

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中学百科全书（物理卷）



## 前 言

物理学是自然科学中一门重要而范围极其广泛的基础学科，主要研究物质运动的最一般规律和物质的基本结构，以及它们的相互作用。

物理学又是一门不断发展的学科。在欧洲古代，物理学一词是自然科学的总称。直到 16 世纪后，物理学才开始发展成为一门范围较为明确的学科，并且在 19 世纪末逐步形成了力学、热学与分子物理学、电磁学、光学等分支，这些分支可统称为宏观物理学。20 世纪以来，物理学的发展进一步深入到微观领域，并建立了原子物理学和量子力学、原子核物理学、固体物理学和凝聚态物理学、粒子物理学、宇宙学等分支。物理学的进展，极大地扩展了人们的眼界，有力地增强了人们认识自然和改造自然的能力。

物理学的生命力还表现在能够不断地从它的比较成熟的分支生长分离出工程技术和应用性学科，例如热机学和热工学、材料力学、电工学和电子技术、原子能技术、真空技术、激光和同步辐射技术以及超导技术等。现代物理学的发展，还有力地促进了化学、生物学、天文学、地学的进一步发展，并形成了众多的边缘学科。物理学的这些应用和发展，不断地促进了生产技术和生产力的发展和变革，从而不断地改善了科学研究和人类生产、工作、生活的条件和环境，不断地改变着人们的生活方式和思维方式，甚至还影响到人类自身的演化过程。

由此可见，物理学在人才培养和学校教育过程中，常常起着打基础和激发创造性智能的重要作用。通过物理学课程的学习，开阔学生的视野，使他们自觉地去接触自然，了解自然，认识自然。通过物理学学习的深入，启发学生从某种复杂的自然现象中抽象出关键和本质的东西，从而促使他们更好地把握其内在规律，培养起提出问题、分析问题和解决问题的能力。

为了适应基础教育的改革、建设与发展的要求和中学图书馆建设的需要，面向世界，面向未来，面向现代化，为提高中学物理教育水平和物理教学质量服务，为提高全民族文化素质和实现社会主义现代化建设服务，我们特编写这部《中学生百科全书·物理卷》。

本卷收入条目约 1500 条，其主要依据是：(1)从中学物理教育的实际出发，收录了大量覆盖中学物理学课程的条目，对中学物理教学的重点和难点补充了不少有关背景材料的条目，着重阐述普通物理学的基本概念、基本定律和基本原理，说明常见的物理现象以及常用的物理知识，以适应中学物理教育水平的不断提高。(2)从中学物理教师业务提高的需要出发，收录了专门介绍物理学科最新进展和最新成就的条目，酌量选取了有关现代物理学和相应学科以及对中学物理新教材的内容作必要延拓和加深的条目，为提高中学物理教师的素质和物理教学质量服务。(3)从中学生的智能培养考虑，收录了不少物理学中富有启迪思维、侧重社会应用的条目，选收了将物理学史渗入物理教学、把思想教育寓于物理教学中的条目，还为中学开展课外科技活动提供最为适用的材料，以期对中学生的思想境界、物理基础和创造能力的提高会有所促进。

目前无论是国外还是国内，已出版了不少于几十种的物理学辞典、百科、手册，本卷力图在下列几方面体现特色：(1)针对性与系统性相结合。本卷是专为中学物理教师、中学管理人员和中学生编写的中学物理教学工

具书，主要针对目前我国中学物理教育的实际情况，其深度和广度，掌握在略高于中学物理教学用书和教学参考书的程度，并对现行使用的和正在编写的中学物理新教材的内容作必要的延拓和加深。但本卷又立足于满足中学物理教育水平不断提高的需要，因此取材比较广泛、知识较为完备、门类也较齐全，能形成一个较为完整的系统。(2)时代性与新颖性相结合。本卷还立足于当代，立足于改革，既要写出时代气息，表现手法也要力求做到构思新、取材新、形式新。全卷的框架、编排，我们也作了反复的推敲：除按国内外较通行的物理学各主要分支学科体系进行排列外，还从客观发展趋势出发，构建和推出新的排列。全卷内容包含12个部分：总论，力学，分子物理，热学，电磁学，光学，近代物理学，环境物理，实验物理，计算机在物理学中的应用，物理学与其它科学技术，物理教学，物理学史和物理学家，以努力适应当前与今后中学物理教学改革的需要。(3)思想性、科学性与实用性相结合。本着为提高中学物理教育水平和物理教学质量服务的宗旨，全卷强调以马克思主义哲学为指导进行编写，在条目的释文方面既要努力体现教育方针的要求，又要力求做到在质量、水平、可读性与实用性上下功夫。释文的内容力求准确、科学，深浅适宜，理论、应用兼顾，并注意体现渗透思想教育的要求。释文的语言力求规范、流畅、生动。本卷卷首附有代表性的物理成果和物理学家的彩色插图。卷末还附有物理学大事年表、诺贝尔物理学奖获得者一览表、经修订的部分物理学名词对照、物理学计量单位等供读者查阅。总之，我们尽力使读者使用起来感到十分便利和颇有收益。

参加本卷编写的有多年在师范大学从事物理教学与科研的正、副教授，也有长期在中学教学第一线，具有丰富物理教学经验的高级教师。我们都是中学时代的过来人，正承担着为基础教育服务的重任，对基础教育有着深厚的体验和感受，对中学教师、中学管理人员和广大中学生不仅寄托着殷切的期望，而且愿把自己的知识和体会都倾注在他们身上，为提高全民族文化素质和实现社会主义现代化建设而积极贡献自己的力量。

在编写过程中，我们曾多次向上海市各区县部分中学物理教师代表征求过意见；并受到著名的老一辈教育家、国家教委和上海教育主管部门有关领导同志的支持和鼓励；也得到出版社领导和编辑同志的指导和帮助；还较多地吸收和参考了国内外物理学辞典、百科、手册的作者们的不少最新的研究成果，在此一并表示感谢。

由于编写时间和编者水平的限制，本卷中难免有不少疏误，敬请广大读者批评指正。中学百科全书物理卷编辑委员会

## 凡 例

1. 全书按学科设卷。一学科为一至二分卷，或两个相近学科合为一分卷。分卷不列卷次。
2. 卷由条目组成，条目采用释文体。卷内各学科及其分支的内容份量和轻重主次，根据学科的主干与分支的发展状况和中学教育与管理的实际需要来安排。条目释文之详略，根据本学科内容的需要在框架结构中的纵横交叉关系来决定。
3. 各卷正文之前设本卷条目的分类目录，供读者了解内容全貌，或查一个分支或一个大的主题的有关条目之用。为了保持学科或分支学科体系的完整并便于检索，有些条目可能在几个分类标题下出现。
4. 多数分卷正文按音序排列，条目出现先后，按条目标题的第一字的汉语拼音字母顺序排列，第一字同音的按四声的顺序排列，第一字同音同调的，则按第二字的音调顺序排列，余类推。有少数分卷因学科的特殊性，排法与此有所不同。
5. 各卷正文之后设本卷拼音索引、笔画索引。笔画索引按条目标题的第一字的画数分别排列，画数相同的字，除一画外均按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、（折，包括 等）的顺序排列。第一字完全相同的，则按第二字的笔画顺序排列。余类推。
6. 正文书眉标明双码页第一个条目标题及单码页的最后一个条目标题的第一字的汉语拼音和汉字。
7. 一部分条目在释文中配有必要的插图。彩色图片按内容分类编排若干页置于正文之前。
8. 具有重要的独立的科学概念，而又在其他条目的释文中解释清楚的，设“参见条”，这种条目不再附释文，只在条题之后用楷体字注明参见的条目标题。
9. 在释文中具有独立的科学概念，释义完整的，而不必另设参见条者，作为“索引条”。索引条仅在分类目录中出现。
10. 本书所用科学技术名词术语符号等，以各学科有关部门审定的为准，未经审定或尚未统一的从习惯。
11. 条目释文中涉及外国人名、地名、机关团体组织名称等的译名时，采取“名从主人，约定俗成”的原则，一般参照有关工具书，采用通行的译法。

## 总 序

一部十五卷本的《中学百科全书》即将和广大读者见面。这是北京师范大学出版社、华东师范大学出版社、东北师范大学出版社历时四年完成的一项大型工程。相信这套大型工具书的出版，对提高中学教育水平、教学质量，促进基础教育的改革和发展，将起到它应有的作用。

发展教育事业是关系到国家富强、人类文明和社会进步的根本大计。在邓小平同志建设有中国特色社会主义的理论指导下，我们伟大的祖国正在加快实现社会主义现代化的步伐。为把我国建成一个富强、民主、文明的社会主义现代化国家，必须首先加强教育。邓小平同志指出：“四个现代化关键是科学技术的现代化”；“科学技术人才的培养，基础在教育”。深刻阐明了发展教育与发展科学技术、振兴经济的关系，肯定了发展教育是发展科学技术、振兴经济的前提和基础。党的十四大再次强调要把教育摆在优先发展的战略地位，制订了到2000年中国教育改革和发展的目标、方针和政策，指出：“科技的进步、经济繁荣和社会发展，从根本上说取决于提高劳动者素质，培养大批人才”，并重申要大力加强基础教育。

在整个教育工作中，基础教育是提高全民族素质的奠基工程。亿万青少年儿童是祖国明天的建设者，到21世纪前半期我国能否建成中等的发达国家取决于他们，国家和民族的未来和我国社会主义的前途决定于他们，而决定他们思想品德、科学文化以及身体等方面素质的，是今天对他们施加的教育。振兴国家，教育是基础，而基础教育则是基础的基础。为发展基础教育作贡献，是我们组织编写这套书的根本出发点。

这套百科全书的编撰原则是，以马克思主义辩证唯物主义和历史唯物主义为指导，坚持内容的思想性、科学性，同时力求使本书具有“门类全”、“内容新”和“实用性强”等特点，以便更好地为广大中学教师、管理干部和有关单位研究人员的实际需要服务，为提高中学教育水平、教学质量和管理水平服务。

包括中学这一层次的基础教育，要全面贯彻“教育必须为社会主义现代化建设服务，必须与生产劳动相结合，培养德智体全面发展的建设者和接班人”的方针，使受教育者在品德、智力和体质等方面得到生动活泼的全面发展。这是中学教育应遵循的一个基本原则，也是编这套书的客观依据。为此本书的总体设计，强调内容的全面性。首先要求：重视马列主义毛泽东思想和建设有中国特色社会主义理论的教育、党的基本路线教育、爱国主义教育、集体主义教育和社会主义教育。同时从教学需要出发，以新中国成立以来特别是改革开放以来教学实践经验和各科教学的基本内容为基础，尽可能地反映中国和世界的优秀文明成果，以及当代科学、技术、文化的最新发展。全书的内容结构，除按传统的文理科知识分卷外，新设了体育与卫生保健、音乐美术、劳动技术和学校管理等专卷，以全面地贯彻执行《中国教育改革和发展纲要》。

世界科学技术在不断发展，人类社会在不断进步。邓小平同志高瞻远瞩地指出：教育必须“面向现代化，面向世界，面向未来”。为此，当务之急，是要逐步实现教育本身的现代化。教育现代化实质上是一场意义深远的教育革命，它首先要求教育思想的现代化，同时还要实现教学内容、教学方法和教学条件的现代化。当然，这里的核心问题是课程、教材的现

代化。随着中学教育改革的深化，广大教师必须进行再学习，努力提高自己的知识水平，具有进行科学研究、使用先进教学设备和组织学生参加社会实践等能力。教育的现代化离不开管理的现代化。因此必须使广大的中学管理干部，面对加快改革开放的新形势，努力更新观念，更新知识结构，提高管理水平，从而把我国中学教育管理工作推上一个新的阶段。本书内容要求着眼于一个“新”字，力求做到观点新、材料新、结构新。在认真总结和继承前人文化科学知识的基础上，充分吸收当代国内外文化科学和管理科学的最新成果。要求既不脱离我国当前的实际，又具有一定的前瞻性或超前性，以适应中学教育改革的发展的需要。

全书以国家教委审定的现行普通中学教学计划、教学大纲和新编教材为依据，对现在中学的课内知识作了必要的拓宽和加深，但都要求从中学教师、中学管理者当前和长远的需要着眼，无论是分卷设立，条目确定；或材料选用，释文撰写；乃至编排方式，检索方法，都突出了它对中学的实用性，力求使这部百科知识总集，成为中学常备多用独具特色的工具书，这是广大的读者和编者的共同要求，也是我们实际编写过程中力求做到的。

当然，就整个基础教育事业来说，编一部中学工具书只是其中很小的一部分，但从组织和编撰这套百科全书的本身来说，却是一项相当宏大、相当复杂的工程。全书 15 卷，涉及 19 个大学科，收条目近 40000 个，共 2500 万字，铢积寸累，绝非轻而易举之事。同时作为一套大部头的百科全书，既要有每卷内部的合理结构，又要有卷与卷间的相互联系和全书的整体性与规范性。全书各卷之间，在内容上力求做到相互照应，以反映各学科之间的广泛联系。各卷内部的框架结构，采取历史与逻辑相统一的原则，力求总体内容能够反映各学科发展的基本进程和基本规律。条目与条目之间，要求反映本学科主干和分支的纵向从属关系与横向并列交叉关系，尽量避免内容重复，其必须重复出现者。根据学科的特点和中学教育的要求，在内容处理上各有不同的侧重面，并注意防止论点相悖。

这套百科全书在上级主管单位关怀指导下，得到了教育界、科技界和文化学术界许多专家、学者的热情支持，特别是得到北京师范大学、华东师范大学、东北师范大学的领导和广大教师的支持与帮助。本书聘请长期从事教学与科研并熟悉中学教育的专家担任分卷主编、副主编；又请几十所高等院校、科研单位的教授、副教授；研究员、副研究员；中学特级教师和高级教师近 800 人为全书撰稿、审阅词条与释文。大家齐心协力，几经寒暑，数易其稿，终于完成了这项艰巨工程。三家出版社担负了繁重的组织工作，并投入大量人力和财力；编辑、校对和出版人员，日夜兼程，埋头苦干，为本书如期出版付出了辛勤劳动。现在，让我们代表全书编审委员会，向关心和支持这项工作的单位与个人；向工作在第一线的所有同志表示亲切慰问和衷心感谢！

四年前，三家出版社约请我们牵头，组编这套大型工具书，我们三人或年事已高，或事务繁重，实难再担此重任，但事关基础教育，对于我们多年从事教育的人来说，却又义不容辞，因此，愿就力所能及为基础教育的建设添砖加瓦。现在这套大书即将面世，虽然经过几年的努力，但学海无涯，书中不足或不妥之处在所难免，望读者不吝赐教，以便再版时改正。

苏步青

刘佛年  
柳 斌

1993年4月

## A

射线 ( $\alpha$ -ray) 放射性原子核所发生的  $\alpha$  粒子流。 $\alpha$  粒子即氦原子核 ${}^4_2\text{He}$ ，由两个中子和两个质子构成，其质量是4.001509原子质量单位，电量是两个正电子电量。

在  $\alpha$  射线中， $\alpha$  粒子的动能可以达到几兆电子伏特。不同的放射性物质放射出的  $\alpha$  粒子流，其速度各不相同。由于  $\alpha$  粒子的质量比电子质量大得多，通过物质时极易使其中的原子电离而损失能量，所以它穿透物质的本领比  $\beta$  射线弱得多，例如用一张纸常常就可以挡住  $\alpha$  射线。

ADC 和 DAC (analog-digital converter and digital-analog converter) 模数转换器和数模转换器。将在时间上和幅值上都连续的模拟信号，转换成在时间上和幅值上离散、且按一定方式编码的一组脉冲或电平信号——数字信号，将这一转换的操作称为模数转换，可写成 A/D，执行这一操作的装置称为模-数转换器，常写成 ADC 或者 A/D 转换器。将数字信号转换成模拟信号的操作称为数模转换，可写成 D/A，执行这一操作的装置称为数-模转换器，常写成 DAC 或者 D/A 转换器。

A/D 和 D/A 在其它方面的应用 (application of A/D and D/A in the other fields) 在通信和信号分析系统中，诸如时间的展阔、超前和滞后；瞬态现象的存贮和记录；信号波形的合成和分析；传递函数的合成和分析；卷积；数字滤波；利用相关技术和快速傅里叶变换从噪声中提取有用信号；加密和解密编码传输等，都需要使用 A/D 和 D/A 转换器。

在图形显示系统，数字通讯系统，医疗设备以及多其他系统或设备中，都使用着各种高精度低速或者低精度高速或者两者兼顾的数-模、模-数转换器。

在物理实验中广泛采用着 3 1/2 位数字电压表和 4 1/2 位数字电压表，以及 8 路 8 位或者 8 路 12 位的通用 ADC 集成电路芯片，它们连接实验仪器与计算机后，就可以研究许多长周期和短瞬间的物理变化的规律，使人们的“反应”速度和“持久”能力有了质的提高。

A/D 和 D/A 在数字控制系统中的应用 (application of A/D and D/A in the digital control system) 数-模与模-数转换技术是由数字测量和数字控制的要求而产生和发展起来的，特别是微型机的迅速普及更加速了这一技术的进展。下图是典型的数字控制系统的框图，控制对象可能是一个物理实验或者生产过程，也可能是一个自动控制装置。反映其运动状态的各项参数（如温度、压力、流量、角度、位移、速度和加速度等）大都是非电模拟量，通过相应的传感器可以变换成电压或电流信号。调节其状态参数的各种执行元件绝大多数也需要电压或电流信号驱动。然而数字计算机只能接受和处理数字信号，其输出结果也是数字信号。这就是说数字计算机和控制对象之间不能直接交换信息。只有使用采样器和 A/D 转换器把模拟传感器输出的电压或电流信号转换成适合计算机需要的数字信号，并通过 D/A 转换器和保持器把计算机输出的数字信号转换成时间上连续的电压或电流信号才能实现计算机对控制对象的闭环控制。显然，是 ADC 和 DAC 搭起了两者之间的语言桥梁。没有转换器，数字计算机只能是一个计算工具，而不能执行控制功能，因而也就不能构



成多种闭环数字控制系统。

未做图

#### 数字控制系统框图

许多系统并不需要如图所示的所有环节，如果系统只包含传感器、采样器、A/D 转换器和计算机，它就是一个典型的数据采集系统。若系统中没有传感器、采样器和 A/D 转换器，它就是程序控制系统，大多数数控机床都属这类系统。

未做图

#### 数字遥测系统方框图

A/D 和 D/A 在数字遥测系统中的应用(application of A/D and D/A in the digital remotecontrol system) 上图是一个典型数字遥测系统。在定时器的控制下，信号发送端的多路切换器和接收端的多路分配器同步切换，A/D 转换器把被测对象的各个模拟参数分别转换成数字信号，并经发射机发射出去，接收端的 D/A 转换器把接收的数字信号转换成与原始模拟信号等效的电压或电流，并馈送到指定通道去驱动相应的模拟元件。遥测、遥控技术在航天、气象、军事、通信和工业部门中占有十分重要的地位。

A/D 与 D/A 在测量和测试设备中的应用(application of A/D and D/A in the measureequipments) 当今广泛使用的各种数字电压表和其他数字测量仪器，其核心环节是 A/D 转换器。随着单片机的出现和发展，出现了许多自动测试系统。这些系统可以对大规模集成电路、高度复杂的系统或设备的各种参数进行自动测试，并能对测量数据进行处理、存贮、读出和打印。使用这种系统可在时间、成本和可靠性等方面，远远胜过人工测试。在自动测试系统中包含着大量的 D/A 和 A/D 转换器。D/A 转换器被用来制造程控电源、脉冲发生器、扫描发生器和波形发生器等，它还被用作校正失调或增益误差的“电位器”、电桥平衡电源以及作为 A/D 转换器、采样/保持器和峰值跟随器的部件。而 A/D 转换器则被用来完成模拟量-数字的变换。

APPLE 计算机系统(APPLE computer system) 以它的结构简单、新颖，配有标准接口可以连接各种外部设备，特别是具有较强的图形处理功能及较完整的软件配备而流行全世界。

APPLE 微型计算机整体设计合理，灵活，扩展性好。主机板上以 6502 微处理器为 CPU，基本指令 56 条，有 13 种寻址方式，因此实际操作有 151 种。系统时钟频率为 1 兆赫，指令时间为 2~7 微秒，定点加法速度可达 50 万次。RAM 最大可达 48K 字节，ROM 最大可达 12K 字节，还可扩充 128K 字节 RAM。主机板上带有彩色图像信号发生器，可直接连结彩色监视器和单色监视器，显示方式灵活多样。主机板带有键盘、盒式磁带机接口、送话器和游戏机插座等。系统中各部件通过 APPLE 总线进行连结与通讯。此外在主机板上还有 8 个外围 I/O 插座，用于扩充内存板和增加其他语言固件板，连接调制器和家用电视机，以及其他的发展和扩充。

APPLE 机的外围配置齐全，现在已开发功能插件 120 多种，外设 30 多种。功能插件主要包括模拟量的输入输出，各种输入输出接口，内存扩充，实时时钟 Z80、MC6809、MC68000 微处理器和 BASIC、FORTRAN、COBOL-80 等语言固定板。它带有 RS-232C 和 IEEE-488 接口，并有行式打印机、绘图

仪、图形输入板以及两个 5 1/4 英寸软磁盘驱动器，每个容量为 143K 字节。APPLE 机还可以配置 8 英寸软盘驱动器，6~20 兆温氏硬磁盘，光笔，时间记录仪，实时音频频谱分析仪等外设。

APPLE 机系统软件丰富，兼容性好。它配有 DOS3.3 磁盘操作系统，CP/M2.2 操作系统。它的系统监控程序和整数 BASIC 常驻 ROM。它支持汇编、PASCAL、COBOL、FORTRAN 以及 LISP、FORTH 等语言。

APPLE 微型机开发了丰富的应用软件，配备了汉字卡。由于它的功能齐全，结构灵活，扩展方便和价格便宜，因此它的应用之广远远超过了其它 8 位微机。主要应用于商业管理、企业管理、科学计算、数据处理、辅助教学、工程学、家庭医药、实验室、游戏和过程控制等领域。

APPLE 微机可以与 Omninet 局部网络和 Nestar Cluster/One“model A”局部网络联网，开拓了新的使用途径。

APPLE 总线 (APPLE-bus) 以 6502 微处理器为核心的系统所开发和应用的。该总线比较简单、灵巧，共有 50 条引线，其中 48 条引线已经定义，8 条双向数据总线，16 条地址总线，4 条电源线，1 条信号和电源公共地线，2 条中断请求线和 2 条用于实现中断优先级链状电路的中断入和中断出引线，1 条 DMA 线和 2 条用于实现 DMA 优先级的链状电路的 DMA 入和 DMA 出引线，3 条时钟线以及读/写线，准备就绪线，I/O 选通线，设备选择线，输入/输出选择线，禁止线，复位线以及 1 号用户线等各 1 条。

APPLE 微型计算机系统的各部件通过 APPLE 总线进行连接和通讯。APPLE 公司提供了各种各样的扩充插件板插在计算机母板的八个插座上，以扩充存储器或外部设备及联网。

阿尔哈曾 (Alhazen 965~1039) 阿拉伯物理学家、数学家。生于巴士拉。长期在埃及开罗生活和工作。当时眼病流行，医师们用手术治疗眼病，他就根据医师的经验和通过自己的实验，仔细研究了人眼结构和人的视觉。

阿尔哈曾的重要贡献是在光学方面。他用实验证明，古希腊学者 (柏拉图、欧几里得) 的视觉论 (即光是从眼睛发出的理论) 是没有根据的。提出自己的视觉理论，认为“自然光和彩色光线作用在眼睛上”、“借助于可见物体发出的、进入眼睛的光线而形成视觉形象”。还认为被观察物体上的每一点对应于眼睛的某一感觉点，给出了双眼视觉的正确说明。明确了光的反射定律，指出入射光线与反射光在同一平面内，并详细讨论了光经过曲面镜的反射而成像，改进了古希腊人对光经过球面镜、圆锥面镜和柱面镜成像位置的认识。分析了光通过不同媒质界面的折射，设计出测定入射光线与折射光线的方法，阐明玻璃球有放大图像的作用并提出光以有限速度传播的看法。汇集上述研究成果的著作《光学宝鉴》曾由意大利光学家维泰洛译成拉丁文于 1270 年发表，其后以手抄本的形式传播，1572 年里斯内在瑞士巴塞尔出版了更完整的版本。

阿伏伽德罗 (Amedeo Avogadro 1776~1856) 意大利物理学家、化学家。生于都灵。曾受法学教育，1796 年获法学博士后，当过几年律师。1800 年起开始自学数学和物理学。1803 年发表第一篇科学论文。1806 年起在都灵科学院附属学院任演示员。1809 年任韦尔切利学院教授。1819 年当选为都灵科学院院士。1820~1822 年和 1834~1850 年，任都灵大学物理学教授。

主要研究分子物理学和原子论。从盖-吕萨克定律得到启发，于 1811 年在题为《论物体分子的相对质量和它们组成化合物的比例的测定方法》的论文中，提出分子假说，奠定了分子学说的基础。与此同时，提出一个对近代科学有深远影响的假说：在相同的温度和相同的压力条件下，相同体积中的任何气体总具有相同数目的分子。这个假说被称为阿伏伽德罗定律。根据这个定律，他详细研究了测定分子量和原子量的方法，对当时物理学和化学的发展，起了重大的推动作用。著有《有重量的物体的物理学》（共 4 卷，1837 ~ 1841）。

阿伏伽德罗定律 (Avogadro law) 参见理想气体。

阿基米德 (Archimedes 公元前 287 ~ 前 212)

古希腊物理学家、数学家、发明家。生于西西里岛的叙拉古（今意大利锡拉库萨）。11 岁起被送到埃及的亚历山大里亚学习和工作，曾是欧几里得的学生。公元前 240 年回到叙拉古，当了国王亥洛厄的顾问。

阿基米德在科学的许多方面都有卓越的贡献。在力学方面的成就尤为突出，是公认的古代最伟大的力学家。他是静力学的奠基人，在其著作《论平面图形的平衡》中，引入重心和相对于直线和平面的力矩的概念，确定各种平面图形的重心，并对杠杆平衡条件作了严格的数学证明。得出重物的重量和它们离支点的距离成反比的杠杆定律。运用这一定律，阿基米德设计过杠杆滑轮系统，创造了用小力把大船推到水里等奇迹。他还奠定了流体静力学的基础，在其著作《论浮体》中，详细阐述了关于浮体问题的重大发现。得出著名的阿基米德原理：放在液体中的物体受到向上的浮力，其大小等于物体所排开的液体重量。借助这一原理，阿基米德解决了亥洛厄王关于鉴定纯金王冠是否掺假的问题。

和他的前辈及同时代的一些学者相比，阿基米德的学术活动有一个显著的特点，就是他既极为重视科学的严密性、准确性，要求对每一个问题都进行精确的、合乎逻辑的证明；又非常注意科学知识的实际应用，曾创造了许多仪器和机械，特别是在工程和军事上的发明甚多，开创理论研究和实际应用密切结合的学风。因此，他被誉为“有巨大的独创和真正的发现的重视实验的发明家”，是当之无愧的。

阿基米德定律 (Archimedes law) 参见浮力。

阿基米德原理 (Archimedes Principle) 由阿基米德发现的关于浮力的基本原理。该原理表述为：放在液体中的物体受到向上的浮力，其大小等于物体所排开的液体重量。传说当时的亥厄洛王召见阿基米德，让他鉴定纯金王冠是否掺假。他冥思苦想多日，在跨进澡盆洗澡时，看见水面上升而得到启示，从而作出了浮力原理的重大发现，即通过王冠排出的水量解决了国王的疑问。在他的《论浮体》一书中，详细阐述了这一原理的发现和内容，从此使人们对物体的沉浮有了科学的认识。

阿特武德机 (Atwood machine) 早期测量重力加速度的器械。由英国数学家和物理学家阿特武德于 1784 年制成。他将质量同为  $M$  的重物用绳连接后，放在光滑的轻质滑车上，再在一个重物上附加一质量  $m$  ( $m \ll M$ ) 的重物。这时，由于小重物的重量而使体系作初速度为零的缓慢加速运动，所产生的微小加速度可表示为

$$\alpha = \frac{m}{2M + m} g,$$

从实验测得  $g$  后，即可算出重力加速度  $g$ 。

未做图

阿特武德机

**爱因斯坦** (Albert Einstein 1879 ~ 1955) 20 世纪最伟大的自然科学家，物理学革命的旗手，自哥白尼、伽利略、牛顿以来在物理科学领域中最杰出、最有影响的革新家。

**生平** 1879 年 3 月 14 日生于德国乌耳姆一个经营电器作坊的小业主家庭。一年后，随全家迁居慕尼黑。13 岁那年，一部唯物主义无神论著作《力和物质》对他的世界观产生极大影响，使他中止了宗教信仰，形成了强烈的热爱科学的理想。1894 年，全家又迁居意大利米兰，他因不满“那种依赖训练、外界权威和追求名利的教育”，离开慕尼黑中学，于次年春天也来到米兰。同年转学到瑞士阿劳市的州立中学。在此期间，他琢磨了下列理想实验：假若一个人以光速跟着光波跑，将会发生什么样的事情？在阿劳求学时，他还下定决心，不做工程师，要当物理教员，于是在 1896 年入苏黎世联邦工业大学师范系学习物理学。大学期间，以极大兴趣去听物理学的课程，常常去物理实验室工作，并以极大的热忱在家里向理论物理学的大师们学习。目标专一、独立自主、勤奋自学，成为他的学习特点。他在自学中视野宽广，认为不应该把学习局限在一个狭窄的专门方面，要基础雄厚，才可能有高深的建树。爱好沉思则是他的突出性格。1900 年大学毕业，两年后才找到固定职业。1902 年来到瑞士伯尔尼专利局工作。在这里他不用为生活操心；从事发明专利申请的技术鉴定工作，又迫使他进行多方面的思考；再则他又充分抓紧时间，埋头于科学研究。因此这几年是他最愉快的年代，也是他最富有创造性活动的年代。1905 年在物理学三个不同领域中取得了历史性成就，特别是狭义相对论的建立和光量子论的提出，推动了物理学理论的革命。同年获苏黎世大学的博士学位。1909 年离开专利局，任苏黎世大学理论物理学副教授。1912 年任母校苏黎世联邦工业大学教授。1915 年建立了广义相对论。他所作的光线经过太阳引力场要弯曲的预言于 1919 年被证实，引起世界范围的轰动，爱因斯坦和相对论在西方成了家喻户晓的名词。爱因斯坦并不把自己的注意力囿于自然科学领域，而是以极大的热忱关心社会、关心政治。他说：“人只有献身于社会，才能找出那实际上是短暂而又风险的生命的意义。”他秉性正直，具有强烈的社会责任感；一生酷爱和平、民主和自由，与法西斯主义作了毫不妥协的斗争；积极参加争取和平民主的进步运动，成为全世界科学家的楷模。

**科学贡献** 综观爱因斯坦的一生，他在狭义相对论、广义相对论、光量子论、分子运动论、宇宙学和统一场论等现代物理学的 6 个领域都作出了巨大的贡献。

**狭义相对论** 1905 年 6 月，爱因斯坦写了著名的《论动体的电动力学》的论文，完整地提出了狭义相对性理论。这是他 10 年酝酿和探索的结果。狭义相对论的创立，是物理学理论的一场革命，它变革了传统的空间、时间、质量、动量、能量等基本概念，不仅揭示了作为物质存在形式的空间和时间的统一性，而且揭示了各种物理运动形式的统一性：力学运动和电磁运动的统一性，以及两种运动量度（能量和动量）的统一性。

**广义相对论** 在多数物理学家还不理解狭义相对论的时候，爱因斯坦

却继续努力把他的理论向前推进。1907年提出了均匀引力场与均匀加速度的等效原理。以后经过8年艰苦的探索，中间得到了他的老同学格罗斯曼的帮助，应用了黎曼在半个多世纪前建立的曲面几何，终于在1915年11月建立了广义相对论。广义相对论进一步揭示了作为空间和时间统一体的四维时空同物质的统一关系，揭示了空间和时间不可能离开物质而独立存在，空间的结构和性质取决于物质的分布，物质之间的引力不过是空间曲率的一种表现。

**光量子论** 早在1905年3月，就写了《关于光的产生和转化的一个启发性的观点》的论文，提出光量子假说，把普朗克的量子概念扩充到辐射在空间的传播上去。爱因斯坦的光量子论揭示了光的量子本性，光不仅仅被看成是一种波动，它同时也是一种粒子，是粒子和波的综合。揭示了对于统计的平均现象，光表现为波动；对于瞬时的涨落现象，光表现为粒子，从而揭示了微观粒子的波粒二象性。光量子论的提出，也遭到几乎所有老一辈物理学家的反对，迟至1913年普朗克还认为这是爱因斯坦的一个失误。尽管如此，爱因斯坦还是孤军奋战，坚持贯彻量子论思想。1906年发表论文《普朗克的辐射理论和比热理论》，把量子概念扩充到物体内部的振动上去，成功地说明了低温时固体的比热同温度的关系。1916年发表论文《关于辐射的量子理论》，是量子论发展第一阶段的理论总结，它从玻尔的原子的构造假说出发，用统计力学的方法导出普朗克的辐射公式，提出受激辐射理论。这不仅对20年代量子力学的创立有重要作用，也为60年代蓬勃发展起来的激光技术准备了理论基础。1924年德布罗意的物质波假说刚提出，就首先得到爱因斯坦的热情支持，而且爱因斯坦立即用来研究单原子理想气体，同印度青年物理学家玻色合作，提出玻色—爱因斯坦统计法。由于受了爱因斯坦这项工作的启发，薛定谔才试图去发展德布罗意理论，终于在1926年建立了波动力学。

**分子运动论** 1905年的4月和5月，爱因斯坦发表了两篇关于分子运动论的论文，试图通过对悬浮粒子运动（即1827年发现的布朗运动）的观测来测定分子的实际大小。4月写的一篇是他向苏黎世大学申请博士学位的论文。他从事这项研究，是为了解决半个多世纪来科学界和哲学界长期争论不休的原子和分子是否存在的问题。3年后，法国物理学家佩兰以精密的实验证实了爱因斯坦的理论预测，这就以无可辩驳的事实证明了原子和分子的存在。

**现代宇宙学** 爱因斯坦在建立广义相对论后，就开始有关宇宙学问题的探索。1917年，发表题为《根据广义相对论对于宇宙学所作的考查》的论文，提出宇宙空间是有限无界的假说，这是现代宇宙学的开创性文献。后来，由于荷兰天文学家德西特和苏联大气物理学家弗里德曼的工作，发现宇宙空间可能是在不断膨胀着，预见到各个星系之间存在着相互分离（远退）的运动。这一预见为美国天文学家哈勃于1929年发现河外星系谱线的红移而得到了有力的支持。

**统一场论的研究** 从20年代开始直至晚年，爱因斯坦把主要的科学创造精力用于统一场论的研究。企图建立一种包括引力场和电磁场的统一理论，用广义相对论的推广形式来概括所有各种物理运动形式，用场的概念来解释物质结构和量子现象。他认为这是相对论发展的第三阶段。虽然这一研究探索当时未取得具有物理意义的结果，但近年来正以新的形式显示

它有着不可估量的生命力。正如爱因斯坦自己在晚年时所说：“我完成不了这项工作了；它将被遗忘，但是将来会被重新发现。”事实正是如此，1967年，巴基斯坦物理学家萨拉姆和美国物理学家温伯格各自独立地提出了电弱统一理论。电弱统一理论的成功又进一步促进了强、弱和电磁三种相互作用统一的所谓大统一理论的研究，以及包括引力在内的四种相互作用统一的所谓超统一理论的研究。

**爱因斯坦辐射理论 (Einstein's radiation theory)** 1916年爱因斯坦在一篇关于辐射定律的论文中，首先提出了受激发射的概念。并认为在辐射场达到稳定时，粒子系统吸收的光子数应等于发射的光子数。假定粒子系统的高、低能级能量分别为  $E_2$  和  $E_1$ ，吸收或发射的光子的能量为  $h\nu = E_2 - E_1$ 。如果处于高、低能级上的粒子数密度分别为  $N_2$  和  $N_1$ ，外界光场的单色辐射能量密度为  $\rho_\nu$ ，则单位体积中在时间间隔  $dt$  内从能级  $E_1$  吸收光子而跃迁到能级  $E_2$  的粒子数为  $dN_{12} = B_{12} \rho_\nu N_1 dt$ ，其中比例系数  $B_{12}$  称为吸收系数， $W_{12} = B_{12} \rho_\nu$  称为吸收概率。粒子系统吸收的光子数也等于  $B_{12} \rho_\nu N_1 dt$ 。类似地，单位体积粒子系统因受激跃迁在时间间隔  $dt$  内发射的光子数可表示为  $B_{21} \rho_\nu N_2 dt$ ，其中  $B_{21}$  称为受激辐射系数， $W_{21} = B_{21} \rho_\nu$  为受激辐射概率。单位体积粒子系统因自发跃迁在时间间隔  $dt$  内发射的光子数可表示为  $A_{21} N_2 dt$ ，其中  $A_{21}$  称为自发辐射系数。辐射场稳定时，每一种频率的光子数应保持不变，这要求如下关系成立：

$$(A_{21} + B_{21} \rho_\nu) N_2 = B_{12} \rho_\nu N_1$$

假定粒子系统处于热平衡状态， $E_2$  和  $E_1$  上的粒子数满足玻耳兹曼分布：

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-(E_2 - E_1)/kT} = \frac{g_2}{g_1} e^{-h\nu/kT}$$

其中  $g_1$  和  $g_2$  为能级  $E_1$  和  $E_2$  的统计权重， $k$  为玻耳兹曼常数。根据普朗克关于黑体辐射的公式

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

利用上述各式可得到：

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

$$\frac{B_{12} g_1}{B_{21} g_2} = 1$$

由此可确定  $A_{21}$ 、 $B_{21}$  和  $B_{12}$  的值。

**爱因斯坦固体模型 (Einstein solid model)** 爱因斯坦发展了普朗克的量子假设，于1907年首次提出了计算固体热容量的模型，这个模型成功地解释了固体热容量随温度下降的实验事实。

上一世纪根据经典的能量均分定理得到的结论是，固体热容量不随温度改变，且符合杜隆—珀替定律 ( $C_V = 3Nk$ )。然而在低温下由实验测到的固体热容量却随温度降低而减小。为了解决这一矛盾，爱因斯坦提出了一个固体模型：假设固体晶格中原子的微振动通过引入简正坐标以后可看成一系列互相独立的简谐振子的振动，而且所有简谐振子的频率  $\nu_j$  都相

同。每一个振子可以沿三个方向振动，整个固体晶格中  $N$  个原子共产生  $3N$  个频率为  $\nu_D$  的振动。每一个振子的能级按照量子理论为

$$\epsilon_n = \left( n + \frac{1}{2} \right) h\nu_D$$

根据这个模型可得出整个固体热容量为

$$C_v = 3Nk \frac{\left( \frac{h\nu_D}{kT} \right)^2 \exp\left( \frac{h\nu_D}{kT} \right)}{\left( \exp\left( \frac{h\nu_D}{kT} \right) - 1 \right)^2}$$

设  $\theta_E = \frac{h\nu_D}{k}$  为爱因斯坦特征温度，热容量于是可表示

$$C_v = 3Nk \left( \frac{\theta_E}{T} \right)^2 \frac{\exp(\theta_E/T)}{(\exp(\theta_E/T) - 1)^2}$$

上式表明热容量与振动频率  $\nu_D$  有关。在高温极限下， $T \gg \theta_E$ ，有  $C_v \approx 3Nk$ ，与经典能量均分定理结果相符。它的物理解释是，当  $T \gg \theta_E$ ，即  $kT \gg h\nu_D$  时，能级间距远小于  $kT$ ，能量量子化效应可忽略。因而可采用经典近似。在低温极限下， $T \ll \theta_E$ ，有  $C_v \approx 3Nk \left( \frac{\theta_E}{T} \right)^2 \exp(-\theta_E/T)$ ，热容量  $C_v$  随温度降低而下降。它的物理解释是，当  $T \ll \theta_E$ ，即  $kT \ll h\nu_D$  时，能级间距远大于  $kT$ 。由此产生的能量量子化使振子必须获得能量  $h\nu_D$  才能发生能级之间的跃迁。但是在低温下，振子依靠热运动能量跃迁到高激发态的概率很小，平均而言，几乎全部振子都“冻结”在基态，因而对热容量没有贡献。

爱因斯坦固体模型表明，只有量子理论才能较好地提供对固体热容量的描述，但是这个模型的理论结果在低温下随温度降低得很快，与实验事实不符。这是因为爱因斯坦对振子频率作了过分简化的假设。后来德拜修改了这个模型，进一步发展了固体量子理论。

**安培** (André Marie Ampère 1775 ~ 1836) 法国物理学家。生于里昂。少年时期主要跟随父亲学习技艺。他的父亲信奉卢梭的教育思想，供给他大量图书，令其走自学成才的道路。于是他博览群书，吸取营养，燃起了对科学的热情，12岁时已掌握了相当多的数学知识。1799年开始系统研究数学，并在里昂的布尔学院任教。1809年任巴黎工艺学校教授。1814年被选为帝国学院数学部成员。1824年起任法兰西学院教授。1827年被选为英国皇家学会会员。他还是柏林科学院和斯德哥尔摩科学院院士。

主要贡献在电磁学方面。1820年，当奥斯特作出电流磁效应的实验后，他便在当年9月至12月间一连发表了四篇高水平的论文：9月18日，表述了确定电流的磁场对磁针的作用方向的定则，被称为安培定则；9月25日，发现了两条平行载流导线之间也有相互作用力，当电流方向相同时相互吸引，当电流方向相反时相互排斥；10月9日，主要用各种形状的曲线载流导线，研究了它们的相互作用；12月4日，阐明了两电流之间的作用力与距离平方成反比的定律，即著名的安培定律，也是电磁学的一个基本定律。1921年，提出分子电流假说，即一切磁相互作用都可归结为隐藏在物体内部的所谓分子电流的相互作用，每一个分子电流相当于一个平面

磁体——一个小薄磁片；电流从分子的一端流出，通过分子周围空间由另一端注入；非磁化的分子的电流呈均匀对称分布，对外不显示磁性；当受外界磁体或电流影响时，对称性受到破坏，显示出宏观磁性，这时分子就被磁化了。从而最先指出了电过程和磁过程之间的紧密的“起源”联系，结束了磁是一种特殊物质的观点，使电磁学开始走上全面发展的道路。1822年，发现载电流螺线管的磁效应，得出如下结论：通电流的螺线管相当于一个永磁铁。提出在螺线管内部放置软铁制成的铁芯来加强磁场。试图建立一个全面的电动力学的理论，发表了《电动力学的观察汇编》。1827年，发表了《电动力学现象的数学理论》，这是电磁学发展史上一部重要的经典论著。在电磁理论基础上曾提出过电报的设想，建议用26根导线对应26个字母，用以传递信息，为电报的发展作出一定的贡献。

安培定律（Ampere law）亦称“安培环路定律”。描述稳恒磁场性质的定理之一。稳恒磁场中，磁场强度沿任意闭合回路的环流等于该回路所包围的、传导电流的代数和，即

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I$$

式中电流的正负规定为：电流方向与回路线积分的环流方向呈右手螺旋关系时，电流强度取为正值，反之取为负值。H是线元dl所在处的磁场强度，既包含回路内电流的贡献，也包含回路外电流的贡献。

安培定律是毕奥-萨伐尔定律和磁场叠加原理的必然结果，它表明稳恒磁场是有旋场。使用安培定律，可以方便地计算某些对称分布的载流体系的磁场，如“无限长”直载流导线，“无限长”均匀载流圆柱面、圆柱壳、圆柱体，以及罗兰环等。

安培定则（Ampere rule）表示电流和由它引起的磁场之间方向关系的定则。由法国物理学家安培总结得出，故名。是右手螺旋定则在电流产生磁场方面的特例。

例如：直线电流磁场。设想用右手握住载流导线，伸直拇指。若拇指指向电流方向，那么弯曲的四指即表示磁场的环绕方向（图1）；螺线管电流磁场。设想用右手握住螺线管，使弯曲的四指表示电流的环绕方向，则伸直的拇指所指方向即为螺线管内部磁场的方向（图2）；圆线圈电流磁场。设想用右手弯曲的四指表示圆线圈中电流的环绕方向，则伸直的拇指所指的方向即为轴线上磁场的方向（图3）。

安培计（ammeter）是测量电流的电表。在中学里都使用指针式安培计。安培计有两个重要参数：量程电流和安培计的内阻，通常分别用 $I_g$ 和 $R_g$ 表示。 $I_g$ 与电表的构造有关，特别磁短路的调节，可使 $I_g$ 有10%~15%的变化； $R_g$ 为电表动圈的阻值，通常是定值，能用表外增加电阻的方法，使电表内阻增加，但不能使内阻减小，除非电表的量程电流变大，即灵敏度降低。安培计有“+”、“-”两个接线端钮的则是直流安培计，在量测电流时，要注意“+”是流进端，“-”是流出端，即串接在测量电路里。

图1 长直载流导线的磁场

图2 载流螺线管的磁场

图3 圆电流轴线上的磁场

安培计通常是电流计扩大量程后成为各种量程的电流测量仪器。扩大电流量程有如下两种方法。一种是单电阻并联法（如图1），另一种是多



电阻串并联法（如图 2）。图中  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$  为三种量程的安培计，更多量程的设计可仿此法，不难画出来。

### 图 1 单电阻并联法

根据简单计算，单电阻并联法得到的安培计量程电流为：

$$I_m = I_g(1 + R_g/R_{sm}) ;$$

其等效内电阻为：

$$R_{i,m} = R_g \quad R_{sm} = \frac{R_g R_{sm}}{R_g + R_{sm}}。$$

根据简单计算，多电阻串并联法得到的安培计量程电流和等效电阻分别为：

### 图 2 多电阻串并联法

$$I_1 = I_g \left( \frac{R_a + R_0 + R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \right) ,$$

$$R_{i1} = R_1 (R_2 + R_3 + R_0 + R_g) ;$$

$$I_2 = I_g \left( \frac{R_a + R_0 + R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2} \right) ;$$

$$R_{i2} = (R_1 + R_2) (R_3 + R_0 + R_g) ;$$

$$I_3 = I_g \left( \frac{R_a + R_0 + R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \right) ;$$

$$R_{i3} = (R_1 + R_2 + R_3) (R_0 + R_g)。$$

$R_0$  为补偿电阻，使  $R_g + R_0$  为某一合适值。

**安培力 (Ampereforce)** 载流导体在磁场中所受到的作用力。由法国物理学家安培首先通过实验总结得出其规律，故名。电流磁效应的发现促使安培致力于电磁力的研究。1821 ~ 1825 年间，他设计了一系列精巧的实验，研究电流间的相互作用。他发现载流直导线在匀强磁场中受到的作用力的大小为

$$F = ILB \sin \theta ,$$

式中  $L$  为直导线长度， $I$  为电流强度， $B$  为磁感应强度， $\theta$  为电流方向与磁感应强度  $B$  方向间的夹角。力的方向由左手定则（电动机定则）确定。经进一步分析可得出基本的表示电流元受力的公式（安培力公式）：

$$dF = I dl \times B。$$

这样，任意形状的载流导体在稳恒磁场中受到的作用力，原则上都可以通过上式利用积分计算求得，即

$$F = \int I dl \times B ,$$

或

$$F = \int_V (j \times B) dV ,$$

式中  $j$  是电流密度， $dV$  是载流体系的体积元。

安培力实质上是运动电荷在磁场中受到的力。当电流流经导体时，作漂移运动的自由电子受到洛伦兹力作用，获得与电流方向垂直的横向动量。在电子与固体晶格的频繁碰撞中，这种动量不断传递给晶格，宏观上即表现为载流导体受到侧向力的作用，这就是安培力。

安培力作用是各种电动机的基本工作原理。输给电动机电枢线圈的电流，在永磁体或电磁铁的磁场中受到安培力作用，形成使线圈转动的力矩。转动的电枢线圈带动各种工作机械，从而实现电能向机械能的转化。各种磁电式电表也是根据安培力原理制成的装置。此外，在由于电磁感应使金属体内出现涡电流的情况下，涡电流在磁场中同样要受到安培力作用。由此又形成了电磁驱动和电磁阻尼等多种应用。

**安全电压 (safety voltage)** 36 伏及其以下的电压。一般情况下，这种低电压不会对人体造成触电伤害，故名。我国采用的安全电压标准有 36V 和 12V 两种。在潮湿环境下作业，存在易燃、易爆气体等特别危险区域的局部照明，携带式电动工具等，如无特殊安全装置和安全措施，均应采用 36V 安全电压。在金属容器、隧道、矿井内使用的手提电动工具或照明灯等，常采用 12V 安全电压。

**安全用电 (safety in using electricity)** 正确利用电能，防止电气事故，降低其危害，保障人身和设备安全的各种原理、方法、制度等的总称。发生电气事故，不仅会损坏设备，而且容易引起火灾；发生人身触电事故，轻则引起肌体和心理伤害，重则立即导致死亡。故安全用电一直是安全生产的重要方面，而且随着家用电器的普及，其重要性更为突出。

**电流对人体的危害** 电流对人体的危害与电流流经的途径、电流的强弱和频率以及持续时间的长短等因素有关。实验表明，25 ~ 300Hz 的交流电对人体伤害最甚。在这种频率下，成年男子和女子开始引起触电感觉的电流分别约为 1.1mA 和 0.7mA。触电后能自主摆脱电源的最大电流值分别约为 10mA 和 6mA。电流超过 30mA，便会引起人体心脏跳动不规则，继而引起心室颤动，伴有强烈痉挛或昏迷。超过 100mA 的电流将使心脏立即停止跳动而导致死亡。人体电阻的大小决定于皮肤干湿情况、触电面积的大小以及触电方式和持续时间等因素，其值可在数百至数十万欧姆间变化。使用或修理带电电器时，双手要保持干燥，也不要赤脚站立在地面上，以便使人体有较大的电阻，万一发生触电时可减小通过人体的电流。在特别潮湿等环境下的作业和某些携带式电动工具中，规定使用安全电压，以便保证即使触电也不会产生引起伤害的电流流过人体。

**触电方式** 在普遍采用的三相四线制低压供电方式中，触电方式分两相触电和单相触电。前者是人体同时触及三相电源中的两根端线时引起的触电。此时线电压直接作用于人体，是极为危险的情形。后者是人体触及一根端线时的情况。若电源中性点接地，则在触电点与地面间存在相电压，此时的危险程度决定于触电点与足底地面间的人体电阻。若足底与地面导通，情况就很危险。若中性点不接地，危险程度决定于触电端线与大地间的电阻、大地与中性点之间的分布电容容抗以及触电点与地面间的人体电阻等因素。触电的另一种方式是在高压区域内，这时人体可能会被电弧或电流灼伤，甚至导致死亡。

**接地与接零** 将电器设备的某一部分通过导线与埋入地下的接地体相连接称为接地。与三相四线制电网中性线相连接称为接零。由于绝缘损坏、焊接脱落等原因，可能使本来不应带电的机壳、机座等与端线连通而带电，人体触及这些部分就会触电。预防这种触电的接地和接零称保护接地和保护接零。对于中性点不接地的电网（民用电大多如此），电器设备的金属外壳、框架等应保护接地，接地电阻值按国家规定应小于 4 ~ 10  $\Omega$ 。

在某些采取中性点接地的供电网络中，则不能采取保护接地，而须采取保护接零。

**高压防护** 使用 10kV 以上的电气设备时，无防护措施的人员不宜靠近，以防止人体与高压带电体间的空气击穿放电，灼伤人员甚至导致触电死亡。发生高压线断落地面时，人员不能靠近；万一处于落地点附近，只能缓慢连续移动双足离开危险区域，不能大步跑开，以防跨步电压造成触电。大电流供电系统万一发生紧急情况，不能靠近开关直接用手拉闸切断电源，以防强大的感应高压击穿空气，灼伤人体甚至电击死亡。

**静电防护** 静电主要由摩擦或感应而生成，其危害主要在于能引起可燃气体、液体或粉尘等爆炸起火，或使人体遭受电击等。随着电子工业，特别是微电技术的发展，静电使元器件损伤甚至毁坏，引起计算机和元器件的误动作等，也日益突出，已引起广泛重视。可采取接地、中和、泄漏等方式消除有害静电，如架空管道、机轴、辗磨设备等均须接地，运油车等则采用悬链接地，某些车间用喷雾增湿以有利静电释放等。在微电技术中，则通过穿戴防静电衣、帽、手套、鞋袜，喷涂特制油漆，建立防静电系统等，以对付静电危害。

**事故急救** 发生电气事故或火灾时，切不可在未切断电源的情况下喷水救火，否则将导致更严重的后果。发生人员触电事故时，如不能立即切断电源，应使用干燥木杆、竹竿等将电线或带电体挑离或击离人体，切不可靠近触电者或用手拉触电者，以防止连带触电。触电者被救离后，如出现休克、昏迷等情况，应即施行人工呼吸或胸外心脏挤压等紧急救护，并迅速找医生或送医院救治。

**安全用电规章制度** 电气事故和触电事故的发生大多是由于缺乏安全用电知识或疏忽大意而发生的。必须加强安全用电知识的学习和宣传教育。同时，国家和各行业、单位应根据实际情况，制定安全用电行政法令、法规和制度。对输电线路的设置、维护、检修，电气设备的安全规定、安全指标及其安装、验收、维修和操作等，都有通用的规定。行业 and 单位还应根据行业特点作某些特殊的操作性规定。操作、检修和管理人员必须学习、掌握这些规章制度，并通过必要考核，才能上岗工作。

**昂内斯 (Heike Kamerlingh Onnes 1853 ~ 1926)** 荷兰物理学家。生于格罗宁根。就学于格罗宁根大学。1879 年获博士学位。1882 年任莱顿大学实验物理学教授，在这里创建了莱顿实验室，是世界著名的低温研究中心之一。1916 年被选为英国皇家学会会员，1920 年被选为法国科学院院士。

昂内斯是超导现象的发现者，获 1913 年诺贝尔物理学奖。早年主要从事对液体和气体在较大范围内的性质的研究。后来集中精力钻研低温下的性质。1908 年，成功地实现将最后一个被认为是永久气体的氦气液化。1911 年，在检测纯水银的低温电阻时，发现随着温度下降至 4.17K 时电阻突然消失。在当时实验条件下，要用仪表测量去证实达到零电阻是不可能的，为此设计了一个精巧的实验：将一个金属环放在磁场中，使它们冷却到临界温度以后，然后撤去磁场，结果环内的感生电流会持续流动下去。1912 年，继续进行广泛深入的研究，发现锡和铅也有这样的现象。1913 年，明确把这种现象称为超导电性。从此，诞生了超导物理学这一门新学科，开辟了现代物理学研究的一个新领域。1914 年，产生利用超导体做成的线圈

来产生强磁场的愿望，但出乎他的意料，超导体在通上不大的电流后，超导电性就立即消失。由此发现超导体的临界磁场，并利用超导闭合线圈的实验，初步确定了超导体电阻的上限。直到本世纪 60 年代，人们发现了可以在很高的磁场和很大电流下仍保持超导电性的“第 II 类超导体”从而实现了昂内斯当年的愿望。

**奥斯特**（Hans Christian Oersted 1777 ~ 1851） 丹麦物理学家。生于鲁兹克宾。1794 年考入哥本哈根大学，1799 年获哲学博士学位。1801 ~ 1803 年，先后到德国和法国游学，受到康德和谢林关于自然力统一的哲学思想的熏陶。1806 年起任哥本哈根大学物理学教授。1821 年当选为英国皇家学会会员。1823 年被选为法国科学院院士。1829 年创办了综合技术研究所，并任所长。

主要贡献是发现电流磁效应。自从 18 世纪 80 年代末，库仑根据电荷可以传导、磁荷不能传导的事实进一步肯定电和磁是不同的实体以后，当时的物理学家如安培和毕奥都认为电和磁不会有任何联系。可是，奥斯特在康德和谢林哲学的指导下，于 1807 年就宣称，他正在研究电和磁的相互联系。1812 年，在其《关于化学定律的见解》一文中，再次提出了电和磁存在着相互联系的问题。1820 年，在一次讲课后，观察到通电导线会使附近的磁针发生偏转的现象，发现了电流的磁效应。经过持续三个月的研究，于 1820 年 7 月 21 日正式公布该项发现。从而彻底否定了那种不正确的观点，深刻揭示了电与磁的本质联系，打开了电磁学发展的大门，在欧洲引起极大的反响。1822 年，首次测得水的可压缩性的精确数据。1823 年，在对温差电偶接头进行研究时，发现这种接头在很低的电位差下，能产生较大的电流。40 年代末，对抗磁体进行研究，试图用反极性和反感应效应来解释物质的抗磁性。

**奥斯特实验**（Oersted experiment） 显示电流周围存在磁场的实验，又称“电流磁效应实验”。1820 年丹麦物理学家奥斯特通过这一实验首先发现了电流的磁效应。奥斯特的实验装置是在伽伐尼电池的两极间接上一根铂丝，铂丝正下方放置一枚小磁针。电源接通后，发现磁针轻微晃动，最后停在与铂丝相垂直的方向。若改变电流方向，小磁针的偏转方向也随之改变。这就说明了电流对小磁针有磁力作用。

奥斯特实验以前，电现象和磁现象一直被当作两种截然不同的物理现象来研究，许多科学家如库仑、安培和毕奥等都认为电和磁之间没有任何联系。但深受康德哲学思想影响的奥斯特相信自然界的各种相互作用应具有某种统一性，特别是电和磁之间应当有某种联系。为此，他坚持进行各种实验探索，终于取得了成功。阐述实验成果的论文于 1820 年 7 月 21 日发表，立即引起了轰动，并迅速地在当时欧洲大陆激起了一股研究电流磁效应及其应用的热潮。奥斯特实验第一次揭示了电现象和磁现象之间的联系，为统一的电磁学的建立奠定了基础。

## B

**射线** (  $\gamma$ -ray ) 放射性原子核所发出的电子流 ( 或正电子流 ) 。这种电子的动能可达几兆电子伏以上。由于电子的质量小, 速度大, 通过物质时不易使原子电离, 能量损失比较慢, 因而与  $\alpha$  射线相比,  $\gamma$  射线具有较大的穿透本领和较小的电离作用。例如具有 50 万电子伏能量的  $\gamma$  粒子在空气中可前进约 1.5 米, 而具有相同能量的  $\alpha$  粒子在空气中仅可前进约 3 毫米。在相同条件下,  $\gamma$  射线电离作用所产生的离子对约等于  $\alpha$  射线的千分之一。

**BASIC 语言** ( BASICLanguage ) 是全称 Beginner ' sAll-purposeSymbolicInstructionCode ( 初学者通用符号指令代码 ) 的缩写。BASIC 语言的主要特点为: 小巧灵活, 简单易懂, 使用方便, 适于在小型和微型计算机上进行小型的科学计算; 具有会话功能, 即计算机与使用者构成双方交流, 能彼此提出问题和回答问题; 具有台式计算机运算命令, 能实现台式机的功能; 具有字符串操作与外部设备通讯的特殊功能, 从而使 BASIC 语言能够进行数据处理和实时控制; BASIC 语言编写的程序在执行时是通过机内的软件“解释程序”逐句进行解释执行的, 每执行一次, 从头到尾解释一遍, 因此速度较慢。现在有的软件能将 BASIC 程序编译后成为计算机的机器语言, 每次执行几乎用不到“解释”, 所以速度大大提高。

BASIC 语言虽然简单, 但内容并不贫乏, 正在逐渐发展, 功能增强, 字符串操作、矩阵运算和函数处理等功能是其他语言所没有的。

符号在 BASIC 语言中, 有以下字母、数字及符号。

字母: ABC...XYZ

数字: 012...789

标点符号: . ( 小数点 ), ( 逗号 ); ( 分号 ) ( ) ( 圆括号 ) “ ” ( 引号 )  $\square$  ( 空格 )

算术运算符: + - \* ( 乘 ) / ( 除 ) ( 乘幂 )

关系符: < > = < = ( 小于等于 ) > = ( 大于等于 ) < > ( 不等于 )

类型说明符: \$

**变量** 包括简单变量和下标变量。简单变量由一个字母或者一个字母后面跟一个数字组成。下标变量由简单变量加上一个含有相应下标的圆括号来表示, 如 X(0)x(1)x(2)x(3)x(4), 也称为数组 X,

具有五个下标变量。还有一种有两个下标的下标变量也称为双下标变量, 例如

A(0,0) A(0,1) A(0,2) A(0,3)

A(1,0) A(1,1) A(1,2) A(1,3)

A(2,0) A(2,1) A(2,2) A(2,3)

A(3,0) A(3,1) A(3,2) A(3,3)

通常称 A 为数组名, A(I,J) 中的 I 为下标 1, J 为下标 2, 中间用逗号分开。

**表达式** 算术表达式与算术式子基本相同, 但乘号 ( \* ) 不能省略, 例如: A\*B。只允许用圆括号, 要注意左括号数应等于右括号数; 不允许两个运算符相邻, 如 3 乘以 -2, 要写成 3\* (-2)。

运算的顺序是：先乘方，后乘除，最后加减，有括号时括号内优先，同一级由左向右进行运算。

**赋值语句** 变量=表达式或LET 变量=表达式 功能是完成等号右边表达式所规定的运算，并将结果赋值给左端的变量。

**打印语句** PRINT 表达式表

功能是将表达式表中出现的表达式和变量的当前值打印出来，而对表达式中用“ ”号括起来的字符串（也可能是数字、字母或符号）则原文照印。打印语句可分三种打印格式，即紧凑格式、按区输出和利用列表函数TAB 输出格式。详细使用打印语句可参阅各种机型的 BASIC 语言使用说明。

**键盘输入语句** INPUT 变量表

功能是在计算机计算过程中给变量赋值。

**无条件转向语句** GOTO 行号

功能是将程序转移到指定的行，从而改变程序的执行顺序。其中行号是指程序所要转移的那一个程序行的行号。行号必须是程序中使用的行号。

**读数语句和置数语句** READ 变量表和 DATA 数据表

功能是将要赋值的数据或者字符放在 DATA 里，需要赋值给变量时可用 READ 语句。常用在一个变量多次赋值和仅改变 DATA 内容、整个程序保持不变的场合中。注意：DATA 中的数据要大于变量赋值数。DATA 是一个非执行语句，可以放在程序的任何地方，而 READ 语句必须放在使用这些变量之前。读数据时，按先后顺序，将第一个 DATA 语句中的第一个数据赋给第一次执行 READ 语句的第一个变量，然后再读第二个等等。两个语句中的变量，数据之间都要用逗号分开。

**恢复数据区语句** RESTORE

当数据区的数据需要重新使用时，可使用恢复数据区语句，或者说使 DATA 中的数据或者字符指针回到 DATA 后的第一个数据。

**条件转向语句** IF 关系表达式 THEN GOTO 行号

功能是若关系表达式为真即成立，则程序将转移到指定的行号进行继续操作和执行。如果条件转向语句中的行号变为一个或多个语句，则程序将按照一个或多个语句执行，如果不出现无条件转向语句或者条件转向语句，执行完就执行下一行号的新语句。当条件转向语句中的关系表达式不为真，即不成立，则程序的行号就变为下一行号继续执行。

**注释语句** REM 注释内容

功能是便于阅读。是以在程序的开始处或者程序中某功能子程序的开始处写上程序的标题或者插入必要的注解来实现的。跟在 REM 后面的注释内容可用英文或者拼音文字写，在打印程序清单时能准确地打印出来，而在程序运行时不予理睬。

**暂停语句** STOP

功能是使程序在 STOP 前面的行号这一点停止执行，并打印或者显示出 STOP × × × ×，其中 × × × × 为停机语句的行号。

**结束语句** END

功能是标志程序已经结束。计算机将会显示 READY 或者其它提示符，表示计算工作已经完成，并准备好接受新的任务。

**循环语句** FOR  $\lfloor$  循环变量=初值  $\lfloor$  TO  $\lfloor$  终值

## STEP 步长值 循环体

### NEXT 循环变量

功能是按照一定规律重复执行某些运算，但在重复过程中的某一参数即循环变量按初值到终值，根据步长值逐个代入。其中循环变量是一个简单变量，循环变量的初值、终值和步长值是常数、简单变量或算术表达式，但变量或者表达式中的各量的值都应知道。若步长值为 1，则 STEP1 可以省略。NEXT 后面的循环变量与 FOR 语句里的循环变量必须相同。循环程序内可以再套循环程序，但要注意内外层循环要分清，只准嵌套、并列，绝不能交叉。

### 转子语句和返回语句 GOSUB 语句行号和 RETURN

功能是把程序控制转移到指定的语句行号，去执行这个语句行号开始的一个子程序。而 RETURN 在子程序的末尾即结束语句，其功能是返回去执行转子程序语句 GOSUB 的下一条语句。

### 数组说明语句 DIM 数组名称 (维数)，数组名称 (维数)，...

例如 10 DIM A(5), B(12), C(12, 14)

功能是数组 A 具有 5 个下标变量，即空出 5 个房间去存数组 A，空出 12 个房间存数组 B，空出  $12 \times 14$  个房间存数值 C。如果数组没有用 DIM 语句来说明，则 BASIC 系统自动空出 11 个房间准备存数组，一维数组能容纳的最多房间必须小于或者等于 256 个。二维数组能容纳的最多存贮单元必须不大于 1024 个。但随着高速大容量计算机的发展，许多限制已逐渐拓宽。

**BASIC 语句编写程序的运行** 如果用 BASIC 语言编写的程序需要运行，只要键入“RUN ✓”，计算机就按照程序的行号由小至大地逐条执行，直到遇到 END 语句，程序全部运行结束。上述命令的意义是要计算机运行，而“✓”表示运算开始，也称为“ENTER”或者“回车”键，计算机接受回车后，开始自行操作。

显示程序命令如果要显示程序的全部内容，可键入 LIST ✓ 命令，则在显示屏上会显示出从行号最小的语句开始，一直到行号最大的语句结束。如果要显示 100 到 200 行号间的程序清单，可输入 LIST100—200 ✓ 命令，如果显示从头到 100 行号，可输入 LIST—100 ✓；如果显示从 200 行号到最大行号，可输入 LIST200—✓。

程序存盘命令如果要程序存放在软盘或者硬盘内，可用 SAVE┌“文件名” ✓ 命令实现，文件名是为了识别各贮存的程序而给与的，文件名最好与程序的内容和具体要求联系起来，将来查阅时非常方便并容易理解，但文件名的字长不能超过 6 个，开头的字不能是数字而是文字即字母。

程序从盘中取出到计算机命令如果要从盘中读取某文件名的程序，可用 LOAD“文件名” ✓ 命令实现。

由于各种计算机所编译的 BASIC 系统都不相同，因此具体使用时，要严格按照随机的文本操作使用，避免张冠李戴，致使机器拒不执行。

巴丁 (John Bardeen 1908 ~ ) 美国物理学家。生于麦迪逊。1928 年毕业于威斯康星大学。1936 年获普林斯顿大学哲学博士学位。1938 年任明苏尼达大学助理教授。1941 年到贝尔实验室从事研究工作，并担任过所长职务。1951 年任伊利诺斯大学物理学与电气工程教授。

巴丁是世界上第一支晶体管的发明者和超导电流理论的创始人，1956年和1972年两次获诺贝尔物理学奖。1945年，在贝尔实验室工作期间，就对半导体理论有深入的研究。1947年，为了解释半导体的某些长期不能理解的导电整流性能，提出了半导体表面态理论。1948年，在关于电子行为性质的假设和达到理想固态器件的途径的探索中，与布喇顿合作，发现了晶体管效应。这一工作导致他二人共同发明点接触型晶体管。1949年，肖克莱发明PN结晶体管。晶体管的发明，导致了电子技术的深刻革命。

此后，巴丁又投入了超导现象的研究工作。1951年，试图根据电子—声子相互作用建立超导电性理论。1957年，与库珀、施里弗合作，提出了低温超导现象的电子对量子理论，指出在金属中正常移动的自由电子是成对地耦合的，并同晶格振动相互作用，被他们的名字字首命名为BCS理论。这一理论成为后人研究超导现象的基础。1958年，根据能隙模型，发展了迈斯纳效应的理论。独立地把超导体的电磁性质的理论推广到任意频率的场的情况。

巴耳末 (Johann Jakob Balmer 1825 ~ 1898) 瑞士物理学家。生于洛桑。曾在巴塞尔、卡尔斯鲁厄和柏林学习。1849年在巴塞尔获博士学位。1859年起在巴塞尔女子中学任教达40年之久。

巴耳末是一位普通的中学教师，但他对光谱学的发展却作出重大贡献。其所以能取得成功，除了选取氢光谱的研究作为突破口外，还在于摆脱了传统的力学观念的束缚，站在几何学的“新”角度去处理氢光谱；借助几何图形领悟到谱线波长趋近于某一极值，又从几何图形推出平方关系。1885年，发表如下公式：

$$H = \frac{m^2}{m^2 - n^2} \cdot h,$$

其中H表示氢原子光谱线的波长， $h=3645.6 \times 10^{-7} \text{mm}$ ， $n=2$ ， $m=3, 4, 5, \dots$ 等整数，被称为巴耳末公式。由此计算得到的可见光谱线的波长，和实验值的误差小于4万分之一。

巴耳末一生就发表了两篇论文，另一篇是1897年发表的《光谱波的一个新公式》。巴耳末的氢光谱公式，以简单、典型、规律性强的特点，打开了光谱学研究新领域的大门，为原子物理学，特别是量子力学的发展，提供了可靠的依据。

白矮星 (white dwarf star) 光度暗弱并处于恒星演化末期的小质量恒星。由于开始发现的几颗这样的星体均呈白色，所以称为白矮星。它们的特征是光度低，质量与太阳同一数量级，而半径与地球相当，因此其密度极大，约为  $10^8 \sim 10^{12}$  千克/米<sup>3</sup>，例如像火柴盒大小的白矮星物质的质量达数吨到数千吨，故属致密天体，平均密度约为水的一百万倍。白矮星与其他大多数恒星不同之处是它不是靠正常气体压力，而是靠内部电子气体的简并压力顶住了引力收缩作用。引力作用把脱离原子核的电子紧密地压缩在一起，它们之间会产生一种起源于量子效应的排斥力。这就是电子简并压力。

典型白矮星的核心区由碳氧混合物构成，核心的外围是一个氦气包围的薄层，大多数情况下还有一个更薄的氢层。白矮星是从初始质量约为太阳质量的恒星演化而来的。在核心区的氢燃烧和氦燃烧熄灭后，核反应停止，这时由于引力的作用而使星球体积收缩而演化为白矮星，这个过程约



为几十亿年。它的密实的结构将抵住进一步的引力塌缩，这时星体对外辐射主要靠降低温度来维持。随着温度的降低，白矮星逐渐变成红矮星。当这种能量也枯竭时，就停止辐射并到达演化的终点，成为一个冷而无活力的恒星残骸。这种残骸也称为黑矮星，这个过程也需几十亿年。

天文观测发现，天狼星的伴星就是一个白矮星，其体积很小，半径约为 1 万公里，其质量几乎与太阳相同。因此它表面的引力加速度很大，约为地球的 3 万倍。其表面的磁场也很强，约为  $10^7$  高斯。

摆 (pendulum) 能够产生摆动的一种机械装置。意大利力学家伽利略首先研究了单摆，后来荷兰科学家惠更斯研究了复摆，他们为摆的力学理论奠定了基础。

图 1

单摆 又称“数学摆”。质量可忽略、长度为  $l$  的不会伸缩的细线(或杆)，其一端固定，另一端系一质量为  $m$  的可以当作质点看待的小球，受重力作用在竖直平面内摆动的装置，如图 1 所示。若不计空气阻力，可得运动方程为

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2 \sin\theta = 0,$$

其中  $\omega^2 = \frac{g}{l}$ 。当  $\theta$  很小时 ( $\theta < 5^\circ$ ) 上述方程可化为

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2\theta = 0。$$

其解为  $\theta = \theta_0 \sin \omega t$ ，是一简谐振动。 $\theta_0$  为最大偏角，称为摆幅或振幅； $\omega$  为摆的角频率或圆频率；

$T = \frac{2\pi}{\omega}$  (秒) 为周期； $f = \frac{1}{T}$  为摆的频率。摆的周期  $T$  与振幅

$\theta_0$  无关，这一重要性质，称为摆的等时性，由伽利略发现，成为钟表原理的基础。

复摆 又称“物理摆”。在重力作用下能绕固定转轴摆动的物体。如图 2 所示，物体重心  $C$  不在固定轴  $O$  处，物体质量为  $m$ ，对转轴  $O$  的转动惯量为  $I$ ，重心到  $O$  的距离为  $d$ ，复摆的运动方程为 (摆角  $\theta$  很小时)：

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{mgd}{I}\theta = 0。$$

图 2

摆的周期  $T$  为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}}。$$

式中  $\frac{I}{md}$  称为等值摆长，这表明复摆的周期相当于一个摆长为  $\frac{I}{md}$  的单摆的周期。

扭摆 由细弹性杆支承、能绕杆轴扭转的装置，如图 3 所示。物体转过一个角度，弹性轴就给物体一个恢复力矩，使它回到平衡位置；物体由于惯性将继续沿反方向转动，这时相反的恢复力矩使物体减速，停止并回

转，如此往复产生扭转振动。设物体绕轴线的转动惯量为  $I$ ，杆轴的刚度系数（每转单位角度所需的力矩）为  $k$ ，则扭摆作为刚体的定轴转动，其运动方程为

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{k}{I}\theta = 0,$$

其周期  $T = 2\sqrt{\frac{I}{k}}$ 。以上运动方程也与单摆的微振动方程一样，故

它们的运动规律相似，都是简谐振动。若已知  $k$ ，则利用扭摆可测定物体的转动惯量  $I$ ；反之，若已知  $I$ ，则可测定金属丝的刚度系数。

图 3

图 4

**傅科摆** 验证地球具有自转运动的一种单摆。由法国物理学家傅科于 1851 年首先在巴黎伟人祠的大圆屋顶下作了表演，故名。他用的摆是一个重 62 磅的铅球，悬挂在 220 英尺长的细钢丝下，在摆动持续的很长时间内，由于摆动平面相对惯性坐标系（例如以地心为原点、坐标轴指向恒星的坐标系）是不动的，但地球上的观察者随地球而转动，故地球上的观察者看到摆动平面沿地球自转相反方向转动，转动角速度大小等于地球自转角速度的铅直分量  $\omega_n$ ，即  $\omega_n = \omega \sin\varphi$ （见图 4 所示），因此摆动平面旋

转周期  $T$  与实验所在处的纬度  $\varphi$  的关系为  $T = \frac{T_0}{\sin\varphi}$ ， $T_0$  为地球自转周期。

傅科测得摆动平面旋转一周的周期约为 32 小时，由此推断出巴黎的纬度为  $49^\circ$ ，证实了上述公式的正确性，也验证了地球自转的存在。

**坂田昌一**（Sakata Shyoichi 1911 ~ 1970）日本理论物理学家。生于东京。1933 年毕业于京都大学。1941 年获博士学位。1942 年任名古屋大学教授，在这里创立了基本粒子研究室，终生从事基本粒子理论研究。

主要贡献是发展介子理论和对基本粒子结构模型的研究。1935 年，与汤川秀树合作，预言了  $K$  俘获。1938 年，建立了核力的标量理论，并引入中性介子来说明核力的电荷无关性。1942 年，他和谷川安孝、井上健一起，提出了两种介子的理论，对粒子物理学的发展，起了积极推动作用。1947 年，鲍威尔发现  $\pi$  介子，直接证实了上述理论。1949 年，研究了基本粒子构造问题。1953 年，盖耳曼—西岛法则提出后，给这个法则以实体论的解释。1955 年，提出一种强相互作用粒子的复合模型，被称为坂田模型。该模型认为，强相互作用的基本粒子都是由质子、中子、 $\Delta$  超子及其反粒子组成的。这个模型对于揭示基本粒子的内部结构，推动粒子物理学的发展，具有重要意义。1956 年，提出介子和重子的分类，在这个方案中，取质子、中子和兰姆达零超子作为基本粒子，被称为坂田方案。

坂田昌一在哲学上坚持唯物辩证法，认为物质是无限可分的，主张现有的基本粒子不是物质的最终单元，而是构成自然界的有质的差异的无限个层次之一，它应当由更深层的其他形式的物质所组成。他将自然辩证法的观点，应用于粒子物理学研究之中，批判了唯心主义和形而上学。

**板画**（drawings on blackboard）在物理课堂教学进行过程中，教师在黑板上用示意图、简笔图、图线等各种图形说明教学内容，使学生对所学内容获得生动、鲜明、形象的认识。板画可以帮助学生想象物理模型

和物理过程，促使学生从形象思维到抽象思维过渡，学会用简化的示意图表达复杂的结构、关系和变化过程。

板画时应注意：要简明、生动、形象，可见度大。把要研究的对象，用简笔画形式放大、夸张，可以取得较好的效果。画板画要快捷，但不要草率。生动、形象的板画能立即唤起学生的直观感受，激起学习兴趣，留下深刻的印象。板画与板书要紧密配合，还要与讲课或演示实验紧密配合，能边讲、边演示、边板书、边板画，可使学生正确理解物理现象及其过程。图线型的板画对学生有示范作用，要指导学生正确建立坐标轴，选取合适的长度单位，正确描绘图线。

板书 (writings on blackboard) 在物理课堂教学进行过程中，教师将教学内容划分段落，在黑板上提纲挈领地表达讲课的内容体系和推导线索，突出教学的重点和关键，使学生对基本概念和定律有明晰的认识和理解，并便于学生笔记和复习。板书随着教师的讲课过程逐步展开，能使学生的注意力既集中于教师的语言、表情、姿态、动作，又集中于板书的内容。所以板书对课堂教学起着重要的辅助作用。

在课堂教学中，要有成效地运用板书，应注意：要有计划、有准备。通常把教学内容的主干、系统，简明扼要地按层次展开。重要的公式、概念、结论等是一节课的“持久性”板书，应安排在黑板的显著部位；而一些推导、演算等“暂时性”的板书写在黑板一侧，用后可擦去。教师在备课时，要预先拟好板书计划，以便上课时合理使用黑板板面。要条理分明，主次分明，体现知识之间的逻辑关系和内在联系。要简明正确，少而精。过多的板书写会分散学生的注意力。要注意语言与板书的主次关系，最好边讲，边板书，这样有助于学生清楚、正确地理解教学内容，切不可使学生陷入课内抄笔记、课后背笔记的被动学习的状态。

半波反射 (half-wave reflection) 参见半波损失。

半波损失 (half wave loss) 入射光从折射率小的光疏媒质入射到折射率大的光密媒质界面时，反射光损失半个波长光程的现象。半波损失通常发生在掠入射 (入射的近似  $90^\circ$ ) 或正入射 (入射角近似为  $0^\circ$ ) 的情况下。这时，反射光中电矢量的振动方向与入射光中电矢量的振动方向恰好相反，因此两者的相位差为  $\pi$ ，这相当于光程差  $\frac{\lambda}{2}$ 。

光从光密媒质入射到光疏媒质界面而被反射时，不存在半波损失现象，折射光也不存在半波损失。

半导体 (semiconductor) 电阻率介于导体与绝缘体之间 ( $\rho = 10^4 \sim 10^8 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ) 的固体材料称为半导体。半导体的能带结构与绝缘体类似，但它的禁带宽度  $E_g$  较小，因此电子较容易从价带激发到导带，在导带中产生传导电子；同时在价带中产生空穴。因此在半导体中有两种载流子：导带中的电子和价带中的空穴。在外电场作用下，两种载流子运动产生电流。

半导体材料的能带结构有间接带隙式和直接带隙式两种。直接带隙式半导体的能带结构是导带底 (即导带中能量的最小值) A 点和价带顶 (即价带中能量的最大值) B 点在同一波矢  $K$  ( $K=0$ ) 的位置上，见图 1。A、B 两点的能量之差  $E_A - E_B = E_g$  称为“禁带宽度”。从图 1 看出，直接带隙半导体材料砷化镓 (GaAs) 还有另一个特点，即它的导带有两个能谷 A 和 C，利用这一特殊能带结构制成的一种称为“耿氏二极管”的体效应器件，在

微波领域获得了广泛的应用。在如图 2 所示的间接带隙式能带结构中，导带底和价带顶不处在同一波矢  $K$  的位置，导带底  $A$  在  $K$  的位置，价带顶  $B$  在  $K=0$  的位置，按定义  $E_g=E_A-E_B$ 。硅是一种最常用、较便宜的半导体材料，它大量应用于晶体管和集成电路的制造。

图 1 半导体材料的直接带隙式能带结构

图 2 半导体材料的间接带隙式能带结构

半导体的能带 (energy band of semiconductor) 见半导体。

半导体激光器 (semi-conductor laser) 用半导体作为工作物质的激光器。常用的一种为 P-N 结砷化镓激光器。在一块砷化镓单晶体的上、下面上分别焊上电极。当电流密度超过阈值时，电子和空穴在 P-N 结区通过受激辐射复合，产生激光。半导体单晶体本身便是谐振腔，故晶体的两个端面要研磨抛光，使其相互平行，并通过镀膜以增加反射。输出的激光波长为 0.9040 微米，输出特性受温度影响极大，一般需用冷却系统。随着半导体技术的发展，近年来半导体激光器也取得了重大进展。

半导体集成电路 (semiconductor integrated circuit) 采用半导体平面工艺 (包括氧化、扩散、光刻、蒸发、化学淀积等) 把电路的各种元件如晶体管、二极管、电阻、电容等制备在同一块半导体 (如硅) 衬底上，元件之间互相是电隔离的，最后再按电路要求用金属引线把它们连接成一个完整的、具有一定功能的电路。

半导体集成电路按功能可以分为数字电路和模拟电路两大类。数字电路。又称逻辑电路或开关电路。它用于电子计算机和自动控制线路中的数字计算或信号控制。在数字电路内，晶体管都工作在截止区或饱和区，电路以“开”和“关”两种状态来模拟两进位制的基本数字量“1”和“0”。最初的数字电路采用双极型晶体管，制造时各元件之间必须采取电隔离措施，为此要增加芯片面积和制造工序。1964 年后采用了 MOS 晶体管。由于 MOS 工艺不需要另外的隔离工艺，因此有制作简单、集成度高、功耗小等优点，MOS 晶体管数字电路也就成为大规模和超大规模集成电路中的主角。随着 MOS 工艺的发展，进一步又发明了 CMOS (互补 MOS) 和 VMOS (垂直 MOS) 等工艺。模拟电路。又称线性集成电路。电路内晶体管工作在非线性区，因此电路具有非线性放大作用。模拟电路包括直流运算放大电路和各种交流放大 (如音频放大、中频放大、宽带放大等) 电路等。

办公室自动化系统 (autosystem in office) 是一种多功能事务管理系统，主要内容分两个方面：事务管理和汉字信息处理。

办公室事务管理功能可归纳为：起草、修改、编辑、输出各种公文。会议日程时间与地点的管理，计算机可按月、星期、日分别显示日程表，对临时性的接待、座谈及会议的安排与时间表的合理调整，传送会议通知。任务管理，进行任务分配与调度，检查任务完成情况，对紧急任务的安排和重要任务完成时间报警 (机器提醒办事人员) 等。邮件信息管理，根据邮件户头文档正确地分拣邮件，传送邮件信息，自动印出传递单位地址、收件人姓名等信息。联机管理行政人员的人名地址目录，通过人名地址目录文档，自动电话可随时与不在单位办公室的在册人员取得联系，以应付紧急性任务的执行处理。建立一个合理的数据库，将办公室事务中所要用到的各种类型数据以文件方式存入数据库中。图形管理，对下级机构汇来的日报、月报、年报数据和经济管理方面的数据，例如计划图、百分比、

增长率、增长百分比等，可以用直观的图形（由线图、圆形图等）显示出来。查文人员资格审查，对查阅公文、检索文件信息的人员资格进行审查并登记，符合某级别的人员才能查看，不够级别或冒充者机器会自动报警且为文件进行保密。对于合法人员，可联机查询数据库中的文件与档案，并在阅文登记文档中对查询、阅文人员进行登记。面向一般办公人员的对话屏幕。

汉字信息处理方面的功能应具备：汉字输入方式有 3~5 种，如拼音码、五笔法、区位码、首尾输入等方式，以满足现有的不同类型办公人员的要求。输出字型一般应以仿宋体显示，打印字型应有一至五号排印字型和可供选择的放大字型；字库至少应具有国标一、二级汉字库，同时有造字功能、造词组功能；汉字全屏幕编辑功能，能任意选择排印的行距、页型及各种字体的混合使用；中西文兼容的排版功能。

薄膜干涉 (filminterference) 呈现为牛顿环或油膜色彩等现象的干涉效应。

**分振幅法干涉** 当入射光遇到透明薄板时，在第一表面和第二表面依次产生反射。由于振幅的平方为光强，入射光的依次反射相当于入射光的振幅被依次分解，故称为分振幅法。如果薄板厚度为  $d$ ，折射率为  $n$ ，薄板上下两侧都是空气，光束从薄板表面 A 点入射后，引起反射光  $AA'$ ，见图 1 所示。A 点的折射线在第二表面 F 点又形起反射光  $FB$ ，并折射出第一表面，形成与  $AA'$  平行的光线  $BB'$ 。 $AA'$  和  $BB'$  即为两束分振幅光。如果用透镜把它们会聚在焦点上，便会产生干涉效应。过 B 点作线段  $BD$  垂直于  $AA'$ ，可以看出两束相干光之间的光程差为

$$= n (AF + FB) - (AD + \frac{\lambda}{2}) ,$$

其中  $\frac{\lambda}{2}$  为光从上下表面反射时因情况相反（第一次反射时入射光从光疏媒质到光密媒质，有半波损失，第二次是从光密媒质到光疏媒质，无半波损失）而引起的额外光程差。经过简单的计算，可得

$$= 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2} ,$$

或用折射角  $\gamma$  表示为

$$= 2dn \cos \gamma - \frac{\lambda}{2} .$$

当这两束相干光的程差 等于波长的整数倍时，在会聚点出现相长干涉，得亮点； 等于波长的半整数倍时，在会聚点出现相消干涉，得暗点。

实际上，还存在于薄板内经过三次或五次等反射而最终从上表面射出的许多光束，不过这些光束的光强已大为减弱，它们的振幅与第一次反射光的振幅相比可以略去。此外，光在 F 点反射时必然也有折射光从薄板下表面射出，还有从 B 点反射后第二次从下表面射出的光束。这些经过薄板的透射光，经透镜会聚后也能引起干涉，只是透射光干涉图样可见度较低，比较模糊。

**等倾干涉** 从上述光程差的计算中可知，光程差由薄板厚度  $d$ 、折射率  $n$  和入射角  $i$  决定。对于  $n$  和  $d$  均为常数的平行平面薄板，受到扩展面光源照射时，从面光源上不同点处发出的光在薄板上同一点处将有不同的

入射角，而每一入射角都有一相应的光程差。因此，由相同入射角的光所引起的反射光在透镜焦平面上有相同的光程差或相位差，因而有相同的光强。光强相同的点的轨迹形成干涉图样。因此，由相同入射角的光束形成的平行平面薄板的干涉称为等倾干涉。它的干涉图样呈椭圆弧形，光源垂直照射时呈圆弧形。条纹明暗仍由光程差 决定。

平行平面薄板的厚度  $d$  越大，相邻亮条纹之间的距离越小。水面的油膜或肥皂膜在阳光照射下呈现彩色花纹，从不同角度观察时彩色不同，这就是薄膜的等倾干涉。如果膜的厚度太大，便看不到干涉图样。

**等厚干涉** 当薄膜的两个表面构成稍有夹角的尖劈状时，薄膜上各处的厚度不等。用位于透镜焦点上的点光源所形成的平行光束照射尖劈膜，见图 2 所示。取入射平行光束中两条光  $a$  和  $c$  进行讨论。 $a$  经过薄膜

图 2 等厚干涉

后从  $B$  点出射，为  $a$  光； $c$  在  $B$  点反射后，为  $c$  光。 $a$  和  $c$  在  $B$  点交叠后经透镜成像于  $B'$  点。同一点发出通过均匀媒质并在透镜后会聚于一点的任何光线，具有相同的光程，故从  $B$  到  $B'$  的传播过程中没有光程差。在  $B$  点相遇的  $a$  光和  $c$  光之间的光程差仍可用前述公式计算。对于薄膜表面不同的入射点，入射角  $i$  和  $d$  均不同，故经透镜后不同入射点的像明暗不同。图 2 是为了清楚起见的一种夸大的画法，实际上  $a$  光和  $c$  光很靠近，它们形成一个像点  $B'$ ，也就是  $A$  点和  $B$  点实际上可视为同一入射点。该入射点的亮暗决定于这二束光的光程差，即决定于该点处的厚度  $d$ ，故称等厚干涉。干涉图样是一些平行于尖劈棱的直线条纹。厚度  $d$  愈大，形成的干涉级次愈高，零级条纹在尖劈棱处。如果光对薄膜的入射角不大，等厚干涉条纹定域于薄膜表面。牛顿环实际上是一个等厚干涉的例子。

**薄膜混合集成电路** (thin film hybrid integrated circuit) 在同一块基片上用蒸发、溅射，电镀等薄膜工艺制成无源网络，再组装分立的微型元器件外加封装而成的半导体芯片或单片集成电路。薄膜混合集成电路所用的基片有多种，最常用的是玻璃基片，其次是微晶玻璃和被釉陶瓷基片，有时也用蓝宝石和单晶硅基片。在基片上制造电路所用的薄膜主要有四种：导电、电阻、介质和绝缘薄膜。

导电薄膜用于作为电路的连结线、焊接区或电容极板。对导电薄膜的要求，主要是膜的导电率大，膜在基片上附着牢靠，其可焊性好和稳定性高。为此，常采用多层结构膜。一般采用二至四层结构。如铬—金(Cr-Au)、钛—铂—金(Ti-Pt-Au)、铬—铜—铬—金(Cr-Cu-Cr-Au)等。

电阻薄膜构成电路的各种微型电阻。对它的要求主要是膜电阻的阻值范围宽，温度系数小，稳定性能好。最常用的材料是铬硅系和钽基系，如镍—铬(Ni-Cr)、铬—硅(Cr-Si)、铬—氧化硅(Cr-SiO<sub>2</sub>)、钽(Ta)、氮化钽(Ta<sub>3</sub>N<sub>5</sub>)等。

介质薄膜构成各种微型电容器的介质层。对它的要求是介电常数大，击穿强度高，损耗角正切值小，使用最多的是硅系和钽系，如氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、氧化钽(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)等。

绝缘薄膜用于作为交叉导体的绝缘和薄膜电路的保护层。为了减小薄膜网络的寄生效应，绝缘薄膜的介电常数应很小。常用的材料有氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、氮化硼(BN)等。

**保守力** (conservative force) 广泛存在于自然界的一种力。此力

所作的功与所取路径无关，仅决定于受力物体移动时初末两点的位置。万有引力、静电力和弹性力等都是保守力。若  $F(r)$  对物体来说是外力场，且为保守力，根据做功与路径无关的性质，在 A、B 两点之间 F 沿任意路径所作的功可以写成

$$\int_A^B F \cdot dr = U(B) - U(A)。 \quad (1)$$

即 U 仅为力场中位置的函数。对于像万有引力和静电力这种只与两相互作用物体距离有关的力，一对作用力和反作用力从初位置  $(A_1, A_2)$  到末位置  $(B_1, B_2)$  沿任意路径所作的功必然可以写成

$$\int_{(A_1, A_2)}^{(B_1, B_2)} (f_{12} \cdot dr_1 + f_{21} \cdot dr_2) = U(B_1, B_2) - U(A_1, A_2) \quad (2)$$

U 只是两物体相对位置的函数，实际上只是它们的距离的函数。保守力的另一等效定义是，力绕任何闭合路径所作的功等于零：

$$F(r) \cdot dr = 0。$$

或者也可以等效地写成，力在力场中每一点的旋度等于零：

$$\nabla \times F(r) = 0。$$

最后一式常成为一个力场是否为保守力场的判别式。

凡是不满足保守力条件的力称为非保守力。摩擦力（包括内摩擦力）和阻力都是非保守力，克服这些力所做的功与所取路径有关。始终作负功的非保守力称为耗散力，物体在耗散力作用下，其机械能因不断损耗而减少。

**本原 (arche)** 指世界的来源和存在的根据。希腊文为“ἀρχή”，原义是元始，又译为始基。泰勒斯认为，水或湿气是万物的本原，万物起源于水并复归于水。稍晚的赫拉克利特认为，万物的本原是永恒运动、发展着的火，“万物都换成火，火又换成万物”。其后的恩培多克勒认为，万物都是由土、水、气和火这四种元素按照不同的比例结合起来而形成的。他由此在《论自然》一诗中提出了物质不灭的思想。亚里士多德集上述对本原认识的大成，设想天体和地球是由不同的材料组成的：月层以下的一切物体都是由土、水、气、火四种元素组成的；月层以上的天体则是由更纯洁的第五种元素“以太”构成的。

**本征半导体 (intrinsic semiconductor)** 一种理想的半导体晶体。在绝对零度时，价带内所有能级被电子填满，导带内的所有能级被空置，导带与价带之间被禁带隔开。在一定温度下，电子受热可能从价带激发到导带，在导带内产生导电电子，同时在价带内产生导电空穴，这称为“本征激发”。依靠本征激发产生载流子而导电的半导体称为本征半导体。对于本征激发，导带中产生的电子数  $n$  和价带中产生的空穴数  $p$  相等，即  $n=p=n_i$ （均取单位体积粒子数）， $n_i$  称为“本征载流子浓度”，它是温度  $T$  的函数，通常随着温度的增加而增加。本征半导体费米能级的位置一般非常接近于禁带中央。

**比较 (comparison)** 在物理学研究中，找出研究对象之间的同一性和差异性的研究方式。各种物理现象和过程可以通过比较，确定它们之间的差异和共同点。任何一项物理研究不管是自觉还是不自觉都包含着比较的成分。在物理学众多领域的实验和理论研究中，比较方法发挥着重要的

作用。无论在空间上同时并存的事物之间，还是在时间上先后相随的事物之间，都可以找到它们赖以相互区别的特点，也都可以找到它们相互联系的地方。

在比较的过程中，条件是十分重要的，所谓同一和差异，都是在一定的条件下而言的。控制变量的方法就是保证在相同条件下进行比较，这是一种在物理学实验研究中寻找规律的基本分析方法。在物理学领域中，比较研究的形式是多种多样的，有的是比较一个物理现象在一定时间内前后变化的情况，有的是同时比较不同的物理现象，有的是比较研究对象随条件变化的情况等。比较研究的关键就是在表面上差异极大的对象之间，找出它们的同一性，在表面上极为相似的对象之间，找出它们的差异性。物理学上不少重大的发现都是在比较的过程中，抓住同中之异、异中之同这个关键环节才获得的。例如笛卡儿总结动量守恒所研究的六种碰撞，表面现象都有差异，而它们的联系（碰撞前后动量都守恒）虽然隐藏着，但却是本质。笛卡儿抓住这一本质，就抓住了比较研究的重点。又如对量子力学理论体系的认识，海森堡的矩阵力学体系与薛定谔的波动力学体系开始是对立的学派，但经过比较，对立的双方看到波动力学和矩阵力学在数学上是完全等价的，只不过是着眼点和处理方法不同。于是找到了“异中之同”，进而统一了对量子力学理论体系的认识，确立了它在物理学中的地位。

比重 (specific grayity) 参见密度。

比重计 (hydrometer) 又称浮秤。测定液体密度的仪器。比重计是根据阿基米德原理制成的。它由一根附有刻度的其底部带有泡状部分的封闭玻璃管和泡内装有铅粒或水银等重物组成，以使比重计获得一定浮力后与重力平衡而能竖直浮立于待测液中（见附图）。液体密度越大，比重计受到的浮力越大，故浮得越高，管上与液面相平处的刻度读数即为待测液体的密度。比重计分两种：重标与轻标，它们分别适用于测定密度大于 1 和小于 1 的液体。某些专用比重计有特定刻度，如测定酒精度数（含量）的酒精比重计。

比重计

避雷针 (lightning rod) 一种防止直接雷击的装置。由金属棒构成，装在独立构架（在野外仓库区）或建筑物顶上。它与引下线和接地装置配合，能将一定范围内的高空雷电引向自身，泄入大地，以保护周围建筑物或屋外电气装置免遭或少遭雷击。

避雷针是 1776 年由富兰克林首先发明的。其实，避雷针的防雷作用并不在于避雷，而是在于接受电流后迅速导入地下。通常的避雷针把雷电引入大地的引下线少，尚难保证超高建筑物顶部免遭雷击，对建筑物的防雷效果还不够理想，于是科学家又发明了效果更好的避雷带和避雷网等防雷措施。近 20 年来，又发展到直接利用建筑物的钢筋混凝土构件中的钢筋作为接地装置来防雷，这种称为“暗笼式避雷网”的防雷式引下线，具有众多的引下线网，导引电流的作用更好，是一种更加经济、美观和安全的防雷方式。

毕奥-萨伐尔定律 (Biot-Savart law) 又称毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律。表示电流和由它所激发的磁场之间相互关系的基本定律。法国物理学家毕奥和萨伐尔在实验基础上，于 1820 年首先提出了长直电流对磁极的



作用力与距离成反比的结论。不久，法国数学家拉普拉斯把载流回路对磁极的作用力抽象为各个电流元作用力的矢量和，从而使实验结果上升为一般形式的毕奥-萨伐尔定律。

任何线电流都可以看作由无限多的电流元  $Idl$  连接而成， $I$  为电流强度， $dl$  为线元矢量，其方向即为线元中电流的指向。电流元  $Idl$  在空间一点  $P$  处所激发的磁感应强度  $dB$  的大小与  $Idl \sin \theta$  成正比，与  $r^2$  成反比。设  $r$  是由该电流元指向  $P$  点的矢径，且  $r=|r|$ ， $\theta$  是  $dl$  与  $r$  之间的夹角，则  $dB$  的方向按右手螺旋定则垂直于  $dl$  和  $r$  共同决定的平面。可用数学表达式将毕奥-萨伐尔定律一般表示为

$$dB = k \frac{Idl \times r}{r^3},$$

式中  $k$  为比例系数，其值与单位制选择有关。在国际单位制中， $k = \frac{\mu}{4\pi}$ ， $\mu$  为均匀介质的磁导率。由于磁场服从叠加原理，任意形状的线电流在空间一点所激发的磁感应强度就等于各电流元在该点所激发的磁感应强度的矢量和，即

$$B = \int_L dB = \int_L \frac{\mu}{4\pi} \frac{Idl \times r}{r^3}.$$

各种载流体系都可以看作由线电流组成，所以，毕奥-萨伐尔定律是讨论磁场性质和计算任意载流体系磁场的基础。

由于电流元不可能单独存在，毕奥-萨伐尔定律不可能用直接的实验方法进行验证。但由它计算得出的各种载流体系的磁场都与测量结果相符，从而使该定律得到了间接的证明。

**变压器 (transformer)** 利用电磁感应原理改变电压、电流和阻抗的器件。一般由铁芯和线圈（包括初级线圈和次级线圈）两部分组成。单相变压器结构如图所示。当初级线圈通以交流电后，在铁芯中产生变化的磁通量，从而在次级线圈上便产生频率相同的感应电压。

单相变压器结构示意图

**变压器的种类** 变压器种类繁多。按用途分，有电源变压器、调压器、脉冲变压器、自耦变压器等。按电源相数分，有单相变压器、三相变压器等。按制式分，有壳式变压器、环形变压器等。

**理想变压器** 一种理想的，无漏磁和漏抗，铁芯和线圈没有铜损和铁损，因而效率为 100% 的变压器。理想变压器初级和次级线圈的电压与它们线圈的匝数成正比；初级和次级线圈的电流与线圈的匝数成反比；初级和次级线圈的阻抗与线圈匝数的平方成正比，即

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}, \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2.$$

实际变压器的效率用  $\eta$  表示，定义为输出功率  $P_2$  和输入功率  $P_1$  之比，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 V_2}{I_1 V_1}.$$

电力变压器的效率都较高，满载时在 95% 以上，大型变压器可达 99%。电子设备中的小容量变压器效率稍低些，一般在 90% 以下。

**变压器的铜损与铁损** 由于初级和次级线圈导线存在电阻，电流通过时将产生焦耳热损耗，习惯上称铜损。在交变磁场作用下，铁芯物质中产生磁滞损耗和涡流损耗，习惯上统称铁损。它们不仅损耗电磁能量，使变压器效率降低，而且都转变为热，使变压器的温度升高。变压器温度过高时将损坏绝缘，降低器件寿命，甚至烧坏器件。为此在设计上须尽量降低绕组电阻。变压器的铁芯则常用涂有绝缘漆的 0.35 ~ 0.5mm 厚的硅钢片叠成，以尽量增大电阻，减小涡流，降低磁滞损耗。同时，还必须设法让变压器内部的热量易于散发。容量在 5kW 以上的变压器常放置在储满矿物油的铁柜内，通过油的对流将热传给柜壁，再散发到周围空气中。

**变压器的应用** 变压器的应用极为广泛。它是电力传输的重要设备。为了减少电能通过导线传输时的焦耳热损耗，常常采用高压传输。例如，葛洲坝水力发电厂到上海的输电线路电压高达 500kV。传输过程中的升压、降压都是由变压器完成的。在电子技术中，各种类型的变压器担负着变换电压、电流、阻抗以及位相的功能。工业上的电焊、整流、电炉（感应炉、电阻炉等）冶炼等各种作业中，都要使用各种类型的专用变压器。

**变质量运动 (motion of variable mass)** 由于外界质量的不断加入，或由于不断向外界输送质量，而使物体质量不断发生变化的运动。例如雨滴穿过云层时的运动。这时云层中的水汽不断地凝结在水滴上而使水滴质量不断增加。又如火箭克服重力的上升运动。这时火箭由于不断向外喷出燃气而使其质量不断减少。变质量物体的运动方程可以由力学中的动量定理导出为

$$m \frac{dv}{dt} = (v - u) \frac{dm}{dt} + F。$$

式中  $m$  为变质量物体的质量； $v$  是它在惯性系中的速度； $u$  是外界质量附着于主体质量（变质量物体的质量）之前瞬时在同一惯性系中的速度，或者是脱离本体质量瞬时而成为外界质量的那一小部分质量在同一惯性系中的速度； $F$  是总外力。对于变质量物体本身来说，与牛顿运动方程相比，多了一项  $(v - u) \frac{dm}{dt}$ ，是因为系统质量发生变化而受到的作用力，称为推力。用变质量运动方程可以解释火箭的运动。

**标准电感器 (standard inductor)** 一种特制的标准测量用电感器。为使电感数值准确，稳定性高，线圈的骨架采用坚固的非金属、非磁性、膨胀系数小的材料（如大理石或陶瓷）做成。线圈采用多股铜绞线来绕制，以减小集肤效应。按结构可分为固定的和可变的两类，每类又可分为自感和互感两种。标准互感线圈的结构和要求与标准自感线圈相同，但它有两个互相绝缘的绕组。连续可调节的可变电感器是由两个电感线圈组成。一个固定线圈，另一个是由手轮旋转的活动线圈。两个线圈接成串联，借两个线圈间的互感变化，得到不同大小的总电感。使用标准电感时要注意它的电感值、准确度等级、使用频率范围、允许通过的电流、环境温度和湿度。

**标准电容器 (standard capacitor)** 一种特制的电容量准确和稳定的用作标准的电容器。一般由两组严格绝缘、相互位置固定不变的金属极片组成。制造标准电容器要选用高质量的介质，以减小介质损耗。空气和云母是常用的介质，由于空气的介电常数小，一般只能做小容量的固定标

准电容器或可变标准电容器（1000pF 以下），但性能稳定；云母的介质损耗比空气大，且介电常数随温度变化大，但介电常数较大，适用于制造电容量较大（1000pF 以上）的标准电容器，但性能较差。此外制造电容器的极板的材料要用刚性好、膨胀系数小、耐腐蚀的材料。为防止外电场影响和潮气浸入，通常都有屏蔽，并加以密封，以保证电容量的准确和稳定。

**标准热宇宙模型**（standard model for hot uni-verse）又称大爆炸学说。是目前能解释宇宙演化至今形式的最好候选理论。该学说认为宇宙开始于一次非同寻常的大爆炸，或者说宇宙之初是一个温度极高（ $10^{32}\text{K}$ ）的灼热奇点。由于温度如此之高，使任何物质不能以分子、原子、甚至是原子核那样的状态存在，它们只能分离成高速运动的基本粒子。它们中最主要的是数目大致相等的正、负电子；此外还有数目几乎相等的无质量的中微子，这种粒子除了弱作用外不参与电磁作用和强作用；另外还有充满宇宙的大量的光子。这些粒子不断地从大爆炸后释放的能量中产生，然后又由于频繁地碰撞而迅速湮灭。除了上述的轻粒子外，还有少量质量较重的粒子，如中子和质子，它们是未来将会形成的原子核的基本组分。

由黑体辐射理论可知，光子的平均波长反比于温度。再根据哈勃定律可推出，光子的波长增长率（即红移量）正比于宇宙空间的尺度。因此我们可得出结论：宇宙的空间尺度与宇宙的温度成反比，亦即宇宙随着温度下降而不断地膨胀。

根据狭义相对论，粒子的产生是有条件的，它要求能量大于粒子的静能  $mc^2$ 。譬如电子的静能为  $0.526\text{MeV}$ ，当宇宙的温度为  $T$  时，根据统计力学可知，能赋予粒子产生的能量为  $E \sim kT$ （ $k$  为玻耳兹曼常数）。于是可能产生电子的温度（称为“阈温度”）为  $T \sim mc^2/k \sim 6 \times 10^9\text{K}$ 。用同样的方法我们可求出产生其他粒子的阈温度。显而易见，粒子的质量愈大，其阈温度就愈高。从宇宙的最初百分之一秒起，由于宇宙的膨胀，它的温度已下降到  $10^{11}\text{K}$ ，这个温度已低于一些质量较重粒子如 介子、中子和质子的阈温度。这就是说，这些粒子在此温度时产生的机会已变得很少了（当然不能讲绝对不产生，由于涨落现象，宇宙中局部区域的温度还可能高于  $10^{11}\text{K}$ ，因此还可能产生这些粒子）。考虑到它们间极其频繁的碰撞，随之的湮灭，宇宙中质量较大粒子的数目将开始减少，而质量较小的粒子，如电子、正电子和无质量的光子、中微子等，由于它们还在大量产生，所以尽管碰撞湮灭，但它们的总数并没有减少。此外，宇宙中的粒子频繁地碰撞，它们的自由程很短，这对光子而言亦是如此，因此那时的宇宙对辐射（光子）来说是不透明的。为此有人把那时的宇宙比作由辐射和物质搅成一锅沸腾的汤——“宇宙汤”。当然这锅宇宙汤对辐射而言是粘稠而不透明的。大爆炸后，经过  $0.11$  秒，宇宙温度由于膨胀而下降到  $3 \times 10^{10}\text{K}$ 。这时宇宙的成分仍然主要是电子、正电子、中微子、反中微子和光子。它们处于一种热平衡状态，这时宇宙的温度仍然高于这些轻粒子的阈温度。由于高温，此时宇宙中的能量以辐射能为主，其它形式的能量相对辐射能来说可略去不计。辐射能量密度可根据斯忒藩——玻耳兹曼定律为

$$u = \frac{8\pi^5 k^4}{15(hc)^3} T^4。$$

式中  $h$  是普朗克常数。由此可推算出此时宇宙的能量密度约大于  $10^{-$

$2\text{GeV}$ 。这种能量下宇宙中游离的中子和质子仍然不能组合成为稳定的原子核，因为原子核的结合能只有  $6\sim 8\text{MeV}$ ，将它除以玻耳兹曼常数  $k$ ，换算成的温度小于  $3\times 10^{10}\text{K}$ 。所以即使核子有机会合成为原子核，在这样的高温环境下也将被立即摧毁。同样的理由，使较重的中子通过衰变成较轻的质子的过程，比它的逆过程容易，因此在核子中，质子数逐渐增多而中子数在不断减少。估算表明，此时核子中质子约占  $62\%$ ，而中子占  $38\%$ 。

当温度进一步下降到  $10^{10}\text{K}$  时，宇宙时约为  $1.2$  秒。宇宙的能量密度随温度的四次方下降。按粒子物理理论，此时原来统一的弱作用与电磁作用、强作用之间的差别将显露出来。由于弱作用的强度分别是电磁作用强度的  $10^{10}$  分之一，强作用强度的  $10^{12}$  分之一，因此仅受弱作用制约的中微子几乎可看作为自由粒子，它已不再与其他粒子通过有效的相互作用来交换能量。这就是说，中微子从这时起，已不对宇宙的演化起任何积极作用，而处于“退休”状态，同时它也不再和电子、正电子、光子同处于热平衡之中，这就是所谓的“中微子退耦”。同时，用已叙述过的方法，得出那时宇宙中核子中质子与中子数之比为  $76/24$ 。

在  $13.83$  秒时，宇宙的温度为  $3\times 10^9\text{K}$ ，这个温度已低于电子和正电子的湮灭温度，此时电子和正电子的湮灭速率要比它们从辐射中产生的速率快得多，所以它们的数量将急骤减少。这样，在它们湮灭过程中所释放出的能量将使宇宙的冷却速度减缓；另一方面中微子由于已退耦，就得不到这份额外的能量，因此它的温度要比电子、正电子及光子的温度低  $8\%$ 。那时宇宙舞台上的主角只剩下了光子，可以说从那时起，我们所说的宇宙温度实际上就是光子的温度。由于温度的下降，稳定核的形成已成为可能，大量的中子和质子结合成重氢核（氘核），少量的中子和质子结合成氦核（两个中子与一个质子）。生成的氘核再和一个游离质子结合成氦的轻同位素  $^3\text{He}$  核，而  $^3\text{He}$  核又再与一个游离中子，或者氘核与一个游离质子组成普通的氦核  $^4\text{He}$ 。由于此时宇宙温度还偏高，上述形成氘核的过程还很艰难，因而此时能生成的氦核还不多。当然，与此同时游离的中子还在不断地衰变成质子，所以核子中的质子与中子数之比可升为  $83/17$ 。此外大量的正、负电子对湮灭所释发的能量，减缓了宇宙温度的下降，这样使得温度为  $10^9\text{K}$  的宇宙约可持续  $3$  分钟。此后，大部分电子与正电子已消失，不断得到能量补充的光子，它的温度要比处于退耦状态的中微子温度高出  $35\%$  左右。

到宇宙时  $3$  分  $46$  秒时，宇宙温度已下降到使氘核变为稳定氦核的合成过程也顺利得多的程度，此时中子数与质子数之比已下降为  $13$  比  $87$ ，所剩的这些中子几乎都结合到氦核中。由于氦核中的质子数与中子数均为  $2$ ，况且中子与质子的质量又相差无几，因此可推算出氦核的质量约占核子总质量的  $26\%$ 。但是，此时比氦核更重的原子核仍然形成不了。

到了大爆炸后  $34$  分  $40$  秒时，宇宙中大规模正、负电子湮灭过程已经停止。由于电荷守恒，宇宙中还剩下原有十亿分之一的电子，以平衡宇宙中质子的电荷（注意，这正是质子数与原有的电子数之比）。此外，这时光子的温度要比中微子的温度高出  $40\%$  左右。

再过  $40$  分钟后，随着宇宙的继续膨胀，它的温度已下降到足以使所有的中子与质子结合成氦核，氦核的合成过程终止了，多余的质子处于游离状态。由于其它粒子的质量相对于核子的质量可忽略不计，所以此时所生

成的氦核的质量约占宇宙总质量的 27%左右。至于要形成稳定的原子，当时的宇宙还是太热，一直要过了 70 万年之后，宇宙才能冷却到原子核和电子可组成稳定原子的阶段。原来众多的自由正、负电子已消失殆尽，宇宙中的物质对辐射而言，已变得畅通无阻而透明了。

当温度下降至  $10^3\text{K}$  时，光子的平均能量已低于  $13.6\text{eV}$ ，它们绝大多数再也没有能力可电离原子了，稳定的原子于是可大量形成，这就是辐射与物质的退耦，称为“光子的退耦”，宇宙于是开始进入“物质为主时期”。在此前，我们称宇宙处于“辐射为主时期”。光子退耦后，原子等物质开始聚合，逐渐形成恒星和星系，然后再过一百万年左右，高级的原子、分子复合物——生物才在宇宙中出现。

上述一帧帧清晰的宇宙演化图像是从如下基本观念出发的：宇宙学原理，即在大尺度上宇宙物质的分布是均匀和各向同性的，以及借助于哈勃定律等观测到的事实，并采用广义相对论及现代粒子物理理论。在此基础上我们不仅能给出一部令人目眩的宇宙演化史，而且还预言了一些后来被观测所证实的重要结果，如  $3\text{K}$  微波辐射背景等。这些发现反过来又使大爆炸学说能在众多的宇宙演化理论中鹤立鸡群，独占鳌头。

**标准时 (standard time)** 按全世界统一的时区系统计量的时间，又称区时。在同一瞬间，位于地球上不同经度的观测者测得的地方太阳时是不同的，因此需统一标准。19 世纪中期，欧美国家开始采用一种全国统一的时间，这种时间多以本国首都或重要商埠的子午线为标准，如英国采用格林威治时间，法国采用巴黎时间，美国采用华盛顿时间。这种时间在一国之内通用，并无不便，但随着远洋航海与长途铁路运输日益发达，国际交往越来越频繁，各国各行其时，给人们带来许多困难，因此在 19 世纪 70 年代采用加拿大工程师弗莱明提出的在全世界按统一标准划分时区，实行分区计时。

世界时区的划分，是以本初子午线为标准，从西经  $7.5^\circ$  到东经  $7.5^\circ$ 。（经度间隔为  $15^\circ$ ）为零时区；从零时区的边界分别向东和向西，每隔经度  $15^\circ$  划一个时区，东、西各划出 12 个时区；东 12 区与西 12 区相重合，全球共划分成 24 时区。各时区都以中央经线的地方时为本区的区时，相邻两时区的区时相差 1 小时。目前，全世界多数国家采用以时区为单位的标准时，并与格林威治时间保持相差整小时数。但也有少数国家（如圭亚那、利比里亚等）仍采用其首都的地方时为本国的统一时间。

我国幅员辽阔，从西到东横跨东 5~东 9 共 5 个时区。中华人民共和国成立后，全国采用首都北京所在的东 8 时区的区时，称为北京时间。北京时间比格林威治时间（世界时）早 8 小时，即

$$\text{北京时} = \text{世界时} + 8 \text{ 小时}。$$

**表面物理学 (surface physics)** 研究固体表面附近几个原子层内原子的排列、电子状态以及外来原子或分子的吸附对固体性质影响的一门新学科。表面物理学以及相关的表面分析技术是 20 世纪 60 年代以后迅速发展起来的近代固体物理学中的一个重要分支。固体表面通常指的是固体和低密度气体 ( $10^{-8} \sim 10^{-9}$  帕的超高真空下) 的界面。在表面处，由于原晶格三维周期性结构被破坏和表面吸附等原因，表面附近的几个原子层内的化学组成、原子排列、原子振动状态、电子态以及其他各种物理和化学性质，常常和体内有很大的差异。

**表面结构** 将一块晶体沿某晶面切开，若切开面附近的原子位置和电子结构不发生变化，所形成的表面就称为“理想表面”。事实上理想表面是不存在的。由于垂直于表面方向的晶格周期性中断，表面原子受力的情况与体内不同。这会使晶体表面附近 3~5 层原子的排列发生变化，在晶体三维周期性结构和真空之间形成一过渡层。对多数金属清洁表面，表面原子只有垂直于表面的位移，这将引起表面法向间距膨胀或收缩，而不会改变平行于表面的二维周期结构。但对于多数半导体和少数金属晶体清洁表面，平行于表面的原子排列的周期结构也发生变化，这种现象称为表面再构。晶体表面还经常出现台阶和各种缺陷。实际晶体表面常会吸附某些外来的原子或分子，吸附原子会引起基底表面原子的排列发生变化，形成再构表面；吸附原子本身会形成一层不同于衬底周期结构的有序排列或与表面原子混合组成有序的表面合金或形成化合物。研究晶体表面结构常用的实验手段是低能电子衍射 (LEED)，此外还有反射高能电子衍射 (RHEED)、场离子显微镜 (FIM)、表面扩展 X 射线吸收精细结构谱 (SEXAFS) 和扫描隧道电子显微镜 (STM) 等。

**表面成分** 固体表面由于吸附外来的原子或分子，以及体内杂质和某些组分向表面富集等原因，固体表面的成分常常不同于体内。表面成分的分析包括表面元素组成，表面元素的化学态及元素在表层的横向和纵向分布的测定等。测量表面各类物质的原子质量和原子序数可以确定表面元素的成分。常用的实验方法有 X 射线光电子谱 (XPS)、俄歇电子谱 (AES)、离子散射谱 (ISS) 和次级离子质谱 (SIMS) 等。

**表面电子态** 晶体表面在垂直于表面方向上晶体原子的周期势场被中断，与外部真空之间有一结构上的突变；在平行于表面的平面内仍然存在周期性。这种不同于晶体内部的表面势场使表面电子态 (又称电子结构) 具有特殊性：处于这种状态的电子定域在表面附近很窄的区域内，它的概率振幅随着离开表面距离的增加而按指数规律衰减。电子在表面层内仍是共有化的。当表面存在杂质或缺陷时，还有另一种表面态，例如晶体表面吸附外来原子后会形成稳定的吸附表面态。表面电子态的研究包括表面能级的性质、表面态密度分布、表面电荷密度分布及能量分布等的确定。常用的实验方法有紫外光电子谱 (UPS)、角分解电子谱 (ARPES) 和离子中和谱 (INS) 等。

**表面振动模** 表面处晶格的周期性被破坏，表面附近原子之间的弹性系数和排列情况与体内不同，因此表面原子的振动模式也与体内不同。它是一种局限在表面的格波，其传播方向沿着表面，其振幅随与表面垂直距离的增加而按指数规律减小。当表面有吸附粒子覆盖层时，通过对覆盖层振动模式的测定可推测吸附分子的结构、吸附粒子和表面的键合状态、键的强度以及吸附的确切位置等。此外还可以通过观察某些振动模式的激发来判断键的方向。研究表面原子振动的实验方法有红外反射谱 (IRAS)、拉曼散射谱 (RAMAN) 和电子能量损失谱 (EELS) 等。

**表面分析技术** 这是表面科学中的一个重要的分支。除前述提到的各种实验方法外，已开发的表面分析技术有一百多种。这些方法的共同特征是：利用电子、光子、离子、原子等各类粒子以及电磁场、热辐射或声波等对固体表面的散射，通过测量从表面散射或发射的粒子或电磁场的能谱、光谱、质谱以及空间分布或衍射图像，从而得到有关表面性质的各种

信息。

**表面张力 (surface tension)** 存在于液体表面层内，使液面有收缩趋势的一种作用力。表面张力的方向和液面相切，大小与液体的性质、纯度和温度等因素有关。

**表面张力的宏观表现** 表面张力使液体表面的面积趋向于尽可能最小。表面张力使自由液体表面呈球面形态。由于表面张力的存在，密度比液体大的小薄片状物体可以悬浮在液面上。

**表面张力的微观本质** 分子之间相互作用力在不同距离上可分别表现为引力和斥力，引力的作用力程大约是分子有效直径的几倍，而斥力的作用力程远比引力短得多，因而每个分子受到其他分子的作用往往表现为引力（内聚力）。当分子处于液体内部时，由于受到来自各个方向的周围分子的吸引作用，因而总的平均效果通常并不显示出宏观效应。而处于液体表面层内的分子则受到周围分子所产生的指向液体内部的吸引作用。越靠近液体表面，这种作用越大，从而迫使液体表面尽可能地收缩，如同绷紧的弹性薄膜那样，任何迫使表面“膜”扩大的作用都会导致表面层产生一种抗拒扩大的力，这就是表面张力。

**表面张力的定量描述** 表面张力的大小可用表面张力系数描述。设想在液面上作一长度为  $L$  的直线段，则表面张力的作用表现为在线段两边的液体以一定的力  $F$  相互作用，力的方向与线段垂直（与液面相切），大小与线段长度  $L$  成正比，即  $F = \sigma L$ 。比例系数称为表面张力系数，它表示该直线段单位长度上所受到的表面张力大小，单位是牛/米。与液体性质、纯度和温度有关，例如在 18℃ 时，纯水的表面张力系数  $\sigma = 73 \times 10^{-3}$  牛/米，水银的  $\sigma = 490 \times 10^{-3}$  牛/米。在日常生活中，人们往往在水中加入某种洗涤剂或溶入洗涤粉，以增强水的去垢作用，其物理原因是这类洗涤剂大大降低了纯水的表面张力系数，从而使洗涤剂溶液容易渗透到被洗物质的纤维之间，稍加搓洗就会使污垢微粒脱离被洗材料，达到去垢效果。

**并行接口 (parallel interface)** 解决 CPU 和外部设备间并行传送数据的接口芯片，共有两种这样的器件，一种是以硬件布线逻辑实现的，如 Intel 8212 芯片；另一种是以软件改变其工作方式的可编程序并行 I/O 器件，如 Intel 8255、Mc 6820 PIA 等。通常并行接口芯片有如下功能：两个或两个以上的具有锁存器或缓冲器的数据端口；每个数据端口都有与 CPU 用“应答”方式交换信号所必须的控制和状态信息，也有与外部设备交换信息所必须的控制和状态信息；每个端口可编程序指定中断或非中断方式工作；具有选片和控制电路；通常这类接口片可用程序选择数据端口，选择端口的传送方向，选择与 CPU 交换信息的方式（查询或中断）等等。因此并行接口片要有能实现这些选择的控制字寄存器，并由 CPU 用输出指令来写入。

**波 (wave)** 又称“波动”。振动的传播过程，是能量传递的一种形式。波是偏离平衡状态的一种扰动，且这种扰动随时间从空间的一个区域移动或传播到另一个区域。

**波的形式** 波的形式是多种多样的。它赖以传播的空间可以是充满介质的，也可以是真空。最常见、最普通的是机械波（如水波、声波等）和电磁波。

机械波是机械振动在介质中的传播过程。当介质中某点发生振动时，

它周围各点也会相继引起振动，振动由近及远地传播开去，就形成机械波。例如石块投入静水中，水面会掀起波纹，并逐渐向四周传开而形成水波。

电磁波是电磁扰动在空间传播的过程，即电磁场的传播过程。它与机械波不同，传播不需要介质，能在真空中传播。例如太阳发出的光波、各种无线电波都是电磁波。

微观粒子不但具有粒子性，且具有波动性，这种波称为物质波或概率波。如电子波、中子波。此外广义相对论还预言存在引力波。据认为，双星体系可能是一种较强的引力波源。

**波动方程** 波的特征可用数学语言来描述，这就是波动方程。它是线性二次偏微分方程，最简单的形式（如弦上的波动方程）有：

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)y(x, t) = 0,$$

$y(x, t)$  是质点位移， $v$  为波的传播速度。它给出了波函数随空间和时间的变化关系。若给出特定的边界条件，可求出波动方程的解，从而能深刻了解波的传播规律，认识波的本质。

描述微观粒子运动规律的波是概率波，其波动方程又称薛定谔方程，一般形式为

$$\left[\eta \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\eta^2}{2m} \nabla^2 - V\right]\psi(r, t) = 0,$$

其中  $\hbar$  是普朗克常数  $h$  除以  $2\pi$ ； $m$  为粒子质量； $V$  是势函数。

各种不同性质的波都遵循同一类数学方程——波动方程。因此任何一个物理量或变量，若满足波动方程，即它随时间和空间的变化与机械波或电磁波相似，则也称为波，如容器中物质粒子密度变化形成密度波。

**波形** 波形即是波函数的函数形状，波函数一般可写成  $F(r \pm vt)$ ，其中  $r$  是矢径的幅值，+和-号分别表示波沿正和负  $r$  方向的传播， $v$  为波的传播速率， $F$  可以是各种函数。

(1) 简谐波。F 函数的形式有多种多样，一种最简单的函数是正弦或余弦，即

$$A \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(r + vt)\right] \text{ 或 } A \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(r + vt)\right],$$
 这种波称为简谐波。

(2) 平面波。在空间直角坐标系  $(x, y, z)$  中，若  $r=x$ ，则在同一个  $y-z$  平面上，波在任一点都具有同样的值，这种波称为平面波。此时波面为平面，其波线是一簇与波面正交的平行线。从远处点波源传来的波也可看作平面波，如到达地球上的太阳光波。

(3) 柱面波。若  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ，这时形成的波是柱面波。其波面为一柱面，波的传播方向从圆柱的轴心（波源）沿径向向外。该波的振幅随离波源的距离增加而减小，所以是一种减幅波。

(4) 球面波。若  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ，这时形成的波是球面波。其波面为一球面。波的传播方向从球心沿半径向外。点波源发出的波就是球面波，振幅随离波源的距离增大而减小，因此也是一种减幅波。

(5) 纵波与横波。振动方向与波的传播方向一致的波是纵波，也称疏密波。如声波在介质中传播时，任何时刻各质点振动的相位不同，从而形成相间的密部和疏部，波的传播就像密部与疏部在向前移动。振动方向与传



播方向相垂直的波是横波，如弦上传播的波和电磁波。机械波的横波一般只能在固体介质中而不能在液体和气体中传播。

**波的能量** 所有的波都携带能量。例如机械波在弹性介质中传播时，介质会发生形变和运动，因而获得弹性势能与动能；电磁波（光波）在空间传播时因存在振动着的电磁场，而使空间具有能量。这种能量是从波源传播过来的。对于某一部分介质（或空间），在波传播过程中不断有能量传进，又不断有能量传出，波的传播过程不仅是振动的传播，又是能量的传播过程。

**主要性质** 波的主要特征用频率（或周期）和波长（或波数）来描述。频率反映波的时间周期性，而波长反映波的空间周期性。波还具有一些独特的性质，从经典物理学角度看，明显不同于粒子，这些性质主要包括波的叠加性、干涉现象和衍射现象等。但波又具有粒子性。现代物理学的研究已表明，波动也是一切微观粒子的基本属性。因此，波是宇宙中极普遍极广泛的现象。波的概念是物理学少数极其重要的概念之一，对波的研究已成为物理学最基本的课题之一。

**波长（wave length）** 波在一个振动周期内传播的距离。常用符号表示。也就是在波的传播方向上，两个相邻的同相位点（例如波峰或波谷）间的距离。波长描述波在空间上的周期性。它等于波速和周期之积，即  $\lambda = vT$ 。同一频率的波，在不同的介质中传播，波长不同。例如 1 千赫的声波在空气中传播时，其波长约为 34 厘米，在水中其波长约为 1.5 米。若波源相对介质运动，则要考虑多普勒效应，此时应以两个相邻的振动位相相同点之间的距离作为波长的定义。

波数是波长的倒数，即单位长度中所包含的波长数，单位为米<sup>-1</sup>或厘米<sup>-1</sup>。波数  $k = \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{v}$ ， $f$  为频率， $v$  为波速，有时也规定  $2\pi/\lambda$  为

波数。

**波带片（zone Plate）** 一种具有聚光作用的特殊衍射屏。从点光源 Q 发出的光在传播过程中遇到不透明屏上的小圆孔时，该圆孔仅让球面波 S 的一部分通过，见下图。设 R 为球面 S 的半径。为考察对称轴上

任意一点 P 处的光振动，连 QP 线与球面相交于 B<sub>0</sub> 点。令  $\overline{PB_0} = r_0$ ，以 P 点为圆心，分别以  $r_0 + \frac{\lambda}{2}$ 、 $r_0 + 2 \cdot \frac{\lambda}{2}$ 、 $r_0 + 3 \cdot \frac{\lambda}{2}$  ... 为半径作圆，这些与球面 S 交于点 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub> ...，于是有  $\overline{B_1P} - \overline{B_0P} = \overline{B_2P} - \overline{B_1P} = \overline{B_3P} - \overline{B_2P} = \dots = \frac{\lambda}{2}$ ，或者说波面上任何相邻两环形带所发出的次波到达 P 点时的光程差均为  $\frac{\lambda}{2}$ 。这样分成的环形带称为菲

涅耳半波带，简称半波带或半周期带。

可以证明，各半波带的面积近似相等，故任一半波带所发出的次波到达 P 点时的振幅  $a_k$  仅与各半波带至 P 点的距离  $r_k$  以及该距离指向和波面 S 在该点处法向的夹角  $\theta_k$  有关。半波带序数 k 增大， $r_k$  和  $\theta_k$  也随之增大。故各半波带所发出的次波对 P 点光振动振幅的贡献将随 k 值增大而减小，即  $a_1 > a_2 > a_3 > \dots > a_k > a_{k+1} > \dots$ 。因相邻两半波带的次波到达 P 点时相位相反，故 P 点的合振幅为  $A = a_1 - a_2 + a_3 - \dots + (-1)^{k+1} a_k$ 。若将各

奇数带的 $a$ 写成两个一半之和，如 $a_1 = \frac{a_1}{2} + \frac{a_1}{2}$ ，并近似取 $(\frac{a_1}{2} - a_2 + \frac{a_3}{2})$ ， $(\frac{a_3}{2} - a_4 + \frac{a_5}{2})$ ，...等均为零，于是有 $A = \frac{a_1}{2} \pm \frac{a_k}{2}$ ，其中 $k$ 为奇数时取正号，偶数时取负号。于是可以得到以下结论：P 点处光的振幅等于第一个半波带和最末一个半波带所发出的次波在该点处的振幅之和或差的一半。

### 波带片

用不透明材料涂在奇数带或偶数带上，使它们不透光，这样形成的衍射屏称为波带片。因为奇数带和偶数带对 P 点的贡献互相减弱，所以采用波带片后 P 点处的光强会增强许多倍。可见，波带片具有聚光作用。波带片也有类似于透镜成像的公式：

$$\frac{1}{R} + \frac{1}{r_0} = \frac{k\lambda}{\rho_k^2},$$

式中  $\rho_k = \sqrt{B_k B_0}$ ，为第 $k$ 个半波带的半径。若将 $\frac{\rho_k^2}{k\lambda}$ 看作焦距 $f$ ，则  $R$  和  $r_0$  分别相当于透镜成像公式中的物距和像距。波带片与透镜的区别，在于波带片有多个焦点，它们的距离分别是  $f/3$ ， $f/5$ ， $f/7$ ，...。当平行光入射时，在轴上这些位置也会出现亮点。

**波动说** (theory of wave) 一种关于光的本性的理论，由惠更斯最早提出。惠更斯在光学研究中作出了重要贡献，他从光是波动的传播这一观念出发，提出以他名字命名的原理：波在其中传播的物质的每一个粒子，应该不仅是把它的运动传给跟它位于由发光点引出的同一直线上的下一个粒子，而且也必须把一部分运动给与跟它接触的一切其他粒子，于是围绕着每一粒子都形成一个以那一粒子为中心的波。在此基础上，他对于光的本性看法是从光的产生和它所引起的作用两个方面来说明光是一种波动，他写道：“光同声一样，是以球形波面传播的，这种波同把石子投在平静的水面上时所看到的波相似。”与牛顿不同，惠更斯是光的微粒说的反对者，然而他自己关于光波的概念又是不完善的，错误地认为光只是一种纵波。他的波动说在解释光的干涉、衍射和偏振现象时也遇到了困难。于是在 18 世纪，微粒说在光学领域中占据优势。

19 世纪，托马斯·杨和菲涅耳等人的工作使得波动说又复苏起来。托马斯·杨以波动说圆满解释了薄膜颜色；用双缝实验显示了干涉现象。菲涅耳以杨氏干涉原理补充惠更斯原理，形成惠更斯—菲涅耳原理；提出了光的衍射理论；圆满解释了光的偏振现象；正确假定了光是横波。由于托马斯·杨和菲涅耳的一系列发现，不仅深化了人类对光的本性的认识，而且使波动说在光学领域中占据优势。

**波段** (wave band) 参见电磁波。

**波峰** (wave crest) 又称波幅。在任一指定时刻，波到达的各点都处于不同的振动状态，位移具有正向最大值的位置。反之，具有负向最大值的位置称为波谷。不同时刻，波峰和波谷的位置随时间在不断改变，它们的移动速度与波的传播速度一致。例如水波凸起的最高处是波峰，凹下的最低处是波谷，它们在不断地向前移动。

**波幅** (amplitude) 即波峰。

波腹 (antinode) 见驻波。

波谷 (wave trough) 见波峰。

波节 (node) 见驻波。

**波粒二象性 (wave-particle duality)** 微观粒子所具有的一种普遍属性。光和实物粒子都具有波动性和粒子性这两重属性。波粒二象性的观念是现代量子理论的基本出发点之一。

**光的波粒二象性** 历史上关于光的本性的研究过程中,牛顿认为光是由(经典)微粒构成的(1672年),而惠更斯认为光是波动(1690年)。近代的波粒二象性并不是这些朴素思想的简单组合。光的波动性主要指的是它的叠加性,即它具有干涉和衍射等特性。光的干涉和衍射等现象是19世纪初发现的。1864年英国物理学家麦克斯韦又建立了光的电磁理论。因此光的波动性已从理论上和实验上得到了充分肯定。光的粒子性是指光的量子性,即光或电磁波是由一份份具有最小单元能量和动量值的称为“光子”的基本粒子所构成,光的能量和动量等都是“量子化”的。1900年,普朗克为了解释黑体辐射实验引进了“能量子”概念。他认为物质的分子或原子振子所放出或吸收的光或电磁辐射的能量是不连续的。1905年爱因斯坦在解释光电效应时由进一步认为,光不仅在发射和吸收时显示出粒子性,而且在空间中传播时也具有这种粒子性。构成光或电磁辐射的这种基本粒子后人就称为“光子”。光的粒子性已为光电效应以及康普顿效应等大量实验所证实。

对于频率为  $\nu$ , 波长为  $\lambda$  的光, 其光子的能量  $E$  和动量  $P$  的值是

$$E=h\nu, p=h/\lambda$$

其中  $h$  为普朗克常数。上两式将光的两重属性, 即粒子性和波动性联系起来。

光的波动性和粒子性在任何过程中都不能区分开来。例如在光电效应实验中, 在不同方向上出射的光电子的分布(称为角分布)与入射光的偏振方向有关。这表明, 为了解释光电效应, 不仅要用到光的粒子性, 还要用到光的波动性。再如在干涉实验中, 如果把光的强度减弱到任一时刻只有一个光子通过狭缝, 人们仍可观察到干涉图样。这表明波动性是每一个光子的特性, 每个光子将与它自己发生干涉。

**实物粒子的波粒二象性** 关于实物粒子如电子、质子等具有波动性的假设最早是由法国物理学家德布罗意于1923年提出的。他认为, 与光的波粒二象性一样, “任何物体伴随以波, 而且不可能将物体的运动和这种波的传播分开”。与实物粒子相联系的波称为“物质波”或“德布罗意波”。这种波的频率和波长与实物粒子的能量和动量之间的关系与上述光的波动性和粒子性的关系形式一样。

1927年美国物理学家戴维孙和革末用电子束投射到晶体上, 发现了电子的衍射现象, 这时的衍射图样与将X射线投射到晶体上所出现的衍射图样完全类似。而且他们从这种衍射图样得到的电子波的波长与电子动量之间的关系与德布罗意关系算出的结果一致, 从而首先从实验上证实了电子具有波动性的假设。

波面 (wave surface) 见波阵面。

波片 (wave plate) 使寻常光(o光)和非常光(e光)之间产生相位延迟的晶片。常用的有四分之一波片和二分之一波片。后者又称半波

片。从单轴晶体中切割一片平行平板，使其表面与晶体光轴平行，厚度为  $d$ 。当平行光垂直表面入射时，入射面和主截面重合， $o$  光和  $e$  光的主平面重合，二者不改变传播方向。但波片的寻常光折射率  $n_o$  和非常光折射率  $n_e$  不同，故通过波片后，二者之间的光程差为  $(n_o - n_e) d$ ，即相位

$$\text{差} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d。 \text{厚度} d \text{ 满足条件：} (n_o - n_e) d = \pm \frac{\lambda}{4} \text{ 波片，}$$

称为四分之一波片，它使  $o$  光和  $e$  光产生  $\pm \frac{\pi}{2}$  相位差。厚度  $d$  满足条件

$$(n_o - n_e) d = \pm \frac{\lambda}{2} \text{ 或 } \pm \frac{\lambda}{4} \text{ 的波片，分别称二分之一波片或全波片，产生相}$$

位延迟  $\pm \frac{\pi}{2}$  和  $\pi$ 。波片的厚度与波长有关，例如对可见光来说， $\lambda/4$  波片厚度仅为  $10^{-5}$  厘米数量级，制造上相当困难。通常采用较厚的波片，使

$$\text{光程差为 } (2k+1) \frac{\lambda}{4} \text{，即相位差为 } (2k+1) \frac{\pi}{2} \text{。制作波片的材料可}$$

用单轴晶体的石英或方解石，也可用云母，后者虽是双轴晶体，但很容易按天然解理面撕成薄片，两光轴都和解理面差不多平行，可以符合做波片的要求。

#### $o$ 光 $e$ 光振动方向图

右图表示了波片内  $o$  光和  $e$  光的振动方向。设波片平面为纸平面，波片的光轴为图中的横轴。光正入射时， $e$  光振动在光轴方向上， $o$  光振动在纵轴方向上。如果有一任意方向振动的线偏振光正入射到波片表面上，其振幅为  $A$ ，振动方向与光轴的夹角为  $\alpha$ ，则它进入波片后将分解成  $o$  光和  $e$  光，它们的振幅分别为  $A_o = A \sin \alpha$ ， $A_e = A \cos \alpha$ 。

**波前 (wave front)** 即波阵面。

**波数 (wave number)** 见波长。

**波速 (wave velocity)** 波在单位时间内传播的距离，即波的传播速度。例如声波在  $0^\circ\text{C}$  的空气中传播速度为 332 米/秒；在水中约为 1500 米/秒；光波在真空中传播速度约为  $3 \times 10^8$  米/秒。波速与温度有关，如声速在室温时约为 340 米/秒。机械波的波速决定于介质性质（弹性模量和密度），对于纵波，弹性模量为体变模量  $k$ ，故

$$v = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

为介质密度。对于横波，弹性模量为切变模量  $G$ ，故

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

因固体的体变模量大于切变模量，故在固体中纵波波速远大于横波波速。

对于单色波（频率或波长单一的波）来说，波速等于相速度，即对应任一振动相位（如波峰或波谷）向前的速度，也就是波面传播的速度，其数值等于波长与波源振动频率之积：

$$v = \lambda f = \frac{\lambda}{T}$$

**波线 (waveray)** 又称波射线。形象表示波的传播方向的曲线。波

线上任一点的切线方向与波在该处的传播方向一致。在各向同性介质中，波的传播方向总与波面垂直，故波线总与波面垂直。但在各向异性介质中，波线不一定与波面垂直。波的能量总沿波线向前传递。

**波源** (wavesource) 又称振源。引起波动的初始振动系统。在弹性介质中，只要有一介质元在其平衡位置附近振动，周围的介质元在其弹性力作用下也发生振动，依次再引起其邻近质元的振动。这样振动就依次向前传播，形成波。这个最初振动的质元就是一个波源。地震时震源就是波源，人的声带振动就是声源，各种灯、激光器都是光源，无线电波的发射设备是一种电磁波源。

**波阵面** (wavefront) 又称波面。波传播时，介质中各点在平衡位置附近振动，位相相同（即位移大小和方向以及运动方向相同）各点组成的面。离波源最远的波面称为波前。如投石于静水中，水波的波面是一簇同心圆，最外面的一个就是波前。在各向同性介质中，波面的法线方向就是波的传播方向。按波面的形状可分平面波、球面波和柱面波。

**玻恩** (Max Born 1882 ~ 1970) 英国物理学家。

生于普鲁士的布雷斯劳。1901年入布雷斯劳大学。1907年获格丁根大学哲学博士学位。1915~1920年任柏林大学教授、法兰克福大学理论物理系主任。1921年任格丁根大学物理系主任。1933年，迁居英国，先后任剑桥大学和爱丁堡大学教授。1953年退休返回格丁根。他是英国皇家学会会员。

玻恩是量子力学的奠基人之一，获1954年诺贝尔物理学奖。1923年起，致力于量子理论的研究，年轻的海森伯当时是他的助教和合作者。1924年，海森伯力图创立一种新的理论，以解决量子理论中的一些直观概念问题。但他所设计的方案所产生的代数学却不具有交换律，即两个量的乘积决定于它们相乘的次序。玻恩得知后，立即提出要用矩阵代数加以解决。1925年，玻恩和海森伯、约旦合作发表了长篇论文，以严整的数学形式全面系统地阐明了海森伯的理论，给出了结论正确的自洽的量子力学体系，从而创立了矩阵力学。而量子力学这一名称正是玻恩1924年的一篇论文的标题。1926年，薛定谔以波函数为基础，提出与矩阵力学等价的波动力学。薛定谔本人把波函数看作是连续和实在的物质波的描述，而玻恩则指出，波函数在空间某一点的强度，即振幅绝对值的平方，必须理解为在相应位置上找到粒子的概率的度量，这就是著名的对波函数的统计解释。同年，还提出一种以微扰论为基础的方法，被称为玻恩近似法，来解决粒子碰撞的量子力学问题。他与维纳合作，把算子的概念引入量子力学中。并指出人们不能准确地测定一个电子的位置，只能根据波动情况，在某一点确定电子存在的概率，这为海森伯提出不确定关系建立了理论基础。1927年，与奥本海默合作，研究了双原子分子结构的量子理论。这一系列的贡献，使格丁根大学一时成为量子物理学家瞩目的中心。

玻恩对方法论和哲学问题也有浓厚的兴趣。他总是看到物理学与主要哲学问题的联系，分析物理学对认识论的贡献，力图从哲学上理解自然科学发展的新阶段。他认为，像绝对肯定，绝对精确，终极真理等一类观念都是些幻影，应该把它们从科学中排除出去。粒子运动的基本的过程，并不是服从决定论的规律，而是服从统计规律，从体系在目前状态的有限知识，借助于理论，人们可以推论出对于将来情形的猜测和预测，这也是用

概率术语表达的。著有《爱因斯坦的相对论》（1921）、《固体的原子理论》（1923）、《原子物理学》（1935）、《因果性和机遇的自然哲学》（1949）、《不息的宇宙》（1951）、《我这一代的物理学》、《我的一生和我的观点》（1968）等。

**玻耳兹曼**（Ludwig Eduard Boltzmann 1844~1906）奥地利物理学家。生于维也纳。1863年入维也纳大学学习，1866年得博士学位后，在维也纳的物理学研究所任教。尽管这个研究所规模很小，但学术空气甚浓，它的成员思想敏锐，对玻耳兹曼的影响极大。1869年任格拉茨大学教授。1873年起至逝世先后任维也纳大学、慕尼黑大学、莱比锡大学的数学、理论物理学、自然哲学教授。1899年当选为英国皇家学会会员。

玻耳兹曼是统计物理学的奠基人之一。早在大学学习期间，就得知麦克斯韦工作，他和麦克斯韦一样都企求通过分子的碰撞，用力学规律来解释气体的平衡态。1871年，在平衡态的统计理论中，提出了各态经历假说。把统计方法应用于实际气体，得出气体分子在重力场中的速度分布律，被称为麦克斯韦-玻耳兹曼速度分布律。1872年，导出了非平衡态的分布函数的运动方程，被称为玻耳兹曼积分—微分方程。这个方程非常复杂，在40多年的时间里，都未被解出，直到1916~1917年间，恩斯科和查普曼才分别求出对于稀薄气体的解答。现在，该方程经常被用于研究流体、等离子体和中子的输运过程。同年，根据系统的分子达到麦克斯韦分布函数所表示的分布时，系统处于稳定状态，以及碰撞过程的对称性，建立了著名的H定理。这个定理与熵增加原理相当，都表征着过程由非平衡态向平衡态转化的不可逆性。该定理在19世纪被称为玻耳兹曼最小定理。1877年，证明了熵同宏观态所对应的可能的微观态数目的对数成正比的关系。它后来被表述为

$$S=k\ln W,$$

其中k为玻耳兹曼常数，此式后来铭刻在他的墓碑上。1884年，根据麦克斯韦关于光压的假说，从理论上导出了热辐射有下列关系：绝对黑体辐射的能量与物体绝对温度的四次方成正比。在此之前，斯忒藩从当时实验结果外推而得到这个关系，但无理论根据，仅是个猜想。因此这个关系被称为斯忒藩-玻耳兹曼定律。它对于普朗克的黑体辐射理论研究有很大启发。

玻耳兹曼十分关心自然科学的哲学问题。他为了捍卫原子论，积极地与以奥斯特瓦尔德为首的唯能论者作斗争，尽管他与奥斯特瓦尔德私交很好。为了坚持唯物论，在认识论方面则与以马赫为首的经验主义者作斗争。列宁曾对玻耳兹曼的哲学观点给予肯定的评价。玻耳兹曼还是一位很好的教师，他极力推崇讨论式的教学和坚持对学生严格要求，因而博得学生的敬重。然而来自气体动力学理论反对者的不断攻击，以及疾病缠身等苦恼，导致他患精神抑郁症，他于意大利度假时的自杀可能与此有关。

**玻耳兹曼统计**（Boltzmann statistics）研究服从经典力学规律的近独立粒子集合的统计方法。

按经典力学的观点，同一种物质的近独立粒子是可分辨的。如果在某一时刻，组成某个系统的N个近独立粒子的坐标和动量已被确定，则整个系统在这一时刻的微观状态也就被确定。从分子相空间看，N个代表点构成在各个单粒子态上的一个分布。N个代表点的不同分布，相应于系统的

不同的微观状态。但在宏观上，系统的状态参量是由处于分子相空间中不同能量层内分子代表点数目的一套填布数分布来确定的。N 个代表点的不同填布数分布，相应于系统的不同的宏观状态。

考虑一个处于平衡状态的由大量独立粒子构成的孤立系统，它具有确定的粒子数 N 和体积 V，其能量在  $E \sim E + \Delta E$  ( $\Delta E \ll E$ ) 之间。以  $\epsilon_i$  和  $g_i$  分别表示第 i 个能量层的能量和该能量层所划分成的相格数，显然处于同一能量层内不同相格中的代表点表示相应粒子处于不同的微观状态。由于在同一能量层内不同相格中两个代表点状态的交换并不改变填布数的分布，也就是不改变系统的宏观态，然而系统的微观状态却因两粒子状态的互换而发生改变。以  $\{a_i\}$  表示粒子可实现的一个填布数分布的序列，显然  $\{a_i\}$  必须满足以下条件： $\sum_i a_i = N$ ， $\sum_i \epsilon_i a_i = E$  ( $i = 1, 2, \dots$ )。由于经典粒子可分辨性以及任意多经典粒子可以共同占有同一相格，因此与填布数分布  $\{a_i\}$  对应的系统可能出现的不同微观状态数为

$$\Omega = \frac{N!}{\prod_i a_i!} \prod_i g_i^{a_i}$$

根据统计物理的等概率假设，对于处在平衡状态的孤立系统，每一个可能的微观状态出现的概率相等，因此使  $\Omega$  为极大的分布，出现的概率也最大，这个分布称为最概然分布。

利用拉氏乘法，可以得到经典近独立子系统的最概然分布为

$$\alpha_i = g_i e^{-\alpha - \beta \epsilon_i}, \quad (\beta = \frac{1}{kT})$$

这个分布就称为玻耳兹曼分布。其中  $e^{-\alpha} = \frac{N}{Z}$ ， $Z = \sum_i g_i e^{-\beta \epsilon_i}$  称为配

分函数，它在统计物理中有着重要的作用。选取  $N=10^{19}$ ，当原来处于最概然分布的每个能层内的粒子数仅仅偏离万分之一，形成一个新的分布，

$\frac{\delta a_i}{a_i} = \pm 10^{-4}$ ，可以得出对应于后者分布的微观状态数  $\Omega'$  与对应于最概然

分布的  $\Omega_M$  之比为  $\frac{\Omega'}{\Omega_M} \approx \epsilon^{-10^{11}} \approx 0$ ，因此最概然分布的微观状态数非常接

近于全部微观状态数，可以近似地认为平衡态下孤立系统的近独立粒子实质上处于玻耳兹曼分布。

由玻耳兹曼分布可以求得理想气体的热力学性质，但会出现吉布斯佯谬；也可以导出能量均分定理，但在低温下无法解释固体热容量随温度下降很快的实验事实，这些问题只有用量子统计理论才能得以解决。

麦克斯韦速度分布仅仅讨论分子速度的分布而不管分子所处的空间位置，玻耳兹曼分布既考虑每个分子的速度（动量）又考虑每个分子的空间位置，因此麦克斯韦速度分布是玻耳兹曼分布的一个应用，可由玻耳兹曼分布导出。在吉布斯发展的系统理论中，考虑了全部粒子的空间位置和动量，因此玻耳兹曼分布是正则分布的一个应用，可由正则分布导出。

玻尔 (Niels Henrik David Bohr 1885 ~ 1962) 丹麦物理学家，原子结构理论的奠基者，对应原理的提出者，哥本哈根学派的创始人。

生平 玻尔 1885 年 10 月 7 日出生于哥本哈根。在中学时代已是一个

思想敏锐的学生，且是班上的中心人物。1903年入哥本哈根大学，主修物理学。在大学时代就作为一个理解力不一般的学生而出众，通过极为勤奋的学习，为以后的发展打下了坚实而雄厚的基础。作为富有创造才能的大学生，于1906年完成了通过观察有规律的振动射流精确测出水的表面张力，荣获丹麦科学院的金质奖章。1909年和1911年分别以关于金属电子论的论文获得哥本哈根大学的科学硕士和哲学博士学位。随后来到剑桥大学，希望在J.J.汤姆孙指导下继续电子论的研究工作。可是汤姆孙对这个课题已不感兴趣，并且鉴别不了玻尔论文的重要性，但这没有妨碍玻尔在剑桥大学卡文迪什实验室竭尽全力地工作。几个月后，赴曼彻斯特，参加了以卢瑟福为首的科学集体。1912年3月至7月这段期间，玻尔专心致志，为他在物理学上取得的突出成就——原子结构理论奠定了基础。该年夏天回国，在母校任讲师，利用课余时间继续研究扩展自己的理论。1913年，先后发表了三篇著名的论文，为20世纪原子物理学开辟了道路。

### 科学贡献

**原子结构理论的奠基者** 电子被发现后，J.J.汤姆孙根据1902年开尔文提出的实心带电球的想法，提出了他的原子结构模型。几年后，卢瑟福用粒子散射实验否定了汤姆孙的模型，提出了有核原子模型。1912年，玻尔对卢瑟福的有核原子模型产生很大兴趣，他坚信这个模型是符合事实的，但又发现这个模型与经典理论所产生的矛盾。一是电子绕原子核转动具有加速度，按照经典电动力学的概念，这样的电子应以电磁波形式辐射能量，轨道会愈来愈小，最终会落到原子核上，于是就会得出原子是不稳定的推论，但事实上原子是稳定的。二是由于辐射，电子转动的频率必然不断改变，因而原子光谱应是连续光谱，但事实上原子光谱却是分离的线状光谱。玻尔分析了上述矛盾，于1913年7月、9月和11月，以《论原子构造和分子构造》为题，先后分三大部分发表了长篇论文。在这些论文里，玻尔把光谱现象、普朗克的量子论和爱因斯坦提出的光量子论，以及卢瑟福的原子模型，这三个看来互不相关的东西结合在一起，制定了量子化的原子结构模型，提出了量子态的崭新概念。玻尔假定，电子不能在任意轨道上运动，只能在一组特别的分立的轨道上运动，这些分立的轨道是由量子化条件决定的，即轨道角动量只能取与不连续整数成正比的值。对应着这些特定的分立轨道，原子具有特定的分立能态。在通常情况下，电子处于和最低能态相对应的轨道上，根据量子化条件，在这个轨道的内侧不能再有轨道，这样就可以说明原子的稳定性。玻尔还假定，电子可以从能量低的轨道向能量高的轨道跃迁，也可以从能量高的轨道落到能量低的轨道。这时原子要吸收或发射光，光的能量等于电子轨道间的能量差，于是就解释原子光谱是分离的线状光谱而不是连续光谱的事实。玻尔依靠这个原子结构理论，不仅定量地说明了氢原子的光谱，而且还定性地解释了原子的化学行为和它们的光谱线。

**对应原理的提出者** 玻尔在对量子论的发展中，为了更深入地探索经典理论和量子理论之间的关系，于1918年提出著名的对应原理。该原理认为，按照经典理论来描述的周期性体系的运动和该体系的实际量子运动之间存在着一定的对应关系；具体地说，体系的经典广义坐标傅里叶系数和体系的跃迁概率之间存在着简单的对应关系。这一原理一经提出，便在量子论的发展中一直起着指导性的作用。应用这个原理可以给塞曼效应以量



子论的解释，对于经典理论所不适用的斯塔克效应也有较为满意的解释，对原子中电子的分组和元素周期表以及分子的形成都作出了相对合理的解释，甚至后来还成了海森伯矩阵力学的直接的前奏。由于这些辉煌的成绩，玻尔获得了 1922 年的诺贝尔物理学奖。

哥本哈根学派的创始人 1921 年，玻尔不为国外的优越条件所吸引，而在自己所诞生的国土上倡导建立了哥本哈根大学理论物理学研究所。由于玻尔的辛勤努力，一个不到 500 万人口的国家，成了当时国际物理学的三大中心之一，并一直被许多物理学家誉为“物理学界的圣地”。玻尔以他的崇高声望在自己周围吸引了一批优秀的青年物理学家，如海森伯、泡利、狄拉克、朗道、克莱因、克拉默斯、布洛赫等，形成了哥本哈根学派。在玻尔强有力的领导下，这个学派对现代物理学的发展作出了重大贡献。而玻尔作为该学派的创始人，他对量子力学原理的深刻分析更是产生了深远的影响。1924 年，玻尔与克拉默斯和斯莱特提出了概率波的概念，这是牛顿以来理论物理学中的全新概念。后来，当量子理论的数学框架确定以后，玻恩采用了这个概率波的观念，并给被看作概率波的形式系统中的数学量以清晰的定义，从而作出了量子力学的统计解释。再有，作为哥本哈根解释的不确定关系，虽然首先是由海森伯于 1927 年提出的，然而这个关系的最终的完备表述——互补原理，却应归功于玻尔。在玻尔领导哥本哈根学派长达 40 年之久的学术生涯中，每当物理学取得突破性的进展，他总是下很大功夫从哲学角度对有关问题作出解释和概括。海森伯不确定关系的提出，引起了一些带根本性的哲学争论：世界的运动规律在实质上就是统计性的吗？决定论的观点是否必须放弃？量子力学是不是一种“完备的”理论？怎样正确理解因果原理？是否必须引用多值逻辑来确切地表述量子力学？微观客体和测量仪器之间到底是什么样的关系？人对事物的认识有没有最终的界限？等等。1927 年，玻尔首次提出的互补原理，就是试图对这些问题作出满意回答的一种很有影响的理论。该理论的主要论点是“量子论的本性迫使我们把空间-时间坐标表示和因果性要求看作是各自用表示观察和定义的理论化的描述的两个彼此互补但又互斥的特征，而这两者的结合则是古典理论的特征。”这就是说，按照玻尔的看法，物质世界中的客体、精神世界中的概念、语言文字中的单词全都具有许多意义不同的“方面”，犹如数学中多值函数的许多值。这些方面是互补的，因为一旦承认了某些方面，就必须放弃另外一些方面。但是，那些另外的方面却又不是可以彻底放弃的：在适当的条件下，我们又不得不承认它们而放弃在另外条件下曾经承认的那些方面。在这种意义上，这许多“方面”又是互补的。按照这种理论，微观客体的粒子性和波动性，就是这种既是互斥又互补的两个方面。追求这两个方面中哪一个方面更“基本”是毫无意义的，只有而且必须把这两个方面全部考虑在内，才能而且必能得到事物的完备描述。玻尔还认为，互补原理是因果原理的“合理推广”，在他看来，为了容纳和排比“我们的经验”，因果原理是过于狭窄的，必须用互补原理这种“更加广阔的思维框架”来代替它。尤其是在他的晚年，他用这种理论阐述了物理科学、生物科学、社会科学和哲学中的无数问题，在西方学术界产生了相当重要的影响。

对原子核物理学的贡献 玻尔不仅对原子结构研究应用量子论作出了贡献，而且从 30 年代中期起，他和他的研究所开始用更大的精力来研究原

子核物理学。1936年，玻尔提出核的复合态的概念，认为低能中子进入核内后会和核子发生强相互作用而使许多核子受到激发，形成复合核。1937年，玻尔又提出核的液滴模型，认为核中的粒子有点像液滴中的分子，它们的能量服从某种统计分布规律，粒子在“表面”附近的运动导致“表面张力”的出现。这种模型能够解释一些实验事实，是有关核结构的第一种相对正确的模型，从而在奠定核反应的理论方面具有重要意义。在此基础上，玻尔曾正确预言由慢中子引起核裂变的是铀-235而不是铀-238。他和惠勒于1939年在《物理评论》上发表的论文，被认为是这一期间核物理学方面的重要成就，正是玻尔等在这方面的贡献导致了核能的大规模释放。

玻尔半径 (Bohr radius) 见原子半径。

玻尔模型 (Bohr model) 描述氢原子能量状态的半经典理论。1913年由丹麦物理学家玻尔提出。该模型包括两个基本假设：定态假设：氢原子中存在一系列可能的电子运动的稳定轨道，电子在这些轨道上运动时处于稳定状态（这种状态的能量保持不变，称为“定态”），此时电子并不辐射电磁波。量子跃迁假设：原子中的电子从一个能量为  $E_i$  的状态到另一个能量为  $E_f$  的状态跃迁过程中，将发射（或吸收）光子，其频率由下式确定：

$$h\nu = |E_i - E_f|,$$

其中  $h$  为普朗克常数。

由于原子中的电子与原子核之间的主要作用是库仑力  $f_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$

（万有引力忽略），这时电子绕核作圆周运动所需的向心力  $\frac{mv^2}{r}$  便由这库仑力提供。由此可以得到确定电子运动轨道半径的方程： $mv^2 r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}$ 。为了回答哪些半径的轨道才是稳定的轨道这个问题，玻尔采用了

如下“角动量量子化条件”：电子的轨道角动量等于  $h$  ( $h = h/2\pi$ ， $h$  为普朗克常数) 整数倍的轨道才是稳定的，即  $mvr = nh$ 。结合以上两式，便得出稳定状态的轨道半径为

$$r = n^2 a_0,$$

其中  $a_0 = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{me^2} = 0.529 \times 10^{-10}$  米。 $n = 1$  时电子的轨道半径，称为第一玻尔半径，简称玻尔半径。定态能量（电子的动能与库仑势能之和）为

$$E_n = -I \frac{1}{n^2},$$

其中  $I = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2a_0} = 13.6$  电子伏，称为氢原子的“电离电势”。氢原

子能量最低的状态相应于  $n=1$  的状态，称为“基态”。氢原子的基态能量为  $E_1 = -I = -13.6$  电子伏。 $n=2, 3, 4, \dots$  的状态分别称为第一激发态，

第二激发态，第三激发态等，相应的能量分别为 $E_2 = -\frac{I}{4} = -3.40$ 电子伏， $E_3 = -\frac{I}{9} = -1.51$ 电子伏， $E_4 = -\frac{I}{16} = -0.85$ 电子伏等。可见氢原子的能量（或能级）是分立的，或者说氢原子的能量是“量子化”的。

根据玻尔模型第二个假设，当电子从较高能级 $n_1$ 跃迁到较低能级 $n_2$ （即 $n_1 > n_2$ ）时，将发射频率为 $\nu = \frac{E_{n_1} - E_{n_2}}{h}$ ，波数为 $k = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$ （ $c$ 为真空中的光速）的光，所以有

$$k = R \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right),$$

其中 $R = \frac{I}{hc} = \frac{I}{2\pi\hbar c}$ ，这就是氢光谱的里德伯公式，里德伯常数即为 $R$ 。

玻尔模型的这些结果与氢光谱的实验值很好符合。

玻尔模型发表之后不久，索末菲于1916年将玻尔的圆轨道推广为椭圆轨道，并引入了相对论性修正，解释了部分当时已观察到的氢光谱的精细结构及碱金属的光谱。

玻尔的氢原子模型组合了普朗克的量子论，原子的有核模型观念，以及关于氢光谱的里德伯-里兹组合原则。它的两条基本假设，即定态假设和量子跃迁假设本身就否定了经典物理学对原子结构这类微观现象的适用性。根据经典物理学观念，绕着原子核运动的电子要辐射电磁波，它的能量因此将不断减少，电子运动的半径也将随之不断减小。最后电子落到原子核上，正负电荷中和，原子发生崩溃而消失。可见在经典物理学中，原子是不稳定的；原子发射的光谱频率是连续的。但是经典物理学的这两个结论显然与实验事实相悖。实际的原子是稳定的，原子的光谱线是分立的。玻尔模型试图绕过经典物理学的这些困难，直接从实验事实出发，建立一种新的理论，以便能够解释这些事实，特别是关于氢光谱的大量实验事实。玻尔模型将量子论思想引进原子结构的研究领域，清楚地显示出经典理论在这些领域的不适用性；玻尔理论还建立了定态、能级、量子跃迁等概念，这些概念在量子物理学中非常有用。

玻尔模型也存在明显的局限性，它只是一种半经典理论。该理论虽然引进了分立的定态概念，从而避免了完全经典理论中原子的不稳定性等问题，但仍然保留了轨道概念。而根据量子理论，所谓定态，是指能量确定的状态，而不应理解为轨道确定的状态。根据波粒二象性，氢原子中的电子实际上不再具有明确的轨道，经典力学中的轨道概念在量子理论中并不存在。

**玻色-爱因斯坦统计 (Bose-Einstein statistics)**

参见量子统计。

**玻色子 (boson)** 自旋为0或正整数的粒子统称为玻色子。如介子、光子以及 $\pi$ 粒子、氦的同位素 $^4\text{He}$ 原子等。一切具有偶数个核子的原子核也是玻色子。全同玻色子系统服从玻色-爱因斯坦统计规律性。这类系统中的所有粒子在极低温度下可能都会落在最低能量状态，这种现象称为

玻色凝结。

**玻意耳** (Robert Boyle 1627 ~ 1691) 英国物理学家、化学家。生于利斯莫尔。曾在伊顿公学读书。1654 年到牛津开始从事物理学和化学方面的研究。积极参加英国皇家学会的创建活动，1680 年被选为皇家学会会长。

在物理学方面，1659 年，由助手胡克的协助，改进了盖利克发明的抽气机，利用它作了许多实验（证明空气的弹性，确定空气的比重。测定空气的稀薄程度等）。1661 年，由助手汤利的协助，对一端封闭的弯管内气体体积随压强的变化作了实验研究，发现了气体体积与压强成反比的规律；1676 年，马略特也独立地发现这个规律（因此，叫做玻意耳-马略特定律）。为了进行他的实验，他研制成气压计，并于 1662 ~ 1663 年引入“barometer”（气压计）这个名称。他还最先对固体的弹性进行研究。表述了关于白光的复杂性、感应起电的可能性等思想，主张热是分子的运动。在化学方面，拥护原子论假说，认为一切物体都是由较小的、完全相同的粒子组成的。1661 年，表述了接近于近代的化学元素的概念，区分了化合物和混合物，并把实验方法引入化学之中，从而为化学这门科学的形成奠定了基础。著有《怀疑的化学家》（1661）、《关于空气的弹性及其影响的物理-化学新实验》（1660）、《关于颜色的实验和考虑》（1664）、《各种形式和性质的起源（根据微粒哲学）》（1666）等。

**玻意耳定律** (Boyle's law) 参见气体实验定律。

**泊松亮斑** (Poisson bright disc) 根据菲涅耳的衍射理论和实验而得到的亮斑。1818 年，巴黎科学院举行了一次规模很大的科学竞赛。竞赛题目为：利用精确的实验来确定光线的衍射反应；从这些实验中，用数学归纳法推导出光线通过物体附近时的运动情况。竞赛评奖委员会由拉普拉斯、比奥、泊松、阿拉哥、盖-吕萨克 5 人组成。前三位是微粒说的拥护者，阿拉哥是波动说的支持者，盖-吕萨克是中立派。在阿拉哥的支持下，年轻的菲涅耳提交了他的论文。该论文从横波出发，圆满地解释了光的偏振，用波带法定量地计算圆孔、圆板等形状的障碍物产生的衍射花纹，结果与实验吻合。但评委之一的泊松就菲涅耳理论算出小圆板的阴影后方的中心点应为亮斑持有异议。泊松认为这是违反光线直进原理的，是不可能的。在此关键时刻，阿拉哥用实验证实了亮斑的存在。在实验事实面前，拉普拉斯、比奥与泊松这三位学者只好认输，奖金终于颁发给了菲涅耳。有意思的是，后人不把此亮斑称为菲涅耳亮斑或阿拉哥亮斑，而是称为泊松亮斑。

**泊肃叶公式** (Poiseuille equation) 又称泊肃叶定律。确定粘滞流体在水平细圆管（一般为毛细管）中流量的公式。此式由法国科学家泊肃叶于 1842 年从实验中建立，故名。当粘滞系数为  $\eta$  的流体流过半径为  $R$ 、长为  $l$  的圆管时，每秒流过管中任一横截面的流体体积流量为

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta l} (p_1 - p_2),$$

其中  $P_1 - P_2$  为圆管两端的压力差。

若将伯努利方程用于研究水平圆管内的流体，因水平圆管内不同截面上流速相同，高度相同，则各截面上压力相等，即在水平管内维持流动不

需要压力差。而按泊肃叶公式，若无压力差，则流量等于零，即需要压力差才能维持水平管内的流动。实际情况是流体有粘性，为保证流体的流动，必须利用压力差来克服内摩擦力，因此泊肃叶公式更正确些。

流体粘性越大，流速越小，管子越细，泊肃叶公式越准确。在细管内缓慢的流动可看作层流，例如血液在支血管和微血管中的流动都可看作是层流并可应用泊肃叶公式。心肌梗塞患者血液的粘性将增加，急性炎症和其它许多病症也会不同程度地引起血液粘性的变化，研究血液的粘性流动对于病理学、诊断学和药学都很有价值。利用泊肃叶公式，通过量度血管两端的压力差、流过的流量及血管的几何参数，可测定血液的粘滞系数。

伯努利 (Daniel Bernoulli 1700 ~ 1782) 瑞士物理学家、数学家。生于荷兰格罗宁根。1716 ~ 1720 年先后在巴塞尔大学学医、海德堡大学学哲学、斯特拉斯堡大学学伦理学，此后专攻数学。1725 ~ 1733 年在俄国彼得堡科学院工作。1733 年起回到巴塞尔大学任教，1750 年起主持实验物理教研室。

丹·伯努利是伯努利家庭中成就最大的科学家，他曾因天文测量、地球引力、潮汐、磁学、洋流、船体航行的稳定、土星和木星的不规则运动、振动理论等成果而十次获得法国科学院年度奖，还被聘为圣彼得堡科学院的名誉院士。在物理学方面，以流体力学的贡献最为突出，流体动力学这个学科就是由他命名的。他用流体的压强、密度和流速作为描述流体运动的基本物理量，得出著名的流体力学的基本方程（伯努利方程），这个方程实质上是机械能守恒定律的特殊情况。提出了“流速增加、压强降低”的伯努利原理。坚持热是物体微小粒子运动的假设，从物质的分子结构假设出发，首次得出玻意耳-马略特定律的理论说明。把气压看成是气体分子对容器壁表面撞击而产生的效应，建立了分子运动论和热学的基本概念。1760 年，用自己制作的静电计，得出如下结论：电荷之间的相互作用力与电荷之间距离的平方成反比。在数学方面，其研究涉及代数、概率论、微积分、级数理论、微分方程等多学科的内容，取得了重大成就。他还将级数理论运用于有关力学问题的研究之中，有力地促进力学发展。著有《流体力学》(1738)。

伯努利方程 (Bernoulli equation) 流体力学的基本方程之一。对于密度均匀的无粘流体的稳定流动，沿流线表述能量守恒定律而得出的方程。瑞士物理学家伯努利于 1738 年从实验和推理中建立此方程，故名。根据机械能守恒，对于密度均匀的稳定流动 ( $v$ 、 $p$ 、 $\rho$  都只随位置而变，但不随时间而变) 的理想流体，在其中每一流管中的任一点处有

$$\frac{v^2}{2} + v + \frac{p}{\rho} = C,$$

式中， $v$ 、 $p$  表示流体的速度与压力， $\rho$  为密度， $v$  为单位质量流体的势能， $C$  为常量（但对不同流管有不同的值）。在只有重力作用时， $v = gh$ ， $h$  为离某一零势能位置的高度，此时有

$$\frac{v^2}{2g} + h + \frac{p}{\rho g} = \frac{C}{g},$$

此式即为伯努利方程。它表示在同一流线上，各点的流速头（流速高度）、位置头（位置高度）和压力头（压力高度）之和为一恒量。如果从

连续性方程出发，能求出在管道中各处的  $v$  值，再根据伯努利方程可求出各高度为  $h$  处的压力  $p$ 。在管道横截面形状或面积发生突变处， $\frac{v^2}{2}$  可

能有一半左右转化为热能，造成不必要的动能损耗。由于流体的粘滞性，公式的恒量  $C$  也会随管子增长而有所减小。伯努利方程在水力学和化学工程等方面有广泛的应用。

**不等臂天平** (balance of differing in arms) 是砝码质量与待测物不相同，而横臂可以改变的一种天平。其总效应是力矩不变的原理使天平处于平衡指零状态。例如磅秤就是一种不等臂天平。磅秤的砝码指示值为 20kg，实际重量只有 1kg，说明不等臂天平的两臂之比为 1 : 20。为了不等臂天平的臂有足够的强度和准确的比例值，机械结构较为复杂，不易直接明白工作原理。家用的木杆秤，利用支点位置的变化，可在不改变秤砣的条件下，改变量程。

不等臂天平在增大砝码臂的同时，再使砝码有适当的增减，使天平平衡，这就是目前大量使用的质量秤衡仪。例如磅秤的砝码组；测量液体密度的韦斯特发尔秤等等，都是不等臂天平。

**不可逆过程热力学** (thermodynamics of irreversible processes) 研究热力学系统处于非平衡态时的特征行为和状态演化的宏观唯象理论，又称非平衡态热力学。

**唯象的实验定律** 早在 1687 年，牛顿通过观察液体的流动总结出牛顿粘滞定律：当流体沿  $x$  轴方向运动时，流体的粘滞胁强与速度梯度成正比。后来，对于热传导现象，傅里叶在 1822 年又得到傅里叶定律：单位时间内通过物体单位面积的热量与温度梯度成正比，1855 年，斐克提出了关于扩散现象的斐克定律：单位时间内通过单位面积的质量与浓度梯度成正比。这些实验定律都是从因物质的某一性质的不均匀而引起的输运现象中得出的，而这类输运过程都是不可逆过程（见气体的输运现象）。如果把输运的量（单位时间内通过单位面积的输运量）称为“流”，以  $J$  表示，把引起输运的原因（不均匀性形成的梯度）称为“动力”，以  $X$  表示，则以上实验定律可以统一表示为：“流”与“动力”成正比，即， $J=LX$ 。在许多情况下，几种不可逆过程往往会同时出现，有几种“动力”同时作用，几个“流”就同时存在，于是上式可推广为  $J_k =$

$\sum_i L_{ik} X_k$ 。这就是不可逆热力学最初出现的一个唯象关系式，比例系数  $L_{ik}$  称为唯象系数。当动力很弱时，体系的状态偏离平衡态很小，唯象系数  $L_{ik}$  可以近似地看作与“动力”无关的常数。在这种情况下，“动力”与“流”之间呈线性关系。满足这种线性关系的非平衡态称为线性非平衡态。研究这类不可逆过程的热力学称为线性不可逆过程热力学。

**昂色格倒易关系** 1931 年，昂色格发现了在线性不可逆过程中唯象系数之间的对称性质，提出了著名的昂色格倒易关系：如果一个“动力”  $X_i$ （例如某个温度梯度）的单位增加引起一个“流”  $J_k$ （例如某种扩散过程）的增加，那么与“流”对应的“动力”  $X_k$ （例如某种浓度梯度）的单位增加也会引起与“动力”  $X_i$  对应的“流”  $J_i$ （例如热流）的增加，而且  $J_i$  的增加在数值上等于  $J_k$  的增加。这个倒易关系在数学上可以表述为，由

唯象系数构成的矩阵是对称矩阵，即  $L_{ki}=L_{ik}$ 。昂色格倒易关系的提出是人们从研究平衡态热力学发展为研究非平衡态热力学的一个转折点，正是从这个基本关系式中，人们发现在非平衡区发生的种种不可逆过程，有着与微观结构无关的内在联系和演化规律，它们可以与平衡态热力学相媲美。以后，日本的久保学派又提出了在线性非平衡区的涨落——耗散定理和线性响应理论，从而把对不可逆过程的研究推进了一大步。

**局域平衡假设** 研究不可逆过程热力学的目的在于通过增加新的假设来扩展和延伸平衡态热力学的结论和方法。其中一个主要的假设就是局域平衡假设。它假定，一个非平衡系统可以被划分为许多小体积元，每个小体积元在宏观上足够小，以至它的性质可以用该体积元内部某一点附近的性质来代表，但每个小体积元在微观上又足够大，包括大量分子，以至仍然满足统计处理的要求。在某个时刻  $t$ ，虽然整个系统处于非平衡态，熵函数变成一个与组分浓度以及浓度随空间和时间变化有关的十分复杂的泛函，然而作了如上假设后可以认为，每个小体积元近似处于局域平衡态，熵仅仅是局域态变量的函数。根据熵的可加性，整个非平衡态系统的熵就是这些局域熵的总和。此外，还假定上述近似定义的局域热力学变量之间仍然满足平衡态热力学的关系。以上两个假设合起来就称为局域平衡假设。

**最小熵产生原理** 线性不可逆过程热力学的另一个重要结果，是普里戈金在 1945 年基于局域平衡假设而确立的最小熵产生原理。这个原理表明，在线性非平衡区，热力学系统会朝着某个非平衡定态演化，这个定态可以用一个叫做最小熵产生的特性函数来表征，一旦系统处于非平衡定态，它就具有与外界边界条件相容的最小熵产生。一旦边界条件允许熵产生为零，系统就进入平衡态，熵函数取极大值。最小熵产生原理体现了热力学系统在线性非平衡区存在一种“惰性”，当边界条件阻止系统走向平衡态时，系统就趋近一个尽可能接近平衡态的非平衡定态。无论是处于熵极大的平衡态还是处于有着最小熵产生的非平衡定态，一旦系统受到某个微小扰动，不管初始条件如何，偏离这些状态的系统最终仍被拉回这些状态，这里发生的过程都是不可逆过程。如同走向平衡的自发过程总是趋于无序一样，在线性非平衡区，即使初始条件强加一个有序结构，但走向非平衡定态的自发过程也总是趋于破坏任何有序，增加无序。因此，在线性非平衡区，不会自发形成时空有序结构。

**超熵产生和稳定性判据** 当热力学系统远离平衡态时，“流”和“力”之间存在着非线性关系，系统处于非线性非平衡态，研究这类不可逆过程的热力学称为非线性不可逆过程热力学。

在非线性非平衡区，最小熵产生原理不再有效。为了进一步扩展对非平衡热力学系统稳定性的讨论，普里戈金学派提出了一般热力学稳定性判据。这个判据表明，在局域平衡假设的基础上，相对于参考定态的熵的二级偏离（又称超熵）总是负的，当系统处于线性非平衡区时，超熵随时间的变化（又称超熵产生）始终大于或等于零。按稳定性理论可确定线性非平衡定态是渐近稳定的。然而当系统处于非线性非平衡区时，虽然超熵依然小于零，但根据不同的动力学过程，超熵产生却可能大于零、小于零或等于零，因此它们分别对应于热力学系统稳定、不稳定和临界状态三种情况。尤其是当系统的约束条件改变时，如果超熵产生从大于等于零变成小

于零，按稳定性理论可确定，系统处于不稳定状态，外界微小的扰动就可以使系统失稳而可能进入一个新的稳定状态——耗散结构。

与线性不可逆过程热力学相比，非线性不可逆过程热力学还是一个正在发展中的理论，然而，它毕竟给出了对传统的平衡态热力学的重要的补充，尤其是指出了在远离平衡时，热力学系统存在着出现宏观有序结构的可能性，这就有助于人们重新认识宏观不可逆性的本质及其作用。

不确定关系 (uncertainty relation) 亦称测不准关系、不确定原理。微观现象所遵循的一个普遍规律。德国物理学家海森伯于 1927 年首先发现。

在经典物理中，对于任何两个物理量，原则上可同时作任意精确的测量。但是在量子理论中，在同时测定微观粒子的某些成对物理量时，其精确程度将受到某种程度的彼此制约。例如粒子的动量和坐标，能量和时间，角动量的不同分量都是这种成对物理量（称为“正则共轭”量），它们之间都存在不确定关系。在对微观粒子的动量和坐标进行同时测量时，动量的不确定量  $\Delta p$  和坐标的不确定量  $\Delta x$  之间存在如下不确定关系的制约：

$$\Delta p \Delta x \geq h/2,$$

其中  $h = h/2\pi$ ， $h$  为普朗克常数。上式表明，粒子在客观上不能同时具有确定的坐标位置及相应的动量。如果其位置完全确定 ( $\Delta x = 0$ )，则粒子的动量值就完全不确定；反之亦然。上式不确定关系中的等号相应于经典极限情况。

不确定关系并非来自具体的测量过程，而是来自微观世界中的波粒二象性。不确定关系中的一个关键的量是普朗克常数，它是一个非常小的量。在宏观现象测量中，测量误差远远大于这个量，因此可近似地取  $h = 0$ ，这时有  $\Delta p \Delta x = 0$ 。但是在微观现象中，所测物理量，例如粒子的位置和动量和乘积其数量级与  $h$  的量级差不多，此时  $h$  不能近似为零。不确定关系会在各种微观现象中显示出来。

布喇菲格子 (Bravais lattice) 表征晶格周期性而引入的一种空间格子或空间点阵。点阵中每一格点的位置可用一矢量  $R = l_1 a_1 + l_2 a_2 + l_3 a_3$  表示，其中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为三个基矢； $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  为一组整数，常记为  $(l_1, l_2, l_3)$ ，其所有可能取值的集合就表示一个空间格子。在点阵中，若每一个格点的周围情况都完全一样，则称为布喇菲格子。布喇菲格子是一种最简单的空间格子，是点在空间中周期性的规则排列。当我们以同样方式把一个原子（或一组原子）安置在每个布喇菲格子的格点上就构成了晶格。根据群论分析，共有 14 种独立的布喇菲格子（见下图）。自然界中晶格的类型很多，它们可能就是某类布喇菲格子，也可能是由两种或多种布喇菲格子组合而成。

布朗 (Robert Brown 1773~1858) 英国植物学家。生于曼尔罗斯。从小对植物发生了浓厚的兴趣，后来进入马尔柯尔学院和爱丁堡大学学习。1801~1805 年，在澳大利亚沿岸地区考察、研究植物。回英国后，任林奈学会的图书馆馆员、林奈博物馆馆长。

1827 年，用显微镜观察植物的花粉团粒悬浮在静止水面的形态，发现这些花粉团粒作不规则运动。为了

14 种布喇菲点阵



- (a)简单三斜；(b)简单单斜；(c)底心单斜；
- (d)简单正交；(e)底心正交；(f)体心正交；
- (g)面心正交；(h)六方；(i)三方；
- (j)简单四方；(k)体心四方；(l)简单立方；
- (m)体心立方；(n)面心立方；

进一步证实这一结果，一再扩展观察对象，不仅对活的或死的植物体，而且遍及一切有机物，甚至烟灰、泥土、矿物质等无机物的微粒，都一一进行仔细的观察。结果发现，一切无机的或有机的、无生命的或有生命的物质的微小团粒，悬浮在静止的水面上，都会无休止地作不规则运动，从而揭示了自然界普遍存在的分子运动的奥秘。人们为了纪念这个重大的发现，便把花粉的运动命名为布朗运动。

**布朗运动** (Brownian movement) 悬浮在液体或气体中的微小颗粒由于受到液体或气体分子的撞击而表现出的一种永不停止的无规则运动。

**布朗运动的发现** 1827年英国植物学家布朗在研究微生物时，首先观察到悬浮在水中的花粉微粒（直径约为 $10^{-3}$ 厘米）以一种杂乱无序的方式不停地运动，有时还伴随有微粒本身的变形。布朗还用其它微粒——包括保存了上百年的“死”的生物标本微粒、希腊女神塑像的粉末颗粒——代替花粉反复进行观测，发现了类似的现象。而且温度越高，运动显得越激烈。布朗确信，这不是微生物的运动。但究竟是什么原因导致了这类运动，当时像麦克斯韦、克劳修斯等一些著名的物理学家都没有找到正确的答案。直到1877年德耳索才指出，这类运动是由于微粒受到周围分子不平衡的碰撞所致。

**爱因斯坦的理论解释** 爱因斯坦在1905年发表的关于布朗运动的论文正确地解释了这一现象。一个悬浮在液体中的微粒在受到液体分子的撞击时，会导致两种效应，一种表现为微粒在液体中运动时受到的粘滞阻力，它的大小与微粒运动速度成正比；另一种表现为推动微粒前进、折返甚至造成变形的动力。只要微粒足够小，且在某一瞬间从各个方向上撞击微粒的分子数目稍有差异，就会使微粒受到一个净冲力的作用。不同时刻，这种冲力的大小和方向可能都不相同，从而引起微粒的无规则运动。液体温度越高，分子运动越激烈，被液体分子包围的微小颗粒受到的撞击就越频繁，由此产生的无规则运动也就显得更加杂乱无章。

爱因斯坦不但成功地解释了布朗运动的成因，而且作了定量讨论。他利用统计物理学方法发现，微粒在液体中作无规则运动时离开坐标原点距离平方的平均值  $\overline{x^2}$ ，与微粒在水中的扩散系数  $D$  之间存在以下的关系：

$$\overline{x^2} = 2Dt, \text{ 其中 } D = \frac{kT}{\alpha} \text{ 为扩散系数, } \alpha \text{ 是液体粘滞系数, } k \text{ 是玻}$$

耳兹曼常量,  $T$  是绝对温度。由于许多液体的  $\alpha$  可由实验测定，因而通过测量某时间间隔  $t$  内布朗微粒行走的平均距离，就可由上式得出玻耳兹曼常量  $k$ 。再由气体普适常量  $R$ ，就可算出阿伏伽德罗常量  $N (= R/k)$ 。爱因斯坦深知如果他的理论分析得到验证，将会对原子的粒子性及真实存在性提供可靠的依据。因此从实验上证实这一理论结果就成了当时热学和分子物理学面临的迫切课题。

**佩兰的杰出成就** 法国物理学家佩兰按照爱因斯坦的理论进行了多次实验。他发现，不管采用什么性质的液体，每次测出的  $k$  值几乎相等，

且与当时公认的精确定值非常接近。他由此得到了建立在科学实验基础上的阿伏伽德罗常量  $N$ 。佩兰的成功为原子的粒子性提供了直接的证据，同时也使人们完全信服了爱因斯坦的理论以及他所采用的统计方法。佩兰的成就使他荣获 1926 年诺贝尔物理学奖。

佩兰在实验中还发现，布朗微粒运动的轨迹初看起来像一团乱麻似的折线，其实仍有一定的规律性。由于一个微粒在液体中受到的撞击高达每秒  $10^{10}$  次，因而相隔一段时间记录下来的轨迹仅仅是微粒在这段时间内运动的一种粗略描述。为了研究微粒轨迹的结构，一个合理的方法就是尽量缩短观测时间。佩兰先取 30 秒为间隔记录下微粒运动轨迹，再取 3 秒为间隔作观

每隔 3 秒记录的布朗粒子运动轨迹图

测记录（如图所示）。他发现 30 秒的轨迹折线中的每一直线段在 3 秒的轨迹中又变成了折线，而且这根新折线与原来的折线轨迹在形状上很相似，只是尺度按一定比例缩小了。如果再分别以 0.3 秒、0.03 秒为间隔进行观测，可以得到一系列相似的折线轨迹。因而布朗微粒的运动轨迹是一种“结构中有结构”的自相似几何图形，又称分形。自然界中存在着各种各样的分形，利用计算机图形学可以产生出众多奇妙的分形图案。近十年来，对分形的研究已经成为当代非线性科学的一个重要内容。

**布儒斯特定律 (Brewster's law)** 当自然光以一个称为布儒斯特角  $i_B$  的入射角从媒质 a (折射率为  $n_a$ ) 射入媒质 b (折射率为  $n_b$ ) 时，反射光将是线偏振光，它的电矢量振动方向垂直于入射面，且折射光线与反射光线互相垂直。布儒斯特角又称起偏振角、起偏角或全偏振角。习惯上把振动方向垂直于入射面的电矢量称为 s 分量，平行于入射面的电矢量称为 p 分量。自然光以任意入射角入射时，折射光中总有 p 分量和 s 分量，以布儒斯特角入射时也不例外，故折射光总是部分偏振光。但当以布儒斯特角入射时，反射光中没有 p 分量，故 p 分量全部在折射光中，使折射光的偏振度最高。例如，将许多玻璃片叠在一起，自然光以  $i_B$  角入射，每经过一次界面，有 15% 的 s 分量被反射掉。通过多次反射和折射后，入射自然光中所有的 s 分量几乎全被反射掉，透射光也就几乎成为 100% 的 p 分量线偏振光。

通过特殊的入射角使自然光中的 s 分量和 p 分量分开来的现象，由布儒斯特于 1813 年发现，也称为布儒斯特定律。布儒斯特角由媒质 a 和媒质 b 的折射率决定： $i_B = \text{tg}^{-1}(n_b/n_a)$ 。

P/M 操作系统 (CP/Moperationalssystem) 是一种磁盘操作系统。其结构为层次型,由三部分组成:基本输入输出系统 BIOS,基本磁盘操作系统 BDOS 和控制台处理命令程序 CCP。此外还有过渡性

程序区 TPA 和零页的系统参数区。

BIOS 是一个与硬件有关的模块,提供了磁盘和其它外设输入输出操作,为外设确定了精确的低级接口。它由冷启动引导,热启动引导,查控制状态,控制台字符输入输出,列表设备字符输出,穿孔输出,读带输入,磁头回零道,选盘,选道,选盘区,设置 DMA 指针,读写盘扇区,查询列表设备准备状态和扇区转换等外围控制子程序组成。上面这些逻辑外设又可各自定义四种物理外设,只要 BIOS 有自定义外设的基本操作子程序,因此只需改写 BIOS 便可较方便地把系统移植到其它的硬件配置上。

BDOS 是独立于硬件的基本磁盘操作系统。它的主要功能是进行磁盘文件管理,提供磁盘文件结构、盘区分配和盘文件存取。它使用了盘图映象和文件控制块来作为实现其功能的数据结构。它提供了若干条系统调用作对系统软件 and 用户软件的支持,系统软件和用户软件可以简便地使用系统给出的系统调用标识符来调用这些系统资源。系统给出的调用手段还使系统具有可扩性。

CCP 是 CP/M 操作系统与用户的接口,由命令处理和内部命令子程序两部分组成。CP/M 的命令分为内部和外部两种,内部命令子程序是操作系统不可分割的一部分,随同操作系统一同装入 RAM,外部命令作成文件存于磁盘上,使用时调入 RAM 运行。

CP/M 本质上是一个文件管理系统,应用极为广泛。

**参考系 (reference frame)** 又称参照系。为确定物体的相对位置并描述其运动而选作基准的另一物体或物体群。与参考体固连的整个延伸空间称为“参考空间”。同一物体相对于不同参考系的运动状态可不相同。只有选定参考系,对某一物体的相对位置及其运动的描述才有意义。参考系的选择主要取决于问题的性质和研究的方便,例如描写落体运动时,常把地球作为参考系;描述行星运动时,常把太阳和几颗恒星作为参考系。

**参考系的变换 (reference frame transformation)** 物理问题研究的一个重要方法,能使物理问题变得简单明了。其数学原理就是矩阵的变换和操作。假定原来参考系用坐标  $(x, y, z)$  表示,变换到的新坐标系用  $(x', y', z')$  表示。分下面几种类型进行讨论。

(1)  $x' = -x, y' = y, z' = z$ 。相当于

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ 或 } X' = M_x X,$$

即实现对  $yz$  平面反映的“镜象”变换,  $M_x$  为变换矩阵。如果要实现  $XZ$  平面反映的镜象,则为

$$M_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ 或 } Y' = M_y \cdot Y,$$

$$\text{而 } M_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \text{ 或 } Z' = M_z \cdot Z,$$

为 xy 平面反映的镜象。

(2)  $x' = -x, y' = -y, z' = z$  相当于两个反映, 变换矩阵可写成:

$$M_{xy} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, M_{yz} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$M_{xz} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

(3)  $x' = -x, y' = -y, z' = -z$ , 其变换矩阵可写成:

$$M_{xyz} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \text{ 或者 } X' = M_{xyz} X.$$

(4) 如果坐标绕 z 轴旋转一个如图 1 所示的正角度  $\theta$ 。给定一点 P(x, y, z), 则变换后的坐标:

$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta$$

$$y' = -x \sin \theta + y \cos \theta$$

$$z' = z,$$

用矩阵表示, 可写成如下的形式:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$R_{z, \theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

可简化为:  $X' = R_{z, \theta} X$ , 式中  $R_{z, \theta}$  表示绕 z 轴转动  $\theta$  角。如果绕 z 轴反向转动, 则式中  $\theta$  前面应加负号, 即

$$R_{z, -\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

不难理解下列几种变换矩阵的物理意义:

$$R_{x, \theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

和

$$R_{x, -\theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix},$$

以及

$$R_{y, \theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$

和

$$R_{y, -\theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}。$$

(5) 如果  $(x, y, z)$  坐标系平动到  $(x', y', z')$  系, 矢量  $s$  表示平移矢量  $(s_x, s_y, s_z)$ , 在  $(x, y, z)$  中的  $P$  点矢量为  $r$ , 在  $(x', y', z')$  中  $P$  点的矢量为  $r'$ , 显然有关系式:

$$r = s + r' \quad \text{或者} \quad r' = r - s,$$

写成矩阵形式为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -s_x \\ -s_y \\ -s_z \end{pmatrix} \quad \text{或写成: } X' = X + T,$$

式中  $T$  表示式称为平移矩阵。注意平动是矩阵的相加, 镜象和转动是矩阵的相乘。

假定实现一连串变换, 例如平动  $T_1$ , 接着转动  $R_{s, \theta}$ , 再反映  $M_x$ 。可方便写出下列各表示式:

$$\text{平动: } X_1 = X + T_1,$$

$$\text{转动: } X_2 = R_{s, \theta} \cdot X_1 = R_{s, \theta} (X + T_1),$$

$$\text{反映: } X_3 = M_i X_2 = M_i [R_{s, \theta} (X + T_1)].$$

下面我们考虑伽利略变换, 即平动变换

$$r' = r - s,$$

在  $t=0$  时, 令两个坐标原点重合, 然后让带撇的坐标系在不带撇坐标系中以恒定速度  $V$  移动, 如图 2 所示, 则有

$$s = Vt, \quad r' = r - Vt,$$

写成分量形式, 有

$$\begin{cases} x' = x - v_x \cdot t \\ y' = y - v_y \cdot t \\ z' = z - v_z \cdot t \\ t' = t, \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -v_x \\ 0 & 1 & 0 & -v_y \\ 0 & 0 & 1 & -v_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix} \quad \text{或者} \quad X' = G_1 X,$$

上式即位置和时间的伽利略变换。对速度的变换

$$v' = v - V,$$

相当于  $v$  坐标的平动, 它的矩阵形式为:

$$\begin{pmatrix} v'_x \\ v'_y \\ v'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_z \\ v_y \\ v_x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -V_x \\ -V_y \\ -V_z \end{pmatrix}$$

$$\text{或 } \frac{d}{dt}(X') = \frac{d}{dt}(X) + G_v。$$

上述表式是对速度的伽利略变换的定义。伽利略变换是物理系学生所熟知的，这里的目的不再重申变换的物理意义，而是根据矩阵表示法来定义变换。

洛伦兹变换在相对论物理学中是很基本的。假定不带撇的坐标是静止不动的，带撇的坐标以恒定速度  $V$  沿着  $x$  轴平行“运动”。定义  $\beta = V/c$ ，式中  $c$  是光速，再定义  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ，洛伦兹变换为

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - \beta ct) = \gamma x - \gamma \beta ct \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma(t - \frac{\beta}{c}x) = \frac{\gamma \beta}{c}x + \gamma t, \end{cases}$$

用矩阵表示可写为如下式子：

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & -\gamma\beta c \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{\gamma\beta}{c} & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix} \text{或 } X' = LX。$$

**测辐射热计 (radiometer)** 检测微小辐射能量的仪器，用于测量可见光、红外线、微波或激光的辐射能。它的原理与电阻温度计相似，只是更为精细。通常的测辐射热计是由惠斯通电桥构成的，电桥的两个臂是两条相同的薄铂条。当一桥臂的铂受辐射（小于  $10^{-13}$  焦耳）照射时，使铂条电阻变化，引起电桥不平衡，由此测出辐射能。另一种半导体测辐射热计的桥臂是由一片粘在石英板上的半导体膜构成的光敏传感器。还有一种超导测辐射热计，是利用了硝酸银超导材料的薄膜，在低温（4K）时，在电导率由正常态向超导态过渡的过渡点附近其电阻随温度急剧变化的性能。这种测辐射热计灵敏度很高。

**测高仪 (altimeter)** 测量物体高度的仪器。用于量测不能直接用米尺测量的物体，或者只能间接或分隔一定距离来测量的场合。例如毛细管内液体面的高度测量，就要用测高仪。测高仪是由望远镜和带刻度标尺的铁架子组合起来的仪器设备。望远镜中在目镜的焦点处，设有“+”叉丝，用以与被测物的测量位置重合，读出标尺上的刻度值，当望远镜移到被测物的另一个测量位置并由叉丝与之重合时，又可读出另一刻度值，两值之差就是被测物两位置间的距离值。测高仪用于测“高”，说明测量架子中的标尺垂直于地球表面的水平面，所以又是物体的高度。在测量前先根据水准仪，调节测量架子的标尺垂直度，达到水准仪的气泡指示在任何方位都在中间规定的范围才能准确测量。测高仪的测量范围通常为 1.2 ~ 1.5 米，最小分度值为 0.1 毫米，并采用 10 等分游标，所以位置读数误差为 0.1 毫米。

**测量中的有利条件 (advantageous condition in measurement)** 是

提高实验精确度的重要方法。其实质就是对误差表示式或者表示式中的最大误差项求最小值的条件。根据误差有最小值的条件进行测量，可有效地提高实验的精确度。

例如，用电桥测量待测电阻的阻值，采用了如图所示的线路。由图可知：

$$R_x = \frac{R_2}{R_3} \cdot R_4 ,$$

并且有关系式： $R=R_2+R_3$ =常数，因此

$$R_x = \frac{R - R_3}{R_3} \cdot R_4 ,$$

$R_x$  的误差分配表示式为

$$\begin{aligned} \frac{R_x}{R_x} &= \frac{R}{R - R_3} + \left( \frac{1}{R - R_3} + \frac{1}{R_3} \right) R_3 + \frac{R_4}{R_4} \\ &= \frac{R}{R - R_3} + \frac{R}{R_3(R - R_3)} + \frac{R_4}{R_4} \circ \end{aligned}$$

在上面的表示式中， $R_4$  的相对误差可选得足够小，由于  $R > R_3$ ，因

此  $\frac{R}{R_3(R - R_3)}$  项是最大误差值。

适当选取  $R_3$  值，使最大误差值减到最小，这就是测量中的有利条件。如果再仔细观察，发现求  $R_3(R - R_3)$  的极大值，就是最大误差项的极小值条件。因此令  $Z=R_3(R-R_3)$ ，不难求得，当  $R_2=R/2$  时， $Z$  有极大值， $Z_{\max}=R^2/4$  ( $R_3=R/2$ )。所以原  $R_x$  的表示式改为：

$$\begin{aligned} R_x &= R_4 , R_2 = R_3 = R/2 , \\ \frac{R_x}{R_x} &= \frac{2}{R} + \frac{4}{R} \frac{R_3}{R_3} + \frac{R_4}{R_4} \\ &= \frac{2}{R} + \frac{4}{R} + \frac{R_4}{R_4} \circ \end{aligned}$$

由上式可知， $R$  值足够大， $R$  和  $R_3$  足够小，是提高电桥测量电阻精密度的关键。

注意：一旦  $R_2$  与  $R_3$  不是严格相等，会产生系统误差，其值可按按下法进行计算：

$$\text{即 } R_2 = \frac{R}{2} + \Delta R , R_3 = \frac{R}{2} - \Delta R , \text{ 所以}$$

$$\begin{aligned}
R_x &= \frac{R_2}{R_3} \quad R_4 = \frac{\frac{R}{2} + R}{\frac{R}{2} - R} \cdot R_4 \\
&= R_4 \left(1 + \frac{2R}{R}\right) \left(1 - \frac{2R}{R}\right)^{-1} \\
&= R_4 \left(1 + \frac{2R}{R}\right)^2 \\
&= R_4 \left(1 + \frac{4}{R} R + 4\left(\frac{R}{R}\right)^2\right)
\end{aligned}$$

所以  $R_x = R_4 \left(1 + \frac{4}{R} R\right)$ 。

令  $R_{x0}=R_4$ ，则

$$R_4 = R_{x0} \left(1 + \frac{4}{R} R\right),$$

或者化成  $R_{x0} = R_x \left(1 - \frac{4}{R} R\right),$

因此  $\frac{R_{x0} - R_x}{R_x} = -\frac{4}{R} R,$

即待测电阻的准确度是  $-4 \cdot \frac{R}{R}$ 。提高R的值会增加准确度。

**层流 (laminar flow)** 又称片流。流体质点不相互混杂、质点的迹线有条不紊、层次分明的流动。层流是粘滞流体的一种特性，粘滞性起着重要作用。在此种流动中，流体微粒的轨迹没有太大的不规则脉动，相邻两层流体之间只有分子相互作用引起的动量交换。

当雷诺数  $R_e$  较小时，即流体密度、流速和物体长度都很小，或者流体粘滞系数很大时，出现层流。在毛细管中，流体的流动实际上都是层流。在正常的血液循环中，动脉中血液流动也是层流。实验表明，粘滞性很大的液体（如甘油等），在管中的流速即使比粘滞性低的液体（如水、酒精）大得多，也还是层流，此时流体阻力与运动速度成正比。

**层子模型 (straton model)** 一种强子结构模型。1965年由我国北京基本粒子理论组提出。该模型认为，物质结构有无限层次，并将质子、中子和介子等层次上构成粒子的基本组分称为层子。该模型成功地解释了当时粒子物理的许多实验结果。层子模型所包含的一些观念，如层子不止3种观念，关于强子结构波函数的观念，层子在强子内部的运动可作非相对论近似处理的观念等，在其后的粒子物理学发展中都得到了证实，并渗透进了其后进一步建立起来的强子结构和强相互作用理论（如“部分子模型”、“量子色动力学”）之中。

**差分 (difference)** 在物理学中，大量所遇到的问题是计算各种类型的连续集。但是数字计算机只能对连续集进行抽样，在所选的这些点上进行加工和计算。这就是与差分概念有密切关系的计算方法。下面简要地说明差分的数学概念。

设有一组点子  $(x_i, y_i)$ ， $i=1, 2, \dots, n$ ，各个  $x$  值之间的差是常数，则  $y_i$  的一阶向后差分由下式定义：



$$\nabla y_i = y_i - y_{i-1}$$

取一阶向后差分的差分就得到二阶向后差分，即

$$\begin{aligned} \nabla^2 y_i &= \nabla(\nabla y_i) = \nabla(y_i - y_{i-1}) = \nabla y_i - \nabla y_{i-1} \\ &= y_i - y_{i-1} - y_{i-1} + y_{i-2} \end{aligned}$$

所以  $\nabla^2 y_i = y_i - 2y_{i-1} + y_{i-2}$ 。

如果愿意，可以重复上述过程，得到高阶向后差分表式。 $y_i$  的一阶向前差分的定义是：

$$y_i = y_{i+1} - y_i,$$

同样可得到二阶向前差分

$$\Delta^2 y_i = y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i.$$

$y_i$  的一阶中心差分定义为：

$$\delta y_i = y_{i+\frac{1}{2}} - y_{i-\frac{1}{2}}.$$

$y_i$  的二阶中心差分，即一阶中心差分的中心差分：

$$\delta^2 y_i = y_{i+1} - 2y_i + y_{i+1}.$$

上述  $\nabla$ ， $\nabla^2$ ， $\Delta$ ， $\Delta^2$ ， $\delta$  和  $\delta^2$  称为差分算子，为了便于采用，列出下面的差分算子表。

	$y_{i-3}$	$y_{i-2}$	$y_{i-1}$	$y_i$	$y_{i+1}$	$y_{i+2}$	$y_{i+3}$
$\nabla$	0	0	-1	1	0	0	0
$\nabla^2$	0	1	-2	1	0	0	0
$\nabla^3$	-1	3	-3	1	0	0	0
$\Delta$	0	0	0	1	-1	0	0
$\Delta^2$	0	0	0	1	-2	1	0
$\Delta^3$	0	0	0	-1	3	-3	1
$\delta$	0	0	1	-2	1	0	0
$\delta^2$	0	1	-4	6	-4	1	0

差分在许多计算中用到。

插值多项式 (interpolation Polynomial) 已知在一组分立点上的函数分布情况，希望对各中间点的函数值作出最佳估计，这是一个很普遍的问题。实现这点的有效办法是利用插值多项式。多项式中最简单的是线性关系，即假设有两个点  $(x_i, y_i)$  和  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ ，插值多项式为

$$y = Ax + B,$$

为了求得常数 A 和 B，将两点的值代入，即

$$y_i = Ax_i + B,$$

$$y_{i+1} = Ax_{i+1} + B,$$

解出 A 和 B 后，就可得出线性插值关系式：

$$A = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad x = x_{i+1} - x_i,$$

$$B = \frac{x_{i+1} \cdot y_i - x_i \cdot y_{i+1}}{x_{i+1} - x_i},$$

$$y = \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{x} \right) (x - x_i) + y_i, \quad x = x_{i+1} - x_i.$$

如果考虑三个点  $(x_{i-1}, y_{i-1})$ 、 $(x_i, y_i)$ 、 $(x_{i+1}, y_{i+1})$ ，用二次插值函数，即形式为：

$$y = A(x - x_i)^2 + B(x - x_i) + C,$$

同样设  $x_{i+1} - x_i = x_i - x_{i-1} = x$ ，则可将三个点分别代入上述方程，得到三个联立方程，从而解出常数：

$$A = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{2x^2}$$

$$B = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2}$$

$$C = y_i,$$

所以插值多项式为

$$y = \left[ \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{2x^2} \right] (x - x_i)^2 + \left[ \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2x} \right] (x - x_i) + y_i.$$

用这种方法可推广到  $n$  次插值多项式，对于  $n$  次多项式需要给定如下形式的  $n$  个点：

$$\dots, (x_{i-1}, y_{i-1}), (x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}), \dots$$

插值多项式的形式为：

$$y = A_1 x^{n-1} + A_2 x^{n-2} + \dots + A_n.$$

事实上，二次插值多项式有

$$y'' = 2A = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{x^2}$$

$$A = y''_i / 2, \quad B = y'_i, \quad C = y_i.$$

**查德威克** (James Chadwick 1891 ~ 1974) 英国物理学家。生于柴郡。1911年毕业于曼彻斯特大学，后又在柏林大学和剑桥大学深造，获剑桥大学哲学博士学位。1923年任卡文迪什实验室副研究主任，与卢瑟福一起工作。1935年任利物浦大学教授。1948年任剑桥大学冈维尔和凯厄斯学院院长。1927年当选为英国皇家学会会员。

主要贡献是发现中子，获1935年诺贝尔物理学奖。早期从事放射性和核物理方面的研究，1914年，在柏林大学时，第一次测得了放射性物质所产生的辐射的连续能谱。1919年，与卢瑟福合作，用氦第一次测到了核蜕变效应。1920年，研究了粒子在铂、银和铜核上的散射，直接测出了原子核的电荷。1932年，发表了题为《中子可能存在》的论文。在此之前，法国的约里奥—居里夫妇，用粒子轰击铍，发现铍射线轰击石蜡和其他含氢物质时，石蜡中会放射出一种强质子流，由于当时错误地认为铍辐射是一种辐射，因而对这种质子流的放射现象难以解释。此事很快引起查德威克的注意，他在剑桥大学重复了同样的实验，敏锐地觉察到铍辐射不可能是辐射，而是电中性的粒子流，且粒子的质量等于质子的质量，其他物质的辐射也存在同样的情况，从而发现了中子的存在。铍辐射即是由铍射出的中子组成的，中子是原子核的组成部分。中子的发现，不仅改变了当时人们的物质结构的概念，同时还为研究和变革原子核提供了一种有力的手段，促进了核裂变研究工作的发展和原子能的利用。

**查理** (Jaques Alexandre César Charles 1746 ~ 1823) 法国物理学家。生于博让西。自学成才，曾任巴黎国立工艺学院实验物理学教授。1816 年任巴黎科学院院长。

主要贡献是研究了气体膨胀的规律。1787 年，确立了在体积不变时给定质量的理想气体的压强随温度变化的定律（被称为查理定律）。当时没有把它发表，而是在 1802 年盖-吕萨克发表的气体膨胀定律的论文中提到了查理的上述发现。1783 年，在蒙戈尔费兄弟制成热空气球之后不久，查理制成第一个充以氢气的气球，并且在这个气球上实现了飞行（距离为 27 英里）。这次飞行在巴黎引起很大的轰动，当时目睹这一盛况的富兰克林曾给朋友写了一篇热情的报导。查理还发明了一系列精巧的物理仪器，其中包括测温计、比重计、反射测角仪等。

**查理定律** (Charles law) 参见气体实验定律。

**柴油机** (diesel engine) 参见热机。

**场** (field) 物质存在的一种基本形式。指具有非定域的、弥散特征的物质。场是物理场，即相互作用场。它由没有静止质量的场量子组成，并存在于整个空间，如电磁场、引力场等。场可以在同一空间内互相叠加。

最初场被看作是以太的特殊状态，后来由于狭义相对论否定了静止不动的以太的观念，因而场就被看成是物质存在的一种基本形态。场的物理性质可以用一些定义在全空间的量描述[如电磁场的性质可以用电场强度和磁场强度或用一个三维矢量势  $A(x, t)$  和一个标量势  $\varphi(x, t)$  描述]，这些场量是空间坐标和时间坐标的函数，它们随时间的变化描述场的运动。场观念的典型代表是电场和磁场，它们用麦克斯韦方程组描述，其中场量满足对空间坐标和时间坐标的偏微分方程，这是人们所发现的第一组场方程。最早用来描述自旋为  $1/2$  的相对论性粒子的方程是由狄拉克发现的。后来发现狄拉克方程既能用来描写电子又能描写正电子，实验上又发现了正负电子对可以转化为光子，光子转化为正负电子对的事实，这就导致提出电子也是场的这个概念。描写电子的狄拉克方程也就被看成是场方程。此后人们使用量子场论来描述场，并进一步对每一种基本粒子引进一种场，而把它们之间的相互作用看成是各种场之间的相互作用。

场观念本身体现出深刻的哲学思想。它是摆脱时间悖论的一种出路，按照这种悖论的说法，过去已不存在、将来尚不存在、现在亦不存在，因为它的延伸恒等于零。而根据法拉第、麦克斯韦揭示的场观念却告诉人们：

即使没有物体时，场也存在；有了物体时，也就有了场；从而完全有可能确定场的现时存在。场观念也为摆脱匀质空间悖论提供了一条出路，这种悖论把空间和物质混淆起来，它抹煞了个别物体同周围空间的区别，把它转化为虚无，取消了它的物理意义。而根据场观念，空间点亦即空间线的交叉，如果周围空间在物理上体现于这个点中，那么空间点就可以有物质的存在。作为物理实在的场的空间（有别于时间）的规定也就在这里。

**场致发射** (field-emission) 又称冷发射。某些物体表面在强电场作用下发射电子的现象。场致发射过程的机理与热发射、光电发射不同，电子借助于量子隧道效应穿透表面势垒而逸出。场致发射不需要提高物体的温度，故称冷发射。但加热物体可加速场致发射，因物体温度升高，物体内的电子能量也增大，则电子穿透表面势垒的概率也增加。

场致发射的电子流密度与电场强度、发射体的材料及表面光滑程度有关。利用电子或离子的场致发射可制成场致电子（或离子）发射显微镜，它不用透镜而直接将发射体尖端发射的电子投射到屏幕上，产生发射表面的放大图像，放大倍数可高达 100 万倍，分辨率可达  $20 \times 10^{-10}\text{m}$ 。利用这种显微镜可观察样品表面的单个原子，研究金属晶格缺陷及晶体表面的原子结构等。

**超导电性 (conductivity)** 某些物质在一定温度以下呈现电阻等于零的性质。具有这种性质的物体称为超导体。

19 世纪热学理论的研究促使绝热膨胀等获得低温的技术得到了飞速发展。1908 年荷兰科学家昂尼斯首次成功地实现了氦的液化。在一个大气压下氦的沸点为 4.2K。他于是进一步在这一低温区考察了多种纯金属的电阻率。1911 年他发现汞 (Hg) 样品的电阻率突然降到零的现象，并将汞的这种性质称为超导电性。自那时以来，至今人们已发现在正常压力下有 28 种元素，约 5000 余种合金和化合物具有超导电性。

**超导体的基本性质** 超导体的基本性质主要表现为它的临界温度，以及它的零电阻性和完全抗磁性。

超导体由正常态转变为超导态的温度称为临界温度。各种超导元素的临界温度  $T_c$  都很低 ( $< 10\text{K}$ )，其中最高的是铌 (Nb)， $T_c=9.26\text{K}$ ；最低的是铯 (Rb)， $T_c=0.0002\text{K}$  (外推值)。超导合金和化合物的临界温度高些，其中最高的是铌三锗 ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ )， $T_c=23.2\text{K}$ 。除了临界温度外，超导体还存在临界磁场  $H_c$  和临界电流密度  $J_c$ 。

超导体最显著的特点是它的电阻为零。利用磁通量变化使由超导材料制作的环内产生感应电流。实验发现，这种电流会无衰减地持续很长时间。通过这类实验测得的样品铅的电阻率为室温的  $1/10^{17}$ 。这表明超导体的电阻率确实为零。

完全抗磁性是超导体的另一个基本特性。材料处于超导态时，体内磁场恒等于零。这一性质由迈斯纳等人于 1933 年首先发现。所以超导体的这种排斥磁场线的现象又称为迈斯纳效应。

**超导电性的理论** 超导电性发现后，许多科学家作了长期努力，探索超导电性的机制，建立超导电性理论，解释超导电性的各种现象及其特性。超导电性理论的建立可以区分为两个阶段：唯象理论和微观量子理论 (BCS 理论)。

“超导电性的两流体模型”是一种唯象理论。这个理论认为，超导体中有两类传导电子：正常电子和超导电子，前者与普遍金属中的导电电子相同，遵从欧姆定律；后者在运动时不受任何阻力。以后，人们又建立了“伦敦方程” (1935 年) 和“京茨堡-朗道方程” (1950 年)，并以这些方程来描述超导电子的运动规律，获得了一定的成功，预言了某些其后为实验所证实的超导现象。例如这些理论预言，磁场在超导体内部为零；但在超导体表面处，磁场将随深度按指数规律衰减，穿透深度的数量级约为  $10^{-6}\text{cm}$ 。因此当超导体样品尺寸与  $\lambda$  可比拟时，它不再具有完全抗磁性。

1957 年建立的 BCS 理论是目前公认的能够阐明超导电性产生的原因及其特性的微观理论。1950 年，物理学家弗罗利希利用当时刚刚建立并完善的量子场理论，发现金属中的电子交换声子 (晶格振动能量量子) 可产生吸引作用。1956 年，美国物理学家库珀从理论上预言，在费米面附近动量

相反自旋也相反的两个电子之间，这种弗罗利希作用特别强，甚至超过此时它们之间的库仑排斥作用，因此可能形成电子对——库珀对。第二年，巴丁、库珀和施里弗利用库珀对观念建立了完整的超导量子理论。

金属电阻的起源可简单地解释如下：作定向迁移运动的电子受到晶格点阵的散射，这是一种使电子定向迁移运动趋于混乱的倾向，于是单位时间内通过导线横截面的电量将减小，电子的定向迁移运动显示出受到阻力。现在，弗罗利希相互作用表明，电子与晶格的相互作用在一定条件下不再引起电子的散射，而是形成库珀对，库珀对与晶格之间不再存在相互作用，它相当于超导电性两流体模型中的超导电子，因此它的运动将不受到任何阻力。这就是超导电性产生的原因。

两个动量和自旋都相反的电子形成库珀对后向外释放了结合能，因此其能量比两电子分离时低。费米面附近的电子两两配对后，将会改变原来电子能谱结构，结果在连续能带下面出现一单独能级，称为“超导基态”，它代表结合成电子对的状态。超导基态与连续能带之间的间隔称为超导体的“能隙”，其值与材料微观结构的性质以及温度等因素有关。在绝对零度时，费米面附近的电子全部结合成库珀对，此时为最大；当温度稍升高时，由于热激发，一些库珀对解体而成单个电子，将减小；当温度达到某个值  $T_c$  时，库珀对全部消失，变为零，此时超导态便转变为正常态。 $T_c$  就是超导体的转变温度。图 1 显示了超导体锡的能隙与温度  $T$  的函数关系，它表明了 BCS 理论的正确性。

弗罗利希吸引作用、库珀对和超导体能隙等都是处于晶格中的电子气系统的一种集体效应。根据不确定关系估计，库珀对中电子的距离约为  $10^{-6}$  米，大约是晶体格距的  $10^4$  倍，能隙约为  $10^{-3}eV$ 。

图 1 超导态能隙与温度的关系

**高临界温度超导体** 尽管迄今已发现数以千计的超导元素、合金和化合物，但是由于它们的临界温度都很低，需要使用技术复杂、成本昂贵的液态氮作为冷却剂，超导体的应用范围因此受到极大的限制。

1986 年，瑞士科学家贝德诺尔兹等人首先发现了一类氧化物超导体，其临界温度达 30K。随后，美国、中国和日本的物理学家相继发现了这类超导体，临界温度达到 98K，甚至更高。过去发现的超导体主要是金属、合金或金属间的化合物，而新的高  $T_c$  超导体都是金属氧化物，如钇钡铜氧 ( $YBa_2Cu_3O_7$ )、铋锶钙铜氧 ( $Bi_2Sr_2CaCu_2O_7$ )。金属氧化物通常是半导体或绝缘体，因此人们很少想到它们中会出现超导体，而且具有如此高的转变温度。所以金属氧化物高温超导体的发现具有很重要的意义。

近些年来，高温超导的研究成了世界各国科学家的一个热门课题，主要包括三个方面：进一步寻找高临界参数的超导新材料；阐明高  $T_c$  氧化物超导体的物理机制；开发新超导体的技术应用，如研制高  $T_c$  的高温氧化物超导实用线材或带材，发展制备高质量超导薄膜的技术，利用高温氧化物超导材料制造各种电子元件和器件等。

**超导电性的应用** 超导体的应用极为广泛，举例如下。

(1) 超导磁体：利用合金（如 Nb-Ti、Nb-Zr）或金属化合物（如  $Nb_3Sn$ 、 $V_3Ca$ ）等稳定而实用的超导材料制成的导线绕制的磁体，可以通强大的电流，产生很强的磁场，其值可达几万~几十万高斯。作为比较，若采用在

氢中退火的纯铁作为铁芯制作的电磁铁，由于铁磁材料的磁饱和特性，其磁场很难大于 2 万高斯；如果去掉铁芯，增大电流，则由于焦耳热损耗也很难获得有效的强磁场。超导磁体目前已广泛应用于高级实验设备、高能加速器、受控聚变反应实验等领域。

(2) 超导列车：为了克服普通列车与轨道之间的摩擦力，最好使整个列车悬浮起来。通常可采用“磁悬浮”方式，如图 2 所示。在列车底部和 U 型轨道上设

图 2 超导列车原理图

计一定数量的磁体，利用同性磁极相斥的道理，使整个车箱悬浮在轨道之上约 10cm 处。此外，在车箱和 U 型轨道侧面安装一系列磁体，并通过供电系统依次调整其极性，使列车始终受到向前推进力。超导列车的时速很容易达到每小时 300 千米以上。

(3) 约瑟夫森结：又称超导隧道结。由中间被薄绝缘层(厚度约为 1nm)隔开的两块超导体组成。超导电子由于量子力学隧道效应可以贯穿绝缘层。如果在两块超导体上加一直流电压  $V$ ，则在两超导体之间可产生振荡的超导电流，其频率与电压  $V$  成正比 ( $\omega = 2eV/\hbar$ ，其中  $e$  为电子电荷， $\hbar = h/2\pi$ ， $h$  为普朗克常数)。利用这种约瑟夫森效应可精确地测量常数  $e/\hbar$  或测量电压  $V$ ，还可制造各种电子元器件。约瑟夫森器件的反应速度快(例如，其开关速率小于  $2 \times 10^{-12}$  秒)；功耗小(仅为普通半导体器件的千分之一)；灵敏度高(例如对电流的分辨率为  $10^{-9}A$ ，对电压为  $10^{-15}V$ ，对磁场为  $10^{-11}G$ )。约瑟夫森结已应用于制作电压标准，以及灵敏度和精确度都极高的磁强计、电流表、电压表、低温温度计等，还可用它制作微波和红外探测器。利用约瑟夫森结制造仪器和设备的技术目前已发展成为一门新的分支学科——超导结电子学。

超导量子干涉仪 (superconducting quantum interference device) 简称 SQUID，是一种能测量微弱磁信号的极其灵敏的仪器。其主要应用在于：物理实验室中用来测量弱磁场、材料的磁化率等；在引力物理研究中用来探测引力波；在基本粒子研究中用来探寻磁单极子；在地球物理和地质研究中，可用它测量岩石矿样剩磁及磁化率，探测大地的磁场，从而为寻找地热和矿藏资源提供依据；在生物磁学方面用来测量心磁图、肺磁图、脑磁图、胎儿心磁图以及其他生物磁信号；在军事方面可作为核潜艇的低频通讯、导航以及用来探测敌人的潜艇活动等。

SQUID 的基本原理是建立在磁通量子化和约瑟夫森效应的基础上的。根据偏置电流的不同，分为直流和射频两类。直流 SQUID 器件的组成如图 2 所示。它是包含有两个约瑟夫森结的超导环，结的两端连接直流电源。约瑟夫森结是一种超导器件，由两块超导体之间被一薄势垒层隔开而组成，可由超导材料(例如铌)用制作半导体器件的工艺方法制得，一般称作 SIS 隧道结。实验发现，如果 SIS 隧道结的绝缘层厚度只有

直流 SQUID 器件的组成图

1nm 左右，就会发生库珀对的隧道电流，这种电流是无阻的，即超导环中有电流流过，但 SIS 结两端无电压降落。实验还表明，绝缘层能够承受的无阻电流很小，一般是几十微安到几十毫安，超过了就会出现电压。这种在 SIS 结能通过很小的隧穿超流的现象称为超导隧道结的直流约瑟夫森效应，用  $I_c$  表示超导结的临界电流。1963 年罗威尔发现临界电流  $I_c$  和

磁场有关。当通过器件的电流超过临界电流  $I_c$  时，器件两端将出现电压。 $I_c$  的数值对磁场特别敏感，并且是磁场的周期函数，它是通过环中磁通的变化而反映出来的，变化的周期恰好是一个磁通量子  $\phi$ 。因此，只要适当选择能产生略大于  $I_c$  的偏置电流的电压  $V$ ，就可以根据电压变化测量出环中磁通  $\phi$  的变化。通过一个探测线圈把外磁场耦合到 SQUID 的超导环中，就可以构成灵敏度极高的超导磁强计，它可以测量出  $10^{-11}$  高斯的微弱磁场，仅相当于地磁场的一百亿分之一，比常规的磁强计灵敏度提高几个数量级。用 SQUID 还可以制作成灵敏度极高的超导磁梯度计、磁化率计、检流计和电压计。此外，用 SQUID 制作的噪声温度计可以测量极低 (mK) 的温度，灵敏度可达到  $1 \mu\text{K}$ 。

由于 SQUID 的灵敏度高，因而促进了许多学科的发展，甚至催生出一些新的学科，例如生物磁学就是在 SQUID 出现之后得以发展的一门新兴学科。目前国外在脑磁方面应用多通道 SQUID 仪器，获得了丰富的成果。预期在特异功能、气功功能、癌症早期诊断方面，SQUID 有可能成为得力助手。SQUID 在其他方面也发挥了积极作用，如地球物理学、地质研究等。

**超晶格 (superlattice)** 一种人工制造的晶格结构。1969 年由日本科学家江崎等人首先发明。用分子束外延方法使两种不同的半导体薄膜周期性地交替生长而成。每一次交替称为一个周期，约为几个到几十个原子层厚，超晶格结构通常有几个到几百个周期。超晶格具有非常好的界面质量，它的势垒形状和杂质分布可以根据需要来设计。现已研制出一批新型的微波器件和高速光电器件，如高电子迁移率晶体管、微波振荡管以及高灵敏度的霍尔器件等。此外，这种人工晶格的周期可控制到原子间距的精度，因此出现了许多天然晶体中未曾出现过的新的物理现象，即量子尺寸效应。超晶格的出现进一步证实了固体中的量子力学效应，也为进一步开展这方面的研究提供了条件。

超晶格制造中的两种异质材料，通常要求其晶格常数接近匹配，以避免由于失配而在界面形成缺陷。但近些年来的研究发现了一类所谓应变超晶格材料，只要失配在 10% 以内就可完全被材料的弹性应力所调节，因此在超晶格界面上不产生失配位错。这样在材料的选用上可以不再受晶格匹配条件的限制，开辟了超晶格材料研究的一个新的领域。如由两种间接带隙材料 Si 和  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ ，GaP 和 GaAsP 做成的应变超晶格，通过子带的“折叠”可以使它具有直接带隙材料的特性，另外还有应变引起有效质量改变的特性等，在光学、电学特性的应用中具有很大的灵活性。

**超距作用 (action at a distance)** 物理学史上对两个不相接触的物体间发生相互作用的一种观点。它认为两个不相接触的物体间存在直接的、瞬时的相互作用，不需要媒介，也不需要传递时间。它也是发生于牛顿学派与莱布尼兹学派间进行争论的一个内容，其实质是原子论与以太论的争论在引力传递机制问题上的反映。牛顿是主张原子论的，初看起来牛顿的引力定律似乎是支持超距作用观点的，但是牛顿本人并不赞成超距作用的解释。他在给本特利的一封著名的信中写道：“如果重力是物质内在固有的和本质的，以致一个物体可以通过真空而没有其他东西的中介，超距作用到另一个物体上，并且通过它们的作用或力可以经过真空从一物体传到另一物体上，对我来说是极其荒谬的，我相信没有一个在哲学上有思

考能力的人，会陷入这种谬论之中。”然而按照莱布尼兹学派的想法，牛顿的引力定律是以原子论为基础的，原子论的基本观点是原子和虚空，于是引力只能通过虚空而传递，也就是说，没有介质的引力传递是不合理的。相反，如果引力通过他们主张的介质或以太传递，则是正确的。所以按照他们的理解，认为两个不相接触的物体间的相互作用，不需要媒质而从一物体传到另一物体上，都称为超距作用，其目标显然是指向牛顿的。事实上牛顿从未直接或间接地提出引力定律是超距作用的观点和说法。

18 世纪时超距作用又成为牛顿学派与笛卡儿学派进行争论的一个焦点。当时法国的笛卡儿学派既反对超距作用，又不恰当地否认引力定律，于是引起一些年轻的牛顿追随者起来捍卫牛顿的引力理论，并强烈反对笛卡儿的以太理论。随着验证引力定律所取得的巨大成功，而探索以太却未获得实际结果，再加上牛顿在力学领域的权威性，超距作用的思想得以流行开来，并为许多物理学家所接受，使超距作用的观点在物理学中占据了统治地位。

到了 19 世纪，随着电磁学的发展，英国物理学家法拉第指出超距作用是错误的。他认为不相接触的物体间的相互作用不是直接传递，而是通过中间的媒质以有限的速度传递的。这种形式的相互作用被称为媒递作用，这是场的概念的起源。麦克斯韦电磁场理论的建立，赫兹验证电磁波实验的完成，使媒递作用的观点在物理学中明显占据了上风，而超距作用的观点在电磁学领域内为多数物理学家所扬弃。

**超流动性** (superfluidity) 见量子液体。

**超声波** (ultrasonic sound) 频率高于 20000 赫的不能引起人耳听觉的声波。其中频率高于  $5 \times 10^8$  赫的超声波称为“特超声”。超声波的特点是：波长短，近似作直线传播；在固体和液体中传播时衰减远比电磁波小；能量容易集中，可形成很大的声强，产生剧烈的振动，引起激震波、液体中的空化等作用；其传播特性（如声速、声衰减等）与介质的各种性质密切相关。

超声波在工农业生产和医学卫生等方面有广泛的应用，大致可分为低功率和高功率两方面。在低功率方面有：探伤与测厚。用超声波可无损地检验铸件中的砂眼、裂纹和有害杂质，并可精确测量工件厚度。超声全息照相。用超声波声呐探测水中鱼群和潜艇，或用于水下短距离通讯。

在医学上用超声波扫描适宜于对软组织和胎儿进行检查。利用其传播与介质有关的特性可制成超声波粘度计、超声波流量计等。在高功率方面有：利用超声波引起的空化作用所产生的局部高温和高压，使不易混合的液体，如水与油混合在一起，使聚合物的巨大分子团破裂，使工件表面清洁，可用来洗涤餐具、衣服、消毒器皿；使原子点阵破裂，促进化学反应的速度。空化作用还可用来改进电镀铜板和光学玻璃的质量。清除金属表面的氧化物以提高焊接质量，或使不易焊接的金属（如铝）能焊接在一起。用于清除工厂废气中的悬浮物。医学上可用于脑外科手术。

此外在基础研究领域也有重要应用。机械运动是最简单、最普遍的物质运动，它与其他形式的物质运动以及物质结构之间的关系非常密切。超声振动本身就是一种机械运动，因此超声方法也是研究物质结构的一个重要途径。它与电磁辐射及粒子轰击一起被列为研究物质微观结构和微观过程的三大重要手段。由于超声技术应用的发展和日趋重要，因而对超声波



的研究也变得愈来愈重要，已成为一门独立的学科——超声学。

**超声波发生器** (ultrasonic generator) 产生超声波的装置。它的原理与产生低频声波相同：使金属板、杆或空气柱（笛）受激发而发生机械振动，并把振动传达到四周的介质中去。机械振动的激发可以采用机械方法、热学方法、电动方法、磁致伸缩方法或压电方法。按种类大体分为两类：机械型。它是利用高速气流或液流冲击金属簧片或空腔而产生超声波，把机械能转变为超声能。如旋笛，就是使高压气体在一高速旋转的圆盘上的气孔喷出而产生超声波的。机电型。它是利用机电换能器把高频电能转换成超声能而产生超声波的。常用的有：压电式，即利用石英、钛酸钡等材料的压电效应制成压电式换能器；磁致伸缩式，即利用镍及镍合金（如镍铁合金、镍铜合金）等铁磁材料的磁致伸缩效应制成磁致伸缩式换能器。就实用意义来说，利用电的方法产生超声波的装置是主要的。

**超声成型** (ultrasonic forming) 利用超声波在介质中传播时，使介质发生某些物理变化（如温度升高、应力下降等）从而达到使介质成型的一种技术。它主要应用于冷拔金属材料而使塑料在模腔内就地熔融成型。

冷拔金属材料这种方法是在 50 年代 Blaha 和 Langenecker 在用锌单晶加超声振动作拉伸实现时发现的。由于超声振动使金属张应力下降从而“软化”来冷拔金属材料。其机理一般认为有两个方面：一是表面效应，由于超声振动而减少金属件与模具表面间的摩擦力；二是体积效应，包括叠加、锻击和冶金学效应，这一效应表现为金属塑性增加。

在塑料成型中，由于超声在塑料介质中传播时，塑料质点吸收超声能量而产生振动，因而温度升高，使塑料在模腔内成型。又由于在超声能作用下，树脂微粒受驱使而有高度的无规则运动，可以得到用常规方法难以得到的均匀混合物，因而具有比常规成型方法（如注射、挤出、压制、铸塑等）周期短、成本低、制品力学性能好、内应力低、形状稳定性高等优点，可广泛应用尺寸要求严格的精密部件及复合材料的成型。其缺点是由于超声振幅的限制，目前还不能成型超过 300 毫米的大型制品。

**超声凝聚** (ultrasonic agglomeration) 气体或液体中的悬浮物（尘埃、烟、雾等弥散物）受到适当能量的超声波作用时，会凝聚成较大颗粒而沉降的现象。工业上利用超声凝聚可去除悬浮粒子，这样既可防止空气污染，又可回收物质。例如烟囱中尘埃的超声处理，就是利用超声凝聚作用。要使极细微的尘埃沉降，一般来说十分困难，但利用超声凝聚却十分奏效，这对于防治工业硅肺等职业病也有很大意义。

**超声探伤** (ultrasonic testing) 以超声作为采集信息的手段，来发现材料或工件缺陷（内部的或外部的）的方法。根据超声波的原理可分为三种形式：穿透法（透过法）、反射法（回波法）和共振法。其实施形式一般分为主动式超声波探伤和被动式声发射检测。前者是基于超声波具有穿透性、一定的辐射指向性以及对所有介质都是“透明”的。正因为超声波具有以上特点，在用于材料的检测上，它就优越于其他波动。因此它可广泛应用于诸如反射探伤和测厚、水浸法探伤和加延迟块、隔热块探伤、对薄壳体芯体介质探伤和管道内的液体检测、作成声透镜进行聚焦探伤等方面。被动式声发射检测的根据是，被检材料在外部条件作用下，材料中的能量分布发生改变而部分能量以弹性波形式释放，释放的声信号含有反

映材料内部结构或缺陷性质和状态变化的信息。这一技术最早在地震学中应用,1950年才用于金属方面的研究,1964年研制成实用的声发射监视系统,并在固体火箭发动机壳体的水压实验中取得成功。

在超声探测中,也不是所有的检测结果和现象都能给出严格精确的理论分析,其理论的发展和超声检测技术的实际使用之间还存在一定的距离。目前,超声探伤形成了以下三个研究方向:可探性研究、准确性研究和高速性研究。微型计算机在超声探伤中起到越来越大的作用。目前超声探伤已成为工业、国防战线上保证产品的质量、确保安全的一种重要手段。

**超声显微镜 (ultrasonic microscope)** 利用超声显示物体微细结构的一种声学成像装置。它是利用物体声学特性的差异,用声成像的方法来显示物体内部情况。当入射到物体上的声波经反射、折射、衍射或吸收后,这些声波因与物体相互作用而含有物体内部的信息,利用声波的某些物理效应把含有新信息的声波显示出来就实现了声成像。其装置包括两部分:造成声像的超声系统(由超声源、超声透镜等组成)和使声像变成可见像的装置。现代超声显微镜已使用频率高达  $10^9$  赫以上的特超声,其波长比可见光略短,分辨率比光学显微镜还高。它的突出优点是可以观察光学显微镜和电子显微镜难以观察的不透明物体的内部情况,对于生物组织切片或样品无需染色,观察及时;对于大规模集成电路,毋需损坏样品表面即可直接进行内层观察。但超声显微镜得到的像与光学显微镜得到的并不完全一致,两者可相互补充。

**超声学 (ultrasonics)** 声学的一个分支。主要研究超声波的产生、接收和在媒质中传播的规律,以及超声波的各种效应和在国民经济中的应用。自1883年第一次制成超声气哨,开始对超声的研究以来,到了本世纪初,由于无线电电子学的发展,可利用某些材料的压电效应和磁致伸缩效应制成各种机电换能器,以产生各种频率和强度的超声发生器。超声波在媒质中的反射、折射、衍射、散射等传播规律虽与可闻声波并无本质差别,但超声在媒质传播时,由于与媒质的相互作用,会使媒质产生一系列物理与化学变化,出现一系列的力学、光学、电学和化学等超声效应,特别是它的非线性效应和声空化作用。近年来超声学的研究发展十分迅速,广泛应用于工农业生产、国防、医学、基础研究等各个领域,是一门应用性和边缘性很强的学科,同时它也是一门很年轻的学科,目前对超声应用的机理还未彻底了解,尚待深入研究。

**超声诊断 (ultrasonic diagnosis)** 利用超声反射原理来分析人体组织及脏器的结构、密度、大小、深度及其他有关的物理特性所构成的病理波型,从而对疾病作出诊断的技术。超声医学诊断吸收了工业上探伤的方法,其基本原理是利用超声波在穿过两种不同声阻抗的介质界面时,会产生反射和折射等现象,从而根据仪器记录的反射波诊断疾病状况。最早将超声应用于医学诊断,并试图首次制作人体声像的是德国的杜西莱。1942年他用超声束“照射”人体,然后测出通过人体的超声束强度。50年代初,美国的威尔德和霍里首次成功地在临床情况下应用超声技术诊断脑部损伤。现在超声探测应用于临床的范围有了明显的扩大,如可以利用超声确定眼睛的体积和水晶体的位置;可以确定胆囊结石的位置;可以帮助外科医生在心脏手术时,观察位于心室和心房之间二尖瓣的功能等。随着科技的进步,新型的超声诊断仪不断问世,常用的有A型超声诊断仪(利用幅

度调制)、B型超声诊断仪(利用辉度调制)、M型超声心动图仪、超声多普勒仪等。目前B型超声诊断仪应用最广泛,能显示肿物或病变的大小、范围和性质;能显示病变与周围组织或脏器之间的关系;能将显示屏上的图像记录储存。至今B型超声技术已发展到第四代,即将计算机与超声设备联接,产生了数字式超声图像。超声诊断操作简单、无损伤,是一种重要的诊断技术,它对疾病的早期诊断,对复杂疾病的正确诊断具有重要意义。

**超声治疗 (ultrasonic therapy)** 利用超声波的能量改变生物组织的结构、状态或功能,从而治疗某些疾病的一种方法。超声治疗包括超声理疗和超声手术两个方面。

超声理疗是利用强度较低的超声波(每平方厘米数瓦以下)的热效应、机械效应等,用聚焦或非聚焦束对疾病部位进行“加热”和机械刺激,来治疗某些疾病。它主要包括超声按摩、超声针灸及超声热疗。超声按摩、针灸对于治疗某些皮肤病、坐骨神经痛和某些神经疾病、脑血栓及促进伤口愈合和囊肿的吸收等都有较好的效果。超声热疗治癌的尝试已进行了数十年,实验表明,用聚焦超声对体表及体内深部的癌肿加温至42~43左右,配合化疗和放射性疗法,可有效地抑制癌细胞的生长,直至杀死癌细胞,而正常组织则不受影响。但因不同癌细胞对热疗的反应不同,目前尚未找到规律,对治疗机理尚缺乏了解,加之体内温度的精确测定问题尚未解决,因而,超声治癌目前还不能在临床普及应用。

超声手术主要有超声碎石和超声手术刀的应用两种。超声碎石主要是利用聚焦的高强度(数十至数百瓦每平方厘米)声波的空化作用以及机械效应使体内的结石碎裂,从而自行排出体外。目前,超声粉碎肾结石和膀胱结石已在临床有较多的应用。超声手术刀主要是将超声聚焦于刀端,通过刀的强烈振动打碎某些软组织如肝组织、脑组织等。这种手术刀主要用于肝或脑组织内肿瘤的切除等。手术中,打碎的组织碎屑则随时被冲洗并吸出。这种手术刀目前已在脑外科、肝外科手术中得到较多的应用。

超声治疗的研究工作始于本世纪30年代,于50年代十分活跃,后来由于技术上的原因以及由于超声生物效应的复杂性和对其机理及影响因素的基础研究不足,一些研究结果又互相矛盾而一度冷落;近一、二十年来,随着基础研究的逐渐深入和某些治疗效果得到肯定,超声治疗的研究又活跃起来,预计将有很好的发展前景。

**超外差接收机 (superheterodyne receiver)** 利用外差原理完成接收过程的无线电接收机。外差原理是超外差收音机、电视接收机和其他接收机赖以工作的基本原理。当两种不同频率的交变电流在非线性器件中进行混频时,会产生出两种新频率的交流电流,它们分别等于两个输入频率的和与差。在超外差接收机中,通常仅利用差频,把它作为中频放大器的输入。外差原理使我们可以把很宽范围的不同输入频率变换为预定的较低的中频值,从而在这一中频上进行更有效的放大。对于超外差收音机,中频值通常取465千赫。对于超外差调频接收机,标准的中频值为10.7兆赫。对于我国的电视接收机,视频信号中频值通常为37兆赫,声音信号的中频值为30.5兆赫。在超外差接收机中,中频信号经过放大以后,由检波器(调频接收器中称鉴频器)进行解调,以得到所需的声频输出信号。

天线输入回路变频器混频器本机振荡中放检波低放

### 图 1 超外差调幅接收机

### 图 2 超外差调频接收机

在电视和雷达接收机中，也采用类似的电路安排以便得到所需的视频输出信号。图 1 和图 2 表示超外差式调幅接收机和调频接收机的基本结构。图中 AFC 为自动频率控制电路。

**潮汐 ( tides )** 由于月球和太阳的引力作用，引起海面水位周期性涨落的现象。白天为潮，夜晚为汐。多数海区，每昼夜涨落潮约为两次，少数地区出现一日一次。潮汐产生的主要原因在于月球对地球的引潮力。地球和月球以万有引力相互吸引，两者都围绕共同质心作圆周运动。因而，地球上任一质点既受月球引力作用，又受地球绕质心运动时的惯性离心力作用。图 (a) 中是月球对地球上几个典型位置上的质点的引力。根据万有引力定律，月球对地球上每一质点的引力，其方向指向月心，而引力大小与月心和质点间距离的平方成反比。图中 A 点比 B 点离月球较近，因此，月球对 A 点的引力大于对 B 点的引力。月球对地球的引力可以用月球对地心的恒定引力与地球上随地点而变的

#### (a)(b)月球的引潮力

小的引力差值 (图 b) 的矢量和表示。这个小的引力差值就是月球的引潮力。较大的恒定引力完全被地球绕地—月系统质心作轨道运动的离心力平衡，在潮汐现象中不起作用。潮汐产生的原因还在于太阳对地球的引潮力，以及地球的自转和公转等，这些因素综合作用的结果，使地球表面同一地点的海面水位周期性起伏。阴历朔 (初一前后) 望 (十五前后)，日、月、地球三者几乎在同一直线上，此时引力最大，涨潮最高，落潮最低，称为大潮。上弦 (初八、初九) 和下弦 (廿二、廿三)，分别出现最低的高潮位和最高的低潮位，称为小潮。以海平面为起算基面，确定水面周期性升降的高程称为潮位。固体地球在日、月引潮力作用下引起的弹性、塑性周期性形变，称为地球潮汐或固体潮汐。

**城市形态遥感 (remotesensingofurbanmorphology)** 遥感技术用于探测、研究城市布局的空间结构和形式，城市用地的外部几何形态，城市的土地利用布局等。利用遥感遥测可以迅速而又全面、重复地对城市形态进行普查。如美国于 1970 年利用高空飞机和地球轨道卫星摄影的优点对城市土地利用情况进行了普查，所采用的遥感技术是多光谱摄影，所获得的遥感资料是彩色红外胶片，这类胶片还特别适宜于在城镇上空摄影，因为它对霾层有很高的透过率，能清晰地区分植被与其他特征。航空摄影也适宜于研究交通运输网，如道路规划、停车场地评定等。利用城市形态遥感资料可对城市形态作全面规划及改进工作。

#### 充磁机示意图

**充磁 (magnetize)** 使铁磁质获得或增强磁性的过程。充磁一般在充磁机上进行，充磁机如图所示。将待充磁的磁铁放置在电磁体铁芯的开口处。开口铁芯由电工纯铁制成，套有两组线圈。

充磁时，线圈中通以直流电流，使两级间产生强大的磁场，使磁铁进一步磁化而被充磁。断开电源后磁铁即可获得所需要的剩磁。有些仪表表头由于磁铁磁性减弱而使灵敏度降低，就必须给磁铁充磁。

**冲击摆 (ballisticpendulum)** 测量水平速射物体速度的一种实验装置。常用来测量子弹的速度。由一块质量较大的木块或砂箱被两根细绳

吊住，构成一摆动装置，如图所示。若碰撞时间（速射物体从开始射入摆锤到相对于摆锤的速度减少到零的时间）与摆的摆动周期相比很小，则可以认为在碰撞过程中摆锤始终处于平衡位置。在碰撞时间内，摆和入射物体不受水平外力作用，因而水平动量守恒。由动量守恒可求得入射物体的速度  $v$  为

$$v = \frac{m+M}{m} \sqrt{2gh},$$

其中  $m$  为入射物体的质量， $M$  为摆锤质量， $h$  是由于

冲击摆入射物体与摆锤的非弹性碰撞而使摆锤与嵌入其中的入射物体摆动的最大高度。根据上式，可以通过测量  $m$ 、 $M$  和  $h$  来决定  $v$ 。

**冲力 (impulsive force)** 在碰撞或打击过程中，物体间先突然增大而后迅速消失的力。冲力的特点是作用时间极短，但量值可以达到很大，以至在这段极短时间中的冲量仍保持为有限值，也就是，冲量的量值远大于冲力作用的时间量值，而远小于冲力本身的最大量值。由于在冲力作用的极短时间内，其他外力（如摩擦力和重力）的冲量很小，因而可以忽略不计。

**冲量 (impulse)** 力在时间过程中的积累效应的量度。即力与它的作用时间的乘积。若力  $F$  是常矢量，它在时间  $(t_1, t_2)$  中的冲量为  $I = F(t_2 - t_1)$ 。若力  $F$  随时间变化，它在时间  $(t_1, t_2)$  中的冲量为

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt.$$

冲量可以改变质点或物体的动量。由于冲量只与质点

或物体在冲量作用时间始末时刻的动量差有关，而与这段时间中作用力的变化和运动过程的变化无关，因而在研究作用时间很短、运动状态发生显著变化的过程时，例如碰撞等问题时，特别有用。这是因为我们并不需要，同时也很难测定在极短时间过程中运动状态变化的细节，真正需要了解的是在这一极短时间始末运动量的改变量。冲量的量纲与动量的量纲相同，为  $LMT^{-1}$ ，其中 SI 单位为千克·米/秒。

**臭氧层空洞 (ozone hole)** 极地上空平流层中的臭氧含量明显减少因而在整个大气臭氧层中好像出现了一个空洞的现象。

1985 年 5 月英国南极探险科学家乔·法曼首先提出南极出现臭氧空洞，即每年春季（9、10 月份）在南极正上空大约 12~20 公里高度处，大气臭氧层中的臭氧含量明显下降。然而，从 11 月份起臭氧浓度又开始回升。后来，美、日等国科学家均有类似的报告结论。如 1987 年 10 月、1989 年 10 月在南极上空测得平流层臭氧的含量均为 1979 年 10 月的一半左右，臭氧层空洞的范围约在 1000 万平方英里。观察表明，空洞的周围有高浓度臭氧的极气旋。空洞本身还有分层现象，有些层臭氧消耗较多，有些较少。臭氧层空洞现象后来在北极附近也被发现，臭氧含量的最低值发生在每年的 2 月份。

臭氧层空洞的发现表明大气臭氧层正在遭到破坏，到达地球表面的紫外辐射将增加，这对于人类、生物和气候都将带来不利的影晌。目前探讨臭氧层空洞的形成原因及如何保护臭氧层等问题已成为全球环境保护的重要内容之一。

南极臭氧层空洞形成原因有多种解释。它们分别从大气动力学、大气

化学等不同方面并结合实地测量而被提出。从大气动力学观点看，在南极地区，由于陆地的范围大以及陆海对比度明显，在南极上空容易形成相对稳定的极气旋。每当春季来临时，随着吸收太阳辐射的增加，极气旋的热量也剧增，气旋内受热的空气上升，减少了臭氧浓度，因而形成臭氧层空洞。大气化学说认为，臭氧是被含氟氯烃类物质及 NO、NO<sub>2</sub> 所消耗。这种长寿命的氟氯烃类物质通过紫外辐射的光解作用产生大量氯原子，氯原子和臭氧很容易发生反应，于是就破坏了臭氧层。以后的研究又发现 HCl 和 ClONO<sub>2</sub> 这两种物质发生反应会生成氯气和硝酸，氯气被光解后即生成氯原子。这种氯原子同样会与臭氧发生反应，因而破坏了臭氧层。

南极冬春季的平流层云为 Cl、ClO、HCl 和 ClONO<sub>2</sub> 之间达到快速平衡提供了条件。但是，对南极臭氧层空洞大量的测量数据表明：臭氧空洞的形成需从化学机制及气象过程两方面来说明。

大气平流层底部的臭氧层对于保护地球生命免受太阳紫外辐射的污染起着关键作用。它能吸收 240~320 纳米的紫外辐射，这些辐射可以使单细胞有机体（海藻、微生物、原生动植物等）和高等动植物的体表细胞死亡，也能损伤细胞的基因物质（DNA）以及引起人的皮肤晒斑，皮肤癌的发生也与紫外辐射的照射强度有关。

臭氧因吸收太阳紫外辐射、可见辐射及热红外辐射（9.6 微米）而使上层大气变热，使得对流层顶和平流层顶的温度稳定地分别维持在 220K 和 280K。这种臭氧加热为平流层上层和中间层的环流驱动提供了主要的能源。所以上层臭氧层的破坏会直接、间接地影响全球的气候。

为避免破坏臭氧层，有些国家已首先限制除必要设备必需以外的含氟氯烃类化合物如氟里昂的使用，至今已逐步发展成世界范围内的共同行动。1987 年 9 月，23 个国家的代表在加拿大蒙特利尔签订了一项议定书，其中具体规定了限制和减少氟氯烃使用的计划和要求。为加速消减氟氯烃的使用，保护全球的臭氧层，1989 年 5 月又有 80 多个国家共同发表了《赫尔辛基宣言》。

**触发器 (trigger)** 在外加信号触发下能转换工作状态的电路。通常用触发器的输出电压表明其工作状态。触发器分为两类：双稳态触发器：它有两个稳定的工作状态。在外加信号触发下电路可从一种稳定的工作状态转换到另一种稳定的工作状态。双稳态触发器可用来构成各种计数器、分频器和寄存器等。单稳态触发器：它有一个稳定的工作状态和一个暂时稳定的工作状态。无外加信号触发时，触发器处于稳定的工作状态，在受外加信号触发后，触发器从稳定的工作状态转换到暂时稳定的工作状态，经过短暂时间后，自动返回到原来的稳定工作状态。单稳态触发器可用于脉冲整形和脉冲延时。

基本的触发电路有 R—S 触发器、T 触发器、D 触发器和 J—K 触发器等，下表列出了基本触发器的逻辑符号和真值表。

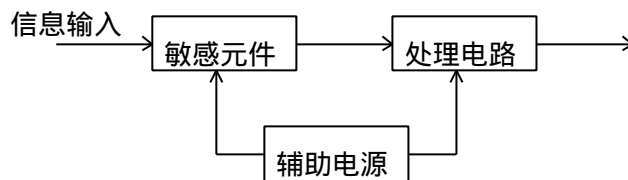
各种触发器的逻辑符号和真值表

各种触发器均可由分立元件构成，也可由集成电路来实现。随着集成电路技术的发展，集成触发器的品种逐渐增加，性能优良，其应用将日益广泛。

**传感器技术 (transducer technique)** 传感器研究、开发和应用技

术。与信息检测、材料科学、加工制造等学科技术密切相关。通俗说来，传感器就是用人工方法制造的能感知外界信息的人造器官。在发展早期，它的含义较广，将水银温度计、气压表及湿度计等都包含在内。1959年莱昂提出传感器的输出信号必须是电信号的主张，获得了人们普遍承认。因此，传感器按工作原理来说就是按一定规律将各种被检测量转换成便于处理的电学量的器件。

自然界的条件是千变万化的，外界的信息是多种多样的，实际要测量和控制的对象也是五花八门的。同时这些被测量绝大多数是非电量，这些非电量信息即使能被检测，也难以放大、处理和传输。因此，传感器首先将这些信息都转换成电信号，然后再通过电子线路将电信号进行处理放大，最后用仪表指示或用显示器显示，或者通过计算机对某些设备进行控制。各种传感器的工作原理可以千差万别，但其结构却均可分为两部分：敏感元件和处理电路。如图所示，



传感器结构原理图

敏感元件执行传感功能，将非电量信息转换为电信息；处理电路对敏感元件输出的电信息进行处理。

传感器技术涉及的面很广。例如：传感器原理的选择。同一个被测对象往往可以采用不同工作原理的传感器来进行检测，这就有一个传感原理的选择问题，当然也包括新的传感原理的探索和基于新传感原理的新型传感器的开发问题。传感器材料问题。制造传感器的“敏感”材料是传感器技术的物质基础。人们最早应用的敏感材料是半导体类型材料，以后陆续出现了如记忆合金、非晶态半导体、快离子导体、压电陶瓷、功能高分子材料、光学玻璃纤维、超导材料等。传感器制造工艺。它要求先进的、高精度加工和组装技术。目前的传感器已朝着微型化、集成化、多功能和智能化方面发展。所谓传感器智能化，就是指在一块芯片上，除了制作若干个传感器之外，还要把信号处理电路也集成在上面，构成“信息型传感器”。

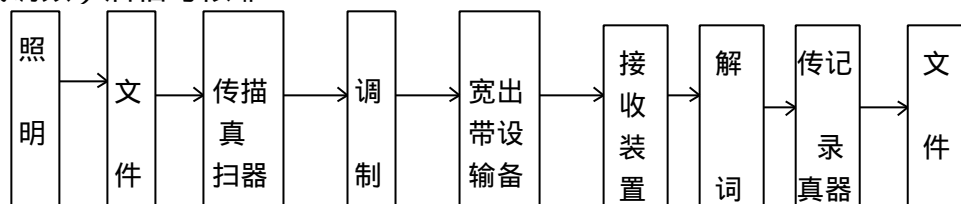
传感器种类繁多。根据传感器感知外界信息的原理，可以将其分为三类：物理传感器——基于物理效应（如光、电、声、磁、热等）进行的传感器；化学传感器——基于化学反应（如化学吸附、选择性化学反应等）进行工作的传感器；生物传感器——基于酶、抗体、激素等分子识别功能的传感器。根据传感器感知对象的不同可以分为温度、湿度、压力等传感器。也可按其使用的敏感材料来分类，如半导体传感器、光纤传感器、陶瓷传感器等。

随着科学技术的迅猛发展，特别是微型计算机的广泛应用，机—电—仪一体化日益明显，传感器技术显得越来越重要。

传声器（microphone）旧称微音器，通常称话筒或麦克风（英文的音译），将声信号转换成相应电信号的器件。广泛用于广播、录音和扩音

设备中。传声器的主要性能指标有：灵敏度、频率响应、指向性、失真系数、输出阻抗、动态范围等。按不同的构造和工作原理可分为压电式、电动式、炭粒式和电容式（包括驻极体）等数种。压电传声器是靠具有压电性质的晶体变形产生电动势的传声器；电动传声器是利用导体在磁场中运动而产生输出的传声器；炭粒传声器是靠炭粒间接触电阻的变化而起换能作用的传声器；电容传声器是靠电容变化工作的传声器。不同场合使用不同类型的传声器，要求的特性也不完全相同。

传真（facsimile）用有线或无线电传送固定图像的收发系统。图像或有关的复制品通常的形式有照片、手迹、地图或图纸等。传真可以利用电报、电话线路实现，也可用专线实现，但前者价廉实用。传真的原理如下图所示。光源将文件照明，传真扫描器把复制件分成许多小点或像素，并有次序地将各点的光强通过光敏元件转换为图像电信号，经调制（调幅或调频）后信号依靠



传真原理方块图

宽带输出设备，通过有线或无线电传送至用户的接收装置，信号经放大、解调后复原为图像电信号，该信号送入传真记录器，按传真扫描器转换时的次序，重新复制文件。

电话传真是新闻报导和文件传真中使用最广的传真方式。它是利用普通的电话线路实现的图像信息收发系统。因为它不必采用专用线路，所以价廉实用。电话传真只需配一微型传真机，就可使电话线路不仅能通话，而且能进行文件和图片的传真。

目前，传真应用极广，发生在报纸发行地区以外的新闻事件的照片，都是用传真发送的。有些国家的远地城市的整版报纸，也是由传真发送的版印刷的。铁路上应用高速传真（每分钟几页）来传送运输单。

串行接口（serial interface）在微机中指的是异步通讯接口适配器，这是一种通讯接口的大规模集成电路。其结构由发送和接收两部分组成。发送部分能接收与寄存由 CPU 并行送出的数据，通过移位寄存器变为串行并添加一个起始位、奇偶校验位及规定的停止位，由一条数据线发送。接收部分把接收到的数据，去掉起始位、停止位，检查有无奇偶错误，有无帧错误，然后把接收的字符经过移位寄存器转变为并行以后，送至接收数据寄存器，以便由 CPU 用输入指令取走数据。

此外，接口片中还要有控制部分，CPU 通过它除了实现片内的控制以外，还向外部设备发出控制命令，同时把外部设备的状态，通过它传送给 CPU。

接口片的功能可以通过软件编程来选择和确定。确定的内容主要有：传送的波特率；字符格式；时钟脉冲周期与数据位周期的比例系数 K；同步还是非同步（即异步）传送；命令和状态位的确定。

创造能力（creativity）符合创造活动要求的某些能力的结合。集



中表现为在不同活动领域（图形的、符号的、语义的、行为的）内的发散性思维能力。具有创造能力的人，善于根据一定的目的、任务进行求异思维，善于在头脑中构造出各种新形象，善于独立解决各种新问题。心理研究认为智力与创造力在一定范围内相关性是低的，它们是既有联系又不完全相同的两种能力。创造性认知的主要特点是：流畅性——短时间回答许多问题时思考速度快；灵活性——能用广泛的观点进行思考，能提出丰富的假设和机灵的推测；感受性——对缺欠、必要、异样情况加以注意的敏感性；独创性想到别人没想到的事情，根据直觉，大胆、迅速地对问题的本质作出试验性结论。

跟模仿相对立，只有在求异思维中才能更好地培养创造性。物理教学中应鼓励和启发学生敢于猜测和设想，敢于发问和大胆提出自己的见解。

**纯音**（Pure tone）物体振动时只发出一种频率的声音。即指瞬时值为一简单的正弦时间函数的声波，或指具有单一的音调。音叉的声音非常单纯，每秒振动 500 次的音叉，受小槌敲击后，就只发出频率为 500 赫的声音。通常用音叉来校音。

**磁**（magnet）起源于电荷运动的物质属性或存在方式。电荷在静止时，只能与其他电荷间有电场力作用。但在运动的电荷之间，就不仅有电场力作用，还会有磁场力作用。因此，磁可以看作是电荷的一种运动效应。

人类对磁的认识经历了长期的发展过程。我国对磁的认识较早。在古代文字记载中，称磁石为“慈石”，意为铁的“慈母”，说明当时早已发现磁石吸铁的现象。在战国时代已有用天然铁矿石琢磨成的指南器械，称为“司南”。最早的记载见于《韩非子·有度》篇，其著作年代约在公元前 3 世纪。这是我国古代劳动人民的四大发明之一。到了 11 世纪的北宋年代，指南针开始用于海船的引航。西方关于磁的记载最早始于公元前 5 世纪左右。磁石长期被当作护身符或馈赠珍玩。指南针在我国发明 1000 多年以后，才开始传入欧洲。15 世纪西方进入自然科学新的发展时期以后，磁现象仍然被看作是与电现象无关的。直到 1820 年，奥斯特通过实验揭示了电流的磁效应。在这一发现的基础上，法国物理学家安培提出了分子电流假说，认为一切磁现象的根源在于电荷的运动。至此，人类对磁现象的认识进入了一个新的阶段。

**磁体** 也称“磁铁”。具有磁性的物体。天然磁体通称为“磁石”，人造磁体往往有不同的名称。常对磁体作如下分类：永磁体能较长期地保持磁性的物体。天然磁体是以  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  为主要成分的矿石构成的永磁体，其磁性可长久保持，但一般较弱。人造永磁体则是由硬磁材料经磁化后获得，常制成条形、马蹄形、柱形等，应用于各种电表、扬声器、拾音器、耳机、永磁发电机等器件和装置中。优质人造永磁体可在气隙中产生高达 0.7T 的磁场。电磁铁。利用电流的磁效应使铁芯磁化而获得较强磁性的装置，由软磁材料制作的铁芯和励磁线圈组成。当线圈中通有电流时，铁芯被磁化而产生磁场；电流切断后，磁场亦随之消失。小型电磁铁根据铁芯材料不同，可用于继电器、接触器、振荡器等各种电工、无线电设备中。大型电磁铁则应用于起重、选矿设备以及电磁制动器等，其磁极附近的磁场强度可达 1.8T 左右。超导磁体。用超导材料绕制成的通电线圈。磁极附近可产生高达 10T 的磁场。在这样强的磁场下，铁磁质早已出现磁性饱和（参见磁滞回线），故不能再采用铁芯。超导磁体现已应用于高能加速

器、磁流体发电、探测器等装置以及磁悬浮列车、超导电机、受控核聚变等研究中。 生物磁体。生物体内的磁结构。人们早就在注意磁的生物效应。1975年一位美国研究人员发现一种厌氧细菌，其体内有20~50个可以分开的小磁体组成的磁链。由于南北半球地磁场磁场线倾斜方向不同，两半球的这种细菌体内磁链的极性也正好反向，保证了在地磁场的作用下向水底淤泥，而避开水表富氧层。这是人类第一次可重复地证实生物磁体存在的例证，相继的研究正在深入。

**磁极** 磁体上磁性最强的部分。针形、条形、马蹄形磁体的磁极都位于两端处。在水平面内自由转动的磁针或条形磁体，在地磁场中静止时大致呈南北方向，指北的一极称磁北极或N极，指南的一极称磁南极或S极。磁体的同名极相斥，异名极相吸。任何磁体的南、北两极总是成对出现，而且强度相同，两极共存构成磁体，即使切割开来仍然如此，这是磁现象的一个基本特点。现代量子理论认为，在微观领域中可能有单独磁极存在，这种仅具单独磁极的粒子称磁单极子。但迄今尚未观察到这种磁单极子。

**磁性** 某些物质所具有的能激发磁场、并在磁场中受到力作用的属性。自然界中许多物质都呈现出磁性，有些物质如铁、钴、镍以及它们的合金和氧化物能呈现出很强的磁性（铁磁性）。现代技术已能使某些物质获得极强的磁性。近代物理学理论认为，组成物质的原子中，电子绕原子核运动具有轨道磁矩，原子核和电子、质子等基本粒子还存在自旋磁矩。它们是物质磁性的起源。通常由于热运动，上述磁矩的取向混乱，大多数物质在宏观上不呈现磁性。但某些物质由于自然的或人工的原因使上述磁矩出现有序性排列时，这些物质便呈现出宏观尺度上的磁性。有序程度越高，物质的磁性就越强。

**磁学** 研究物质磁性及其应用的学科。从安培分子电流假说开始，物理学便试图从微观结构上阐明物质的磁性。统计物理学和洛伦兹的电子论先后作出了重要贡献。以这两种物理理论为基础，经典物理学在说明物质的抗磁性、顺磁性和铁磁性方面取得了一定成功，形成了相对独立的磁学理论。但由于物质磁性起源于物质内部电子和核子的运动，这种运动都服从量子规律，经典物理的磁学研究不可能不存在种种缺陷。本世纪20年代以后形成的量子理论，弥补了以往磁学的缺陷，为揭示物质磁性的微观机理作了更深入的探索。由于研究的深入，目前磁学已从电磁学中分离出来，成为一门独立的学科。

**磁场 (magnetic field)** 传递运动电荷或电流之间相互作用的物理场。它是由电流、运动电荷、磁体或变化的电场在周围空间所产生的一种特殊形态的物质。这种物质与实物物质的最大区别在于其空间叠加性，即几个电流（或运动电荷、磁体等）所产生的磁场可以同时占据同一空间。另一方面，磁场也具有与实物物质相同的某些属性，如质量（指动质量）、能量、动量等。

磁场的基本特征是，对引入场中的运动电荷或载流导体有磁力作用，且当载流导体在场内移动时，磁力可对之作功。

描述磁场的基本物理量是磁感应强度，并常用磁场线（或称磁感应线）形象地描述磁场。任何磁场的磁场线都是一些无头无尾的闭合回线，表明磁场的属性与静电场不同，在理论研究中称它为无源有旋非势场。按照分布的空间、时间特性，常对磁场作如下分类。

(1) 匀强磁常空间各点场的强弱和方向都相同的磁场。其磁场线是一组平行且等距离排列的直线。这种磁场一般仅能在一定的空间范围内存在，如载流直螺线管内部中央区域，大型磁铁相对两极之间的中央区域等。

(2) 非匀强磁常空间各点场的强弱和方向不相同的磁场。其磁场线在空间的疏密和走向也不相同。实际的磁场一般都是非匀强磁场。

(3) 静磁常亦称稳恒磁常强弱和方向都不随时间变化的磁场。由稳恒电流或静止磁体所产生。

(4) 交变磁常强弱和方向均随时间作周期性变化的磁场。由交变电流、振荡的电荷或磁体所产生。

(5) 脉动磁常仅强弱变化而方向不变的磁常常见于电工、无线电、计算机以及自动控制等技术中。某些星体的磁场也具有脉动性。

人类对磁现象的早期认识都是和磁石、铁磁质等实物相联系的。19世纪初叶，电流磁效应的发现为统一的电磁学研究开辟了道路。后来，英国物理学家法拉第建立了场的观念，改变了以往关于电力、磁力等都是“超距力”的看法，对电磁学的发展起了巨大的推动作用。麦克斯韦进一步发展了法拉第的场观点，建立了统一的电磁场理论。特别是他关于电磁波的预言以及后来电磁波的发现，进一步确证了磁场和电场一样，都是统一的电磁场的一个方面。

在自然界中，磁场是一种广泛的物质存在。各种天体和地球一样都在产生磁场，星际空间中也存在着强度极不相同的磁场。磁场和电场一样，是各种微观运动的基础。对于各种生物，磁场也伴随生命过程而存在。例如，人体的某些组织和器官，都由于生命活动而产生磁场，虽然极其微弱，但却十分重要。许多动物和植物，甚至连一些细菌体内，都发现有磁结构。在现代的人类世界中，电磁场以及各种相应的电磁技术更是渗透到科学技术、工农业生产以及人们日常生活的各个方面。

**磁场高斯定理** (Gauss theorem of magnetic field) 描述磁场性质的定理之一。磁场中通过任意闭合曲面的磁通量恒为零，即

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0.$$

由于任意磁场的磁场线都是无头无尾的闭合回线，这样的磁场线如果从某闭曲面上的某点处穿入，则必然从另一点处穿出，这个定理的正确性是显而易见的。此式说明，磁场中既不存在发出磁场线的“源头”，也不存在吸入磁场线的“尾闾”，这表明，自然界中不存在与自由电荷相当的“自由磁荷”。在理论上，即称磁场为无源场或无散场。

**磁场能量** (energy of magnetic field) 简称“磁能”。磁场所具有的能量。某点处单位体积内磁场的能量称为该点处的磁能密度，常用符号  $w_m$  表示，即

$$w_m = \frac{1}{2} \mathbf{H} \cdot \mathbf{B}.$$

除了在各向异性介质中  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{H}$  的方向有偏离外，一般都是一致的，且  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ ，故

$$w_m = \frac{1}{2} \mathbf{H} \mathbf{B} = \frac{1}{2} \mu \mathbf{H}^2 = \frac{\mathbf{B}^2}{2\mu},$$

式中  $\mu$  为介质的磁导率。在场空间中体积  $V$  内的磁能为

$$W_m = \int_v \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} dV = \int_v \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} dV。$$

在稳恒磁场的情形下，磁场总是和电流伴随存在的。电流体系（或磁体的磁性）建立的过程也是磁场建立的过程。在这过程中电源必须做功，例如对一自感为  $L$  的回路，这功为

$$W = \frac{1}{2} LI^2，$$

式中  $I$  是回路达到稳定时的稳恒电流强度。这功既可看作转化为电流体系的能量，也可看作是储存在磁场中的能量。但由于麦克斯韦电磁理论的建立，特别是电磁波的预言被证实以后，磁场被确认为物质存在，凡与磁场相联系的能量也被看作定域于场中，而称为磁场能量。能量成为磁场的物质属性之一。

**磁场强度**（magnetic field strength）描述磁介质中磁场的一个辅助物理量。常用符号  $H$  表示。它的定义为

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}，$$

式中  $B$  为磁感应强度， $M$  为磁化强度， $\mu_0$  为真空磁导率。

在各向同性线性介质中，磁化强度  $M$  与磁场强度  $H$  成正比，即  $M = \chi_m H$ ， $\chi_m$  为介质的磁化率。于是  $B = (1 + \chi_m) \mu_0 H = \mu_r \mu_0 H = \mu H$ ， $\mu_r$ 、 $\mu$  分别是介质的相对磁导率和磁导率。在各向异性或非线性介质中， $B$  与  $H$  间的关系就不再是简单的比例关系。

决定电流或运动电荷在磁场中所受磁力作用的物理量是磁感应强度  $B$ 。在研究均匀磁介质充满所在空间中的稳恒电流所激发的磁场时， $M$  仅与束缚电流的分布有关， $H$  仅与自由电流（即引起磁化的外电流，由电荷的宏观定向运动产生）的分布有关，而  $B$  则与实际存在的所有电流（包括自由电流和束缚电流）的分布有关。 $H$  往往可由安培环路定律方便地求出，再由  $B = \mu H$  即可求得  $B$ ，从而避开了磁化细节的讨论。 $H$  作为辅助物理量的意义也在于此。对照电场强度  $E$  和电位移矢量  $D$  的关系可以看出， $B$  的地位与  $E$  相当， $H$  的地位与  $D$  相当。但由于历史的原因，“磁场强度”这一名称被赋予了 this 辅助物理量。

在国际单位制中， $H$  的单位也是  $A/m$ 。在高斯单位制中，其单位为奥斯特（Oe）， $1A/m = 4 \times 10^{-3} Oe$ 。

**磁场线**（magnetic field line）即“磁力线”、“磁感应线”或“ $B$  线”。形象描述磁场分布情况的假想曲线。曲线上各点的切线方向与该点处磁场方向相同，曲线排列的疏密则表示该点处磁感应强度的大小。可用实验方法显示磁场线的分布状况。例如，在磁场中用铁屑或许多小磁针置于平玻璃板上，轻轻敲击，铁屑或小磁针就会按磁场线方向排列起来。

同一磁场中任意两条磁场线不得相交。任意磁场的磁场线都是无头无尾的闭合曲线，磁场是“无源场”。闭合的磁场线总是和电流或电荷的运动路径互相套合的。磁体的磁场线从  $N$  极出发回到  $S$  极，然后经磁体内部连接起来形成闭合回线。

磁场线的概念是由法拉第于 1831 年前后首先提出的，为研究电场和磁场提供了很大方便。因为当时习惯上采用磁体的相互作用描述磁力，而磁极间的作用力也恰好沿磁场方向，磁场线由此得名。实际上，不管是运动

电荷所受的洛伦兹力，还是电流元所受的安培力，都是和所在处磁场方向垂直的。“磁场线”以前曾称为“磁力线”、“磁感应线”或“B线”。为统一起见，现已规定称为“磁场线”。

**磁畴 (magnetic domain)** 铁磁质内自发饱和磁化的小区域。可用磁畴结构来解释铁磁质强磁性的起因。现在可采用多种方法直接观察铁磁质的磁畴结构。根据量子力学理论，铁磁质中相邻原子间存在较强的交换耦合作用，从而使相邻原子的磁矩取向一致，在一定范围内形成自发饱和磁化。磁畴大小不一，其体积平均约为  $10^{-12}\text{m}^3$ ，内含  $10^{12} \sim 10^{15}$  个原子。相邻磁畴间有畴壁隔开。每个磁畴都有相当大的微观磁矩，但由于各磁畴磁矩取向混乱，整块铁磁体宏观上不呈现磁性。当外磁场存在时，磁矩方向与外磁场方向相同或相近的磁畴将扩大，畴壁外移；而磁矩方向与外磁场方向偏

无外磁场外磁场外磁场外磁场外磁场

外磁场从零逐渐增大时畴壁的移动和磁畴取向

离较大的磁畴将缩小，畴壁内移。外磁场超过一定强度以后，这种畴壁移动将急剧加快，铁磁体的磁化强度迅速增大，直至与外磁场反向的那些磁畴完全消失。与此同时，各磁畴的磁矩也有沿外磁场方向排列的倾向。当所有磁畴的磁矩方向都与外磁场方向相同时，磁化便达到饱和状态。由于畴壁移动和取向运动都伴随有热损耗，这是一种不可逆过程，所以当外磁场减弱或消失时，磁畴结构不可能再按原来的变化过程逆向恢复原状，因此必然出现磁滞和剩磁现象。

加热、锤击或强烈的超声波作用等都能破坏铁磁质的磁畴结构。例如，当温度高于居里温度时，铁磁质的磁畴结构将被破坏，此时铁磁质将转变为普通的顺磁质。磁畴可用粉纹法、磁光法等方法进行实验观察。粉纹法是在磨光的铁磁质表面撒上一层极细的铁粉，用金相显微镜可观察到铁粉沿磁畴边界聚集的图形。磁光法则利用偏振光的克尔效应来观察磁畴结构。

**磁带录像 (videotape recording)** 利用磁带记录、重放图像和声音信息的技术，完成这种功能的设备称磁带录像机，简称录像机。磁带录像是一种集机、电、磁于一身的综合性技术。1950年，美国安培公司开始试制磁带录像机。1956年制成第一台使用2英寸(51毫米)磁带的四磁头横向扫描录像机。这种录像机采用旋转磁头轮，其上均匀对称地安放四个磁头，磁头面与磁带方向垂直。60年代初制成1英寸(25.4毫米)磁

带的单磁头螺旋扫描录像机，并采用开盘式磁带。70年代初出现了 $\frac{3}{4}$ 英

寸盒式磁带的双磁头螺旋扫描录像机。盒式录像机的出现不仅克服了开盘式录像机装带麻烦的缺点，而且以其高性能、高质量、低成本、使用方便等特点，加速了录像机的普及。70年代中期研制出 $\frac{1}{2}$ 英寸盒式磁带双磁

头彩色盒式录像机。80年代初出现 $\frac{1}{2}$ 英寸盒式磁带的摄录一体机，使录像设备更趋完美。

磁带录像是在磁带录音基础上发展起来的。它们记录信号的原理相同，差别在于录像机记录的信号频率可高达6兆赫，比录音机记录的信号

频率(20千赫)高两个数量级以上。根据磁记录原理,磁头与磁带间相对速度 $v \geq 2gf$ 。式中 $f$ 为最高记录频率, $g$ 为磁头缝隙宽度。因此,录像机一方面要减小磁头的缝隙 $g$ (一般在1微米以下),同时要增加磁头与磁带之间的相对速度(速度达数十米每秒)。为减少磁带用量,采用磁带低速行走,装磁头的圆形磁鼓高速旋转的螺旋扫描录像方式,因此在磁带上的磁迹是倾斜的,如下图所示。伴音的录音方式与录音机的录音方式相同,记录于磁带的边缘。磁带另一边由控制磁头录控制信号,通过伺服系统使录放时速度自动扫描跟踪,以保证图像稳定。

#### 螺旋扫描与倾斜磁迹图

盒式录像机的分类方式有多种。首先,按使用磁带宽度可分为

$\frac{1}{2}$ 英寸、 $\frac{1}{4}$ 英寸和8毫米3种。按磁带的磁迹位形可分为VHS、

Beta-max、V-2000、 $\frac{1}{4}$ CVC和8毫米五种,五种格式之间磁带不能

互换。目前以VHS和Beta-max机为主流。

盒式录像机的基本组成主要包括以下几部分:盒式磁带。各种磁头:视频磁头、音频磁头、控制磁头、时间地址码磁头、旋转消磁头、全消磁头,它们大多数是录放共用。视频信号处理系统:它包括高度和色度信号处理两部分。音频信号处理系统:把待录的音频信号处理成音频磁头能记录的信号,重放时还原成音频信号。伺服系统:为磁鼓和主导轴电机提供伺服电压和驱动电压,使磁鼓电机、主导轴电机转速均匀、稳定,从而确保磁鼓旋转均匀,走带稳定,使记录的磁迹满足标准规格并能按同样精度重放。机械系统:主要包括走带机构和加载机构,为稳定走带、加、卸载及其他工作提供机械保证。系统控制:录像机的中枢指挥系统。对各种工作方式、保护及控制电路发出指令,并使其按预定程序工作,从而协调和控制机械部分的动作及电路的工作状态,完成各种操作、控制及保护功能。调谐器:由天线输入电路、调谐器及中频放大器组成,用以把电视广播射频信号解调为视频信号和音频信号,使录像机能直接记录当地电视台节目。射频变换器:将录像机内各种视频信号和音频信号调制到电视发射频率,由射频插座输出,供接收机直接收看。电源:将220伏交流电源整流、稳压,为录像机各部分提供电源电压。

录像磁带是用矩形系数好的二氧化铬或钴三氧化二铁作磁性层,用抗拉强度高不易变形的涤纶作带基。

磁性层经过镜面加工处理以减小对磁头的磨损。常用的VHS录像带的规格列于下表。标有字母“E”的VHS录像带适用于PAL制(我国电视制式),也适用于SECAM制。标有字母“T”的磁带适用于NTSC制。

两者的主要差别仅在于磁带长度和厚度上,可以通用,但录放时间有所改变,根据长度可进行换算。例如T—120在NTSC制中可录放120分钟,在PAL制中则可录放172分钟。

常用VHS录像带规格表

种类	录放时间 (分)	磁带长度 (m)	带盘轴直径 (mm)	导带和尾带 (mm)	磁带厚度( $\mu\text{m}$ )
E-180	180	> 257	26	$170 \pm 20$	$19 \pm \frac{1}{2}$
E-120	120	> 173	26	$170 \pm 20$	$19 \pm \frac{1}{2}$
E-90	90	> 130	62	$150 \pm 20$	$19 \pm \frac{1}{2}$
E-60	60	> 87	62	$150 \pm 20$	$19 \pm \frac{1}{2}$
E-30	30	> 44	62 或 70	$150 \pm 20$	$19 \pm \frac{1}{2}$
T-120	120	> 247	26	$170 \pm 20$	$20 \pm \frac{1}{2}$
T-90	90	> 187	26	$170 \pm 20$	$20 \pm \frac{1}{2}$
T-60	60	> 127	62	$150 \pm 20$	$20 \pm \frac{1}{2}$
T-30	30	> 64	62 或 70	$150 \pm 20$	$20 \pm \frac{1}{2}$

**磁带录音** (magnetic tape recording) 利用涂敷磁粉的塑料磁带记录 and 重放声音信号的技术。完成这种功能的设备称磁带录音机, 简称录音机。录音原理是基于硬磁材料被磁化后留有剩磁以及一长条形硬磁材料可以分段进行磁化的现象。

图 1 磁带录音过程示意图

录音过程如图 1 所示。声音信号电压  $e$  加在有缝隙的环形录音磁头上, 通过线圈的声音信号电流在磁头缝隙处会形成信号磁场。当磁带以均匀速度通过该磁场时, 磁带上的磁性层磁化后就会留下剩磁, 剩磁强弱与磁带该处通过磁头缝隙时磁头线圈的信号电流成比例。这样, 声音信号就以剩磁形式记录在磁带上。

将录有声音信号的磁带按录音时相同的速度通过有缝隙的环形放音磁头, 此时记录在磁带上的剩磁就会在磁头线圈上感应出与已录信号相应的电动势, 经放大后便能复现出原来的声音。

磁性录音机是丹麦人浦耳生于 1898 年发明的, 他所用的记录媒质是钢丝。1936 年, 德国首先制成磁带录音机。

磁带录音机的种类很多, 按所用磁带分, 有盘式录音机和盒式录音机。盘式磁带宽 6.30 毫米, 盒式磁带宽 3.81 毫米。还有一种微盒式磁带录音机, 也是用 3.81 毫米宽的磁带, 但磁带更薄, 盒子更小, 机器常做成袖珍型。

磁带录音机的标准带速是 76.2、38.1、19.05、9.5、4.76、2.38、1.19 厘米/秒, 专业录音机常用较高速度, 家用录音机一般速度较低。盒式机通常用 4.76 厘米/秒的带速。微盒式机多用 2.38 厘米/秒和 1.19 厘米/秒的低档带速。

单声道磁带录音和立体声磁带录音的区别在于录音和放音磁头数以及磁带上记录的磁迹数。如图 2 所示，单声道录音时，只用一个录音磁头，磁带上的磁迹只有一条，若是往返磁带，则磁带上记录有往返两条磁迹(图 2(a))。立体声录音时，有两个叠置在一起的录音磁头，因此，磁带上记录有往返四条磁迹。(图 2

(a)单声道(二迹往返) (b)立体声(四迹往返)

图 2 磁头和磁迹

(b))。与唱片相比，磁带录音的优点是可以消磁和多次重新录音，使用方便。

**磁单极子 (magnetic monopole)** 带有单一极性磁荷的粒子。现有的电磁学理论表明，电的基本单元是电荷，但磁的基本单元是磁偶极矩，它可看作正负单极磁荷的组合。单独的自由磁荷并不存在。1931 年，英国物理学家狄拉克首先探讨了磁单极的存在将会导致什么结论的问题。他讨论了一个电荷为  $q$  的带电粒子在磁荷为  $g$  的磁单极子的场中运动的量子力学问题。

为了得到合理结果，他发现如下条件必须成立：

$$qg = n \frac{h}{\mu_0}, (n = 1, 2, 3, \dots)$$

其中  $h$  为普朗克常数， $\mu_0$  为真空磁导率。 $n=1$  对应于最小电荷(即  $e$ )和最小磁荷。上述结果表明，基本电荷应该是  $h/\mu_0$  的整数倍，这就对“电荷量子化”给出了一种解释。电荷量子化是自然界中的一个令人奇怪的现象，任何带电物体，无论它们的其他性质有多大差别，它们的电量却总是精确地等于基本电荷  $e$  的整数倍。如果将  $e$ 、 $h$  和  $\mu_0$  的值代入上式，并取  $n=1$ ，便可得到基本磁荷的值为  $g=3.3 \times 10^{-9}$  磁库。自从 1931 年以来，对磁单极子问题的研究始终没有停止过。1974 年建立了较严格的关于磁单极子的理论。另一方面，许多物理学家已作了许多努力，期望通过高能加速器和宇宙线实验，或者通过从采集到的古老岩石、陨石和月球岩石等样品的分析中找到磁单极子。但所有这些努力至今尚未取得任何肯定的结果。

**磁导率 (permeability)** 也称“绝对磁导率”。表征磁介质磁属性的物理量。常用符号  $\mu$  表示。在相同的磁化条件下，不同介质的磁化强弱程度以及介质内部磁场的强弱都是不同的，而对于一定的各向同性均匀(且假定充满磁化空间)介质来说，各点磁感应强度  $B$  与该点处外磁化场强度  $H$  的比值是一定的。磁导率即以这一比值来度量，即

$$\mu = B/H。$$

在国际单位制中，其单位为  $H/m$  或  $N/A^2$ 。在各向异性介质中，磁导率与方向有关， $B$  与  $H$  的方向也有所偏离，这时的磁导率表现为一个张量。

**真空磁导率** 表征真空磁属性的物理量。常用符号  $\mu_0$  表示。采用国际单位制时，在毕奥-萨伐尔定律中引进一个有量纲的常数  $\mu_0$ ，从而将定律表示为

$$dB = \frac{\mu_0 Idl \times r}{4\pi r^3}，$$



这里的  $\mu_0$  即真空磁导率，其值与电流强度单位安培的定义有关，根据规定取作

$$\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{H/m (或 N/A}^2\text{)}。$$

相对磁导率表征磁介质属性的物理量。常用符号  $\mu_r$  表示。其定义为

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \text{ 或 } \mu_r = 1 + x_m,$$

式中  $\mu$  为该种介质的磁导率， $\mu_0$  为真空磁导率， $x_m$  为该种介质的磁化率。对于一般的各向同性顺磁质和抗磁质， $\mu_r$  不随外磁场变化，都是接近 1 的纯数，顺磁质的  $\mu_r$  稍大于 1，抗磁质的  $\mu_r$  稍小于 1。铁磁质的  $\mu_r$  一般很大，且随外磁场变化。典型的  $\mu_r \sim H$  曲线如图所示，其中的  $\mu_r^{(1)}$  称“起始（相对）磁导率”，相应于开始磁化时的情形； $\mu_r^{(m)}$  称“最大（相对）磁导率”，相应于磁化曲线斜率最大处的情形； $\mu_r^{(s)}$  称“饱和（相对）磁导率”，相应于磁饱和时的情形。对于各向异性磁介质，由于磁化与方向有关， $\mu_r$  和  $\mu$  一样都表现为一个张量。

**磁感应强度** (magnetic induction) 表示磁场对进入场中的运动电荷（或载流导体）有作用力这一基本性质的物理量。是矢量，常以符号  $B$  表示。实验表明，运动电荷在磁场中要受到力的作用。对于一定的磁场，处于确定点  $P$  的自由小磁针磁北极所指方向是一定的。电量为  $q$  的电荷以速率  $v$  垂直该方向通过  $P$  点时所受到的作用力最大，记为  $F$ ，且与乘积  $qv$  成正比，比值在场中不同点可以不同，但对确定的点来说是一定的。规定这一比值为该点磁感应强度  $B$  的大小，即

$$B = \frac{F}{qv},$$

而  $B$  的方向则由矢积  $F \times v$  的方向决定，即为自由小磁极在该点时磁北极所指方向。磁感应强度的方向也称为该点磁场的方向。

此外，也可以由电流元在磁场中受力作用来定义磁感应强度。

在国际单位制中，磁感应强度的单位是特斯拉 (T)。有时也使用高斯制单位高斯 (Gs 或 G)， $1\text{T} = 10^4\text{G}$ 。

**磁荷理论** (magnetic charge theory) 用“磁性起源于磁荷”的观点解释磁现象的理论。18 世纪末以后由法国物理学家库仑等人所建立。人类对磁现象的早期认识都是与物质的磁性相联系的。正因为如此，18 世纪的科学家们开始系统地研究磁现象是从永磁体着手的。当时对于磁和电的联系尚一无所知，但却由永磁体看到了磁和电之间的一些类比关系。例如电有正电荷和负电荷，而磁分 N 极和 S 极，它们都是同性相斥、异性相吸的。于是，既然电现象起源于电荷，人们也就普遍接受了“磁性起源于磁铁两极的磁荷”这一观点，并由此出发开始研究磁现象。仿照点电荷的概念，引入了“点磁荷”的概念。库仑还用实验测量了“点磁荷”间的作用力，建立了如下的“磁的库仑定律”：

$$F_m = K \frac{q_{m1} q_{m2}}{r^2},$$

与电学库仑定律不同的仅仅在于这里的  $q_m$ ，它是“点磁荷”的“磁荷”量。在法拉第的场的概念为人们逐步接受以后，仿照静电场的研究方法，

把单位“磁荷”所受“磁力”定义为磁场强度，用  $H$  表示，即

$$H = \frac{F_m}{q_m}。$$

于是，在仅由永磁体激发磁场的情况下， $H$  就和静电场中的  $E$  一样服从类似的规律：

$$\oint H \cdot dl = 0，$$

$$H \cdot ds = q_m / \mu_0，$$

$\mu_0$  为真空磁导率。在研究磁介质时，磁荷观点把介质分子看成由正、负磁荷组成的磁偶极子，并仿照电介质理论引入辅助物理量  $B$ ，以与电位移矢量  $D$  对应， $B$  称为磁感应强度。这样一来，磁荷观点就成为一种与分子电流观点相并列的理论，所得出的一些结论也是一致的。所不同的是，分子电流观点是从电流磁效应出发，而磁荷观点则从“磁荷激发磁场”出发。前者把物质分子结构看作圆电流，后者则看作磁偶极子，这在经典理论中本来就不是本质区别。

在存在传导电流的情况下，用磁荷观点讨论磁现象就相当复杂了。电磁学的进一步研究表明，磁荷观点  $H$  定义式中的力  $F_m$  仅在“磁荷”概念下才有意义，对电流或运动电荷施以磁力作用的是磁荷观点中的  $B$ ，而  $H$  则是与电学中的  $D$  相当的一种辅助物理量。特别是麦克斯韦电磁理论建立以后，电磁学便按照  $B$  和  $H$  的本来意义使用它们，只是沿用原来的名称而已。

**磁化 (magnetization)** 使原来不显示磁性的物体在磁场中获得磁性的过程。最容易磁化的是铁磁性物质，如软铁、硅钢等。由于电流能产生很强的磁场，并便于控制，所以常利用电流的磁场使铁磁质磁化而制成永久磁铁或电磁铁。

根据安培分子电流假说，构成物质的分子和原子中，由于电子运动而形成分子电流。这些分子电流是数目庞大的微观小磁体。在通常情况下，由于热运动的影响，这些小磁体的取向是杂乱无章的，因而使物体在宏观上不显示磁性。但当把物体置于磁场中时，这些小磁体便受到磁力矩的作用，出现定向排列，整个物体便显示出磁性。铁磁质特别易于磁化，则是因为铁磁质内还存在一种特殊的磁畴结构。现代理论认为，物质的磁化还与电子自旋等微观运动有关，只有考虑量子效应才能作出更合理的解释。

**磁化电流 (magnetization current)** 亦称“束缚电流”。磁介质磁化后分子电流有序排列而形成的等效电流。均匀磁化时的情形如附图所示。在介质内部任意地方，由于分子电流成对出现且方向相反，结果相互抵消。但在介质表面处，分子电流不会抵消且形成一层沿表面流动的等效电流。这就是磁化面电流。在非均匀磁化的情形

均匀磁化时的磁化电流图

下，介质内部也会出现磁化体电流分布。磁化电流并不是由电荷的宏观定向运动形成的，也与介质分子的热运动没有直接关系。所以尽管它与传导电流一样能激发磁场，但没有热效应，也不能用电表测量。对于抗磁质，磁化电流在介质中产生的磁场与引起磁化的外磁场方向相反；对于顺磁质或铁磁质，两者的方向相同，且铁磁质的磁化电流特别强大。

**磁化率 (magnetic susceptibility)** 表征磁介质属性的物理量。

常用符号  $\chi_m$  表示。它等于磁化强度  $M$  与磁场强度  $H$  之比，即

$$\chi_m = \frac{M}{H}。$$

这是一个无量纲的纯数。对于顺磁质， $\chi_m > 0$ ；对于抗磁质， $\chi_m < 0$ 。其值都很小，且与磁场强度  $H$  无关，而仅决定于介质的种类。各向同性介质的磁化率在各方向的值均相同。附表列出了部分顺磁质和抗磁质在相应条件下的磁化率。

铁磁质的磁化率  $\chi_m$  一般很大，而且是磁场强度  $H$  的复杂函数。此外，对于各向异性介质，不同方向的磁化率不尽相同。在同样的外磁场作用下，不同方向的磁化程度也就不同，这时  $M$  和  $H$  的方向将有所偏离。

部分顺磁质和抗磁质的磁化率

物质	温度 (K)	$\chi_m$	物质	温度 (K)	$\chi_m$
顺磁质			抗磁质		
明矾 (含铁)	4	$4853 \times 10^{-5}$	氮	273	$-50 \times 10^{-10}$
明矾 (含铁)	90	$213 \times 10^{-5}$	二氧化碳	273	$-23 \times 10^{-10}$
明矾 (含铁)	293	$66 \times 10^{-5}$	铋	273	$-166 \times 10^{-7}$
氧	90	$152 \times 10^{-5}$	铜	273	$-98 \times 10^{-7}$
氧	273	$2090 \times 10^{-9}$	金	273	$-360 \times 10^{-7}$
氧	293	$1900 \times 10^{-9}$	汞	273	$-320 \times 10^{-7}$
铝	273	$23 \times 10^{-6}$	银	273	$-260 \times 10^{-7}$
铝	293	$22 \times 10^{-5}$	硅	273	$-24 \times 10^{-7}$
锰	273	$12 \times 10^{-6}$	氦	273	$-99 \times 10^{-10}$
钨	273	$68 \times 10^{-6}$			
钠	293	$72 \times 10^{-6}$			

磁化强度 (magnetization) 描述磁介质磁化状态的物理量。是矢量，常用  $M$  表示。根据安培分子电流假说，物质磁性的强弱决定于分子电流排列的有序化程度。分子电流磁性的强弱是用它的分子磁矩  $m$  表示的。因此，磁化强度可定义为单位体积内分子磁矩的矢量和，即

$$M = \frac{\sum m}{V}。$$

在国际单位制中，其单位为  $A/m$ 。进一步的理论研究现宏观束缚电流相联系的。因此，磁化强度与束缚电流之间存在确定的关系。

磁化水 (magnetizing water) 经过磁场处理的水。一般是让水以一定的速度和流量经过强磁场区域制得的。与普通水相比，磁化水有某些特异性。一般认为，水经磁化处理后，分子间的结合形态由长链拆散为短链，渗透性增强。例如它能渗入坚硬的水垢细缝中，并使绝大部分溶解在水中的杂质的结晶形态发生变化，常可使坚硬的方解石结晶变为松软的纹石结晶。工业上用磁化水防止锅炉和冷却设备等产生水垢，简单易行，投资少，使用寿命也较长。用磁化水搅拌水泥可增加其强度。饮用磁化水防治某些疾病，从我国明代李时珍的《本草纲目》以后就常有记载。本世纪 60 年代以后，饮用磁化水防治胆结石的试验取得成功，并已用于临床。此

外，磁化水还被用于浸种催芽、育秧和灌溉等。但水在磁化前后微观结构和各种属性究竟发生哪些变化，以及它和其他物质间的相互作用过程和机理等，目前尚不清楚。

**磁介质 (magnetic medium)** 在磁场作用下能被磁化并反过来影响磁场的媒质。任何媒质在磁场作用下都或多或少地发生磁化并反过来影响原磁场，因此任何媒质都是磁介质。磁介质分为顺磁质、抗磁质和铁磁质三大类。相对磁导率  $\mu_r > 1$ ，且与 1 相差极微的物质称为顺磁质，如锰、铬、铂、氮等都属于顺磁性物质，这种物质磁化较弱，且在外磁场撤去后磁性立即消失；相对磁导率  $\mu_r < 1$ ，且与 1 相差极微的物质称为抗磁质，如水银、铜、铋、硫、氯、氢、银、金、锌、铅等都属于抗磁性物质，这种物质与顺磁质一样，磁化较弱，在外磁场撤去后磁性也立即消失；相对磁导率  $\mu_r$  的数值很大 ( $\mu_r \gg 1$ ) 的物质称为铁磁质，如铁、镍、钴以及这些金属的合金，铁氧体等物质都属于铁磁性物质。铁磁质的磁化较强，在外磁场撤去后仍能保存部分磁性。

**磁矩 (magnetic moment)** 表征磁体或电流系统磁效应的物理量。是矢量，常用符号  $m$  或  $P_m$  表示。条形磁体的磁矩是两个磁极间的距离与一个磁极强度的乘积，方向沿两磁极连线，由 S 极指向 N 极。平面载流回路的磁矩大小为电流强度  $I$  与回路面积  $S$  的乘积，其方向按右手螺旋定则垂直于回路平面，即当电流绕右手螺旋旋进的方向流过时，螺旋前进的方向 (如图)，用法向单位矢量  $n$  表示，则平面载流回路的磁矩为

$$m = ISn。$$

#### 电流回路的磁法向

对于一般的电流分布，磁矩的计算比较复杂。

原子中的电子绕原子核运动，与回路电流相当，所以也有磁矩，称为“轨道磁矩”。电子还有自旋运动，其磁矩称为“自旋磁矩”或“本征磁矩”。这是物质磁性的主要来源。此外，原子核、质子、中子等基本粒子也都有相应的磁矩。这些微观磁矩都是量子化的，它们在各方向的投影也是量子化的。

磁矩常用于某些计算。例如，平面载流线圈在均匀外磁场中所受到的磁力矩  $M$  可简明地表达为

$$M = m \times B$$

**磁聚焦 (magnetic focusing)** 用磁场使电子束会磁聚焦示意图聚成点或像的过程。由于电子束中的电子从电子源发出时初位置和初速度的方向不同，彼此间又存在斥力作用，因而在行进过程中电子束的横断面将逐渐扩大。

聚焦就是使发散的电子束重新汇聚。使用匀强磁场的聚焦装置如图所示。K 为发射电子的阴极，G 是控制栅极，圆筒 A 为阳极，它们组成电子枪。CC，是产生匀强磁场的长直螺线管。在栅极和阳极电压的作用下，电子以大致相同的速率  $v$  (取决于电子枪加速电压) 从小孔 P 出发进入匀强磁场区域。P 点相当于光学成像系统中的物点。由于阳极圆筒内共轴限制膜片的作用，电子从 P 点出发的速度  $v$  与 B 间的夹角 都不会很大，因此与 B 平行和垂直的速度分量分别是

$$v_{\parallel} = v \cos \theta \quad v_{\perp} = v \sin \theta$$

$$v_{\perp} = v \sin \theta \quad v_{\parallel} = v \cos \theta$$

在匀强磁场中，电子将作等距螺旋线运动，运动周期  $T$  和螺旋线半径  $R$ 、螺距  $h$  分别为

$$T = \frac{2\pi m}{eB}, \quad R = \frac{mv_{\perp}}{eB} \approx \frac{mv}{eB} \theta,$$

$$h = v_{\parallel} T \approx \frac{2\pi m v_{\parallel}}{eB}.$$

因此，虽然初速度方向不同的电子将循不同半径的螺旋线运动，但在一个周期后又都将重新汇聚于轴线上的同一点  $P$ 。从电子枪不断发出的电子都将陆续出现于  $P$  点，这就起到了聚焦的作用。实际使用的往往是短线圈产生的非匀强磁场，其聚焦原理与使用匀强磁场的大致相同。这种线圈对运动电荷的作用类似于透镜对光的作用，故常称它们为“磁透镜”。磁聚焦在许多电真空系统（如电子显微镜）中有广泛的应用。

**磁力 (magnetic force)** 磁场对运动电荷、电流作用力的总称。也是洛伦兹力和安培力的总称。安培力本质上是洛伦兹力作用的结果，所以，磁力本质上都是磁场对运动电荷的作用力。

通常的磁体在磁场所受作用是以磁极受力来度量的。磁极所受磁场的作用力量值上等于磁极强度与磁场强度的乘积。但实际上磁体的磁性是由电子绕核运动和原子核、电子、质子等基本粒子的自旋运动引起的，所以，磁体所受的磁力归根到底也是磁场对运动电荷的作用。

**磁流体发电 (magnetohydrogenerating)** 将炽热的电离流体的动能直接转化为电能的一种发电方式。其装置主要由燃烧室、强磁体和发电通道三部分组成。在燃烧室中，喷入的油、煤气或核燃料与氧化剂混合燃烧，生成高温（约 3000K）燃气。燃气中的气体分子或原子在高温下发生电离，成为正离子和自由电子。还可在燃气中添加容易电离的含钾或铯的盐类，如

#### 磁流体发电示意图

酸钾 ( $K_2CO_3$ )，使高温燃气加速电离，接近等离子状态。通过加速喷管将这种燃气高速（约 1000 米/秒）喷入发电通道。发电通道一般呈矩形截面，四壁由耐高温绝缘材料制成。大型磁铁产生的强磁场垂直地通过通道，与磁场平行的两壁内侧为耐高温、耐腐蚀的金属电极（见上图）。随气流进入通道的高速运动带电粒子将在磁场中受到洛伦兹力的作用，分别向两侧电极发生偏转运动。由此形成的电动势约为

$$\mathcal{E} = vBL,$$

式中  $v$  为高温燃气的流速， $B$  为通道内的磁感应强度， $L$  为两电极间的距离。不断提供高温高速的等离子气体，便能从两电极间源源不断地输出电能。这种发电方式转动机械很少，因而损耗低、效率高。由于喷入、喷出的都是高温燃气，可以综合利用、循环使用。因具有加工设备简单、投资较少、启动速度较快等优点，许多国家近些年来竞相研制。目前还有些共同性的技术问题有待解决。随着材料科学、磁流体动力学和超导等新技术的发展，磁流体发电可望实现大规模应用。

**磁路定律 (magnetic circuit law)** “磁路欧姆定律”的简称。表示磁路中磁动势、磁阻与磁通间关系的基本定律。它在形式上与电路欧姆定律相似，故名。

**磁路** 磁场线集中通过的闭合回路。各种电器设备中，为了使磁场集中在有限区域内以资利用，都必须设制特定的磁路。在变压器、互感器等磁耦合装置中，磁路由励磁线圈（“磁源”）和软磁材料制作的铁芯组成。在发电机、电动机、电磁铁等利用强磁场的装置中，磁路还包括适当大小的气隙。密集的磁场线沿磁路通过气隙，装置所利用的正是气隙中的强磁场。磁路与电路形式上有许多相似之处，如电路是电场线集中通过的管路，磁路则是磁场线集中通过的管路；电路有串联、并联之分，磁路也有串联、并联之分；磁路和电路还有一系列对应的概念（见附表）。但磁路和电路毕竟有本质的区别。首先，电路中的电流是带电粒子的移动，磁路中的磁通（即磁通量）并不表示任何物质的运动。其次，由于导体和空气（或真空）的电导率相差极大，电流被严格地约束在导体内部。但对于磁介质来说，即使是铁磁质（甚至软磁材料），其磁导率与空气（或真空）之间相差也不过数千倍，且还有磁饱和现象。所以在磁路中，虽然大部分磁场线能沿铁芯内部通过（称主磁通），但总有少部分磁场线从铁芯表面漏出（称漏磁通），就是说，磁路的边界实际上是不可能严格的。

**磁动势** 与电源的电动势相类比，表征“磁源”（励磁线圈）在磁路中激发磁通的能力的一种物理量。常用符号  $\mathcal{F}$  表示。对于密绕的励磁线圈，它在量值上即等于安匝数  $NI$ ，其中  $N$  为线圈匝数， $I$  为励磁电流强度。

**磁阻** 磁动势  $\mathcal{F}$  与它在磁路中所引起的磁通  $\phi_m$  之比，常用符号  $R_m$  表示，即

$$R_m = \mathcal{F} / \phi_m。$$

它表示磁路对磁通的阻碍作用，其大小取决于磁路中各磁介质材料的性质、形状、大小和联接方式等。均匀材料组成的横截面相同的一段磁路，其磁阻为

$$R_m = l / \mu S，$$

式中  $l$ 、 $S$  分别为材料的长度和横截面积， $\mu$  为材料的磁导率。串联磁路的磁阻等于各段磁路磁阻之和；并联磁路的磁阻的倒数等于各分路磁阻倒数之和。磁阻的单位为  $H^{-1}$ 。

磁路定律磁路中磁动势  $\mathcal{F}_m$  与磁通  $\phi_m$  间的关系所遵从的定律，表示为

$$\mathcal{F}_m = R_m \phi_m \text{ 或 } \phi_m = \mathcal{F}_m / R_m，$$

$R_m$  是磁路的磁阻， $\mathcal{F}_m$  常指励磁线圈的安匝数  $NI$ 。在简单磁路中，由于  $R_m \phi_m = (l / \mu S) (\mu HS) = HI$ ，上式即为  $HI = NI$ ，这是安培环路定律的表达形式。磁路定律成立的一个基本条件是在同一磁路中通过不同截面的磁通  $\phi_m$  相同，于是对任一闭合曲面总有

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0，$$

这是磁场高斯定理所要求的。所以，磁路定律实际上是稳恒磁场基本定律的特殊表现形式。在引进磁动势、磁阻、磁位降落 ( $H_i l_i$ ) 等概念后，可以很方便地把求解直流电路的一些方法移用到磁路中来。除磁路欧姆定律外，也可建立相应的磁路基尔霍夫定律。

**磁偶极子** (magnetic dipole) 基于磁荷观点的磁介质理论中组成磁介质的最小单元。一对相距很近的等量异号点磁荷所构成的体系。常用磁偶极矩  $p_m$  描述其特性，其定义为

$$p_m = q_m l,$$

式中  $q_m$  是每一个点磁荷的磁荷量,  $l$  的大小等于两点磁荷间的距离, 方向自负磁荷指向正磁荷。磁偶极子在外磁场中会受到合力 (在非均匀磁场中) 和合力矩的作用, 因而也具有势能等形式的能量, 所有这些量都是与其磁偶极矩成正比的。现在也常用磁偶极子概念作为描述磁介质属性和磁化行为的工具。

**磁泡 (magnetic bubble)** 磁性薄膜在外磁场作用下产生的圆柱形稳定的磁化区域。磁泡内的磁化方向垂直于薄膜。某些磁性薄膜在垂直于膜面方向磁化时, 其能量最低, 因而是易磁化方向, 而在膜面上是难磁化的方向。如果在垂直于膜面方向外加一向上方向的外磁场, 则薄膜内磁化方向向上的磁畴逐渐扩张, 而磁化方向向下的磁畴逐渐缩小。当外磁场增加到一定强度时, 磁化方向向下的磁畴将缩成圆柱状。这些圆柱状的磁畴用偏光显微镜在垂直于膜面方向上可以观察到, 它们运动起来很像一群浮在水面的小水泡, 故称为磁泡。人们可以通过磁泡的产生、移动、消灭等来实现信号的写入、传输和读出。用磁泡作为信号做存储器具有可靠性高、存储密度大、无高速旋转的机械部分等优点。缺点是响应速度较慢, 其读取时间的量级为毫秒。

**磁偏转 (magnetic deflection)** 泛指带电粒子由于受磁场力的作用其运动方向发生变化的现象。例如在显像管中, 电子束的磁偏转过程示意如图。电子沿轴线垂直进入匀强磁场后作匀速圆周运动, 对轴

#### 磁偏转示意图

线有一定的偏转距离。离开磁场区域后, 电子即沿原圆周轨道的切线方向作匀速直线运动而到达荧光屏上, 其偏转距离为

$$D = \frac{eL}{mv} B,$$

式中  $e$ 、 $m$  分别为电子的电荷和质量,  $l$  为偏转磁场的宽度,  $L$  为偏转磁场中心到荧光屏间的距离,  $v$  为电子运动速率。D 与偏转磁场的磁感应强度  $B$  成正比。若磁场由安装在管颈两侧的偏转线圈中的信号电流所产生, 则该信号电流便控制了荧光屏上光点的位置。

**磁屏蔽 (magnetic shielding)** 能使某一空间区域免受外界磁场影响的现象或措施。对于稳恒磁场或频率很低的交变磁场, 可用磁导率很大的软磁材料制成罩壳以进行屏蔽。罩壳壁与腔内空气可看成并联磁路。由于空气的磁导率  $\mu_0$  远小于罩壳材料的磁导率  $\mu$ , 其磁阻也将远大于罩壳壁的磁阻, 外磁场的磁场线将绝

#### 空腔圆筒的磁屏蔽

大部分穿过罩壳壁而不进入腔内。这种屏蔽方式的效果决定于罩壳材料的磁导率和沿外磁场方向的磁阻。罩壳越厚, 与磁场线方向垂直的接缝越少, 屏蔽效果越好。例如, 实验证明, 在磁感应强度为  $B_0$  的均匀磁场中, 对于内外半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ 、相对磁导率为  $\mu_r$  的空腔圆筒, 筒内的磁感应强度为

$$B = \frac{4R_2^2 B_0}{\mu_r (R_2^2 - R_1^2)}.$$

在某些精密的磁测量实验中, 还采用多层屏蔽罩, 将漏入空腔的残余

磁场一次次屏蔽掉，以避免由于外磁场（包括地磁场）干扰而引起的误差。所以效果较好的屏蔽罩一般都较笨重。对于高频交变磁场，常利用电导率很大的金属对电磁波的反射作用以达到屏蔽的目的。相反，在利用电磁波の場合，则要注意避免或减少这种屏蔽作用的影响。

**磁通计**（fluxmeter）测量磁通量的仪器。又称高斯计。结构上，磁通计和磁电式检流计相似，如图所示，它也有产生磁场的永久磁铁及能在磁场中转动的活动线圈。不同之处在于：磁通计没有产生反作用力矩的游丝或悬丝，它的活动线圈的电流是由柔软的导线引入的。由于没有反作用力矩，磁通计的指针可以停在刻度盘的任何位置上。用磁通计测磁通时，要把放到被测磁场中的测量线圈与磁通计的活动线圈相连，构成闭合的测量回路，将探测线圈从磁场中所要测量磁通的地方迅速移出磁场。由于线圈平面内的磁通量发生突变，根据电磁感应原理，两线圈组成的闭合回路中就产生感应电流，电流计发生偏转，被测磁通量与偏转成正比，经过校正，可以直接从当时最大偏转数读出所要测量的磁通量的大小。磁通计作为直读仪表，使用方便，但灵敏度、准确度比冲击电流计差。

磁通计测量磁通的原理图

W—测量线圈

$W_d$ —磁通计的活动线圈

N, S—磁通计的永久磁铁

**磁通量**（magnetic flux）也称“磁感应通量”。表征磁场分布情况的物理量。是可正可负的标量，常以符号 $\phi_m$ 表示。通过磁场中任一面积元 $dS$ 的磁通量 $d\phi_m$ 为

$$d\phi_m = B \cdot dS = B dS \cos \theta$$

式中 $B$ 为磁感应强度。 $dS$ 的方向按规定与面积元平面垂直。对于闭合曲面，面积元的方向常取由里向外的方向。 $\theta$ 为 $B$ 与 $dS$ 间的夹角。通过任一曲面 $S$ 的磁通量为

$$\phi_m = \int_S B \cdot dS$$

通过均匀外磁场中面积为 $S$ 的平面的磁通量为

$$\phi_m = B S \cos \theta$$

式中 $\theta$ 为 $B$ 与平面法向 $n$ 间的夹角。如果按规定描画磁场线，即空间任意点处通过与磁场方向垂直的单位面积上的磁场线条数等于该点处磁感应强度的大小，则通过任意曲面的磁通量就等于通过该曲面的磁场线条数。在国际单位制中，磁通量的单位是“韦伯”，用符号 $Wb$ 表示， $1Wb = 1T \cdot m^2$ 。

任意磁场中通过任意闭曲面 $S$ 的磁通量恒为零，即

$$\oint_S B \cdot dS = 0$$

这称为磁场高斯定理。在电磁感应现象中，感生电动势的大小取决于磁通量的时间变化率。

**磁效应**（magnetic effects）物质磁性状态的变化会引起物质的力学、声学、热学、电学及光学等其它各种性能的变化；反之，力、声、热、电及光等的作用也会引起物质磁性的变化，这两种效应统称为磁效应。物质的磁性与物质的其它性质都取决于物质内部的原子、电子状态以及它们之间的相互作用。因此物质的各种属性是相互联系和相互影响的。磁效应主要有磁力效应、磁声效应、磁热效应、磁电效应和磁光效应以及它们的



逆效应。

**磁力效应** 强磁体在磁场作用下发生形变；反之，在外力作用下强磁体的磁性发生变化。磁致伸缩效应就是一种磁力效应。可分为体伸缩和线伸缩两种。体伸缩指磁体在外磁场作用下其体积发生相对变化；线伸缩则指其某一线度发生变化。磁致伸缩起因于外磁场的作用使磁性材料的原子晶格点阵和磁畴发生的畸变。在单晶体中，磁致伸缩是各向异性的。利用压磁铁氧体的磁致伸缩特性可制造超声波发生器。

**磁声效应** 这种效应本质上也是一种磁力效应，是强磁体的磁化状态与声振动之间的相互影响和相互转换的效应。

**磁热效应** 亦称磁致温差效应。绝热过程中铁磁或顺磁介质的温度随磁场强度的变化而变化的现象。当绝热地减小磁场时，物质的温度会降低。利用这一“绝热去磁”降温法可以得到 0.001K 的低温，是现代获得超低温的有效方法。

**磁电效应** 包括磁阻效应和霍尔效应等。磁阻效应指外加磁场引起某些材料的电阻率发生明显改变的现象。对于非铁磁性物体，外加磁场通常使电阻率增加，称为正磁阻效应。在低温强磁场下，磁阻效应较为显著。单晶磁体的电阻率变化与电流和磁化强度相对于晶轴的取向有关，即磁阻效应是各向异性的。

**磁光效应** 法拉第效应是一种典型的磁光效应。线偏振光透过放置于磁场中的物体，并沿磁场方向传播时，光的偏振面将会发生偏转。法拉第效应有许多实际应用，如制造微波隔离器、光隔离器、环行器等，并可利用此效应实现光的显示和调制等技术。

除法拉第效应外，其他磁光效应还有科顿-穆顿效应、克尔磁光效应等。磁光效应的逆效应称为光磁效应，即物质的磁性在光照射后发生变化的现象。这个效应的许多应用正在研究之中。

**磁性材料** (magnetic materials) 在外磁场作用下具有明显的磁化强度，即具有强磁性的固体。这类材料由磁性原子或离子构成，其磁矩呈有序排列。

材料的磁化是由外磁场  $H$  引起的，其磁化程度用磁化强度  $M$  表示： $M=xH$ ，其中  $x$  称为材料的磁化率，是表征材料磁化性质的参量。按磁化率  $x$  的不同可以把磁性材料分为以下几种。

(1) 顺磁性材料。磁化率  $x$  为正值，即磁化强度  $M$  的方向沿外磁场  $H$  的方向。在弱磁场下磁化强度正比于磁场强度；但对于较强的磁场，磁化强度开始饱和，达到最大值。磁化率  $x$  与温度  $T$  成正比： $x = \frac{C}{T}$ ，这一关

系称为居里定律。过渡金属和稀土族离子晶体的离子具有不满的价电子壳层，是产生顺磁性的根源。

(2) 抗磁性材料。磁化率  $x$  为负值的材料。离子晶体和共价晶体具有抗磁性；它们的原子或离子具有满壳层电子结构。其抗磁性起因如下：由于电子的轨道运动，外磁场使电子产生一附加的进动，而这种进动所导致的附加磁矩方向与外磁场方向相反。抗磁材料的磁化率基本上与温度无关。

(3) 铁磁性材料。磁化率可以是非常大的正数。铁磁材料的温度低于某一值（称为居里温度）时，铁磁材料内部会出现自发磁化小区域；当温度高于居里温度时，铁磁质内部的自发磁化小区域随之消失，这时铁磁体变

为顺磁体。铁 (Fe)、镍 (Ni)、钴 (Co) 以及它们的合金均是铁磁材料。

(4)反铁磁体。体内各原子的磁矩都整齐排列,但相邻各原子的磁矩方向相反、数值相等,因而相互抵消而不具有固有的自发磁矩。反铁磁体的磁化率随温度变化有一个峰值,对应的温度称为尼尔温度。当高于尼尔温度时,反铁磁性消失,磁化率与温度成反比关系,即它的行为像顺磁体;在尼尔温度以下,磁化率与磁场的取向有关。氧化锰 (MnO)、二氯化铁 (FeF<sub>2</sub>) 等晶体是反铁磁体。

(5)亚铁磁体。当温度低于居里点时,亚铁磁体像铁磁体,但其磁化率不如铁磁体那么大,因而它的自发磁化强度也没有铁磁体大;在高于居里温度时,它的特性逐渐变得像顺磁体。天然的磁铁矿 (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) 是人类最早认识和利用的亚铁磁体。后来人们发现磁铁矿的二价铁离子被锰、镍、铜、镁等离子取代的物质也具有亚铁磁性,并统称为铁氧磁体,简称铁氧体。

铁氧体一般指以氧化铁 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 为重要成分的强磁性氧化复合物。它有两个主要特征:相当大的自发磁化强度(亚于铁磁体)和相当高的电阻率。铁氧体具有半导体的性质,因此又称为磁性半导体。铁氧体可以用作硬磁、软磁、矩磁、旋磁和压磁等材料,并制造各种广泛应用于电子、电机、仪表、计算机等领域的元件。

**磁性液体 (magnetic liquid)** 具有磁性的一种胶状溶液,通常由具有磁性的超细微粒如四氧化三铁微粒溶于特定溶剂中制成,所用的溶剂有二酯类或油性物质等。由于磁性液体兼有磁性和液体的流动性,因此可通过磁场来控制,胜任其他固态磁性材料所不能完成的工作。近年来它的应用范围迅速扩大,主要用于轴承密封、扬声器、陀螺、加速度计、光纤连接装置、无摩擦开关、磁光器件等。国外有些国家已将磁性液体应用于纺织、印染等行业,获得了很大的经济效益。附图是应用磁性液体来达到动态密封目的的原理图。图中的导磁体和旋转轴都是用软磁材料(如纯铁)做成的,磁性液体被充填在导磁体和旋转轴之间的气隙内。在轴旋转过程中或静止不转时,由于永磁体磁场的作用,磁性液体可被很好地定位于气隙内。由于磁性液体具有良好的流动性,因此在轴旋转时可起到润滑作用。磁性液体有一定的粘度,可保证气隙处有很好的密封性。采用这种密封技术,避免了普通轴承与轴之间的直接摩擦,因此旋转轴的转速可高达 120000r/min,轴旋转的最大线速度可达到 30m/s,如用于真空密封,真空度可达 10<sup>-9</sup>。由于这种密封是非接触式密封,不会导致密封部件的磨损,因而寿命较长,其应用前景十分广大。

磁性液体还被用来充填扬声器音圈所在的环形气隙,从而提高扬声器的输入功率,调整声压特性,减少失真,使音质得到改善,并可防止其振动膜产生共振等。磁性液体还可用于其他方面,如使用磁性农药液体以防治病虫害,调节植物生长和除草等。

图 1 磁化曲线与磁滞回线

**磁滞回线 (hysteresis loop)** 表示铁磁质磁滞现象的曲线。如图 1 所示,横坐标 H 为外电流所产生的、促使磁化或去磁的磁场强度,纵坐标 B 为铁磁质中的磁感应强度,它的大小也反映了铁磁质的磁化程度。本来没有磁性的铁磁质进入磁化场后,便开始磁化并达到饱和,这个过程如图中曲线 Oa 所示,这段曲线称磁化曲线。以后 B 随 H 的变化情形则如图中 a、

a 两饱和点间的闭合回线所示，这闭合回线即称磁滞回线。

**磁性饱和** 铁磁性物质在外加磁场足够大时，其磁化强度达到极限值的现象。此时即使外磁场继续增强，磁化程度也不再增加。图中 a 点和 a 点就表示了铁磁质的两个不同方向的磁性饱和状态，相应的磁感应强度就是饱和磁感应强度，横坐标值  $H_m$  就是饱和磁化所需要的外磁场强度。

**剩磁** 外磁场撤去后，铁磁质仍能保留一些磁性的性质。往往也把这时所保留的磁感应强度称为剩磁或顽磁，如图中 b 点或 b 点所示的磁感应强度。

**矫顽力** 为了使已磁化的铁磁质失去磁性而必须施加的反向外磁场强度。图中线段 Oc 或 Oc 的长度就是矫顽力。不同的铁磁质有不同的磁滞回线，主要区别就在于矫顽力的大小不同。

**磁滞** 铁磁质磁化和去磁过程中，磁化强度的变化落后于外磁化场变化的现象，或者说铁磁质的磁化强度不仅依赖于外磁化场强度，而且依赖于它的磁化历史的现象。例如，图中 ab 段曲线表示外磁化场强度 H 由  $H_m$  降为零，铁磁质内的磁感应强度 B 却不能由最大值降到零；直到反向磁化场达到一定值（矫顽力）时，B 才沿曲线 bc 降为零；反向磁化场进一步增强，B 才沿曲线 ca 由零增至反向饱和值。曲线 a b c a 又反方向对称地重复了曲线 abca 的磁化过程。曲线 b c a 和 0a 都表示外磁化场强度由零增到  $H_m$ ，但由于磁化历史不同，铁磁质的磁化强度也不一样。总的说来，B 的变化落后于 H 的变化，而且 B 不是 H 的单值函数。

图 2 硬磁物质的磁滞回线

图 3 软磁物质的磁滞回线

磁滞回线是反映铁磁质属性的重要曲线，应用中常按磁滞回线的形状把铁磁质分为如下两种主要类型：**硬磁物质**：矫顽力大的铁磁质。如碳钢、钨钢、钴钢和某些铁氧体材料等。这类物质的磁滞回线形状肥大，接近于矩形。一经磁化后即能保留相当强的剩磁而不易失去，适宜制作永磁铁，广泛使用于电声、电讯、电表、电机和其他工业设备中。**软磁物质**：矫顽力小的铁磁质。如软钢、硅钢、多种合金和某些铁氧体材料等。这类物质的磁滞回线呈瘦长形状，很容易磁化和去磁，适宜制作电感元件，广泛使用于磁性天线、中周磁芯、电视偏转线圈、脉冲变压器和各种高频装置中。

另外，铁磁质沿磁滞回线反复磁化一周的磁滞损耗也与回线所包围的面积成正比。在同样频率和强度的交变磁化场作用下，硬磁物质的磁滞损耗要比软磁物质大得多。这也是工程设计中必须考虑的一个问题。

**磁滞损耗 (hysteresis loss)** 铁磁质在交变磁场内反复磁化过程中由于磁滞而引起的能量损耗。这种损耗以温度升高、热量耗散的形式出现。磁滞损耗起源于磁畴的转动摩擦、磁畴的形变等，从而使分子振动、转动加剧。可以证明，反复磁化一次过程中的磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比，故硬磁材料的磁滞损耗比软磁材料显著。在交流电器中，磁滞损耗十分有害，应尽量使之减小。例如，电工变压器和交流电机中一般都用软磁材料如硅钢片。这是因为钢内掺硅后磁导率提高，电阻率增大，不仅矫顽力降低，磁滞损耗减小，而且涡流损失也将大为减小。

**次声波 (infrasoundwave)** 频率低于 20 赫、不能引起人耳听觉的

声波。其频率范围大致为  $10^{-4} \sim 20$  赫。早在 19 世纪，人类就已记录到火山爆发和流星爆炸所产生的次声波。第一次世界大战前后，由于火炮和炸药的出现，提供了较强的声源，促进了人们对次声在大气中传播现象的了解。现在知道：火山爆发、地震、台风、雷电、核爆炸和大型的火箭发射等，都会产生很强的次声波。

次声波的最大特点是在大气中传播时吸收小、传播距离远。大气对声波的吸收随频率下降而减少，由于次声频率低，故吸收甚小。地球表面的大气层对次声波的传播具有“声波导”的作用，因为声波在大气中的传播速度与大气温度成正比，接近地面处气温随高度的增加而降低，即沿地面传播的声速比较远离地面的声速要大，使声波的传播方向将向上弯曲。但进入大气“逆温层”时，气温随高度的增加而升高，声波在其中传播时开始向下弯曲。因此次声波在地面与逆温层之间的大气中传播时，犹如在一个以此两平面为壁的“管道”中一样，以上下往返振荡的形式向前传播而不会外逸。这正是次声波能够沿地面传得很远的原因。例如一颗氢弹爆炸时所产生的次声波可能绕地球好几圈，行程达十几万公里。

次声波检测系统包括接收、记录、探测和分析等部分。次声接收主要采用次声传声器，它能把次声信号变成电信号。次声记录主要用微机控制数据采集记录器。次声探测包括识别次声信号、测定次声波方位角和确定次声源的位置等。次声分析主要是测定次声信号的特性及其谐波成份等。

次声的应用在本世纪 50 年代开始得到重视。其内容大致有以下几方面：  
监测大气中的核爆炸。在大气中核爆炸可产生很强的次声波，利用由次声传声器阵列所组成的多路接收系统，经计算机处理后即可判断进行核爆炸的时间、地点、当量以及爆炸方式等。  
预测预报台风。在台风眼附近的海洋中通常形成巨浪，巨浪与狂风的撞击和摩擦会产生  $8 \sim 13$  赫的次声波，这种次声波将以比台风快得多的速度传播，利用台风预报仪等设备，可提前十多小时准确地检测到台风的位置、强度等。  
预测自然灾害性事件。火山爆发、地震、龙卷风和雷暴等在发生前可能会辐射出次声波，因此有可能利用它来作为前兆现象预测灾害性事件。例如大地震前，许多动物的反常现象：鸡飞上树、老鼠出洞、马不进厩等，都可能是动物受到震前发出次声波的缘故。  
研究人体或动物的次声辐射还具有医学诊断的价值。如研究心脏跳动所发的次声波成份，可以判断心脏疾病等。通过测定次声波与大气中其他波动的相互作用的情况，还有助于揭示电波在电离层传播中的某些规律。随着次声技术的发展和日趋重要，对次声波的产生、传播、接收和应用的研究愈益深入，也形成一门独立的学科——次声学。

## D

**DMA 接口 (DMA interface)** 即直接存储器存取数据,是指 I/O 设备与存储器之间直接交换数据,不需要 CPU 介入的传送方式。由于 DMA 传送时数据流不需经 CPU 的累加器,所以也不需 CPU 软件控制,但需要有一个专用硬件——DMA 接口片用以控制数据交换,从而加速了数据传送的操作速度。DMA 接口要能控制进行数据交换,必须能发出地址信号,修改地址指针,控制传送的字节数,判断 DMA 是否结束以及发出 DMA 结束信号。因此 DMA 接口片必须有以下功能:能向 CPU 发出总线请求信号;当 CPU 发出响应信号后,接管对总线的控制,进入 DMA 方式;发出地址信息,能对存储器寻址及能修改地址指针;能发出读、写等控制信号;能决定传送的字节数,及判断 DMA 传送是否结束;发出 DMA 结束信号,交回总线使用权。常用的芯片有 8237DMA 控制器。

**DMA 控制器 (DMA controller)** 它的逻辑功能是在外部设备与内存间直接数据交换过程中起控制作用。一般 DMA 控制器应有如下的硬件和功能: 地址寄存器:存放所存取的存储字的地址。操作开始时,指出要存取的存储字的首地址。在每个 DMA 传送周期内,每传送一个数据,其内容加 1 或减 1,指定下一次要传送数据的地址。 字计数寄存器:用于对要传送的存储字数目计数。操作开始时,应填入所要传送的存储字的总数。每传送一个字,内容减 1,当它等于零时,可作为传送结束的标志。 状态寄存器或控制寄存器:可指定一寄存器或若干位,用以识别数据流的方向,提示是否有 DMA 请求,DMA 逻辑是否有效,DMA 传送方式的选择以及 DMA 结束标志等。

一个 DMA 控制器往往是多通道的结构,以控制多台外设的 DMA 操作,此外 DMA 控制器能控制多台外设的 DMA 优先问题。

DMA 控制器已有专用半导体芯片,如 MC6844 及 8257 都具有优先逻辑;可编程的 4 通道 DMA 控制器有 Z8410,以上都是 8 位数片。MC68450 (4 通道)、Z8016、NS16203 和 TMS9911 等都是 16 位数芯片。

**达·芬奇 (Leonardo da Vinci 1452 ~ 1519)** 意大利著名艺术家、科学家、发明家。生于托斯卡纳的芬奇镇。少年时已显露艺术天赋,15 岁左右到佛罗伦萨拜师学艺,成长为多才多艺、学识广博的艺术家、科学家和发明家。1482 年后,应聘在米兰、罗马、巴黎等宫廷中任职。

达·芬奇是意大利文艺复兴时期文艺、科学史上杰出的代表人物。在艺术方面,他与米开朗琪罗、拉斐尔并称文艺复兴三杰,尤以《最后的晚餐》和《蒙娜·丽莎》等画驰名。在科学方面,他的研究涉及数学、力学、物理学、解剖学和生理学等诸多领域。认为实验是认识真理的重要途径,提倡在科学研究中要反复观察和实验,从而对近代科学的诞生和发展,起了促进作用。曾用虚速度原理解释静力学的基本问题,描述过合力的平行四边形法则,确定了不同物体的重心、特别是半圆和四面体的重心,研究了水平抛体的下落、将重物沿斜面的运动分解为两个分量,理解了作用等于反作用、且方向相反。结合绘画研究过光影、明暗、色彩和各种透视现象,研究了介质对物体颜色的影响,设想光的传播如同投石击水引起的水波一样,作过针孔实验,并以光线的直进加以阐明。在工程领域,他有不少发现、发明和独特见解,设计了各种飞行器、连续纺纱机、高效起重机、

辗压机、挖土机等。

**达朗贝尔**（Jean le Rond D'Alembert 1717~1783）法国数学家、物理学家、启蒙思想家。生于巴黎。自幼聪明好学，爱好广泛。早年研究法律，当过律师。后来从事医学和自然科学的研究。1739~1740年，他向巴黎科学院提交关于固体在液体中的运动和积分学的两篇论文，因而被选为该院的院士。1744~1747年，他发表关于风的一般成因的推论的论文，因而获得柏林科学院的奖金，并被选为该院的院士。

在物理学上的贡献主要在力学方面。1743年，在其名著《动力学的论文》中，提出动力学的基本规律，即在物体运动的任一瞬时，作用于物体上的外力和惯性力互相平衡，也就是把牛顿运动定律加以变换，使它可以作为静力学问题来处理。达朗贝尔还指出，作用在一力学体系中每一个质点上的主动力、约束反作用力和惯性力，形成一个平衡力系。上述原理被称为达朗贝尔原理。把达朗贝尔原理和虚功原理结合起来，就会得到达朗贝尔-拉格朗日方程，这是研究经典力学问题的最基本方程，拉格朗日也为此作出了贡献，故以二人名字命名。还与欧拉、丹·伯努利共同奠定了数学物理学的基础，得出表示弦横向振动的二阶偏微分方程的解法。在解流体力学中的一个椭圆型偏微分方程时，首次运用了复变函数。

达朗贝尔曾任《科学艺术和手工业百科全书》（简称《百科全书》）的副主编。在该书中主张按弗兰西斯·培根的原则，将人类知识分为历史、哲学（科学）、美术三大类。十分注重技术与科学的关系，认为《百科全书》不仅是为了提供知识，主要是改变读者的思想。

**达朗贝尔判决**（d'Alembert criterion）法国物理学家达朗贝尔对运动量度的争论进行了评述，目的是想平息这场论战，历史上把此称为“达朗贝尔判决”。1743年达朗贝尔在他的《动力学论》一书的序言里，首先指出发生争论的原因，是由于双方对运动物体遇到障碍时所表现出来的效果，没有一个共同的标准。其次，他认为当物体平衡时，力可以用质量与物体速度的乘积来量度；当物体作减速运动时，力可以用质量与物体速度平方的乘积来量度。即力既可表示为单位时间内运动的改变，又可表示为单位距离内运动的改变。这样就给出了量度运动物体效果的一个很好的标准，并且也是一种有效的测量手段。第三，“判决”这两种量度是等价的，是可以互相推导出来的。同时还模糊地谈到了动量的变化和力的作用时间有关，活力的变化则与物体运动的距离有关，这是达朗贝尔的贡献。

当然，达朗贝尔的“判决”并没有完全平息这场争论。运动量度的争论，直到能量概念及能量守恒与转化定律提出后，才作出明确的评价。正如恩格斯在《自然辩证法》一书中指出：“机械运动确实有两种量度，但是也发现，每一种量度适用于某个界限十分确定的范围之内的一系列现象。...一句话， $mv$ 是在机械运动中量度的机械运动； $\frac{mv^2}{2}$ 是在机械运动

转化为一定量的其他形式的能力方面来量度的机械运动。”这场争论对力学的发展起了积极作用，因为由于争论促进了力学思想的活跃，不仅理清了动量和能量这两个物理量之间的区别与联系，而且也促进了三大守恒定律的形成。

**大气**（atmosphere）围绕天体的气体总体。它的性质取决于天体的大小、质量、温度、旋转速度及其组分。地球大气是围绕地球的气圈，由

多种气体混合而成，并包含一些水汽及悬浮粒子。在环境科学中，大气就是指地球大气。

大气是经过许多化学过程和光化学过程发展起来的。大气近地表面的化学成分几乎是不变的，它是以氮、氧为主的混合气体。随着高度的增加，较轻的元素占优势。在 100 公里以上，由于太阳的紫外辐射，氧、二氧化碳及水汽等均被分解。在 300 公里左右，原子氧是大气中最主要的成分，800 公里左右处氦和氢处于优势。在 800 公里以上的高度，大气质点之间的碰撞变得很少很少，以致一些向外飞的质点可以逃逸大气。

大气组分

分子	近地面所占的体积比	分子	近地面所占的体积比
N <sub>2</sub>	$7.8084 \times 10^{-1}$	Ne	$1.82 \times 10^{-5}$
O <sub>2</sub>	$2.0946 \times 10^{-6}$	He	$5.24 \times 10^{-6}$
Ar	$9.34 \times 10^{-6}$	Kr	$1.14 \times 10^{-6}$
CO <sub>2</sub>	$3.1 \times 10^{-4}$	CH <sub>4</sub>	$1.5 \times 10^{-6}$
H <sub>2</sub> O	十分多变	H <sub>2</sub>	$5 \times 10^{-7}$
O <sub>3</sub>	可变	NO	$\sim 10^{-8}$

水汽是一个十分多变的成分。其质量混合比即每克干空气含水汽的成分，在对流层的下部为  $10^{-3}$  至  $10^{-2}$  克，在平流层中为  $2 \times 10^{-6}$  克，在平流层中的 30 ~ 35 公里高度上，臭氧浓度变得最大，约为  $10^{-5}$  克，这是由于氧分子被波长短于 240 纳米的太阳辐射分解后经分子-原子碰撞而形成的。

根据温度垂直分布的特征，可将大气划分成许多层。 对流层。大气最低的一层，其“顶”高随纬度而不同，在两极附近高约 10 公里，热带地区高约 16 公里。对流层中的平均温度从地面到对流层顶随高度而降低，在低纬度处自 300K 到 180K，高纬度处从 260K 到 230K。对流层是人们生活所在的一层，也是影响环境的重要天气现象的一层。对流平衡是该层的主要热力结构，即太阳辐射引起地面加热，再由于湍流混合与对流引起热量向上输送，大气的运动也将热量从加热较强的赤道地区向极地方向输送。平流层。从对流层顶向上延伸到约 55 公里的高度，也称同温层。在约 30 公里以下的平流层下部于中纬度处温度基本保持不变，于高、低纬度处温度随高度缓慢变化。平流层的上部温度一般随高度的增加而增加，极地温度在夏季和冬季分别可增加至 290K 和 250K。平流层的热力结构主要决定于臭氧、二氧化碳和水汽这些少量成分的辐射平衡。 中间层。从 55 公里到 80 公里左右。温度随高度的增加而降低，在中间层顶出现温度极小值，夏季该值约为 150K，冬季约 220K，这是由于在该高度直接吸收的太阳紫外辐射较少的缘故。实际上在 60 公里以上已是电离层的底部，在这层中每立方厘米有  $10 \sim 10^3$  个电子。 热成层。由中间层顶再向外延伸至大气边缘。它的能量来源是通过直接吸收 200 纳米以下的太阳辐射而得。温度随着高度的增加而增加，在 500 公里处增加至 1500K 左右，然后温度基本上不再随高度变化。这个区域处于太阳的直接控制之下，高层大气的密度也有日变化和太阳活动 11 年的周期变化、相应于太阳旋转周期的 27 天变化、年变化和半年变化以及强磁暴时的强变化，其中的物理现象较为复杂。随着

高度的增加，电离作用愈来愈强，电子浓度的峰值出现在约 300 公里的高度上，白天约为  $10^6$  个电子/厘米<sup>3</sup>，晚间为  $10^6$  个电子/厘米<sup>3</sup>。

地面上的大气压力平均约为 1013 毫巴，大气密度约为 1.2 公斤/米<sup>3</sup>。大气压力和密度都随着高度的增加而迅速降低。与高度大致成指数关系。地球大气由于它的组分和对温度的调节作用以及对有害辐射的防御作用，使得地球上生命存在。

**大气窗口 (atmospheric window)** 电磁波辐射在大气中传播时衰减较少的一些波段。由于大气对电磁辐射的选择性吸收等原因所致。与电磁辐射的波段分类相对应，大气窗口可分为：可见光窗口、红外窗口和微波窗口 (见图)。

#### 大气窗口图

在波长为 0.3~0.7 微米的可见光波段，由于大气分子和气溶胶对电磁辐射的散射作用而使它在大气中传播时有不同程度的衰减，衰减特别小的波段就是可见光窗口，例如氩离子激光器发射的 0.4880 微米、氦氖激光器的 0.6328 微米以及红宝石激光器的 0.6943 微米等。在红外波段，大气对电磁辐射的吸收衰减主要是由水汽、二氧化碳和臭氧造成的，其中以水汽为最重要。它的吸收带位于 1.1、1.4、1.9、2.7、6.3 微米附近以及 13 微米以上。二氧化碳的吸收带中心位于 2.7、4.3 和 14.7 微米附近。臭氧的吸收带中心位于 4.1、4.7 和 9.6 微米附近。这些吸收带之间的波长空隙就是红外窗口，最大的红外窗口是 8~13 微米，这是一个较宽的波段，只是在 9.6 微米处有一臭氧的强吸收带。在红外窗口常用的激光波长为 1.06 微米和 10.6 微米。波长为 1 毫米到 1 米的微波辐射在大气中的衰减是由于氧分子及水汽的吸收所致。氧分子在微波段的两个吸收带是 4~6 毫米和 2.53 毫米，水汽分子的两个吸收带是 1.35 厘米和 1.64 毫米。在这四个吸收带之间的一些弱吸收波段是微波窗口。通常使用的窗口有 3 厘米、1.55 厘米、8 毫米、3.3 毫米和 1.4 毫米。后两个窗口大气干扰较大，但有较高的分辨能力。

大气窗口对大气辐射和遥感遥测具有特别重要的意义，因为可见窗口和红外窗口恰好与地表物体的反射辐射波段、发射辐射波段分别相对应，这使得工作波段选择在大气窗口的传感器能接收到目标物的特征电磁信息。如利用红外窗口进行热成像遥感、拍摄卫星云图等。气象雷达和通讯卫星使用的波长也都是选择在微波窗口或更长的射电波段。

**大气电学 (atmospheric electricity)** 研究大气中发生的各种电现象的一门学科。地球周围被大气圈所包围，按电学性质来划分，大气圈可分为电离层和非电离层。60 公里以下大气各成分基本上处于中性状态，为非电离层，60~1000 公里的高度，在太阳紫外辐射的作用下，大气成分开始电离，产生大量的正、负离子和自由电子，形成电离层。电离层对无线电波传播有很重要的作用，它能使投射来的无线电波经电离层反射而到达数千公里或更远的距离。电离层对不同频率的无线电波反射的效果不同。

电离层一般还可分为 D、E、F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 四层。D 层在 60~90 公里，仅在白天存在，夜晚消失，无线电波通过 D 层被吸收减弱，很少能反射，该层的电子浓度较低，约  $10^3$  个/厘米<sup>3</sup>。E 层在 110 公里附近，比较稳定，电子浓度在  $10^4 \sim 10^5$  个/厘米<sup>3</sup>。F<sub>1</sub> 层在 160 公里附近，F<sub>2</sub> 层在 300 公里附近，



$F_1$  与  $F_2$  层共同组成 F 层，白天分开，夜间合为一层， $F_2$  层的电子浓度最高，白天达  $10^6$  个/厘米<sup>3</sup>。电子浓度与无线电波临界频率  $f_c$  的关系为：

$$N = 1.24 \times 10^{-8} f_c^2,$$

其中  $N$  为电子浓度。若  $F_2$  层也不能反射无线电波，则该无线电波将穿过整个电离层。

大气电学表明，100 公里高度附近的电离层是一个良导体。非电离层中由于存在三种离化源：即：大气中的放射性物质、地壳中的放射性物质和来自太空的宇宙线，它们能使大气分子和原子电离而成离子，因此大气中通常存在一个垂直向下的电场——大气电场。一般大气电场只有垂直分量，而没有水平分量。晴天大气电场在地面附近最大，平均为 120 伏/米，在工业区由于污染等原因，地面场强可达 300 ~ 400 伏/米。晴天大气电场值随高度增加而很快递减，在 10 公里高度上，电场值降到地面值的 3% 左右。大气中带正、负电荷的离子在电场力作用下，正离子向下运动，负离子向上运动，形成了一股源源不断的由大气流向地球的传导电流——晴天大气电流。大气电学表明，如以全球而言，流向整个地表的传导电流约达到 1800 安培。由于有电流，因此大气具有某一电导率，其值大约为  $2 \times 10^{-16}$  / 欧姆·厘米。通常把大气电尝电流密度和电导率三者称为大气电要素。当雷暴过境时，大气中的电场方向会反转，即大气相对于地球为负电位。当闪电发生时，地面由于尖端放电而向上输送正电荷。一个完整的闪电由梯式先导、直窜先导、回击等过程组成，闪电的平均持续时间约 0.25 秒，包含数次闪击的一次闪电将往地面输送约 20 库仑负电荷。大气电学当前研究的重点是闪电频数和闪电分布及全球电量平衡问题、闪电定位技术以及特殊闪电研究等。

**大气光学 (atmospheric optics)** 研究大气中发生的各种光现象的一门学科。自从利用光作为通讯和探测目标物的手段以来，大气对光的散射和衰减作用受到人们广泛的重视。60 年代出现的激光技术，并以此为基础发展起来的通讯、探测和武器系统等都需要考虑大气对它们的影响。大气的物理状况在各种天气条件下是不断变化的，它们对光传播的影响会使光学系统的效能、适应性降低，有时甚至使系统目的无法达到。大气光学就是研究各种天气条件下大气对光传播的影响，如对光的散射、吸收、衰减和消光等效应，从而为解决光学系统问题提供物理依据和计算方法，并被用来探测大气中特定的污染物，使激光雷达成为监测污染的手段之一。近年来在大气光学研究中形成的一些理论，如非球形和均匀粒子的散射理论、三维辐射传输理论及波在介质中传播的多次散射理论等，可近似地解释许多大气光学现象。根据米氏散射理论研制的激光雷达，已较广泛地用于边界层气溶胶、能见度及云的定量和半定量探测。我国在研究大气的吸收和散射原理、大气光学特性及光像的观测和理论、电磁波在湍流大气中的传播、激光大气遥感和微波大气遥感等方面作了大量工作，取得了显著的成果。在今后的大气光学研究中，关于气溶胶和云对辐射的影响以及激光束在大气中传输的理论等问题，将会取得进一步的发展。

**大气含水量分布 (distribution of water vapor in atmosphere)** 对流层和平流层中水汽的垂直分布。水汽是地球大气的一种主要的有明显变化的成分，其变化与凝结、降水过程有关。水汽的浓度易变，尽管它的总

质量很大，但它的滞留时间很短，一般只有 10 天左右。对每一温度，空气中都有一个水汽的凝结上限，由水汽饱和的分压力确定。在对流层的较低暖气层中，大气含有高深度的水汽。在高冷区域，水汽敏锐地受饱和值的限制。未饱和空气中的水汽含量可用水汽压或摩尔分数  $N_v$  表示，摩尔分数由下式给出：

$$N_v = \frac{\text{水汽摩尔数}}{\text{总摩尔数}} = \frac{\text{水汽摩尔数}}{\text{干空气摩尔数}}。$$

**大气能见度 (atmospheric visibility)** 具有正常视力的人在大气背景中能识别出具有一定大小目标物的距离。根据观测者与目标物的具体位置，能见度可分为水平能见度、斜视能见度和铅直能见度三种。大气能见度是常用的大气光学性质，它对交通航行、高空摄影、天文观测及军事行动等都有直接的影响。大气能见度可被划分为 10 个等级。

能见度等级划分

能见度级	能见距离	能见度级	能见距离
0	0 ~ < 50 米	5	2 ~ < 4 公里
1	50 ~ < 200 米	6	4 ~ < 10 公里
2	200 ~ < 500 米	7	10 ~ < 20 公里
3	500 ~ < 1000 米	8	20 ~ 50 公里
4	1 ~ < 2 公里	9	> 50 公里

在夜间由于物体和背景的亮度大大减小以及人眼对亮度、色彩的响应较为迟钝，所以白昼与夜间的能见度分别用不同的公式加以计算。

**大气声学 (atmospheric acoustics)** 研究声音在实际大气中的发生、传播，运用声学手段探测大气的一门学科。早期的大气声学仅研究可听声在低声大气中传播的问题，直到 19 世纪后半叶，大气声学的研究才得到较快发展。斯托克斯、雷诺、丁铎尔等人分别研究了风、风梯度、温度梯度对声音的折射效应以及大气起伏对声音的散射效应。瑞利在 1877 年出版的巨著《声学原理》中，对包括上述工作在内的声学研究成果在理论上给以全面的总结和提。本世纪初，随着同温层的发现，人们注意到声音的“反常”传播现象，即强大声源所发出的声音可以在较远的距离听到，而在较近的距离反而听不到。图示为在一次爆炸后测出的声音传播图。图上阴影区表示听到爆炸声的地区，称可闻带，而空白区表示听不到爆炸声的地区，称为沉默带。由图中看出，可闻带和沉默带相间分布，并且基本上以爆炸源为中心而对称分布。研究表明，这种反常现象是由于声波在大气中折射所产生的。大气基本上可看作水平方向性质均一，而在垂直方向分成若干薄层媒质，每个薄层内温度、密度等性质基本相同。如果大气中两个相邻的气层温度不一样，则声波在它们的界面上发生折射。如果各层之间的气温分布随高度增加而递减，那么

一次性爆炸产生的声音反常传播图

声波传播方向向上偏折。相反，如温度随高度增加而增加，即所谓逆温层现象，则声波向下偏折。反常带的产生就是当强声源发出的声波向上传播时，遇到高空的逆温层，而使声音传播方向折向远方的地面，从而形成反常可闻带。其间的沉默带是由于地面直接声波以及折射声波不能到达

而形成的。如果声源足够强，反常可闻带的声波经地面反射后还可形成第二、第三反常可闻带。反过来，利用这一原理，可以通过大规模的爆炸，并根据爆炸声波反常传播的观测而间接探测平流层以下温度层结构的状况。如根据这一反常传播现象首先推断出平流层中存在着逆温层。声波由于在地面和 50 公里高度上逆温层之间的轮流反射而传播很远，又形成所谓“大气波导”。在某种具体剖面上计算出声波传播路径或简正波声场便成为大气声学中的基本课题之一。

大气声学还广泛应用于低层大气中气象扰动的研究。60 年代末，在原有“声雷达”基础上经过改进的“回声探测器”，对大气物理的研究起了很大推动作用，同时也促进了大气声学许多方面的进展，如声传播过程中相位和振幅起伏的研究，用次声“透射”大尺度的大气过程等。当前国际大气声学的研究重点是与声遥感有关的声波在湍流大气中的传播规律和涉及城市环境污染治理的噪声在大气中的传输问题。

**大气探测学** (atmospheric sounding) 研究大气探测原理和方法的一门学科。大气探测就是利用各种探测手段对大气现象进行系统的观察和测量。大气探测是大气科学的基础，一般可分为：地面气象观测、高空气象观测、大气遥感、气象卫星探测以及特殊观测等。

人们很早就开始了对天气现象和气候的观察，15 世纪以前就有了关于雨量测定的记载。自 17 世纪发明了气压计后，开创了仪器观测大气的历史。从 1643 年到 20 世纪初的二百多年时间里，是地面气象观测发展并趋于成熟的阶段。到本世纪 20 年代末，随着无线电技术的发展，法国、原苏联、德国、芬兰等国都开始研制无线电探空仪，发展高空探测技术，大气探测进入发展阶段。40 年代中期，气象火箭的探测进一步把探测高度从 20~30 公里提高到 100 公里。从 40 年代到 60 年代，随着第一颗气象卫星的发射，发展了大气遥感技术，从根本上扩大了探测范围，提高了对大气过程探测的连续性，一颗极轨气象卫星每隔 12 小时就给出一次全球气象观测资料。近 20 年来，以地面为基础的站网探测和气象卫星探测已组合成探测系统，实现了直接观测和遥测技术的结合。随着现代科学技术的发展，红外、微波、声波、自动化、计算机、卫星技术等广泛地被采用，大大丰富了大气探测的内容，形成了一个以多学科为基础的独立学科，并以崭新的面貌出现在科学的前沿。

大气探测主要有直接探测和遥感探测二种。直接探测是通过各种感应元件直接测量大气要素，其原理是根据元件的物理、化学性质受大气作用而产生反应的特性。如氯化锂湿敏电阻测湿就是利用氯化锂在大气中因吸湿而使元件电阻率改变的特性来进行测量的。遥感探测是根据大气中光、电、声等信号的传播特性，反演出大气要素的时空分布。如微波遥感测湿就是根据大气中的水汽在 1.35cm 波长处有强辐射的特点来进行的。此外也可人为地在大气中施放某些示踪物质，以分析它的传播和演变规律，由此推测大气的状况。近年来，已对大气中某些物理和化学过程进行实验室模拟，如建立大型云室，以考察云内的物理规律；建立大型风洞，模拟大气边界层的状况，探索动力学规律等。

**大气污染** (air pollution) 大气中的污染物超过一定浓度后对人类生活及生物造成的有害影响。大气污染最早始于人类用煤作燃料。随着煤的消耗量急剧增多，工业区和城市大气受到了烟尘和二氧化硫的严重污

染。二次大战后，石油成为主要燃料，二氧化硫污染发展迅速，由此曾造成数起重大污染事件：1930年12月比利时马斯河谷重工业区的烟雾事件，致使63人死亡。1948年10月美国宾夕法尼亚州的多诺拉镇烟雾事件。1952年12月5日~9日的伦敦烟雾事件，在该事件中，死亡人数达数千。现代交通工具汽车急剧增加，它所排出的氮氧化物和碳氢化合物废气，在阳光的曝晒下会生成有刺激性的光化学烟雾，如1943年美国洛杉矶发生的浅蓝色烟雾事件。

大气中的污染物主要来自：矿物燃料燃烧，它释放二氧化硫、氮氧化物、碳氧化物、碳氢化合物及烟尘；工业生产过程中生成的污染物——氟化物和各种金属及其化合物等有害气体及粉尘；大气层核试验所带来的放射性降落物；农业上施用的农药也会飞散入大气；从海洋来的一些盐粒、活火山的微尘与气体；大气中的烟尘和粉尘，一般是金属、硫酸盐、有机化合物和放射性物质，它们也会吸附一些有害的气体。这些污染粒子的半径为1微米到几百微米。半径小于10微米的在大气中长期漂移，称为飘尘，危害较大。半径小于10微米的，由于重力作用而很快沉降，称为降尘，危害较小。

大气中有害物质的浓度越高，污染越严重，危害也越大。有害物质的浓度除了取决于该物质的总排放量以外，还与排放源的高度、局部地区的气象、地形有关。污染物一旦进入大气，就会扩散稀释。风越大，扩散越快，反之，扩散越慢。特别是在出现逆温层时，即冷空气在下面，热空气上升的情况下，污染物往往可积聚到很高的浓度，造成局部地区的大气污染，比利时马斯河谷重工业区的烟雾事件就是一例。地形或地面状况复杂的地区，如山谷和盆地，会形成局部的山谷风、海陆风、热岛效应等热力环流，烟气不易扩散，且容易回旋，致使污染浓度增高，形成严重污染。降水可对大气起净化作用，但由于污染物随雨雪降落，使大气污染转化为水污染和土壤污染。高烟囱排放可使污染物扩散，它虽然降低了污染物的近地面浓度，但扩大了污染区域，并使一氧化氮、二氧化硫等物质在大气中滞留的时间更长。

大气污染对人体健康有多种有害影响，主要是对呼吸道系统的刺激，严重的可造成窒息而死亡。对农林业的损害表现为作物枯黄，产量降低，品质变劣。有害气体的氧化可转化为酸及腐蚀性的粒子物质，这些物质的干、湿沉淀物将腐蚀金属及建筑材料。总之，大气污染会严重扰乱生态平衡。

**大气物理学** (atmospheric physics) 研究发生在大气中的各种物理现象和物理过程的一门学科。它研究大气的化学组成与物理结构；水的相变与云雾降水的形成；各种尺度的大气运动；辐射能的吸收、放射、传输及其转换过程以及大气中各种各样的声、光、电现象等。采用最新技术来探测地球大气的状态参数和利用现代数理方法来描述大气物理过程的内在规律性，是当今大气物理学的显著特点。

大气物理学的范围很广，涉及从气溶胶微粒到行星尺度的大气环流；从贴地层到整个大气上界，亦包括其他行星大气在内；从大气探测方法到人工影响天气气候等。它不仅要探求地球大气本身的运动规律，而且还要研究大气圈与水圈、生物圈、岩石圈和冰雪圈之间的相互联系和相互作用。近20多年来，人们更加关注对大气科学的研究，其主要原因是：人类与

日俱增的工业生产活动使污染和人们有意无意中改变环境的可能性成为十分突出的中心问题。面对人口的迅速增长，世界粮食资源问题使人们意识到气候变动的严重影响，特别是对发展中国家的影响。人造卫星的出出和电子计算机的发展给大气研究提供了更有力的工具，使人们有可能把大气作为一个整体来加以研究。近年来，全球大气研究集中于一个大规模的国际研究计划——全球大气研究计划。该计划由大气科学家和各国气象局共同组织，其目的是研究关于整个大气的环流和运动特性的一些基本问题以及气候变迁的机制。

随着现代科学技术的迅速发展，电子计算机、气象卫星、红外、激光、微波、声波等新技术以及各种新型雷达的相继诞生并引入大气研究领域，使大气物理学有了新的进展。大气探测新技术的广泛应用不仅可搜集过去难以获得的观测资料，而且创新了一系列研究方法，使人们对大气现象的物理本质有更深刻的了解，拓宽了大气物理学的研究领域并逐步发展成三个基本的分支：研究大气的化学组成、物理结构以及大气运动和运动系统，从而更深入地了解它们的物理本质及其演变规律，以提高天气和气候预报的准确率。研究和探讨大气中发生的各种动力和物理过程，如辐射能的传输与转换，云雾与降水，大气湍流与污染，大气声、光、电等，探索人类活动对大气状态的可能影响和人工影响天气、气候的方法。为上述目的以及国防和国民经济建设中监测天气或其他特殊需要，研究和各种大气探测方法，以获取各种必要的气象资料。

大气压 (atmospheric pressure) 又称大气压强，简称气压。重要的气象要素之一。由于地球周围大气的重量而产生的压力，其大小等于单位面积上大气柱的重量。1643 年意大利物理学家托里拆利用水银柱做实验，证实了大气压的存在(见托里拆利实验)。帕斯卡受其启发，于 1646 ~ 1647 年又以不同方式重做一系列实验，证实了大气压随高度的增加而减少，并证实了水银柱的高度与当时当地的大气条件有关，从而预示了气压计用于气象预报的前景。在海平面附近，大气压的值相当于 760 毫米水银柱产生的压力，即为  $1.01325 \times 10^5$  帕，通常称为 1 个标准大气压。同一水平面，由于温度等因素的影响，大气压也有差异，这种差异会引起空气的流动，形成风。

大统一理论 (grand unified theory) 统一描述强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用的一种理论。寻求不同相互作用的统一理论是长期以来物理学家努力的一个目标。牛顿早在 17 世纪将天体的力学运动规律和地面上的力学规律(如自由落体、平抛、斜抛等)统一为牛顿力学。19 世纪 60 年代，麦克斯韦统一了电现象、磁现象及光现象，建立了统一的电磁学理论。爱因斯坦曾长期致力于寻找引力相互作用和电磁相互作用的统一理论，但没有成功。本世纪 60 年代末。一些物理学家建立的电磁相互作用和弱相互作用的统一理论，即电弱统一理论，取得了成功。其后在 70 年代初，强相互作用又取得了进展。这些理论有一个共同特点，即具有所谓“定域规范对称性”，或者说它们都是规范相互作用理论。于是一些物理学家在此基础上尝试建立大统一理论。按照这一理论，各种基本相互作用的强度与所涉及的能量有关。随着能量的增加，强相互作用的强度迅速减小，电磁作用的强度也会减小，而弱相互作用的强度则将增加。大约在  $10^{15}$  GeV 能量标度上，这三种基本相互作用的强度将变得相同，这时它们便统一为

一种相互作用。可见，强作用、电磁作用和弱作用是这种统一相互作用在目前加速器能量标度（ $10^2\text{GeV}$ ）上的不同表现。这种大统一理论能够对目前一些其他理论无法说明的事实（如电荷量子化、夸克和轻子的种类等）作出解释。该理论还预言质子将会衰变，其平均寿命约为 $10^{30}$ 年，但是迄今的实验并不支持大统一理论的这个结论。实验的结论是，质子的寿命 $>10^{31}$ 年。不过，寻找统一相互作用理论的尝试始终是物理学家所追求的一个目标。

**戴维南定理**（Thevenin theorem） 又称等效电压源定理。将有源二端网络简化为一电压源的定理。内容如下：任一线性有源二端网络可等效为一个电压源，即等效为一个电动势  $E$  和一个电阻  $r_0$  的简单串联电路，其中电动势  $E$  等于网络的开路电压  $V_0$ ，内阻  $r_0$  等于从网络两端观察所得到的除源网络的总电阻。所谓“除源网络”是指把要简化的网络内部所有电动势看作零（即短路），而其它部分不变时所得到的无源二端网络。例如一有源二端网络是一电压源（电动势  $E$  和内电阻  $r_0$  的串联），则所谓“除源”就是除掉电动势  $E$  而保留电阻  $r_0$ 。戴维南定理对计算复杂电路中某一支路的电流这类问题特别有效。这时只需将除去这一支路之外的其它电路看作有源二端网络而加以简化，就变成简单电路。由此即可方便地算得该支路中的电流。

**单摆**（simple pendulum） 见摆。

**单板机**（single board computer） 是将微处理器芯片和 1~60 块其他支持芯片安装在同一块印刷电路板上的微型计算机。它有两类。第一类单板机是主要为了用户熟悉微处理器及配套芯片的硬件、软件功能开发成的实验器，还可用于小规模过程控制，仪器、仪表和机械产品智能化以及小型数据处理。例如 Z80 单板机，把 CPU、RAM、ROM、I/O 接口等部件装在一块印刷板上，板上还带有小键盘作为输入设备，并备有七段数码显示器以显示程序和数据，可配接盒式磁带机和微型打印机，都配有监控程序，有的还配有初级和高级语言程序，并配有 CRT、ASCII 键盘和软盘驱动器及其他外部设备。第二类单板机又称为单板模块，是以计算机系统总线为基础，配有各种 CPU 板、存储器板、I/O 板、外设控制器板、模拟信号输入输出板，快速乘法器以及高速 DMA 接口板等等。用不同规格型号的这类单板模块配上相应的机箱、电源、外部硬件和软件产品，可以构成不同功能的微型计算机系统，还可构成多微机系统和微机局部网络工作站。

单板机给用户和生产厂都带来许多好处，可简化系统结构，简化系统软件和硬件的设计，系统易于扩充、维修和更新。

**单片机**（chip microprocessor） 只用一块集成电路基片制作的微电脑。一台微型计算机的全部功能（CPU、ROM、RAM、I/O 接口和时钟发生器等）集成在一块芯片上，称之为单片机。它是一类控制型的计算机。

近十几年推出的 4 位微型机全是单片机。如日本电气公司的  $\mu\text{COM}46$  系列，美国得克萨斯仪器公司的 TMS1000 系列等，主要用于家用电器、办公室自动化、工业控制、智能仪表、辅助教育等方面。应用数量占微机市场的 70% 左右。目前 8 位单片机品种已达几十种，有代表性的是 Inter80 系列，莫托洛拉的 68 系列，译洛格公司的 Z8 等主要用于事务处理、过程

控制、生产管理、情报处理、监视与检测等各方面。把系列软件和应用程序全部在半导体生产厂调试好并做成掩膜 ROM，可大批量生产的完整单片机，既可单独作为完整的计算机来使用，又可接上一些接口芯片进一步扩大功能。

**单色光** (monochromatic light) 理想化的仅包含一种波长成份的光。如果以波长为横轴，光强作为纵轴，单色光在这样的坐标系中可用一条垂直于横轴的没有任何宽度的几何直线表示。单色光的谱线宽度为零。单色光波应该是在时间和空间上都是无始无终的简谐波。

从发光机理来看，原子或分子的发光总是由大量原子或分子来完成的。各个发光原子或分子之间相互干扰，不可能存在某种统一的规则，使它们在同一时刻发出同一波长的光。即使单个原子或分子的发光，也是一种随机过程，且只是在有限的时间间隔中发光。所以，实际光源所发出的光只能是有限长度的波列，它们包含了多种波长成份。这种包含多种波长成份的光称为复色光。在光强-波长坐标系中，复色光表现为连成一片的有限面积，或某些有一定宽度的垂直谱线。

用滤色器或干涉滤光片可从复色光中取出具有狭窄波长范围的光来，也可以用单色仪从复色光中取得某一条光谱线。这些具有极小波长范围的光称为准单色光。在光强-波长坐标系中，准单色光可用中心波长处的钟形曲线表示。在  $\lambda = \bar{\lambda}$  处，光强为极大。光强为极大值的一半所对应的波长与中心波长之差  $\gamma$  称为谱线宽度。准单色光满足条件： $\frac{\gamma}{\bar{\lambda}} \ll 1$ 。钠

光灯、汞灯和一些常用的激光器都是准单色光源。实用中常常把准单色光称为单色光。

**单色仪** (monochromator) 提供一种颜色的光或在狭窄波长区段的光的仪器。通常用棱镜或光栅等分光元件把复色光分解成准单色光。它能输出一系列独立的、光谱区间足够窄的单色光，且所输出单色光的波长可根据要求连续调节。它的光学系统主要由三部分组成：入射准直部分、色散系统和出射聚光系统。附图为一棱镜单色仪的光路。入射准直部分由入射狭缝  $S_1$  和准直凹面反射镜  $M_1$  组成；色散系统由平面镜  $M_2$  和三棱镜  $P$  固定在一起组成，它们置于色散工作台上，可绕  $O$  轴转动。出射聚光系统由聚焦凹面反射镜  $M_3$  和出射狭缝  $S_2$  组成。

#### 单色仪光路图

光源发出的光经透镜  $L$  照亮入射狭缝  $S_1$ ，进入  $S_1$  后投向准直镜  $M_1$ ，经  $M_1$  反射后成为平行光射向平面反射镜  $M_2$ ， $M_2$  反射后仍为平行光射向三棱镜  $P$ 。由于棱镜的色散作用，经棱镜折射后，成为不同方向的平行光，各种不同波长的光束方向各不相同，波长长的偏向角小些，波长短的偏向角大些。同种波长的一束平行光射到聚焦镜  $M_3$  上经反射后会聚于  $M_3$  焦面上的一点。由入射狭缝  $S_1$  上各点的该波长的光，在  $M_3$  焦平面上形成一条谱线，谱线即狭缝  $S_1$  的像。若光源包含多种波长成分，则在  $M_3$  的焦平面上便获得很多谱线（也可以是连续谱）。出射狭缝  $S_2$  位于  $M_3$  的焦平面上，因  $S_2$  较窄，于是落在  $S_2$  处的单色光就从狭缝射出。

在仪器的底部有读数鼓轮，它与万向接头转动杆及把手相连。当转动

把手时，棱镜就转动，鼓轮的读数反映了棱镜转动后的位置，从而也反映了出射光的波长。鼓轮旁有反射镜，便于读数。

单色仪可用来测量光学材料的透射率曲线，确定光源的光谱能量分布及光电探测器的光谱响应等。

单位制 (system of units) 见物理量。

导出单位 (derived unit) 见物理量。

导弹 (guided missile) 依靠制导系统控制飞行轨道的火箭或无人驾驶飞机式的武器。其任务是把炸药弹头或核弹头送到打击目标附近引爆以摧毁目标。具有射程远、速度快、精度高、威力大等特点。

导弹一般按发射器与目标的位置分类。从地面发射并攻击地面目标的称为地地导弹，这种导弹还可按射程远近分为近程（小于 1000 公里）、中程（1000 ~ 8000 公里）和远程或洲际（8000 公里以上）导弹，也可按弹道式地地导弹和巡航式地地导弹分类。从舰艇发射攻击地面目标的称为舰地导弹。从地面发射攻击空中目标的称为地空导弹。从舰艇发射攻击空中目标的称为舰空导弹。从空中发射攻击空中目标的称为空空导弹。从空中发射攻击地面目标的称为空地导弹。

导弹通常由弹头（战斗部）、弹体结构、动力装置和制导系统组成。战斗部主要包括壳体、战斗装药、引爆装置和保险装置几部分。弹体结构是把导弹各部分连结起来的支承结构。动力装置是导弹飞行的动力源。导弹的动力装置常用固体或液体火箭发动机。制导系统用于控制导弹飞行方向、姿态、高度和速度，引导导弹或弹头准确地飞向目标。有多种制导方式如无线电制导、惯性制导、寻的制导等都可以达到制导目的。弹头是导弹武器系统的核心部分，还需要导弹武器系统中的其他组成部分协调一致地工作，才能完成导弹攻击的任务。

1 引信 2 战斗部 3 燃烧箱 4 弹翼 5 氧化剂箱

6 舵 7 尾翼 8 制导设备 9 发动机 10 助推器

导弹结构示意图

导纳 (admittance) 在具有电阻、电感和电容的交流电路中，通过任一端网络的交流电流  $i$  与该网络两端交流电压  $u$  之比。它等于该两端网络的复数阻抗  $Z$  的倒数。常用符号  $Y$  表示。例如，对于 RLC 串联电路，

总阻抗为  $Z = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$ ，所以它的导纳为

$$\begin{aligned} Y &= \frac{1}{R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)} \\ &= \frac{R}{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} + j \frac{\left( \frac{1}{\omega C} - \omega L \right)}{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \\ &= G + jB. \end{aligned}$$

其中复数导纳的实部称为电导，常用符号  $G$  表示；复数导纳的虚部称为电纳，常用符号  $B$  表示。导纳的模为



$$y = |Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

导数 (derivative) 在物理上用来描绘变化率或者两个变量变化时的相互关系。在具体使用和计算时，导数被化为差分表达式，而推导这些差分表达式的依据，就是泰勒级数展开。

函数  $f(x)$  在  $x=a$  处的值为  $f(a)$ ，在  $a$  附近的其它  $x$  函数值要用  $a$  的有关式子组合起来，可写成如下级数展开式：

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n + \dots$$

式中  $f'(a)$  就是  $x=a$  点的导数值， $f''(a)$  就是  $x=a$  的二阶导数，等等。注意  $x=a$  的  $n$  阶导数，不是将  $a$  代为  $x$ ，再求  $n$  次导数，而是  $f(x)$  对  $x$  求  $n$  阶导数后，将  $x$  由  $a$  代入得到的数值。上式就是泰勒级数表示式。

在差分计算里，把  $a$  附近的点限定在  $(a \pm x)$  的范围内， $n$  是一个整数， $x$  为某一常数差值。现在取  $x_i = a$ ， $x - a = x$ ，则  $x = x_i + x$ ，上述泰勒级数可改写成：

$$f(x_i + x) = f(x_i) + \frac{f'(x_i)}{1!}x + \frac{f''(x_i)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^n(x_i)}{n!}x^n + \dots$$

如果取  $x_i = a$ ， $x - a = -x$  即  $x = x_i - x$ ，则上式变为：

$$f(x_i - x) = f(x_i) - \frac{f'(x_i)}{1!}x + \frac{f''(x_i)}{2!}x^2$$

$$+ \dots + (-1)^n \cdot \frac{f^n(x_i)}{n!}x^n + \dots$$

为了计算一阶导数  $f'(x_i)$ ，并使公式中出现的表示式和因子尽可能少，忽略  $x^3$  项及其它更高项的项，采用以上两级数相减的函数差分形式，即得到：

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i + x) - f(x_i - x)}{2 \cdot x}$$

或者写成：

$$f'_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2 \cdot x},$$

即

$$y'_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2 \cdot x}。$$

上式就是一阶导数的中心差分表达式。

为了计算二阶导数  $f''(x_i)$ ，忽略  $x^4$  项及其它更高次的项，采用以上两级数相加的函数差分形式，

$$f''(x_i) = \frac{f(x_i + x) - 2f(x_i) + f(x_i - x)}{x^2},$$

或者写成：

$$y''_i = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{x^2},$$

上式为二阶导数的中心差分表达式。

应用同样的方法，可以求得三阶导数、四阶导数甚至更高阶导数的中心差分表达式。

**导体 (conductor)** 具有大量能在外电场作用下自由移动的带电粒子 (电子或离子)，因而能传导电流的物体。金属是最常见的一类导体。金属原子最外层的价电子很容易挣脱原子核的束缚，而成为自由电子，余下的正离子 (原子实) 形成规则的点阵。金属中自由电子的浓度很大，约为  $10^{22}/\text{cm}^3$ 。金属导体的电阻率约为  $10^{-8} \sim 10^{-6} \cdot \text{m}$ 。铜、铝、铁及某些合金是常用的导电材料。

电解质 (酸、碱和盐) 的水溶液及熔融电介质也是导体，其中的载流子是正、负离子。大部分纯液体虽然也能离解，但离解度很小，所以不是导体。例如纯水 (去离子水)，其电阻率高达  $10^{10} \Omega \cdot \text{m}$  以上。如果在纯水中加入电解质，其离子浓度将大为增加，约达  $10^{20} \Omega/\text{cm}^3$ ，电阻率降至约  $10^{-1} \Omega \cdot \text{m}$ ，便成为导体。电解液在通电过程中伴随着化学变化，因此，它常应用于电化学工业 (如电解提纯，电镀等)，并把它称为“第二类导体”。

电离的气体也能导电，其中载流子是电子和正负离子。在通常情况下，气体是良好的绝缘体。但是在加热或用 X 射线、 $\gamma$  射线或紫外线照射等条件下，可使气体分子离解，因而电离的气体便成为导体。电离气体的导电性与外加电压有很大的关系，且常伴有发声、发光等物理过程。电离气体常应用于电光源制造工业。

**道耳顿分压定律 (Dalton partial pressure law)** 简称分压定律，是关于混合气体压强的一条基本实验定律：容器中混合气体对器壁所产生的压强等于在同样温度和同样体积条件下组成混合气体各成份单独存在时的分压强之和。道耳顿分压定律是英国物理学家和化学家道耳顿在 1802 年通过实验确定的。对于实际的混合气体，只有当它的压强较低时该定律才近似地成立；对于混合的理想气体，则严格成立。

若各种气体的单位体积内所含分子数分别为  $n_1, n_2, \dots$ ，则单位体积内混合气体的总分子数为  $n = n_1 + n_2 + \dots$ 。混合气体的压强为  $p = nkT = (n_1 + n_2 + \dots) kT = n_1 kT + n_2 kT + \dots = p_1 + p_2 + \dots$ ，其中  $p_1 = n_1 kT, p_2 = n_2 kT, \dots$ ，是各组份气体分别施于器壁的分压强。所以道耳顿分压定律的数学表示式为：

$$p = nkT = \sum_i n_i kT = \sum_i p_{i0}$$

在实际问题中，质谱分析法是测量各分压强的主要方法。利用理想气体状态方程和道耳顿分压定律，可以导出混合理想气体的状态方程。

**倒易点阵 (reciprocal lattice)** 又称倒格子。为解释和理解晶体中的 X 射线衍射现象而引入的一个重要概念。如果某晶体点阵的一组基矢为  $a_1, a_2, a_3$ ，我们按下面的关系定义一组新的基矢

$$b_1 = 2\pi \frac{a_2 \times a_3}{a_1 \cdot (a_2 \times a_3)},$$

$$b_2 = 2\pi \frac{a_2 \times a_1}{a_1 \times (a_2 \times a_3)},$$

$$b_3 = 2\pi \frac{a_1 \times a_2}{a_1 \times (a_2 \times a_3)},$$

由这组基矢可得到一个新的点阵，这个新点阵称为原来晶体点阵的倒易点阵。倒易点阵中的每个阵点和晶体点阵的晶面具有倒易关系，倒格矢  $k_h = h_1 b_1 + h_2 b_2 + h_3 b_3$  所标志的一个倒阵点可用于代表晶体点阵中密勒指数为  $(h_1 h_2 h_3)$  的一族晶面。晶体对 X 射线的衍射可看作晶体中各晶面族反射 X 射线的结果，借用倒易点阵的几何图象可直接而形象地描写晶体 X 射线衍射。倒易阵点与衍射图样上的衍射斑点有直接联系。

倒易点阵的概念在固体理论中亦有重要作用。晶体中电子或声子等的状态常用波数矢量（简称波矢）来描述。倒易点阵基矢的量纲是  $[\text{长度}]^{-1}$ ，与波矢有相同的量纲。由倒易点阵所组成的空间可理解为状态空间（波矢空间）。在倒易点阵中选定一阵点为原点。作出由原点出发的诸倒易点阵矢量的垂直平分面，这些面所围成的最小多面体称为第一布里渊区。它的体积等于倒易点阵原胞的体积。完整晶体中运动电子和声子等的能量和状态都是倒易点阵的周期函数，因此只须用第一布里渊区中的波矢来描述能带电子和点阵振动等的状态。任何类型的波通过晶体点阵传播时，其能量（或频率）都是波矢的多值函数，在布里渊区内该函数是连续的；在布里渊区边界处，能量会发生不连续变化。固体的能带便是这样形成的。

**德拜固体模型 (Debye solid model)** 德拜在 1912 年为改进爱因斯坦固体模型而提出的一种计算固体热容量的模型。由这个模型可以得到与实验符合得很好的热容量公式。

德拜考虑了如下的模型：假设固体是各向同性的连续介质，可以传播弹性振动。固体中  $N$  个互相耦合的原子的振动可变换为  $3N$  个不同简正振动频率的近独立的简谐振动，振动有一个最高频率  $\omega_m$ （德拜频率），固体中任何弹性波都可以分解为这  $3N$  个简正振动的叠加。振动在固体中的传播有三种模式：一个是纵波，对一定的波矢  $k$ ，纵波只有一种振动方式，即在传播方向上的振动，传播速度为  $c_t$ ；另外两个是横波，即在垂直于传播方向的两个相互垂直的方向上的振动，传播速度为  $c_t$ 。利用这个模型，首先可求得固体内能  $U = U_0 + 3NkTD(x)$ ，式中

$$D(x) = \frac{3}{x^3} \cdot \int_0^x \frac{y^3 dy}{e^y - 1}$$

是德拜函数， $y = \frac{\hbar\omega}{kT}$ ， $x = \frac{\hbar\omega_m}{kT}$ 。设  $Q_D = \frac{\hbar\omega_m}{k}$  为德拜特征温度，

于是热容量为

$$C_v = 9Nk \left( \frac{T}{Q_D} \right)^3 \int_0^{\frac{Q_D}{T}} \frac{e^y y^4 dy}{(e^y - 1)^2}$$

在高温极限下，即  $T \gg Q_D$ ，可得  $C_v \approx 3Nk$ ，与经典能量均分定理结果

相符。在低温极限下，即  $T \ll Q_D$ ，可得  $C_v \approx 3Nk \frac{4\pi^4}{5} \left(\frac{T}{Q_D}\right)^3$ ，这就是德

拜  $T^3$  定律 ( $C_v \sim T^3$ )。对于非金属固体，上式与实验相符。一般的金属固体在  $3k$  以上也符合  $T^3$  定律。实际上  $T^3$  定律只适用于大约  $T < \frac{1}{30} Q_D$  的温度，也就是绝对温度几度以下极低温范围。进一步研究表明，当弹性波的波长与晶格常数可比拟时，固体不再可被看作为各向同性的连续介质模型，德拜的理论不适用，需改用晶格动力学理论来讨论固体热容量。

**德布罗意** (Louis Vicotr de Broglie 1892 ~ 1986) 法国物理学家。生于迪耶普。中学时代就显示出文学才华。1910 年获巴黎大学文学士学位。后来喜欢上盛行的自然科学，经过学习，1913 年获理学士学位。第一次世界大战期间服过役。1924 年获巴黎大学博士学位。1926 年起在巴黎大学任教。1932 年任巴黎大学理论物理学教授。1933 年当选为法国科学院院士，1942 年任该院常务秘书。1953 年当选为英国皇家学会会员。

德布罗意是物质波理论的提出者和量子力学的创始人之一，获 1929 年诺贝尔物理学奖。1923 年，把爱因斯坦关于光的二象性思想推广到物质客体上去。1924 年，发表了她的博士论文《量子论研究》，在论文中大胆提出，并非所有的物质性质都能用“是由微粒组成的”这一理论来解释，

认为对于光子建立起来的两个关系式： $E = h\nu$ 、 $\lambda = \frac{h}{p}$ ，同样也适用电

子，进而去类比一切实物粒子，提出这样两个假设，即所有具有动量  $p$  和能量  $E$  的物质客体，如电子等，都具有波动性，其频率和波长分别由下式给出：

$$\nu = \frac{E}{h}, \lambda = \frac{h}{p},$$

式中  $\lambda$  为波长，这两个假设成为建立波动力学的物质基础。同年，在没有一个已知事实支持这个理论的时候，断言电子流通过屏上的小孔时应呈现出光线在同样条件下所呈现的现象。此后，人们相继用实验证实了电子、原子、中子都具有波动性。德布罗意的理论最终得到了完全证实：实物粒子都具有波动性，被称为德布罗意波，即物质波。德布罗意也是波动力学的创始人，他提出的物质波理论，受到了薛定谔的高度重视，薛定谔沿着德布罗意的思想，建立了薛定谔方程，创立了波动力学。德布罗意著有《波和运动》(1926)、《波动力学导论》(1929)、《物质和光：新物理学》(1939)。

**等概率假设** (postulate of equal probability) 本假设是统计物理学中的一个先验的基本假设。它可以表述为：“对于给定能量、体积和粒子数而且处于统计平衡的孤立系统，在相空间能量层  $E \sim E + \Delta E$  之

间，各个可能的微观状态出现的概率相等。”满足这个概率分布的统计系综 (简称系综) 称为微正则系综。

在统计物理中所讨论的孤立系统，不是指那些绝对孤立、各个力学量 (如能量、动量和动量矩) 完全不能改变的系，而是指在外界环境对系统的随机影响极其微弱的条件下，其状态可以允许在属于  $E \sim E + \Delta E$  能量层

的各个状态之间发生跃迁，但不能在属于不同能量层或不处于  $E$  内各个状态之间发生跃迁的系统。因为有这种允许的跃迁，才有可能使系统处于不同的微观状态，才有必要讨论各个状态出现的概率。等概率原理正是为描述这样的孤立系统处于统计平衡而提供了充分必要的条件，因此它构成了平衡态统计物理的基本假设。

基于等概率假设，从微正则系综出发，可以建立起一整套统计物理的理论，并且导出热力学的基本公式和定律，得到与实际观测相符合的结果（例如气体的状态方程），这就证明了等概率假设的正确性。

**等厚干涉** (interference of equal thickness) 参见薄膜干涉

**等倾干涉** (interference of equal inclination) 参见薄膜干涉

**低维固体** (low-dimensional solid) 结构或性质上明显地表现出零维、一维和二维特征的固体材料。毫微米大小的半导体和金属的原子簇是典型的零维固体。某些聚合物，例如聚乙炔，其电子沿碳链方向的耦合比不同链之间的耦合强得多，具有一维特点。石墨夹层化合物的结构是层状的，这是一种二维固体。此外，固体的表面，表面上的吸附层，两种材料的界面或厚度很薄的薄膜等也都属于二维系统。

通常的三维固体其线度要比组成原子（分子）的线度大得多，所以可忽略其边界效应的影响。但当固体某些方向上的线度缩小到与原子（分子）线度可比拟时，边界效应将变得明显。因此随着物体维度的减小，会出现某些新的现象和独特的性质。例如，一维导体是不稳定的，在低温下会变为半导体或绝缘体，即发生所谓佩尔斯相变。又如，在两种不同的半导体相接触所形成的异质结（如  $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ）的界面处，电子被限制在一个很窄的势阱中，此时电子在垂直于界面方向上的运动是量子化的，形成一系列分立能级，而与界面平行方向上的运动是自由的。这是一种“二维电子气系统”。在低温、强磁场下二维电子气的电导和磁化率等具有与三维体系不同的特点。例如二维电子系统会发生量子霍尔效应。

**低温物理学** (Low temperature physics) 研究物质在低温下的物理性质及有关低温的获得和测量技术的学科。物理学中的“低温”通常指液氮常压沸点（77K）以下的温度。77K 附近称为液氮温区，20K 附近为液氢温区，4K 附近为液氦温区，1K 以下则称为超低温。随着低温技术和低温物理的发展，现在人们更习惯于将液氢常压沸点 4.2K 以下的温度才称为低温。

低温下物质的热运动明显减弱，并导致原子的排列和磁矩的取向等等有序程度的增加。因此在低温下，固体的许多物理性质将明显地不同于常温时的情况，甚至出现突变。尤其在 4K 以下接近绝对零度时，某些物质显示出一些在较高温度下从未观察到的现象，其中最典型的现象是固体的“超导电性”和液氦的“超流动性”，对于物质的超导性和超流性现象的研究至今仍是低温物理学的最主要的课题。

获得 4.2K 以下温度最常用的方法是降低液氮面上的蒸气压，利用这种方法可使液氮温度达到 1K 以下。利用顺磁盐绝热去磁或  $^3\text{He}-^4\text{He}$  稀释致冷机可达到  $10^{-3}\text{K}$  温区。在绝热去磁技术中如果用核磁矩代替电子磁矩，则可进一步将温度降到  $10^{-6}\text{K}$ 。

低温下使用的温度计主要有气体温度计、蒸气温度计、电阻温度计、温差电偶温度计和磁温度计等。1K 以下的温度可通过测定  $^4\text{He}$  或  $^3\text{He}$  的蒸

气压、碳或某些纯金属的电阻和某些顺磁盐（如硝酸铈镁等）的磁化率来确定。

狄拉克（Paul Adrien Maurice Dirac 1902 ~ 1984）英国物理学家。生于布里斯托尔。1918年入布里斯托尔大学，1926年获剑桥大学哲学博士学位。1932年至退休，一直任剑桥大学数学教授。1971年任佛罗里达大学教授。1930年当选为英国皇家学会会员。他还是中国物理学会名誉会员。

狄拉克是量子力学创始人之一，获1933年诺贝尔物理学奖。1925年，海森伯访问剑桥大学，对当时还是研究生的狄拉克影响很大，开始致力于量子力学理论的研究。同年，提出了量子力学的一种数学形式 $q$ 数（非对易代数）理论，发展和简化了海森伯的矩阵力学体系。1926年，薛定谔统一了量子力学的两种表达方式后，狄拉克进一步发展了这种统一，使量子力学理论体系最后得以完成。1927年，首次提出二次量子化理论，为建立量子场论找到了一个出发点。预言了感生辐射和原初辐射的量子等同性，这种等同性是量子电子学的基础。1928年，把相对论力学方法，应用到量子力学之中，提出了相对论形式的薛定谔基本方程。这个方程描述了电子或其他自旋为 $h/2$ 的基本粒子在速度接近于光速时的运动规律，被称为狄拉克方程。在狄拉克的理论中，把相对论、量子论和自旋这些在以前看来似乎无关的概念和谐地统一起来，还论证了电子磁矩的存在，并赋予真空以新的物理意义。

1930年，发现狄拉克方程的解具有异常的性质，即除正能解外还有负能解，负能解使正能电子向负能态跃迁是不合理的。为了克服这一困难，提出“空穴假说”，即认为真空实际上是所有负能态都被填满的最低能态，如果有一个负能态没有被填满，就是出现了一个“空穴”（缺少一个负能电子），它相当于一个正能电子。在此基础上作出预言，应该存在和电子质量相同而电荷相反的正电子。还提出正负电子对能够由光子在真空中产生出来，而正负电子相碰撞时，就湮灭变成光子。1932年，狄拉克所预言的正电子，被美国物理学家安德逊在研究宇宙线时发现，这是人们从实验中最早发现的反粒子。狄拉克理论不仅揭示反物质的存在，而且加深了人们对物理真空的新认识，导致物理真空性质的研究成为量子场论的重要课题之一。

狄拉克对量子统计、量子电动力学、引力理论等也作出了重要贡献。1926年，发现用反对称波函数表示全同粒子系统的量子统计法，被称为费米—狄拉克统计法。找到两种量子统计法的理论与量子力学波函数的对称性的关系，证明了遵守玻色—爱因斯坦统计法的质点组的总波函数，对于质点的变换是对称的；遵守费米—狄拉克统计法的质点组的总波函数，对于质点的变换是反对称的。1931年，论证了以基本磁荷为基础的对称量子电动力学存在的可能性。1932年，与福克、波多利斯基共同提出多重时间形式，成为现代量子力学的先驱。1933年，根据电子的电荷量子化，提出可能存在磁单极的假说，但至今未在实验上得到最后证实。1937年，提出引力随时间变化的假说。此后又研究引力理论的哈密顿表述形式问题，以便把引力场进一步量子化。

笛卡儿（René Descartes 1596 ~ 1650）法国哲学家、物理学家、数学家。生于都兰。曾在欧洲著名的拉弗莱什耶稣会学院学习。1616年毕业于普瓦捷大学。1618 ~ 1625年到欧洲各国旅行。1629 ~ 1649年间在荷兰定

居,在那里完成了他大部分哲学、物理学和数学等著作,如《方法论》(1637)及其附录《几何学》、《屈光学》和《气象学》、《形而上学的沉思》(1641)和《哲学原理》(1644)等。《论光》等则是他死后1664年才出版的。

笛卡儿在科学上的贡献是多方面的。但他的哲学思想和方法论,在其一生中则占有更重要的地位。他是笛卡儿主义的创始人,力图建立自然界的普遍图象。在这个图象中,一切物理的和其他现象都可以解释为由相同物质构成的大的和小的粒子的运动的结果;而有了物质(空间)和(机械)运动,就能按照物质运动本身的规律,构造出全部世界,无须上帝照管。这类机械论的自然观以后曾统治自然科学的发展达两个多世纪。在古代演绎方法的基础上,他还创立了一种以数学为基础的演绎法:以唯理论为根据,从自明的直观公理出发,运用数学的逻辑演绎,推出结论。这种方法和培根所提倡的实验归纳法结合起来,经过惠更斯和牛顿等人的综合运用,成为物理学特别是理论物理学研究的重要方法。

在物理学方面,笛卡儿发展了伽利略的运动相对性的思想,说明了运动与静止需要选择参照物的道理。比较完整地表述了惯性原理:只要物体开始运动,就将继续以同一速度并沿着同一直线方向运动,直至遇到某种外来原因造成的阻碍或偏离为止。引入运动量的概念,它表示为运动物体的大小与其速度的乘积。明确提出了动量守恒的思想:物质和运动的总量永远保持不变;但他没有认识到动量是矢量。对碰撞和离心力等问题曾作过初步研究,给后来惠更斯的成功创造了条件。提出大气压随高度的增加而减小的看法。从光的发射论的观点出发,用网球打在布面上的模型来计算光在两种媒质分界面上的反射、折射和全反射,从而首次在假定平行于界面的速度分量不变的条件下导出“ $\sin i/\sin r = \text{常数}$ ”的折射定律;但他的假定条件是错误的。

在数学方面,笛卡儿最杰出的成就是创立了解析几何学。在笛卡儿时代,代数还是一个比较新的学科,几何学的思维还在数学家的头脑中占有统治地位。笛卡儿致力于代数和几何联系起来的研究,于1637年,在创立了坐标系后,成功地创立了解析几何学。他的这一成就为微积分的创立打下了基础。

笛卡儿主义(Cartesianism)泛指笛卡儿的思想以及他的继承者的思想。产生并流行于17世纪的法国和荷兰,在西欧大陆其他各国也有一定影响。笛卡儿倾向于新科学,因为他认清了宗教迷信和经院哲学对人生有百害无一利,只有新科学才能给人类带来幸福。在这一点上,他和弗·培根是一致的,因此他们被称为近代科学的两位伟大的旗手。笛卡儿明白科学的发明可以帮助各种技艺,减轻人类的辛劳,但是他决不止于为生产技术而研究科学,而要追求科学的原则,认识科学的底蕴,因此他不限于追求经验、利用经验,还要追问人是怎样研究科学的,这就是要提高到世界观的水平,建立新的科学的哲学。他认为只有这样才能真正造福人类,关于这一点,他在1637年出版的《谈正确引导理性在各门科学中寻找真理的方法》(简称《方法谈》)和1644年出版的《哲学原理》中都进行了阐述。他的哲学思想是:在心物、心身关系上,主张两者是相互排斥的,提出思维的本性与生物体相分离,因而在“形而上学”的范围内建立起近代典型的二元论。在认识论上,强调理性认识,贬低感性认识,认为感觉与经验不是真知识的来源,只有理性才能认识事物的真相。在自然观上,指出整

个自然界包括有生命的动植物在内，都像机器那样在作永不停止的运动，并力图建立自然界的普遍图象：对自然现象，否定了经院哲学的“目的因”、“质料”、“形式”等概念，而采用以“广延”为本性的微小粒子为基础的物质论；对物体作用，否定隔开一定距离发生作用的那种力，认为空间是充满着物质的，其各部分的运动只因相互碰撞才发生变化；对宇宙图景，否定真空的存在，引入以太概念，提出旋涡说。指出正是由于以太的作用，物体才能组成具有稳定形状的体积，以及在宇宙中形成许多大小、速度和密度各异的旋涡。指出行星所以绕太阳运转，就因为太阳周围有一个巨大的旋涡，这个旋涡足以推动地球和其他行星运动；月亮所以绕地球运转，则是在地球周围有次旋涡或较小旋涡；在旋涡中重物趋向中心，轻物离开中心，因此重物总是落下地面。这样，笛卡儿不仅把行星的圆周运动，而且把重物的下落都归之于旋涡的吸引效果，由此构出全部世界，无须上帝照管。这类机械论的自然观，由罗奥(1620~1672)、雷吉斯(1632~1707)、克拉奈(1621~1690)、雷鸠斯(1598~1679)、科尔德莫阿(1626~1691)、马勒伯朗士(1638~1715)等继承，而统治自然科学的发展达两个多世纪。

**第二类永动机** (perpetual motion machine of the second kind) 参见热力学第二定律。

**第一类永动机** (perpetual motion machine of the first kind) 见热力学第一定律。

**第一推动者** (Primum mobile) 意指宇宙运动的原动力，最早由亚里士多德提出。他认为一切运动都有其第一推动者，如果第一推动者是不被推动的而是推动别的物体运动的，则是指神。中世纪的托马斯·阿奎那则把第一推动者看成是上帝存在的证明。到了17世纪，牛顿认为物质、时间和空间不是上帝创造的，但原子却是上帝创造的，至于原子和虚空构成万物系上帝和自然的共同操作。在此基础上他提出“我不知道没有神臂的推动，在自然界中会有哪一种力量能引起各种横向运动。”当行星向太阳垂直落下时转变为一个横向的轨道时，他又认为“好像它们全都是上帝在离我们系统遥远的天区创造的”。虽然牛顿的第一推动与亚里士多德的第一推动有所不同，但在牛顿尚不了解行星的横向运动或轨道运动的起因时，却依然归于神臂的推动和上帝的创造，从而陷入了唯心主义。

**地磁场** (geomagnetic field) 地球的磁常 1600年英国物理学家吉伯首次指出了地磁场的存在。地球本身是一个巨大的磁体。磁极的位置有长期变化。1970年，地磁北极位于北纬 $78.6^\circ$ 、西经 $70.1^\circ$ 处。两极区的磁场强度约为 $48 \sim 53 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ，赤道附近约为 $24 \sim 32 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

地磁场由基本磁场和变化磁场两部分叠加而成。基本磁场又称稳定磁场，其分布与均匀磁化的球体或磁偶极子的磁场相似，是地磁场的主要部分，约占94%。它是由地球本身的磁性结构产生的。关于这种磁性结构及其起源有多种假说。例如有一种假说认为，地心附近存在大量导电性炽热流体，它们的对流运动和地磁场的存在使地球成为一个能自行维持的、巨大的发电机，由此形成环形电流以及相应的基本磁场。基本磁场相当稳定，但也会因为局部地壳性质出现异常和外来磁场的影响而发生某种程度的变化。变化磁场则是由太阳辐射、太阳粒子流和宇宙线的影响而产生的，其分布并不规则，并且随产生条件的变化而变化。例如，太阳发生磁暴时，变化磁场将首先受到严重影响。



地球上某一点的电磁状态常用磁偏角、磁倾角和地磁场强度水平分量这三个量表示，简称地磁三要素。

(1)磁偏角。地磁场强度矢量所在的铅垂平面与地球子午面之间的夹角。我国于 11 世纪首先发现磁偏角。当时的北宋科学家沈括在《梦溪笔谈》中就有过这样的记载：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。”而欧洲直到 15 世纪末，哥伦布横渡大西洋时才发现地磁偏角现象。地球上不同地点的磁偏角不同，主要随经度发生变化。船舶和飞机航行时，用磁罗盘测得的是地磁方位角。必须知道所在地的磁偏角，才能正确地确定方位。目前在导航中，磁罗盘已逐步被回转罗盘所代替。

(2)磁倾角。地磁场强度矢量与水平面之间的夹角。我国北宋曾公亮主编的《武经总要》中关于利用地磁场进行人工磁化的记载，表明当时已在实践中知道并开始利用磁倾角。地球上不同地点的磁倾角也不相同，主要随纬度发生变化。磁倾角为零各点的连线称为磁赤道。

(3)地磁场强度水平分量。地磁场强度矢量在水平方向的投影。若以  $H$  表示某地地磁场强度的大小， $H'$  表示其水平分量，则  $H' = H \cos \theta$ ，式中  $\theta$  为该地的磁倾角。除了某些地磁异常区域外，在地理南北极附近各有一个  $\theta = 90^\circ$ 、 $H = 0$  的地点，这就是地磁两极的位置。

地磁三要素不仅随地点，而且还会随时间变化，但基本磁场随时间的变化十分缓慢。测量和记录地球表面各点的地磁三要素等基本数据，绘制成“地磁图”，并随时发现其变化，对于天文、地质、气象、采矿、航行等都有重要的作用。

**地磁学** (geomagnetism) 研究地球本体及其周围空间电磁场的起源、变化和分布规律的一门学科。研究内容有：地磁场的测量、地球的基本磁场和长期变化、地球的变化磁场及日地相关现象、岩石磁性和古地磁、地磁场的成因和电磁感应和地球内部的电导率等。

我国古代人民对地磁学的发展做出了重要贡献。远在春秋战国时期，随着冶铁业的发展和铁器的应用，对天然磁石已有一定认识，指南针是我国古代的四大发明之一，磁偏角的发现，也不迟于 11 世纪。地磁学作为一门科学而不是一项技术确立下来，则要归功于英国的吉伯。1600 年他发现圆球形天然磁性矿石表面磁场倾角的分布与地面相似，提出了“地球是个大磁体”的假说，这是关于地磁学理论的最早论断。随着磁偏角的发现和测量，人们于 1701 年绘制了世界上第一张地磁图：大西洋等偏角图。随后又发现了地磁倾角的存在，但直到 1839 年之前地磁学的主要内容仍然是地磁测量。1839 年高斯建立了地磁场的球谐分析理论，把地磁场的研究纳入了数理分析的轨道，并证明地磁场主要由球内源产生。近年来，地磁学获得了迅速发展，在高空和地球内部的介质的物性、组成和运动状态的研究中发挥了重要作用，被西方称之为“地学革命”的“板块大地构造”学说的重要支柱就是在地磁学的领域取得的。

地磁场是一个向量场，通常可用 7 个参数来表达，其中  $F$  表示地磁场的总强度， $x$ 、 $y$  和  $z$  分别表示向北、向东和垂直向下的三个分量， $H$  表示  $F$  在水平方向上的分量， $D$  表示地磁偏角， $I$  表示地磁倾角，如图所示。它们之间满足如下关系：

$$F^2 = x^2 + y^2 + z^2, H^2 = x^2 + y^2$$
$$\operatorname{tg} I = z/H, \operatorname{tg} D = y/x,$$

$$x=H\cos D, y=H\sin D, z=F\sin I。$$

在 7 个参数中，只有 3 个是独立的，知道其中的任意 3 个，其余 4 个也可计算出来。地磁场的测量就是应用地磁仪器观测某一测点独立的地磁参数，一般有两类方法。一类是连续记录地磁场随时间变化的固定测点，叫地磁台，通常测量 H、D、z 三个参数。另一类是野外流动磁测点，它不能连续测定地磁场随时间的变化，而是间断地进行地磁参数的绝对测量。为了便于分析，还需将各测点不同时间的观测值，归算到同一指定时刻。这样固定地磁台站和野外磁测点所取得的特定时刻地磁场各参数的数值和它们随时间的变化，构成了地磁场分析研究的基础资料。

**地球 (earth)** 太阳系的九大行星之一，人类居住的星球。按行星距离太阳的次序 (由近到远) 排列为第三。

**结构和成份** 地球有辐射带、电离层、大气圈和岩石圈 (或称地壳)，在地壳层以下，地球又可分成地幔和内、外地核。地球内部的分层情况是：第一层为地壳，厚度约为 33 公里，密度为  $3.3 \times 10^3$  千克/米<sup>3</sup>，成份主要是花岗闪长岩等；第二层为地幔，在 33 ~ 2900 公里之间，其体积占地球总体积的 82%，密度为  $5.6 \times 10^3$  千克/米<sup>3</sup>，主要成份可能是超基性岩；第三层为地核，2900 ~ 5100 公里之间为外核，5100 ~ 6370 公里之间为内核，地核中心密度达  $13 \times 10^3$  千克/米<sup>3</sup>，主要成份由铁和镍等金属物质组成。

地球内部的温度随深度上升。100 公里深处温度为 1300，300 公里深处的温度为 2000。地核边缘温度约为 4000，地心的温度为 5500 ~ 6000。因地表层是热的不良导体，来自太阳的巨大热量不能渗入地下，故地球内部的热能主要来源于地球本身，可能产生于天然放射性元素的衰变。

地球内部的压力也随深度增加，在地幔中深度每增加 1 公里，压力增加 470 个大气压，在地核界面上的压力为 137 万个大气压，在地心处为 370 万个大气压。

地球表面包有坚固的地壳，面积为  $5.11 \times 10^8$  千米<sup>2</sup>，其中海洋占总表面积的十分之七。地球周围的大气圈，由氮、氧、水汽等气体组成。大气圈外的辐射带由带电粒子组成。

**基本物理特性** 地球近似看成球体，但由于地球自转，赤道将略为隆起，成偏球体。赤道半径为 6378.2 千米，极半径为 6356.2 千米。据人造卫星拍摄地球照片，地球呈梨状的旋转体。地球质量为  $5.976 \times 10^{24}$  千克，平均密度为  $5.52 \times 10^3$  千克/米<sup>3</sup>。地球上任何质点都受到地球引力和惯性离心力作用，两者合力才是物体的重力。重力随高度递增而减小，亦随纬度而异。赤道处的重力加速度为 9.78 米/秒<sup>2</sup>，两极处为 9.83 米/秒<sup>2</sup>。有些地方会出现重力异常，这反映地球内部物质分布的不均匀性。重力异常与地质构造和矿床有关。

地球公转周期为 365.25 日，自转周期为 23 小时 56 分钟。地球的轨道为一椭圆，它与地球赤道相交成 23° 27' 角度，故有四季寒暑和昼夜长短的区别。天文观测表明，地球自转并不均匀，存在着三种变化：长期减慢、不规则变化和周期变化。在太阳与月球作用下，地球自转轴沿一锥面进动，周期为 26000 年。

地球的基本磁场可能是由地核内部的电流体系造成，除基本磁场外，地球磁场还有长期变化和短期变化。岩石磁性研究表明：在最近 5000 万

年，地球的磁场与现在类似，但在地球整个历史发展过程中，地球磁场极性曾发生过数百次逆转。

**起源和演化** 地球在 46 亿年前起源于原始太阳星云，它同其他行星一样，经历了吸积、碰撞等物理演化过程。刚形成地球时，温度较低，无分层结构，但在陨石的不断轰击、放射性衰变致热和原始地球的重力收缩下，地球温度逐渐升高。地球内部物质开始局部熔融，在重力作用下物质开始分异，较重物质下沉，较轻物质上升，一些重元素（如液态铁）沉到地球中心，形成密度很大的地核。物质的对流伴随着化学分离，最后形成现今的地壳、地幔和地核等层次。

地球上原始大气圈几乎是和原始地壳在同一过程中形成的。原始大气圈中的水蒸气逐渐冷却，凝结成雨滴降落到地面，一部分渗透到地表的岩石中，一部分汇集成大大小小的溪流，注入原始洼地里，形成了地球上最早的江河湖海，这就是原始水圈。

当原始大气圈和原始水圈在地球上出现时，地球上还是一个没有生命的世界。但是，自从地球上有了水和空气，就给生命的产生和生物的发展创造了条件，约在 30~40 亿年前，地球上开始出现单细胞生命，以后逐步进化为各种生物，直至人类这样的高级生物，构成了一个生物圈。

**地球表面特征光谱 (terrestrial characteristicspectrum)** 地面物体对电磁辐射的反射和发射特性随波长的变化关系。所有地表都具有发射和反射电磁辐射的本领。地球表面反射的大部分电磁辐射能量都是太阳提供的，遥感所记录的能量就是被物体反射的太阳辐射的能量。不同地物的反射率大小不同，这主要取决于地物的内部结构、外部特征以及所处的状态。同一地物的反射率大小也随着波长而变化，图 1 是土壤和植被等的反射光谱特征曲线，根据反射特性，人们可以在遥感图片上识别不同的地物。此外，对于同一类地物，由于具体结构不同，其反射光谱特性也不同。如对于同属森林的落叶林和针叶林，它们的反射率在可见光波段相差很小，甚至相等，而在近红外波段却有着明显的差别（见图 2）。这一特征使得人们在对给定目标

图 1 波长（微米） 图 2 波长（微米）

物应用遥感测量时可以选择适宜的工作波段，如为获得某林区的枫树和松树的分布图，则根据图 2 选取近红外波段显然是合适的。

地物的发射光谱特征可以用发射本领 来表征， $1 \leq \epsilon \leq 0$ 。地面物体可看作为一灰体。在温度相同的情况下，物体的发射本领与其表面特征和内部热学性质有关。一般来说，金属因其比热小、热导率高等原因而有较低的发射本领，但当它表面形成氧化物后，发射率急剧增加。非金属的发射本领  $\epsilon > 0.8$ 。不同的岩石由于其表面特征及内部热学性质不同，发射光谱特性也不同，据此在红外扫描的图片上可识别它们。为有效地利用遥感数据，人们必须了解所要研究地物的光谱特征，由于影响地物光谱的因素复杂且不易控制，因此，在进行地物光谱特性测量和识别时，应特别注意形成这些特性时的边界条件。

**地球辐射 (terrestrial radiation)** 源于地球及其大气的电磁辐射，其波长决定于地球及大气的温度。大气能发射辐射、吸收辐射和传递辐射，在任意一处的净辐射通量取决于温度与水汽随高度的分布。由地球辐射垂直散度所引起的增暖及冷却为驱动大气风系提供了所必需的大部分

势能变化。地球辐射也使得地表气温维持在适宜于人类和动植物生活所需的限度内。

具有绝对温度超过零度的任何物体都能发射连续的红外辐射。在地球温度下，实际上发射的辐射波长都大于 4 微米，即位于光谱的红外部分。而且，几乎所有的云也发射连续辐射，辐射强度略小于具有同样温度的黑体辐射强度。地球表面及云还会吸收红外辐射，吸收率几乎为 1。大气对辐射的吸收与发射具有选择性，它决定于大气中多原子分子的运动——振动带和纯转动带的波长和强度。大气中的少量气体在红外波段有许多吸收带（见大气窗口），吸收系数有许多峰值。具有峰值的谱线都有一定的宽度，并互相交叠。这些谱线的形状，也就是吸收系数随波长的变化，取决于低层大气中的分子碰撞和高层大气中的随机热运动。吸收系数还是气温和气压的函数，所以在垂直方向，它的变化是相当大的。

**地球物理学** (geophysics) 一门以地球为研究对象的应用物理学。从广义上说，地球物理学可分为： 固体地球物理学； 海洋物理学； 空间物理学。从狭义上理解，地球物理学一般指的是固体地球物理学，又称地体学或大地物理学。固体地球物理学又可分为两大方面：研究大尺度现象和一般原理的称普通地球物理学；勘察石油、金属、非金属矿或其他地质体的称勘探地球物理学，又称物理探矿学。后者因为工业上的需要，发展极快，已经自成体系。普通地球物理学依研究领域和手段，又分为重力学、地磁学、地震学、地热学等传统分支，以及深部探测、地球动力学等新的分支。简而言之，地球是这门学科的研究对象，物理学是研究这门学科的理论基础，利用物理学的电学、磁学、热学、运动学和动力学等方面的原理和方法，研究地球各部分的物理条件、物理性质、物理状态，以寻找其变化规律，由此构成了地球物理学的内容。当代的诺贝尔奖获得者有好几位都致力于地球物理问题的探讨。尤里和阿耳芬都对地球的起源研究有贡献，阿普顿是研究电离层的，里贝是研究  $^{14}\text{C}$  的，这些科学家都是杰出的地球物理学家。

到了 20 世纪 30 年代，由于物理学的发展，尤其是物理勘探方法显示出优异的效果，从而促进了地球物理学作为一门独立的学科而得到极大的发展。50 年代，根据地球物理研究的结果，人们已对地球内部的分层结构、物质组成和物理状态有了大致了解，但对许多地学现象，特别是地下资源分布问题等还无法圆满解释，因此在 60 年代初，国际间组织了约有 50 个国家参加的协作计划——“上地幔计划”，主要研究： 全球性的地壳断裂系统； 大陆边缘地带及岛弧的构造； 地幔的物质组成及地球化学过程； 地壳及地幔的结构及其横向不均匀性。所用的手段包括：地震、地磁、古地磁、重力、海上地球测量、地热、地质、深钻等。计划延续了 10 年，其重要成果之一是提出了板块大地构造假说。1974~1979 年，国际间又组织了“地球动力学计划”，作为以前计划的继续，主要目的是解决板块运动的驱动力问题。80 年代以来，地球物理学实施对岩石层的研究计划，其中心课题是研究大陆岩石层的现状、形成、演化和动力学，也包括研究洋底岩石层。

**地下水污染** (ground water pollution) 参见水的污染。

**地震波** (seismic wave) 当地震发生时由震源产生的各类冲击波。地震波有三种类型： 初至波或 P 波； 续至波或 S 波； 面波。这些波

能形成有感震动或造成破坏。

P波和S波能在岩体内传播，所以也称体波。其中P波的传播速度较快，范围是5.5~23.7公里/秒。P波的运动方式与声波相同，当它通过岩体时，在传播方向上引起岩体的振动。当P波由地球深处传到地表时，其中有一部分可变成声波传入大气层。如果这些声波的频率刚好落在耳朵可听到的范围内，则人和动物就能听见这类声音。S波在岩体内的传播速度较慢，它的运动方式是使岩体在垂直于波的传播方向上作剪切运动。由于液体受到剪切后不会弹回，所以S波不能在地球的液体部分中传播，如海洋。这也使得人们知道部分地核是处于熔化状态，因为S波不能通过地核。

地震面波也可分为两种，一种是勒夫波，它的运动方式与S波基本相同，但岩体在水平方向上作剪切运动。这种水平震动的结果对建筑物带来影响。破坏建筑物的地基。另一种面波是瑞雷波，当波行进时，岩体在垂直平面内作椭圆运动。面波的传播速度比体波慢得多。

相对于无限小应变和地震波频率，地球可被看成一具有高度弹性的物体，胡克定理可较好地用于建立地震波的传播理论。

**地震活动性 (seismicity)** 一个区域或地带有历史记载以来地震活动的频繁和强弱程度。常用发生地震的次数和强度来表示。研究内容有：地震活动的地理分布、区域特性及分布图像。地震活动的地理分布可用震中分布图来表示。大地震密集的狭长地带称为地震带，它与一定的地质构造相联系。地震带内的地震活动在时间分布上是不均匀的，其重复出现时间不等，从几十年到几百年乃至千年以上。地震活动方式可分为单发式和连发式两种，前者表现为以一次巨大地震和若干次中小地震来释放带内所积聚的能量。后者则以在一定时间内多次大地震来释放能量。地震活动的区域特性可用震级—频度（一定时间内发生地震的次数）的经验公式来描述。地震活动性的强弱也可用单位时间内单位面积所放出的地震波能量来表示。地震活动的分布图像主要是指大地震前后地震活动的时间分布和空间分布。时间分布可用震级、频度和能量分别与时间的关系图表示，以估计未来地震的时间发展趋势。空间分布是地震带的分布图像，可用来预测未来的大地震震中的可能分布地点，它与某区域密集发生的中、小地震带的分布图像有关，例如可能发生在活动带的空段，也可能发生在两条带的交叉点附近等。这些地震活动图像与地质构造环境有关，一定程度上能反映区域构造应力作用过程。分布图像的变化趋势可为地震预报提供信息。

**地震学 (seismology)** 研究大地震动的—门学科。天然地震是地震学的重要研究对象之一。地震学还研究对地震灾害的预测和预防，并利用地震波研究地球的内部情况。地震是一种自然灾害。从地震发生前后的宏观现象来研究其本质，探索地震的成因，是长期来人们一直沿用的研究方法。我国是世界上最早有地震的文字记载并对它进行研究的国家，其历史可追溯到周朝。东汉的张衡于公元132年发明了世界上可测震中方位的第一台仪器——候风地动仪，在地震学史上作出了重大贡献。

地震在全球的分布是不均匀的，地震区的震中常呈带状分布，目前已知的全球性的地震带有三个：环太平洋地震带；阿尔卑斯地震带；各大洋的海岭带。当前比较重要的地震成因假说有断层成因说、相变成因说和岩浆冲击成因说，其中以断层成因说最为人们所重视。震源机制是地震学的一个重要研究内容，主要涉及地震断层（震源）的几何参数和物理

参数。震源的几何参数和物理参数都是地震力学性质的描述，它为人们认识地震从而预测和预报地震提供了一定的依据。地震学的另一重要研究内容是地震波的传播理论。当地震发生时，从震源辐射出各种类型的波，这些波有的在地球内部传播（体波，包括纵波、横波），有的在地球表面传播（面波）。通过它们在地球介质中的传播特征，可以了解地球内部的结构和性质。

研究地震的成因、震源机制和地震波的传播，是为了有效地预测和预报地震。地震不是一个孤立的现象，它是一个物理过程中的特定事件，可以选择某些事件作为前兆来预测地震。目前常用的测震方法是利用现在和以前地震的观测来预测将来的地震，也叫以震测震。利用地震仪记录地震波，分析大小地震的时空分布、大小地震的关系、地震波速的变化、地震图上任何特殊信号等，目的是寻找大地震将要到来的标志。地震预报是人类迫切需要解决的问题，我国政府十分重视这项工作，于 1971 年成立了国家地震局，专门负责地震研究和地震预报。我国曾成功地预报了 7.4 级的海城地震，地震预报工作在世界上处于领先地位。目前国际上对地震预报的成功率仍很低，我国的成功预报也有一定的偶然性。就是说，目前对地震本质的认识还没有实质性进展，仍然处于积累资料和经验的发展阶段。

**地震预报** (earthquake prediction) 通过研究地震规律、观测地震前兆来预测预报地震发生的时间、地点及震级的工作。

地震的前兆现象很多，但产生这些前兆现象的原因也很复杂，必须从地震、地质、地球物理、地球化学、天文气象等各方面进行精确的观测和深入的综合研究，揭示这些现象的本质和与地震的关系，获得预报地震的可靠依据。目前作为地震预报预测的地震前兆观测有：地应力测量、地倾斜测量、地形变测量、断层位移测量、地下水观测、地球物理场观测、生物异常观测、微震观测、地声观测、地温观测以及地球自转速度不均匀性的地极移动、天文和气象异常的研究等。此外，P 波和 S 波两类地震波通过未来地震震源区域时传播速度的相对变化也是常被观测的前兆现象之一。通常 P 波速度比 S 波速度大，约为 1.75 倍，但当两种波通过即将发生地震的区域传播时，可以观测到 P 波比它的正常传播速度慢，只比 S 波快 1.5 倍。这一异常变化持续一段时间后会恢复到正常，而且不久地震就发生了。前兆持续的时间越长，地震越大。

地震预报内容的三要素是指地震发生的地点、时间以及地震的震级。根据预报时间的不同，地震预报可分为长期预报、中期预报、短期预报和临震预报，它们分别相应于预报若干年内，一二年或几个月，几个月或几天，以及几天或几小时内的地震情况。

**点电荷** (point charge) 不考虑线度以及电荷分布情况，认为电荷集中于一点的带电体。点电荷只是为了简化某些问题的讨论而引进的一种理想化模型。例如在研究带电体之间的相互作用时，若带电体本身的线度远小于它们之间的距离，便可把它们作为点电荷处理。有限体积中分布的电荷在很远处的电场可近似为点电荷的电场。

两个静止的点电荷  $q_1$  和  $q_2$  之间的相互作用力  $F$ ，可以由库仑定律表

示：
$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$
，式中  $r$  为两点电荷之间的距离， $K = \frac{1}{4\pi\epsilon}$ ，其中  $\epsilon$  为介质的电容率，力的方向在两点电荷的连线上。

静止点电荷在空间某点处的电场强度  $E$  与它的电量  $q$  成正比，而与该点离点电荷的距离  $r$  的平方成反比，其间的定量关系

为： $E = K \frac{q}{r^2}$ ，电场的方向沿着以点电荷为中心的径向方向，其指向决

定于电荷的符号，若点电荷  $q$  为正，电场沿着径向方向；若点电荷  $q$  为负，则逆着径向方向。

取无穷远处的电势为零，则点电荷所激发的电场中离点电荷距离  $r$  处的电势为：

$$U = K \frac{q}{r}。$$

外电场  $E$  中点电荷  $q$  受到的电场力为  $F=qE$ ，可见正点电荷所受力的方向与外电场方向一致；负点电荷所受力的方向与外电场方向相反。外电场中点电荷所具有的势能为  $W=qU$ ，其中  $U$  为点电荷所在处外电场的电势。

对于点电荷的场以及点电荷在外场中受力情况的研究，为人们处理有限分布电荷的场及其在外场中受力情况这类问题提供了有效途径。例如，为了计算连续分布电荷的场，可先将它分割为无穷多个“电荷元”，而每个“电荷元”可看作点电荷，然后利用场的叠加原理对各“电荷元”所激发的场求和（积分），便可得到有限分布电荷所激发的电场。

典型的国外中学物理教程（some influential school physics courses in the world）在 20 世纪中后期，由美、英等国开创的科学课程改革运动中，对各国物理教学改革起过引导和推动作用，具有较广泛影响的革新物理教材和目前仍广泛使用的传统物理教材。它们是：

1. 《PSSC 物理》（Physical Science Study Committee Physics）（中译本书名《物理》，科学出版社，1978 年出版）。

这套教材是 50 年代末起始的美国科学教育改革的产物，它的编写指导思想是布鲁纳的“学科结构论”。1960 年由“物理教学研究会”组织编写的《PSSC 物理》第一版问世。这套教材包括课本、实验教材、教师参考书、标准测试题和一套教学影片。这套革新教材的出版，带动了化学和生物教材的改革；在国际上也产生了很大的影响。

《PSSC 物理》的知识内容和体系与传统教材都有很大区别。传统教材中的静力学、流体力学、声学、热学以及电路的知识，都被删去了，而增加了大量的跟学习近代物理有关的基础知识，如时空概念及其测量，数据的处理方法，物质的结构，电荷在电场中的能量和运动，光子和物质波，原子的能级和原子光谱的知识。对动量守恒和能量守恒等基本定律，也比传统教材讨论得深入，并介绍了它们在近代物理中的重要意义。教材既重视实验，又重视理论，使学生了解物理学家怎样根据实验现象，经过理论研究，得出物理规律。全书较充分地反映了物理学研究中实验、科学的逻辑思维和数学方法三者的紧密结合，是一套较鲜明体现物理学学科结构的典型教材。《PSSC 物理》虽然在更新教材内容和推进物理教材改革方面起了较显著的作用，但它的目标是培养科学家。由于教材过份重视物理理论知识体系和科学思维方式，因此仅适合数学基础和科学思维能力强的优秀学生，选学选教者甚少，难以推广。

2. 《HPP 物理》（Harvard Project Physics）（中译本书名《中学物理教程》，文化教育出版社，1980~1987 年出版）。

这套教材是继 PSSC 教材后，为多数学生设计的一套物理课程。目的是尽量引起大部分学生学习物理的兴趣。这套教材包括课本和手册、学生读物、教学参考书、程序教学指导书、补充读物、电影循环片、幻灯片、实验设备等。课本和手册共 6 册。它与只讲物理知识本身的传统窄条式课程结构模式不同，《HPP 物理》纵向按物理学发展过程的线索展开，横向按物理学与技术、社会以及其他学科的联系展开。全书的特点是，不仅要使学生获得物理学基本概念和规律的知识，而且使学生了解科学是人类文化发展的重要部分，学习科学知识的必要性不仅在于科学知识本身的意义，而且在于这些知识是了解现代社会所面临的问题，如环境问题、能源问题等所必需的。本书注意从物理学史的角度阐明科学进步和技术的关系，以及它们对社会发展的关系。书中应用的数学知识相对较少，注意讲述物理学与其它科学的关系。例如，书中谈到了物理学跟数学、化学、哲学以及文学之间的联系和相互影响，这些问题所占的篇幅达全书的 10%。由于《HPP 物理》的人文化特色以及对严密的科学逻辑思维训练要求较低，特别适宜于不致力于科研的一般学生学习物理的需要，该书采用的面远较《PSSC 物理》广。《HPP 物理》鲜明的人文化特色和新颖的教材风格，使它成为继《PSSC 物理》之后，又一套在世界范围内有广泛影响的中学物理教材。

### 3. 《纳菲尔德中学物理教程》(Naffield Physics Project)。

这是一套英国的物理革新教材。其中物理教程包括普通级 (O-level) 和高级 (A-level) 两种。1966 年出版了普通级物理教材。这套教材删除了传统教材中的许多内容，增加了新内容，突出实验的作用，采用通过实验引入概念和得出规律的问题式教学法。1977 年出版了修订版课本，主张让学生在教科书和教师的指导下，通过实验和观察，进行探索式的学习，从而达到真正理解知识和培养能力的目的。这套课本不是完全按照知识体系编写的，而是按照学生的认识过程，把演示、学生实验、问题和叙述互相结合，由浅入深地引导学生去观察、思考，进而认识规律，体现有指导的探索式学习。

纳菲尔德高级 (A-level) 物理教材是 1970 年出版的，供中学的预科班使用。教材内容的选择突出了三个方面：电磁波的特性、从统计学观点来阐述热力学第一定律以及量子力学的基本观念。教材结构由三条主线构成：原子和物质的组成、对运动和变化的研究方法、场的理论的出现和发展。安排课程内容时还注意了科学知识的实际应用，如电子学在技术中的应用等。这套课程的设计思想是培养学生具有基本和扎实的科学工作素养和独立工作的能力。A 级教程于 1985 年出版了修订版，修订版课本的每个单元包括正文、总结、阅读、实验指导、家庭实验、问题，在正文叙述的各部分注明相应的演示、学生实验、不同类型的问题、阅读等。通过这种教材体例把学生的各种学习活动组织起来，使课本既起到知识载体又起到学习指导的作用。纳菲尔德物理教程注重学生的实验探索和科学思维能力的培养，仅适合程度较好的学生使用。

### 4. 《探索物理知识》(汤姆·邓肯，文化教育出版社 1980 年出版)。

这是一套在英国使用较普遍的普通级 (O-level) 物理教材。供中学前五年的学生 (11~16 岁) 使用。原书于 1968 年出第一版，全书分五册。与传统的物理教材不同，这套教材的内容并不按力、热、声、光、电、磁、原子这种传统的物理知识的逻辑体系展开，而是按学生认知水平的发展来



编排，教学内容逐年加深。教材以大量演示实验和学生实验为基础。并穿插了许多问题，引导学生动手动脑学物理。这套教材另一特色是知识面广、图片和感性材料丰富，涉及日常生活和技术中的各种物理现象及物理知识的广泛应用，对运用数学工具和科学逻辑思维的要求不高，所以是一套适合多数一般程度学生使用的革新教材。

5. 《物理学》(Modern Physics) (上海教育出版社 1976 年第一版, 1978 年新一版。)

此书是美国典型的传统中学物理教本。1922 年第一版, 后来在 1964、1968、1972、1976、1980 年再版是现代中学物理教材的模本。此书一直沿用至今, 而且使用面仍较广。多次出了修订版, 新增加了近代物理的内容。教材内容按力、热、声、光、电、磁、原子这种物理知识的逻辑体系展开, 光学首先建立在光子和波的模型基础之上, 然后再学习几何光学。内容充实、知识覆盖面广、叙述细密, 是这本书的主要特点。全书几乎覆盖了基础物理所有主要的知识, 并介绍了大量有关技术应用的辅助知识。教材以知识阐述为基础, 没有安排实验和演示。教材对学生科学思维能力的要求一般, 介绍了较多的物理学家, 但未讨论物理学及其思想方法的发展。

**电 (electricity)** 物质的一种基本属性。人们对电现象的研究有悠久的历史, 古代就观察到摩擦起电现象, 后来又观察到感应起电现象。16 世纪末以后的两个世纪中, 人们发明了各种电学仪器, 如起电机、莱顿瓶、验电器等, 并利用这些仪器对电进行定性研究。18 世纪中叶, 美国物理学家富兰克林发现有两种电, 或者说两种电荷, 分别称它们为“阳电荷”和“阴电荷”, 即现在通常所说的正电荷和负电荷。实验还发现同种电荷相斥, 异种电荷相吸。

现代科学指出, 从物质的原子结构层次上来说, 一切物体都是由原子构成的, 原子则是由带正电的原子核和带负电的电子构成的。通常原子中的正负电荷的量相等, 所以整个物体呈电中性。如果它们由于某种原因(如摩擦、受热、化学变化、强光或射线照射等)而失去电子就带正电, 获得电子则带负电。宏观现象中物体的起电过程就是物质原子中核外电子的转移过程。电荷是基本粒子的一种固有属性, 从物质结构的基本粒子层次上来说, 自然界中的一切电现象都来源于这个属性。大量的精确实验已证实, 一切基本粒子所带的电荷严格地等于某一基本电荷的整数倍, 基本电荷为  $e=1.6021892 \times 10^{-19}$  库仑。既然电荷是物质的固有属性, 因此电荷既不能创生, 也不能消灭, 只能从一处转移到另一处, 这个结论可以通过电荷守恒定律来描述。

电荷周围存在电场, 匀速运动时还有磁场, 变速运动时则会产生电磁场或电磁波。可见电现象和磁现象密切有关, 它们是统一的电磁现象的两种特殊形式。随着人们对电的性质及其运动规律的深入了解, 它已被广泛地应用于生产、生活和科学研究领域中。

**电报 (telegraph)** 用有线电、无线电、光学或其他电磁系统传输书面消息的电信方式。收报局把书面材料投递给收报人。一般又称被发送的和复制出的文件性材料为电报。电报多年来一直是一种重要的通信方式, 直到 20 世纪 70 年代, 电报仍然是一种主要的远距离通信系统。

1835 年, 美国人莫尔斯创制了莫尔斯电码。1838 年发明了发报机和收报机。1844 年 5 月 24 日在刚建成的巴尔的摩至华盛顿的全长 60 公里的第

一条架空电报线路上，用莫尔斯电码发出了人类有史以来第一份正式电报。这种用导线传递的电报，就是有线电报。后来，随着无线电的发明，又研究成无线电报，使电报通讯向前迈了一大步。

不管是明码电报或是密码电报，组成电报的最基本符号就是两个信号，即短的（·）和长的（—）脉冲。这两个信号构成的不同的组合，可以表示不同的外文字母和 0~9 的数字。在中文电码中，先用（·）和（—）不同组合表示 0~9 数字，再用数字的组合表示出一个汉字。而（·）和（—）的不同组合方式就构成了不同的码，如下图所示。所谓密码就是指它们的组合方式是特定的、保密的。如果不知电码的结构就无法将电文译

#### 我国电码和莫尔斯电码图

电报经一百多年的使用和改进，有了较大的发展。1924~1928 年间电传打字机问世并得到广泛应用，使收报自动化，现在打印字数达每分钟 100 多字；敷设了大量海底电缆将各大洲各国都连接起来，并不断扩展了一条线路上通电报的路数，使线路效率提高；1850 年贝克韦尔发明传真电报，到 1934 年又出现了不怕长时间曝光的干式记录纸，使传真得到实用和发展；计算机和磁存储器的应用，使电报自动交换技术也得到更大的发展。

**电场 (electric field)** 电荷或变化的磁场周围空间存在的一种特殊形态的物质。电场的基本特性是静止电荷置于电场中将受到力的作用。电场就是传递电荷之间相互作用的媒介物。静止电荷产生的电场称为静电场（又叫库仑场），它不随时间变化。电场中的电力线是不闭合的，由正电荷出发，终止于负电荷；这种场可引进电势概念，因而称为“有势场”。变化的磁场产生变化的电场，称为感应电场（变化的电场又产生变化的磁场，形成统一的电磁场或称电磁波）。感应电场随时间变化，电场中的电力线是闭合曲线，是一种“非势场”，一般不能引进电势概念。

历史上，围绕电的传输问题有过长期的争论。一种看法认为，电荷对电荷的作用无需经过中间物质传递，这就是所谓超距作用观点；另一种看法是，一电荷对另一电荷的作用是通过某种中间媒介物传递的，这就是近距作用的观点。近代物理学的发展表明，超距作用是错误的，近距作用是正确的。

**电场能量 (energy of electric field)** 电场所具有的能量。电荷与电场常常是相伴存在的。科学实践证明电场是一种特殊形态的物质，电能储存在电场中。单位体积中的电场能量称为电场能量密度 $\omega_e$ 。其值为

$$\omega_e = \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 E^2。$$

式中  $\epsilon_0$  为真空介电常数， $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数， $E$  为该处的电场强度。可见，电场中各点能量密度  $\omega_e$  正比于各该点电场强度  $E$  的平方。在不均匀电场中，体积  $V$  内的电场总能量  $W$  为

$$W = \int_V \omega_e dV = \int_V \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 E^2 dV。$$

对于带电体的总能量，积分应遍及带电体激发电场的所有空间。

**电场强度 (electric field strength)** 表示电场强弱和方向的物理量。电场中某一点的电场强度  $E$  定义为放在该点的试探电荷（体积和电

量都充分小的正电荷)  $q$  所受电场力  $F$  与其电荷量的比值, 即  $E = \frac{F}{q}$ 。

电场强度的单位是牛顿/库仑或伏/米。电场强度是矢量, 其方向为正电荷受力的方向。对场中确定的点, 电场强度与试探电荷无关, 仅由电场本身性质决定。一般来讲, 电场中空间各点的场强大小和方向都不相同, 也就是说电场强度是空间位置的函数。整个电场强度的空间分布描述了电场的性质。若空间各点的场强大小和方向均相同, 则称为匀强电场(或均匀电场)。电场强度遵守场的叠加原理, 即空间总的电场强度等于各电场单独存在时场强的矢量和。

带电体  $q$  在电场  $E$  中所受的电场力  $F$  可由  $F=qE$  求得。可见正电荷所受电场力的方向与电场方向一致(顺着电场方向), 负电荷所受电场力的方向与电场方向相反(逆着电场方向)。电场力的大小不仅与该点场强的大小有关, 而且还与带电体本身电荷量的大小有关。

**电场线**(electric fieldline) 又称“电力线”, 形象描述电场强弱和方向的假想的系列曲线。电场线上各点的切线方向与该点的电场方向一致; 电场线的疏密程度, 与该点处的电场强弱成正比。

在静电场中, 电场线有如下性质: 电场线发自正电荷(或无限远), 终于负电荷(或无限远), 不存在电荷的空间各点处电场线是不间断的连续曲线; 电场线不构成闭合曲线, 或电场线上各点的电势沿电场线方向不断减小; 在没有点电荷的空间, 由于电场中每一点只有一个场强方向, 所以任意两条电场线不可能相交。

在变化磁场所激发的电场中, 电场线呈闭合曲线, 上述的前两个性质不复成立, 但第三个性质仍然成立。

**电池**(battery) 将化学能、光能、热能、核能等形式的能量不经过中间机械转换过程而直接转换为电能的装置。如化学电池、太阳电池、温差电池、核电池等。目前日常应用最多的是化学电池, 即将化学能直接转换成电能的装置。历史上, 最早的化学电池是伏打电堆, 由意大利人伏特于 1800 年发明。最早的铅蓄电池是法国人普兰特于 1859 年发明的。以后 1868 年法国人勒克朗谢发明锌锰电池, 1899 年瑞典人荣格发明铁镍蓄电池。近代电子工业和航天工业的发展, 促进了新型高能量电池的研制。1941 年法国人安德烈制成高能量锌银蓄电池。1958 年英国人培根制成高功率氢氧燃料电池, 后来成功地应用在美国“阿波罗”号登月飞船中。70 年代前半期, 美、法、日等国研制成各种高能量锂电池, 并投入使用。

在化学电池中, 通过电池内部的氧化和还原等化学反应过程实现化学能转变为电能。这种反应分别在两个电极上进行, 如右图所示。负极活性物质由电位较负并在电解质中是稳定的还原剂组成, 如锌、镉、铅等

#### 电池中化学反应原理图

活泼金属和氢或碳氢化合物等。正极活性物质由电位较正并在电解质中是稳定的氧化剂组成, 如二氧化锰、二氧化铅、氧化镍等金属氧化物, 氧或空气, 卤素及其盐类, 含氧酸及其盐类等。电解质则是具有良好离子导电性的材料, 如酸、碱、盐的水溶液, 有机或无机非水溶液, 熔融盐或固体电解质等。当外电路断开时, 两极之间虽然有电位差(即开路电压), 但没有电流, 存储在电池中的化学能并不转换为电能。当外电路闭合时, 在两极电位差的作用下即有电流流过外电路。同时在电池内部, 由于电解

质中不存在自由电子，电荷的传递必然伴随两极活性物质与电解质界面的氧化或还原反应，以及反应物和反应产物的物质迁移。电荷在电解质中的传递也要由离子的迁移来完成。因此，电池内部正常的电荷传递和物质传递过程是保证正常输出电能的必要条件。

电池的一个重要性能参数是电动势，电动势等于单位正电荷由负极通过电池内部移到正极时电池内非静电力（化学力）所作的功。电动势取决于电极材料的化学性质，与电池大小无关。如锰锌干电池的电动势约为 1.56 伏。电池的另一个重要性能参数是内阻，它与电池的电极面积和电解质的性质有关，电极面积越大，内阻越小；电池用久后，电解质等导电性能下降，其内阻变大。电池的容量也是电池的一个性能参数。它表征电池所能输出的总电荷量，通常用安培小时作单位。

实用的化学电池可以分成两个基本类型：原电池和蓄电池。原电池制成后即可产生电流，但在放电完毕后即被废弃。蓄电池又称为二次电池，使用前须先进行充电，充电后可放电使用。放电完毕后又可再充电，如此多次重复使用。

**电磁波**（electromagnetic wave）在空间传播的交变电磁场。它是由电荷的加速运动或振荡引起的电磁场扰动向四周传播而形成的。它在真空中的传播速度为 30 万公里/秒。1865 年英国物理学家麦克斯韦从理论上预言电磁波的存在。1888 年德国物理学理赫兹首先用实验证实电磁波的存在。他还从电磁波的传播规律确定电磁波和光波一样，具有反射、折射和偏振等性质，验证了麦克斯韦关于光是一种电磁波的理论。电磁波一般通过天线发射，天线的分布电感和分布电容构成了开放型的 LC 振荡电

路。电磁波的频率为  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。由于电磁场是物质存在的一种形式，

它具有能量和动量，所以电磁波的传播伴随着电磁能量和电磁动量的传递。天线在单位时间内辐射电磁波的能量与频率的四次方成正比。频率越高，辐射效率越高。

电磁振荡能够在空间传播，是由于：变化的磁场激发涡旋电场；变化的电场激发涡旋磁场。交变的涡旋电场和涡旋磁场相互激发，闭合的电力线和磁力线就像链条的环节一样，一个个地套连下去，在空间传播开来，形成电磁波。图 1 为电磁振荡在某一直线上传播过程的示意图，并非真实的电力线和磁力线的分布图。实际上电磁振荡是沿各个不同方向传播的。

电磁波在形式上与机械波十分相似，同样可用频率、波长、波速和振幅等来描述，但在本质上完全不同。机械波是一种物质运动的传播，它的传播依赖媒质，只

图 1 电磁振荡的传播机制示意图

能在弹性介质中传播；电磁波则是一种运动的物质，在真空中以光速  $c$  传播，电磁波在介质中的传播速度小于光度  $c$ ，它不能穿透金属。在机械波通过的地方，是介质中各点的位移在作周期性的变化；而在电磁波通过的地方，却是空间各点的电场强度和磁感应强度在作周期性的变化。由于各点的电场强度和磁感应强度的方向总是互相垂直的，并且都和电磁波的传播方向垂直，如图 2 所示，因此电磁波是横波。电磁波的波长、波速和频率间有关系： $c=f\lambda$ 。频率越高，波长越短。

图 2 电磁波传播示意图

电磁波的波长范围极广，波长不同，其呈现的形式也不同。其中光波是波长极短的电磁波，而无线电波，则波长较长。电磁波的分类见表 1。在无线电技术中应用的电磁波叫做无线电波，其波长范围是从几毫米到三千米以上，可划分为几个波段。各无线电波的波段不同，其性质和用途也不同。表 2 列出了各波段的无线电波的主要用途。

表 1 电磁波的分类

名称	波 长	附 注
无线电波	10000 米 ~ 0.75 毫米	分为超长波、长波、中波、短波、微波等
红外线	0.75 毫米 ~ 0.76 微米	分为近红外线、中红外线、远红外线
可见光	0.76 微米 ~ 0.4 微米	分为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种
紫外线	0.4 微米 ~ 1 纳米	
X 射线	0.1 微米 ~ 0.1 皮米	又称伦琴射线
射线	30 纳米以下	又称丙种射线

表 2 无线电波的波段表

名 称	波 长	频 率	主要用途
长波	3000 米以上	低于 100kHz	电报通讯
中波	3000 ~ 200 米	100 ~ 15000kHz	无线电广播
中短波	200 ~ 50 米	1500 ~ 6000kHz	电报通讯，无线电广播
短波	50 ~ 10 米	6 ~ 30MHz	无线电广播电报通讯
超短波（米波）	10 ~ 1 米	30 ~ 300MHz	广播、电视、导航等
微 波	分米波	1 ~ 0.1 米	300 ~ 3000MHz 电视、雷达、导航及其他专门用途
	厘米波	0.1 ~ 0.01 米	3 ~ 30kMHz 同上
	毫米波	0.01 ~ 0.001 米	30 ~ 300kMHz 雷达、导航及其它专门用途

无线电波的传播形式主要有天波、地波（表面波）和空间波三种。天波系指受到天空电离层反射或折射后返回地面的无线电波。由于电离层经常变化，故天波传播不够稳定，但传播距离远。地波又称表面波，系指沿着地表面传播的无线电波。地波在传播过程中由于部分能量被大地吸收而逐渐减弱，波长越短，衰减越快，因而传播距离不远。但地波不受气候影响，故可靠性高。空间波又称直射波，它是从发射点经过空间直线传播到接收点的无线电波。电视台发射的电磁波主要靠空间波传送到各家各户，因此电视天线越高，播送范围越广。

电磁波在输电线中电能的传输过程中起着重要的作用。导线中存在电流时，电荷运动所激发的磁场和沿导线的电位变化所产生的电场在导体周围形成电磁场，该电磁场的传播方向沿导线方向，正由于这电磁场的存在和传播，使电能从一端输送至另一端。因此电能传输的速度就是电磁波的传播速度。

电磁场（electromagnetic field） 物理场的一种。

相互依存的电场和磁场的总称。随时间变化的电场激发磁场，磁场随时间变化时又激发电场，二者互为因果，形成统一的电磁场。变化的电场可由变速运动的带电粒子所引起，强弱变化的电流则会产生变化的磁场。

按照麦克斯韦电磁场理论，一旦某处的电场或磁场有变化，不论由于什么原因，这种变化都不会局限于该处，而总会以光速向四周传播，形成电磁波。电磁场是极为广泛的一种物质存在，它同样具有质量、动量和能量。现代理论认为，和实物物质一样，电磁场也是由基本粒子构成的，构成电磁场的基本粒子称为光子。

**电磁场能量** (electromagnetic energy) 简称“电磁能”。电磁场所具有的能量。某点处单位体积内的电磁能量称为该点处的电磁能量密度，常用符号  $w$  表示，即

$$w = \frac{1}{2} (\mathbf{D} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{B})。$$

除在各向异性介质中外，一般有  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ ，故上式也可表为

$$w = \frac{1}{2} (\epsilon E^2 + \mu H^2) = \frac{1}{2} (\frac{D^2}{\epsilon} + B^2 / \mu) ，$$

式中  $\epsilon$  和  $\mu$  分别为介质的介电系数和磁导率间中体积  $V$  内的电磁能量为

$$W = \int_V w dV = \int_V \frac{1}{2} (\mathbf{D} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{B}) dV。$$

能量是电磁场的物质属性之一。

**电磁场强度张量** (electromagnetic-field strength tensor) 麦克斯韦电磁理论与狭义相对论是完全一致的。在狭义相对论中可引入四维空间的概念，它是一维时间和三维空间所构成的总体，以充分反映相对论中时间和空间的密切联系。引进四维空间和四维坐标系后，一切物理量可按四维标量、四维矢量（有 4 个分量）和四维张量（有 16 个分量）等来分类（参见四维空间）。在这种四维形式中，电场强度  $\mathbf{E}$  的三个分量和磁场强度  $\mathbf{B}$  的三个分量均属于同一张量的不同分量，这个张量便称为电磁场强度张量，常用符号  $F^{\mu\nu}$  表示（ $\mu, \nu$  取 0, 1, 2, 3）。其 16 个分量可用如下方阵表示：

$$[F^{\mu\nu}] = \begin{bmatrix} 0 & -E_1/C & -E_2/C & -E_3/C \\ E_1/C & 0 & -B_3 & B_2 \\ E_2/C & 0 & 0 & -B_1 \\ -E_3/C & 0 & B_1 & 0 \end{bmatrix}$$

洛伦兹变换可表示为四维时空坐标的转动变换，同一物理量的不同分量在洛伦兹变换下可互相转换。因此对于一个惯性系来说是电场分量，则对于另一惯性系来说可能转化为磁场分量；反之亦然。可见，把电磁场区分为电场部份和磁场部份是相对的。

**电磁打点器** (electromagnetic timer) 准确度较高而构造又比较简单的一种计时仪器。准确度取决于交流电频率的稳定度和电磁打点器本身的机械特性。在短时间内使用（不超过几十秒钟），由于排除了电源的稳定度，由机械特性限制只能取三至四位有效数字。例如打点器在纸带上打出的两个点之间的时间间隔为电源频率的倒数，若  $f=50.0\text{Hz}$ ，则时间间隔为 0.0200 秒，即 20.0 毫秒，或者写成：20.0ms。这对于中学物理实验

的误差已满足要求。如果要更高准确度

#### 电磁打点器

- 1—复写纸调节片 2—打点钉 3—振动片
- 4—备用孔 5—底座 6—接线柱 7—线圈
- 8—极靴 9—磁钢 10—纸带限位板

的计时仪器，可用晶体振荡器产生的频率，其准确度和稳定度可使有效数字增加到六位以上。

电磁打点器的结构如图所示。主要有线圈、振动片、打点钉、磁钢、纸带限位板、复写纸定位调节片及底座等部件。其原理是线圈通以交变电流产生交变磁场，使振动片振动，磁钢组成的磁路起阻尼作用，在振幅太大时，阻尼作用很强，可以使振幅得以控制，提高机械振动片的工作频率，又不降低振动幅度。机械振动系统的固有频率在磁路作用下应尽量与电源频率一致，使打点器的工作处于较好的状态。

注意，线圈的工作电压为 2.0 伏特，千万不要直接与 220 伏交流电源连接，以免烧毁打点器的线圈。

**电磁感应** (electromagnetic induction) 通过闭合回路的磁通量发生变化而产生电动势的现象。由英国物理学家法拉第于 1831 年首先发现。这种电动势称为感应电动势，由此在导体中产生的电流称为感应电流。根据磁通量发生变化的不同原因，感应电动势又可分为动生电动势和感生电动势。前者是由于导体在磁场中运动，切割磁场线而产生的，可用导体中的自由电子受到洛伦兹力的作用来解释。后者则是由于磁场发生变化而产生的，即变化的磁场能够产生电场。

电磁感应现象是继奥斯特发现电流磁效应以后电磁学领域内的又一个重大发现。它进一步揭示了电现象和磁现象之间的紧密联系，也为后来麦克斯韦电磁理论的形成准备了条件，并且是麦克斯韦方程组的主要依据之一。

电磁感应现象是电磁学的重要内容之一，在电工、无线电等众多工程技术中有极为广泛的应用，例如发电机、电动机、变压器等许多设备都是以这一现象为依据而设计制造的。

**电磁感应的发现** (discovery of electromagnetic induction) 19 世纪物理学史上的一项重大科学发现，深刻揭示了电与磁之间的相互联系与转化。

**法拉第的工作** 1820 年奥斯特发现电流的磁效应，使正在皇家实验室工作的法拉第深受震惊，他想“既然电流能产生磁，那么反过来，磁能不能产生电流呢？”法拉第紧紧抓住自己这个新奇的独特的思想，在日记本上写下了这样的警句：“由磁产生电！”下定决心搞清楚电与磁之间的关系，开始了扎扎实实的实验工作。

可是实验探索的道路从来是曲折的。从 1821 年起，虽然实验一再失败，但法拉第并没有就此止步，而是继续顽强地探索，经过整整 10 年艰巨卓绝的努力，终于在 1831 年获得成功。

1831 年，在电磁学发展史上是极为珍贵的年头。该年 8 月，法拉第在实验探索中，用一只软铁环绕上两组线圈 A 和 B，线圈 B 与一只电流计相连。当线圈 A 与一电池组相连时，电流计的指针便偏转，然后又回到原来位置；当线圈 A 与电池组断开时，指针又偏转一下，然后又回到原来位置。

法拉第并没有立刻完全领悟到这一现象的重要意义，但已开始意识到这是一种暂态效应。9月，法拉第又将两根条形磁铁放置着，并将一个绕上螺旋线圈的铁质圆柱体放在N与S极间，线圈与一只电流计用导线相连接。他观察到每当铁质圆柱体脱离或接触两极时，电流计的指针发生短暂的扰动。他意识到这一效应和在8月份所做实验显示的效应相类似，都不是稳恒的，而是暂态的。在取得初步成果的面前，法拉第并没有停步。他懂得在静电学中的感应现象取决于导体的接近或远离，而电流的闭合和断开相应于电流的接近或远离。但是法拉第认为，必须用导体的运动来得到感应电流。于是在该年10月，他把磁棒插入和抽出线圈时，观察到线圈中产生了感应电流。此刻的法拉第已完全忘掉了近10年来无数次失败带给他的痛苦。他深信无疑，这几次实验在安排上尽管不同，但结果都显示了由磁可以生电。

1831年11月24日，法拉第向英国皇家学会宣读了他发现电磁感应的论文（《电学的实验研究》第一辑）。该论文在列举了十几个电磁感应实验后，把可以产生感应电流的情况概括为五类：变化着的电流，变化着的磁场，运动的稳恒电流，运动的磁铁，在磁场中运动的导体。他还把电磁感应同静电感应类比，但指出电磁感应与静电感应不同，感应电流不是与原电流成正比，而是与原电流的变化有关。

**同时代人的工作** 有关电磁感应问题，值得指出的是，当时并非只有法拉第在进行探索，而是有相当多的物理学家在这个问题上从事研究。奥斯特发现电流的磁效应后，法国的菲涅耳和安培就试图探索磁是否也能产生电，曾经进行过不少实验，但没有取得成功。

瑞士物理学家科莱顿也在1823年按照菲涅耳的尝试，企图使一块磁铁在螺线管中移动使导线上产生出感应电流。为了排除磁铁移动对电流计指针的影响，他把电流计放在另一房间内，用长导线把电流计和螺线管连接起来，并在两个房间里跑来跑去进行实验和观察，这样也就无法发现暂态效应。

美国物理学家亨利于1827年开始研究电磁现象，他应用安培的理论改进了当时的电磁铁，使它的场强提高了很多。1829年在实验不同长度的导线的电磁铁的提举力时，意外地发现通电线圈在断开时有强烈的电火花产生。次年暑假，他继续对这一现象进行研究，并于1832年发表了题为《在长螺旋线中的电自感》的论文，成为自感现象的第一个发现者。

俄国物理学家楞次在得知法拉第的发现消息后，很快考察了电磁感应的全过程。1832年，他提出关于磁体突然移近或远离线圈时所产生的作用的研究报告，指出感应电动势与绕组导线的材料和直径无关。1834年，给出了确定感应电流方向的确切表述。

**电磁感应发现的意义** 法拉第电磁感应现象的发现，在电磁学发展史上具有划时代的意义。首先它丰富了人类对于电磁现象本质的认识，揭示了电与磁之间相互联系和转化的客观规律。其次它激励人们去深入探索电与磁普遍联系的理论，从而奠定了电磁学发展的基础。第三它在实践上为人类文明特别是电工技术、电子技术、电磁测量等开辟了广泛应用的前途，极大地推动了社会生产力的发展。

**电磁驱动 (electromagnetic drive)** 由于电磁感应而引起的一种驱使导体在磁场中运动的作用。如图，磁铁和金属圆盘都可以绕轴旋转。



如果让磁铁旋转，由于电磁感应，金属盘中将产生涡电流。涡电流所受磁力将反抗相对运动，因而使得圆盘跟随磁铁旋转。由此可见，电磁驱动和电磁阻尼本质上是一致的，都是涡电流反抗导体

#### 电磁驱动

与磁体间相对运动的机械效应。只是由于相对运动状态不同，表现的作用也不一样。若导体的运动快于磁体，这种机械效应就表现为对导体运动的阻尼作用（或对磁体的驱动作用）；反之，若导体的运动慢于磁体，则表现为对导体的电磁驱动作用（或对磁体的电磁阻尼作用）。由于电磁驱动是由电磁感应产生的，导体的运动总慢于磁体，或者说两者的运动是异步的。电磁驱动是感应式异步电动机和磁式转速计的基本设计原理。前者是利用三相交流电造成磁场的旋转，从而驱动金属转子转动。磁场和转子的转速差是形成电磁驱动的基本条件，所以电机正常运转时转子的转速也要比磁场转速小百分之几。在磁式转速计中，使永磁体和机器的转轴相连，圆盘状金属感应片则与游丝和指针相连。当永磁体随机轴转动时，感应片中涡电流所受到的磁力矩使它转过一定角度，与游丝产生的恢复力矩平衡，

指针也就稳定在与机轴转速相应的刻度上。在感应式继电器中，电磁驱动则通过两个交变磁场对金属片的作用而形成。两个交变磁场的变化方式不同，将造成金属片不同的运动状态。

**电磁污染**（electromagnetic pollution）由电磁辐射所引起的对电子和电气设备的干扰及对人类的危害。电磁波充满着整个宏观宇宙及微观世界，人们的生产活动和生活离不开它，然而它同时也给人类和环境带来了污染。

电磁辐射分成天然和人工两类。天然电磁辐射来自自然界，如雷电、太阳光辐射、宇宙射线、地磁辐射和地球热辐射。闪电，瞬间会产生高能量的无线电辐射，会对电气设备、飞机、建筑物等造成干扰和破坏。但更严重的污染是来自人工电磁辐射，各种现代电磁能设施所产生和发射的电磁辐射功率愈来愈大，在一个局部范围内造成了电磁环境污染。人工电磁辐射主要有：各类放电引起的杂波，如火花放电、弧光放电、辉光放电和电晕放电等；工频交变电磁场，多数是由大功率输电线引起的电磁感应；射频电磁辐射，主要产生于高频加热设备、介质干燥设备及无线电广播通讯等。其中以射频电磁辐射对环境的污染最为严重，它的分类见下表。射频辐射会引起干扰危害，直接影响电子设备、仪器仪表的正常工作，使之信息失误、控制失灵。射频辐射对通讯联络讯号的干扰会引起联络中断与失误。强电磁辐射还能构成对某些武器、弹药的严重威胁，可使电爆管的效应提前或滞后，高频辐射场能使金属器件之间在互相碰撞时打火，从而引起火药爆炸或燃烧等严重事故。射频电磁场对人体的影响主要是引起中枢神经系统的机能障碍和以交感神经疲乏紧张为主的植物神经紧张失调。

#### 射频电磁波分类表

名称	符号	频率范围 (赫兹)	波长范围 (米)	应用对象
极高频	EHF	$3 \sim 30 \times 10^{10}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	微波技术
超高频	SHF	$3 \sim 30 \times 10^9$	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	
特高频	UHF	$3 \sim 30 \times 10^8$	$10^{-1} \sim 1$	
甚高频	VHF	$3 \sim 30 \times 10^7$	$1 \sim 10$	电视
高频	HF	$3 \sim 30 \times 10^6$	$10 \sim 10^2$	无线电广播
中频	MF	$3 \sim 30 \times 10^5$	$10^2 \sim 10^2$	
低频	LF	$3 \sim 30 \times 10^4$	$10^3 \sim 10^4$	

**电磁学** (electromagnetism) 研究电、磁和电磁相互作用现象及其规律的物理学分支学科。内容包括静电现象、磁现象、电磁感应、电磁场和电磁辐射等。主要根据库仑定律, 电流的磁效应, 以及电磁感应等实验事实, 以及麦克斯韦关于变化电场产生磁场的假设, 从而奠定了电磁学的整个理论体系。电工学、无线电电子学、自动控制等许多应用学科均是在电磁学的基础上发展起来的。

电磁学的建立和发展是人类长期实践和思考的产物。人类关于电磁现象的认识甚早, 在公元前 585 年, 希腊哲学家泰勒斯就记载了用木块摩擦过的琥珀能够吸引碎草等轻小物体以及天然磁矿石吸引铁的现象。我国古代也有类似的记载。春秋战国时期 (公元前 770 ~ 前 221 年), 已有“山上有慈石 (即磁石) 者, 其下有铜金”, “慈石名铁, 或引之也”等磁石吸铁的记载。东汉已有指南针 (司南勺)。关于静电现象, 西汉末年已有关于“瑁 (玳瑁) 吸 (细小物体)”的记载; 晋朝 (公元 3 世纪) 还有关于摩擦起电引起放电现象的详细记载, “今人梳头, 解著衣, 有随梳解结, 有光者, 亦有咤声。”不过应当指出, 无论是西方还是中国, 早期对电和磁的认识都是现象性的; 很初步的。

1600 年, 英国伊利莎白女王的御医吉伯在他出版的《磁石论》一书中对于磁石的各种基本性质作了系统的定性描述, 还对摩擦起电性质作了许多研究。发现不仅琥珀经摩擦后能吸引轻小物体, 而且相当多的物质, 如金钢石、蓝宝石、硫磺、硬树脂和明矾等经过摩擦后也都具有吸引轻小物体的性质; 他注意到这些物质经摩擦后并不像磁石那样能够指南北, 为了表明与磁性的不同, 他把琥珀的希腊文字表示这种性质, 称为“电的”性质 (electric)。他在实验中制作了第一只验电器, 它是一根可绕固定中心转动的金属细棒, 当摩擦过的琥珀靠近它时, 金属细棒可转动指向琥珀。

大约在 1660 年, 马德堡的盖利克发明了第一台摩擦起电机。他用硫磺制成形如地球仪的可转动球体, 用干燥的手掌擦转动的球体, 使之获得电。起电机的发明和改进在静电实验中起了重要作用, 促进了 18 世纪对于电的研究。1729 年英国的格雷发现了导体和绝缘体的区别; 法国杜费发现电有两种: 1745 年荷兰莱顿的穆欣布罗克又发明了电容器的原始形式—莱顿瓶。这项发明为电的进一步研究提供了条件。

1747 年富兰克林用莱顿瓶发现了正电和负电, 并提出了电荷守恒定律。他的工作更加丰富了人们对电的认识, 认识到莱顿瓶的贮电作用来自玻璃; 发现导体的尖端更易于放电等等。他的著名的风筝实验统一了天电和地电。他还建议用避雷针来防护建筑物免遭雷击, 在 1754 年首先由狄维施实现。

18 世纪后期，开始了电荷相互作用的定量研究。1766 年，普里斯特利根据带电金属容器内表面没有电荷和对内部不产生电力的实验结果，猜测电力与万有引力有相似的规律，两个电荷之间的作用力与它们之间距离的平方成反比。1769 年罗宾孙通过作用在一个小球上电力和重力平衡的实验，第一次直接验证了两个电荷相互作用力和距离平方成反比这个定律。1773 年卡文迪许根据他的导电球壳内表面检测不到电荷的实验的精确度，推算出电力与距离成反比的方次与 2 相差最多不超过百分之二。他的这一实验是近代精确验证电力定律的原型。可是他的这一结果以及其他重要研究成果直到 1879 年才由麦克斯韦整理公诸于世。1785 年库仑设计了精巧的扭秤实验，直接精确地测定了两个静止点电荷的相互作用力，并发现这种力与它们之间的距离平方成反比，与它们的电量乘积成正比。库仑的实验得到世界公认，从此对电学研究进入了定量阶段，并使它逐渐发展成为科学的一个分支。

1811 年泊松把早先力学中拉普拉斯在万有引力定律基础上发展起来的势论用于静电学，发展了静电学的解析理论。

18 世纪后期电学的另一重要发展是意大利物理学家伏打于 1799 年发明了电池。其装置为由一系列按同样顺序叠合起来的银片、锌片和用盐水浸泡过的硬纸板所组成的柱体，称为伏打电堆。它为电学实验提供了持续的电流，扩展了电学实验的范围。后来，人们利用它还发明了许多电学方面的应用，如电解、电弧、电灯及电镀等。

19 世纪初科学界普遍认为，电和磁是两种独立的作用。但是，丹麦的自然哲学家奥斯特于 1820 年发现了电流的磁效应：当电流通过导线时，引起导线近旁的磁针偏转。电流磁效应的发现开创了电学研究的新纪元。同年，安培用实验证明了载流螺线管与磁铁的等效生；阿喇果发现钢和铁在电流作用下的磁化现象；毕奥和萨伐尔做了长直载流导线对磁极作用的实验；安培还做了一系列电流相互作用的实验。这些实验不仅使人们认识到电流能够产生磁场以及磁场对电流有作用力等事实，而且开创了电流现象应用的新领域：电磁铁、检流计、电动机、电报和电话等相继发明，并很快进入了实用阶段。

检流计的问世为欧姆发现电路定律提供了条件。1826 年，他在热传导理论的启发下，用实验建立了电路定律。在此基础上，基尔霍夫解决了分支电路问题。

1831 年英国物理学家法拉第发现电磁感应现象，在实验基础上确立了电磁感应的规律：当闭合线圈中的磁通量发生变化时，线圈中便产生感应电动势，感应电动势的大小取决于磁通量随时间的变化率。1834 年楞次给出了电磁感应时，线圈中感应电流的方向；1845 年诺埃曼建立了表述感应电动势的数学公式。电磁感应的发现为电能的开发和广泛利用提供了崭新的前景。1866 年西门子发明了可供实用的自激发电机；到 19 世纪末实现了电能的远距离输送，电动机在生产和交通运输中得到广泛应用，从而极大地改变了工业生产的面貌。

对电磁现象的广泛研究，使法拉第逐渐形成他特有的场的观念。这个观念为电磁现象的统一理论准备了条件。英国物理学家麦克斯韦在法拉第、诺埃曼、韦伯等物理学家的研究基础上，引入涡旋磁场和位移电流概念，建立了电磁场的普遍方程组。他还根据方程组推论电磁作用以波的形

式传播，电磁波在真空中的传播速度等于电量的电磁单位和静电单位的比值；并根据该值与光在真空中的传播速度相同，大胆预言光是电磁波。

1888年赫兹根据电容器放电的振荡性质，设计制作了电磁波源和电磁波检测器，通过实验发现了电磁波，测定了电磁波的传播速度，并观察到电磁波与光波一样具有偏振性质，能够反射、折射和聚焦，从而证实了麦克斯韦理论和预言。从此，麦克斯韦理论逐渐为人们所接受，同时也开辟了一个全新的领域——电磁波的应用和研究。

目前，电磁学已发展成为经典物理学中相当完善的一个分支。它可以用来说明宏观领域内的各种电磁现象。电磁现象是十分普遍的现象，电磁作用是物质的基本相互作用之一。电磁学已渗透到物理学的各个领域。电磁学理论的日臻完善也促进了电技术的发展。在科学和技术的不断发展中，电磁学的应用必定会找到它更为广阔的前景，同时，它也将更加丰富电磁学内容本身。

《电磁学通论》(A Treatise on Electricity and Magnetism) 英国物理学家麦克斯韦的代表作。1873年正式出版。麦克斯韦在他的第三篇电磁学论文《电磁场的动力学理论》发表后不久，因身体不好而不得不辞去皇家学院的教授职务，在休养期间，他感到以前自己的许多电磁学论文都是刊登在各种卷帙浩繁的学报或刊物上，逐年累月，会渐渐被人遗忘。而且这些论文太深，学生们一般不敢问津。于是他决定用一种统一的方法，按照一种统一的思想来总结前辈们——法拉第、库仑、奥斯特、安培、高斯等的电磁学成就和他本人十多年来的研究成果，并给于理论的解释和数学的表述。这种统一的方法就是动力学的方法，这种统一的思想就是法拉第的力线和场的思想。麦克斯韦在困难的条件下，经过1866~1870年长达5年的辛勤努力，终于抱病完成了本书。他在第一版序言中写道：“如果我能用我所写的东西帮助学生理解法拉第的思想和表达方法的话，我将认为它达到了我的一个主要目的——把我读法拉第《研究》所感受的同样喜悦传授给他们。”

麦克斯韦的这个目的达到了。本书共分两大卷，全面系统地总结了前人有关电磁现象的发现，特别是法拉第的研究成果和法拉第关于力线和场的思想；创造性地推导出全面反映电磁规律的麦克斯韦方程组；预言电磁波的存在并阐明了其本质；创立了电磁波的传输模型；提出了光的电磁理论。麦克斯韦将自己提出的这一完整理论称为“电磁场理论”。该书既是电磁学这门学科中出现的一部崭新的科学著作，又是一部极其优秀的电磁学教科书，而该书也就成了集古今电磁现象和理论之大成的具有划时代意义的伟大著作。

**电磁灶**(electromagnetic pan) 应用高频感应加热原理的一种厨房炊具。为日本人所发明，70年代末始见于市场。主要结构为高频转换装置、感应线圈和平底铁磁锅。感应线圈上方设置有一块搁置铁磁锅的平板，由耐高温、耐冲击、又不隔离高频电磁场的陶瓷(微晶玻璃)制成。还附设有控制系统、保护电路等。市电经转换装置转换成高频交流电后通过感应线圈，线圈形成的高频交变电磁场作用于磁铁材料制作的平底锅，锅体内便产生涡电流。涡电流的焦耳热使锅体温度升高，以用于烹饪。其优点主要是锅体本身生热，不需要中介传热，故热效率比普通电炉、煤气炉等都高；工作时无明火，也没有明火加热的烟气，清洁卫生，比较安全；而

且电磁结构易于控制，可在 50~200 范围内随意调节烹饪温度。其缺点是总有一定能量的电磁波泄漏。患有某些疾病者，特别是使用心脏起搏器等电磁医疗器械的人不宜使用电磁灶；能产生涡流的铁磁性物体，如铁质刀、叉、汤匙等均不能放在灶台上；另外，戴手表者也不应过分接近工作中的灶台。

**电磁阻尼** (electromagnetic damping) 由于电磁感应而引起的一种阻碍导体在磁场中运动的作用。如图，把一铜片悬挂在电磁铁的两极间，形成一个摆。电磁铁未通电时，自由摆动的铜片会经过相当长时间才停下。当电磁铁线圈通电后，空间存在不均匀磁场，摆动铜片中即出现涡电流。由楞次定律分析可知，涡电流所受磁力总是反抗相对运动的，即产生阻尼作用，使铜片的摆动迅速停止。用永磁体代替上述电磁铁，或者让铜片在磁场中转动，也都会产生电磁阻尼作用。在电磁仪表中，利用这一原理使指针较快地稳定在所指刻度上。在电度表中，利用电磁阻尼以稳定转动线圈的转速。电气火车中所使用的电磁制动装置也是根据这一原理设计的。相反，在某些电磁机械中，则应采取适当措施，如在金属片上划缝等，以避免或减小电磁阻尼。

#### 电磁阴尼

**电的流体说** (fluid theory of electricity) 一种关于电的本性的学说。18 世纪 20 年代以后，电普遍地被认为是可以在导体中流动，能够从一个物体传到另一个物体的流动物质，人们开始把它称为电流体。此后出现了两种电的流体说。迪费于 1733 年，西默于 1759 年先后提出了电二元流体说，认为两种相反的电流体既能共存，也能相互独立。当两种电流体等量地共存于一个物体中时，那个物体不显电性，即处于普通物体的状态；当两种电流体相互独立时，物体就显示出某一种电性。在此期间，瓦特孙于 1745 年，富兰克林于 1747 年，爱宾努斯于 1759 年，先后提出了电一元流体说，主张电具有单质性，当电流体在物体中富集时物体带正电，电流体从物体上散失后物体带负电。电二元流体说的作用是导出了“同性相斥，异性相吸”的原理；而电一元流体说的积极成果是发现了电荷守恒定律和静电感应原理。然而电流体的概念于 1837 年被法拉第的工作所扬弃。法拉第在创立新的静电感应理论时证明了脱离物质而独立存在的电荷是不存在的，从而电的流体说也随之被扬弃。

**电灯** (electric lamps) 利用电流热效应而发光的灯具。白炽灯首先由美国人爱迪生于 1879 年发明。他将碳丝封入真空的玻璃泡中，所以称为碳丝灯。碳丝温度不能太高，因而发光不强，耗电多，又易挥发损坏。1911 年库利奇改成钨丝灯。因钨的电阻率极大，熔点高达 3370℃，使发光效率和寿命大大提高。1913 年朗缪尔发明在白炽灯泡内充以惰性气体以减缓灯丝烧损，因而提高了灯泡的使用寿命。最初使用氮气，后来则按灯泡瓦数大小而使用含不同比例的氮和氩的混合气。

现代白炽灯的结构如下图所示，其灯丝由细钨丝绕成螺旋状，每圈互不接触，不致发生短路，但可减少热量损失，使灯丝维持较高的温度，同时也可增加灯丝的发光面积，使白炽灯更加明亮。其每烛光所耗功率仅为 0.6 瓦特。灯丝由支架支撑，自灯丝接至泡外的导线是铁合金丝，先经一玻璃茎，为避免发热爆裂，铁合金丝的膨胀系数与玻璃相同。灯泡的两电极可用两相互绝缘的锡电极或一个锡电极和铁皮座（螺口灯泡）组成。为

减少钨丝挥发，泡内充有氮和氩的混合气体。

### 钨丝电灯泡

白炽灯的规格种类很多，主要指标有两项：功率和电压，选用时应注意这两项指标。

**电动势** (electromotive force) 电源内部非静电力将单位正电荷从电源负极移至正极所做的功。常用符号  $\varepsilon$  表示。设非静电力将正电荷  $q$  从电源负极移至正极所做的功为  $W$ ，则

$$\varepsilon = \frac{W}{q}。$$

电动势也可表示为

$$\varepsilon = \int_{-}^{+} E_{\text{非}} \cdot dl。$$

(经电源)

它反映了电源中非静电力做功的特征，其中  $E_{\text{非}}$  是非静电场强度。电动势具有与电位差相同的单位。

当整个闭合回路上都存在非静电力（例如在变化磁场中的闭合线圈内）时，电动势可定义为单位正电荷沿闭合回路移动一周时非静电力所做的功，即

$$\varepsilon = \oint_L \varepsilon_{\text{非}} \cdot dl。$$

由于非静电力所做的功等于电源内其它形式能量转化成电能的价值，因此也可把电动势理解为单位正电荷通过电源时所发生的其它形式能量转化成电能的价值。

**电工学** (electrical engineering) 研究电磁现象及其规律在工程技术中应用的一门学科。电工学是在电磁学的基础上发展起来的，随着电磁学理论研究的不断进展和电器工程技术方面的发明创造不断出现，尤其是本世纪中叶电子计算机的出现、微电子技术的迅猛发展，使得电工学的内容更加丰富。电工学的内容通常包括：电工原理、电磁测量、发明、输电、配电、电机、电器、电工材料、工业电子学以及电力拖动、电热、电焊、照明等。从基础理论的角度来看，电工学可分为三部分：以基本电路元件的性质、电路的基本定律和电路的分析计算方法为主要内容的电路部分。例如电路模型、电路定律、动态电路分析、网络理论、分布参数电路和非线性电路等。以常用电机、电器的基本工作原理、性能、使用方法及其控制电路（继电接触控制电路）为主要内容的电机和控制部分。例如磁路和变压器、异步电动机、直流电动机、电磁测量等。以电子器件的性能、基本电子线路（晶体管分立元件电路、基本集成电路）的原理及应用为主要内容的电子技术部分。例如二极管整流电路、晶体管放大电路、晶体管振荡电路、晶体管直流放大电路和运算放大器、可控硅整流电路、数字电路等。电工学在能源的合理开发、电能的输送和使用、电气控制和自动化、非电量的电测法以及信息传输与处理等方面都具有重要的意义。在科学技术不断发展的过程中，电工学的实际应用与发展必将更加广泛，同时，电工学本身的内容也必将会更加丰富。

**电功率** (electric power) 电流通过一段导体时电场力在单位时间内对电荷所作的功。常用符号  $P$  表示。电功率和机械功率一样，反映了能量转移的快慢或单位时间内能量转移的量值。电功率在数值上等于电路两

端的电压  $U$  和通过电路的电流强度  $I$  的乘积，即  $P=UI$ 。

在直流电路中，电压和电流强度不随时间变化，所以电功率也不随时间变化，是常量。在交流电路中，电流强度和电压随时间变化，故瞬时功率也将随时间而变化，它等于瞬时电压  $u(t)$  和瞬时电流  $i(t)$  的乘积，即

$$P(t) = u(t) i(t)。$$

在实际应用中，通常用平均功率  $\bar{P}$  来表示交流电功率的大小，它等于瞬时功率  $P(t)$  在一个周期  $T$  内对时间的平均值，结果可表示为

$$\bar{P} = UI \cos\varphi$$

式中  $I$ 、 $U$  分别表示交流电流和交流电压的有效值， $\cos\varphi$  称为功率因数。

电功率的单位是瓦特。

电荷 (electric charge) 见电。

电荷密度 (charge density) 电荷分布疏密程度的量度。从微观上看，物体上的电荷起源于构成物质的原子中的电子和原子核的电荷，所以其分布是不连续的。但从宏观上看，可以忽略这种原子间隔的不连续性而认为物体的电荷是连续分布的。电荷密度可以分为体电荷密度、面电荷密度和线电荷密度，它们分别描写分布在三维体积中、二维平面上以及一维线段上电荷的疏密程度。

体电荷密度 单位体积内的电量。带电体中某点  $P$  处，若包含该点的体积元  $V$  内的总电量为  $q$ ，则  $P$  点处的体电荷密度定义为：

$$\rho = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{q}{V} = \frac{dq}{dV}。$$

面电荷密度 单位面积内的电量。带电体上某点  $P$  处，若包含该点的面积元  $S$  内的总电量为  $q$ ，则  $P$  点处的面电荷密度定义为：

$$\sigma = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{q}{S} = \frac{dq}{dS}。$$

线电荷密度 单位长度内的电量。带电细棒或细线上某点  $P$  处，若包含该点线元  $l$  内的总电量为  $q$ ，则  $P$  点处的线电荷密度定义为：

$$\lambda = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{q}{l} = \frac{dq}{dl}。$$

电荷守恒定律 (conservation law of charge) 电荷既不能创生，也不能消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。是电磁现象中的基本定律之一。单位时间内从包围某一体积的闭合曲面上流出的电量等于该体积内的电荷随时间的减少率。在与外界不发生电荷交换的体系中，电荷量为一常数，即该系统中正负电荷的代数和保持不变。例如，在摩擦起电中，把相互摩擦的两个原来不带电的物体看作一个系统，它们总是带等量异号的电荷。在静电感应现象中，带电体靠近某孤立的不带电导体时，在该孤立导体的两端处将出现等量异号电荷；一个电子和一个正电子相遇后将发生“湮没”而转化为光子，光子不带电。电荷守恒定律迄今已为大量的精确实验所证实。

电话 (telephone) 利用电信号传输消息、互通话语的通信方式。在发话端，送话器把话音变成电信号，通过有线或无线电话传输到收话端，

再由受话器把电信号还原成声音。电话是美国人贝尔于 1876 年发明的。1878 年，贝尔成功地进行了在波士顿和纽约间的首次长途电话通话。

电话通信系统由电话机、线路设施及交换机三部分组成。

**电话机** 通话的终端设备。它完成声-电、电-声的转换作用。电话机由通话部分、电路部分、呼叫部分和附属部分组成。 通话部分：包括送话器和受话器。送话器在声波的作用下，按照声压的变化将话音转换为电信号（话音电流）送到线路中去。受话器把从线路中收到的话音电流恢复成话音。 电路部分：包括由电子元件、感应线圈组成的消侧音电路。 呼叫部分：包括极化铃、拨号盘或手摇发电机等。 附属部分：包括叉簧、话绳等。

**线路设施** 包括用户线、中继线和长途线路等。用户线是把用户的电话机接到电话局的线路。每个用户都有一对电话线通到电话局，所以用户线的数量最多。中继线是电话局之间传输信号和通话用的传输线路。长途线路是连通城市之间的通信线路，通常采用多路复用的载波技术。长途线路除了有线设施以外，也可采用微波中继或卫星转接等。

**交换机** 使任意两个电话机连接起来进行通话的设备。它是电话通信的枢纽，各个用户之间要由交换机来接通线路，然后才能通话。交换机通常可分两种： 人工交换机：用人工进行用户之间接线工作的交换机。用户打电话时，先向话务员报出对方用户号码，话务员根据所报号码，接到被叫用户，然后双方可进行通话。用户讲话完毕时，话务员拆开该两用户之间的连接。接线与拆线工作，由话务员根据交换机上不同的信号进行。

自动交换机：利用机键的动作进行用户之间接线工作的交换机。当用户拨动电话机上的拨号盘时，发出脉冲电流，控制机键的动作，经过一系列自动选择过程，接到被叫用户。接线速度较人工快而准确，经营成本也低，但投资较大。自动交换机的制式很多：有步进制、机动制、全继电器制及纵横制等。目前正在逐步推广的程控电话的自动交换机是电脑控制的集成电路交换机。

如今，电话已被发展为多种形式，有录音电话、对译电话、多功能程控电话、数据电话、保密电话、可视书写电话等等，各有各的功能和用途。并且，电话已成为人们迅速地得知各行各业的信息的有力工具。

**电化学 (electrochemistry)** 研究由化学能转变为电能，或由电能转变为化学能过程的规律性以及实现这些过程的介质特性的一门学科。研究内容包括电化学反应平衡过程的电动势与热力学函数之间的关系、电解质溶液理论、原电池、电极过程动力学等。电化学无论是在一些规模较大的电解、电镀、电池、电冶金、电合成等工业中，还是在电分析、环境监测等分析测试应用技术中，都得到了广泛的应用。

电现象与化学现象有着密切的联系，在化学反应中绝大多数的反应都是有电子得失的氧化还原反应。氧化还原反应的发生和进行的程度都与电势直接相关。自从 1799 年伏打研制成第一个原电池后，促使电化学从 19 世纪初开始发展起来。目前，电化学工业已经成为国民经济中的重要组成部分。电解法已被广泛地应用于提炼和精炼有色金属和稀有金属。许多化工产品也是通过电解方法制得的。在工业上还广泛应用电化学方法进行金属的腐蚀和防护研究。在全世界，每年由于金属腐蚀所遭受的损失严重，其中以电化学腐蚀占的比重最大，因此研究产生腐蚀的原因，利用非金属



或某些金属保护措施，生成金属保护层防腐，使金属表面钝化和缓蚀剂的应用就成为电化学研究的重要内容之一。与电解过程相反，化学电源是将化学能转化为电能的装置。日常生活中使用的干电池，汽车、飞机上的蓄电池，宇宙飞船上的燃料电池等，都是电化学中的重要研究内容。随着现代科学技术的发展，电子工业和空间技术对电源提出了更高要求，研制体积小、重量轻、容量大的化学电池就成为电化学的重要研究课题。目前开发和研制的化学电源，按其使用特点分为三大类，即一次电池、二次电池和燃料电池。一次电池也叫原电池，电池中的活性物质用完电池即失效。二次电池通常又称蓄电池，电池中的活性物质经过反应后，可以用简单的方法使其再生，因此电池可反复使用。燃料电池是一种将燃料的化学能直接转换为电能的装置，又称为连续电池。一般以氢气或含氧化合物以及煤等作为负极的反应物质，以空气中的氧或纯氧作为正极的反应物质。燃料电池的发电效率高，电化学能量转换的实际效率可达 60%，被广泛用于宇航、军航动力装置以及旅游、野营等。

**电解 (electrolysis)** 电解质受直流电作用，在两个电极上（或电极旁）同时发生化学反应而分解的过程。化学变化是物质失去或获得电子（氧化或还原）的过程。电解过程是在含有正、负离子的电解质溶液的电解池中进行，池中插入正、负两个电极。被电解的物质可以制成电极或作成溶液，电流（即电子）流进负电极（阴极），溶液中带正电荷的组分迁移到阴极，并与电子结合，变成中性的元素或分子，沉积于该电极上（即工件）；带负电荷的组分迁移到另一电极（阳极），给出电子，变成中性元素或分子。若被电解物质为电极，则反应中电极中物质元素给出电子而溶解。采用不同的电极和电解质，在电极上将产生不同的新物质。如电解熔融氯化钠将产生金属钠和氯气；电解氯化钠的水溶液则产生氢氧化钠和氯气；电解水将产生氢气和氧气。利用电解法可把一种金属镀在另一种金属的表面，这种方法称为电镀。在冶金工业中，从矿石或化合物提取金属，即电解冶金；利用电解法可制出凹凸花纹的金属复板，这种方法称为电铸。电解中析出物质的定量关系由法拉第电解定律给出。

**电解质** 在化学和物理学中，指由于解离成带正、负电荷的离子而能导电的物质。如酸类、碱类及盐类等。一般纯净的水导电的程度极其微弱，如果加入少量酸、碱或盐使其溶解，溶液便能显著导电。导电时正、负离子分别向电路的负、正两极（阴极和阳极）移动，并且通常在该处放电。

根据物质电离程度的大小，一般可分为强电解质和弱电解质两种。强电解质在溶液中完全电离，如氢氧化钠等金属的氢氧化物及氯化钠等盐类。弱电解质在溶液中仅部分电离，如水中的醋酸等。

很多盐类，如氯化钠熔融时虽没有任何溶剂存在，但也具有电解质的性质；还有一些盐如碘化银，即使在固态时也是电解质。

**电镀** 利用电流将金属沉积于导体（如金属）或非导体（如塑料、木材、皮革）表面，从而形成金属涂层的工艺过程。电镀工业约开始于 1840 年，在发明氰化物电解液以电镀银、金、铜和黄铜后，电镀工业发展迅速。1869 年发明镀锌。20 世纪 20 年代相继出现铁零件防锈的镀锌或镀铬技术。

#### 电镀

电镀的原理如右图所示。电镀时，将被镀的工件作阴极，欲镀的金属作阳极，并以欲镀金属的盐或酸溶液为电解质，通以电流，则溶液分解，

金属附着于工件表面，阳极的金属逐步溶解，以保持电解液的浓度。电镀时在工件表面析出的金属均为结晶体，结晶体越细越均匀，电镀质量越高。为了得到表面平滑而光亮的镀层，镀件需要抛光处理，但费用增加，现在较多采用电镀液中添加光亮剂，或采用“平整”沉积法。采用周期换向电镀，即周期性地变换电流方向的方法，也可达到改善镀层质量的目的。

对非导体表面的电镀，要先用石墨、导电漆、化学镀处理，或经气相涂层处理，使形成导电层后，再进行电镀处理。

电镀应用极广。镀铜广泛用于防止钢材特殊部位在表面渗碳时的硬化。镀银用于餐具和电器接触器和发动机轴承。镀金用于装饰品和表壳。镀锌是为防止钢铁制品表面的生锈。镀镍和镀铬用于制造汽车和家庭用具的装饰和防锈。

**法拉第电解定律** 表示电解中析出物质的质量与通过电量之间关系的定律。是英国科学家法拉第于 1833 年提出的，故名。

(1) 法拉第第一定律：对于同一种物质，在电极上析出或溶解物质的质量  $M$  与通过电解液中的电量  $Q$  成正比，即

$$M = KQ。$$

式中  $K$  称为物质的电化当量，数值上等于电解液中通过单位电量时电极上析出物质的质量。不同物质的  $K$  值不同，下表列出了几种元素的电化当量。

(2) 法拉第第二定律：物质的电化当量  $K$  与它的原子量  $A$  成正比，与载流离子的电荷数  $Z$  成反比，即

$$K = C \frac{A}{Z}。$$

式中  $C = \frac{1}{F}$ ， $F$  为法拉第常数。法拉第常数就是 1 摩尔电子的电量，

数值上也等于在电解中析出 1 摩尔单价离子所需的电量。 $F = 9.648455 \times 10^{-19}$  库仑。

几种元素的电化当量值表

物质	原子量 ( kg )	电化当量 ( kg/C )
银 ( Ag )	$1.07868 \times 10^{-1}$	$1.1180 \times 10^{-3} \text{ } \acute{u}$
铜 ( Cu )	$6.354 \times 10^{-2}$	$3.294 \times 10^{-4}$
氢 ( H )	$1.0079 \times 10^{-3}$	$1.054 \times 10^{-5}$
氧 ( O )	$1.5999 \times 10^{-2}$	$8.293 \times 10^{-5}$
氯 ( Cl )	$3.5453 \times 10^{-2}$	$3.674 \times 10^{-4}$

**电介质 ( dielectric )** 一种绝缘体。主要以极化方式而不是以传导方式传递电的作用和影响的物质。在其中起主要作用的是束缚电荷。

电介质可以分为气态电介质 ( 如氢、氧、氮及一切在非电离状态下的气体 )、液态电介质 ( 如油、纯水、漆、有机酸等 ) 和固态电介质 ( 如玻璃、云母、陶瓷、纸、石英等 )。固态电介质又分为非晶体和晶体两种。气态、液态和非晶体固态电介质由中性分子组成。在晶体内部，分子、原子或离子按一定规则形成晶格，这些分子、原子或离子所在的位置称为晶格的结点，结点的集合称为点阵。实际电介质并不是完全不导电的，在室温下，其电阻率 约为  $10^8 \sim 10^{18} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 。在外电场超过某极限值 ( 材料的击

穿场强)时,电介质会被击穿而失去介电性能。

电介质性能的重要参量有:相对介电常数、介电损耗因子和击穿场强。用于储能和绝缘的电介质主要考虑介电常数和击穿场强,如在电容器中的电介质;而用于高频传输系统的电介质则主要考虑介电常数和损耗因数,如用于高频电缆中的电介质。

电致伸缩、压电性、热电性和铁电性是某些固体电介质的特性,这些性质在实际中有广泛的应用。例如制造传感器实现非电量电测变换等。

**电介质的极化** 在外电场作用下,电介质表面出现宏观面电荷,在不均匀电介质内部还出现宏观体电荷的现象。

电介质根据极化机制的不同,又可分为两类。在一类电介质中,当外电场不存在时,电介质分子的正、负电荷“重心”是重合的,等效的分子电偶极矩为零,这类分子称为无极分子,如气态的 $H_2$ 、 $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$ 以及液态的 $Cl_4$ 等分子。在外电场 $E$ 的作用下,无极分子的正、负电荷“重心”向相反方向作一微小位移,形成一个电偶极子,各个电偶极子沿 $E$ 方向排列会在电介质表面形成宏观面电荷(对均匀介质),这种极化形式叫做位移极化。在另一类介质中,即使外电场不存在,电介质的正负电荷“重心”彼此也不重合,形成一定的分子电偶极矩,这类分子称为有极分子,如气态的水、二氧化硫及液态的水、硝基苯、酯类等。在无外电场时,由于热运动介质内有极分子的电偶极矩的取向是杂乱无章的,因而不会在介质中出现宏观电荷。在外电场 $E$ 中,每一分子受到一力矩 $L=p \times E$ 的作用,使其趋于沿 $E$ 方向取向;另一方面热运动强烈地阻碍着这种取向,但外电场越强,这种取向作用也越大,结果在介质表面形成宏观面电荷,这种极化叫取向极化。

实际上,在取向极化介质中也有电子的位移极化,只是后者比前者弱得多。然而在高频电场中,有极分子的取向由于转向时的惯性而减弱;但电子惯性极小,因而这时位移极化在有极分子中起着主要作用。

**极化强度** 描述电介质极化状态(包括极化程度和极化方向)的物理量。它是一个矢量,常用 $P$ 表示。电介质的极化强度等于单位体积内分子电偶极矩的矢量和,即在电介质中,取一物理无限小体元 $V$ , $V$ 内分子电偶极矩的矢量和为 $P_i$ ,则有

$$P = \frac{P_i}{V}。$$

实验表明,在大多数常见电介质中,场中某点处的极化强度矢量 $P$ 与该点的场强 $E$ 成正比,即 $P = \chi \epsilon_0 E$ 。 $\chi$ 为该点电介质性质所决定的常数,叫做电介质的极化率。满足 $P = \chi \epsilon_0 E$ 关系的电介质是各向同性电介质。对这种电介质中的每一点,不论场强方向如何,大小一样的场强总要在自身方向上引起同一大小的极化强度。

极化强度与极化电荷之间存在普遍关系。在电介质内部,极化体电荷密度 $\rho_p$ 决定于极化强度 $P$ 的散度,且有

在两介质的界面上极化面电荷密度 $\rho_{ps}$ 决定于极化强度矢量在界面法线方向上分量的突变,且有

$$\rho_{ps} = -\nabla \cdot P。$$

$P_{1n}$  和  $P_{2n}$  分别为界面两边的介质中极化强度  $P_1$  和  $P_2$  在界面处的法向分量。其中法向规定为介质 1 指向介质 2 的方向。

**介电常数** 又称电容率，表征电介质性质的常数。电容器充满均匀电介质后，其电容  $C$  与其真空状态时的电容  $C_0$  之比  $\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$ ，称为相对介电常数， $\epsilon_r$  是一个无量纲的量。国际单位制中将库仑定律中出现的常数  $\epsilon_0$  与  $\epsilon_r$  的乘积记为  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ，称为绝对介电常数。下表列出了部分材料的相对介电常数。对于真空， $\epsilon_r=1$ ，这时  $\epsilon = \epsilon_0$ ，因此称  $\epsilon_0$  为真空介电常数，其值为  $\epsilon_0=8.85418782 \times 10^{-12}$  法/米。

电容器中的电介质要求有较大的相对介电常数，以便减小电容器的体积和重量。介质的相对介电常数电介质的相对介电常数表

电介质	相对介电常数 $\epsilon_r$
真空	1
空气	1.000590
水	78
油	4.5
纸	3.5
玻璃	5 ~ 10
云母	3.7 ~ 7.5
普通陶瓷	5.7 ~ 6.8
电木	7.6
聚乙烯	2.3
聚苯乙烯	2.6
二氧化钛	100
氧化钽	11.6
钛酸钡	$10^2 \sim 10^4$

通常随温度和介质中传播的电磁波的频率而变，它与介质的电极化率  $\chi_e$  之间的关系为： $\epsilon_r=1+\chi_e$ 。相对介电常数是电介质性能的重要参量之一。

**电介质的击穿** (breakdown of dielectrics) 外加电场超过电介质所能经受的击穿场强时，介质的电导突然增大，甚至引起结构损坏或破碎。击穿场强一般约为  $10^7 \sim 10^8$  V/m，其值越大，则表示介质愈不容易被击穿，材料的耐压性能愈好。

介质击穿的过程很复杂，除了与介质本身的微观结构和杂质缺陷等因素有关外，还与介质厚度、电极形状、环境温度和湿度等因素有关。电介质击穿可以分为热击穿、电击穿和化学击穿三种类型，但在具体击穿过程中有时以一种为主，有时是几种类型同时存在。

由于固体电介质存在击穿现象，因此在高压电力输送中使用的绝缘介质，以及在强场、高能、强光源等条件下工作的固体材料都必需考虑到击穿的因素，以确保安全工作。因此对介质击穿问题的研究不仅有重要的科学意义，还有着很广泛的实用价值。

**电镜技术** (electron microscope techniques) 一种用电子显微镜进行显微分析的技术。由于电子的德布罗意波波长 (参见电子) 比光波小

几个量级，所以电子显微镜具有高分辨成像能力，对显微分析带来极大方便。从本世纪 30 年代以来，一系列电子光学仪器的相继出现并不断完善，有力地推动了材料显微分析技术的发展。它们主要是透射电子显微镜，超高压电子显微镜，扫描电子显微镜，扫描透射电子显微镜等。

透射电子显微镜，简称透射电镜 (TEM)，是以波长极短的电子束作为照明源，用电子透镜聚焦成像的一种具有高分辨本领、高放大倍数的电子光学仪器。被分析的样品必须制成电子能穿透的、厚度为 10~200 $\mu\text{m}$  的薄膜。其点分辨本领优于 0.3~0.5 $\mu\text{m}$ ，晶格分辨本领可达 0.1~0.2nm，放大倍数达数十万倍。超高分辨本领透射电镜还能直接显示固体晶格像，甚至可以观察重金属原子像。超高压电子显微镜，简称超高压电镜 (HVEM)，是又一种 TEM，它的加速电压为 1000kV，等于常用的 TEM 加速电压的 10 倍，从而成为重要的显微分析手段。扫描电子显微镜，简称扫描电镜 (SEM)，它的成像原理与 TEM 不同，是以类似电视摄像显像的方式，用细聚焦电子束在样品表面激发出次级电子，经探测器收集后成为信号，再调制扫描成像。SEM 具有样品制备简单、放大倍数连续调节范围大、景深大、分辨本领比较高等特点，是进行样品表面显微分析研究的有效工具。扫描透射电子显微镜，简称扫描透射电镜 (STEM)，成像方式与扫描电镜相似，不过接收的不是次级电子而是透射电子 (包括部分小角度散射电子)，样品也必须是薄膜。利用这种 STEM 已观察到轻元素支持膜上的单个重原子，特别是利用它的微小电子束斑作极微区 (几十埃) 的晶体结构分析和成分分析。

**电离 (ionization)** 中性原子或分子由于外界原因而形成离子的过程。

**原子的电离** 原子如果受到电子、正负离子或其他原子碰撞，或受到强光照射，就能获得一定的能量而被激发到高能态，这时称为受激原子。当原子获得更大能量时，可能有一个或多个电子脱离原子核的束缚而成为自由电子，相应的原子便成为带正电荷的系统，称为正离子。此过程就称为电离或离化。速度不大的自由电子也可能被某些原子俘获，这种有一个或多个附加电子的原子称为负离子。正离子和负离子通称为离子。产生电离的方式很多，如电子碰撞电离，重粒子碰撞电离，光致电离，亚稳原子碰撞电离等。电离后的物质将改变其导电性质，例如气体被电离后称为电离气体。在外界电场作用下电离气体中的正负离子将沿相反方向运动而形成电流，气体因而失去绝缘性而成为一类导体。

#### 原子电离能图

**电离能** 从基态原子最外层移走一个 (价) 电子所需的最小能量称为电离电势或电离能。通过加速电子与原子碰撞的实验可测量该原子的电离能。当加速电势差达到或超过某一阈值  $v_1$  时，可观察到正离子流，则该电势差就等于被测原子的电离能。例如氢原子的电离能就是 13.6eV。此外，还可用光谱法和光致电离法等实验测定电离能。目前已测定了多数原子的电离能。上图显示了原子的电离能随原子序数  $Z$  的周期性变化关系。惰性气体 (氦 He、氖 Ne、氩 Ar 等) 原子的电离能具有极大值，而碱金属元素 (锂 Li、钠 Na、钾 K 等) 原子的电离能具有极小值。电离能的大小反映了原子最外层的一个价电子与原子其余部分结合的紧密程度。惰性气体外层电子形成完全的壳层结构，这种结构最稳定，要移去一个电子需要更大的能量。对于碱金属原子来说，最外层只有一个电子，该电子与原子其

余完整壳层部份结合很弱，移去这个价电子只需很小能量。

**分子离解能** 一个处于基态的分子分解为完全独立的原子时所需要外界提供的最小能量，称为分子的离解能。例如氢分子 ( $H_2$ ) 的离解能为 4.478eV，氯化钠 (NaCl) 分子的离解能为 3.58eV。对于以离子键结合的分 子，如氯化钠，还可能分解为完全独立的离子。这时的离解能与分解为中性原子时的离解能不一样。例如氯化钠分解为钠离子 ( $Na^+$ ) 和氯离子 ( $Cl^-$ ) 时的离解能为 5.00eV。

**电离能 (ionization energy)** 参见电离。

**电力线 (electric line of force)** 参见电场线。

**电量 (electric quantity)** 物体电荷多少的量度。它在国际实用单位制中的单位是库仑。在一般物理现象中，大量的实验证实，电量的最小单元是电子的电量，其值为  $e=1.6021892 \times 10^{-19}$  库仑。所有客观物体的电量或者等于电子 (或质子) 的电量，或者是它们电量的整数倍。所以把  $e$  称为基本电荷。但是 20 世纪 60 年代末以来的高能加速器实验已经证实，质子和中子等是由更为基本的组分粒子夸克所构成，而夸克带有分数电荷 ( $\frac{2}{3}e$  或  $-\frac{1}{3}e$ ) (参见强子结构)。夸克只能存在于小于质子线度的

微观世界中，而不会出现于宏观世界中。

**电流 (electric current)** 电荷的定向移动。例如在金属中，表现为自由电子的流动；在液体或气体中，表现为正负离子在相反方向上的流动。存在电流的条件有两个：存在自由电荷；存在电场。导体中有电流时会引起各种效应。例如，电流周围存在磁场；电流通过电阻时会使电阻发热；电流通过电解质时引起电解；电流通过气体时，在适当条件下会导致发声、发光。利用电流产生的各种效应可以检测电流，进而制成各种检测电流的装置。安培表就是利用电流的磁效应制成的。在电场中，正负电荷总是沿着相反方向运动。因为正电荷沿某一方向运动和等量的负电荷沿反方向运动所产生的效应大致相同 (霍尔效应是个例外)，所以为方便所见，习惯上把电流看成正电荷的运动，并规定正电荷的运动方向为电流的方向。这样，在导体中电流的方向总是沿着电场的方向：从高电势处到低电势处。由于电流形成过程的不同，又可分为传导电流、对流电流等。

(1) 传导电流。带电亚原子粒子、离子或空穴等荷电粒子在导体内部流动而引起的电流。例如，金属中的自由电子流动、半导体中自由电子和空穴的流动所引起的电流。

(2) 对流电流。亦称运流电流。带电介质或介质中的带电部分不是由于电场作用而在空间运动时所形成的电流。例如，介质在电场中极化时，体内产生的极化电荷和表面处出现的极化面电荷因随介质运动而引起的极化电流；带电的平行板电容器绕垂直于板面的轴急速旋转时所形成的环形电流。对流电流的周围也产生磁场。由于带电体在原来没有磁场的空间中匀速运动不须外力维持 (略去空气阻力)，所以对流电流不需要电热来维持，它不引起热效应。

**电流互感器 (current mutual inductor)** 仪表中使用的互感器的一种。将交流大电流变换成电压较低的小电流的装置。基本结构和工作原理都与变压器相同，但因为用于测量，在设计上要求电流变换误差极小。其初级线圈仅一、两匝 ( $N_1$ )，远小于次级线圈匝数  $N_2$ ，故能将大电流变

换成小电流，供给仪表或继电保护装置，并使它们与高压电路隔开。通常规定其次级额定电流均为 5A，以便使与之联用的电流表或继电器的电流线圈等在制造上得以标准化。电流互感器常与电流表一起组成专用测量仪器。使用时初级线圈串联在待测大电流电路中，次级与电流表串联，如图所示。由于电流表内阻很小，故相当于次级短路的变压器。待测大电流

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \text{ 也就等于次级电流表读数的 } N_2 / N_1 \text{ 倍，就使读数方便而又完}$$

全。若次级线圈回路开路，反抗磁芯中磁通（量）变化的次级线圈中的感应电流消失，铁芯内的交变磁通增大，铁损亦随之增大，发热过多甚至会烧坏绕组绝缘。同时，次级感应电动势可高达数百伏，也会击穿线圈的绝缘且危及人身安全。故次级回路不允许开路。电流互感器广泛应用于电力系统中的测量与保护装置。

### 电流互感器

**电流强度**（current strength）描述电流强弱的物理量。表示单位时间内通过导体任一截面的电量。常用符号  $I$  表示稳恒电流，用  $i$  表示变化电流。可以把这一概念推广到任一曲面，将单位时间内通过该曲面的电量称为电流强度。如果在时刻  $t$  至  $t + \Delta t$  时间内，通过导体任一横截面的电量为  $q$ ，则时刻  $t$  通过该横截面的电流强度  $i(t)$  为

$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}。$$

电流强度是标量，但可正可负。它只能描述导体中通过某一截面电流的整体特性。利用电流的磁效应、热效应、化学效应及霍尔效应等各种效应可以测量电流强度。量度电流强度的仪表有灵敏电流计、安培计等。电流强度通常简称为电流、单位为安培（A）。

为描述某点的电流强弱和流动的方向，常用电流密度表示，用符号  $j$  表示，又称电流密度矢量。导体中某点处电流密度的方向是指该点处正电荷运动的方向，其值等于通过该点并与电流方向垂直的单位面积上的电流强度。设  $dI$  为通过与电流方向相垂直的面元  $dS$  上的电流强度，则

$$j = \frac{dI}{dS}。$$

对任意面元  $dS$ ，则有  $dI = dS \cos \theta$ ， $\theta$  为  $dS$  与  $j$  之间的夹角，因而有

$$dI = j \cdot dS。$$

对通过任意有限曲面的电流强度可表示为

$$I = \iint_{(S)} j \cdot dS，$$

这表明，一个曲面的电流强度就是该曲面上电流密度  $j$  的通量。

导体中某点处的电流密度  $j$  决定于该点的电场强度  $E$  和电导率  $\sigma$ ，它们之间有关系

$$j = \sigma E，$$

此关系为欧姆定律的微分形式。

电流密度的单位为安培/米<sup>2</sup>（A/m<sup>2</sup>）。

**电流天平**（current balance）亦称“安培秤”。用来测量载流回路

间相互作用力的天平装置。基本结构如图所示。一对完全相同的圆线圈 A 和 B 同轴地固定在天平一侧的底座上，线圈平面与天平的水平面平行。可动线圈 C 悬挂在同侧砝码盘下方，使 C 与 A、B 共轴平行，且处于 A、B 之间，与 A、B 的距离相等。调节天平使之平衡。三线圈通电方法是，电流强度的大小均相同（为  $I$ ），但 A、C 电流反向，因而相斥；B、C 电流同向，因而

#### 电流天平结构示意图

相吸。所以线圈 C 将受到向下的磁力作用，必须在另一侧砝码盘内添加砝码，才能使天平重新平衡。从所加砝码可读出 C 所受合力  $F$  的值，它与  $I^2$  成正比，即

$$F=KI^2,$$

比例系数  $K$  决定于各线圈的大小、匝数以及相互间的距离。使用这一装置可直接秤量线圈 C 所受的磁力同时只要知道  $K$ ，便可推算出电流强度  $I$ 。在国际单位制中，电流强度单位“安培”是用两根平行放置的无限长载流直导线间单位长度上的相互作用力来定义的，这在实际测量中难以实现。电流天平提供了一种测定电流强度的标准化方法。只要按安培力公式准确计算并适当选取  $K$  值，电流天平就能按定义单位准确秤量出电流强度。

**电流源**（current source）用一恒定电流  $i_s$  和一个阻抗  $Z_0$  相并联的电路来表示的电源。 $Z_0$  为电源内阻， $Z$  为负载阻抗，如右图所示。

当  $Z_0 \gg Z$  时，流经负载的电流在改变负载的情况下基本上保持不变，这种电流源称为恒流源。内阻较大的电源通常可近似作为电流源，如晶体管输出端的等效电源等。

#### 电流源电路图

一个实际电源既可将它看作电压源，也可看作电流源，即对同一外电路而言，不管将电源处理为电压源还是电流源，它在外电路上产生的电压和电流是相同的。也就是说，对确定的外电路，用电压源或电流源表示是等效的，且可相互变换。

**电路**（electric circuit）传送电流的通路。电路一般由四个主要部分组成：电源、负载、联接导线与控制设备。电源是电路的能源，如电池和发电机，它的作用是将各种形式的非电能量转换为电能。负载是用电设备，如电动机或电子计算机等，它的作用是将电能转换为所需形式的非电能量。联接导线的作用是传输电能。控制设备的作用是执行控制任务，如开关等。

电路可按不同方式分类。根据电源性质分，有直流电路和交流电路等。根据联接方式分，有串联电路、并联电路、简单电路和复杂电路等。收音机或其他电子仪器设备中由晶体管、变压器、电容器、连接导线以及其他电子元件组成的网络也是电路。

电路断开时电流为零的状况称为开路，又称断路。电路两端直接连通的状况称为短路。在实际应用时要严防电源短路，因为一般电源内阻很小，短路时电流很大，电源提供的全部功率消耗在内电阻上会产生大量的热量，将损坏甚至烧毁电源。

**电纳**（susceptance）见导纳。



电偶极子 (electric dipole) 两个相距极近、等量

而异号的点电荷所构成的系统。如图所示，正、负两电荷间的距离  $l$  远比场点  $P$  到它们的距离  $r$  小得多。一个电荷的电量  $q$  和  $l$  的乘积称为电偶极子的电偶极矩  $P$ ，即

$$P=ql,$$

它是矢量，方向沿着两电荷的连线，自负电荷指向正电荷。

电偶极矩是表征电偶极子性质的物理量。对于复杂的中性分子电结构，如果其正电荷中心与负电荷中心不相重合，也可近似地认为是一个等效电偶极子。

电偶极子激发的电场的场强分布用极坐标 (见上图) 表示为

$$E_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p\cos\theta}{r^3},$$
$$E_\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p\sin\theta}{r^3},$$

式中  $\theta$  中电偶极矩  $p$  与矢径  $r$  间的夹角。在轴线上 ( $\theta=0$ )，有

$$E_\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}, E_r = 0; \text{在中垂线上} (\theta=90^\circ), \text{有} E_r = 0, E_\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}.$$

电偶极子在与它相距很远的点的电势  $V$  为

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cdot r}{r^3}.$$

在外电场  $E$  中，电偶极子会受到一力矩  $L$  的作用，它可表示为

$$L=p \times E.$$

$L$  的作用倾向于使电偶极子沿场强方向取向。

电气体发电 (electronic gas generating) 以一定压力、温度的运动流体 (气体、液体) 作为能源，使低级能 (热能、动能) 转变成直流电能的过程。在离子发生段，一个高压电源  $V_0$  的两个极分别接在离子发射极  $N$  和吸引极  $A$  上，如图所示。发射极是针形金属棒，

电气体发电示意图

吸引极是金属环。在高电压作用下，发射极  $N$  与吸引极  $A$  之间产生尖端放电，使通过的高速电介质流体 (通常是燃气) 部分电离。当  $N$  极是正极时，流体中的电子和负离子被吸收，负离子在  $N$  极上放出电子而呈中性。正离子被排斥，流向吸引极。但由于高速流体的带动，正离子未能被吸引极吸住，而流向集电极  $M$ ，使电流  $I_a=0$ 。集电极  $M$  上由于正离子集积而电位升高，当接有外负载时，就产生了电流  $I_c$ 。极间的静电场要阻止正离子向集电极流动，而高速流体带动正离子流向集电极，所以产生电流。这样，高速气流克服静电场所做的功，就转变成了电能，也就是实现了能量的直接转变，即直流发电。

电桥 (bridge) 由四个臂所组成的电路。如图所示，在支路联接端的一个对角线  $cd$  接电源，而在另一个对角线中接检测电流或电压的仪器。通常用于比较法测量各种电学量的仪器之中。若电桥中的电源采用直流电源，检测仪器采用检流计，这种电桥称为直流电桥，可用来测量电阻的数

值。如果电路中采用交流电源，检测仪器采用耳机或交流毫伏表，则成为交流电桥，可用来测量电容、电感等数值，也可构成滤波电路。

#### 电桥原理图

电容 (capacitance) 描述导体或导体系统容纳电荷性能的物理量。常用字母  $C$  表示。电容器的电容  $C$  以一个极板的电量与两极板间电势差

( $V_1 - V_2$ ) 之比来量度，即  $C = \frac{Q}{V_1 - V_2}$ 。电容的大小仅取决于极板的形

状、大小、相对位置以及极板间电介质的电容率。如果把组成电容器 (例如球状电容器) 的一极板移至无限远，则电容就变为导体的电荷  $Q$  与其电势  $V$  之比值，即  $C = \frac{Q}{V}$ ，称为孤立导体的电容。

实际上，电容普遍地存在于导体和器件中。导线、线路等单独段落所具有的电容称分布电容。线圈匝之间的电容称为匝间电容。由于元件的结构或排列等原因所引起的附加电容，统称为寄生电容，如极间电容或线间电容等。各种器件的输入电路所具有的电容称为输入电容。例如晶体管电路的输入电容即包括极间电容和输入引线间的寄生电容。寄生电容和分布电容往往会影响器件或仪器的高频特性。因此电子电路中十分重视这些电容的存在，并研究如何消除这些电容的影响。

电容的单位为库仑/伏特 (C/V)，即法拉 (F)。在实用中 F (法拉) 单位太大，常用  $\mu\text{F}$  (微法) 和  $\text{pF}$  (皮法) 作单位，它们之间的关系为

$$1\text{F} = 10^6\mu\text{F} = 10^{12}\text{pF}.$$

电容器 (capacitor) 两个任意形状的导体组合。这两个导体称为电容器的极板。把这两块极板和电池的两极联接就可使电容器充电，在极板上获得等值异号电荷。电容器的电容定义为  $C = \frac{Q}{V_1 - V_2}$ ，其中  $Q$  为任

一极板上的带电量， $V_1 - V_2$  是两极板间的电势差。电容是电容器的特性常数，取决于两导体的形状、大小、相对位置，还与极板间所充的电介质有关。下表列出几种简单电容器的电容公式。电容器的种类很多，按极板形状可分为平行板电容器、球形电容器、柱形电容器等；按其容量是否可变来分，有可变电容器、半可变或微调电容器、固定电容器等；按极板间使用的介质分，有真空电容器、空气电容器、云母电容器、纸质电容器、油浸纸介电容器、陶瓷电容器、涤纶电容器、电解电容器、聚四氟乙烯电容器、钛酸钡电容器等。

几种简单电容器的电容公式

名称 特征	平行板 电容器	柱形电容器	球形电容器
结构参量	极板面积为 $S$ , 极板间距 $d$ $d \ll \sqrt{S}$	内外圆柱半径为 $R_1$ 、 $R_2$ , 圆柱长为 $l$ $(R_2 - R_1) \ll l$	内外球面半径为 $R_1$ 、 $R_2$
真空时的电容 充满均匀介质 时的电容	$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ $C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d}$	$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$ $C = \frac{2\pi\epsilon_r \epsilon_0 l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$	$C = \frac{4\pi\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}$ $C = \frac{4\pi\epsilon_r \epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}$

电容器的重要指标有电容值和工作电压（即耐压）。电解电容器在使用时要注意正负极性。电容器可用于储能。例如，照机时闪光灯闪光的能量就来自电容器所储存的能量。电容器在电力系统中是提高功率因数的重要器件，在电子电路中是获得振荡、滤波、相移、旁路、耦合以及波形变换的主要元件。

**电容器的串联和并联**（series and parallel connection of capacitors）把电容器一个接一个地联接成单一线路为电容器的串联；把多个电容器的一极板联在一起，另一极板也联在一起而形成的组合为电容器的并联。由于电容器串联和并联时的等效电容和等效耐压会发生变化，在实际中经常采用。下表列出了电容器串、并联时的特征。

**电弱统一理论**（unified electro-weak theory）统一描述电磁相互作用和弱相互作用的理论。由美国物理学家格拉肖、温伯格和巴基斯坦籍科学家萨拉姆于本世纪 60 年代后期提出，故又称“格拉肖—温伯格—萨拉姆模型”或“温伯格—萨拉姆模型”。犹如电作用和磁作用是同一种电磁相互作用的两种不同表现形式一样，按照这个理论，电磁作用与弱作用是一种统一作用的两种不同表现形式，这种统一作用称为“电弱相互作用”。这个理论是在一些物理学家于 20 世纪 50~60 年代提出的某些理论和观念（如“对称性自发破缺”、“黑格斯机制”等）的基础上发展起来的。在这个理论中，原来存在四种质量均为零的矢量粒子（自旋为 1），其中一种带有电荷为 +e，一种带有电荷为 -e，还有两种粒子不带电。由于某种至今尚未从实验上发现的一类标量粒子（自旋为零）的作用，这四种矢量粒子转化为另外四种矢量粒子，其中一种粒子的质量仍然为零，这就是光子（ $\gamma$ ），另外三种粒子获得了很大的质量，称为中间玻色子，分别记为  $W^+$ 、 $W^-$  和  $Z^0$ 。由光子传递的作用就是电磁作用；由中间玻色子传递的作用是弱作用。由量子论可知，相互作用的力程大致与媒介粒子的质量成反比。光子的质量为零，所以电磁作用是一种长程力作用，作用力程为无限大；中间玻色子有很大的质量，所以弱作用是一种短程力作用，作用力程小于  $10^{-16}$  米。其次，光子是稳定粒子，而中间玻色子是不稳定粒子（寿命  $\sim 10^{-17}$  秒）。所以在后者传递相互作用的过程中尚未完成作用传递之前便有大量百分比衰亡，导致弱作用的强度比电磁作用小许多。电弱统一理论至今已

被大量加速器实验所证实,该理论所预言的三类中间玻色子已于 1983 年先后被发现。但是该理论所包含的标量粒子(称为黑格斯粒子)至今尚未从实验上发现,此外还有一些问题尚待进一步研究。

**电声学**(electro-acoustics) 声学的一个分支。主要研究声能和电能相互转换的原理、技术及应用。通常所指的电声,频率范围主要在可闻声,有时也涉及次声与超声频段。电声换能器主要有传声器、扬声器、送受话器、助听器等,它们是电声学所研究的主要器件和重要研究内容之一。电声技术主要研究声音信号的放大、记录、存储、传送、重放、交换、复制以及加工修饰等,应用于有线与无线的通讯系统和广播系统,以及会场、剧院、录音棚、高保真录放等方面,此外还应用于发展中的声控、语控技术,以及语言识别和声测等新技术。随着社会的发展和生产的需要,对电声学提出了更高的要求,今后发展的趋势是电声器件、设备向高保真度、立体声、高抗噪能力、高效率、高通话容量的方向发展;继续进行音质评价的研究,改善录放技术和音响加工技术;“机器人”与识别语言等语言信息处理技术。

**电视**(television) 是用无线电电子学方法实时传送活动(或静止)景物的图像和声音,并研究这种图像和声音信号的产生、处理、传输、再现以及存储的原理和应用的学科。它需要应用视觉生理、心理学、光度和色度学等原理,综合应用了无线电电子学、信号处理和信息科学、计算机科学以及通信等学科的成就。

**基本原理** 利用人的视觉对景物细节分辨能力的有限性和视觉暂留 0.1 秒的特性,采用电视扫描方法,首先对图像进行空间和时间分解,即把随时间空间变化的景物的像分解成亮度、色调和色饱和度相同的称为像素的微小单元。一帧(幅)完整的图像通常由几十万个不同的像素组成。然后应用通信中的时分复用技术,以一定的时间顺序传送按时空分布的像素,即用自左向右,自上而下的隔行扫描方法,将摄取的图像变成按时间先后顺序传送的电信号。为了减少闪烁和利用视觉暂留存储效应,将一帧图像分成场频为 50 赫(或 60 赫)、帧频为 25(或 30)赫的奇偶场传送,使其具有连续感和无明显的闪烁感。

电视传像是用电视扫描之法,将随时空变化的景物,经光电转换的摄像系统变成随时间变化的电信号,通过无线或有线信道传送到接收端,并利用电光转换的显像器件,再现被传送的图像。

**发展简史** 电视发展经历了三个阶段,即机械电视、电子黑白电视和彩色电视。

1884 年德国科学家尼普科夫发明了机械电视用的扫描盘;1925 年英国的贝尔德表演了实用的机械扫描电视;1930 年左右,英国和原苏联等国曾进行机械电视广播。1927 年美国范思沃恩发明了电子电视系统;1923 年美国的兹沃雷金发明了光电摄像管;1936 年贝尔德电视公司在英国进行电子黑白电视广播,从而开创了电子电视时代。在黑白电视基础上发展起来的彩色电视,最早始于 1951 年。美国曾经试播一种 CBS(场顺序)制彩色电视,由于不能与相当普及的黑白电视兼容,所以无法推广应用而停播。1953 年美国联邦通信委员会(FCC)批准了可与黑白电视兼容的 NTSC(National Television System Committee)制彩色电视,于 1954 年 1 月 1 日正式播出,从此,进入了彩色电视时代。1967 年 8 月 25 日德国采用 PAL(Phase

Alternation Line)制播送彩色电视;1967年10月1日法国开始采用 SECAM (Sequential Couleur à Mémoire)制。从此在世界上便形成了三种不同的彩色电视制式。中国现在采用的是 PAL—D 制式。

为了进一步提高彩色电视质量,满足人们不断增长的文化生活需求,现在正在研究和开发数字电视、MAC 制电视、电视多工、高清晰度电视和卫星电视等。

**彩色电视制式** 彩色电视是在黑白电视相当普及的基础上发展起来的,因此彩色电视信号通常包括反映彩色黑白兼容的亮度信号以及仅仅反映彩色的两个色差信号。根据三基色相加混色原理,经摄像系统将自然景物中的彩色光分解成红、绿、蓝三种相互独立的颜色光,并将它们变成相应的电信号。然后再经过矩阵编码处理得到便于传送的亮度信号和红蓝两个色差信号。其中色差信号再经过处理而变成色度信号,并将它叠加在亮度信号高端组成视频全信号,在同一信道中传输。在收端接收到这种信号后,经过解调,恢复为红、绿、蓝三个基色信号,加到彩色显像管上,激励相应的红、绿、蓝荧光粉,进行相加混色,复现出原来的彩色图像。

现行彩色电视制式的主要区别,是色差信号的编解码方式各异。对于 NTSC 制式来说,两个带宽不等的色差信号为 I、Q,采用正交抑载(平衡)调幅与同步解调技术传送。为改善 NTSC 制的相位敏感性,PAL 制在 NTSC 制的平衡正交调幅与同步解调基础上将红色度信号逐行倒相传送。SECAM 制则将红、蓝色差信号进行逐行轮换调频传送。从黑白电视制式导出的 NTSC、PAL、SECAM 制的系统主要特性如下表

黑白制式	M	BGH	I	DK	L
每帧行数	525	625	625	625	625
帧频/场频 (Hz)	30/60	25/50	25/50	25/50	25/50
行频 (Hz)	1574.264	15625	15625	15625	15625
视频带宽 (MHz)	4.2	5	5.5	6	6
伴音与图像					
载频之距 (MHz)	4.5	5.5	6	6.5	6.5
彩色副载频 (MHz)	3.58	4.43	4.43	4.43	4.25

频道号	频率范围 ( MHz )	图像/伴音载 频 ( MHz )	频道号	频率范围 (MHz)	图像/伴音载频 (MHz)
1	48.5~56.5	49.75/56.25	35	686~694	687.25/693.75
2	56.5~64.5	57.75/64.25	36	694~702	695.25/701.75
3	64.5~72.5	65.75/72.25	37	702~710	703.25/709.75
4	76~84	77.25/83.75	38	710~718	711.25/717.75
5	84~92	85.25/91.75	39	718~726	719.25/725.75
6	167~175	168.25/174.75	40	726~734	727.25/733.75
7	175~183	176.25/182.75	41	734~742	735.25/741.75
8	183~191	184.25/190.75	42	742~750	743.25/749.75
9	191~199	192.25/198.75	43	750~758	751.25/757.75
10	199~207	200.25/206.75	44	758~766	759.25/765.75
11	207~215	208.25/214.75	45	766~774	767.25/773.75
12	215~223	216.25/222.75	46	774~782	775.25/781.75
13	470~478	471.25/477.75	47	782~790	783.25/789.75
14	478~486	479.25/485.75	48	790~798	791.25/797.75
15	486~494	487.25/493.75	49	798~806	799.25/805.75
16	494~502	495.25/501.75	50	806~814	807.25/813.75
17	502~510	503.25/509.75	51	814~822	815.25/821.75
18	510~518	511.25/517.75	52	822~830	293.25/829.75
19	518~526	519.25/525.75	53	830~838	831.25/837.75
20	526~534	527.25/533.75	54	838~846	839.25/845.75
21	534~542	535.25/541.75	55	846~854	847.25/853.75
22	542~550	543.25/549.75	56	854~862	855.25/861.75
23	550~558	551.25/557.75	57	862~870	863.25/869.75
24	558~566	559.25/565.75	58	870~878	871.25/877.75
25	606~614	607.25/613.75	59	878~886	879.25/885.75
26	614~622	615.25/621.75	60	886~894	887.25/893.75
27	622~630	623.25/629.75	61	894~902	895.25/901.75
28	630~638	631.25/637.75	62	902~910	903.25/909.75
29	638~646	639.25/645.75	63	910~918	911.25/917.75
30	646~654	647.25/653.75	64	918~926	919.25/925.75
31	654~662	655.25/661.75	65	926~934	927.25/933.75
32	662~670	663.25/669.75	66	934~942	935.25/941.75
33	670~678	671.25/677.75	67	942~950	943.25/949.75
34	678~686	679.25/685.75	68	950~958	951.25/957.75

MAC 制这种制式采用多路模拟分量信号，简称代初发展起来的一种新的彩色编码方法。它将行政程的亮度信号以及红、蓝色差信号分量，在时域中按不同所示。

表中彩色副载频是按 M/NTSC 制为 3.58MHz，BG/PAL 和 D/PAL 为 4.43MHz，L/SECAM 为 4.25MHz 列写的。

由于制式不同，使电视信号传输时受其制约。在进行电视节目制作、

交换时需进行制式转换。摄像、录像、电视机都与制式有关。全制式可满足任一电视制式要求。单制式则只能用于相对应的制式，如 PAL—D 录像机只能适应中国采用的电视制式，不能录放美国、日本和台湾地区的 M/NTSC 制式的电视节目。有的 D/PAL 制的 VHS 录像机具有彩色制式放像转换功能，可播放 M/NTSC 制节目，但不能录制 M/NTSC 信号。比例进行压缩，然后分别置于行正程的不同时间段上，红蓝色差信号逐行轮换传送，构成时分复用模拟分量信号。按声音、数据信号与 MAC 信号的不同复用方式，分成 A、B、C、D、E 等的 MAC 族。目前已在卫星电视中应用的有 B-MAC 和 D<sub>2</sub>-MAC。我国已在研究采用 D<sub>2</sub>-MAC 的问题。MAC 制为提高彩色电视传输质量，统一彩色电视制式，进行高质量多路伴音，立体声传输，以及为过渡到数字电视、高清晰度电视等工作开创了新途径。

电视频道是指按电视图像与伴音信号的传送频带要求，将用于电视广播的 VHF、UHF 频段划分成若干个编号指配的上下频率范围。例如，中国的电视频道有 68 个，1~12 频道为 VHF 频段，13~68 频道为 UHF 频段。如上表所示。

电视接收机和录像机等频道都与指定的电视制式的频道相对应，能调谐在任一指定频道上收看电视节目。

**闭路电视** 又叫电缆电视 (CATV-cabletelevision)，通过电（或光）缆传输、交换、分配电视节目或数据的系统。1950 年前后随着广播电视的兴起，为改善广播电视的传送质量，出现了多用户共用一个天线的共用天线电视 (CATV-communityantenna television)，随后进一步发展成为传输、交换、分配电视图像、声音、数据的闭路电视。通过高频电（或光）缆将信息中心与用户终端联系起来，形成闭路电视网络。这种网络不仅可以传送多频道电视节目，自办节目，而且把分散在各地的闭路电视台、广播台、卫星站联系起来，能及时播发新闻、经济、教育、文化、艺术、金融等各种信息，供用户选看。

**电视重影** 电视电波经多路传输到接收天线引起主图像边缘出现干扰影子的现象。出现重影的主要原因，是来自直接或反射的电波有时间差，在图像上形成位移差，出现重叠的影子。完全消除重影的有效方法，还在研究之中，目前常用的方法是提高天线方向性，采用共用天线系统，使用单频道天线，使线路及馈线连接电缆及接头阻抗很好匹配等措施，使重影减弱。

**卫星电视** 由通信广播卫星向波束覆盖区内广大用户转发彩色电视。卫星电视具有覆盖范围大，不受地面距离限制、信号传输质量高，载频高，频带宽，容量大以及灵活可靠等特点。是数字电视、高清晰度电视、多路伴音、立体声广播、数据传输的重要传输手段，是电视广播的重要发展方向。卫星电视是将经过预处理的电视图像的视频和声音信号，以频分或时分复用方式形成基带信号，对主载频调频传输。由于载波频率、频道划分、传输频带、调制解调方式与现行的电视广播不同，因此，不能用普通彩色电视机直接收看卫星电视广播。为此需采用专门的卫星电视接收系统，接收卫星电视信号，经解调后，才能送到彩色监视器或接收机上收看卫星电视节目，或通过 CATV 系统分配到每个用户终端。

常用的卫星电视广播的下行频段有与通信共用的 3.7~4.2GHz 的 C 频段和 11.7~12.2 或 11.7~12.5GHz 的 Ku 频段，在这 500MHz 的频带中，分

成 24 个频道，每个频道的接收带宽为 27MHz 或 30MHz。

由卫星地面站向通信广播卫星发射信号，称为上行，经星载转发器进行频率变换和功率放大后向覆盖区内发射信号，称为下行。卫星电视接收站的天线尺寸因通信广播卫星的下行等效全向辐射功率(EIRPs)的大小而异，一般 EIRPs 在 30~55dBW 之间，接收站抛物面天线直径相应地为 6~0.7 米左右。定点在 87.5°E 和 105.5°E 的中国通信卫星和亚洲一号卫星在覆盖区中的 EIRPs 值约为 34(或 36)dBW，使用 3 米天线和 25K 低噪声下变频组件，能收到较高质量(3.5 级)的图像。亚洲一号卫星的北波束覆盖中国的 EIRPs 为 34~36dBW，使用 3、5、7、9、11、13、17、21 等频道转发电视节目。其中 5 频道为体育台，7 频道为 MTV，9 频道为 BBC，11 频道为中文台，13 频道为合家欢，17 为云贵台，21 为中央电视台第四套节目。5、7、9、11、13 频道用 M/NTSC 制播出彩色电视，立体声伴音节目。随着卫星电视的下行 EIRPs 提高，有可能用直径为 1 米左右的小天线，实现个体接收。

**电视测试图 (television test pattern)** 综合直观地评价彩色电视图像质量的图形。它由黑白矩形护边框、灰底白格背景、圆、台标、肤色、清晰度线、灰度级、白色中心十字线、彩条、黑白条、黑色针线以及标准时间、台号四周彩色图形等组成。其主要用途分述如下。

**黑白矩形护边框**的四周：用于校正图像的宽高比是否为 4:3；考察图像是否位于光栅中心。当接收机显像管上的光栅在图像正中心时，黑白边框上下左右对称，表明图像中心位置和行场扫描幅度是正常的。垂直边框还用于检查同步分离和箝位是否正常。

**灰底白线正方格背景**：用于检查行场扫描线性，幅度大小，几何失真和非线性失真，聚焦，动态会聚，色纯度等是否正常。当水平垂直线条粗细近似相同时，表明聚焦最佳。白条线清晰，无彩色镶边，表明动态会聚一致。有灰度背景，表明色纯正常。

**圆**：用于检查几何失真和非线性失真。大圆呈正圆形，表明电子圆的中心为图像的几何中心，行场扫描线性好，4:3 宽高比准确。圆边缘光滑说明隔行扫描正常。

**圆中男女肤色**：用于调整色调、色饱和度和亮度。

**圆内白色背景**的黑色台标；用于电视台台名标志。

**五级清晰度线**：用于检查水平清晰度，视频带宽。自左向右呈现五块粗细不同的垂直线分别代表五级清晰度线数和相应带宽(括号内数字，单位为兆赫)为 140(1.8)，220(2.8)，300(3.8)，380(4.8)，450(5.6)；或 64(0.8)，140，220，300，380。五块粗细垂线全部清晰，则表明频道微调、聚焦、视频带宽均正常，若 300 线(第四块)以上不清晰，表明视频带宽差，或显像管分辨力低。若在 300~380 线块上出现彩色斜纹，表明色通道带宽正常。反之，太窄，需加大色通道带宽。

**灰度级**：自左向右，由黑到白的灰度级层次分明，无色，表示彩色接收机的亮度、对比度调整配合准确，显像管白色平衡调整正确。

**圆中心的黑色背景**上的白色中心十字线：由中心垂直白线和两边对称分布的 5 根白十字线组成。用于确定全图中心位置，检查隔行扫描和静会聚。

**彩条**：自左向右，由白黄青绿紫红蓝黑 8 个垂直条组成。用于调整彩



色电视接收机的色调和色饱和度，使彩色鲜艳颜色准确。检查自动消色是否正常。

黑白条：由 250kHz 方波形成，幅度从白电平到黑电平。用于检查接收机亮度通道的瞬时响应，和是否有低频拖尾等现象。

黑色针：位于黑色背景中的白色矩形，用于检查接收天线性能或射频电缆的匹配程度，正常时，两边的黑色针线应无重影出现。

时间标志：供电视观众对时用。

圆外左右色差信号条块：用于检查接收机中的同步解调、延迟线、PAL 开关、G—Y 矩阵的工作性能。在正常情况下，左上角 270° 的 R—Y 方块呈青偏绿色，下角 90° R—Y 方块呈红偏紫色。左中间 G—Y (0°, 146°) 的竖条呈黄偏橙色。右上 180° 的 B—Y 方块呈黄偏绿色，下角 0° 的 B—Y 呈蓝偏紫色。右边中间的 G—Y (0°, 360°) 的竖条呈蓝偏青。左、右、上、下角的 R—Y、B—Y 工作在正常、交变两种状态。若在左上角的 R—Y 方块中出现青色（或红色），右上下角的 B—Y 方块出现蓝色或黄色，则说明 R—Y 和 B—Y 的同步解调的基准副载波相位不准。若 R—Y 和 B—Y 方块中出现“百叶窗”干扰条纹，说明 PAL 延迟线的相位和幅度不准。若关掉显像管红蓝电子枪，调节色饱和度电位器，正常情况下，两个 G—Y 竖条的亮度不变。反之，则变化，说明 G—Y 矩阵不准。

电势 (electric potential) 又称电位。描述静电场性质的一个物理量。静电场中某点的电势就是该点与选作电势为零的参考点之间的电势差。所以某点 a 处的电势定义为将单位正电荷从该点移动到电势零点处的过程中电场力所作的功，即

$$\varphi = \int_a^{\text{电势零点}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}。$$

当电荷分布在有限空间时，习惯上总是选取无限远点为零电势参考点，这时有

$$\varphi_a = \int_a^{\infty} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}。$$

若电荷分布延伸至无限空间，则零电势点必须选取在有限空间的某处。

由于静电场力在电荷移动过程中所作的功与所取的路径无关，所以选定零电势点后，场中各点的电势都具有确定的值，并可用它来描写静电场的特性。这也是对静电场可引进电势这个物理量的依据。

电势是电场空间坐标的标量函数，因此是标量场中各点处电势的值与零电势参考点的选取有关，而零电势参考点位置的选取有任意性，因此电势的值只有相对意义。

电势的单位为伏特。

等势面 又称等位面。在静电场中电势相等的点所组成的曲面。电荷沿等势面移动时，电场力对它不作功。例如，当导体置于静电场中并达到静电平衡时，导体内部的电势处处相等，导体表面便是一个等势面。

等势面有一个重要的性质，即等势面与电场线处处正交。若在画等势面时，使任意两个相邻等势面的电势差为常数，便得到电场的等势面图。此时，等势面较密集处，电场强度较大；等势面较稀疏处，电场强度较小。因此等势面图与电场线图一样，也是描述电场分布的一种直观图象。例如，

点电荷产生的静电场中等势面是以点电荷为中心的同心球面，且内密外疏。

**电势差** 又称电位差。反映场的特性的物理量。取足够小的电量作为试探点电荷  $q_0$ ，在静电场内任意两点  $a$  与  $b$  的电势能差  $W_a - W_b$  在数值上等于把该电荷从  $a$  点移到  $b$  点过程中电场力所作的功  $A_{a-b}$ ，此值与电量  $q_0$  成正比，电势能差与  $q_0$  的比值则与电荷本身无关，称为静电场内这两点的电势差。可表示为

$$\varphi_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \frac{A_{a \rightarrow b}}{q_0} \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}。$$

在直流电路中的电场是稳恒电场，也是无旋场，也可引进电势差的概念。这时电路中两点间的电势差又称为电压。

在迅变电磁场中，由于电场强度的环路积分不等于零，电场中  $a$  点至  $b$  点的  $\mathbf{E}$  的线积分与路径有关，故不能像静电场中那样引进与静电力做功相联系的、具有明显物理意义的电势和电势差概念。

在国际单位制中，电势差与电势具有相同的单位，都是伏特。

**电势梯度**也称电位梯度。表示电场内电势随空间变化程度的物理量。电场中某点的电势梯度是一矢量。其方向是该点处电势变化最大的方向，其值就是沿该方向上电势的变化率。如图所示， $S_1$  和  $S_2$  为相邻的两等势面，分别为  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ ，设  $\varphi_2 > \varphi_1$ ， $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi$ ， $P_1$  点处沿电势增加方向单位矢量记为  $\mathbf{a}$ ， $P_1$  和  $P_2$  两点之间的距离记为  $L$ ，则  $P_1$  点的电势梯度(记作  $\text{grad}\varphi$ ) 定义为

$$\text{grad}\varphi = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\varphi}{L} \mathbf{a} = \frac{\partial \varphi}{\partial L} \mathbf{a}$$

静电场中任一点处的电场强度  $\mathbf{E}$  等于该点电势梯度的负值，即  $\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi$ 。这一关系称为电场强度  $\mathbf{E}$  与电势  $\varphi$  的微分关系。

#### 电势梯度

电势梯度的单位与电场强度的单位是相同的，都是伏特/米。

**电势能** 电荷因为处于外电场中而具有的一种势能。这是由于静电场是保守场或势场而引入的一个概念。与重力势能的情况类似，点电荷在静电场中某一点处的电势能就是该点相对于参考点(电势零点)的电势能。点电荷  $q$  在电场中  $a$  和  $b$  两点的电势能差  $W_a - W_b$  等于将该点电荷从  $a$  点移至  $b$  点过程中电场力所作的功  $A_{ab}$ ，即

$$W_a - W_b = A_{ab} = \int_b^a q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}。 \quad (1)$$

若选定  $b$  点为电势零点，则  $W_b = 0$ ，因此电荷  $q$  在  $a$  点处的电势能为

$$W_a = \int_a^b q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}。 \quad (2)$$

当电荷分布在有限范围内时，一般选定无限远处为电势零点，这时电荷  $q$  在  $a$  点处的电势能可表示为

$$W_a = A_{a\infty} = \int_a^{\infty} q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}。 \quad (3)$$

电势差就是单位电荷的电势能差，因此静电场中  $a$  和  $b$  点的电势差与点电荷  $q$  在这两点的电势能差存在如下简单关系：

$$W_a - W_b = q(\varphi_a - \varphi_b),$$

即电荷  $q$  在  $a$ 、 $b$  两点的电势能差等于电量  $q$  与这两点间电势差 ( $\varphi_a - \varphi_b$ ) 的乘积。

在任何情况下，点电荷在电场力作用下总是从电势能高处移向电势能低处。在此过程中，减少的那部分电势能便转化为其它形式能量（如电荷的动能）。

电势差计 (potentiometer) 又称为补偿器。可用来测量电位差的最准确仪器。其原理如图所示。把开关  $S$  打向标准  $N$  侧，调节电阻  $R_h$ ，在检流计指零时  $E_N = I_w R_N$ ， $I_w = E_N / R_N$ ，式中  $E_N$  为标准电池的电动势，保持工作电流  $I_w$  不变， $S$  打向  $X$  侧，调节补偿电阻  $R_c$  至检流计指零，则

$$U_x = I_w R_c = \frac{E_N}{R_N} \cdot R_c。$$

乘积  $I_w R_c$  称为补偿电压  $U_c$ ，根据调节  $U_c$  的方式不同，补偿电路分为两种类型：用调节电阻  $R_c$  来调节  $U_c$  而保持电流不变的定流变阻式； $R_c$  固定而调节其上流过的电流值的定阻变流式。目前这两类方式都被广泛用于实际测量中。

直流电势差计将标准电动势与被测电压（或电动势）近似于直接并列比较，由上式说明，被测电压（或电动势）的值仅决定于电阻比值  $k = R_c / R_N$  和标准电池的电动势，因此测量准确度高。

#### 电势差计

测量准确度高的另一个原因是：电势差计在两次平衡时指零仪的指示都是零，即在灵敏度限定的范围内指零仪中没有电流通过。这说明在读数时电势差计既不吸收标准电池的能量，也不吸收被测对象的能量，从而确保它们原有的数值不变。检流计中没有电流流过还使得  $E_N$  和  $U_x$  的内阻或该回路导线电阻都不产生附加电压降。

不吸收测量对象中的能量而保持其原有状态，是补偿测量法的突出特点。所谓补偿法，其基本含义就是用与被测量同性质的已知量去补偿被测量，在实现补偿时二者的作用相互抵消的测量方法。由于二者作用相等，已知量的值就代表了被测量的大小。并且由于二者作用抵消，使测量回路中没有电流，所以又属于零值法，因而不消耗被测量的能量。

电势差计是将已知的标准电动势  $E_N$  分成连续可

调而又已知比例数的若干份数  $kE_N$  ( $k = R_c / R_N$ )，用这个已知电压  $kE_N$  去补偿未知电压  $U_x$ ，从而确定  $U_x$  的数值。由于电势差计是应用补偿法的典型仪器，所以被称为“补偿器”。由于补偿法的优点，电势差计的应用很广泛，不但应用于精密电测领域如测量电阻、电流、电功率等，而且经常采用自动补偿电路实现自动测量和控制。

电通量 (electric flux) 电场强度  $E$  的通量。表征电场分布情况的物理量。通过面积元  $dS$  的电通量  $d\phi_e$  为

$$d\phi_e = E \cdot dS = Ed \cos \theta,$$

式中  $\theta$  为面积元的法线方向与该点处电场强度  $E$  的方向之间的夹角。通过有限曲面  $S$  的电通量  $\phi_e$  为

$$\Phi_e = \iint_{(S)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}.$$

在静电场中，通过任一闭合面的电通量与该面所包围的总电荷  $q_i$  成正比，即

$$\Phi_e = \iint_{(s)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i,$$

式中  $\epsilon_0$  为真空介电常数。上式称为电学中的高斯定理。

在静电学中，电通量可通过电场线图象形象描述。某一曲面  $S$  的电通量在数值上等于穿过该曲面的电场线的条数  $N$ 。电通量为正，表示有电场线从该面的后方空间穿过该面而进入前方空间。电通量为负，表示有电场线从该面的前方空间穿过该面而进入后方空间。电通量为零，表示没有电场线穿过该面，或穿出和进入该面的电场线条数相等。

《电学实验研究》(Experimental Researches in Electricity) 英国物理学家、化学家法拉第的代表作。这部著作从 1839 年开始陆续出版，1855 年出齐。全书共三大卷，包括 30 个部分，三千余节。第一卷第一部分是阐述电磁感应的一组论文，包括：论电流的感应，论从磁产生电；论物质的一种新的电条件；论阿拉哥的磁现象，其中总结对电磁感应的发现，那是法拉第 1831 年 11 月 24 日在皇家学会上宣读过的。以下部分是论及不同来源的电的同一性，地球的磁电效应，导电性的新定律，电化学分解，自感现象，气体放电，伏打电堆理论，光的磁化，磁力线的说明，新的磁效应，最后部分是阐述磁化规律作为结束。该书从头到尾是典型的法拉第风格：内容分条叙述，语言简洁清新，完全不用数学。逐节阅读下去，一幅幅实验图画就会呈现在面前，完全可以仿照它们自己再做一遍，由此受到巨大的启发和引起丰富的联想，新发明、新创造便会在人们的头脑中逐渐形成。

这部著作既是法拉第一生从事电磁学研究的实践经验和劳动成果的结晶，也是他留给人类的最宝贵的科学遗产。这部著作虽与牛顿的《原理》一书不同，它不是以体系化、公理化而是以素材提供给读者，然而人们从中同样可以找到这位伟大科学家的许多深刻的观念和新奇的思想，长于实验和精于观察的本领，以及他的工作热情和对科学的献身精神。

**电压 (Voltage)** 参见电势差。

**电压互感器 (voltage mutual inductor)** 仪表中使用的互感器的一种。将交流高电压变换为低电压的装置。基本结构和工作原理都与变压器相同，但因为用于测量，故在设计上要求电压变换误差极小其初级线圈匝数  $N_1$  远大于次级线圈匝数  $N_2$ ，故能将高电压

**电压互感器**

变换成普通电表可直接测量的低电压，并使电表等与高压电路隔开。通常规定电压互感器的次级额定电压均为 100V，以便使与之联用的电压表、功率表和继电器等的电压线圈在制造上得以标准化。电压互感器常与电压表等一起组成专用测量仪器或保护装置。使用时初级线圈并联在待测高压交流电路上，次级与电压表等串联，如图所示。由于电压表等阻抗很高，这时的互感器便相当于次级无负载时的变压器。待测高压  $V_1 = (N_1/N_2) V_2$  也就等于次级电压表读数的  $(N_1/N_2)$  倍。电压互感器广泛应用于电力系

统中。使用时其次级线圈决不允许短路，否则将烧毁装置，造成事故。为防止高压漏电危及测量人员，铁芯及次级线圈的一端应接地。

**电压源 (voltage source)** 用一个恒定电动势 和一个阻抗  $Z_0$  相串联的电路来表示的电源。 $Z_0$  为电源的内阻， $Z$  为负载阻抗，如右图所示。该电源提供给负载的电压随负载不同而有所改变。

#### 电压源电路图

任何一个电源，例如发电机、电池或各种信号源，都含有电动势 和 内阻抗  $Z_0$ ，在分析与计算电路时，往往把它们分开，用右图所示的电压源等效电路来进行处理。一般在电源内阻较小时，大多采用电压源表示。当电源内阻较大时，往往采用电源的另一种表示法，即电流源表示。两种表示法是等价的，可以相互等效变换。

**电影 (film)** 把活动画面连续拍摄成一幅幅分立的照片，每相邻两幅上的动作只相差一点点，然后再把它顺序地映入人的眼睛，由于视觉的暂留现象，使人看到的感受是活动画面图像。1889 年爱迪生在伊斯曼连续底片的基础上发明了近代电影。他的原理与现在电影的原理基本一样，在 35 毫米宽的胶片两侧打上输送孔，使胶片移动，把活动着的物体一幅幅地拍摄下来。但是爱迪生放映电影时的方法是采用电灯透射，从上面用放大镜窥视。1890 年，已制成每秒钟能拍 40 张的活动图片。1895 年，法国的卢米埃兄弟制成了世界上第一架摄影机，并改革了爱迪生的电影放映机，将活动照片映射在布幕上，立刻吸引了大批好奇的观众，电影的发展从此拉开了序幕。

电影产生的初期，通用的银幕高宽之比是 16 22，电影界称之为标准银幕，这种银幕在我国十分流行。1953 年“西尼玛斯珂普”宽银幕系统问世。这种影片在拍摄时同样使用一条 35 毫米的电影胶片，但摄影镜头的光学系统是变形的，人和物都变成了瘦长的，而在放映时，只要在普通的放映机镜头前再加一变形镜头（还原镜头），人和物就能恢复原状，而形成了比标准画面的视野宽得多的宽阔画面。这种影片，电影界称之为“真宽银幕”影片。

后来，又出现了一种不用变形镜头，而只简单地将标准画面的高度压缩一些，使画面的高宽比例有所改变，这种影片，人们叫做“遮幅式宽银幕”影片，电影界称之为“假宽银幕”影片。

1947 年，原苏联青年工程师西姻扬·伊扎诺夫发明了立体电影，在莫斯科首映了立体故事片《鲁滨逊漂流记》，观众为之惊呼。立体电影在拍摄时使用两部摄影机，或者如“真景电影法”那样，使用有两个镜头的摄影机，分别代表人的左右两只眼睛。显影时供左眼看的胶片染成红色，供右眼看的胶片染成绿色，两份胶片用两台同步放映机同时放映在银幕上。观看者必须戴上有色眼镜，其中一个镜片为红色，另一镜片为绿色。观看者实际上是分别看到两个映像，两个映像在观看者头脑中叠合在一起，产生立体感。

在我国目前放映的立体电影有两种，一种是要戴眼镜（红、绿眼镜或是偏光眼镜）看的；另一种不戴眼镜而是由光栅银幕来产生立体感。

**电源 (electric source)** 把其他形式的能量转换成电能的装置。如发电机、电池、温差电偶等。发电机通常将机械能转换为电能；干电池、

蓄电池等将化学能转换为电能；温差电偶将热能转换为电能。

电源内部存在使正负电荷分离，并使它们分别积聚到电源正极和负极的非静电作用，称为非静电力。正是这种非静电力，使电源两极间产生并维持一定的电势差。不同电源的非静电力的来源不同。干电池、蓄电池等化学电源的非静电力是一种与离子的溶解和沉积过程相联系的化学作用；在一般发电机中，非静电力起源于磁场对运动电荷的作用（即电磁感应或洛伦兹力）；在温差电偶中，非静电力是一种与温度差和电子浓度差相联系的扩散作用。

在电子设备中，有时把变换电能形式的装置亦称为电源，如整流器（将交流电变为直流电）、信号发生器（将市用交流电变为各种频率的交流信号）等。

**电源的串联和并联**（series and Parallel connection of electric sources） 将一个电源的负极与下一个电源的正极相连，依次结成一串，称为电源的串联；将几个电源的正极连在一起，负极另连在一起所构成的组合，称为电源的并联。

串联电源组合的总电动势等于各电源电动势之和：

$$= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n,$$

总内阻等于组成串联的各电源内阻之和：

$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_n.$$

若串联所用的电源都相同，它们的电动势均为  $\varepsilon_0$ ，内阻均为  $r_0$ ，则串联电源的总电动势  $\varepsilon$  和总内阻  $r$  为：

$$\varepsilon = n \varepsilon_0,$$

$$r = n r_0.$$

对于并联电源组合，所用的电源通常都选用电动势和内阻都相同的。这时并联电源组合的总电动势等于一个电源的电动势，即

$$\varepsilon = \varepsilon_0,$$

总内阻等于一个电源内阻的  $\frac{1}{n}$ ，即

$$r = \frac{r_0}{n}.$$

不同电动势的电源并联时，往往会在电源之间产生电流，因而一般不宜采用。

电源串并联的应用场合不同。需要获得较高的电压时，可采用几个电源的串联方式；需要获得较大的电流时，可采用几个相同电源的并联方式。

**电源内阻**（internal resistance of source） 电源内部所具有的阻抗。电源内阻可能是纯电阻性，如干电池和蓄电池的内阻；也可能既有电阻性，又有电抗性（电感性或电容性），例如，发电机或电子技术中的信号源的内阻，同时具有电阻性和电抗性。

在直流电路中，考虑到电源的内阻  $r$  时，闭合电路中的电流强度为

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

式中  $\varepsilon$  为电源电动势， $R$  为外电阻。上式也可写为

$$\varepsilon = IR + Ir,$$

即电源电动势等于外电路上的电压降（即路端电压）与电源内阻上的电压降之和。这种关系称为全电路欧姆定律。化学电池的内阻并非恒定，新电池的内阻较小，用旧了的电池的内阻较大。新干电池的内阻约为  $0.5 \Omega$ 。

在电路中，为了减少电能损耗，应尽可能减小电源内阻。另一方面，在有些电子线路中，为了提高输出功率，需要使负载电阻  $R$ （或负载阻抗  $Z$ ）与信号源内阻匹配，匹配的条件是

$$R=r \text{ (或 } Z=Z_0 \text{ ) ,}$$

其中  $r$  或  $Z_0$  为电源的内阻。在这个条件下，电源的输出功率最大。

**电致变色** (electrochromatic alteration) 一种当化合物被加上一定电压后会改变颜色的效应，又称“电色显示”。此效应可用于数字显示。最初人们发现三氧化镍有此效应，但因改变颜色的速度太慢而未被用于数字显示。一般来说，具有每秒至少 10 次的反应速率，就不致于使视读感觉闪烁。在人们对氧化铌的电致变色的研究中，发现该种化合物改变颜色的速度较快，只须经  $1/50$  秒就能变色，因而被用于数字显示。

美国贝尔实验室对此项应用作出了贡献。他们用阳极生长法或喷射法在一镀锡表面上形成氧化铌薄膜，该薄膜呈透明色，当向位于其后面的接点施加一电脉冲时，经  $1/50$  秒，薄膜即由透明色变成深蓝色。贝尔实验室进一步研究表明，采用一种新的喷射法直接沉积，也就是将氧化铌薄膜沉积在钽上，那么该薄膜除具备阳极氧化铌薄膜的所有特点外，还具有通电时薄膜呈黄色、而施加反极性电压时薄膜又呈淡蓝色的特点，即可通过电的变化来改变颜色。电致变色显示的优点是：颜色的产生速度较快，且颜色的对比度好；颜色的消失速度也快，当向其接点施行一反极性电脉冲时，颜色即行消失；对于颜色有一定存储能力；如深蓝色约能保持 10 小时。

**电致发光** (electroluminescence) 在气体、液体和固体的放电过程中所产生的发光现象。日光灯是电致发光和光致发光的结合：灯管中的水银由于电极放电而被激发，水银原子发出的紫外线被荧光粉转换成可见光。硫化锌薄片两面外加电场也可产生电致发光。在快速电子轰击下，许多物质如红宝石、荧光粉等也会发光。阴极射线通过荧光屏发光广泛应用于电视、雷达、示波器、电子显微镜等设备，但需要高效率的、多种颜色的荧光粉。

**电子** (electron) 一种基本粒子，常用符号  $e$  或  $e^-$  表示。电子是一种非常稳定的粒子，是构成任何物质原子的基本组成部份。

电子的发现“电子”这一名词最早于 1881 年由斯通尼提出，并用它表示电荷的最小单位。根据法拉第电解定律，一摩尔任何原子的单价离子带有相同电量，其值就是法拉第常数  $F$ 。另一方面，根据阿伏伽德罗定律，一摩尔任何原子的数目等于阿伏伽德罗常数  $N_A$ 。因此电荷的基本单位应是  $C=F/N_A$ 。

汤姆孙于 1897 年首先从实验上确认电子作为一种粒子的存在。汤姆孙发现阴极射线在电场或磁场作用下能发生偏转，并由此测定了阴极射线粒子电荷的符号。另外由于电场力与电荷有关 ( $F_e=eE$ )；磁场力与粒子运动的速度有关，因而当粒子动能确定时，与粒子的质量有关

$$\left( E = \frac{1}{2}mv^2, F_B = evB = eB\sqrt{\frac{2E}{m}} \right)$$

汤姆孙于是对阴极射线同时施加电场和磁场，并调整到使它不发生偏转，此时电场力和磁场力相等，从而得到一个阴极射线粒子的电荷和质量之间的关系式，并由此确定出这两个量的比值。汤姆孙从实验上发现电子的电荷与质量之比，即电子的荷质比约为氢离子荷质比的 1840 倍。由此他得出如下正确的结论：“存在有比原子小得多的微粒”。

电子电荷 汤姆孙在测定电子荷质比之后不到两年，又分别测定了电子的电荷与质量。电子电荷的精确测量是密立根于 1910 年通过“油滴实验”首次得到的。通过实验发现油滴所带电荷的量是某一最小电荷的整数倍，这一最小电荷就是一个电子的电荷。现代测定的电子电荷的值为

$$e = 1.6021892(46) \times 10^{-19} \text{ 库仑。}$$

电子质量 从实验测得的电子荷质比及电子电荷的值，可定出电子的质量。现代测定的电子质量值为  $m = 9.109534(47) \times 10^{-31}$  千克。

电子自旋 实验发现，电子具有自旋角动量和自旋磁矩。为了理解这种现象，常常将电子比拟为不断地旋转的小陀螺。但是电子的自旋运动完全是一种“内禀运动”，是一种量子现象，完全不同于发生在时空中的粒子的运动或刚体的运动。电子的自旋角动量的值为  $\sqrt{s(s+1)}\eta$ ,

( $s = \frac{1}{2}$ )， $\eta$  为普朗克常数  $h$  除以  $2\pi$ 。电子自旋在空间中的取向不是任意的，且它在空间中某个方向(如外磁场方向)的投影只可能取两个值  $m_s h$

( $m_s = \pm \frac{1}{2}$ )。所以我们常称电子的自旋是  $\frac{1}{2}$  (以  $\eta$  为单位)。与电

子自旋相联系的磁矩在空间中某一方向的投影是  $\mu_z = -m_s \mu_B = \pm \frac{1}{2}$

$\mu_B$ ，其中  $\mu_B = 9.273 \times 10^{-24}$  焦耳/特斯拉，称为玻尔磁子。

电子的波动性 电子具有波动性的假设最早是法国物理学家德布罗意于 1924 年提出的。1927 年美国物理学家戴维孙和革末通过电子束对晶体的衍射实验证实了电子具有波动性的假设。电子的德布罗意波的波长与它的动量  $P$  之间存在如下关系：

$$P = h/\lambda$$

由这个关系可以证明，对于宏观现象中运动的电子(如示波管，显像管中的电子束，或加速器中的电子束)，电子的德布罗意波波长与它们运动的线度相比非常非常小，因此电子的波动性在这些情况中完全可以忽略，电子运动的轨道概念可以保留，经典力学理论仍然适用。但是对于微观领域中电子的运动(如原子中电子的运动)，其德布罗意波长可与运动的线度相比拟，甚至更长，电子的波动性在这些情况中非常显著，电子运动的轨道概念不再适用，经典力学理论也不再适用。所以在微观领域中要用量子理论。

正电子 与电子相对应，自然界中还存在“反电子”，或称正电子。根据量子理论，自然界中的任何基本粒子都存在相应的反粒子。正电子的电荷为正，其电量、质量、自旋等与电子相同。故常用符号  $e^+$  表示。英国物理学家狄拉克于 1930 年首先从理论上预言了正电子的存在。美国物理学



家安德森于 1932 年首先从宇宙线实验中发现了正电子。正电子在真空中是稳定的，但是当它与电子相遇时便立即发生“电子对湮灭”而转化为光子或其他粒子。

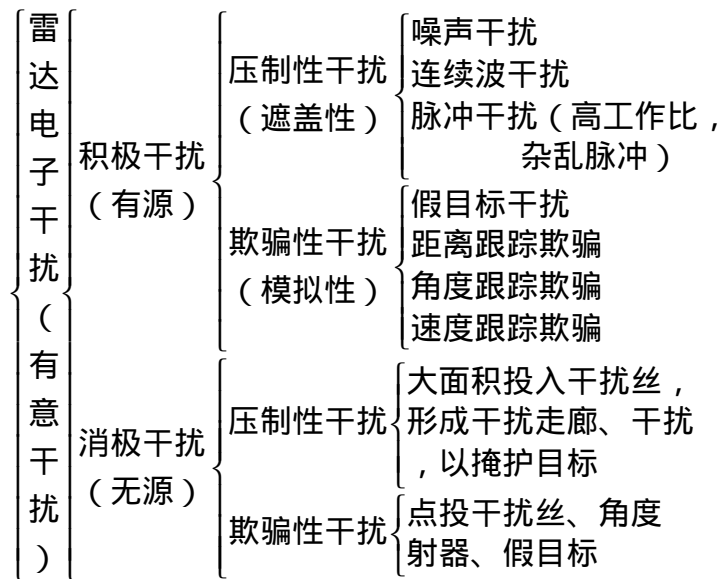
**电子的大小** 如果电子具有有限线度或内部结构，则必然会在高能散射实验中显示出来，迄今尚无迹象表明电子有内部结构。最新实验表明，如果电子有大小，其线度将不会超过  $10^{-18}$  米。

**电子鼻 (electron nose)** 一种模仿人鼻嗅觉功能的仪器，亦称“嗅敏仪”。它主要由传感和检测两部分元件组成。传感部分作为“鼻子”是一种对气体敏感的嗅敏半导体元件，一般采用以二氧化锡为主的一种 N 型金属氧化物半导体。该种半导体是一种多孔型的烧结体，粉末颗粒仅为 0.1 微米，因此对气体的吸附本领特强，它的嗅觉功能比人鼻还要灵敏。检测部分则采用桥式电路。电子鼻的工作原理是：由于嗅敏半导体元件具有相当大的吸附气体的表面，当气体分子被元件吸附时，元件的电导率发生变化，即元件的电阻发生变化。而检测部分是以嗅敏半导体元件为电桥的一臂，开始时将电桥调节到平衡，输出为零，当元件嗅到气体时，电阻值发生变化，此时输出就不为零，电表上的读数即为气体浓度的相对大小。用这种仪器可以辨认出氢、一氧化碳、不饱和烃类等几十种易燃、易爆及有毒的气体。

**电子对抗 (electronic warfare)** 为削弱、破坏敌方电子设备正常工作，保障己方电子设备正常工作而采用的综合技术措施。其实质是，战争双方利用专门的无线电子设备和器材争夺对电磁频谱的有效使用权。这包括两个方面：一方面利用专门的无线电电子设备（电子侦察和干扰设备）破坏和减弱另一方无线电电子设备（通信、雷达、遥控和导航等）的威力和效能，这就是电子侦察和电子干扰；另一方面采取一定的技术措施来防止和消除对方从事的电子侦察和电子干扰工作，以保证己方电子设备正常工作，这就是电子防御。例如在雷达领域，电子对抗包括对敌方雷达的侦察和干扰，对己方雷达的掩蔽和防护，以达到反侦察和反干扰的目的。

电子侦察就是使用电子侦察装置对敌方的雷达、通信、制导等电子装备所发射的信号进行截获、测频、测向、分析和识别，查明敌方电子系统及其各种参数，以便进一步采取对抗措施。电子侦察包括情报侦察和技术侦察：情报侦察分战略侦察和战术侦察。例如用侦察卫星发现敌方洲际导弹及战略部队的部署，以及用远程电子侦察设备对敌人导弹基地进行监视等均属于战略侦察的范围；陆、海、空军及民兵装备电子侦察设备，以发现敌方军事部署、动向和企图，则属于战术侦察的范围。技术侦察是以获取敌方电子技术情报为主要目的的侦察。通过电子技术侦察所得到的大量技术情报，可判断敌方军事电子学的发展水平和动向。

电子干扰是指有意识地发射或转发某种电磁波，扰乱或欺骗敌方的无线电设备，使之不能正常工作或完全不能工作。对于不同的领域，有不同的电子干扰类型。以雷达干扰为例来说明分类特点：



电子防御是指防御敌方电子侦察和干扰的技术和方法。例如通信反侦察的措施有通信伪装、快速通信、保密通信、多波道通信等。通信抗干扰主要手段有：采用隐蔽的通信信道，改用备用频率，用几个频道同时通信，使用定向天线，增大发信机的功率，缩小通信机的通频带等。

随着军事电子技术的发展及技术分支的增多，电子对抗所包括的技术范围也越来越广。电子对抗的范围，在频域上包括射频对抗、光学对抗（也称光电对抗）和声学对抗三个技术领域： 射频对抗：按对抗的对象又可分为通信对抗、导航对抗、雷达对抗、制导对抗、对遥控遥测系统的对抗以及对无线电信号干扰等。这些设备大多工作在射频波段，因此整个射频波段都是进行电子对抗的领域。 光电对抗：包括红外对抗、电视对抗和激光对抗等。光波也是一种电磁波，因此光学对抗也是射频对抗频率扩展的结果。 声学对抗：指海下的电子对抗。在海洋中，潜艇、船舰或新型雷主要靠声学探测设备来发现和跟踪目标。水声对抗是专门用来对声学探测设备（声呐）进行侦察和干扰的措施。

**电子伏特 (electron-volt)** 常用来表示微观粒子或微观系统能量的一种单位。以符号 eV 表示。等于一个电子通过电势差为 1 伏特的电场过程中所获得（或减少）的动能。1eV=1.602 × 10<sup>-19</sup> 焦耳。1MeV=10<sup>6</sup>V 称为 1 兆（百万）电子伏特，它的 1 千倍以 GeV 表示，即 1GeV=10<sup>3</sup>MeV=10<sup>9</sup>V。

**电子管 (electron tube)** 借助电子在真空或者气体中在电场和磁场中的运动而构造的一种电子学器件。通常有一个发射电子的阴极和一个接收电子的阳极，还可能有控制电子发射和运动的栅极或者其他辅助电极。整个器件密封在由玻璃或金属制成的管壳内，内部的各电极与壳上的各引脚相连，管壳内部抽成真空，残余气体压强为 10<sup>-4</sup> ~ 10<sup>-8</sup> 帕。有的电子管可能充入少量特殊气体。电子管的结构如图所示。当灯丝通电后，加热阴极并使之发射电子，改变管内各栅极的电位和阳极的电位，使电子管内各电极间的电场发生变化，从而控制电子的运动，改变阳极电流。

#### 电子管结构及符号图

电子管按电极数目来分类，可分为二极管、三极管、四极管、五极管、六极管、七极管和八极管等。有些电子管内包含两部分或更多的部分，成为复合管，如双二极管、二极-三极管、三极-五极管等。按用途可分为整

流管、调制管、收信管和发射管等。按工作原理可分为光电管、磁控管等。

按工作频率又可分为低频管、高频管、超高频管等。电子管的主要用途是：无线电广播、无线电通信、雷达、工业加热和粒子加速器等。

**电子光学 (electron optics)** 研究电子束在电场或磁场中的运动规律及轨道的学科。电子束在静电场和静磁场中的行为与光线通过不同折射率介质时的行为相似，因而可以用几何光学和物理光学的方法来描述电子束在电场和磁场中的行为。通过适当形状的一组电极所产生的静电场能使电子束聚焦，这种静电场称为“静电透镜”。也可采用适当结构的通电线圈形成能使电子束会聚的磁场，这称为“磁透镜”。

电子束的聚焦、偏转以及电磁透镜等问题均属于电子光学研究的范畴。许多电子器件如阴极射线管、显像管、摄像管、质谱仪、电子显微镜等，都是按照电子光学的原理设计和工作的。电子光学的定律对于任何带电粒子流都成立，因此它也可应用于离子器件。

**电子壳层 (electrons shell)** 参见原子结构。

**电子论 (electron theory)** 根据物质电结构的假说以解释各种物理现象的经典理论，由荷兰物理学家洛伦兹提出。在物质电结构中，最早由韦伯引入荷电粒子的概念。此后黎曼、克劳修斯都倾向于认为，电磁现象是由于荷电粒子的存在和它们的运动。麦克斯韦建立电磁场理论之后，用荷电粒子去解释电磁现象的想法减弱了，但洛伦兹仍坚持这种观点。他引进荷电粒子与电磁作用的洛伦兹力，并将电磁扰动以有限速度传播的概念引入荷电粒子的相互作用中，于是电磁波经过媒质所呈现的各种客观现象可归结为电磁波与物质中在准弹性力作用下的电子相互作用的结果。这样，微观的电动力学方程就变得简单明确，而宏观媒质的电动力学方程可以从这些简单的微观方程导出。该理论不仅能解释媒质中一系列的电磁现象及媒质在电磁场运动中的一些效应，包括推出运动媒质中光的传播速度；还能解释媒质的色散和吸收及金属方面的一些性质，从而成为电磁理论的一个重要进展。根据该理论，洛伦兹又研究了电子运动对光和电磁现象的影响，算出洛伦兹变换，成为向狭义相对论发展中的一个重要环节。再则该理论经过相对论和量子论扩充后，已成为现代原子物理学的基础。

**电子窃听 (electronic eavesdropping)** 指在谈话人并不知晓和未经其同意的情况下，以电子设备截听其谈话的行为。在历史上，最普通的电子窃听形式是线路窃听，以此窃听电话和电报通讯。线路窃听的起源可以追溯到电报通讯开始使用的时候。电话线路的窃听则始自 19 世纪 90 年代。以后为窃听谈话，发展了电子侦听器。可分为两种。一种是利用侦听对象室内已有的设备，诸如电话机、收音机、电唱机、电视机、扩音喇叭或磁带录音机，把它们当作传声器、发射机或电源；另一种则是独立的窃听装置，它利用了现代技术的成果，诸如微型电路、小型陶瓷传声器和小型电池等，使窃听器的体积越来越小。

侦听对象自己的设备给安装窃听器提供了条件。任何扬声器都能起传声器的作用。侦听对象的设备内的直流电源可方便地被利用。侦听对象的设备与电源线或信号线相连接，而这种线路可把截听到的谈话传送到便于进行录音的地方。

窃听器的设计技巧在各国情报部门中达到了很先进的水平。晶体管、微型电路和激光、空间时代的一切技术成果，革新了电子窃听技术。最有

效率和最便宜的收听装置是用集成微型电路制成的无线电传话器。100 线典型的微型电路可以装在一块比一张邮票还要小和还要薄的器材上。这种传话器可以藏在扑克牌中或墙纸的背面。

新的窃听手段是应用激光的窃听装置。光线从几百米之外定向发射至侦察目标，它能对房间中谈话造成的窗玻璃极微小的振动作出反应，从而不被察觉地收听到谈话内容。这种窃听方式是较难侦破的。

**电子显微镜 (electron microscope)** 利用电子束代替光束来照射物体并能形成一极高放大倍数的像的显微镜。电子显微镜中的电子束通过作为电子折射媒质的静电透镜或磁透镜进行聚焦。利用足够高的加速电压，能够产生出波长比普通光要短数千倍的电子波。根据显微镜原理，波长越短，其分辨本领越大。所以电子显微镜的放大倍数比普通光学显微镜大几千至数十万倍。

电子显微镜有透射电子显微镜、扫描电子显微镜和发射式电子显微镜等多种。透射电子显微镜的原理如图所示。与光学显微镜十分相似，它由以下几部分构成：产生等速电子束的电子源，把电子集中在样品上的聚光镜，移动样品（电子束能透射）的样品台，物镜，投影镜和观察终像的荧光屏。为了能永久记录图像，可用照相底片或胶卷来代替荧光屏。为使电子束自由行进，整个仪器的真空度必须达到约  $10^{-4}$  毫米水银柱。

电子显微镜有两个主要用途：观察那些用普通光学显微镜不能分辨的精细结构，如生物中的病毒、蛋白质分子结构、化学中大分子结构等。对这些研究大多采用透射电子显微镜。对发射电子的表面进行研究。主要对固体表面进行研究。扫描电子显微镜在这方面起着越来越重要的作用。发射式电子显微镜则用于特殊的研究目的。有些特殊显微镜则利用质子束、X 射线束或正离子束代替电子束来获得放大影像。

**电子学 (electronics)** 以电子运动和电磁波及其相互作用的研究和利用为核心而发展起来的应用科学和技术。又称电子技术。电子和电磁波在真空、气体、液体、固体和等离子体中运动时产生的许多物理现象和物理效应，以及电子和电磁波的相互作用的物理规律构成了电子学基础研究的主要内容。电子学不仅致力于这些物理现象、物理效应和物理规律的研究，尤其致力于这些物理现象、物理效应和物理规律的应用。

**电子学发展简史** 电子学的发展首先是从利用电子器件开始的。它是在早期的电磁学和电工学的基础上发展起来的。它的诞生迄今只有 100 年左右的历史。1895 年，意大利人马可尼在赫兹实验的基础上成功地进行了 2.5 公里距离的无线电报传送实验。1896 年，俄国人波波夫也独立地进行了约 250 米距离的类似试验。此后数年，马可尼的研究将无线电报的传送距离不断延伸，1899 年实现了跨越英吉利海峡传送无线电报的试验；1901 年，完成了跨越大西洋的 3200 公里距离的试验。无线电报的发明，是人类利用电磁波的一项重大成就，电子学从此进入了一个研究和利用电磁波的极其兴旺的时期。

1883 年爱迪生效应的发现，预示着新的电子元件即将问世。1904 年，英国人弗莱明首先把爱迪生效应付诸实用，发明了二极电子管。1906 年，美国人德福列斯特发明具有放大作用的真空三极管。它的产生是电子学发展史上的一次重大突破。它不仅为当时蓬勃发展的无线电报通信事业提供了一种极其有用的器件，而且开创了真空电子学研究领域，由此取得了许

多成就，如电视、雷达、计算机的相继发明。1919年英国首先建成播发语言和音乐的无线电广播电台。此后无线电广播事业发展极其迅速，世界各地建立了各种电台，波段从中波扩展到短波，调制方式从调幅扩展到调频、脉冲调制等。随着电台的发射功率的增大，电台广播的覆盖面越来越大，人造卫星的发射成功，实现了卫星直播，使覆盖面获得更进一步的扩大。1927年英国人贝尔德成功地用电话线路实现把图像从伦敦传至大西洋中的船上。不过它还不是全电子电视。兹沃雷金在1923年和1924年相继发明了摄像管和显像管，对电子电视作出了杰出的贡献。1931年他组装成世界上第一个全电子电视系统。广播、电视的发明，不仅丰富了人类的文化生活，而且为人类提供了一种公共的信息媒介。1936年，英国人沃林-瓦特设计建成警戒雷达，十分有效地警戒了德国轰炸机的侵袭。1938年，美国研制成火炮控制雷达，大大地提高了火炮的命中率。1940年，制成能产生大功率微波的多腔磁控管，次年，研制成功微波雷达。在整个第二次世界大战期间，雷达成了电子学中最活跃的部分。

1946年，美国制成了大型电子数字积分计算机（ENIAC）。但是，这种计算机的程序仍然是外加式的，存储容量不大。数学家诺伊曼等提出了一个全新的存储程序式通用电子计算机方案——电子离散变量自动计算机（EDVAC），它是电子计算机发展中的一项重大突破，有力地推动了存储程序式计算机的生产。从此以后，电子计算机的应用越来越广泛，从科学计算扩展到事务管理、过程控制、情报检索、人工智能等许多领域，对人类的生产和生活产生了巨大的影响。

正当电子管进入全盛时期，美国贝尔实验室的物理学家认识到电子管在体积、功耗、寿命等方面的局限性，将限制电子技术的进一步发展。1948年该实验室的巴丁和布喇顿两人合作研制成功点接触型晶体管。1949年，肖克莱提出了P-N结理论。1950年晶体管开始进入工业化生产阶段（由于研制成功晶体管，上述三人共获1956年诺贝尔物理学奖）。1957年，贝尔实验室的斯帕克斯发明面结型晶体管，克服了点触式晶体管的缺点。晶体管的诞生是电子学的第二次重大突破。电子学在以后取得的许多成就，如集成电路、微处理器和微型计算机等，都是从晶体管发展而来的。

1952年，英国学者达米尔首先提出制造单块半导体集成电路的思想。1957年，英国普列斯公司与马尔维尔雷达研究所协作制成了触发器电路。1958年美国的开尔贝制成第一个半导体集成电路。1961年，美国开始生产半导体集成电路。集成电路的出现是电子学的第三次重大突破。

集成电路一经问世，发展就极为迅速。1962年制成了包括12个元件的小规模集成电路。1966年制成了包括50个门（数百个元件）的中规模集成电路。1967年第一块大规模集成电路问世。1977年，在30平方毫米的芯片上制作15万个元件的超大规模集成电路诞生。大规模集成电路的问世是电子学的第四次重大突破，使电子学进入微电子学时期。

1957年，原苏联发射人造地球卫星成功，宣告了空间时代的到来，促进了遥感、遥测、遥控技术的发展，也推动了卫星通信技术的发展。使电子学出现一次大飞跃。

电子学发展的一个重要方面，表现在电磁波谱利用的扩展上，特别是对光频段（包括红外和紫外）的开拓和利用上。1954年，美国人汤斯用致冷的氨分子作工作物质，研制成世界上第一台微波激光器。1958年汤斯和

肖洛将微波受激辐射的原理推广到红外和光频段。1960年，美国人梅曼研制成第一台激光器——红宝石脉冲激光器。激光器的出现，导致了大容量光纤通信的问世，使用于信息技术的电磁波谱，从无线电频段扩展到光频段，从而使已经显得十分拥挤的无线电频段得到了缓解。

电子学所取得的成就是多方面的，每一分支专业或学科都有自己的应用基础科学的成就。理论与实践，循环往复，相辅相成，不断提高，把整个电子学推向一个又一个新的阶段。

**电子学的学科体系和基础** 现代电子学具有一个庞大的学科体系，它包含了众多分支。这些分支通常可划分为四大类，即：系统和大系统技术；基础理论与基础技术；元件、器件、材料与工艺；交叉学科类。各类中又包含许多分支学科。在系统与系统技术类中，分支学科有：通信、广播、电视、雷达、导航、电子对抗、计算机、能电子系统以及综合多种系统技术的大型电子系统等。其共同特点是用电子学方法实现具有某一种或多种社会和军事应用的功能。在基础理论和基础技术类中，分支学科有：电子线路与网络分析、微波、天线、电波传播、测量、电源、显示技术、信号处理、信息论、自动控制原理、可靠性理论等。它们是构成功能性电子系统所需的各种技术手段或基础理论。在元件、器件与材料、工艺类中，分支学科有：固态电子器件与集成电路、真空电子学、电子元件、电子材料及有关生产技术等。这一类分支学科可以说是电子学的物质基础。在交叉学科类中，目前主要有：量子电子学、核电子学、空间电子学、生物与医学电子学、射电天文学与雷达天文学等。由于电子学不断与其他学科交叉渗透，还将会形成许多新的分支学科。

电子学应用的范围越来越广泛。任何应用都涉及电子器件和电子电路。电子器件的种类很多，习惯上分为有源器件和无源器件两大类。有源器件主要有电子管和晶体管。电子管包括真空管和充气管。按功能和应用来分类，真空管可分为普通电子管、图像管、光电管和微波电子管等四类。普通电子管用于整流、放大、振荡、变频和开关等，有二极管、三极管、四极管和五极管等类。图像管包括阴极射线示波管和电视显像管，是一种显示光图像的真空管。光电管是在光照射下产生电信号的器件。最简单的光电管为光电二极管；复杂的如电视用的摄像管。微波管即产生或放大微波的电子管。常见的微波管有磁控管、速调管、行波管等。充气管是利用气体放电原理而工作的电子管。常用在电子电路中起控制、整流、稳压、指示等作用。晶体管指有源的半导体器件，如半导体二极管、晶体三极管、场效应晶体管、半导体闸流管等，其主要用途为控制、放大、振荡和开关等。晶体管进一步发展为集成电路，成品日趋小型化，现已制成在1立方厘米体积内可以包含上百万个晶体管的超大规模集成电路。

无源器件在电子电路中起重要的作用，主要有电阻器、电容器、电感器。

电子电路的种类繁多，最常用的有：电源电路，它通常包括整流器（将交流变为直流）、滤波器（用以除去剩余的交流成分）、稳压器（对电源起稳压作用），以及为了从直流电源获得交流或脉动电流时，采用的变换器或断续器电路。开关和定时电路，它比单纯采用机械的开关或定时装置更加可靠、灵敏、迅速，包括开关和延时器、多谐振荡器及门电路等，其中多谐振荡器是一种广泛使用于二进制计数器的电路，而各种门电路是计

算机中逻辑处理大量采用的电路。放大器的基本作用是提高信号的功率或幅度，用以放大的有源元件通常是电子管或晶体管，在放大电路上通常按其工作频率分为声频、视频、射频和微波放大器。振荡器是产生一定波形和频率信号的装置，广泛应用于测试仪器中的信号发生器以及定时或计数装置、无线电和电视发射机或接收机、感应加热设备以及雷达系统等。

**电子衍射仪 (electron diffraction)** 电子波 (具有一定能量的电子) 落到晶体上时，被晶体中原子散射，各散射电子波之间产生互相干涉的现象，叫做电子衍射。1927 年期间发现了单晶和多晶的电子衍射现象，它证实了德布罗意提出的电子具有波动性的设想，构成了量子力学的实验基础。电子衍射仪的装置结构原理如图所示。阴极发射电子，在阳极高压作用下被加

#### 电子衍射原理图

速，经过阳极 A 的光阑孔和磁透镜 L 到达试样 S 薄片上，被试样薄片衍射后在荧光屏或照相底板 P 上形成电子衍射图样。根据电子的加速电压的高低，分为高能电子衍射 (数万伏至数十万伏) 和低能电子衍射 (数十伏至数千伏)。高能电子衍射主要用来研究薄箔、薄膜、小颗粒 (厚度或直径为  $10^{-9}$  至  $10^{-6}$  米) 和分子的结构，也用来研究晶体物质的表面结构。低能电子衍射主要用来研究单晶表面结构以及与表面横向周期性变化相联系的那些表面过程。

**电子音响合成器 (electronic sound synthesizer)** 一种用电子技术产生、控制、变换的能够适应人们不断丰富感受、想象和表达能力的新颖乐器。它可以维妙维肖地模拟种种传统乐器的音色，又可以真实地模拟乐音以外的风浪、车马、人声、鸟鸣等自然界存在的音响，也可以把一种声音改造成另外一种声音，更重要的是还可以产生出许多过去没有的独特音响，如所谓的宇宙声等等。

最早应用电子技术来合成音乐的是美国一位著名声乐专家奥尔逊，他于 1950 年制成世界上第一台合成器。后来另一个美国人摩格巧妙地利用控制电压，使音量、音色自由地加以改变，从而产生了千变万化的音响。由于传统的管弦乐器和电子琴、电吉他等电子乐器的音色基本上是固定的，而合成器具有灵活多变的奇异特性，因此在乐团、舞台、电影、电视等各种音响效果的制作中得到了越来越广泛的应用。

现在，许多国家都在对合成器进行大量的研究和生产。世界上一些主要的音乐学院把合成器作曲列入教程。合成器在未来的音乐世界里有着远大的发展前景。

**电子云 (electron cloud)** 表示原子或分子内的电子在其原子核附近空间概率分布的俗称。当用图形表示这种概率分布时，可用浓淡程度表示各处概率的大小，浓度愈深，则表示电子在该处出现的概率愈大；反之亦然。原子中的电子在空间中的运动状态常用三个量子数，即主量子数  $n$ 、角动量量子数  $l$  和磁量子数  $m_l$  特征，因此不同状态或具有不同量子数的电子将具有不同的空间概率分布，或者说具有不同形状的电子云。

**电子组态 (electron configuration)** 原子内同科电子的状态。原子中电子的状态可用四个量子数，即主量子数  $n$ 、角量子数  $l$ 、磁量子数  $m_l$  和自旋磁量子数  $m_s$  表示。主量子数  $n$  和角量子数  $l$  相同的电子称为同科电子。原子中的电子壳层是以  $n$  和  $l$  来标记的。若有  $x$  个电子其  $n$  和  $l$  均相

同，则这  $x$  个电子的组态可记为  $n l^x$ 。例如氦原子处于基态时，其电子组态为  $1s^2$ ；氧原子处于基态时，其电子组态为  $2s^2 2p^4$ 。当氧原子中的一个外层  $2p$  电子被激发到  $4s$  态时，该受激氧原子的电子组态为  $2s^2 2p^3 4s^1$ 。从电子组态可以看出原子中电子在各个壳层上的分布情况。参见原子结构。

**电阻 (resistance)** 描述电路中两点间在一定电压下决定电流强度的一个物理量。常用符号  $R$  表示。一段导体 (不包含非静电力) 的电阻在数值上等于导体两端的电压  $V$  与通过该导体的电流强度  $I$  之比，即  $R = \frac{V}{I}$ 。其单位为欧姆 ( $\Omega$ )。电阻的倒数  $\frac{1}{R} = G$ ，叫做电导，单位为西门子 (S)。电阻或电导的量值反映了导体的导电性能。

**电阻率和电导率** 不同材料具有不同的电阻。金属导体的电阻最小，绝缘体的电阻最大，半导体的电阻介于导体和绝缘体之间。导体的电阻取决于它的形状、大小和材料的性质。对于由一定材料制成的横截面均匀的导体，它的电阻  $R$  与长度  $l$  成正比，和横截面  $S$  成反比，即  $R = \frac{l}{S} \rho$ ，式中  $\rho$  叫做电阻率，单位欧·米 ( $\Omega \cdot m$ )。电阻率的倒数  $\frac{1}{\rho} = \sigma$

叫做电导率，单位为西每米 (S/m)。电阻率和电导率都是表征材料导电的特性参数。下表列出了一些材料在 0 时的电阻率。其中银是导电性能最佳的材料，其次为铜，由于铜价格较便宜，因此使用最为广泛。

某些材料的电阻率会因受到热、压力和光等的作用而发生显著的变化，这种效应得到广泛的应用。压敏电阻用于测量微小应变。由铜、镍、钴、锰等的金属氧化物烧结陶瓷制成的热敏电阻用于温度测量和补偿。硫化镉、硫化铅等半导体制成的光敏电阻用于自动控制、红外遥感、电视和电影等设备中。

**电阻温度系数** 材料的电阻率都随温度的改变而改变。设  $\rho_0$  为参数温度  $t_0$  (常用 0 或 20) 时材料的电阻率，则在温度  $t$  时，其电阻率为  $\rho = \rho_0 [1 + a(t - t_0)]$ ，式中  $a$  称为电阻的温度系数。其单位为  $1/^\circ C$ 。下表中列出了几种材料的电阻温度系数。电阻温度系数有正有负，一般，金属的电阻温度系数为正，半导体和电介质的电阻温度系数为负。

非线性电阻以电压  $V$  为横坐标轴，电流强度  $I$  为纵坐标轴，画出的导体的电压  $V$  和电流  $I$  的曲线，称为该导体电阻的伏安特性曲线。当欧姆定律成立时，其伏安特性曲线是一条通过原点的直线，图 1 为金属导体的伏安曲线，其斜率的倒数就是该导体的电阻  $R$ 。具有这种伏安特性的电学元件叫做线性元件。其电阻称为线性电阻。对于另一些电学元件，如晶体管、电子管、一般玻璃管中的气体等，欧姆定律不成立，其伏安特性曲线不是直线。图 2 为晶体管的伏安曲线。这时定



材料在 0 时的电阻率 和电阻温度系数

材料	$\rho_0(\Omega \cdot m)$	$\alpha(1/^\circ C)$
银	$1.49 \times 10^{-8}$	$4.30 \times 10^{-3}$
铜	$1.55 \times 10^{-8}$	$4.33 \times 10^{-3}$
铝	$2.5 \times 10^{-8}$	$4.6 \times 10^{-3}$
钨	$4.89 \times 10^{-8}$	$5.1 \times 10^{-3}$
铁	$8.6 \times 10^{-8}$	$6.51 \times 10^{-3}$
铂	$9.81 \times 10^{-8}$	$3.96 \times 10^{-3}$
汞	$94.07 \times 10^{-8}$	$9.9 \times 10^{-4}$
碳	$3500 \times 10^{-8}$	$-5 \times 10^{-4}$
镍铬合金 ( 铬 20 ~ 30 , 镍余量 )	$110 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-5}$
铁铬铝合金 ( 铬 12 ~ 15 , 铝 3.5 ~ 5.5 , 铁余量 )	$140 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-5}$
镍铜合金 ( 铜 54 , 镍 46 )	$50 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-5}$
锰铜合金 ( 锰 11 ~ 13 , 镍 2 ~ 3 , 铜余量 )	$48 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-5}$

义曲线上某一点的 V 和 I 的比值为直流电阻  $R = \frac{V}{I}$  , 显然 R 不再为常数 , 这种元件为非线性元件 , 其电阻为非线性电阻。

非线性元件在电子电路中使用较广 , 为分析工作状态 , 定义某一工作条件下的动态电阻  $R_{动} = \lim_{I \rightarrow 0} \frac{V}{I}$  ( 参见图 2 ) , 即曲线上 P 点斜率的倒数。动态电阻在定量分析包含非线性元件的电子线路时十分有用。

图 1 导体的伏安特性曲线图 2 晶体管的伏安曲线

**电阻的串联和并联** ( series and parallel connection of resistances ) 把电阻一个接一个地联接起来 , 使电流只有一条通路的联接 , 称为电阻的串联 ; 把多个电阻的一端联在一起 , 另一端也联在一起 , 使电流有多条通路的联结 , 称为电阻的并联。串联时 , 各电阻上的电流相等 ; 并联时 , 各电阻上的电压相等。因此 , 两种电路各有不同的特点。上表列出了两种联接时的电路特性对比。表中  $I_i$ 、 $U_i$ 、 $R_i$ 、 $P_i$  分别为第 i 个电阻上的电流、电压、电阻和功率 , 而  $I$ 、 $U$ 、 $R$ 、 $P$  分别为总电流、总电压、等效电阻和总功率。

**电阻箱** ( resistance box ) 一种箱式电阻器。由若干阻值精确的线性电阻器按一定方式联接而成。各线性电阻器均用高稳定度的电阻温度系数较小的锰铜合金线或康铜合金线以无感式 ( 双线并绕 ) 绕在瓷管或绝缘片上 , 并经老化处理而成。电阻箱的档位一般有  $\times 0.1$ 、 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1000$  等。电阻箱按阻值变

图 1 演示用电阻箱

图 2 刷形开关结构图

图 3 电阻箱面板图

换方式的不同分为开关式和插头式。图 1 为插头式电阻箱结构示意图，图 2 为刷形开关式电阻箱结构示意图，图 3 为开关式电阻箱面板图。电阻箱是电气测量中的常用仪器，用它可以提高读数精确度和有效位数。有时为改变电路中的电流或电压，也可用电阻箱作微调。电阻箱一般不得作电路负载之用。

**叠加原理 (superposition principle)** 经典电磁学的一条基本原理。它来源于力的叠加原理。在静电场中，由实验得出的静电力叠加原理为：当空间有两个以上的点电荷时，作用于每一点电荷的总静电力等于其它点电荷各自单独存在时作用于该点电荷的静电力的矢量和。由此可知，如果空间有三个点电荷  $q_1$ 、 $q_2$  和  $q_3$ ，它们单独存在时的电场强度分别为  $E_1$ 、 $E_2$  和  $E_3$  则这三个点电荷所产生的总电场强度即为

$$E=E_1+E_2+E_3。$$

将上述结论推广到  $n$  个点电荷的情况，便可得到如下结论： $n$  个点电荷所激发的电场在任一点处的总场强，等于每个电荷单独存在时所激发的电场在该点处的场强的矢量和。这就是电场的叠加原理。

由场强的叠加原理可以导出电位的叠加原理： $n$  个点电荷在任一点处所产生的电位，等于每个点电荷单独存在时在该点处产生的电位的代数和。

磁场也遵从叠加原理。例如，若空间某点处有运动电荷或电流产生的磁感应强度  $B_1$ 、永磁体产生的磁感应强度  $B_2$ 、变化电场产生的磁感应强度  $B_3$ ，则该点总磁感应强度为

$$B=B_1+B_2+B_3，$$

其中  $B_1$  还可以是若干电流的磁场的叠加， $B_2$  可以是若干永磁体磁场的叠加。

叠加原理在宏观电磁现象中普遍成立，但在微观电磁现象中，由于量子效应，叠加原理不再普遍成立。

丁肇中 (1936 ~ ) 美籍华裔物理学家。生于密歇根州安阿伯。出生后两个月随父母回中国，中学时代在中国度过。1956 年入美国密歇根大学，1960 年获硕士学位，1962 年获物理学博士学位。1963 ~ 1966 年在欧洲核子中心、哥伦比亚大学工作。1967 年任麻省理工学院物理学教授。同时担任美国科学院院士，中国科学技术大学名誉教授。

主要贡献是发现  $J/\psi$  粒子，获 1976 年诺贝尔物理学奖。早在 1965 年就领导进行了量子电动力学和矢量介子的一系列出色的实验工作，证明了量子电动力学的正确性和推动了对矢量介子的认识。1972 年领导进行了寻找长寿命中性粒子。1974 年领导发现了一个质量约为质子质量 3 倍的具有奇特性质的长寿命中性粒子。取名为  $J$  粒子，“ $J$ ”和“丁”字形相似，寓意是中国人发现的粒子。与此同时，美国物理学家里希特也发现了这种粒子并取名为  $\psi$  粒子，所以国际上称这种粒子为  $J/\psi$  粒子。新粒子的发现表明它有新的内部结构，不能用当时已知的 3 种味的夸克来解释，而需要引进第四种夸克即粲夸克来解释，从而大大推动了粒子物理学的发展。70 年代后期领导了一系列高能正负电子对撞方面的实验，并于 1979 年领导发现

了三喷注现象，为胶子的存在和量子色动力学提供了实验依据。同年领导进行了高能量下电磁相互作用与弱相互作用干涉效应的实验，为电弱统一理论提供了实验证据。80年代以来在寻找新粒子方面又开展了一系列高能物理实验工作，在促进中国高能物理人才培养方面也做了大量工作。

**定态 (stationary state)** 量子理论中指能量具有确定值的状态。

例如，氢原子中能量为  $E_n = -I \frac{1}{n^2} = (-13.6\text{eV}, n=1, 2, \dots)$  的一

系列可能状态都是定态。量子力学中微观粒子的状态用波函数描写。对于定态，其波函数随时间  $t$  作周期性变化，且可表示为  $\psi(x, t) = \psi(x) e^{-iEt/\hbar}$ ，其中  $E$  即为该定态的能量， $\hbar = h/2\pi$ ， $h$  为普朗克常数。由这种类型的波函数确定的粒子在空间分布的概率  $|\psi(x, t)|^2 = |\psi(x)|^2$  与时间无关。正是由于这一特点，所以称这类状态为定态。

**动力学 (dynamics)** 经典力学的一部分。研究物体受力和运动状态变化的规律。动力学在运动学的基础上进一步揭示了物体运动状态发生变化的原因。动力学的基本原理是牛顿运动定律，其中以牛顿第二定律为核心，这个定律指出了力、加速度、质量三者间的关系。动力学按所研究对象的性质分为质点动力学、质点系动力学和刚体动力学。动力学的基本原理也可以表现为不同于牛顿定律的形式，并由此引伸出一套相应的不同理论系统，例如达朗伯原理、拉格朗日方程等都可以代替牛顿运动定律作为动力学理论的出发点。由动力学基本原理推论出的一些带有普遍意义的定理，称为动力学的基本定理，它包括动量定理、角动量定理和动能定理。并因此引入了诸如动量、角动量和机械能这样一些重要的物理概念，已成为物理学乃至整个自然科学的重要概念。动力学概念本身也往往被推广，广义上，被理解成为探讨任何形式的运动状态变化规律的学科，例如把电磁学理论称为电动力学等。

**动量 (momentum)** 物质运动的一种量度。描述物质机械运动状态的一个重要物理量。当物质机械运动状态发生变化时，它的动量也发生变化，并通过力的作用效果在时间过程中的积累，即冲量作用，把这部分变化了的动量传递给与之相互作用的外界，或者从外界传入物质系统，实现了机械运动从一个系统到另一个系统的转移。物体的动量是一个矢量，一般表示为此物体的质量  $m$  与速度  $v$  的乘积，而方向与速度相同，即  $P=mv$ 。物体系的动量是物体系中各物体动量的矢量和。

当物体的速度  $v$  很大，以至可以与光速  $c$  相比时，必须用相对论动量表示式，即

$$p = mv = m_0 v / \sqrt{1 - v^2 / c^2},$$

$m$  是物体的相对论性质量， $m_0$  是物体的静质量。

电磁辐射基元 (光子) 的动量大小为  $h\nu/c$ ， $h$  是普朗克常数， $\nu$  是电磁辐射的频率，它的方向就是辐射的方向。牛顿第二运动定律和相对论性力学方程可以用动量表示为

$$dp = F dt,$$

$p$  是物体的动量， $F$  是物体所受合力， $t$  是时间。这说明动量的变化是通过冲量的作用而传递的。动量的量纲是  $MLT^{-1}$ ，SI 制单位为千克·米/秒。

动量与力之间关系的规定由动量定理来描述。该定理表述为：在某段

时间中的动量增量  $p$  等于所受合外力在这段时间中的冲量  $I$ ，即  $p=I$ 。它是牛顿第二定律的直接推论。在碰撞、冲击等问题中，尽管冲力很大且作用时间很短，难于测定，但它总是使物体获得有限大的动量增量。所以，根据动量定理，可以通过测定动量的变化来确定冲力的冲量，并根据作用时间的长短来判断冲力的时间平均值。

**动量定理** (theorem of momentum) 参见动量。

**动量守恒定律** (law of conservation of momentum) 自然界的一条基本定律。不与外界交换物质的系统且不受外力作用时，系统一切形式的动量总量在运动中保持为恒量。对于机械运动，质点的动量定义为  $mv$ ， $m$  是质点的质量， $v$  是质点的运动速度。若机械运动与其他运动形式之间不发生转化，则系统不受外力作用时，它在惯性系中运动的力学总动量保持不变，即

$$\sum_i m_i v_i = \text{常量},$$

式中求和遍及系统中各质点。

动量守恒定律也是牛顿第二定律、第三定律联合应用于力学系统的必然结果。有了动量守恒定律，就更便于解决某些力学问题。例如，求解大炮发射炮弹的问题，就可运用动量守恒定律而得知：在水平方向上炮弹向前飞行的动量应与炮身向后反冲的动量相等。

**动能** (kinetic energy) 物体由于有速度而具有的能量，即物体由于运动而具有的做功本领。质量为  $m$ 、速度为  $v$  的质点所具有的动能为  $\frac{1}{2}mv^2$ 。当以速度为  $v$  运动的该质点通过各种可能的运动方式被减速到

静止时，将克服外力作  $\frac{1}{2}mv^2$  的功。因而，量  $\frac{1}{2}mv^2$  反映了物体由于运动而具有的做功本领。一个物体的动能是物体中各部分动能之和。如果这个物体是一个定轴转动的刚体，它的能量可以归结为  $I\omega^2/2$  的形式，其中  $I$  是刚体对转轴的转动惯量， $\omega$  是刚体转动的角速度。对一个质点系，可以把动能写成

$$T = \frac{1}{2}Mv_c^2 + \sum_i \frac{1}{2}m_i v_i^2.$$

式中  $M$  是质点系的总质量， $v_c$  是质点系质心的速率， $m_i$  是质点系中第  $i$  质点的质量， $v_i$  是这个质点相对于随质心平动的参考系的速率。刚体在作一般运动时，动能表示式是

$$T = \frac{1}{2}Mv_c^2 + \frac{1}{2}I\omega^2.$$

$M$  和  $v_c$  分别是刚体的总质量和速率， $\omega$  是绕着通过质心的瞬时转轴的角速度大小， $I$  是刚体对通过质心的瞬时转轴的转动惯量。在相对论中，质点的动能在数值上定义为把质点从静止状态加速到速率等于  $v$  时外力作的功，它等于

$$T = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v/c^2}} - mc^2,$$

其中  $m$  是质点的静质量， $c$  是真空中光速。当速率  $v$  与光速  $c$  相比很小时，上述相对论动能  $T$  可近似表示为

$$T = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2}。$$

在忽略相对论效应时,  $v/c=0$ , 上式转化为非相对论情形下的动能表示式  $T=mv^2/2$ 。

**动能定理** (theorem of kinetic energy) 描述质点或质点组动能的变化与作用力作功之间关系的定理。也是宇宙中普遍成立的能量守恒定律在机械运动中的表述。质点的动能定理是: 质点动能的增加等于合外力对它所作的功。数学表示式是  $E_{k2}-E_{k1}=W$ , 其中  $E_{k1}$  为初动能,  $E_{k2}$  为末动能,  $W$  为合外力所作的功。在涉及质点的位置和速度关系的力学问题中, 应用动能定理较用牛顿第二定律方便。当质点只受保守力作用时, 则由该定理可得出机械能守恒定律。用机械能守恒定律求解力学问题更方便。质点组的动能定理是: 质点组动能的增量等于外力和内力对质点组所作的总功。数学表示式是  $E_{k2}-E_{k1}=W_1+W_2$ ,  $E_{k1}$  为质点组的初动能,  $E_{k2}$  为质点组的末动能,  $W_1$  是外力作的功,  $W_2$  是内力作的功。刚体的内力不作功, 所以刚体的动能定理可表述为: 在一个运动过程中, 刚体动能的增量等于外力在此过程中对刚体作的功。

**动生电动势** (motional electromotive force) 在稳恒磁场中运动的导体内所产生的感应电动势。由运动电荷在磁场中受洛伦兹力作用而引起。当导体在磁场中运动时, 导体内的自由电子 (或其他自由电荷) 也随之运动, 从而受到洛伦兹力的作用。洛伦兹力是一种非静电力, 因而便产生电动势。单位正电荷所受洛伦兹力为  $f=v \times B$ , 因而回路中的电动势为

$$\varepsilon = \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l},$$

式中  $d\mathbf{l}$  是回路中的导体线元,  $v$  是线元  $d\mathbf{l}$  的速度,  $B$  是  $d\mathbf{l}$  所在点的磁感应强度。对于在匀强磁场中作平移运动的直线形导体, 上式简化为

$$=LvB\sin\theta,$$

式中  $L$  是直线形导体位于磁场中的长度,  $\theta$  是  $v$  和  $B$  间的夹角。电动势的指向与  $v \times B$  的方向相同。

动生电动势是各种动生式发电机的基本原理, 正在研究中的磁流体发电也是根据这一原理设计的。

**断点** (breakpoint) 是程序执行时的停顿点, 断点位置可根据调试程序的需要合理设定。程序一旦执行到断点位置, 便自动停顿, 不同性质的断点可检查当时的不同系统状态和中间结果。通常不输入继续执行的操作之前, 程序将不再起动。

设置断点是常用的程序调试手段, 用毕后可用消除断点命令消除已设的断点。

在有些高级语言中, 也允许使用特定语句在源程序中插入断点, 例如, FORTRAN 语言中, 允许使用“PAVSE 断点信息”形式的语句设置断点。在 BASIC 语言中也可以使用 STOP 语句设置断点, 并可在程序执行到断点后, 用 PRINT 命令查看当时有关变量的值。

**对称性** (symmetry) 物理学中的对称性是指物理系统的状态和物理现象的运动规律在某种变换下保持不变的性质。任何物理系统和物理现象总具有某些普适的或某种程度下普适的对称性, 这已成为目前物理学中的一个基本观念。

对称性最早起源于几何学，一个物体或一个系统各部分之间的适当比例、平衡、协调一致，从而产生一种简单性和美感。尽管物理学中有许多复杂的细节，但仍然包含了不少简单而优美的方面。这种简单而优美方面即表现为各种物理学中的对称性和相应的守恒定律。

牛顿力学理论表明，例如“今天”做某一力学实验与“明天”做同样的实验所得到的力学定律是相同的。这就是“时间均匀性”或“时间平移变换下的不变性”是物理学中的一种对称性。类似地，物理学中的所有基本规律，无论是力学的、电磁学的，还是原子物理学和粒子物理学的基本规律，在空间平移变换和空间转动变换下也保持不变。这就是“空间均匀性”和“空间各向同性”。上述三类对称性也称为连续变换对称性，因为有限的时间平移、空间平移和空间转动变换可以分别通过相继的无穷小变换实现。与连续变换对称性相应，还存在许多分立对称性，例如空间反演变换就是一种分立对称性。一个物理现象具有空间反演不变性要求，它的镜像现象也满足同样客观规律。

除上述与时空有关的对称性外，物理学中还存在许多与时空无关的对称性，有时这类对称性称为内禀对称性。例如反映质子和中子在核力相互作用现象中其性质完全相同的“同位旋对称性”；描写粒子和反粒子遵循同样规律的“电荷共轭对称性”；描写全同粒子系统特点的“交换对称性”；描写夸克之间强相互作用特点的“色空间对称性”等。

物理系统的每一种对称性对应了一个守恒物理量，这种守恒量在相互作用过程中保持不变。所以对称性和守恒定律密切相关。对称性与守恒定律的密切关系迄今已成为物理学研究中的基本出发点之一。

**对应原理 (correspondence principle)** 描述量子理论和经典理论之间关系的原理。量子力学定律的结果在经典极限下与经典定律的结果相一致。所谓经典极限情况是指大量子数的情况。例如因为经典理论中氢原子内运动电子辐射的电磁波的频率与电子圆轨道的频率相等，因此根据对应原理，由氢光谱里德伯公式（见氢光谱）所给出的频率当量子数  $m$  和  $n$  很大时，应等于电子圆轨道运动的频率。玻尔正是根据这一推理，引进了氢原子玻尔模型中的角动量量子化条件。所以玻尔在 1913 年提出他的氢原子理论时就包含了对应原理的观念。玻尔系统阐述对应原理的文章则发表于 1918 年。在玻尔的理论以及其后的量子力学建立过程中，对应原理曾经起过很重要的作用。不过应当指出，并非所有量子理论可与经典理论相对应。例如关于自旋的量子理论就不存在所谓大量子数的经典极限，因此也不存在相应的经典理论。

**对撞机 (collider)** 使两束反向运行的粒子束对撞的装置。是在高能加速器基础上发展起来的一种超高能实验装置。电荷相反的高能粒子，如电子和正电子，质子和反质子，可在同一储存粒子束的高度真空环（称为“储存环”，其垂直于环面方向上有导引磁场）内反方向回旋而发生对撞。电荷相同的粒子如质子和质子，就需要两个交叉的储存环，每一环内有一束粒子，但回旋方向恰巧相反，在两环的交叉点上使两束粒子发生对撞。普通加速器产生的高能粒子束与静止靶发生碰撞时，由于动量守恒定律的要求，碰撞后靶粒子有反冲运动，这部分能量是无效的。如果使碰撞粒子和靶粒子相反方向运动而发生对撞，并使它们的质心保持不动，则系统的全部动能都是有效的。例如根据计算，两个 30GeV 的质子对撞时的有

效能量（即 60GeV）相当于一个 1800GeV 的质子与一静止质子碰撞时的有效能量。对撞机就是根据这个原理设计的。

对撞机有两个重要指标，即能量和亮度。对撞机的能量是针对所研究的对象设计的。对撞机的亮度与其中运动的两束粒子流的流强乘积成正比，而两束粒子对撞时产生某种粒子的事例数与亮度成正比，所以亮度愈大，单位时间内产生的粒子愈多。目前世界上有多台正负电子对撞机正在运行（见下表）。其中北京正负电子对撞机（BEPC）位于我国首都北京西郊的中国科学院高能物理研究所内。这台加速器尽管能量不高，但其亮度大。近些年来我国的科学工作者已在这台加速器上做出了一些引起国际同行注目的工作（如

现在正在运行的正负电子对撞机

名称	国别	能量 ( GeV )	建成年代
SPEAR	美	3.9 × 3.9	1972
DORIS	德国	7 × 7	1973
VEPP4	原苏联	5 × 5	1979
CESR	美	8 × 8	1979
PEP	美	15 × 15	1980
TRISTAN	日	30 × 30	1986
BEPC	中	2.8 × 2.8	1988
SLC	美	50 × 50	1989
LEP	西欧联合	50 × 50	1989

关于 轻子质量的测量)。此外 BEPC 还是一台高能物理与同步辐射应用的两用机。预计高能物理实验的任务将会在 5~10 年内完成，同步辐射的应用将会逐步扩大，并逐步向专用同步辐射光源过渡。除正负电子对撞机外，目前世界上正在从事高能粒子物理研究工作的大型高能对撞机还有美国费米实验室的质子-反质子对撞机（TEVATRON， $10^3\text{GeV} \times 10^3\text{GeV}$ ），西德的电子-质子对撞机（DESY， $26\text{GeV} \times 820\text{GeV}$ ）等。这些对撞机的直径超过 6 千米，均采用超导磁铁。此外，还有几台更大型的超导对撞机正在建造之中。以这些高能加速器或对撞机为依托，常常建有粒子物理学研究中心，以吸引世界各国科学家从事深度微观领域的研究工作。

多层介质膜 (multilayer dielectric film) 在玻璃基板上用高低折射率透明介质交替反复镀膜的多层透明膜片。最简单的多层膜是  $\frac{\lambda}{4}$  膜系。

原理见下图。用 G 代表玻璃，A 代表空气，用 H 和 L 分别代表光程为  $\frac{\lambda}{4}$  的高和低折射率膜。这种多层膜系可记为

G | HLHLH | A。制作时，先在玻璃基板上蒸镀折射率为  $n_H$  的介质，厚度为  $h$ ，且要求  $n_H h = \frac{\lambda}{4}$ 。然后再镀上折射率为  $n_L$  的介质，厚度为  $l$ ，且

要求  $n_L l = \frac{\lambda}{4}$ 。依次交替镀膜，并使膜层两端是高折射率的 H 膜，于

是总层数为奇数。入射光自空气进入多层膜系后，在每个反射面上都有反射光，在上图中用  $S_1, S_2, \dots, S_3$  表示。在反射光束中引起光波相位差的因素有两个：一是光束的光程差引起的相位差；另一是由于反射面两边介质折射率不同而引起的额外光程差。各反射光的相位与入射光相位之差如下表所示。

	光程差引起相位差		反射表面引起的相位差		总相位差
	光程差	相位差	光程差	相位差	
$S_1$	0	0	$\lambda/2$		
$S_2$	$\lambda/2$		0	0	
$S_3$	$\lambda/2$		$\lambda/2$		3
$S_4$	$3\lambda/2$	3	0	0	3
$S_5$	$\lambda/2$	4	$\lambda/2$		5
$S_6$	$5\lambda/2$	5	0	0	5

从表中可看出，各反射光之间的相位差为  $\lambda/2$  的偶数倍，即同位相。所以它们干涉的结果是互相加强，于是提高了反射率。根据计算，如果介质膜有  $(2k+1)$  层，则在正入射时的反射率  $R_{2k+1}$  为

$$R_{2k+1} = \left[ \frac{n_0 - \frac{n^2}{n_L} \left( \frac{n_H}{n_L} \right)^{2k}}{n_0 + \frac{n^2}{n_L} \left( \frac{n_H}{n_L} \right)^{2k}} \right]^2$$

式中  $n_0$  和  $n$  分别为空气和玻璃的折射率。当  $k$  逐渐增大时， $R_{2k+1}$  趋近于 1。常用的高折射率介质为 ZnS  $n_H=2.40$ ；低折射率介质为  $MgF_2$   $n_L=1.38$ 。如果用玻璃作为基板， $n=1.52$ ，则反射率与层数的关系由下表给出。

层数	k 值	强度反射率 $R_{2k+1}$ (%)
1	0	33.8
3	1	70.5
5	2	89.1
7	3	96.25
9	4	98.75
11	5	99.58

由上表可以看出，层数越多，反射率越高。

增透膜如果希望透射光增加，反射光尽可能减少，这就需要增透膜。光学仪器中光学元件很多，光束遇到每一元件的表面时总会发生反射，这种反射光不但使光能量损耗，也在仪器内部产生严重的杂散光，影响仪器质量。增透膜可以改善这种质量问题。同样可以采用  $\lambda/4$  膜，来大大减小光的反射损失。例如在玻璃基板上镀一层折射率为  $n_x$  的  $\lambda/4$  介质膜，则反射率为



$$R1 = \left[ \frac{n_0 - \frac{n_x^2}{n}}{n_0 + \frac{n_x^2}{n}} \right]^2 ,$$

这里只有一层， $k=1$ 。如果希望  $R_1=0$ ，则所镀膜的介质折射率应该为

$$n_x = \sqrt{n_0 n} ,$$

这个条件常常不能完全满足，因为这种特定折射率的镀膜介质不一定能找到。但越接近这一条件，其反射率就越低。当然也可以镀多层膜来达到同样目的。

干涉滤光片在多层介质膜的制作中，膜层的厚度相当于  $\lambda/4$  的光程。当然也可以制作  $\lambda/2$  或其它膜系。这表明，反射率或透过率都与光的波长有关。干涉滤光片就是利用干涉原理使某种特定波长的光透射特别强，而尽可能遏制其它波长光透过的光学元件。它自第二次世界大战期间出现以来，已在高科技领域中发挥越来越大的作用。

最简单的干涉滤光片犹如一具紧凑的法布里-珀罗干涉仪。在两反射面之间充满薄的电介质透明层。可以在某一波段内只容许宽度约 0.01 微米的准单色光通过。在反射面镀金属膜，可以增强反射本领，使之具有窄的透过波段。但反射强势必导致透过弱，因此这种金属膜干涉滤光片效率不高，透过光只有 30%。

用多层介质膜制成的干涉滤光片，其层次可多至 30 层，透过波段宽度可达 0.005 微米，有 80~90% 的透过率。还可以制成截止滤光片，减色滤光片，受抑全反射滤光片，反热滤光片和冷反射镜。

### 多光束干涉 (multiple-beam interference)

图 1 多光束干涉

多束相干光波在共同交叠区域内所产生的干涉现象。设有两块平行放置的平板玻璃  $G$  和  $G'$ ，见图 1 所示。在相向的两面上镀银膜以增大光的振幅反射率  $r$ 。振幅为  $A_0$  的入射光在银膜面之间作来回多次反射，并形成多次透射光束(1)、(2)、(3)...等等。原始入射光的入射角为  $i$ ，折射角为  $r$ ，因此第一次反射光的振幅为  $rA_0$ ，第一次透射光的振幅为  $(1-r)A_0$ 。以此类推，各次透射光的振幅为，光束(1)  $(1-r)A_0$ ；光束(2)  $(1-r)^2 A_0$ ；光束(3)  $(1-r)^3 A_0$ ；光束(4)  $(1-r)^4 A_0$ ；...。各次透射光相互平行，可用透镜使它们在焦平面上会聚，形成等倾干涉图样。透射光束中任意两相邻光束的光程差为  $\Delta = 2nd \cos r$

，即引起的相位差为  $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2nd \cos r$ 。设光束(1)的初相位为 0，则

各透射光束的相位依次为  $0, \phi, 2\phi, 3\phi, \dots$ 。所以各透射光束的振幅以公比为  $(1-r)$  的等比级数减小；其相位则以公差为  $\phi$  的等差级数增加。于是，各透射光的振动依次为  $(1-r)A_0 e^{i\omega t}$ ； $(1-r)^2 A_0 e^{i(\omega t - \phi)}$ ； $(1-r)^3 A_0 e^{i(\omega t - 2\phi)}$ ；...。将上述各振动相加，并算出合振幅  $A$  的平方（即光强），结果为

$$A^2 = \frac{A_0^2}{[1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \sin^2(\frac{\phi}{2})]}$$

对于一定的银膜，振幅反射率  $\rho$  是一常数，光强  $A^2$  随  $\phi$  而改变。当  $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$  时，光强取极大值 ( $A_0^2$ )；当  $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$  时，光强取极小值  $\left(\left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)^2 A_0^2\right)$ 。于是干涉条纹的对比度为

$$F = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\rho}{1 + \rho^2}$$

为小于 1 的正数。当  $\rho = 0$  时， $F=0$ ，即分不清条纹光强的最大值与最小值；当  $\rho = 1$  时， $F=1$ ，即条纹光强对比最清晰，干涉图样是在几乎全黑的背景上的一组很细的亮条纹。图 2 中的一组曲线，表示在不同  $\rho$  值的情况下，透射光强随  $\phi$  的变化关系。可以看出，反射率  $\rho$  很小时，极大值至极小值的变化十分缓慢，干涉条纹可见度极差。

图 2 透射光强变化

纹可见度极差。

**多普勒效应 (Doppler effect)** 当观察者和波源有相对运动时，观察者收到的波的频率和波源发出的频率不同的现象。这现象由奥地利物理学家多普勒于 1842 年首先发现，故名。当波源与观察者相互接近时，观察者收到的频率升高；相互离开时，频率降低。例如，火车飞驰而过车站时，站上的人听到汽笛声由高亢变低沉，说明频率由高变低。实验还证明，各种波都具有这种效应。

**经典多普勒效应** 在静止的介质中，假定观察者与波源沿同一直线运动，相对于介质的速度分别为  $v$  和  $u$ ，波的传播速度为  $v$ ，波源发出的频率为  $\nu$ ，而观察者接收到的频率为  $\nu'$ ，当波源静止时，观测者接收

到的频率为  $\nu' = \left(1 + \frac{v}{V}\right)\nu$ ，当观察者静止时，则有  $\nu' = \frac{\nu}{1 - \frac{u}{V}}$  当两

者都运动时， $\nu' = \frac{1 + \frac{v}{V}}{1 - \frac{u}{V}}\nu$ 。式中  $v > 0$  和  $v < 0$  分别表示观察者趋近和背

离波源；而  $u > 0$  和  $u < 0$  分别表示波源接近或离开观察者。从以上各式可知，即使观察者与波源相对介质的速度相同，但在观察者运动、波源静止与观测者静止、波源运动的两种情况中，所测得的频率  $\nu'$  是不同的，由此可通过多普勒效应断定何者在运动。

**相对论性多普勒效应** 在各向同性介质中，由于电磁波（包括光波）的传播速度与参照系无关，因此它与声波的多普勒效应（属于经典的）有所不同。主要有以下三方面：对声波，源运动引起的多普勒频移（多普勒效应引起的频率变化）一般与观测者以同样速度运动引起的频移不同；而对电磁波，多普勒频移仅与两者相对运动速度有关，而不论是源还是观测者在运动。对于真空中的光波，观测者接收到的频率  $\nu'$  为

$$v = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ 其中 } v \text{ 为观测者或光源的速度, } c \text{ 为光速。}$$

对声波，当源和观测者运动方向与两者之间的连线成直角时，没有多普勒频移，而电磁波存在多普勒频率。与声波不同，电磁波在介质中传播时，观测到的频率不受介质运动的影响。

**多普勒效应的应用** 利用多普勒效应可解释用光谱仪观测天体光谱的红移和紫移现象，这是因天体与地球间相对运动引起的。观测运动天体上元素发出的光波波长与地面上相同元素发出的光波波长比较而出现的谱线移动（即相当于频率变更），可以准确地计算该天体相对于地球运动的速度。人造卫星运行的速度和高度就是利用这一效应测定的。利用多普勒效应还可解释气体发光的光谱谱线变宽的原因。由于发光原子或分子以不同速率相对于观测仪器向各个不同方向运动所产生的波长移动不同，因此观测到这种频率的谱线变宽。利用多普勒效应制成流量计，可测量人体内血管中血液的流速或工矿企业管道中污水或有悬浮物的液体的流速，还可制成多普勒测速器，测量汽车的速度等。

EPR 悖论 (Einstein-Podolsky-Rosen paradox) 又称 EPR 论证。爱因斯坦、波多耳斯基和罗森为论证量子力学的不完备性而提出的一个悖论。EPR 是这三位物理学家姓的头一个字母。这一悖论涉及到如何理解微观世界实在的问题。

1935 年 5 月, 爱因斯坦同两位年青的美国物理学家波多耳斯基和罗森在美国《物理评论》47 期发表了题为《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗?》的论文。在这篇论文中, EPR 首先给物理实在与物理理论的完备性下了定义。如果一个物理理论对物理实在的描述是完备的, 那末物理实在的每个要素都必须在其中有它的对应量, 即完备性判据。当我们不对体系进行任何干扰, 却能确定地预言某个物理量的值时, 必定存在着一个物理实在的要素对应于这个物理量, 即实在性判据。EPR 在推理过程中还默认了以下两个假设: 定域性假设: 如果测量时两个体系不再相互作用, 那末对第一个体系所能做的无论什么事, 都不会使第二个体系发生任何实在的变化; 有效性假设: 量子力学的统计预示(至少在本论证有关的范围内)已为经验所证实。接着, EPR 介绍了物理实在的量子力学描述的一般特征后, 认为量子力学不满足上述这些判据, 所以是不完备的。

在论文的第二部分, EPR 设计了一个思想实验来论证: 假设有两个子系统  $S_1$  和  $S_2$  构成的复合系统, 当  $t < 0$  时, 它们是彼此分离的, 状态为已知; 在  $0 < t < T$  时间间隔内, 它们接近而发生相互作用; 在  $t > T$  以后, 它们又彼此分离并停止相互作用。一方面由量子力学可知, 当子系统  $S_1$  与  $S_2$  分离后, 据对子系统  $S_1$  的动量(或位置)所作的测量, 人们便可以在不对子系统  $S_2$  进行干扰的情况下确定地预示子系统  $S_1$  的动量(或位置)。因此, 根据 EPR 的实在性判据和定域性假设, 子系统  $S_1$  的动量与位置均对应于物理实在的要素。另一方面, 由于动量与位置是一对不对易的共轭变量, 人们不可能对子系统  $S_1$  的动量与位置同时进行测量, 从而不可能对子系统  $S_1$  的动量与位置同时作出预示。这样, 我们就否定了上面二中择一的两个命题中的第二个命题, 从而证明了其中第一个命题, 即证明了量子力学并不为物理实在提供一个完备的描述。

EPR 文章发表后, 在物理学界、哲学界引起了巨大的反响。玻尔认为 EPR 所说的“不对体系进行任何干扰”是不确切的, 因为在测量过程中虽然没有对子系统  $S_2$  施加力学干扰, 但由于作用量子的不可分性, 微观体系和测量仪器构成了一个不可分割的整体, 测量安排是确定一个物理量的必要条件, 而对微观体系未来行为所预示的可能类型正是由这些条件所决定的。这样, 玻尔提出的量子现象的整体性特征, 引起了人们对 EPR 所默认的定域实在论的怀疑, 既拯救了量子描述的完备性, 也意味着把世界看作在空间上分离的、独立存在的各部分组成的看法不一定普遍成立, 支持了关于世界是普遍联系的, 不可分割的整体观念。

**扼流圈 (choke)** 用以扼制交流电或交流电中的高频成份的电路元件。常用铁芯或铁氧体芯线圈构成。由于线圈的阻抗与交流电流的频率成正比, 因而对于直流电或频率较低的交流电, 其阻抗很小, 反之, 对于频率很高的交流电, 其阻抗很大, 从而起到“通低频, 阻高频”的作用。实际电路中, 扼流圈的应用很广, 例如“滤波扼流线圈”是用来扼制整流后

的交流成分的；“音频扼流线圈”是用来扼制音频电流成分的；“射频扼流线圈”则是用来扼制射频电流成分的。

**二次电子发射** (secondary electron emission) 具有足够能量的带电粒子(如电子、正离子、负离子)打到固体表面时,从固体表面发射出电子的现象。所逸出的电子称为二次电子。二次电子的数目可小于也可数倍于入射电子或离子的数目。它主要取决于入射电子或离子的速度、入射角和物体的性质及其表面状态。二次电子发射在光电倍增管、超正析像管和储存管中得到了实际应用。在某些电子管中,二次发射是引起负阻效应的原因。在普通电子管中,为抑制负阻效应,增加了抑制栅极,使得从阳极撞击出来的二次电子无法跑到屏栅极去,只能返回阳极。

**二端网络** (two-terminal network) 仅有两条导线和其它网络相联的网络。网络是泛指电路或电路的一部分的术语。不含电源的二端网络称为无源二端网络;含有电源的二端网络称为有源二端网络,如下图所示。仅含直流电源的二端网络,称为直流二端网络;含有交流电源的二端网络称为交流二端网络。若网络由线性元件组成,则称为线性网络,否则为非线性网络。二端网络的外部特性由它的电压和电流之间的关系确定。

有源二端网络

无源二端网络

二端网络图

**二级相变** (second-order phase transition) 参见相和相变。

**二维电子系统** (two dimensional electron system) MOS 结构表面沟道区内和异质结界面势阱区内的电子系统。

在金属—氧化物—半导体(MOS)晶体管的栅极(G)上外加足够大的正偏置电压时,在硅衬底表面会感应电子形成N型沟道区(见图1中斜线区),这沟道很窄,沟道内的电子在沿垂直于硅片表面方向的能量是量子化的,这样表面沟道内的电子就构成一个二维电子系统。又如在砷化镓(GaAs)和镓铝砷(GaAlAs)两种半导体构成的异质结界面上,由于两种材料的费米能级不同,电子就从费米能级高的GaAlAs落入GaAs的导带上形成一个电子势阱(见图2)。这个电子势阱很窄,阱内电子在垂直于界面方向的能量是量子化的,因此,这个异质结界面势阱内的电子也构成一个二维电子系统。

图1MOS表面反型层

图2GaAs/GaAlAs界面势阱

**二氧化碳激光器** (carbon dioxide laser) 用二氧化碳作为工作物质的分子激光器。输出激光的波长为 $9.6\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$ ,属于红外波段。它通常包括一根米长的玻璃管或石英管,充以 $\text{CO}_2$ 气体及He和 $\text{N}_2$ 等辅助气体。电极为空心镍圆筒。谐振腔的两块反射镜中,一块是镀金或镀银的全反射镜,另一块是锗片部分反射镜。放电管外通水冷却。当两电极间加上直流电压时,管中气体放电,即有功率在50瓦左右的连续激光输出。

下图为 $\text{CO}_2$ 能级示意图。 $\text{CO}_2$ 分子由排列在一条直线上的三个原子组成,碳原子位于中间。它的能级由三个量子数表示,代表分子的振动方式。激光上能级是001能级,激光下能级取100时,输出10.6微米激光,下能级取020时输出9.6微米激光。分子除振动运动外还有转动运动,每个振动能级包含许多转动能级。图中只画出100和001两个振动能级所包含的

转动能级。转动能级用转动量子数  $J$  表示。分子从一个振动能级跃迁到另一个振动能级时，同时发生转动量子数变化  $\Delta J$ 。当  $\Delta J=+1$  时称为 R 支；当  $\Delta J=-1$  时称为 P 支。例如从 001 中的  $J=23$  跃迁到 100 中的  $J=22$ ， $\Delta J=23-22=+1$ ，故这个跃迁的谱线用记号 R(22) 标志。从 001 中的  $J=21$  跃迁到 100 中的  $J=22$ ，则用记号 P(22) 标志。括号中的数是下能级的  $J$  值。 $\text{CO}_2$  激光器输出的激光在 10.6 和 9.6 微米波段都有 40 多条谱线。如果需要输出单支谱线，可将谐振腔的部分反射镜改用有选择性反射的闪耀光栅，改变光栅角度便可得到各种波长的单支  $\text{CO}_2$  激光谱线。

#### CO 能级图

辅助气体  $\text{N}_2$  (氮) 的作用是传递能量。因为氮分子的第一激发态位于  $\text{CO}_2$  的 001 振动能级附近，气体放电时电子把  $\text{N}_2^*$  激发到第一激发态  $\text{N}_2^*(1)$ ， $\text{N}_2^*(1)$  与基态  $\text{CO}_2$  分子碰撞后将  $\text{CO}_2$  激发到  $\text{CO}_2(001)$ 。氦的作用是降低工作气体温度，因为 He 的导热系数很大。工作气体的温度对粒子数反转有很大影响，早期的  $\text{CO}_2$  激光器只能输出功率几十毫瓦，后来发现加入 He 和  $\text{N}_2$  可以提高输出功率。 $\text{CO}_2$  激光器效率高达 30 ~ 40%。采取其它一些措施后峰值功率可达上万瓦。

FORTRAN 语言 (FORTRAN language) 是英文 formulatranslator 的缩写, 其含义是“公式转换器”。它是一种分块并列结构的面向过程的高级语言。FORTRAN 语言开始是为解决数学问题和科学计算而提出的, 多年来的应用表明, 由于 FORTRAN 本身标准化程度高, 便于程序互换, 较易优化, 计算速度快, 因此这种高级语言目前已广泛流行。国外几乎所有计算机厂商都能向用户提供 FORTRAN 的编译程序和应用程序的版本。从使用的角度来看, 目前 FORTRAN 也不再是专用于科学计算 (数值计算) 中进行程序编制的语言了。越来越多的商业系统、企业单位也采用 FORTRAN 语言来编制商业和企业管理程序。

**基本字符** FORTRAN 语言由 47 个基本字符 (的不同组合) 所组成, 可分成三大类:

(1) 字母 (26 个大写的英文字母);

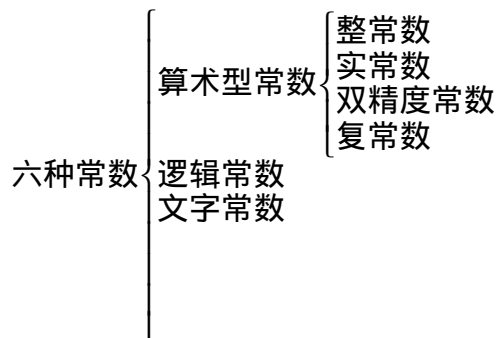
(2) 数字 (共 10 个) 0~9;

(3) 专用字符 (共 11 个): “=” 等号, “ ” 空格, “+” 加号, “-” 减号, “\*” 乘号, “/” 除号, “,” 逗号, “.” 小数点, “(” 左括号, “)” 右括号, “\$” 币符 (中国符) 或者 “\$” 币符 (美国和一些国家)。

在 FORTRAN 程序里, 一般不允许使用这 47 个字符以外的字符。

常数在程序运行时值不变的数据, 称为常数。

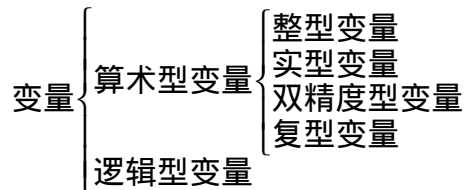
共有六种类型的常数:



整常数中不出现小数点和指数部分, 但可以有正号或负号; 实常数有小数点或指数部分。实常数有三种表示形式: 由一个数字序列和一个小数点组成, 如 3.8, 78.0, 0.54, 这种实常数称为基本实常数; 基本实常数后带一个实指数, 如 3.8E2, 就是  $3.8 \times 10^2$ ; 整常数后带一个实指数, 如 8E5, 就是  $8 \times 10^5$ 。

**符号名** 符号名由 1 至 6 个字母数字串组成, 它的第一字符必须是字母, 例如: X, LIN, T579, CHENG, ... 所有 FORTRAN 的专用名 (或称为关键字) 不得用作符号名, 也不得作为符号名的首部。例如 DATA, STOP, CALL, D043, IFAB, ENDX 都不得作为符号名使用。

变量用符号名命名的数据, 该符号名称为变量名。变量分为五种类型:



其中整型变量与实型变量是最常用的类型。变量在使用之前必须通过类型语句对其类型进行说明。在 FORTRAN 语言中，允许用隐含规则即不通过类型语句而由符号名本身自我说明是整型还是实型。

当变量的符号名首字母是 I, J, K, L, M, N 中的任一个时，如 L12, MYX, NL23, INTE, 可不通过类型语句进行说明，编译程序会自动判别其为整型。否则如 TA4, SUNE, TEMP, BETA, ... 被判别其为实型。

隐含规则只对整型和实型变量起作用，对其它类型变量，仍需用类型语句进行说明。

**标准函数** 又称为基本函数。可分为标准内部函数和标准外部函数。标准函数已定义的，需要时可以直接调用，在表达式中像一个变量一样参加运算。常用的标准函数名称、符号名、数学意义、类型可参阅下页的附表。

**源程序的书写格式** FORTRAN 源程序由注解行、结束行和若个语句行组成。而行和语句由一些字符构成。程序中出现的运算成份有常数、变量和函数。

注解行出现在程序中，用英语或汉语拼音插入注解或说明，为了认定是注解行，在行的开头必须写上字母 C。注解行仅仅在打印时写在程序纸上，编译程序并不把它看成程序的一部分。

标准函数表

分类	名称	符号名	数学意义	自变量个数	自变量	函数
标准内部函数	绝对值	ABS	$ a $	1	实	实
		IABS			整	整
	浮点化	FLOAT	整型量转为实型	1	整	实
	定点化	IFIX	实型量转为整型	1	实	整
	符号传送	SIGN	$a_2$ 的符号乘 $ a_1 $	2	实	实
ISIGN				整	整	
标准外部函数	指数函数	EXP	$e^a$	1	实	实
	自然对数	ALOG	$\ln a$	1	实	实
	正弦	SIN	$\sin(a)$	1	实	实
	余弦	COS	$\cos(a)$	1	实	实
	正切	TAN	$\tan(a)$	1	实	实
	双曲正切	TANH	$\tanh(a)$	1	实	实
	平方根	SQRT	$\sqrt{a}$	1	实	实
	反正切	ATAN	$\arctan(a)$	1	实	实

语句行的一行只能写一个语句，不能写两个语句，语句太长一行写不下，可以继续写下去，最多可以有 19 个继续行。书写时一行分为三部分，第一部分写语句号（如果需要的话）；第二部分写续行标志（如果需要的



话)；第三部分写语句内容。程序中的语句可以分为执行语句和非执行语句。

结束行表示该一程序的最后一行，并用 END 表示。说明程序执行到此结束。

**程序结构** FORTRAN 源程序采用分段编写，称为段结构(或块结构)。整个程序由一个或几个相对“独立”的程序段所组成。程序段分为主程序段和辅程序段。主程序段总是一个，辅程序段可有一个、几个或没有。不论哪种程序段，都以 END 作为结束行。

**算术表达式** 共有五个运算符，即+，-，\*，/，\*\*。最后的运算符为乘幂。FORTRAN 表达式与数学表达式很相似。

FORTRAN 表达式的计算顺序与数学表达式一致。先乘除后加减，乘幂优先于乘除，函数调用优先于乘幂，括号内的运算最优先。括号不分大中小，一律用( )。

**赋值语句** 变量=表达式 或者  
数组元素名=表达式。

功能是把右边表达式的计算值赋于左部量。

**赋标号转语句** ASSIGN1T0k

功能是在程序执行到标号 1 时，即转到由 k 内容所决定的程序标号继续执行。

**语句函数定义语句** f (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>n</sub>) =算术表达式。例如：

S (U, V) =SQRT (U\*\*2+V\*\*2)。

**读写语句** READ (u, f)k 和 WRITE (n, f)k 功能是数据输入到计算机，输出到外部设备和通道。为了说明传送数据的特征和字数、变量数，通常将读写语句和格式语句组合起来写，以保持规定格式传送。例如

```
READ (4, 27) I, J, X
27 FORMAT (2I4, F12.)
WRITE (6, 25) IN, XO, YO
25FORMAT (20X, I4, 10X, 2F12.6)
```

表示写出程序格式。

写语句也可写成 WRITE (\*, \*) A, B, I 形式，而不需要格式语句，写语句中的第一个“\*”表示系统隐含的输出设备即打印机，如 PRINT 的作用，如果第一个“\*”为 6，输出设备为显示屏；第二个“\*”为指定的输出格式，对于整数输出，每个整数占 13 列，对于实数输出，每个实数占 18 列，打印出 7 位小数，如

```
WRITE (*, *) A, B, C, I
```

**无条件转语句** GOTO k

功能是无条件去执行标号为 k 的语句。

**计算转语句** GOTO (I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, ..., I<sub>n</sub>) , k 其中 I<sub>1</sub> 为可执行的语句标号，当 k=1 时 控制转去执行标号为 I<sub>2</sub>的语句 k=2 时 执行 I<sub>1</sub>标号语句 ,...。

**算术条件语句** IF (算术表达式) I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>

功能是若表达式小于零、等于零或者大于零，则去执行标号为 I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、或者 I<sub>3</sub>的各语句。如果 I<sub>2</sub>和 I<sub>3</sub>相等，则表示不小于零就转到 I<sub>2</sub>语句。

**逻辑条件语句** IF (关系式) S 功能是关系式满足，执行 S 语句；不

满足 执行紧跟在逻辑条件语句后面的语句。注意 :关系式大于 0 可写成 关系式.GT.0.0 ; 大于、等于零可写成关系式.GE.0.0 ; 小于 0 写成.LT.0.0 ; 小于等于 0 写成.LE.0.0。

**停语句和暂停语句** STOPn 和 PAUSEn

功能是停止程序运行, n 可以是数字也可以是字符, 但字符要用 ‘ ’ 号表示, 即 ‘ ABC ’, 当程序停止运行时, 会显示出 STOP25 或者 STOPABC, 其中 25 和 ABC 用来识别停止到什么位置, 用以辨别程序的流程。STOP 停语句执行后, 一般不能再启动运行, PAUSE 暂停后, 再键入命令可继续执行程序, 可用来调试程序用。

**数组、维数语句** A(i), A(i, j), A(i, j, k), DIMENSION 数组功能是设置内存空间存放数据。

**循环语句** DO11=m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>, m<sub>3</sub>

功能是完成计算方法和步骤完全相同, 但计算所用的数据有一定的变化规律, 要求多次重复计算的场合。例如用凑数法求解方程的根, 就需多次循环计算, 每得到一个值进行比较, 直到满足要求为止。循环语句中 1 是循环语句后的某一可执行语句的标号, 标号为 1 的语句称为循环终端语句。I 是整形变量名, 称为循环的控制变量, m<sub>1</sub> 为循环控制变量的初值, m<sub>2</sub> 为循环控制变量的终值, m<sub>3</sub> 为增量(步长)。一个 DO 语句定义一个循环, 从紧接着 DO 语句后面的第一个可执行语句开始, 直到 I 为标号的终端语句为止, 称为 DO 循环的循环体。DO 循环执行完毕后, 程序的运行脱离循环而转向循环终端语句后面的可执行语句。这种转向称为正常出口, 如果循环体内包含 IF 语句或 GOTO 语句, 程序就可能在完成循环之前, 通过这些语句转出循环体外。这种转向称为非正常出口, 控制变量仍有定义, 它的当前值可以引用。

**继续语句** CONTINUE

功能是使正常的执行顺序继续下去。通常此语句加上标号作为 DO 循环的终端语句。

**子程序与调用语句** SUBROUTINE 子程序名 (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, ..., a<sub>n</sub>) 是一种特定功能的程序单位, 根据需要可被调用, 在子程序中列在第一行用以说明子程序的名称和包含的变量内容。

子程序的末尾可用 RETURN 或者 END, 通常用 END, 并且在子程序中只能出现一个 END; 所以在子程序的其他地方如果需要时可用 RETURN 语句。

CALL 子程序名 (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>n</sub>)

功能是调用子程序, 如果子程序没有参数可写成:

CALL 子程序名

**函数子程序** FUNCTION 函数名 (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, ..., a<sub>n</sub>)

功能是当某些函数的值不可能用一条语句来求得时, 就可借助函数子程序来定义一个函数。

函数子程序的第一条语句必须是 FUNCTION 语句。函数名要遵循 FORTRAN 的取名规则, 即第一个字母来确定是整型还是实型; 如果函数名第一字母是 N, 但又不是整型, 则在第二条语句就要写明 REALN; 函数子程序的最后一条语句必须是 END 语句, 即把控制返回到调用程序单位。

**数据初值语句** DATA list<sub>1</sub>/data<sub>1</sub>/, list<sub>2</sub>/data<sub>2</sub>/, ..., list<sub>n</sub>/data<sub>n</sub>/

功能是用来在编译期间给变量置初值。

注意在同一程序里一个变量只能赋值一次。

**FORTRAN 语言编写程序的运行** 写好了 FORTRAN 源程序后，必须经过编辑、编译、连接、运行等几个步骤。

如果要建立源程序磁盘文件，其名为 A1.FOR（后缀 FOR 表示 FORTRAN 源程序文件），则打入命令，C>EDLIN A1.FOR↵

如果是新建的文件，则显示屏上会出现：NEW FILE（表示是新文件）

\*（\*是进入编辑状态的提示符）

\*I↵（I 为插入命令，↵回车）

然后按源程序逐行地键入，输入完毕按 CtrlBreak 键（按住 Ctrl 键再按 Break 键）可退出插入状态。

\*L↵（列出程序清单，如发现有错，可通过修改命令进行修改）

\*E↵（退出编辑状态，返回操作命令状态）

C>（表示计算机目前连接 C 盘）

如果要编译源程序，源程序 A1.FOR 在 A 盘上，FORTRAN 编译程序在 C 盘上，则可采取如下命令：C>A:↵（将计算机与 A 盘连接）

A>C: FOR1↵A1;↵（从 C 盘调入 FOR1 编译程序，对 A 盘上的 A1.FOR 源文件进行编译，如有语法错误，会显示出“有 x 个错误”的信息，然后设法找出来修改（每次修改都必须重新用 EDLIN 命令），直到编译不再出现错误为止）

A>C: FOR2↵A1;↵（如不发生错误，则全部编译完成，产生目标程序 A1.OBJ.）

如果程序包含几个程序单位，则应分别进行编译，得到几个目的程序，然后把它们与子程序库连接成为一个统一的目的程序。如果只有一个程序单位（名为 A1），则可键入：

A>C: LINK↵A1;↵

如果有几个程序单位（主程序和子程序），名字分别为 A1，A2，A3，则可键入：

A>C: LINK↵A1+A2+A3;↵

连接完毕后，产生一个可供执行的程序块，系统自动给它定名为 A1.EXE，存放在 A 盘上。

如果要运行 A1 文件，只要直接键入 A1↵即可。

**发光（luminescence）** 物质在较冷时产生的光发射。它和燃烧的木柴、熔化的铁或通电加热的灯丝等炽热物体发的光不同。霓虹灯、日光灯、电视、X 光机透视屏都显示着发光现象。有机物和萤火虫的荧光素、广告颜料等都可发光。闪电和极光也属发光。这些发光现象不是由于物质温度高于室温而产生的，所以常称为冷光。

物质吸收了能量（如紫外线、X 射线、电子射线、化学反应能）而发光。吸收能量使物质中的原子达到受激态，由于受激态是不稳定的，物质将会回到基态而把吸收的能量释放出来。发光的效率决定于激发能量转变成光能的程度，只有极少数物质的发光效率达到有实用意义的数值。发光的微晶材料叫做荧光粉。最早人工合成的荧光粉是硫化锌，这是现代技术中最重要的荧光粉。纯硫化锌并不发光，只有当它含有少数激活剂时才发

光。某些金属的氧化物或硅酸盐、磷酸盐等，如用特定的方法制备，也可以发光。

**法布里-珀罗干涉仪** (Fabry-Perot interferometer) 用平面平行空气板产生多光束干涉的光学装置。是法布里和珀罗两人于 1899 年首次研制的。空气板由两块略带楔形的玻璃或石英夹成，相向的两平面镀以银膜或其它高反射膜，平行膜面加工精度要求很高，与标准样板的偏差不允许超过  $1/20 \sim 1/50$  个波长。平行空气板厚度可用准确的厚度为  $d$  的环隔开。若该厚度可以改变，则称为法布里—珀罗干涉仪；若不能改变，称为法布里—珀罗标准具或法布里—珀罗光谱仪。

**原理** 干涉仪的工作原理是多光束干涉效应。光在腔内往返一次的相位移动为  $\varphi = \frac{4\pi d}{\lambda} n \cos r$ ；干涉仪强度透过系数为  $T = \frac{(1-\rho)^2}{(1-\rho)^2 + 4\rho \sin^2 \frac{\varphi}{2}}$ 。

一般情况光为正入射，故折射角  $r \sim 0$ ； $n$  为介质折射率，用平行空气板时  $n=1$ ； $\rho$  为反射率。因此  $\varphi$  为常数，输出光强与输入光强呈斜率为  $T$  的线性关系。当  $T \rightarrow 1$  时，经多次反射后形成的各透射光接近于等振幅光束，相邻光束的相位差为  $\varphi$ 。因此可获得锐利的干涉条纹。由于两镀银面相互平行，且光源为扩展面光源，故产生等倾干涉，干涉条纹是同心圆，中心处级次高，外围干涉圈的级次低。

**参量 定义**  $\Delta\lambda$  为光谱分辨率。 $\Delta\lambda$  为刚能被分辨的两相邻波长的波长差。因镀银面反射系数越大，由透射光获得的干涉亮圆环越细锐， $\Delta\lambda$  越小，故分辨本领越大。两镀银面间距离  $d$  大，干涉条纹的级次  $k$  也就高，分辨本领也越大。但分辨本领大了，不同级不同波长的条纹容易重叠，使自由光谱范围，即互不重叠的光谱范围变得很窄。法布里—珀罗干涉仪的自由光谱范围为  $\lambda^2/2d$ 。

**应用** 由于分辨本领很高，这类干涉仪可应用于光谱线超精细结构的研究。例如一条波长为 0.6438 微米的镉红谱线，在光谱分析实验中，粗看起来是一条谱线，但是如果用分辨本领为  $10^{-6}$  微米的法布里—珀罗标准具分析，就可以发现它实际上包含了许多很细的谱线。

在普通法布里—珀罗干涉仪中放置某种非线性介质，使它的吸收率随入射光强而变化。当入射光较弱时，非线性介质吸收很强，不会出现多光束干涉，透射光强随入射光强的增加而缓慢增加。但当入射光强达到某一值时，非线性介质变成透明，使透射光强变得很强。在取入射光强  $I_T$  作横坐标、透过光强  $I_0$  作纵坐标的图上， $I_T$  先是缓慢上升，在介质变成透明的  $I_0$  值处， $I_T$  突然垂直升跃。若降低  $I_0$ ， $I_T$  此时并不按原路返回，而是沿一条像磁滞回线那样的轨迹变化。就是说，对于一定的入射光强，透过光强具有两个稳定值。如果不是利用非线性介质的吸收特性，而是利用它的折射率随入射光强变化的特性，也能观察到同样的双稳态现象。与电子器件和半导体器件中的非线性元件一样，这种光学双稳态器件也可以应用于计算机（光计算机），模拟与门和或门，作为逻辑开关、转换开关或控制开关等元件，在新一代计算机的研制和光通信中具有重要价值。这是在本世纪 80 年代初在非线性光学基础上发展起来的一种光学双稳态器件。

**法拉第** (Michael Faraday 1791 ~ 1867) 英国物理学家、化学家。

电磁感应的发现者，电解定律的确立者，电磁学实验大师。

**生平** 法拉第 1791 年 9 月 22 日生于伦敦一个铁匠家庭。从孩提时代起，没有受过系统的教育。12 岁时便到伦敦布朗福街 2 号一家钉书铺做学徒。在书铺里工作了 7 年，犹如上了 7 年的学校。1812 年初秋，购到戴维科学讲演会的听讲券，在听讲时是那样聚精会神，回到家里整理笔记又是那样仔细认真，更可贵的是按戴维讲的亲自动手做实验。于是在头脑里闪过一个念头，并写了一封信给戴维，诉说自己贫困的身世，对科学的憧憬，希望得到一个能够接触技术的职位。经过一番曲折，最后终于得到戴维的推荐成为一名实验助手。1813 年起，随戴维夫妇去欧洲大陆作科学考察旅行。1815 年回国后，立即投入紧张的研究工作。1816 年在皇家学院化学杂志上发表了第一篇科学论文。1824 年当选为皇家学会会员。1825 年任皇家研究所实验室主任，靠勤奋自学的法拉第开始在科学事业上大显身手。

### 学术成就

**电磁感应的发现者** 经过反复的研究和实验 终于在 1831 年作出了电磁感应的重大发现。次年还发现在相同的情况下，不同金属导线中产生的感应电流同导线的导电能力成正比。并直觉地揣测到磁铁周围是一个充满力线的场，感应电流的产生是由于导体切割力线。虽然法拉第并没有把他的研究结果用数学公式定量表示出来，但他对于电磁现象的丰富研究，他作为电磁感应的发现者也是当之无愧的。

**电解定律的确立者** 在总结大量实验结果的基础上，于 1834 年确立了关于电解的两条基本定律。其中电解第一定律为：不管电介质或电极的性质是什么，由电解所析出之物的质量与电流强度及通电时间成比例，换句话说，与通过溶液的总电量成正比。电解第二定律为：一定量的电流量所析出之物的质量与这物质的化学当量成比例。法拉第电解定律是电化学中的重要定律，在电化生产中经常用到它。法拉第所以能发现电解定律，一个重要原因在于他通过自学打下了较为扎实的电学与化学知识的基础，具备了兼通电学与化学两门学科的本领，其后又成了这两门学科造诣很深的专家。以致当这两门学科相互渗透时，法拉第以他特有的才能，很快地架起了沟通这两门学科的桥梁，从而作出了新的具有重要意义的发现。

**电磁学实验大师** 法拉第是迄至 19 世纪中叶最杰出的实验科学家。他毕生从事卓有成效的实验工作，在化学和物理学领域作出了一系列重要发现。以致在当时就有人深为钦佩地赞扬他：“自从伽利略以来，全世界还未曾见过一个人能够做出这样大量的多种多样的惊人发现，而且也未必能很快看到会有另一个法拉第出现。” 证明各种来源的电都相同的实验。时至 19 世纪 30 年代，已发现的电有五种：摩擦产生的电（法拉第称为普通电）、动物电、伏打电、温差电和电磁感应产生的电（法拉第称为磁电）。有些人认为，这些电是彼此不同的。1832 年，法拉第对上述五种电进行全面系统的实验研究，最后得出结论：“不管电的来源如何，它的本性都是相同的。” 说明电容率特征的实验。由于法拉第是反对超距作用观点的，空间介质的电学性质问题便引起他的高度重视。他曾研制出一种球形电容器，当时称它为分布仪。1837 年，对平板电容器进行实验研究，得出绝缘材料的电容率。导体的电荷在其表面的实验。法拉第认为传统的证明导体的电荷在其表面的实验还未具有决定性。于是在 1838 年设计了新的实验——“法拉第笼”，他带着灵敏的电学测量仪器，住进笼子里面去。结果

发现：“此时虽然笼子带有颇为强大的电荷，可是在笼内却检查不出电荷存在的任何微弱影响。”这一重要发现，既说明导体的电荷分布在其表面，又为后人提供了静电屏蔽的方法。证明电荷守恒的实验。1843年，法拉第将一只盛水用的锡铅合金桶和一只灵敏的金箔验电器相连接，进行了一系列精确的实验，证明了电荷守恒定律，即电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。该定律是电磁学的重要定律之一。光的偏振面在强磁场中旋转的实验。1845年，法拉第用一束偏振光通过重玻璃，然后用尼科耳棱镜进行细致的观察。结果他发现原来没有旋光性的重玻璃在强磁场的作用下产生旋光性，使偏振光的偏振面发生偏转。这就是磁致旋光效应的发现，后来被称为法拉第效应，这也是人类第一次认识到电磁现象与光现象之间的关系。揭示抗磁性和顺磁性的实验。对磁力线与物体的相互作用抱有浓厚兴趣的法拉第，于1845年又宣布发现了大多数物质具有抗磁性。要获得这个结果同样是相当困难的，但是法拉第在新设计的实验中，用很强的电磁铁，得出了挂在强电磁铁前的重玻璃会被排斥的结果，他便把这类物质称为抗磁质。被这一发现所鼓舞的法拉第，将身边所有物质都放到强磁场中进行试验，结果又发现其中的铂、钨、火漆等物质和铁一样，它们便被称为顺磁质。

可贵的物理思想 一般认为法拉第仅是一位伟大的实验科学家，这样的评价是不全面的。法拉第还是一位具有丰富物理思想的科学家 各种自然力统一的观念。法拉第认为各种自然现象都是相互关联的，各种自然力是可以相互转化的。他列举电磁感应磁光效应、电池的化学论思想、电化当量以及不同来源的电的同一性来说明上述统一性观念，他坚信这一观念的正确性。电磁以太的模型。为了解释当时已知的电磁现象，法拉第建立了如下模型：电磁作用是由弥漫整个空间的以太形态产生的，这些以太是由力线或力的管子所组成，这些力线或力的管子将相反的电荷或磁极连接起来，并且沿力线的方向有张力作用，在垂直于力线的方向则有压力作用。当然，从现代的观点来看，这种电磁以太模型是被否定的，但在当时采用这种模型却获得了一定的成功，即用近距作用的观点来论证电磁力，这样就更接近于物理实际。场观念和力线图。历史上发现的好几种力都是遵从距离的反平方关系的，作为物理思想上具有独立气质的法拉第，他不是去随附当时普遍流行的观点，而是在自己的实验总结中大胆否定了超距作用，认为物体之间的电、磁力是需要由媒介传递的近距作用。最为突出的是，法拉第于1845年11月7日最早使用磁场一词，于1847年1月19日开始单独使用场这个词，也就是明确提出了磁体和带电体周围空间存在一种由磁或电产生的物质——场，起到了传递电、磁力的媒介作用。场的崭新观念，用文字来描述是困难的，而用数学公式来说又不是法拉第擅长的。经过周密的思考和分析后，法拉第决定用图示法，即用电力线、磁力线来表示，这是近代物理科学中的一个创造。法拉第的场观念和力线图是自牛顿时代以来，在物理学概念、基础理论方面最重要的变革，它打破了欧洲大陆国家（特别是法国和德国）传统的超距作用观念，而使近距作用观念得以占据统治地位，为以后麦克斯韦电磁场理论的建立奠定了基础，并对整个物理学的发展产生重大影响。

法拉第电磁感应定律 ( Faraday law of electro-magnetic

induction) 确定回路中感应电动势的实验定律。任一闭合回路中的感应电动势与通过该回路的磁通量的时间变化率成正比, 即

$$\varepsilon = \frac{d\phi_m}{dt}$$

式中  $\phi_m$  的单位为 Wb,  $t$  的单位为 s,  $\varepsilon$  的单位为 V。负号是确定回路中感应电动势的方向所要求的, 其使用规则如下: 任设一个巡回方向为回路的正方向, 并由此按右手定则确定回路正法向  $n$  的方向。按  $n$  的方向计算通过回路的磁通  $\phi_m$  及其时间变化率  $d\phi_m/dt$ 。若  $-d\phi_m/dt > 0$ , 则感应电动势  $\varepsilon$  沿上述设定的正方向; 反之, 则  $\varepsilon$  与所设方向相反。由此确定的感应电动势或感应电流的方向总是与楞次定律所确定的方向一致的。

利用电动势的定义式和磁通量的表达式, 定律即可表示成

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S},$$

上式称为法拉第电磁感应定律的积分形式。再利用斯托克斯定理, 又可得

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

上式称为法拉第电磁感应定律的微分形式。它们反映了变化的磁场激发涡旋电场这一事实, 成为描述电磁场的基本方程之一, 是麦克斯韦电磁理论和麦克斯韦方程组的重要基础。

1820 年奥斯特发现了电流的磁效应以后, 英国物理学家和化学家法拉第即致力于其逆效应的探索。他进行了大量的实验, 屡经失败和挫折, 终于在 1831 年 8 月 29 日得到了成功。当他把绕在软铁芯上的一只线圈中的电源接通或断开时, 发现铁芯上的另一只线圈内有电流出现。他敏锐地意识到这就是长期寻求的“磁能转化为电”的现象。使他感到意外的是, 这一现象并不是包括他本人在内的许多物理学家所期待的一种稳定效应, 而是一种暂态的或非稳定效应。为此, 他又设制了几十种实验以寻找这种非稳定效应的规律, 并于 1832 年建立了电磁感应定律。不过, 现代所采用的电磁感应定律的数学表式是 1846 年德国科学家诺埃曼和韦伯通过各自的研究而总结出来的。由于法拉第的杰出贡献, 定律仍以他而得名。

电磁感应现象和电磁感应定律的发现具有划时代的意义。它使人类真正打开了电磁能量的宝库, 使后来发明发电机、电动机、变压器以及各种电力装置成为可能, 从而极大地改变了工业生产的面貌, 使人类社会进入了电气化时代。

反冲 (recoil) 物质系统在向外发射其部分物质或能量的同时, 余下部分产生的方向相反的运动。例如, 枪炮在发射子弹和炮弹时的后坐作用, 火箭喷射气体而发生的火箭运动, 原子核裂变过程中各个碎片的运动等。反冲现象是动量定恒的结果。当物质系统中有部分物质以一定量值的动量离开系统时, 由于内力的作用, 其余部分必然以大小相同和方向相反的动量运动, 因而形成反冲。在散射问题中, 不动的靶粒子由于受到入射粒子的作用而获得其动量的一部分, 因此而产生的运动也称为反冲。

反粒子 (antiparticle) 一类基本粒子。通常所说的基本粒子可称为“正粒子”。反粒子和正粒子的质量 ( $m$ )、寿命 ( $\tau$ )、自旋 ( $s$ )、同位旋 ( $I$ ) 等量子数完全相同, 但是另一些物理量量子数, 如电荷 ( $Q$ )、

同位旋第三分量 ( $I_3$ )、重子数 (B)、轻子数 (L)、奇异数 (S)、超荷 (Y) 等, 其值相同, 但符号相反。英国物理学家狄拉克首先通过相对论性量子力学从理论上预言了电子的反粒子, 即正电子 ( $e^+$ ) 的存在。1932 年, 美国物理学家安德森从宇宙线实验所得到的云室照片中首次发现了正电子。质子的反粒子, 即反质子 (P) 是在 1955 年从加速器实验上发现的。除了某些中性玻色子 (如  $\pi^0$  介子, 光子) 外, 粒子与反粒子是两种不同的粒子。对于  $\pi^0$  介子或光子来说, 由于区分粒子和反粒子的所有物理量子数均为零, 所以这些粒子也就是它们自身的反粒子。每种粒子与其相应的反粒子相遇时将发生“粒子对湮灭”过程, 而转化为光子或其他粒子对。

**反射 (reflection)** 光行进到两种媒质的分界面时, 有一部分返回原媒质的现象。如果入射点处分界面的不平整程度比波长小得多, 就可看作平滑分界面。光在平滑分界面上的反射为镜反射, 或称单向反射。否则, 为漫反射。如果既有镜反射, 又有漫反射, 则称为混合反射。漫反射时各不同方向的光的亮度如果都相同, 则称为均匀漫反射。同一次反射过程中, 有些波长的光反射得多些, 则称为选择反射。可以利用涂膜技术, 改变媒质分界面的光学性质, 使反射光中减少或增多某一波长的光的成分, 以适应不同光学元件的要求。垂直于或近似垂直于分界面的正入射光所引起的反射称为正反射。

单位时间内从界面单位面积上反射光所带走的能量与入射光入射的能量之比, 称为反射率。能量之比等于光强之比, 故反射率即为反射光强与入射光强之比, 也等于反射光与入射光的振幅平方之比。正反射时, 反射率可用第二媒质对第一媒质的相对折射率  $n_{21}$  ( $=n_2/n_1$ ) 表示, 为  $R=(n_{21}-1)^2/(n_{21}+1)^2$ 。反射光波振幅与入射光波振幅之比, 称为反射比或反射系数。

研究某材料的反射情况, 需要测定该材料样品平面在各方向上对各种波长的反射率。对于一般性的研究工作, 国际照明委员会 (简写 CIE) 推荐取  $45^\circ \pm 5^\circ$  方向上照明,  $90^\circ \pm 10^\circ$  的法线方向观测; 也可以  $90^\circ \pm 10^\circ$  照明而以  $45^\circ \pm 5^\circ$  观测。物质的反射率与厚度有关, 因为一部分光要稍进入物体内部, 然后再被反射出来。故严格的定义还应限定材料样品的厚度。

反射率有时也称为反射比, 反射系数, 反射本领或反射因数。我国全国自然科学名词审定委员会于 1988 年公布的物理学名词 (基础物理学部分) 中, 把这些术语统一规范为强度反射率和振幅反射率。

光的反射是生活中常见的现象。沙漠中有时会出现一种称为海市蜃楼的光学幻视现象, 这是一种光的反射现象。当大气下层热, 上层凉, 光线从地面向上传播逐渐弯曲而至反射, 使沙漠中的人们看到远处的景物。这称为下现蜃景。如果冷气流在下层, 则可能会发生上部景物的全反射成像, 称为上现蜃景。早在 11 世纪我国沈括的《梦溪笔谈》中, 对这些现象就已有记载。

**反射镜 (mirror)** 利用反射面反射光线的光学元件。通常有平面反射镜、球面反射镜和非球面反射镜三种。根据反射的程度又可分为全反射和半透半反射两种, 后者常简称为分束镜。

**平面镜** 通常由镀银或镀铝的平面玻璃制成。平面反射镜对实物成虚



像，对虚物成实像。它是唯一不破坏光束单心性的光学元件，能形成完善的像。

**球面反射镜** 反射面为球面。若球心位于受光面一侧，则称为凹球面镜，简称凹面镜；球心位于受光面另一侧，则称为凸球面镜，简称凸面镜。凹面镜是会聚镜，平行光束经它反射后会聚于一点，此点为实焦点。把点光源放在实焦点位置上，光束经反射后成为平行光束。凸面镜是发散镜，平行光束经它反射后成发散光束，反射光线的反向延长线交于一点，此点为虚焦点。汽车驾驶室两旁安置的观察镜为凸面镜，远处的物体在虚焦点前附近形成正立缩小的虚像。

**非球面反射镜** 有抛物面镜、双曲面镜、椭球面镜、锥面和柱面反射镜等。平行光轴的光束经抛物面镜反射后会聚于抛物面的焦点，在反射式天文望远镜中做物镜，可以使遥远的星体成像于焦点处。反之由焦点发出的光束经抛物面镜反射后形成平行光束，用于做探照灯。双曲面镜和椭球面镜常用于某些特殊的光学系统中，以简化结构和改进成像质量。

**反物质(antimatter)** 由于粒子构成的物质。例如由绕着反质子(P)运动的正电子( $e^+$ )所构成的系统就是一种反物质，称为反氢原子。目前通过高能加速器实验已制造出反氖核和反氦核。某些天体物理学理论预言在宇宙中的某些部分可能存在反物质，但至今尚未被证实。

**泛音(overtone)** 复音中除基音外的其他分音。泛音可以是频率为基频整数倍的谐音，也可以是频率高于基音而不是整数倍的非谐音。例如，两端固定的弦振动时所发出的声是由基音及其谐音组成的；而周界固定的圆形膜振动所发出的声是由基音和非谐音的泛音组成的。每个音声所包含的泛音多少和强弱决定这个音的音品。

**范德格喇夫起电机(Vande Graaff generator)** 产生静电高压的装置。由美国物理学家范德格喇夫于1931年发明。其主要组成部分如图所示。在直立的绝缘管上端装有一巨大的空心金属球A，管内上下两个滑轮上装有绝缘传送带，下滑轮 $P_1$ 用电动机带动旋转，使整个传送带上下运动。下滑轮旁放置有高压直流源，电源一端的导体 $C_1$ 不断将电荷输送到传送带上。在上滑轮 $P_2$ 旁装有一个与金属球相接触的尖端导体 $C_2$ ，传送带上的电荷不断地由 $C_2$ 转移并分布到金属球的外表面，球的电势随之不断升高。范德格喇夫起电机产生的最高电压视金属球的直径大小而异。例如，直径为2米的金属球可产生对地约1兆伏的高压。为了减小体积、提高电压，并减小高压下的漏电损失，可将整个装置放在充有10~20个大气压的氮气钢罐中。

产生正极性的范德格喇夫起电机在科学研究中用作正离子加速电源；产生负极性的则用于高穿透性X射线发生器中。范德格喇夫起电机有时也称为范德格喇夫加速器。

起电机示意图

**方均根速率(rootmeansquare speed)** 参见麦克斯韦速率分布律。

**方以智(1611~1671)** 明清之际思想家、科学家。字密之，号浮山愚者，安徽桐城人。少年时代参加“复社”活动，与陈贞慧、吴应箕、侯方域一起，有“明季四公子”之称。崇祯十三年(1640)中进士，官拜翰林院检讨。清兵下广东，出家为僧，法名行远，号无可、药地、愚者大师、

极丸老人等。康熙十年（1671）因事牵累，被解入粤，途经万安时暴卒。

方以智自幼喜欢技艺，虽然后来生活动荡，贫病交加，却仍能“好学覃思，自童迄白首，手不释卷。”他知识渊博，对天文、地理、历史、物理、生物、医学、文学、哲学、音韵学都有研究，特别强调“质测”（实验科学），主张“寓通机（哲学）于质测”，即哲学不能离开科学，科学应该以哲学为指导。

当时西学已由传教士传入中国。他仔细研究了西学的重要译述，并与传教士汤若望相交至深。由于他能批判地吸取西学精华，因此他的著作具有并蓄兼收的特色。所著《物理小识》十二卷，记录了包括天文、历算、物理、矿物、植物、动物、医药等方面的知识近一千条，是17世纪初叶的一部民间自然百科全书。

《物理小识》中虽然物理内容占的比例甚小，但在力、热、声、光、磁诸方面都有叙述。在力学上他详细记录了利用比重差异，从混合矿石中分出各类金属的方法；记录了以莲子、鸡蛋、桃仁、饭豆试验盐卤浓度的方法；还描述了西方的螺旋起重机。在光学上，他记录了光的反射、折射、光学仪器和大气光象等，并阐述了用有棱的宝石或三棱形的水晶把光分成五色的实验，这比牛顿的色散实验要早三十余年。书中一部分是他摘录前人的记述，大部分是他亲见和实验的记录。除《物理小识》外，他还著有《通雅》、《东西均》、《药地炮庄》、《浮山集》等。

**仿真技术**（simulation technology）利用模型对实际系统进行实验研究的一门技术学科。它是从本世纪50年代开始发展起来的。当实际系统尚未建立，或者在实际系统上进行实验比较危险，或代价太高、周期太长或难以实现时，仿真技术就成了十分重要甚至必不可少的了。

利用仿真技术来模仿真实系统，首先就要建立能反映真实系统主要特性的数学模型，通常称这一过程为系统建模或系统辨识。数学模型是一种用数学方程来描述系统性能的模式。一般所指的仿真，就是应用数学模型进行的数学仿真。数学仿真的过程是：建立一个系统（或过程）的数学模型，然后通过数值计算的方法将数学模型变换成可以在计算机上运算的仿真模型，并据此编制成仿真程序，然后通过数学计算机（或模拟计算机）进行试验。通过模型试验可以了解原系统（或过程）在各种内外因素变化下，其性能的变化规律。

数字仿真技术具有投资少、周期短、较安全等优点，故被广泛应用于各个领域。按其应用的目的来分，可分为两类：用于系统分析和设计；

用于制成训练用的仿真器。训练仿真器一般用于操作人员比较危险或有些条件无法实现的场合。近年来，我国已研究了一些仿真器（或称模拟器），例如飞机驾驶模拟器、船舶操纵训练器、汽车驾驶模拟器以及管理训练模拟器等。前三者训练仿真器既可保证被训练人员的安全，也可节省能源（30~40%），缩短训练周期。管理训练器对管理科学化和现代化很有意义。

**放大镜**（magnifier）一种焦距很短的会聚透镜。它的作用是帮助眼睛观察微小物体的细节。用放大镜观察物体时，像必定是位于明视距离外的正立放大的虚像。为此，必须使物体位于放大镜物方焦点附近靠近放大镜的一侧。放大镜实质上放大了视角，人眼对放大镜所成虚像的视角大于对明视距离处物体的视角。放大镜的放大率  $M$  为：

$$M = \frac{25}{f},$$

式中  $f$  为放大镜的焦距，以厘米为单位。如果放大率为 2.5 倍，习惯上写成  $2.5 \times$ 。从上式看，似乎减小凸透镜的焦距，可以获得更大的放大率。实际上因为有像差存在，单透镜放大镜的放大率一般不超过 5 倍。

用平凸透镜做放大镜，将凸面对着物体，可以减小像差。用弯月形会聚透镜可以减少像散。采用复合透镜做放大镜，可以减少像差，并使放大率达到 20 倍。

**放大器 (amplifier)** 实现增加电信号幅度或功率的装置。放大器的核心是电子管、双极型晶体管或场效应晶体管等有源器件。为了实现放大，一般必须有直流电源。放大器实质上是在输入信号控制作用下，把电源的能量转换为输出信号的能量，使输出信号的变化重复或反映输入信号变化，但幅度和功率都增加了。

#### 图 1 共发射极放大电路

电子管和晶体管的工作机理虽然互有区别，但它们所构成的放大器都使用直流电源，电路形式也极为相似。图 1 是一个常用的晶体管共发射极放大电路。其中晶体管为 NPN 型； $R_C$  是负载电阻，用来提取放

#### 图 2 共基极放大电路

大了的信号电压； $R_B$ 、 $R_A$  称偏置电阻，用来给晶体管提供偏置电流，以保证晶体管工作在最佳工作状态（线性区）。 $C_1$ 、 $C_2$  是兼有隔直流作用的耦合电容。图 2 和图 3 分别是共基极和共集电极放大电路。图 1 ~ 图 3 所示的电路常被称为 RC 耦合放大器。

#### 图 3 共集电极放大电路

放大器的主要性能指标有放大倍数、输入阻抗、输出阻抗、频率响应、非线性失真度和噪声指数等。

**电压放大倍数：**放大器的输出电压对输入电压的比值。共发射极电路的单极电压放大倍数达数十倍；而共集电极电路的电压放大倍数恒小于 1 并接近于 1。

**输入阻抗：**放大电路对信号源（或对前级放大电路）来说，是一个负载，可用一个电阻来等效代替。这个电阻是信号源的负载电阻，也就是放大电路的输入阻抗。共发射极电路的输入阻抗较低而共集电极电路的输入阻抗较高。

**输出阻抗：**放大电路对负载（或后级放大电路）来说，是一个信号源，其内阻即为放大电路的输出电阻。通常希望放大电路的输出阻抗低一些，这样放大电路带负载的能力较好。

**频率响应：**放大器的放大量是频率的函数，它们的关系称为幅-频特性。放大器输出相对于输入的相位差也随频率而改变，这种关系称为相-频特性。它们合称为放大器的频率特性，也称频率响应。**非线性失真度：**对于大信号放大器（如功率放大器），放大器件的非线性造成输出波形可觉察的失真，称为非线性失真，也称谐波失真，其大小可以利用非线性失真系数  $D$  来衡量。若输入为一正弦波信号，输出总功率  $P_0$  中含二次及高次谐波的功率之和为  $P_{OH}$ ，

$$D = (P_{OH} / P_0) \times 100\%$$

则克服非线性失真的主要方法是合理选择放大器件的工作点以及限制输出信号的动态范围。

噪声指数：放大器的内部噪声占很大比例，如电阻的热噪声、电子器件的散粒效应噪声和半导体器件中的复合噪声等。衡量放大器噪声特性的参数叫做噪声指数，记为

$$F = \frac{\text{输入信号功率} / \text{输入噪声功率}}{\text{输出信号功率} / \text{输出噪声功率}}。$$

放大器的分类方式很多。除按所用有源器件类型和器件的运用方式来分类外，还可按放大器的主要功能分为电压（或电流）放大器、功率放大器、直流放大器和低噪声放大器等；按电路的耦合方式分，有 RC 耦合放大器、变压器耦合放大器和直接耦合放大器等；按频率响应特性分，有宽带放大器、窄带放大器和选频放大器等；按使用的频率范围分，有直流放大器、低频放大器、中频放大器、高频放大器和射频放大器等；按特定的技术要求或结构方式还有各种名称，如对数放大器、差分放大器、运算放大器、弱电流放大器，前置放大器、天线放大器、隔离放大器、缓冲放大器和脉冲放大器等。

放射现象（radioactivity）亦称放射性。是指不稳定原子核自发放出  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线的现象。原子核放出射线的过程中，自身由一种核素转变为另一种核素。

放射性有天然放射性和人工放射性之分。1896 年法国科学家贝克勒耳在研究铀盐的荧光现象时，发现含铀物质能发射出穿透力很强但肉眼看不见的射线，它能使照相底片感光。这种天然存在的放射性核素所具有的放射性称为“天然放射性”。原子序数从 84 起的所有核素都具有天然放射性，原子序数比 84 小的某些核素也有天然放射性。它们大多属于由重元素组成的三个放射系（即钍系、铀系和锕系）。1934 年约里奥-居里夫妇用  $\alpha$  粒子轰击铝时，经核反应生成磷 30 和中子，他们发现磷 30 也具有放射性。这种人工制造的放射性同位素所具有的放射性称为“人工放射性”。

放射现象与原子核的衰变过程，如  $\alpha$  衰变和  $\beta$  衰变等有关。在  $\beta$  衰变过程中，衰变后的剩余核（子核）与衰变前的原子核（母核）相比，原子序数减少 2，质量数减少 4。 $\alpha$  衰变是母核通过强相互作用和隧道效应而发射出  $\alpha$  粒子的过程。

衰变有三种类型： $\beta^+$  衰变，即原子核内的一个质子转变为中子，并放出正电子和中微子的过程（ $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ ）； $\beta^-$  衰变，即原子核内的一个中子转变为质子，并放出电子和反中微子的过程（ $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ ）；轨道电子俘获，即原子核内的一个质子俘获一个核外的轨道电子而转变为中子，并放出一个中微子的过程（ $p + e^- \rightarrow n + \nu$ ）。 $\beta$  衰变是通过弱相互作用而发生的。

经过  $\alpha$  衰变和  $\beta$  衰变后的子核往往处于激发态。处于激发态的原子核要放出  $\gamma$  射线而向较低激发态或基态跃迁，这称为  $\gamma$  跃迁。因此， $\gamma$  射线往往伴随着  $\alpha$  射线和  $\beta$  射线产生。

放射性核素放出的射线类型除  $\alpha$  粒子、电子及  $\gamma$  光子外，还可能有正电子、质子、中子、中微子等。

实验表明，高温、高压或强磁场都不会显著地影响放射过程的衰变速率，这是因为这些因素通常只能引起核外电子状态的变化，而放射现象主

要是由原子核内部的变化引起的。

**非晶态材料** (non-crystalline material) 原子在空间分布无长程序的固态物质。又称为无定形材料或玻璃态材料。

非晶态固体中原子的排列不呈现周期性，也没有长程序。但非晶体的结构并非是完全混乱的。在非晶态固体中，由于原子间化学键合作用的影响，在每个原子周围几个原子到十几个原子间距的范围内，原子排列仍然具有一定的规律性。例如，每个原子的近邻配位原子的数目和种类、近邻原子间的距离和键角等等，都是有规则的。这种在小范围内存在的一定程度的规则排列称为短程序。大量的实验结果都已肯定了非晶态固体存在短程序。对多数材料，这种短程序的范围约为 1~2nm。非晶态固体的结构比较复杂，至今尚无有效的技术可以准确测定非晶体中原子分布的全貌。不过，通过某些理论模型和实验观测的对照，目前人们已对非晶态结构的主要特征有了初步了解。

非晶态材料的种类很多，除传统的玻璃外，还有非晶态金属（又称金属玻璃）、非晶态半导体、非晶态高分子聚合物、非晶态电介质以及非晶态离子导体等。许多非晶态材料显示出特有的优异性能，因此它已成为一类新型的固体材料，展现出美好的应用前景。例如，金属玻璃的强度比金属高，而且同时具有很高的硬度和韧性；低含铬的铁基金属玻璃具有非常优异的耐腐蚀性，如  $\text{Fe}_{63}\text{Cr}_{12}\text{Ni}_5\text{P}_{13}\text{Cr}$  非晶态合金的耐腐蚀性比不锈钢要好百倍以上；非晶态磁性材料具有损耗低、高频特性好等优点，有可能广泛应用于电力变压器、高频变压器、磁传感器、磁头等；非晶硅太阳能电池，具有制备工艺简单、成本低等优点，已在计算器、电子手表中得到广泛应用。

**非平衡态统计物理学** (non-equilibrium statistical physics) 统计物理学的一个重要部分，研究系统偏离平衡态时微观粒子系统所遵循的统计规律性。

自然界中平衡态是相对的，局部的，理想化的；而非平衡态才是绝对的、全局的和现实的。由于非平衡态涉及的范畴远比平衡态广泛，因此非平衡态现象极其丰富、十分复杂。迄今为止，非平衡态统计物理虽然在某些问题中已经有了比较成熟的理论，但总体上说，这还是一门正在发展的新兴的学科。

非平衡态可以分为近平衡的非平衡态（线性非平衡态）和远离平衡的非平衡态（非线性非平衡态）。

近平衡的非平衡态统计物理最早是从 1872 年玻耳兹曼写下了著名的玻耳兹曼输运过程方程而开始的。这是一个关于稀薄气体分子在相空间中的分布随时间演化的动力学方程。由这个方程不仅可以导出流体力学方程，而且可以计算出粘滞性现象和热传导等宏观输运过程的动力学系数。在固体物理和半导体物理中这个方程也有许多应用。虽然对建立这个方程的假设和该方程得出的结论存在某些分歧，但是在其后的一段很长时期内，玻耳兹曼方程仍被视为非平衡统计物理的基本方程。

涉及非平衡态的另一种主要理论是久保亮五提出的线性响应理论。这一理论可以追溯到 1905 年爱因斯坦关于布朗运动的研究，爱因斯坦在这一研究中证明了布朗粒子在时间  $t$  内的方均位移与扩散系数存在正比关系。布朗粒子的运动起因于分子随机碰撞的涨落行为，而扩散则来自非平衡系

统的耗散性（不可逆性），因此爱因斯坦所得到的结论又称为涨落-耗散定理。以后尼奎斯特又证明了一个电阻器内的热噪声正比于电阻器的阻值和绝对温度，这是涨落-耗散定理的又一种表述方式。昂色格在假定一个物理量的涨落平均值受宏观弛豫定律支配的基础上，从微观运动方程在时间反演下不变性出发，证明了不可逆热力学中输运系数矩阵的对称性，这就是著名的昂色格倒易关系。1957年久保亮五在只取外场干扰一级近似的条件下给出了随外场改变而导致系统物理量变化的普遍表示式，这一定理就称为线性响应理论或久保理论。

与平衡态统计物理类似，非平衡态统计物理的基本目的也是从微观运动规律出发去讨论宏观体系的性质，所不同的是，非平衡态宏观体系的运动性质主要由耗散（不可逆性）决定。因此如何引入适当的统计假设，得出正确的耗散结果就成了非平衡态统计物理的中心课题。目前这方面的理论和方法还不成熟，比较常见的大致是以下几种理论。推广的吉布斯统计系统方法。祖巴列夫等人发展了这种方法，并将它应用于流体力学、核磁共振现象以及半导体中的热电子理论等领域，得到了与实验相符的结论。直接从建立非平衡系统宏观参量的随机微分方程出发，不采用任何统计假设，对非平衡系统进行半唯象的描述。彻底的非平衡统计物理学方法是从微观变量变化所遵循的动力学方程（刘维方程）出发，再利用统计假设。由于这时的分布函数十分复杂，博戈留波夫等人进行了约化处理。当然，这种约化往往又包含了某种统计假定。约化处理后得到的动力学方程称为 BBGKY 方程链。从这个方程入手，可以导出经典的玻耳兹曼输运方程。

远离平衡的非平衡态统计物理是在本世纪 60 年代以后迅速发展起来的，主要研究对象是远离平衡的热力学开放系统在一定条件下可能出现的有序结构。以比利时科学家普里高金为代表的布鲁塞尔学派称之为“耗散结构”（见耗散结构）。其主要的成就是对非平衡定态的出现以及是否稳定作出了定量的判定，并从理论上找出了非平衡态演化的一般特征。这一理论还揭示出，涨落对耗散结构的形成存在明显的触发作用。他们创立了一套介于宏观描述和统计物理描述之间的非平衡过程随机理论，以概率论为基础，研究非平衡系统的涨落等宏观性质及其遵从的唯象规律。目前这种唯象理论还只能就一些简单的模型进行讨论，同时也已发展起一些渐近的方法。

德国物理学家哈根把非平衡有序结构的出现看作是组成该系统的大量子系统按照某种规律互相作用、互相协调、自己组织的结果，由他创立的学说称为协同学。协同学理论探求着物质世界形成各种有序结构的一般原理，已成为非平衡统计物理学的主要学派之一（见协同学）。

非线性光学（nonlinear optics）研究物质对光场的响应与光场强度成非线性关系的 optics。当光束通过物体时，原子中的正、负电荷中心将会发生偏离而形成电偶极子。单位体积中电偶极矩的矢量和称为电极化强度，用  $P$  表示。当光的强度不很大时，电极化强度与光场强度成线性关系，即

$$P = \epsilon_0 \chi E$$

但当激光出现后，在强激光的作用下，上述关系式变为  $P = \epsilon_0 [\chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3 + \dots]$ ，成式中  $\chi^{(1)}$ 、 $\chi^{(2)}$ 、 $\chi^{(3)}$ ... 都是与物质性质有关的系数，这

是一种非线性关系。于是光学就从线性光学进入非线性光学时代。一般来说，上述关系式中后一系数要比前一系数小得多，且有

$$\frac{x^{(2)}}{x^{(1)}} \cong \frac{x^{(3)}}{x^{(2)}} \cong \dots \cong \frac{1}{E_a},$$

其中  $E_a$  表示原子内的平均场强，大约等于  $3 \times 10^{10}$  伏/米。一般要求光束中的电矢量振幅达到  $10^3$  伏/厘米时，才能在与物质相互作用时明显引起非线性效应，这相当于大约 2.5 千瓦/厘米<sup>2</sup> 的光束强度。因此只有采用激光才行。在普通光源情况下，非线性项不起作用，只要考虑线性项。

除了有高强度的激光，非线性光学的研究还需要有非线性光学材料。这种材料必须具有较高的非线性极化系数和宽频响应特性，透明性好，能承受强激光照射而不易导致光学损伤，还必须能实现相位匹配。

在激光器问世以后的第二年，就发现可用红宝石激光在晶体中实现光学倍频，从此开创了非线性光学的研究。近 30 年来，这一领域的研究非常活跃，并已获得许多应用。

**菲涅耳** (Augustin Jean Fresnel 1788 ~ 1827) 法国物理学家。生于布罗利耶。1804 ~ 1805 年在巴黎工艺学校学习。1809 年毕业于巴黎桥梁与公路学校，以后从事建筑工程工作。1815 年任巴黎工程公司工程师。1823 年被选为巴黎科学院院士，1825 年被选为英国皇家学会会员。

主要贡献是建立了光的波动说。早在 1811 年，在马吕斯的影响下开始独立研究物理学，并且很快就开始在光学方面进行实验研究。1815 年，通过实验重新发现干涉原理，补充了著名的惠更斯原理。1816 年，引入次波的相干性及其干涉的概念，得出惠更斯-菲涅耳原理：任一点波的扰动，可视为到达该点的所有次波干涉的结果。最先研究了光的直边衍射和圆孔衍射。进行了光干涉的双反射镜实验。1817 年，巴黎科学院悬赏征求阐述光的衍射现象的论文，悬赏的题目是：利用精确的实验来确定光线的衍射反应；从这些实验中，用数学归纳推导出光线通过物体附近时的运动情况。菲涅耳参加了竞赛，他以杨氏光的横向振动的假说为基础，写出了应征论文。该论文用波带法定量计算圆孔、圆板等形状的障碍物产生的衍射花纹，结果与实验吻合，从而建立了光的衍射理论，使波动说取得了胜利。1819 年，进行了光干涉的双棱镜实验。1821 年，与阿拉哥一起研究了偏振光的干涉，证实了光波的横向性。1823 年，发现光的圆偏振和椭圆偏振。用波动说解释了光的偏振面的转动、双折射。推出了光在两种介质的分界面上的反射和折射的定量规律，被称为菲涅耳公式；解释了马吕斯的反射光偏振现象和双折射现象，从而建立了晶体光学的基础。他的实验具有很强的直观性、敏锐性，很多现今仍通用的实验和光学元件都冠有菲涅耳的姓氏，如菲涅耳反射镜、菲涅耳双棱镜、菲涅耳透镜等。著有《光的衍射》(1815)、《菲涅耳著作全集》(共 3 卷，1866 ~ 1870)。

**菲涅耳衍射** (Fresnel diffraction) 光源和接收屏(或两者之一)离衍射屏(即障碍物)为有限距离时光的衍射现象。当衍射屏为圆孔、圆屏或具有直线边缘的不透明半无限平面时，分别称为圆孔衍射、圆屏衍射和直边衍射。

**圆孔衍射** 在点光源的传播方向上放置一个带有圆孔的不透明屏，根据几何光学，在屏的后方有限距离处的接收屏上应该出现交界分明的几何

照明区和几何阴影区。但是当圆孔的直径与光的波长可比拟时，投射光会绕过小孔边缘而进入几何阴影区，结果在接收屏上将出现明暗相间的圆环。

根据半波带的理论（参见波带片），观察点光振幅取决于圆孔所含有的菲涅耳半波带的数目。如果圆孔的半径为  $\rho$ ，圆孔与光源和观察点的距离分别为  $R$  和  $r_0$ ，波长为  $\lambda$ ，则半波带数  $k$  为

$$k = \frac{\rho^2}{\lambda} \left( \frac{1}{r_0} + \frac{1}{R} \right)。$$

观察点的位置不同， $r_0$  不同， $k$  数也不同。与  $k$  为奇数相对应的观察点处，合振幅最大；与  $k$  为偶数相对应的观察点处，合振幅最小。如果带数不是整数，则合振幅在上述最大值和最小值之间。这时，若将观察屏沿对称轴线移动，便可看到光强不断变化。根据半波带理论（参见波带片），

观察点处的光波振幅  $A = \frac{1}{2}(a_1 \pm a_k)$ ，其中  $a_1$  和  $a_k$  分别表示第一个和

最末一个半波带次波在观察点处的光波振幅。当  $k$  为奇数时，上式中取正号；当  $k$  为偶数时，上式中取负号。如果圆孔为无限大， $a_k$  显然为零，因

此  $A = \frac{a_1}{2}$ 。如果圆孔的大小恰好使波面露出第 1 个半波带，则观察点光波振幅简单地就等于  $a_1$ ，是无障碍物时的二倍，光强则为四倍。

以上仅仅是对称轴上的情况。在对称轴以外观察时，有类似的结果。光强在有些点处较强，在另一些点处较弱。所以在接收屏上将出现明暗相间的圆环条纹。仅当圆孔足够大，使  $\frac{a_k}{2} \gg 0$ ，观察点的光振动仅由

第 1 半波带贡献时，光的传播才符合直接传播概念。因为第 1 半波带的面积很小，如果  $\lambda = 0.5$  微米， $R$  和  $r_0$  均为 1 米，第 1 半波带半径约半毫米。因此可以看作是直线进行。

实际光源有一定大小，光源上某些点在观察屏某处产生亮条纹，一定可以找到光源上另一些点在该处产生暗条纹。因此，通常情况下不容易观察到衍射图样。但如果用相干性很好的氦氖激光做实验，就很容易看到光的衍射现象。

**圆屏衍射** 在点光源的光路上，设置一个不透明圆屏。假定对于对称轴上的观察点来说，圆屏遮蔽了开始的  $k$  个菲涅耳半波带，从第  $k+1$  个半波带开始的所有半波带所发出的次波能到达观察点。观察点处光波的合振幅于是为  $A = \frac{a_{k+1}}{2}$ 。即不论圆屏的大小和位置怎样，处于圆屏几何影子

的对称轴上任一点处总会有光。圆屏面积越小，被遮蔽的带数越少， $a_{k+1}$  就越大，观察点处的光强就越强。改变圆屏与光源和观察点的距离， $k$  数也随之改变，因而也改变观察点处的光强。所以，圆屏衍射图样与圆孔衍射图样类似，都是同心圆环，但是其中心点处总是亮点。

1818 年巴黎科学院在审议菲涅耳关于次波相干叠加的论文时，作为评判委员的著名学者如毕奥、拉普拉斯和泊松等人都是光微粒说的拥护者。泊松把菲涅耳理论应用于圆屏问题，推导出几何影子中心应有亮斑的结论，并试图以此来否定菲涅耳理论。然而其后不久，阿喇果却用实验证实



了泊松的这个结论，从而肯定了菲涅耳理论的正确性，给光的波动说和惠更斯-菲涅耳原理以有力的支持。

**直边衍射** 平行光垂直照射到具有直线边缘的半无限不透明屏时，根据几何光学，在其后方的观察屏上应有直线边缘清晰的影子。但是根据波动理论，在靠近几何阴影区的几何照明区会出现与不透明屏的直边相平行的明暗相间的衍射条纹。在几何阴影区，也有光强分布，如图所示。O点相当于几何影子的边缘，O点左边为几何阴影区，O点右边为几何照明区。在几何阴影区一定范围内有光强的递减分布。在几何照明区则有明暗条纹。

#### 直边衍射

**沸点** (boilingpoint) 参见蒸发和沸腾。

**费马原理** (Fermat principle) 又称极端光程定律或光学极短时间原理。由法国数学家费马在1657年首先提出。他认为光从某点到达任意第二点的实际路径是光程为极值(极大、极小或常量)的路径。光在媒质中经过的几何路径的长度与该媒质的折射率的乘积称为光程，也可理解为在相同时间内光在真空中传播的距离。因此，光程为极值也就相当于时间为极值。由费马原理可以直接推导出光的直线传播定律以及反射和折射定律。费马原理比这些几何光学基本定律具有更高度的概括性。

**费曼** (Richard Phillips Feynman 1918~) 美国物理学家。生于纽约。1939年毕业于麻省理工学院。1942年获普林斯顿大学哲学博士学位。1945年任康奈尔大学物理学副教授。1951年任加利福尼亚理工学院理论物理学教授。美国科学院院士。

主要贡献是提出量子电动力学新的理论形式，获1965年诺贝尔物理学奖。40年代起对量子电动力学的数学表示方法问题进行研究，发展了用路径积分表达量子振幅的方法。1948年提出处理量子电动力学新的理论形式，得到电荷和质量重正化的计算方法，从而避免了量子电动力学中的发散困难，使复杂的无穷项得以从所有的实际计算中消除，在高度精确测量电子电荷、质量和它与电磁场相互作用的增量上起到了十分重要作用，对量子电动力学的发展作出了重大贡献。提出量子电动力学新的理论形式的直接产物是“费曼图”，即电子通过电磁场相互作用过程中的微观图示法。其表达方式是用一根带箭头的实线代表电子，带反箭头的实线代表正电子，虚线代表光子，电子、正电子和光子的每一次相互作用都用交于一点的两根实线(箭头分别指向和指离交点)和一根虚线来描写。利用费曼图可以系统而方便地计算各种电磁过程的概率，而且使人们对量子电动力学有了一个简明的图象理解。1958年，与盖尔曼一起共同提出在核理论进展中有重要影响的核衰变矢量电流守恒理论(即V-A理论，又称普适费曼型弱相互作用理论)。这一理论被吴健雄1963年的实验所证实。1964年，与盖耳曼一起在粒子物理研究中，根据1961年盖耳曼对强子分组的周期表，提出了强子并不是最基本粒子的观点。1969年，根据高能电子和核子深度非弹性碰撞实验所显示的在核子内部电荷的分布不是连续分布而是集中在一些点上的事实，提出了强子结构的“部分子模型”，认为强子是由许多带电的点粒子构成，这些点粒子称为部分子，在高能电磁相互作用和弱相互作用过程中可以近似作为相互独立的粒子。费曼还是一位著名的教育家，他的《费曼物理学讲义》三卷曾被广泛采用，在我国也有中译本。

费米 (Enrico Fermi 1901 ~ 1954) 意大利出生的美籍物理学家。生于罗马。1918 年入比萨大学高等师范学院。1922 年获物理学博士学位。不久赴德国格丁根大学，成为波恩的学生。1924 年回到意大利。1927 年任罗马大学理论物理学教授。1938 年移居美国，先后任哥伦比亚大学和芝加哥大学物理学教授。1953 年任美国物理学会会长。

费米是一位功绩卓著的现代理论物理学家和实验物理学家，获 1938 年诺贝尔物理学奖。1925 ~ 1926 年，根据泡利不相容原理与狄拉克各自独立地提出电子应服从的统计规律，被称为费米-狄拉克统计法。这个量子统计法也适用于服从不相容原理的其他粒子，如质子、中子，是量子统计物理学的重要方法之一，对理解物质的结构及其性质有重要意义。1927 年，根据费米-狄拉克统计原理，与英国的托马斯各自独立地提出了原子结构的模型理论，被称为托马斯-费米模型。1933 年，提出衰变理论，把以前的辐射理论和泡利的中微子假设结合起来，成功地解释了衰变现象的许多特点，成为现代基本粒子相互作用理论的创始人。

1934 年在实验物理学方面获得一系列惊人的发现。该年初，约里奥夫妇用  $\alpha$  粒子轰击铅、硼，产生人工放射性物质后，费米就想利用中子产生人工放射性。他和他的助手用中子照射了几乎所有的化学元素，在短短几个月中就发现 60 多种新的人工放射性核素。在用中子轰击铀时，发现了原子序数为 93 或 94 的超铀元素。10 月，发现铅板可以增加银在中子照射以后所产生的放射性，换用石蜡后，竟使银的放射性提高了 100 倍。对此现象作出解释：中子经过石蜡后，由于碰撞，减低了速度，慢中子比快中子的效率要大得多，从而提出了慢中子效应。上述发现，奠定了原子核反应堆的理论基础。

1934 年以后，致力于定向的实验研究又获得一系列成果。通过实验建立了核裂变的理论，打破了核裂变几乎是不可能的传统观念。1942 年，在他领导下建成了世界上第一座可控原子核裂变链式反应堆，为原子能的利用做出了开创性的工作。1945 年 7 月 16 日，以他为核心的科学家们成功地试验了第一颗原子弹。为了反对把原子能用于战争目的，于 1946 年初离职回到芝加哥大学任教，转入高能物理研究。1949 年，揭示了宇宙线中原粒子的加速机制，提出宇宙线起源的理论。同年，与杨振宁合作提出基本粒子的第一个复合模型，被称为费米—杨振宁模型。1950 年，提出了介子多重产生的理论。1951 年，由他领导的小组发现了第一个强子共振态。著有《核物理》(1950)、《基本粒子》(1951)、《分子、晶体的量子统计》(1966)。

费米-狄拉克统计 (Fermi-Dirac statistics) 参见量子统计。

费米面 (Fermi surface) 能量等于费米能  $E_f$  的等能面。在自由电子近似下，金属中的自由电子是在能量空间从低能量到高能按球形对称排列的。在同一球面上电子具有相同的能量，称为等能面。电子能量等于  $E_f$  的球面称为费米面。在绝对零度时，费米面内的能级位置全部被电子所填满；而在费米面外，是没有电子的。费米面成为金属中电子按能级分布的分界面，它形象地表示了金属中电子按能量的分布。费米面受温度的影响不明显，当温度升高时，只有较少的电子从球面内激发到球外。由此建立的金属电导模型成功地解释了金属的输运特性。但若考虑到电子与晶格的相互作用，费米面就可能畸变，不再是球面。

**费米子 (fermion)** 自旋为半整数的粒子统称为费米子。如电子、质子和中子等。由这类粒子构成的全同粒子系统服从费米-狄拉克统计规律性。全同费米子系统还要受到泡里不相容性原理的制约，在这种系统中不能有两个或两个以上的粒子具有完全相同的状态。两个独立的费米子所构成的系统其总自旋可能为零，也可能为正整数。例如两个电子所构成的系统其自旋是 0 或 1。

**分光计 (spectrometer)** 一种既能将复色光分解为光谱又能精确测量角度的光学仪器。主要由平行光管、自准直望远镜 (与游标盘相连) 和载物平台 (与主分度盘相连) 三部分组成, 如图所示。平行光管固定在仪器上, 提供平行光束, 照射载物平台上的光学元件。载物平台为一圆盘, 可以绕中心轴转动, 其底座上刻有角度游标读数, 台上放置分光棱镜、光栅等分光光学元件。平行光经过这些元件反射、折射或衍射而改变方向, 用望远镜接收这些平行光, 即能观察到平行光会聚成的狭缝像。望远镜和底座外围刻有角度读数的主分度盘相连, 且也可绕中心轴旋转。测量时, 望远镜内的十字准丝对准某一波长的狭缝像 (即光谱线), 由主分度盘上的角度读数即能精确测定这

#### 分光计结构图

1—平行光管狭缝宽度调节螺丝 2—平行光管水平调节螺丝 3—平行光管物镜 4—望远镜物镜 5—望远镜水平调节螺丝 6—望远镜自准直目镜 7—照明小电珠 8—载物平台固定螺丝 9—读数窗口 10—望远镜制动螺丝 11—望远镜微调螺丝 12—读数盘制动螺丝 13—读数盘微调螺丝 14—载物平台水平调节螺丝 15—载物平台台面

一波长的平行光所偏转的角度。分光计可用来测量棱镜角、棱镜材料的折射率 (通过测定棱镜的最小偏向角而决定) 和色散率以及光波波长等。

**分期原则 (principle of dividing period)** 物理学史划分时期应遵循的基本原则。它既是整个物理学发展史的纲, 也是物理学史研究的一个基本理论问题。长期以来对于物理学史的分期问题, 有着各种不同的观点: 按年代分; 按物理学家的工作分; 按自然观和世界观分; 按生产和社会经济形态分; 按物理学本身发展的特征分。正是众说纷纭。针对这种情况, 物理学史划分时期的基本原则是: 要从客观的历史事实出发, 而不是从任何先验的准则或随意选取的标准出发, 具体地说必须考虑到两个方面: 一是物理科学知识的性质和结构——根据物理科学知识本身在各个发展阶段显示的不同的本质特征, 这是作为分期的主要依据; 二是物理科学的社会功能和社会地位——着眼于各个不同历史时期中物理科学同社会的相互关系, 这是作为分期的派生的、次要的依据。按照这一分期原则, 综观整个物理学的发展, 明显地可分为三个时期: 古代时期 (16 世纪以前), 也称物理学的萌芽时期; 近代时期 (16 ~ 19 世纪), 也称经典物理学时期; 现代时期 (20 世纪)。

**分力 (component of a force)** 见力的合成。

**分析 (analysis)** 在物理学的理论和实验研究中, 将对象分为若干部分、若干层次, 逐步进行具体研究的方法。任何一项物理研究都自觉或不自觉地使用分析方法。通过分析, 可以将复杂的问题分解为简单的问题进行研究。这不仅简化了研究工作, 而且更深刻地揭露研究对象的本质。例如在伽利略之前, 不少人花了大量的精力和时间去研究抛体运动, 都得

不到正确结论。而伽利略用分析方法解决了抛体运动问题。他在把握惯性运动和自由落体运动之后，敏锐地认识到抛体运动可以分解为水平方向的惯性运动和竖直方向的自由落体运动。

物理现象和过程往往有许多因素共同作用，它们互相牵制，只有将它们逐个分解，才便于认识每个因素的作用和在整个事物或现象中的地位，在这个基础上，才能对整个研究对象有全面的了解和认识，这就是物理学研究中最普遍使用的分析方法——控制变量的方法。例如对一定质量的气体，体积（ $V$ ）、压强（ $P$ ）和温度（ $T$  绝对温标）三者作用互相牵制，在未认识它们之间的关系之前，只能用控制变量的方法先得出三个气体实验定律，然后在分析研究的基础上，总结出气体状态方程，全面地揭示了体积、压强和温度之间的关系。

对某个课题，使用分析方法研究，有时还表现为一种历史过程。例如对原子的研究，就经历了证实原子的客观存在、发现电子、测定电子电量和荷质比、证实电子是原子可分离的组成部分、发现原子的核式结构和质子，到发现中子等的研究过程。这是几代物理学家从纵横两个方面，对原子这个客体进行深入分析研究的成果。

在物理研究中，实验分析和理论分析是相辅相成的，在实验工具和手段受到限制的情况下，理论分析就成为一种主要的形式，借助于它，有可能深入到问题的本质，发现新的因素或线索，指导实验分析。理论分析又要以实验分析作为基础、依据和出发点。

**分析论述题**（explanation question）对所给出问题情景作出分析、解释的试题。它的评价目标包括理解分析和应用。这类试题主要测试学生能否正确理解一个熟悉或不太熟悉的问题情景中所包含的物理概念或原理，并能通过正确的科学语言（简要的文字叙述、公式、计算、图像或图线）来分析问题中的物理现象，从而作出解释。

**分析试卷指标**（index to analyse test paper）根据教育测量理论对试卷进行定量分析的依据。试卷指标可分为效度、信度和难度。效度是反映测验准确性的重要指标，它说明一个测量在多大程度上达到测量的目的，是衡量测验准确性和有效性的指标，这种有效程度简称为效度。效度分为内容效度、效标效度（也称准则关联效度，即一个测验结果与另一个可以作为效度准则的评价测量结果的相关程度）等几种。在一般物理教学测验中，最重要而且最常用的是内容效度，也就是试卷是否真正测试了所要检测的物理知识。如果试卷从学生学过的物理知识总体范围和内容中取样适当，而且试题设计较合理，使整个试卷能较真实地反映考生达到各项测试目标的程度，试卷的内容效度就高。因此为了提高试卷的内容效度，在编制物理试卷时，一要注意试卷知识内容取样对考试目标覆盖程度；二要注意编制试题时排除影响预期测试目标的因素，例如某道题的数学运算太复杂，数学变换能力要求太高，就会干扰要检测的物理内容而影响内容效度。

信度是反映测验可靠性的重要指标，这说明测验结果对某考生群体的可信程度。如果几次测量的结果一致，则表示测量是可靠的，是可信的。几次测量的结果不一致，表明有随机误差存在。因此信度也表示不受偶然随机因素干扰的程度。信度的最大值为 1，即随机误差的影响为零，这实际上是不可能的。在常模参照型测验中，一般要求信度值不低于 0.8。对

大规模的标准化考试，试卷信度则应在 0.9 以上。试卷的信度跟试题的难度分布范围有关。如果各道试题的难度基本接近，说明试题间的相关程度高，试卷的内在一致性好，试卷的信度较高。反之，假如试题的难度分布过于离散，例如难度高和难度低的题多，中等难度的题很少，这样不仅会削弱试卷的内在一致性而降低信度，还会影响试卷的区分特性。

对常模参照考试，题目的难度分布越离散，即很容易的题或很难的题占绝大多数，分数分布往往越集中。而试题难度集中在中等难度附近时，分数分布则呈现比较离散的正态分布（标准差 SD 较大），这样便于比较每个考生在总体中的相对位置。因此，要使试卷有高的信度和较好的区分鉴别特性，试题的难度应相对集中在中等难度的范围内。一般讲常模参照考试的试卷中大部分试题（70%左右）的难度应控制在 0.4 到 0.6 之间，难度小于 0.2 的很难的题和难度大于 0.8 的很易的题应占很小的比重，甚至不予采用。

**分析试题指标（index to analyse questions）** 根据教育测量理论对试题进行定量分析的依据。评价试题有两个要求：难度要恰当，区分度要好。难度是试题的难易程度，得分值为 M 的试题， $F = \frac{\bar{M}}{M}$ ， $\bar{M}$  为全体考生对该题的平均得分。难度在 0~1 之间，F 越小，试题难度越大；F 越接近 1，难度越小；F=0.5 左右，试题难度中等。

区分度是指试题对不同能力的考生的区分程度。对答案只有正确或错误这两种选择的选择题，区分度 D 应当用求点两列相关系数的公式来估算， $D = \frac{M_p - M_q}{S} \sqrt{pq}$ ，式中 p 为答对该题考生的比例（即通过率），q 为答错考生的比例（ $q=1-p$ ）， $M_p$  为答对考生试卷总分的平均值， $M_q$  为答错考生试卷总分的平均值，S 为在该考试中全体考生所得总分的标准差。对具有不同得分值的试题，区分度则用考生对该题的实际得分和整卷总分之间的积差相关系数来计算。区分度 D 可以在 -1.0 到 +1.0 之间变化，试题的区分度一般最好大于 +0.4。D 在 +0.3 以下的试题区分度偏低，D 值接近 0 和为负值的题不宜使用。

试题难度太大或太小都无法保证试题有一定的区分度。F=0.5 时，试题的区分度 D 最大。一般试题难度控制在 0.3~0.7 比较适当，这样能得到较高的区分度。

**分析天平（analytical balance）** 高精确度的质量测量仪器。为了防止空气流动、湿度、腐蚀性气体对天平的影响，分析天平都安置在木制的玻璃橱内，橱内还安放干燥剂。操作时可打开边门取存重物 and 砝码，正面的玻璃挡住测量者导致的 CO<sub>2</sub> 侵入。半自动的分析天平使砝码的增减通过橱外的旋钮调节自动配置，致使砝码得到有效的保护。

目前物理实验室常用的分析天平，称量有 1mg、0.5mg、0.2mg 和 0.1mg 四种。为了缩短分析天平的振荡摆动周期，在天平横梁两端设置两个空气阻尼器，提高测量速度，对气流等影响有效地加以抑制。全自动分析天平采用了自动换量程、增减砝码，并显示秤衡值，使测量的人工操作步骤大为减少，测量速度大大提高。

**分音（partial tone）** 复音中的一个物理成分。主观评价上是指复

音中可用耳分清为一简单声音而不能再分的成分。分音的频率可比复音的主频高或低。它可以是主频的整数倍或分数倍；也可以不是，此时的分音称为非谐频分音。谐音、基音和泛音都是分音。

分子 (molecule) 参见分子运动论。

分子电流 (molecular electric current) 又称“安培电流”或“安培分子电流”。分子或原子中由电子运动所形成的电流。1822年由法国物理学家安培为解释物质的磁性和磁化现象所提出的一种假说。

1920年奥斯特发现电流的磁效应后，揭示了物质的磁性，受到科学界的重视。安培受到菲涅耳等人的启示，率先提出分子电流假说：任何物质的分子中都存在圆形电流，称为分子电流。分子电流相当于一个基元磁体。在通常情况下由于热运动，这些基元磁体取向无规则排列，对外产生的磁效应互相抵消，整个物体不呈现磁性。在外磁场作用下，基元磁体将出现沿外磁场方向的取向排列，从而使物体显示磁性。

安培分子电流假说在当时对物质微观结构知之甚少的情况下，在很大程度上是一咱臆测。上世纪末本世纪初以来原子物理学和基本粒子的研究表明，组成物质的原子中不仅有电子的绕核运动，而且原子核和电子、质子等粒子还有自旋运动。这些运动可以等效于“分子电流”，从而使这一假说有了实在的基础。

分子光谱 (molecular spectrum) 分子内部能量状态发生跃变过程中所产生的光谱。分子的内部运动包括整个分子的转动，各组份原子的核在其平衡位置附近的振动，以及分子中价电子的运动。这些运动的能量状态都是分立的，因而形成能级。纯转动能级间的跃迁产生“转动光谱”。由于分子的转动能级之间的间隔很小，所以转动光谱的频率很低，波长很长，通常位于远红外区和微波区。纯振动能级间的跃迁产生“振动光谱”，其波长位于近红外区。同时考虑分子的转动和振动运动所产生的光谱称为“振动—转动光谱”，它具有较复杂的结构。分子的价电子在电子能级间的跃迁产生“电子光谱”，它通常位于可见光区和紫外光区。由于电子跃迁总是伴随着振动和转动状态的改变，所以电子光谱常常不再是由谱线系构成的线状光谱，而是由“谱带系”构成的带状光谱。分子光谱包含了分子结构和分子内各原子相互作用的信息，通过分子光谱的研究可以了解物质分子结构的特征。例如通过纯转动光谱的研究，可测定分子的转动惯量和分子内各原子间的距离；通过电子光谱的研究，可了解分子内价电子的分布，确定分子的电离势和离解能等。

分子力 (molecular force) 参见分子运动论。

分子量 (molecular weight) 参见分子运动论。

分子束外延 (molecular beam epitaxy) 在超高真空 ( $10^{-8}$  帕) 系统中将分子或原子束直接射向衬底，从而在衬底上淀积生长外延层的方法。在 MBE 系统内，分子或原子束由装有待淀积物质源的喷射炉产生。在淀积过程中，喷射炉内源的成分和喷射率由炉温调节保持恒定。衬底安装在由转速可变的马达控制的支座上，并备有加热装置，以获得均匀的外延层。整个系统包括外延层成分及薄膜生长环境用质谱分析仪监控。

分子束外延的特点是淀积温度 ( $\sim 250$  ) 低，淀积速率 ( $0.001 \sim 0.3$   $\mu\text{m}/\text{min}$ ) 相当慢，因而可获得极其良好的掺杂剖面 and 任意的掺杂组分，是目前制造超薄膜 (小于 10nm) 的理想手段。如超晶格材料中周期性改变的

超薄膜层，就是采用分子束外延技术制得的。

**分子运动论** (kinetic theory of molecule) 认为物质是由不停地运动的分子所组成，试图从物质微观结构出发说明热现象的一种理论。

**发展简史** 人类很早就开始思索物质的构成。公元前 600 多年，古希腊的哲学家设想土、气、火、水是构成各种物质的四种独立元素。我国古代的五行学说也包含有水、火、木、金、土“以成百物”的朦胧思想。留基伯和德谟克利特提出的原子论可看作是物质结构理论的萌芽。1658 年法国物理学家伽桑迪考察了原子论的观点，进而假设物质内的原子可以在空间各个方向上不停地运动，并用来解释固液气三种物质状态。1738 年瑞士物理学家伯努利从物质的分子结构假设出发，从理论上导出了玻意耳定律，并论证了气体的压力是气体分子与器壁碰撞的结果。1744 年俄国物理学家罗蒙诺索夫提出热是分子运动的表现；把机械运动守恒定律推广到分子运动的热现象中。自 19 世纪中期开始，随着实验技术的不断改进，分子运动论得到了迅速的发展。

**基本假设** 分子运动论的基本假设主要包括三个方面。

(1) 物质由大量分子所组成，分子是物质中能够保持一切化学性质而独立存在的最小微粒。目前用高分辨率的电子显微镜可观察到晶体的分子结构图像。实验结果表明，分子直径的数量级约是  $10^{-10}$  米，即 0.1nm。分

子的质量与  $^{12}\text{C}$  的原子质量的  $\frac{1}{12}$  的比值称为该分子的分子量，它也等于

一个分子所有原子的原子量的总和。0.012 千克的  $^{12}\text{C}$  含  $^{12}\text{C}$  原子  $6.022045 \times 10^{23}$  个，称为 1 摩尔的  $^{12}\text{C}$ ， $6.022045 \times 10^{23} \text{摩}^{-1}$  就是阿伏伽德罗常量。

(2) 分子不停地作无规则运动，分子运动的剧烈程度是用温度来量度的。分子运动的直接实验观测来自各种扩散现象，而间接实验证实来自布朗运动。温度越高，分子无规则运动就越剧烈，因而又称为分子的热运动。

(3) 分子之间存在相互作用力。当两分子比较接近时，相互作用力主要表现为吸引力，它来源于一个分子受到另一个电偶极矩的极化作用；当两分子相当接近时，主要表现为排斥力，它来源于两个分子外层电子云重叠而产生的排斥作用。大约在分子间距  $r=r_0 \sim 10^{-10}$  米处，分子间吸引力和排斥力大小正好相等。当物体受到外力挤压使分子间距小于  $r_0$  时，分子之间的排斥力就会阻碍压缩，表现为对外力的一种抗拒，而当物体受到拉伸而使分子间距大于  $r_0$  时，分子之间的吸引力就会抗拒拉伸。

分子之间这种相互作用力，使物体中的分子形成某种规则分布，而分子的无规则热运动要破坏这种规则分布。这两种相互对立的作用构成了物质热运动状态变化的内在依据。实验还证明，当物体温度升高到一定的临界值时，分子热运动的激烈程度可以冲决分子作用力的约束，从而使分子从被束缚在  $r_0$  附近作微振动的状态下解脱出来，逐渐变为互相分离，这就发生了通常所观测到的固态—液态—气态的相变。

**研究方法** 分子运动论的研究方法是以经典力学为基础的，它在一定程度上可以阐明气体的某些性质和行为。1859 年英国物理学家麦克斯韦得到气体分子速率分布律，后来德国物理学家玻耳兹曼给出更严密的论证，并得到实验证实。1872 年玻耳兹曼给出分子运动论的基本方程，并首先把概率观念引进分子运动论，给出熵的统计意义。1902 年美国物理学家吉布

斯创立了统计物理学，把基本上只适用于气体的分子运动论推进为对固体、液体都适用的一般理论。

**汾丘里流量计 (Ventruimeter)** 测量封闭管道中流体流量和流速的仪器。由收缩管 (即汾丘里管，又名咽喉管) 和测量压力差的 U 形管装置组成 (见右图)。将收缩管接入待测流量的流体管道中，只要读出原管道 (主管) 和收缩管细部流体的压力差，即可得

汾丘里流量计

出流量，其公式为：

$$Q = S_1 S_2 \sqrt{\frac{2gh(\rho_{\text{汞}} - \rho)}{\rho(S_1^2 - S_2^2)}},$$

其中  $S_1$ 、 $S_2$  为主管与收缩管细部的截面积， $h$  为 U 形管内水银面的差 (它反映压力差)， $\rho$  为该种流体密度， $\rho_{\text{汞}}$  为 U 型管中水银密度。

又因  $Q = vS_1$ ，故也可用它来测量流速  $v$ 。

**风洞 (wind tunnel)** 研究物体的空气动力特性的主要实验设备之一。能人工产生和控制气流，以模拟飞行器或物体周围气体的流动，并可量度气流对物体的作用以及观察物理现象。它是一种具有足够大直径的管道状的实验设备。英国人菲利普斯于 1885 年首先在第一个风洞中做了实验。风洞实验是飞行器研制工作中一个不可缺少的组成部分，它不仅在航空和航天工程的研究和发展中起着重要作用，且在交通运输、房屋建筑、风能利用和环境保护等方面也得到越来越广泛的应用。用风洞作实验的依据是运动的相对性原理。实验时，常将模型或实物固定在风洞内，使气体流过模型或实物，这样，条件易控制，可重复、经济地取得实验数据。

风洞主要由洞体、驱动系统和测量控制系统三部分组成。风洞种类繁多，有不同的分类方法。按实验段气流速度大小可分为低速、跨声速、超声速和高超声速风洞。

**夫兰克 (James Franck 1882 ~ 1964)** 德国物理学家。1902 年入柏林大学，1906 年获物理学博士学位。1917 年任威廉皇帝物理化学研究所的分部主任。1920 年任格丁根大学教授、第二实验物理研究所所长。1933 年从格丁根大学辞职，作为他对德国公布种族法和在希特勒统治下的纳粹政权的抗议。1935 年任霍布金斯大学物理学教授。1938 年任芝加哥大学物理化学教授。第二次世界大战期间，参加了与研制原子弹有关的工程，但在 1945 年轰炸广岛事件前两个月，与一批科学家共同给美国国防部写了“夫兰克报告”，极力主张在无人烟地区公开试验原子弹，以代替在对日战争中不加宣告地使用这种武器的军事决定。虽然这份报告没有达到它的主要目的，但集中反映了他作为物理学家追求真理的勇气。

主要贡献是做了证明原子内部能量量子化的实验，发现电子和原子碰撞所遵循的规律，获 1925 年诺贝尔物理学奖。1914 年，和 G·赫兹利用电场加速由热阴极发出的电子，使电子获得能量并与管中汞蒸气原子发生碰撞。实验发现，当电子的能量未达到某一临界数值时，与汞原子产生弹性碰撞，不损失能量；当电子的能量达到某一临界数值时，与汞原子就发生非弹性碰撞，电子有一定量能量传递给汞原子，后者被激发。实验结果表明，电子的能量变化严格遵守着以 4.9 电子伏特为单位，这既说明电子失去的能量只能等于一系列的分立值，又证实玻尔提出的原子存在分立能态



的假设是正确的，从而有力地推动了原子的量子理论的建立。

**弗兰克-赫兹实验 (Frank-Hertz experiment)** 用低速电子对原子碰撞的办法直接证实原子中存在分立能级的实验。1914年由德国物理学家弗兰克和赫兹首先实现。

图 1 弗兰克-赫兹实验示意图

电子从热阴极 K 发出，经 K 与栅极 G 之间的电场加速。获得一定速度的电子在 K 和 G 之间与汞原子发生碰撞，然后到达接收极 A。在 G 与 A 之间加 -0.5 伏的反向电压。若电子在 KG 区域与原子碰撞时几乎不损失能量，则该电子就能够克服反向电压而达到 A 级，此时电流计有较大读数；反之若电子与原子碰撞时将能量转移给原子，则电子余留的能量不足以克服 GA 间的反向电压，不能到达 A 极，此时电流计读数很小。实验结果表明（图 2），加速电压由零开始上升时，A 极电流同步上升。当电压达到 4.9 伏时，电流计读数突然下降，然后再上升，直到电压达到  $2 \times 4.9$  伏时，电流计读数又第二次突然下降，然后再上升，在  $3 \times 4.9$  伏时第三次突然下降，...

这一结果表明，汞原子并不接受低于 4.9 电子伏的能量，汞原子内存在一个能量为 4.9 电子伏的状态，只有当电子的能量达到 4.9 电子伏时才能为处于基态的汞原子所吸收，而被激发到第一激发态。图 2 中的三个峰值的位置表示电子在 KG 区域中与一个汞原子、二个汞原子和三个汞原子发生碰撞的情况。所以这一实验直接证实了玻尔提出的原子内存在分立的能量状态的假设。改进的弗兰克—赫兹实验（1920 年）还能用来测量分立的第二和第三激发态能量。

**夫琅和费衍射 (Fraunhofer diffraction)** 光源和接收屏都离衍射屏无穷远时出现的光的衍射现象。光源在无穷远，这意味着将光源放置在透镜的焦平面上，使之成为平行光束，再照射在障碍物上。接收屏在无穷远是指它位于第二块透镜的焦平面上。夫琅和费衍射可以直接用惠更斯—菲涅耳原理来计算衍射图样的光强分布。图 1 是实验装置。氦氖激光经倒望远镜系统构成的光束扩束器  $L_1$  扩束后，投射到衍射屏 BB 上，然后用透镜  $L_2$  把衍射光聚焦在接收屏 DD 上。

图 1 夫琅和费衍射

单缝衍射衍射屏若为一宽度为  $b$  的狭缝，在接收屏上便可得到该狭缝的衍射图样。它是一组平行于狭缝的明暗相间条纹，中央条纹最宽最亮。

为了对衍射图样进行分析，可将狭缝分为一组平行于缝长的窄带，每一条窄带发出次波，其振幅正比于窄带宽度  $dx$ 。设平行光在进入狭缝前的振动方程为  $y=A_0 \sin \omega t$ ，狭缝各条窄带所发出的次波的振动方程为  $dy=$

$\frac{A_0}{b} dx \sin \omega t$ 。在单缝 BB 上任意找一点 C，C 点离狭缝中心 O 点的

距离为  $x$ 。作 OG 垂直于 BG。从 C 点处的窄带和 O 点处的窄带所发出的次波到达 P 点时的光程差为  $x \sin \theta$ ，故 C 点处窄带的次波在 P 点处的光振动表式为：

$$dy_p = \frac{A_0}{b} dx \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta)。$$

求上式从  $x = -\frac{b}{2}$  到  $x = \frac{b}{2}$  的积分，可得到沿衍射角  $\theta$  方向传播的所

有各窄带的次波在观察点 P 处所生的光波的合振幅，结果为

$$A_p = A_0 \sin \theta \left( \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \right) \quad \left( \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \right)$$

令  $u = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta$ ，故P点的光强为  $I = A_p^2 = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2$ ，其中  $I_0 = A_0^2$ 。

不同的衍射角 对应于接收屏上不同的观察点。

当  $\theta = 0$  时，聚焦点在  $P_0$ ，该点的光强为  $A_0^2$ ，为最大值。满足  $\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta = k$  的一些衍射方向，即当  $\sin \theta = k \frac{\lambda}{b}$  ( $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) 时， $I_p = 0$ ，接收屏上这些点处呈暗条纹， $k$  称为衍射级。每两个相邻极小值之间，有一极大值。衍射条纹光强极大值与极小值位置沿着垂直于缝长的方向分布，如图 2 所示。它具有如下特点：中央亮条纹的宽度是各次最大亮条纹宽度的两倍，大部分光能集中在中央亮条纹上；暗条纹是等间隔的，但次最大则是不等间隔的，第一次最大在  $\mu = 1.43$  处，第二次最大在  $\mu = 2.46$  处。中央亮条纹的角宽度之半称为半角宽度，它与缝宽和波长 的关系为  $\Delta \theta = \frac{\lambda}{b}$ 。可见，当  $b \gg \lambda$  时， $\Delta \theta \rightarrow 0$ ，即衍射图样压缩成一条亮线，便得到几何光学中的结果。

图 2 衍射条纹光强分布

**多缝衍射** 当衍射屏是一组等宽等距的平行透光狭缝时，在接收屏上便得到多缝衍射图样。若缝宽为  $b$ ，相邻两缝间不透明部分的宽度为  $a$ ，令  $a+b=d$ ， $N$  为狭缝数目，则接收屏上的光强分布为

$$I = I_0 \left[ \frac{\sin \left( \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta} \right]^2 \left[ \frac{\sin \left( \frac{N \pi d}{\lambda} \sin \theta \right)}{\sin \left( \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)} \right]^2。$$

令  $u = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta$ ， $v = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$ ，则上式化为

$$I = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2 \left( \frac{\sin Nv}{\sin v} \right)^2。$$

其中  $\left( \frac{\sin u}{u} \right)^2$  表征宽度为  $b$  的单缝衍射光强分布函数，另一因数  $\left( \frac{\sin Nv}{\sin v} \right)^2$

则是多光束干涉的光强分布函数。故夫琅和费多缝衍射

是单缝衍射和  $N$  个相干光干涉结果两者的组合。图 3 是以  $N = 4$ ， $\frac{d}{b} = 3$

为例所作的多缝衍射光强分布曲线。可以看出，在多缝衍射的强度分布中，保留了单缝衍射强度曲线的形式，但多缝衍射图样中出现一系列新的强度最大值和最小值。其中那些较强的亮线称为主最大，较弱的亮线称为次最大。主最大的位置与缝数  $N$  无关，但它们的宽度随  $N$  增多而减小，它们的强度与  $N^2$  成正比；相邻主最大之间有  $N-1$  条暗纹和  $N-2$  个次最大。

图 3 多缝衍射光强分布

**双缝衍射** 当取双缝衍射屏时，在接收屏上便得到双缝衍射图样。采用多缝衍射图样的结果，令  $N=2$ ，便得到双缝衍射的光强分布，为

$$I = \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2 4I_0 \cos^2 v。$$

当  $b \ll \lambda$  时， $u = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \approx 0$ ， $(\sin u / u) \approx 1$ ，上述光强分布

就与双缝干涉的情况一致。实际上很难做到使缝宽远小于波长，因此杨氏双缝干涉中的干涉亮条纹很难达到相同的亮度。它们只是一种被单缝衍射分布所调制的双缝干涉条纹。

**圆孔衍射** 衍射屏是一个开有小孔的不透明屏时，在接收屏上便得到圆孔衍射图样。它是一组明暗相间的同心圆环。中央亮斑称为爱里斑，

它的半角宽度为  $\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$ ，其中  $D$  是圆孔的直径。中央亮斑的光

能量占通过圆孔总光能量的 84% 其余 16% 的光能量分布在它周围的各级亮圆环中。若夫琅和费衍射中第二块会聚透镜的焦距为  $f$ ，则爱里斑的半

径为  $r = 1.22 \frac{\lambda}{D} f$ 。

任一光学元件都有一定的通光孔径，即使不加任何光阑，平行光通过它们时也会出现衍射现象。所以实际光学系统对点状物形成的像，不可能是点状像，而是有一定大小的爱里斑。波长一定时，通光孔径的直径  $D$  越大，爱里斑越小，越接近于点状像。当  $D \gg \lambda$  时， $\theta \approx 0$ ，便得到几何光学的结果。

**浮力 (buoyancy force)** 流体作用于浸在其中物体 (全部或部分) 的向上托起的力。若把固体浸在液体中，固体侧面受到的压力相互平衡，但下面受到的压力总大于上面受到的压力，所以物体受到的合力总是竖直向上的，浮力的大小等于物体所排开的液体的重量。这就是阿基米德定律 (也称阿基米德原理)，由希腊学者阿基米德于公元前 3 世纪发现，传说是他为了测定王冠含金的纯度，在洗澡时发现的。

阿基米德定律是流体力学的重要规律之一，有十分广泛的应用。船舶、飞艇、潜艇和气球等的设计都要应用这个原理；用来测定液体密度的比重计，也是根据这一原理制成的。

浮力的作用线通过被排开流体的重心，该点称为浮力中心，简称浮心。

**浮力中心 (buoyancy center)** 见浮力。

**伏打 (Alessandro Volta 1745 ~ 1827)** 意大利物理学家。生于科莫。早年读书时，曾想成为一个诗人，由于结识了一位从事物理学研究的子弟，在他的实验室里尝到科学研究的趣味，于是改变当诗人的初衷，全力投入自然科学的研究。1774 ~ 1779 年任科莫大学预科物理学教授。1779 年任帕维亚大学物理学教授，1795 年起任该校校长。1782 年成为法国科学院院士，1791 年当选为英国皇家学会会员。

主要贡献是发明了伏打电池。对伽伐尼的“动物”电的实验很感兴趣，于 1792 年开始重复这些实验，不久就得出结论：青蛙的蛙腿出现痉挛，并不像伽伐尼所认为的那样，是它们自身所固有的“动物”电，而是由于两种不同金属接触时所产生的电效应。通过实验还观察到电不仅产生颤动，而且影响视觉和味觉神经：由两种金属联成弯杆，一端放在眼睛附近，当

另一端与嘴接触的瞬间有光亮感；用一根导线连接两个不同的金属币，将其一放在舌尖上感觉到苦味。伏打由此猜测，所有这些实验中最根本的是不同金属的接触。在此基础上，先后采用了各种不同金属，放在各种液体中进行几百次实验，终于发明伏打电池。1799年所制造的一种电池是由20对铜、锌圆片（中间用盐水润湿的纸板圆片隔开）组成的。1800年正式向皇家学会报告了他的发现，从此产生稳恒电流的装置开始在电磁学研究中发挥了巨大作用。在此之前，1775年发明树脂起电盘，1778年提出电的张力相当于电位差的概念，建立了导体的电容  $C$ 、电荷  $Q$  及其张力  $T$  之间的关系式： $Q=CT$ 。还研制成一种灵敏验电器（1771）、电容器（1773）、电位计和其他仪器。发现了火焰的导电性（1787）。著有《伏打著作集》（共7卷，1918~1929）、《伏打通讯集》（共3卷，1949~

**伏特计 (Voltmeter)** 测量电压的电表。在中学里都使用指针式伏特计。伏特计仅有一个重要参数：电压灵敏度，常用  $V$  和  $k V$  作为单位。例如500型万用电表的直流电压表的电压灵敏度为  $20k V$ 。如果测量选择旋钮指在25伏，说明伏特计的量程电压为25伏，内阻为  $25V \times 20k V=500k$ 。中学里的伏特计都是用毫安表改装的，因此其电压灵敏度为  $1k V$ ，如果用来测量电压的伏特计其电压量程为3伏，则其内阻为  $3k$ 。

伏特计的内阻越大，测量电路某两点的电势差的影响越小，即分流造成的误差越小，反之则大，大到一定程度必须加以修正或者补偿以求得真正的电势差。

在使用伏特计测量电压时要注意并接，并要求“+”、“-”端不要接反。伏特计的结构就是电流表串接降压电阻。

**复摆 (compound pendulum)** 见摆。

**复音 (complex tone)** 又称乐音。具有一个以上音调的声音。物体振动时同时发出多种频率的声音，由一个基音与许多泛音组成。复音中音调最低或频率最低的分音称为基音或基频。能代表复音音调的主要频率称为主频。一般来说主频是基频，但不一定总是基频。当复音具有周期性时，其分音的频率都是基频的整数倍；当复音为非周期性时，其分音的频率并不一定是基频的整数倍。对于任何两个发音体，可以通过调节，使它们具有相同的基音，但泛音的数目与强度却很难达到一致。

**傅科摆 (Foucault pendulum)** 见摆。

**富兰克林 (Benjamin Franklin 1706~1790)**

美国科学家、政治家、社会活动家。生于波士顿。父母都是英国移民，因家境贫寒，只读了两年书。12岁起到印刷厂当徒工，自学成才。40岁后才开始从事电学研究，1756年当选为英国皇家学会会员。晚年主要从事政治活动，参加起草《独立宣言》和《美国宪法》。

1746年，富兰克林在波士顿观看了一位英国学者表演的莱顿瓶放电实验后，对电学产生了强烈的兴趣。不久他又收到了英国朋友柯林生寄来的莱顿瓶，于是他出让了经营多年的印刷所，潜心于电学研究。1747年7月他给柯林生的信中提出了关于电的学说：“电火是一种普通的元素，它存在于所有的物体之中。如果一个物体得到比它正常的份量更多的电，它就被称为带‘正电’；反之，它就被称为带‘负电’。”这就是他提出的单流体学说。在这个学说中，他最先引入了正、负电的概念，使电成为可以定量的物理量，给研究带来很大的方便。事实上，单流体学说已经包含了

电荷守恒定律的内容。

富兰克林在莱顿瓶的实验中发现实验中的“放电”与天空中的“闪电”在许多方面很相似，如发光、光的颜色、曲折的路径、快速运动、被金属传导...。为了验证自己的设想，1752年7月，他冒着生命危险，在雷雨时，将风筝放上了天空，把云层中的电荷引下来。这就是著名的“费城实验”。它破除了人们对闪电的迷信，证实了“天电”和“地电”的统一性。富兰克林因此获得了英国皇家学会1753年的科普利奖章。富兰克林还提出了用避雷针保护建筑物的设想，几年后避雷针开始在欧洲出现。

富兰克林还发明过双焦距眼镜、节能火炉以及用电火花来引爆炸药等。对金属的导热性、声在空气中和水中的传播也作过研究。他在给友人柯林生的信中阐述了自己的研究。这些信出版后被译成多种文字，受到广泛的注意。著有：《对电的实验与观察》（1751）、《富兰克林著作集》（共18卷，1959~1973）。

射线( $\gamma$ -ray) 波长短于 0.2 纳米的电磁波。最早由维拉尔发现。当时已发现了  $\alpha$ 、 $\beta$  两种射线, 故称这种射线为  $\gamma$  射线。射线是由核内能级发生跃迁时发射的。由于核内能级间距大(从几十 keV 到几个 MeV), 发射的  $\gamma$  光子的能量大, 所以其频率很高, 波长很短。在核反应或其它粒子反应中也会产生  $\gamma$  光子。射线在空气中穿行几百米以后, 其强度不会显著减弱, 或者说其穿透本领极强。例如能量为 1MeV 的  $\gamma$  射线穿过 1 厘米厚的铅板后, 其能量约损失二分之一。对于长波  $\gamma$  射线, 可以利用晶体衍射法测定其波长。对高能光子, 由于其波长远小于点阵间距, 更好的方法是通过测量  $\gamma$  光子的能量来确定其波长。例如可以利用  $\gamma$  光子的光电效应, 通过光电子的能量来测定  $\gamma$  光子的能量, 然后应用普朗克公式( $E=h\nu$ ) 算出频率和波长。

盖耳曼(Murray Gell-Mann 1929~) 美国物理学家。生于纽约。15 岁时就入耶鲁大学, 19 岁毕业。随后入加利福尼亚大学理工学院, 直接攻读博士研究生, 1951 年获哲学博士学位。后曾在普林斯顿高级研究院工作和芝加哥大学任教。1956 年任加州理工学院教授。

主要贡献是对粒子分类、相互作用研究以及提出夸克理论, 获 1969 年诺贝尔物理学奖。青年时代就显露出卓越的才华, 18 岁时在对宇宙线进行研究中发现了奇异粒子。1953 年, 和日本物理学家中野董夫、西岛各自独立提出了某些核粒子的“奇异性”概念, 用奇异量子数来解释当时所遇到的某些困难取得成功。后来物理学界把这种解释称作盖耳曼—西岛法则。1958 年, 和费曼合作提出在核理论进展中有重要影响的核  $\beta$  衰变矢量流守恒理论 这是经过 20 余年曲折发展以后达到的关于弱相互作用的正确的唯象理论。盖耳曼本人还提出了一种试验此项理论的方法——从氢气、硼、碳原子核的  $\beta$  衰变能谱中去求证。后来这一验证方法在吴健雄的指导下取得成功。1961 年, 与英国物理学家奈曼独立而几乎是同时提出了强子分类的“八重态法”, 建立强子的周期表, 提出强子不是最基本的粒子, 并预言  $\Omega^-$  粒子的存在。1964 年,  $\Omega^-$  粒子在实验上被发现, 证实了八重态法理论的正确性。同年, 还发展了坂田昌一关于强子结构的思想, 提出强子是由更基本的成分“夸克”所组成, 夸克有三种, 各自有其反夸克, 夸克带有分散电荷, 介子由一个夸克和一个反夸克组成, 重子则由三个夸克组成, 这模型被称为夸克模型。从夸克假设提出后, 物理学家一直在找寻自由的夸克, 但迄今尚未有被确证为成功的报道。夸克模型在解释粒子的静态性质上取得很大成功, 但在解释粒子的动态性质上则未涉及。

盖-吕萨克(Joseph Louis Gay-Lussac 1778~1850) 法国物理学家、化学家。生于圣莱奥纳尔。1800 年毕业于巴黎工艺学校。1802 年起在该校工作, 1809 年起任化学教授。1808~1832 年兼任巴黎大学物理学教授。1832 年起任巴黎植物园化学教授。

在物理学方面主要从事分子物理、热学和磁学研究。1802 年, 发现一切气体的膨胀系数相同, 并计算出它的值为  $0.00375$  度 $^{-1}$ , 由此确立了一个新的气体定律(被称为盖—吕萨克定律)。1804 年, 在气球上进行两次飞行, 其中一次是观察地磁场对磁针的作用, 以及分析高空中空气的化学成分。当乘坐的气球升到 7016 米的高处, 他还想再向上升, 便将许多零星

物体，包括乘坐的椅子都扔了出去，借以减轻气球的重量。测量的结果表明，即使在这样的高度，地磁场也几乎没有什么变化，高空的空的成分也与地面附近的基本一样。1807年，发现空气膨胀时温度降低，压缩时（无热交换）温度升高，由此得出气体的热容与其体积无关的结论。1808年，在实验上发现了一切单纯气体按简单的倍比彼此化合的规律（被称为体积倍比定律）。1811年，提出确定蒸汽密度的方法。1816年，研究了饱和蒸汽压。在化学方面，与特纳尔合作，研究出制备钾和钠的方法。先后制备出一系列化合物，其中包括氢氰酸等，奠定了定量分析的基础。1815年起，与阿拉果合作，编辑《化学和物理学年鉴》杂志。

盖-吕萨克定律（Gay-Lussac law） 参见气体实验定律。

杆振动（Vibration of a rod） 杆的纵振动和横振动的统称。 杆的纵振动：以一定方式支承的细杆中，某些部分受到纵向扰动以后，杆中的横截面相对于其平衡位置纵向位移的往复变化。例如，用锤沿杆轴方向轻击杆的一个端面的中心，端面因受打击而向前运动，由于杆中各横截面之间的应力作用，邻近的横截面亦将依次沿着杆身发生相对位置的变化。端面由于受到邻近横截面的挤压而受到的弹性回复力将力图使它恢复其平衡位置，邻近的横截面也将依次被应力带动而进行这种运动，同时构成各横截面的物质由于其惯性，在返回平衡位置后，将依次继续反向运动，反复如此，形成振动在杆中传播的纵波，此波在杆的两端被反射，使杆中各部分只能以离散的频率同相地或反相地振动，即杆的纵振动。杆纵振动的频率随着杆的长度、材料和两端的约束条件而定。如杆的两端被固定，振动的最低频率（基频） $f$  由  $f=c/2l$  确定， $l$  为杆的长度； $c$  是杆内纵波传播的速度，由杆的密度和杨氏模量决定。杆以基频振动时，杆中各横截面同相地振动，以杆中点处的振幅为最大。此外，此杆还可以以基频的任何整数倍频率（泛音频率）振动，在杆以泛音频率振动时，无纵向位移的各个节点以  $l/n$  的间距沿杆长分布。当杆的一端自由，另一端固定时，其基频为  $f=c/4l$ ，泛音频率为基频的奇整数倍，即  $f=nc/4l$ ，其中  $n=3, 5, 7, \dots$ 。

杆的横振动：以一定方式支承的细杆由于某些部分受到横向扰动而产生的横向振动。杆的横振动的频率与杆的支承方式、截面形状、材料等有关。例如，一端被固定的圆截面杆的几种振动方式如图所示。它的基频为  $f=0.28ac/l^2$ ， $l$  是杆的长度， $a$  是圆形截面的半径， $c$  是杆内纵波的速度，其高阶振型的频率与基频之比依次是 17.5，34.4 等。

杆振动

感生电动势（induced electromotive force） 由磁场变化所产生的感应电动势。按照法拉第电磁感应定律，只要闭合回路中的磁通量发生变化，就会产生感应电动势。如果回路固定不变，但回路所在空间磁场发生变化，则通过回路面积的磁通量也要变化，由此产生的感应电动势即为感生电动势，其量值为

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS。$$

但是，感生电动势的起因不能像动生电动势那样归结为洛伦兹力的作用。后来，麦克斯韦根据这一现象，提出了变化磁场激发感生电场的理论，使感生电动势得到了合理的解释。按照这个理论，形成感生电动势的非静电力即为电荷所受的感生电场力。

### 感应电动机结构示意图

**感应电动机** (induction motor) 亦称“交流异步电动机”或“异步电动机”。根据电磁驱动原理将交流电能转变为机械能的动力装置。是应用最广泛的一种动力用交流电动机。因其转子电流由电磁感应而产生，故名。又因转子转速总小于旋转磁场转速，故称“异步”。基本结构如图如示。定子部分包括机座、定子铁芯、定子绕组等。三相异步电动机的定子绕组由输入端互相间隔电气角  $120^\circ$  的三组线圈组成，嵌在定子铁芯的凹槽内，作星形联接成三角形联接后接到三相电源上。由于各线圈电流产生的均匀正弦交变磁场的位相依次相差  $2\pi/3$ ，从而在磁极空间中产生转速与交流电角频率相同的旋转磁场。转子由与旋转磁场同轴的转子铁芯和转子绕组构成。绕组结构有鼠笼式和绕线式两种。前者是在转子铁芯凹槽内嵌入金属条，在铁芯两端互相联结而形成导体回路。其外形像鼠笼，故名。后者是在铁芯上遍绕三组线圈，结构和形状与定子绕组基本相同，只是比定子绕组略小。绕组的三个出线端可通过转轴上的滑环与电刷引出机外，与变阻器相接以改变和调节电动机的机械特性。现在大多采用此种制式。接入交流电源产生旋转磁场后，转子各回路中便产生感应电动势和感应电流。磁场作用于感应电流的安培力驱使转子随旋转磁场转动，以拖动生产机械。如果转子与旋转磁场转速相同，转子绕组各回路内的磁通量便不再变化，感应电动势和感应电流不再出现，电磁驱动也就停止了。故转速异步，或转子转速总慢于旋转磁场转速是感应电动机工作的必要条件。对于恒定负载，转子转速可稳定在一定值上。这种电动机的优点是结构简单、工作可靠、维护简便，且效率较高，适用范围广。其缺点是转速调节较困难，功率因数也较低。

### 感应圈装置示意图

**感应圈** (induction coil) 利用电磁感应原理从直流低压获取高压的一种电源装置。主要由断续器和互感线圈两部分组成。基本结构如图所示。断续器包括触点 Z、弹簧片 P 和螺旋调节器等。互感线圈中原线圈的导线粗、匝数少，副线圈的导线细，匝数为原线圈的数百倍。它们一起绕制在直条形铁芯上。合上低压电源开关，原线圈中有直流电流通过，铁芯被磁化而吸引弹簧片，触点脱离，电路被切断。铁芯失去磁性后放开弹簧片，它又与触点接触，电路再度被接通。由于切断时磁通变化快，产生高压；而接通时磁通变化慢，感生电压不太高，如此不断重复，造成原线圈回路中的脉动直流电。根据电磁感应原理，此时在原线圈和副线圈中都有感应电动势，但两者由于匝数不同将相差数百倍，从而在副线圈中能产生数万伏高压。电容器 C 的作用是在直流电被切断时触点处不发生火花，从而使切断时间远较接通时间为短，造成副线圈中的电动势在直流电切断时 要比接触时大得多，从而能获得与直流相近的脉动高电压。在实验室中，常用感应圈获取高电压。汽车发动机等的点火装置也是利用感应圈的原理工作的。

**干涉滤光器** (interference filter) 利用光的干涉原理，从复色光中滤出所需波长范围的光的器件。它利用干涉现象而不是利用吸收或散射来消除那些不需要的波长。从结构原理而言，实质上是一个间隔层极薄的法布里—珀罗标准具，其间隔层的光学厚度 ( $nd$ ,  $n$  为间隔层折射率,  $d$  为厚度) 为某一波长的半波长，对该波长，其中心条纹的光程差为  $2nd = \lambda/2$ ，



满足多光束干涉的主极大条件，因而干涉滤光器对该波长是透明的，但它允许透过的光谱范围比有色玻璃小得多。为使滤光效果更好，通常采用真空镀膜工艺把干涉滤光器直接制备在有色玻璃的基板上。

目前使用较广的是多层膜滤光器，多层膜是利用高折射率和低折射率的介质（如 ZnS、MgF 等材料）通过真空镀膜多层叠合而成，当每一层的光学厚度是四分之一波长时，使该波长的光同相位反射加强。膜层数为奇数时反射率增加，如对于七层反射膜的滤光器，其反射率可达 95%。

**干涉图样**（interference pattern）在光的干涉现象中观察到的光的加强和减弱按一定规律分布的整体图像。杨氏双缝实验的干涉图样是明暗相间彼此平行的直线条纹，称为干涉条纹。牛顿圈实验中出现的是一组明暗相间的同心圆，称为干涉圈或牛顿环。

利用一些极简单的装置就能观察到干涉图样。例如在已曝光的黑色底片上用锐利的小刀划出两条平行狭缝，相距不大于 0.5 毫米。通过它看电灯丝，就可观察到明暗相间的彩色干涉条纹。水面上的油膜在阳光下呈现出色彩，这也是一种干涉图样。

干涉图样常用于检验产品质量。牛顿环常用于透镜曲面加工中曲率半径的检测。利用等倾干涉条纹可检测平行平面的平行度。

除了简单的明暗相间的直线条纹或同心环图样外，还可能存在各种复杂的干涉图样。晶体干涉实验或光测弹性中就会出现这类图样。例如单轴晶体的干涉图样是一个边界不太清晰的暗十字和一系列其中心在十字交点处的明暗相同同心圆环的组合。双轴晶体的干涉图样更为复杂。这些图样在矿物学中常用于检测晶体晶轴的方向。若不用单色光而用白光，干涉图样还带有彩色。

固定于某区域的干涉条纹称为定域条纹，反之，称为非定域条纹。观察定域条纹时如不把眼睛调视在该区域，便看不到这种干涉条纹。观察非定域条纹时，只要将眼睛调视到光束传播方向上的任一平面上，都能看到干涉条纹。

**刚体**（rigid body）各部分的体积和形状都不会发生变化的物体。刚体是抽象化的力学模型。实际物体都不是真正的刚体，在有些问题中，物体本身大小和形状的变化对整个运动过程的影响可忽略，即可把它看作刚体而使问题大为简化，其所得的结果仍能和实际情况相当符合。在实际问题中，一个物体是否可看作刚体，应视具体情况而定。一般来说，对于在外力作用下变形很小的固体，在讨论其移动或转动时就可把它看成刚体（在讨论其应变或内部振动时则不能）。

**刚体力学**（rigid body mechanics）以刚体为研究对象的力学理论。刚体被看成各部分之间相对位置不能变化的物体，这是有一定大小的物体的最简单模型，又是许多实际固体的近似描写。所以刚体力学在实际问题中有广泛的应用。刚体力学包括刚体运动学和刚体动力学两大部分，前者讨论刚体运动的描述方法，后者研究刚体运动的客观规律。与质点相比，刚体是由多个质点或许多物质微元构成的系统；与一般的质点系相比，刚体各部分的位置、速度和加速度是互相牵制的，并因此在各部分之间存在着保持刚体大小和形状不变的约束力。刚体的运动方式可分为平动、定轴转动、平面平行运动、定点转动和一般运动等。因此在刚体运动学中，除了有刚体上各点的位置、速度和加速度这种运动学概念之外，还有描述整

一个刚体位置和运动的运动学量，就是刚体上被指定的一个特定点（基点）的位置、速度和加速度，以及刚体的角坐标、角速度和角加速度。刚体平动部分的描述与质点运动学相同；刚体转动部分的描述则用角位移、角速度和角加速度等概念。刚体的动力学特性是刚体中各部分之间的内力对刚体的运动没有直接影响，决定刚体运动的是分布于刚体上一切外力的合矢量以及这些外力对刚体质心力矩的合矢量。含有力的合矢量和力矩合矢量的动力学方程决定了刚体在外力作用下的运动，这使许多刚体动力学问题的实际求解成为可能。鉴于刚体力学在力学中的特殊地位，它构成了力学中的一个非常重要的部分。

**杠杆（lever）** 在外力作用下，能绕着杆上一固定点或固定轴旋转的简单机械。如杆秤、橇棍、拔钉榔头和剪刀等。杠杆是一种增力机械，利用杠杆可以用小力获得大力。或虽不能增力，但能增加位移。杠杆上的施力点称为力点，所施的力称为动力。固定点称为支点。阻力的作用点称为重点。支点到动力作用线的垂直作用距离称为动力臂，支点到阻力作用线的垂直距离称为阻力臂。对于动力臂大于阻力臂的杠杆，可以用较小的动力克服阻力使杠杠平衡。对于动力臂小于阻力臂的杠杆，力点的较小位移可以使重点获得较大位移。支点在力点和重点之间时，动力和阻力方向相同，支点在杠杆的一端时，阻力和动力方向相反。

**杠杆**

O：支点 F：动力 A：力点  $F_1$ ：阻力  $A_1$ ：重点 L<sub>1</sub>：动力臂 L<sub>2</sub>：阻力臂

**杠杆原理（lever principle）** 又称杠杆定律。杠杆平衡时动力矩（动力与动力臂的乘积）和阻力矩（阻力与阻力臂的乘积）大小相等的定律。以 F 表示动力的大小，L 表示动力臂；以  $F_1$  表示阻力的大小，L<sub>2</sub> 表示阻力臂，杠杆原理的数学表示是

$$FL = F_1 L_2$$

利用杠杆原理制得的杠杆可以省力，但不能省功。为要省力，就必须使动力臂大于阻力臂，这时杠杆对阻力作功而使重点移动的距离小于动力对杠杆作功而使力点移动的距离。应用机械功原理也可得到杠杆原理。

**高频加热（high-frequency heating）** 利用高频电能使金属或介质等发热的方法。可分高频感应加热、高频介质加热和微波加热等。

**高频感应加热** 利用涡电流加热物体的方法。被热对象主要是各种金属、合金和半导体材料。变化的电磁场在导体内产生涡电流，从而产生焦耳热，使被热物体温度升高甚至熔化。频率越高，产生热量越多。工业上常用于焊接、冶炼、热处理以及半导体提纯等。所用频率通常在 0.1~1MHz 之间。当用于冶炼、提纯等工艺时，常将材料置于坩埚内，坩埚外绕制线圈，通以高频交流电。这类装置称感应加热炉。家用电磁灶也是一种感应加热炉。

**高频介质加热** 利用介质损耗加热物体的方法。被热对象为各种电介质。在交变电场中，介质分子反复极化，转动、振动等分子运动加剧，相互间的摩擦等作用也加剧，这些都要吸收或损耗电磁能量，并且转变为热能形式使物体温度升高。交变电场频率越高，强度越大，介质损耗越严重，用于加热时升温也越快。一般使用频率在 1~100MHz 间。此法常应用于皮革、木材、电木粉等的加热、塑料热合以及电疗、杀虫、杀菌等方面。

高频加热有其他加热方法不可比拟的优点。例如，热量发生于被热物体内部，不需要中介传热，热效率高，升温快，且易于控制。加热过程无须接触，材料不受污染，可在真空等特殊要求下进行，避免高温下的氧化。既可均匀加热整块介质，也可利用趋肤效应加热金属表面，对表面进行淬火。

高斯(1) (Karl Friedrich Gauss 1777~1855) 德国数学家、物理学家、天文学家和发明家。生于不伦瑞克。幼时家境贫苦，父亲靠做短工维持生活，母亲是石匠的女儿。高斯从小聪明过人。10岁时，一次在课堂上教师让学生计算从1到100的和，他立刻得出答案为5050，这使教师倍加赞赏。11岁时，发现了二项式定理。1792年，15岁的高斯在费迪南公爵的帮助下，才得以进一所较好的学校受教育。1795年入格丁根大学学习，第二年成功地发明了用圆规和直尺作正17边形的方法，解决了两千多年来的一个重大几何难题。1799年获博士学位。1807年任该校教授和天文台台长。1804年当选为伦敦皇家学会会员，1820年成为巴黎科学院院士。

高斯在数学、物理学、天文学等方面都创造了惊人的业绩，在电磁学方面取得的成绩尤为突出。从1831年开始进行电磁学的实验研究。1832年，建立了绝对单位制，引入三个基本单位：时间单位1秒，长度单位1毫米，质量单位1毫克。1833年，建成一座地磁观察台，成为当时观察研究磁偏角变化的中心。与韦伯合作，制成德国第一台电磁电报设备。1839年，在其著作《与距离平方成反比的吸引力和排斥力的普遍理论》中，阐明了势理论的原理，确立了高斯定理，即表示电场强度对任意封闭曲面的通量只取决于该封闭曲面内电荷的代数和，与曲面内电荷分布情况无关，与封闭曲面外的电荷亦无关。该定理成为静电场的一个基本定理。1840年，在其著作《屈光研究》中，利用几何学知识研究光学系统近轴光线行为和成像，建立了近轴光学，又称高斯光学。早在1845年，就有了电磁相互作用的传播速度是有限的思想。

在数学方面，主要从事数论的研究，对超几何级数、复变函数论、统计数学、椭圆函数论都有重大贡献。他的曲面论是近代微分几何学的开端。1818年，提出存在非欧几何学的可能性，是非欧几何学的创始人之一。结合实验数据的测量，发展了概率统计理论和误差理论，发明了最小二乘法，引入高斯误差曲线。

高斯著作颇丰，成就甚多。一生中共发表323篇(种)著作，提出404项科学创见(发表178项)，完成4项意义重大的发明：(日光)回照器(1820)、光度计(1821)、电报(1832)和磁强计(1837)。本世纪30年代，由格丁根大学的学者们整理出版了《高斯全集》，共11卷。

(2) (gauss)，磁感应强度非国际单位制(电磁系单位制或高斯单位制)中的一种单位，目前仍常使用。常用G或Gs表示。它与国际单位制中磁感应强度单位“特斯拉”的关系为：1高斯=10<sup>-4</sup>特斯拉。

高斯定理(Gauss theorem) 电磁学中反映电场强度与电荷分布相互关系的定理。电场强度E在任意曲面上面积分 $\int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$ 称为电场强度对该面积的通量。根据库仑定律可以证明，电场强度对任意封闭曲面的通量正比于该封闭曲面内的总电荷Q，即

$$\int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q}{\epsilon_0},$$

这就是高斯定理。高斯定理表明静电场是有源的，源头在电荷所在处。

高斯定理中的  $E$  是指空间中所有电荷分布产生的电场。该定理表明，总电场的电场强度对任一闭曲面的电通量与该曲面外的电荷分布无关。不过上述结论并不意味着曲面外的电荷对面上电场强度没有贡献。例如若闭合曲面的电通量为零，面上  $E$  并不一定处处为零，如果闭曲面内无电荷，这表明，这时面上的电场正是由面外电荷激发的。高斯定理对任何电荷分布总是成立的。

当存在电介质并用电位移  $D$  描述电场时，高斯定理可表示成

$$\oint_S D \cdot dS = Q_0,$$

即电位移  $D$  对任意封闭曲面的通量等于该封闭曲面内总自由电荷  $Q_0$ 。在这个情况下，与自由电荷在面内的分布情况无关，与极化电荷亦无关。

静电场的高斯定理还可以推广到非静态场情况，这时它便成为麦克斯韦方程组的组成部分。

**哥白尼** (Nicolaus Copernicus 1473~1543) 波兰天文学家，日心说(地动说)的创始人。生于波兰西部托伦城圣阿娜港。曾在克拉科夫的雅盖隆大学学习。23岁赴意大利求学，先在波伦亚大学、后到帕尔瓦大学和法拉腊大学学习。1503年回到波兰，成为他的舅父、大主教瓦琴路德的秘书和医生。1512年，舅父去世，他一直在教会任职达30余年。在此期间，他完成了名著《天体运行论》，并于1543年正式出版。

哥白尼一生最伟大的成就是创立了日心说。他以惊人的勇气、胆略和严格的科学态度，摈弃了当时公认的托勒密的地心说。按照他的日心说：

地球是运动的，它包括绕轴的自转、绕太阳的公转和用以解释二分岁差的地轴的回转运动；太阳为宇宙中心，一切行星和恒星天球都绕着太阳转动；行星在太阳系中有一定的排列次序。哥白尼日心说是人类认识宇宙过程中的一次革命，它不仅破除了地球是固定不动的假设，动摇了宗教神学宇宙观的基础，而且破除了亚里士多德和托勒密的权威性，沉重打击了封建神权的统治，从而把自然科学从神学和经院哲学中解放出来，走上了大踏步发展的征程。哥白尼日心说也有局限性；认为天体运动是匀速圆周运动；把太阳当成宇宙的中心。这些错误随着以后开普勒发现行星运动三定律和牛顿发现万有引力定律得到了修正。

**哥白尼革命** (Copernican revolution) 哥白尼提出的日心说使欧洲科学思想在17世纪经历了一场深刻的变革。在中世纪欧洲科学思想中占主导地位的是托勒密的地心说。这种理论承袭亚里士多德“地球中心说”的宇宙观念，假设太阳、月亮和行星都在所谓本轮的圆周上作匀速运动；每个本轮在中心又在所谓均轮的圆周上作匀速运动；不动的地球位于均轮的中心。这种理论虽然用少量的本轮和均轮，通过计算可得到与当时粗糙的观测较为相符的结果，但由于以不动的地球为中心的宇宙更适合于宗教的思想，这样，托勒密的地心说就被用来为宗教服务，他们断然宣称：这个地球为中心的宇宙观念与宗教教义同样神圣，谁要怀疑它，谁就是大逆不道，亵渎神灵，就应当作为异教徒来论处。

**哥白尼日心说的诞生** 随着资本主义的发展，航海事业也迅速得到发展。而以托勒密地心说为指导编制的天体运行表，在实际航海中总是给观测结果带来较大的偏差。由此终于使人们开始怀疑其理论本身的正确性，这就有力地推动哥白尼在天文学中的革命。哥白尼从1516年开始撰写

《天体运行论》，经过周密的思考和计算后指出，托勒密体系在认识论上的根本错误之一，就是没有将现象和本质加以区别，把假象当作真相。哥白尼认为，不要只停留在事物的现象上，而要进一步去认识事物的本质。正是在这种科学态度的指导下，大胆地提出了日心说。哥白尼还估计到《天体运行论》中提出的太阳为宇宙中心和地球运动的新观念之后，必然会遭到来自教会神学和封建保守势力的反对。但他以大无畏的精神，理直气壮地宣布：“对数学一窍不通的无聊的空谈家会摘引圣经的章句加以曲解来对我的著作进行非难和攻击。对这种意见，我决不予以理睬，我鄙视他们。”

**哥白尼日心说的内容** 主要有以下几点：地球是运动的，地球不仅绕太阳公转，它自己也有自转运动，因而从地球的从西向东运动来解释太阳和恒星的东升西落，是符合事实的。太阳为宇宙中心，而不是地球为宇宙中心，行星都围绕太阳运转。行星在太阳系中的排列次序：离太阳最远是土星（当时尚未发现天王星、海王星、冥王星），绕太阳运转一周，需时30年；其次是木星，绕太阳运转一周，需时12年；然后是火星，绕太阳一周的时间是2年；第四是地球和同它一起的月亮，地球绕太阳一周的时间是1年；第五是金星，绕太阳运转一周，需时9个月；离太阳最近的火星，只需80天就可以绕太阳运转一周。在所有这些行星外，是所谓“恒星天球”，离太阳最远，它包罗一切，但本身是不动的。

**哥白尼日心说的意义** 哥白尼日心说是人类认识宇宙过程中的一次革命，它的重大意义在于：日心说是作为托勒密地心说的对立面出现于历史上的。它把地球从宇宙中心上拉了下来，降为太阳系的一颗行星，和其他行星一起绕太阳运行，这就从事实上否定了长期统治人们思想上的上帝存在，动摇了宗教神学宇宙观的基础。日心说也是作为经院哲学的对立面出现于历史上的。它一扫经院哲学那种空洞、烦琐、无聊的反科学的态度，坚持从对客观事物的科学考察出发，在积累了大量科学事实的基础上，去得出科学的结论，这对后来物理学的发展有深远的影响。日心说的建立，为自然科学的发展开辟了道路。由于哥白尼所关心的是，行星怎样运动才会产生最简单最和谐的天体几何学，这样他认识到必须把行星运动的坐标系从地球移住太阳，于是势必牵涉到物理学、天文学和数学等领域中的革命。哥白尼的日心说对于把自然科学作为“神学恭顺的婢女”更是一次有力的冲击。从此自然科学便开始从神学中解放出来，包括物理学在内的近代自然科学获得了迅猛的发展。

哥白尼日心说也有其局限性，主要有两点：首先由于受到古希腊毕达哥拉斯学派关于圆形是宇宙中最和谐、最美好的形状的影响，哥白尼体系使用圆运动或圆运动的组合来描绘，而且运行速度又是均匀的，这与天体的实际运动情况是不相符合的。其次，哥白尼体系虽然抛弃了地球中心说，但却把太阳当成宇宙的中心，认为整个天球都是绕太阳运转的，这也是错误的。再次，哥白尼对恒星怎样配置，宇宙有限还是无限，行星靠什么运动等问题也未给出满意的回答。这些错误和不完善的地方，随着伽利略、开普勒、笛卡儿的工作不断得到了修正，并由他们为解决这些问题而提出了独特的见解，而牛顿则把这些研究成果做了独创性的综合，为近代自然科学奠定了牢固的基础。

**哥本哈根解释 (Copenhagen interpretation)** 量子力学的正统解释，以不确定原理与互补原理为主要基础。最初是以玻尔和海森伯阐述的

量子跃迁这一不连续过程的概念作为对量子力学本质的解释。1926年，玻尔邀请薛定谔到哥本哈根讲学，薛定谔在报告最后，依然提出要放弃量子跃迁观念，坚持微观世界中无所不在的连续性，由此引起了一场激烈的争论。海森伯思考了这种分歧的根源，认为这是由于量子力学的形式体系缺乏明确的解释引起的。为了作出明确的解释，海森伯于1927年2月同泡利经过深入的通信讨论之后，3月底发表了一篇题为《关于量子论的运动学和力学的直觉内容》的论文，分析了粒子的位置、速度、轨道、能量等基本概念，提出了“不确定关系”：对于一个粒子位置所测得的数值的不定性，同对它的动量所测得的数值的不定性的乘积，和普朗克常数是同一数量级。这意味着量子力学的解释与经典物理学中理论认识的根本假定全然不同，在微观世界中，位置和动量是不可能同时准确地测量的。在此基础上，玻尔于1927年9月提出“互补原理”，它的主要论点是：“量子论的本性迫使我们把空间-时间坐标表示和因果性要求看作是各自用来表示观察和定义的理论化的描述的两个彼此互补但又互斥的特征，而这两者的结合则是古典理论的特征。”从而在哲学上对不确定关系作了概括，并用以解释量子现象的基本特征，于是这一互补原理便被称为量子力学的“哥本哈根解释”，30年代后成为量子力学的正统解释，但遭到爱因斯坦的坚决抵制。此后爱因斯坦和玻尔就量子力学的实质是什么展开了长时期的论争。

哥本哈根学派（Copenhagen school） 20世纪20年代形成的以玻尔为首的著名的物理学派。该学派的聚集地是1920年由玻尔创立并领导的哥本哈根理论物理研究所，当时该所创立的目的就在于促成理论物理学家和实验物理学家的密切合作。早期到研究所工作的有匈牙利的赫维赛，德国的弗兰克，荷兰的克雷默斯，瑞典的克莱因，挪威的罗斯兰德。其后奥地利的泡利，德国的海森伯也来到该研究所。还有英国的狄拉克、福勒等也不时来到研究所进行短期工作。在玻尔所取得的巨大学术成就及严谨的治学作风的感召与影响下，这批出类拔萃的、对量子力学有着基本相同理解的年轻物理学家形成了一个哥本哈根学派。该学派对现代物理学的发展作出了重大贡献。如到哥本哈根的泡利，在玻尔的指导下研究反常塞曼效应，获诺贝尔物理学奖。又如海森伯两次到哥本哈根工作，两次都有重大的理论建树：先是建立了矩阵力学；后又提出了不确定关系。该学派还影响和造就了大量物理学人才，有人统计，全世界有30多个国家的近千名现代物理学家曾经或长或短地在该研究所里工作过。

隔音（sound insulation） 又称隔声。声音入射到分隔构件或间壁上，使透射到另一侧的声能减少的方法。也是利用间壁构件防止空气声和固体声传入室内的一种技术。隔音的目的主要是减少声波、振动、撞击等作用对构件所引起的振动，以及减弱在构件中的声波传播和向外辐射。播音室、病房、教室、影剧院、会议室等等都希望有一个安静的环境，尽量不受外界杂音的干扰，为此都需要好的隔音设备。隔音技术可分为两类：

空气声的隔绝； 固体声的隔绝。声波入射到单层墙或板上，引起墙或板的振动，间接地又将声能传过去，其振动与传声的大小主要取决于墙或板单位面积的质量，若构件质量提高一倍，其透射损失约增加6dB。另外，有空气夹层的双层隔音结构，比同样质量的单层结构隔音要好。如在空气层中填充吸音材料，可进一步改善隔音性能。声音除了可以通过空气传播

外，还可以通过墙或基础等固体传播。机器运转时产生的振动可直接传给基础，并以弹性波的形式从机器沿房屋结构传到其他房间去，这就是固体声。要减弱或消除这种声音，可在振动源和它的基础之间安装弹性构件(如弹簧隔振器、橡皮、软木、沥青毛毡和玻璃纤维毡等)。

**隔振 (vibration isolation)** 把机械或仪器安装在合适的弹性装置上，使其中一种结构传递到另一种结构的振动极大地降低的一种措施。隔振可分为两类：主动隔振，又称为积极隔振。对于本身是振源的设备，减少它对周围环境的影响，将它与支承隔离开，以便减小传给支承上的不平衡惯性力。例如对电动机和各种转动设备的隔振。被动隔振，又称消极隔振。把系统安装在一个隔振的台座上，使之与地基隔离，以减少外界振动传到系统中来，例如车辆的乘座、精密仪器的安装、环境运输的包装等。

使系统尽可能避免和减轻共振作用，或减小振源引起的不需要的振动影响的装置称为隔振器。其性能可用隔振系数来表示，它等于隔振后机器设备的振幅与支承运动的振幅之比。隔振系数小表示隔振效果好。隔振系数与频率的关系见图所示。为粘滞阻尼系数与临界阻尼系数之比。 $\omega_1$  为外界激励频率， $\omega_0$  为隔振系统的无阻尼共振频率。为  $\omega_1$  与  $\omega_0$  之比值。从图中曲线可看出：当  $\frac{\omega_1}{\omega_0} = 1$  时为共振状态； $\frac{\omega_1}{\omega_0} = \sqrt{2}$  时传递力

等于外力； $\frac{\omega_1}{\omega_0} > \sqrt{2}$  时传递力小于外力。实用时一般取  $\frac{\omega_1}{\omega_0}$  为 2.5 ~ 5。此外可看出：增大阻尼可减小机器在起动和停车过程中经过共振区的振幅，但在  $\frac{\omega_1}{\omega_0} > \sqrt{2}$  时，阻尼的增加反而减小隔振效果。

#### 隔振系数计算线图

隔振器一般由重基座、阻尼器和倔强系数很小的弹性体组成。把系统或振源(如机器)固定在重基座之后，就与弹性体、阻尼器等构成一个有阻尼的弹性振动系统，相当于一个有阻尼的弹簧振子。可通过加大隔振器的质量、减小倔强系数，使此阻尼弹簧振子的固有频率远低于外界强迫力的频率，以避免共振；再通过增加阻尼，使共振振幅减小。隔振器正是据此原理设计而成的。重基座是为了增加整个系统的质量，可由铸铁或水泥制成，阻尼器可以是沙土或装有粘滞液体的气缸，弹性体可以是弹簧或柔软橡皮制品，近十几年出现多种高分子化合物的粘弹性材料制品，这些材料既可用于隔振，又能起抗冲击、降噪声的作用。

**格拉肖 (Sheldon Lee Glashow 1932 ~ )** 美国物理学家。生于纽约。1954年毕业于康奈尔大学。1955年获哈佛大学文科硕士学位，1958年获哲学博士学位。1958 ~ 1960年在哥本哈根工作。1962年任加利福尼亚大学副教授。1966年任哈佛大学物理学教授。

主要贡献是对电弱统一理论的研究，获 1979 年诺贝尔物理学奖。1958 年的博士论文《基本粒子衰变中的矢量介子》中已显示出电弱合一的早期想法，从而得到了一个弱相互作用与电磁相互作用统一的理论。1961 年首先意识到要同时描写弱相互作用和电磁相互作用，内部对称性应当扩大，即除了弱同位旋以外还应加上弱超荷，预言了中性弱流的存在，并引用了规范场这个概念。格拉肖曾认为这样的具有部分规范对称性的理论仍然是可以重正化的，后来知道这个结论并不正确。实际上只有在引入对称性自

发破缺概念之后，才有可能建立一个既可重正化又使中间玻色子具有质量的电弱统一理论。1967年温伯格将规范理论和对称性自发破缺的概念用到电弱作用中，其中所采用的规范对称性即为格拉肖所提出的弱同位旋和弱超荷对称性。1968年萨拉姆也提出了类似的理论模型。这一模型因而被称为格拉肖-温伯格-萨拉姆电弱统一理论模型。1970年合作研究了对奇异数改变的中性弱流问题，提出了格拉肖-伊略普洛斯-迈安尼机制，从而可使格拉肖-温伯格-萨拉姆模型推广到强相互作用粒子，这样到1971年，一个完整的电弱统一理论模型已经完成。1973年欧洲核子中心和美国费米国家加速器实验室都测到了中性弱流的反应的事例，其形式和强度与格拉肖的预言相一致。这又表明，格拉肖-温伯格-萨拉姆理论取得了巨大成功。

**各向同性媒质** (isotropic medium) 在任意方向上物理性能都相同的媒质。气体和液体基本属此类。但液体有时也呈现各向异性的情况。有些物体虽然由无数微小的各向异性晶体组成，但如果它们的晶轴方向随机分布，作为整体从宏观上仍然表现为各向同性媒质。属于立方晶系的晶体，如岩盐，为光学各向同性媒质。光在这类晶体中并不出现双折射现象，在不同方向上也没有吸收或反射差异。原因是立方晶系中立方形的高度对称。例如在立方体中任意作一对互相垂直的直线，它们对立方体是完全对称的。

**各向异性媒质** (anisotropic medium) 光的传播速度因方向而异的媒质。在按晶轴的性质而分类的七种晶系中，除立方晶系为各向同性媒质外，其余六种均为各向异性媒质。三斜、单斜和正交晶系的晶体均为双轴晶体；四方、三角、六角晶系的晶体均为单轴晶体。自然光进入各向异性晶体后，将分裂为两个振动方向互相垂直的线偏振光。它们的传播速度不同，而且这种不同的程度随方向而变。此外在各方向上对光的吸收也各不相同，出现多向色性。

**跟踪** (track) 或称为示踪，是一种程序调试的手段。在跟踪程序的控制下执行时，跟踪程序会按时间顺序显示程序每一步执行时的操作和结果。跟踪方式给出的大量信息，可以用来分析程序执行的各个细节，这对查错是非常有用的。

在汇编语言程序调试中，跟踪信息通常包括上一条指令执行后的累加器值，所有通用寄存器的内容，下一条指令的地址和指令内容。

在高级语言例如 BASIC 程序调试前，只要输入 TRACE $\downarrow$ 命令，程序执行开始，就会显示程序进行的行号（前有#表示）和有关数据，以便快速寻找故障产生的原因。调试完毕再键入 NOTRACE $\downarrow$ 命令，计算机就会恢复高速执行，进行正确运算，直到结束程序。

**耿氏二极管** (Gunn diode) 见耿氏效应。

**耿氏效应** (Gunn effect) 由 Gunn 发现的在半导体本体内所产生的高频电流现象。在 N 型砷化镓薄片的二端制作良好的欧姆接触电极，并加上直流电压使产生的电场超过 3kV/cm 时，由于砷化镓的特殊性质就会产生电流振荡，其频率可达  $10^9$ Hz，这就是耿氏二极管。这种在半导体本体内产生高频电流的现象称为耿氏效应。耿氏二极管与普通半导体二极管不同，它不需要 PN 结。

砷化镓的能带结构中，导带有两个能谷（见半导体），两能谷的能隙为 0.36eV。把砷化镓材料置于外电场中时，外电场的作用使体内电子在能



谷之间跃迁，导致其电导率随电场的增加时而增加，时而减小，从而形成了体内的高频振荡现象。

**功 (work)** 量度能量转换与传递的基本物理量。一个物体在力的作用下移动，叫做力对物体做功。物体沿直线运动时，恒力  $F$  作的功  $W$  定义为  $W = F s \cos \alpha$ ， $F$  是力  $F$  的大小， $s$  是物体沿直线位移  $s$  的大小， $\alpha$  是力  $F$  与位移  $s$  之间的夹角（见下图）。 $W$  也可以写成  $F$  与  $s$  的标积形式  $W = F \cdot s$ 。在不是恒力和物体沿曲线运动的情形，力  $F$  在物体的一段元位移  $ds$  上作的元

功是  $dW = F \cdot ds$ 。在物体经过一段路径  $C$  时，力  $F$  作的功  $W$  是它在路径  $C$  的每一段元位移上所作元功之和： $W = \int_C F \cdot ds$ 。根据力学定律，力对物体作的功在数值上等于物体机械能的增加。根据电磁学定律，外力克服电磁力所作的功，在数值上等于电磁场能量的增加。根据热学定律，在没有热传导的情况下，外力所作的功，在数值上等于热力学系统内能的增加。一切实验事实表明，对一个系统作一定数值的功的过程，就是等量的能量向系统传递的过程，所以说，功是能量转换传递的量度。功的量纲与力和位移相乘的量纲相同，是  $ML^2T^{-2}$ ，功的 SI 单位是焦耳，等于 1 牛顿力使物体沿力的作用方向运动 1 米所作的功。

**功率 (power)** 表征做功快慢程序的物理量。如物体在无限小时间间隔  $t$  内移动的元位移是  $s$ ，作用在物体上的力  $F$  在这段时间内作的功就是  $F \cdot s$ ，单位时间所作的功，也就是做功的快慢程度是

$$p = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot \frac{ds}{dt} = F \cdot v,$$

$v$  是物体的运动速度。由于功是能量传递的量度，所以功率是被做功物体在力的作用下所发生的能量随时间变化快慢的量度。功率的量纲是  $ML^2T^{-3}$ ，在国际单位制中，功率的单位是瓦。1 瓦 = 1 牛顿·米/秒。

**功率因数 (power factor)** 交流电流和电压相位差  $\varphi$  的余弦  $\cos \varphi$ 。数值上等于平均电功率  $P$  与视在功率  $S$  之比，即

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{IU}。$$

电功率  $P = IU \cos \varphi$ ，若电路为一纯电阻，其电压和电流同相，功率因数  $\cos \varphi = 1$ ，电功率  $P = IU$ ，这与直流电功率的公式形式相同。若电路为一纯电容或纯电感，这时电流和电压相位差为  $\pm 90^\circ$ ，功率因数  $\cos \varphi = 0$ ，平均功率  $P = 0$ ，这表明电路内没有功率消耗。一般情况下，无源电路的功率因数在 0 与 1 之间： $0 < \cos \varphi < 1$ 。平均功率  $P = IU \cos \varphi = IU$ 。

实际上，用电网络多为感性电路（如感应电动机、变压器等），功率因数可能比 1 小很多，这就必须设法提高功率因数。因为：由于功率因数  $\cos \varphi$  的存在，对于传输  $P = IU \cos \varphi$  的电功率，本来只要求电路中通过

$I = I \cos \varphi$  的电流就够了，但现在却需要通过  $I = \frac{I}{\cos \varphi} > I$  的电流，

从而增加了传输线上的能量损耗；功率因数  $\cos \varphi$  限制着发电设备所能输出的实际电功率。设发电机的容量为  $S = IU$ ，但由于功率因数  $\cos \varphi$  的存在，它输出的实际电功率  $P = IU \cos \varphi$  小于它的容量。

在生产技术上提高功率因数的措施有：利用电容器补偿电感性器件；正确选择电动机；选取合理的运行制度等。

**功能原理** (work-energy theorem) 又称功能定理。力学系统在运动过程中，其机械能增量等于外力所作的功和非保守内力所作的功的总和。在此，机械能被理解为系统中各物体的动能和系统内各部分的相互作用势能。若把系统在外场中的势能计入系统的机械能内，则功能定理表述为：系统在运动过程中，其机械能增量等于非保守外力和非保守内力所作的总功。由于系统势能的增量在数值上等于克服保守力所作的功，所以功和能的这种关系又可以表述为：系统在运动过程中，其动能增量等于一切外力和内力作的总功。

**汞灯** (mercury vapor lamp) 可分为低压汞灯、高压汞灯和超高压汞灯三种。低压汞灯点燃时汞蒸气压小于一个大气压，此时汞原子主要辐射波长为 253.7nm 的紫外线。常用的“日光灯”灯管内壁涂以卤磷酸钙荧光粉，再将紫外线转变为可见光。节能型荧光灯内壁涂有稀土荧光粉，发光效率更高。高压汞灯点燃时汞蒸气压为 2~5 个大气压，内管用石英玻璃。高压汞灯辐射的紫外线光谱加宽，且偏蓝绿，可用于光化反应、光刻机、紫外线探伤及荧光分析等。为使高压汞灯在照明上得到应用，常采用以下两种方式改善它的光色：在石英内管外面，再加一个玻璃壳，内壁涂耐较高温度的荧光粉，将紫外辐射转换成红色可见光，使高压荧光汞灯的辐射光谱接近于暖白色，且有较高的发光效率。玻璃外壳内壁不涂荧光粉，而在壳内与石英灯管之间串联一钨丝，它既作为镇流器，又可辐射出高压汞灯所缺少的红光，以改善光色。这类高压白炽汞灯使用方便，可直接接到 220 伏交流电源上，发光效率低于高压荧光汞灯，但高于白炽灯。超高压汞灯点燃时汞蒸气压达 10 个大气压以上，具有体积小、亮度高，可见光和紫外线能量辐射很强等特点，可用作荧光显微镜、光学仪器及光刻技术的强光源。

**共点力系** (system of concurrent forces) 见力的合成。

**共价键** (covalent bond) 由两个原子各贡献一个自旋相反但并非成对的电子所组成的具有方向性的键。如两个氢原子各自出一个 1s 电子，1s，1s 组成共价键。共价键使两个氢原子结合为一个氢分子。

共价键只是在某一特定的方向上形成，这个方向是组成共价键的电子的电子云密度最大的方向，如氨 ( $\text{NH}_3$ ) 分子中 N 与 H 只是在 x、y、z 三个方向形成三个最稳固的共价键，这称为共价键的方向性。此外一个原子只能形成一定数目的共价键，如氨分子中氮原子可以有三个共价键，而氢分子中的氢只能组成一个共价键，这称为共价键的饱和性。方向性和饱和性是共价键的两个重要特征。

**共鸣** (resonance) 声学中指由发声振动而引起的共振现象。我国古代对共鸣原理早已知晓。在西汉著作《淮南子》中就有“鼓宫则宫鸣，鼓角则角应”的记述。“宫”和“角”都是有一定频率的乐器，宫与宫、角与角的频率相同，所以会发生共鸣现象。

人们常利用共鸣现象来增强发声体的响度。如音叉下面所附的木箱是一个空气室，它的大小与音叉的振动频率相对应，能与音叉一起振动，发出响亮的声音，这个木箱就称为“共鸣箱”（或称“共鸣器”）。许多弦乐器（如琵琶、三弦、二胡）的琴身和琴筒都起共鸣箱的作用。但有时这

种共鸣现象却是要加以防止的。例如登山队员攀登高山时禁止高声喊叫，就是为避免由于叫喊引起与积雪层共振，使积雪层强烈振动而发生雪崩。这是十分危险的，因此禁止高声呼喊，成了登山队的一条戒律。

#### 亥姆霍兹共鸣器

声学中经常用到的亥姆霍兹共鸣器是一种最基本的声共振系统。它是一种用来分析复音的仪器，其外表如图所示，是一套用黄铜制成的大小不同的球形共鸣器。每个球有大小两个口，使用时，把小口插在耳中，大口对着声源，接收传来的声波。如果传来的声波中有与该共鸣器固有基音相同的谐音，就发生共鸣，否则就听不到声音。用一套具有各种不同的固有频率的共鸣器，就可分辨出复音中的各种谐音。但这种分析方法不很准确，比较麻烦，且不能定量测量，现在已为更完善、更准确、更迅速的电声法所代替。

**古代火箭 (ancient rocket)** 各种靠喷气推进的烟火、飞行器，它的前进运动是由向后喷射高速气体的反作用力获得的。世界上公认火箭是我国最先发明的。我国古代的烟火指爆仗、起火或流星一类，它们由几层纸经过某种工艺要求而包裹火药，成圆形或柱形，纸壳上有引火线，点火即发生爆炸。古代以此作为朝廷喜庆娱乐。《武林旧事》载：唐代已有了“烟火、起轮、走线、流星”一类玩物。到宋代，公元1161年采石场战役中使用了“霹雳炮”，它“以纸为之”、“其声如雷”、“纸裂而石灰散为烟雾”。这种“霹雳炮”被认为是以喷射推进的火箭在中外历史上最早的记载。另据席姆的《火箭与喷射》一书中讲到，公元1232年发生的汴京之战中，守城的人如何使用火箭把蒙古兵吓退。这种火箭以十六层纸裹成二尺许的火箭筒，内实以火药。将此火箭筒用绳子捆扎在枪头上，名曰“火枪”；因其能自行飞翔，又名“飞火枪”。特别是火箭筒在爆炸后，“药尽而筒不毁”，表明它为火箭无疑。转而传入欧洲，以后阿拉伯人的著作中称之为“中国箭”。

**古代物理学史 (history of ancient physical sciences)** 16世纪以前物理学发展的历史。古代物理学的萌生经历了原始社会、奴隶社会和封建社会等社会阶段。在漫长的历史时期内缓慢地形成与发展。西方奴隶社会物理知识发展的高峰在古希腊时期。以留基伯和德谟克利特为代表的原子论和以芝诺为代表的斯多噶派物理学，对宇宙间物质存在的一般形式和运动、变化作出了各自的说明。亚里士多德集雅典派的大成，提出他自己的物质观和运动观，并确立了把一切自然现象归于少数原理的物理学方法，然而他的物理学原理大部分是属于思辨性质的，含有较多的猜测和臆想的成分，因而错误百出。由于阿基米德的工作，古希腊后期才能用数学较为严格地处理静力学和流体静力学的问题。进入封建社会的西欧，处于教会神学的严加控制下面，因而中世纪前、中期的物理学几乎陷于停滞的境地。在力学研究方面，直至中世纪后期，欧洲人才取得一些进展，主要是有关物体运动的推理分析和冲力说的提出。在光学研究方面，阿拉伯人在希腊人的工作基础上作出了宝贵的贡献。

中国古代物理知识的发展，在世界物理学史中占有特殊的重要地位。中国是世界上最早进入封建社会的文明古国，从战国到秦汉，中国古代物理知识开始形成了自己的特色。其中墨翟和他的弟子是这个时期研究物理知识成就最大的学派，他们所写的《墨经》既是古代力学论说的代表作，

又是世界上最早的几何光学著作之一。经过汉、唐的发展，唯物主义思想家王充在他的《论衡》中记述了许多物理知识。时至宋、元（公元10世纪至14世纪），堪称中国封建社会自然科学研究的黄金时代，物理知识的积累更为丰富，指南针、印刷术等都是在这个时期内取得的重大发明，具有深远的世界影响。这个时期内，在理论上，一些带有总结性的典籍，诸如《梦溪笔谈》、《营造法式》、《武经总要》等相继问世；在技术上，开始把古代设想的许多东西变为现实，力学、热学、磁学知识得到较广泛的应用，从而在很多方面超过西方，闪耀着中华民族智慧的光辉。

**古希腊罗马的物理知识**（physical knowledge in ancient Greek and Rome）古希腊罗马时期物理学发展成就的概括。在西方古代，古希腊时期物理学发展曾达到一个高峰，然而古希腊人在物理学方面的成就与他们在数学、逻辑学、形而上学、文学、艺术方面的成就相比，相对来说还是比较小的。古希腊人的物理知识，主要表现在力学、光学、声学、热学和磁学等方面。随着罗马帝国的建立，宗教的统治，使古希腊人开创的物理研究活动走向衰落。

**力学方面** 亚里士多德和阿基米德，是古希腊力学知识的集大成者，他们主要研究物体在最简单的情况下（如在重力作用下）的运动和平衡问题。这与当时生产技术的需要（如抛掷物体，举高和搬运重物，建筑宫殿、桥梁等）是密切联系着的。

亚里士多德曾试作杠杆理论，他说，距支点较大距离的力更容易移动重物，因为它画出了一个较大的圆圈。他把杠杆端点的重物的运动分解为切向运动和法向运动两部分，并称切向运动为合乎自然的[运动]；而把法向运动称为违反自然的[运动]。关于落体的一些观点和真理相去更远，他说，体积相等的两个物体，较重的下落得较快。他还确立了把一切自然现象归于少数原理的物理学方法，然而他的力学原理大部分是属于思辨性质的，含有较多的猜测和臆想的成分，因而错误百出。

阿基米德就不同，他是把当时的技术实践和严密数学结合起来进行静力学研究的第一个人，并取得下列几项重要成果： 杠杆定律的证明；提出重心的概念及各种形状物体重心的求法； 阿基米德浮体定律。在力学应用方面，他曾发明了螺旋推进器、威力巨大的投射器和其它机械。

在阿基米德之后的一个世纪，亚历山大的泰西比乌斯发明了水钟（漏壶）、水风琴和压缩空气抛弹机。他还制造了最早的救火机，即灭火唧筒，它由两个压力唧筒联合组成，可以交替喷水。

**光学方面** 毕达哥拉斯、德谟克利特、伊壁鸠鲁和卢克莱修等认为，视觉是由所见物体射出的微粒进入眼睛而引起的。原子论者的这一观点是后来把光看作某种物质实体的光的粒子说的萌芽。但是，恩培多克勒、柏拉图、欧几里得却认为，眼睛本身发出某种东西，它直线射出，与物体的边界相切的这些射线形成一个锥体，从而被看到，物体的大小由视角来确定。亚里士多德认为，视觉是在眼睛和可见物体之间的中间媒质运动的结果。他认为，这种中间媒质有让光通过的可能性（潜在能力），即是透明的，光则把这种可能性变为现实。所以，没有中间媒质就没有视觉。在这种看法中包含着后来的光的波动说的萌芽。

古希腊的几何光学有较快的发展。亚里士多德曾直接提出过这样的问题：为什么插入水中的棍子好像是折断了。欧几里得在他的《反射光学》

一书中研究了反射现象，知道了凹面镜的聚焦作用，假定其焦点在球心或球心与镜面之间，并指出用凹面镜对准太阳也能点火。传说当罗马人包围叙拉古时，阿基米德借助于凹面镜反射光，使距城墙一箭程外的敌船队起火。活动于亚历山大里亚的希隆以光程最短的原则论证了反射定律，这个原则后来为费马所发展。托勒密对光的折射作了实验研究，但并未由此发现正确的折射定律，而是断言折射角与入射角成正比，这个结论只在入射角较小时才适用。

**声学方面** 毕达哥拉斯很早就从事声和音阶的研究，他指出了音程间的算术关系。亚里士多德把声音看作为一种运动，他指出，发声体撞击空气使之在各个方向发生拉伸和压缩运动，从而传播开去；当它碰到障碍时，就像球被反射一样而产生回声，这是关于回声产生的正确认识。古罗马的建筑师们，从经验里提出了建筑声学的一些问题，如声音的交混回响、回声、共振等。他们还把声音的传播和石块投向水面产生的水波相类比后认为，声音也会以无限膨胀的圆形向外发散。

**热学方面** 最著名的是希隆在他制作的“小涡轮”中把蒸汽作为动力使用。这是一个装有两个弯管喷口的中空球。喷管与球的轴成直角，各自弯向相反的方向。当蒸汽在球内产生时，蒸汽就由喷口射出，使球体绕轴转动。这是现代涡轮机的雏形。

**磁学方面** 古希腊人称磁石为“灵敏的铁”，磁石具有吸铁的力量，激励起人们的想象。诸如，牧人玛格内斯的寓言中表明，他由于穿着带铁钉的皮鞋，拄着有铁尖的手杖而被吸住，在艾达山上寸步难行。苏格拉底已知道了磁化现象，他说：“这石不仅吸引铁环，而且还使铁环具有类似的吸引其它铁环的能力，有时你可以看到一些铁片和铁环彼此勾挂以致形成一个十分长的链，而它们的悬吊力全都来自原磁石。”

**古希腊罗马的原子论** (atomic theories in ancient Greek and Rome) 古希腊罗马时期一种认为世界万物是由不可再分的物质微粒的原子组成的学说，其主要倡导者为留基伯、德谟克利物、伊壁鸠鲁和卢克莱修等人。留基伯和德谟克利特首先提出原子的概念，他们认为世界万物包括人和灵魂都由原子这种不可再分的物质微粒所组成。原子是永恒的，由它组成的整个自然界、整个世界也是永恒的。原子本身不变化，但能运动。原子的数量无限多，但它们之间没有性质的不同，仅有大小、形状、次序和位置的区别。世界万物由于构成它们的原子在大小、形状、次序和位置上的不同，而形成千差万别的性质。他们还用原子来说明人的生命现象，认为灵魂也是物质，是由精细和圆滑的原子组成的；这种原子布满了全身而形成灵魂的各部分，空气中有大量灵魂原子，随着人的呼吸与人体交换，从而维持人的生命；一旦呼吸停止，灵魂原子不能重新交换，生命也就结束了。伊壁鸠鲁继承和发展了他们的思想，提出原子有重量的观点，认为重量是原子运动的内在原因，自然的垂直平行降落是原子运动的主要形式。更重要的是，他提出了原子偏斜运动的思想，认为在原子垂直平行降落的过程中，有的原子可以由于其内部原因而脱离它原来运动的直线轨道，向旁边偏斜出去，这样，原子就相互碰撞，从而结合成世界万物。古罗马时期卢克莱修根据当时科学发展水平，在《物性论》中，以诗的语言和丰富的事例详细论证了原子论。他认为没有任何事物能从无产生出来，一切东西都是由原子（他称为“种子”、“本原”、“原初物体”等）产

生的；也没有任何事物消灭后归于无，物质是永恒存在的。古希腊罗马的原子论，为了说明千变万化的自然现象，对原子的性质和运动作出了不胜枚举的种种假设。在这种意义上的原子论，远远不是人们今天所了解的严密的科学理论。但是，在科学发展史上，这却是一种很早的唯物主义思想，因为原子论学者力图用客观存在的事物来说明自然，而并不借助于物质以外的精神或神灵。

**固体 (Solid)** 物质的一种凝聚态，具有一定体积和形状。在不太大的外力作用下其体积和形状改变很小，外力撤去后能恢复原状的固体称为弹性体，不能恢复的称为塑性体。大致上说，切变粘滞系数大于  $10^{13}$  泊的物质属于固体，小于此值的属于液体。

从结构上说，一般把固体分为晶体和非晶体两大类。晶体又包括单晶体和多晶体。单晶体中原子呈有规则的周期性排列，即结构是长程有序的。多晶体则由许多大小不一、取向不同的单晶晶粒组成。自然界中存在的大多数固体都具有晶态结构。非晶体，也称为无定形固体，其组成原子在空间的分布不具有长程的周期性，但在几个原子的线度上仍呈现某种规则排列，所以说它们是短程有序的。玻璃、橡胶、石蜡、沥青和塑料等都是非晶体。晶体有确定的熔点。而非晶体则没有确定的熔点，它随着温度升高而逐渐软化，流动性也逐渐增加。因此有时把非晶体看作过冷液体，而固体则专指晶体。1984年在实验上发现了一类既区别于晶体又区别于非晶体的新的固态物质，称为准晶体，它的结构特征是长程有序的，但没有周期性。用快速冷却方法制备的 AlMn 合金等是准晶体。实验上可利用 X 射线 (或电子、中子) 衍射技术来区分这三类固体物质：晶体的衍射图样由一组组明锐的斑点构成，衍射斑点的分布显示出物体结构的对称性特征；非晶体的衍射图样是一些很宽的弥散环；准晶体的衍射图样与晶体相似，也是由一组组清晰的斑点所构成，但它显示出传统晶体所没有的对称性质，如五重、八重对称性等。

非晶体和晶体及准晶体和晶体之间可以互相转化。处于亚稳态状态的非晶体和准晶体，在一定条件下可转化为稳定的晶态物质，物质状态的这一转化过程称为晶化过程。晶体受高能辐照等影响，内部原子的周期性排列遭到破坏，也可向非晶态转化。

**固体的能带 (energy band of solid)** 描绘固体中电子运动能量状态的一种图像。孤立原子中电子的能量状态是一系列分立的能级。当原子互相靠近聚集成固体时，原子间的相互作用使电子的运动状态发生变化，这时原子的内层电子受到的影响较小，它和原子核一起可看成是个离子实，同孤立原子中的情况相似；但外层电子不但受到其所属那个原子核的作用，还受到其他原子的作用，因此它们不再仅仅属于某个原子，而是在整个固体中运动，成为共有化电子。大量共有化电子的运动是个极其复杂的多体问题，通常可简化为单电子问题处理：把每个电子的运动看成是独立的在一个等效周期势场中的运动，这种等效势场由晶格的离子势场和其他电子的平均势场所构成。用这种单电子近似方法处理晶体中电子运动的理论称为能带理论。能带理论表明，固体中电子的能量状态即能级可分为若干区域，每个能量区域由大量间隔极小的、可视为连续分布的能级组成，称为能带。相邻两能带之间的能量间隔称为能隙或“禁带”，晶格中的电子不可能取这种能量状态。完全被电子填满的能带称为满带，满带中的电

子不导电；完全未被电子占有的能带称为空带；部分被占有的能带称为“导带”，导带中的电子能够导电；价电子所占据的能带称为“价带”。

利用能带理论可以解释金属、半导体和绝缘体的区别。在固体的能带中，能量比价带低的各能带一般都是满带，价带可以是满带，也可以是导带，如图所示。在金属中，价带是导带，所以金属能导电。在绝缘体和半导体中，价带是满带，因此它们都属于非导体。绝缘体中价带与空带之间的能隙较大，在通常情况下电子很难被激发到导带，因此绝缘体几乎是不导电的。但半导体中价带与空带之间的能隙较窄，电子很容易由于热激发从价带跃迁到上面最靠近的空带中，使空带中出现少量电子，价带中出现少量空穴，从而半导体具有一定导电性。在实际半导体中，往往引入杂质来改变能带的填充情况，使价带中的电子数目减少，即空穴数目增加或使空带中的电子数目增加，从而改变半导体的导电性。

**固体的热学性质 (thermal properties of solid)** 主要讨论固体的热容量或比热 (1 克物质的热容量) 随温度的变化。固体的热容量  $C_V$  是其能量随温度  $T$  的变化率。实验发现，在高温和常温情况下  $C_V$  与  $T$  无

导体非导体

导体和非导体的能带

关，是常数，且  $C_V=3R$ ，其中  $R$  是气体常数；但在低温时， $C_V$  随着温度的下降而变为零。

**固体热容量的经典理论** 即杜隆-珀替定律。若把整个晶体 (含  $N$  个原子) 近似为  $3N$  个独立的简谐振子，按经典的能量均分定理，每个简谐振子的能量为  $kT$ ， $k$  为玻耳兹曼常数，则总能量为  $3NkT$ ，从而可算出固体的热容量为  $3R$ 。这个定律仅在常温和高温情况下才与实验符合。普朗克量子论的建立是建立低温下热容量理论的基础。在此基础上，爱因斯坦和德拜分别提出了各自的模型以解释固体热容量的实验结果。

**固体热容量的量子理论** 有爱因斯坦模型和德拜模型。爱因斯坦假定，固体中每个原子围绕格点的振动具有相同的频率，而每个振子的能量由普朗克的理论给出，从而算出固体的热容量。他的理论在高温和常温时，得到与实验一致的结论；但在低温时，爱因斯坦模型的结果与实际并不符合。德拜假定，每个原子的振动频率是不相同的，具有一定的分布，其中有一个最高频率。按照这个模型算出的固体热容量与温度  $T$  的三次方有关，因此当温度降到绝对零度时，热容量  $C_V$  也为零。这就是有名的低温热容量的温度三次方定律。它成功地解释了低温时固体热容量的性质。

**固体中的光吸收 (absorption of light in solid)** 光在固体中传播时，能被物质吸收的现象。一束平行光透射入固体时，其光强随穿透距离衰减的规律就是光的吸收定律。从实验上建立的光吸收定律一般可表示为： $I=I_0e^{-aL}$ ，其中  $I_0$  为入射光将透入固体时的强度， $I$  为光束通过固体层的厚度， $I$  为光束透入到  $L$  厚度处的光强度，称为物质对该频率光的吸收系数。物质的吸收系数与光频率的关系决定该物质的吸收光谱。各类固体材料的吸收光谱可以有很大差别，但通常总可将它分为几个吸收区，不同吸收区中光吸收的机理是不同的。

**本征吸收** 价带电子吸收入射光能量 (大于或等于禁带宽度  $E_g$ ) 后跃迁到导带，产生电子-空穴对。由于各种固体材料能带结构的差别，它们的

$E_g$  不相等，因此本征吸收可以发生在紫外、可见光或近红外区。本征吸收的特点是吸收系数很高，可达  $10^5 \sim 10^6 \text{cm}^{-1}$ 。在本征吸收的低能量端，吸收系数下降很快，这就是本征吸收边。只有当入射光的能量等于或大于禁带宽度  $E$  时，才有本征吸收。

**自由载流子吸收** 导带中的电子或价带中的空穴吸收光能量后在带内从低能态向高能态跃迁。由于这是一种带内跃迁，因此吸收光能量比较小，所以自由载流子吸收一般发生在红外波段和微波波段。自由载流子吸收的吸收系数与载流子浓度有关。金属内自由电子的浓度较高，这种类型的吸收很强。

**杂质吸收** 与杂质相联系的吸收过程种类很多，因固体材料及材料中杂质的种类而异，例如半导体中浅能级杂质电子跃迁的吸收过程就是一种杂质吸收过程，这种过程只有在较低的温度下才能被观察到。

**晶格吸收** 在红外区存在与晶格振动相联系的吸收峰，在这种吸收中光子能量直接转换为晶格振动动能。离子晶体的这类吸收过程的吸收系数很高，可达  $10^5 \text{cm}^{-1}$ 。

**激子吸收** 在价带中的电子吸收光子（其吸收能量小于材料的禁带宽度）而形成激子的吸收过程。由于激子光吸收过程所需光子能量比本征吸收小，所以激子吸收发生在本征吸收限的长波区。

光的吸收在科学技术中有广泛应用，如利用吸收光谱对固体进行定性和定量分析，根据光谱的线型确定物质的化学组分、能带结构等。

**固体中的热传导** (thermal conduction in solids) 当固体中的温度分布不均匀时，热能由高温处向低温处流动的现象。实验表明，固体的热传导同气体、液体的热传导一样，都遵循同一宏观规律，即傅里叶

定律：单位时间内通过单位横截面的热量  $Q$  与温度梯度成正比  $Q = -k \frac{dT}{dx}$ ，

式中的负号表示热量总是由高温流向低温，比例系数  $k$  是材料导热能力的量度，称为热导率，单位为瓦/(米·摄氏度)，其倒数称为热阻系数。对于不同类型的固体，其热导率有很大的差别。此外，热导率还明显地依赖于温度以及固体材料的纯度和物理状态，在低温下尤其如此。

固体中的热量是通过自由电子和晶格振动的格波来传输的。在绝缘体中没有自由电子，它们主要通过晶格振动导热，这种机制的导热效果较差，因此绝缘体的热导率较小。纯金属中有大量自由运动的电子，电子对导热的贡献远大于晶格振动，因此纯金属是热的良导体，其热导率较大。实验表明，在温度不太低时，纯金属的热导率  $k$  和电导率  $\sigma$  之比值与绝对

温度  $T$  成正比，即  $\frac{k}{\sigma} = LT$ ，其中比例系数是个常数，与金属材料的种

类无关。上述关系称为维德曼-夫兰兹定律。对于许多合金、不纯金属和半导体来说，两种热传导机制，即电子导热和晶格导热都起着重要作用。

气体的热传导现象可用气体动理论来解释，固体中的两种热传导过程也可采用相似的模型来描述。它们的热导率都可以写成  $k(\text{常数})v$ ，式中  $v$  是粒子的平均速度， $l$  是平均自由程， $c$  是单位体积的热容。电子导热可用自由电子气模型描述。晶格导热可看成声子的传播过程。在固体物理学中，晶格振动系统可以等效为声子系统，或者“声子气体”。当晶体中温



度分布不均匀时，高温处的晶格振动将具有较多的振动模式和较大的振动幅度，也即较多的声子被激发，声子密度的不均匀分布导致声子的扩散运动，并伴随着热能的传递。声子的平均自由程由声子间的相互碰撞和声子受缺陷、杂质、晶粒间界及晶体表面的散射所决定。

**挂图和模型 (picture and model)** 物理课堂教学中，为增大可见度，增加直观性，说明较复杂结构、过程或抽象物理模型时使用的大型图片和实物模型。

有下列一些需要运用挂图和模型的情况：某些实物或现象，在课堂上难于让全班学生观察，需要制作放大的模型或挂图。例如说明左、右手定则的模型和挂图。某些内部结构复杂的实物，无法从外部或某一侧面看清楚，需要制作解剖式的模型或带剖面的挂图。例如内燃机的结构、原理挂图。某些联系实际的装置、设备，无法参观或参观时无法一目了然其全貌和结构原理，需要制作简化的模型和挂图，如发电站输配电路模型、水压机、船闸等。某些不可能拿出实物的抽象模型，如晶体空间点阵模型、原子结构模型等。

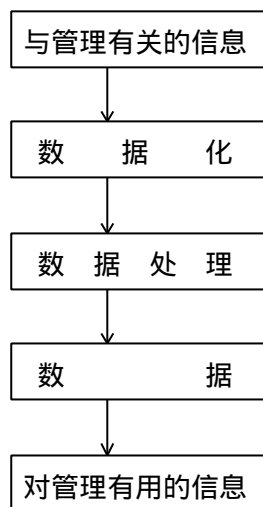
模型比挂图的直观性更强，但挂图比模型在某些方面更容易突出对象，而且成本低廉，有时可将两者长处结合起来，制作带有个别活动部分的示教图，它既可像挂图一样简便，又能起到活动模型的作用。

**观察能力 (observation skill)** 有目的、有计划地运用各种感官或借助仪器去感知客观事物和现象的能力。通过观察，可以了解现象的特征及其发生、发展的条件，认识事物的部分属性和特点，了解事物的相似点或因果关系。因此，观察是学习和科学研究的一种基本方法。观察的目的是：通过比较、归纳来感知对象的主要特征、条件；取得资料；发现问题，即发现细微的、很有意义的问题，从而达到正确的感知和准确的判断。观察能力要通过培养和训练逐渐形成和发展。物理教学中，学生应具有的观察能力是：有目的地观察。用科学的方法观察。这首先要能进行重点的观察，即对与实验目的有关事物和现象的观察；在观察过程中能抓住现象的主要特征和发生的条件。其次是能作比较的观察，即在观察中能对几个事物、现象进行对比，或对某一事物发生变化过程中的情况进行比较。这有助于发现事物的共同特征和某事物的变化规律及条件。再次是要能作归纳的观察，即通过对个别现象分别进行观察，得到一些个别的结论，再通过对所观察到的现象的归纳，得出多因素复杂现象的一般规律，例如用控制变量方法观察、研究多变化因素的问题。使用归纳观察法，有利于掌握现象的实质，以及研究比较复杂现象的一般规律。

培养学生观察能力的任务是激发学生的观察兴趣，培养细致敏锐的观察力，养成善于观察的良好习惯。这首先要充分运用演示实验和学生实验手段培养学生的观察能力，其次要有意识地引导学生观察他们周围的事物和现象，并提出各种启发性的问题，把学生的注意力集中到观察对象的特征和条件上来。

**管理信息系统 (management information system)** 输入与管理有关的数据，输出管理人员所需要的信息系统。从系统的观点出发，任何一个工厂、商店、银行都是一个系统。如果从动态观点分析这系统的运行，会发现物资流和信息流在这类系统中流动。如果仅考虑这类系统中信息流的收集、载荷、处理和传递，那么实际上就是信息系统，即企业信

息系统。在企业信息系统中，根据企业管理的层次结构和信息的特点，又可将企业信息系统向下分为管理信息系统和业务信息系统。



管理信息系统所接受的是浓缩了的、与企业长期任务的决策有关的信息，例如市场、用户、上级以及政策等等，并包括执行决策后果估计和实际执行所得结果的有关信息。

管理信息系统帮助高级管理人员进行质量分析、市场预测、库存控制、质量控制等工作，以便让高级管理人员作出重大的决策，如产品更新，重大革新项目的采用，新的市场的开辟。

管理信息系统以企业参谋人员和业务信息系统所提供的数据（一般是把这些数据存储在企业中央数据库中）作为基础，运用一些数学方法如回归分析、排队论、线性规划、优化理论等作为工具，对有关的数据进行处理，向高级管理人员提供倾向性的数据和各种图表。

**惯性 (inertia)** 物质的基本属性之一。任何物体所具有的保持其原有运动状态的性质。汽车突然开动时，站在汽车里的人会向后倾倒，是因为车已前进而车中的人仍保持相对地面静止的缘故；当汽车突然停止时，站在汽车里的人会向前倾倒，是因为车已静止但车中的人仍相对地面运动的缘故。当作用的物体上的外力为零时，惯性表现为物体相对惯性系保持其运动状态不变，即静者恒静，动者仍以不变的速度运动。当作用在物体上的外力不为零时，惯性表现为外力改变运动状态难易的程度，在一定外力的作用下，有的物体运动速度的变化率即加速度小，有的物体运动速度的变化率即加速度大，这时就说前者的惯性大，而后者的惯性小。物理学中用惯性质量的数值来量度惯性的大小。

**惯性导航 (inertia navigation)** 利用装在飞行器（或船舶）上的惯性敏感元件（如加速度计）感受飞行加速度，再通过计算机自动完成二次积分运算而得出飞行器（或船舶）所达位置的一种导航方法。惯性导航不需要任何地面设备，不发射任何信号，因而不怕干扰，可在任何高度、任何地区、各种气象条件下使用，缺点是误差随时间加大。

**惯性定律 (law of inertia)** 参见牛顿运动定律。

**惯性离心力 (inertial centrifugal force)** 在相对于惯性系有转动的参考系中质点具有的一种惯性力。也就是由于转动系统内各处都具有向心加速度，所以在转动的参考系中质点将受到一种要使它沿径向飞离出去的相似的力。例如车辆行经弯道时，乘客会感到似乎有一个力使他离开弯

道中心向外倒去。这个力的方向与转轴垂直且背离转轴，其大小为  $mr^2$ ， $m$  是质点的质量， $r$  是质点与转轴的距离， $\omega$  是这个转动参考系相对于惯性系运动的角速度。地球是一个相对于惯性系有转动的参考系，在忽略公转后，地球的转动是绕地轴的自转，所以相对于地面来说，除位于地球两极之外，都有惯性离心力作用。物体的重力就是地球对物体的万有引力和惯性离心力之和，但此惯性离心力的量值远比万有引力的量值小，常常可以忽略不计。惯性离心力有时常被称为离心力。

**惯性力 (inertial force)** 在非惯性系中所观察到的、由于物体的惯性所引起的一种相似的力。例如车辆突然向前加速时，面向前站的乘客将向后仰，站在地面上的人看来，这是乘客由于惯性而使其上身部位维持原来未被加速时的运动状态，但车上的乘客却感到好像有一个力使他向后倾，这个力就是惯性力。惯性力并不是物体间的真实相互作用，所以，惯性力没有反作用力。在平移加速运动的参考系中，物体所受惯性力的方向与加速运动参考系相对于惯性系的运动方向相反，惯性力的大小等于物体的质量与参考系加速度大小的乘积。如果在非惯性系中把物体相对运动的加速度也理解为由力的作用而产生，那么，在合力中除了真实的作用力外，还必须计入物体所受的惯性力。

**惯性质量 (inertial mass)** 参见质量。

**光 (light)** 一种电磁波。历史上曾仅仅将引起人们视觉的电磁波称为光，它的波长范围是  $0.39 \sim 0.76$  微米，现在称为可见光。波长大于  $0.76$  微米而小于微波 ( $1$  毫米) 的电磁波称为红外光。在短波段，其波长介于  $0.39 \sim 0.04$  微米的电磁波称为紫外光。X 射线波长在  $0.1 \sim 10^{-9}$  微米之间。小于  $10^{-9}$  微米的电磁波称为  $\gamma$  射线。除可见光外，红外光、紫外光、X 或  $\gamma$  射线都不能引起人的视觉，只能用仪器检测。光在一定条件下的行为像经典的“波动”，在另外一些条件下，它的行为却像经典的“粒子”。因此，光具有波粒二象性。

**光笔 (optical pencil)** 一种铅笔状的光检出器，亦称“光枪”。其作用是将光信号进行转换或放大后传入电子计算机，还常用作对电子计算机所需数据随时进行修改和补充的一种工具。一般的光笔由光导纤维、光电元件或光电倍增管、接触开关组成。它的工作过程是：将光笔对准阴极射线管的显示屏，在光笔指点处的光点被光笔感受后，将光信号转换成电信号，经放大传入电子计算机；通过程序翻译，便可使计算机迅速知道光笔指点处所显示的数据，以及如何对它进行处理。

**光波 (light wave)** 波长在千分之几微米到几毫米之间的电磁波。可分为紫外光、可见光和红外光三个波段。可见光波段的波长范围介于  $0.39$  微米到  $0.76$  微米之间。波长小于可见光的称为紫外光，大于可见光的称为红外光。波长的单位即长度单位。我国法定计量单位中长度的单位为米。因此，波长的单位是米或它的分数单位，如毫

米，微米。以前常用埃作为波长单位，记为  $\text{\AA}$ ， $1\text{米} = 10^{10} \text{\AA}$ 。这是因纪念瑞典光谱学家埃斯特朗而得名的。

光波的源是原子或分子等微观客体。它们发射的光波由波列组成，每段波列为长度有限、振幅为常数或稍有变化的近似正弦的电磁波，各段波列之间无确定的相位关系。如果发射源受到其它原子或分子的作用越强，

或者说发光过程受到的干扰越大，所发射的光的波列就越短。即使是稀薄气体发光，原子或分子间的相互作用可以忽略，其发射光波列的持续时间也将小于或等于  $10^{-8}$  秒。因此，波列的长度也只有几米。

通常采用正弦或余弦函数描写光波。但正弦波或余弦波都是时间上无限、空间上也无限的理想波动，实际中并不存在。利用数学中的傅里叶变换方法，可以求出光波的强度按波长的分布。对正弦或余弦函数作傅里叶变换，它的强度在中心波长处为极大，在大于或小于中心波长处，强度为 0。这表明，正弦或余弦函数所描写的是理想的单色光波。对实际发射有限长度的光波波列作傅里叶变换，它的强度也是在中心波长处为极大，但大于或小于中心波长的成份并不为零，且随着离开中心波长的距离而逐渐衰减。这表明，实际光波是具有一定谱线宽度的非单色光。不过，当光波波列的持续时间比发光体受扰动的周期长得多时，除了考虑相干性等问题外，还是可以用正弦或余弦波来很好描述的。

**光测弹性 (photoelasticity)** 研究物质在应力下对光作用的影响。有些非晶体材料如塑料、玻璃、环氧树脂等，通常是各向同性媒质，不产生双折射现象。但受到应力后，会呈现各向异性而显示出双折射现象。这称为光弹性效应。这种效应可应用于无损研究各种机械结构和建筑物模型中的应力情况。一般把它们放在一对互相正交的起偏器和检偏器之间，并在与水平轴垂直的方向上施加压力或拉力，使待测物成为具有双折射性质的各向异性媒质。这种有内应力的透明物中  $n_o - n_e \neq 0$ ，且与应力分布有关。不同地点因  $(n_o - n_e)$  不同而引起寻常光和非常光间不同的相位差。从观察屏上可观察到反映应力分布的干涉图样。应力集中的地方，各向异性强，干涉条纹细密。根据该原理可检查待测物的应力情况。

在矿井的坑道壁上，嵌入一块玻璃镜，前面放一块偏振片，它对入射光是起偏器，对反射光是检偏器。如从观察的干涉条纹中发现玻璃镜中有应力增大的迹象，即为冒顶事故的前奏。用同样的办法可以预报地震。

**光程 (optical path)** 折射率和光所经过的路程的乘积。光在真空中传播时，折射率  $n=1$ ，光的几何路程即为光程。光在折射率为  $n$  的媒质中经过路程  $r$  时，光程为  $nr$ 。因为折射率为真空中光速与媒质中光速之比，故有

$$nr = \frac{c}{v} r = ct,$$

即光程等于相同时间内光的真空中通过的路程。利用光程概念，可把光在媒质中经过的路程折算为光在相同时间内在真空中的路程，便于光学问题的计算。

两条不同光路的光程之差，称为光程差。光程差恰好等于光的波长的两点处，光波的相位差为  $2\pi$ 。故光程差与相位差  $\varphi$  之间存在如下关系：

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s。$$

**光的独立传播定律 (law of independent propagation of light)** 几何光学的基本定律之一。说明不同光线在媒质中传播时互相不受影响，各自保持其原有的频率和方向。例如两束相对行进的光束在媒质中相遇后，将不受影响地继续沿各自的方向传播；用一个小孔光阑从光束中取出

一小部分光线时，不管取出的这部分光束是多么细小，它仍将沿原来的方向传播。在力学中，有力的独立作用原理；在电磁学中，有叠加原理，这些都与光的独立传播定律的含义相类似。本世纪 60 年代激光出现以后，由于它的高强度，在媒质中传播时由于与媒质的作用而出现非线性效应，这时便不再遵循光的独立传播定律。但这并不表示不能用激光器做几何光学实验，因为非线性光学的实现还必须满足不少特定的条件。

**光的反射定律 (law of reflection of light)** 确定反射光线方向的几何光学基本定律。当光线行进到两种不同媒质的界面上并发生反射时：入射线和反射线位于同一平面内，此平面由两条线决定，一条是入射线，另一条是通过入射点且与反射面垂直的法线。称入射线和法线之间的夹角为入射角；反射线和法线之间的夹角为反射角，则入射角和反射角位于法线的两侧。反射角等于入射角。

本定律是从实验得出的。历史上不同的理论都能对本定律作出解释。牛顿把光看成是一群微粒，光的反射就等于微粒在反射面上的弹性碰撞。牛顿用这一模型能够解释光的反射定律。惠更斯用光的波动说也能解释这个定律。19 世纪中叶建立的光的电磁理论对该定律作出了严格的证明。

**光的干涉 (interference of light)** 符合相干条件的两束光在空间叠加后，其总强度按空间周期性变化的现象。设从空间两定点  $S_1$  和  $S_2$  发出有相同初相位的光振动，它们分别是  $y_1=A_1\sin t$  和  $y_2=A_2\sin t$ 。同时到达 P 点时，P 点的光振动为

$$y = y_1 + y_2 = A_1 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x_1\right) + A_2 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x_2\right),$$

式中  $x_1$  和  $x_2$  分别为 P 点离开  $S_1$  和  $S_2$  的距离。因为光波经过一个波长的光程，相位改变  $2\pi$ ，故光程差和相位差之比为  $\lambda/2\pi$ 。上述两光波到达 P 点时的光振动，与原来出发时的光振动的相位差分别为  $\frac{2\pi}{\lambda} x_1$  和  $\frac{2\pi}{\lambda} x_2$ 。这里假定光在折射  $n = 1$  的媒质里传播。P 点的光强度为其振幅的平方，故有

$$I_p = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta,$$

其中， $I_1 = A_1^2$ ， $I_2 = A_2^2$ ，分别为两光波单独在 P 点时产生的光强度，它们与在出发点  $S_1$  和  $S_2$  时相同，因为这里并不考虑光在传播过程中的衰减。 $\delta$  为两光波到达 P 时的相位差，根据相位差和光程差的关系， $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n(x_2 - x_1)$ 。 $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$  称为干涉项。当  $\cos \delta$  取正值时，P 点光强大于  $(I_1 + I_2)$ ，称为相长干涉。取负值时，P 点光强小于  $(I_1 + I_2)$ ，称相消干涉。当相位差  $\delta$  为  $2\pi$  的偶数倍时，即  $\delta = 2k\pi$  ( $k=0, 1, 2, 3, \dots$ )，则光强度有最大值

$$I_p = I_{\max} = (A_1 + A_2)^2.$$

当  $\delta$  为  $2\pi$  的奇数倍时，即  $\delta = (2k+1)\pi$  ( $k=0, 1, 2, 3, \dots$ )，则光强度有最小值

$$I_p = I_{\min} = (A_1 - A_2)^2.$$

当 介于两者之间时，P 点光强在最大值和最小值之间。若两相干光强度相等， $I_1 = I_2$ ，则P点的光强度为 $I_p = 4I_1 \cos^2 \frac{\delta}{2}$ 。此时最大值为单独一束光波强度的 4 倍，而最小值为零。

如果考察的不只是一个 P 点，则两光束到达观察

屏上不同考察点时经过各不相同的路程，因而有不同的光程差或相位差。每一个考察点都将按上述规律成为最亮、最暗或中间过渡状态，于是形成干涉图样。为了观察干涉图样，要求从  $S_1$  和  $S_2$  发出的两光波始终保持相同的初相位。否则，干涉项应为 $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\quad + \quad)$ 。而无规则杂乱变化的初相位差 将使整个干涉图样在空间移动不定，从而不能察觉它，看到的只是平均强度。如将同一点光源的光分割成两束，使它们分别通过不同的光路后交叠在一起，便可得到两束光波之间的稳定的相位差，从而出现干涉图样。根据将同一光波列分割成两束的方式，光的干涉分为两类：分波阵面法和分振幅法。前者将点光源发出的波阵面分割成两部分，使它们通过不同的光路，经反射、折射后交叠在一起，产生干涉图样。杨氏实验、洛埃镜和菲涅耳双棱镜属此类。后者用半透明膜把同一点处的光振幅分割成两部分。薄膜干涉、牛顿环和迈克耳孙干涉仪属此类。

在有多于两束光波叠加时，情况类同。设有  $n$  个同频率光波列，振幅都为  $A$ ，振动方向沿同一直线。如果它们两两之间的相位差杂乱改变，则合振动强度简单地为  $I=nA^2$ 。如果各个相位差稳定，空间各点的合振动强度介于  $n^2A^2$  和 0 之间，产生干涉图样。

**光的量子性 (quantization of light)** 光的电磁理论揭示了光的电磁波本质，可以解释光的干涉、衍射和偏振等重要的光的波动现象。但在深入研究光与物质相互作用过程中，发现一些用光的电磁理论无法解释的现象。如在黑体辐射、光电效应和康普顿效应中，光显示出粒子性。1900 年普朗克提出辐射的量子论，认为辐射只能以一定的能量子进行发射，能量子的大小是电磁波的频率与普朗克常数乘积的整数倍，因而能量子只能是量子的而不是连续的。1905 年爱因斯坦把量子论发展到整个辐射和吸收过程中，并提出光量子理论，成功地解释了光电效应，并为包括康普顿效应在内的许多实验所证实。

**光的散射 (scattering of light)** 光通过光学性质不均匀的媒质时偏离原方向而向四面八方散开的现象。若入射光强为  $I_0$ ，通过厚度为  $x$  的媒质后光强减弱到  $I$ ，则下列指数规律成立：

$$I = I_0 e^{-(k_a + k_s)x}$$

式中  $k_a$  是吸收系数， $k_s$  是散射系数。二者之和称消光系数。

光通过光学均匀媒质时，媒质中的原子在光波作用下发生振动，并发出与入射光频率相同的次波，各振子之间有一定的相位关系，因而这些次波具有相干性。次波在非折射光线方向上的叠加互相抵消，因此只有折射光，没有散射光。光学不均匀媒质含有大量颗粒，例如尘埃、烟、雾（空气中），或乳状液、悬浮液（液体中的另一种液滴或固体），以及毛玻璃等。这些杂质的线度比波长小或与波长有相同数量级，但它们之间的距离比波长大且无规则排列。因此它们在光作用下发出的次波没有固定相位关系，不可能在除了某一方向的任何方向上形成相消叠加，从而出现散射光。

由媒质中无规排列的颗粒引起的散射，称为廷德耳散射。

光经过均匀媒质时，如果分子的热运动破坏了分子间的固定位置关系，使分子发出的各次波丧失固定相位关系，也能产生散射光。这种现象称为分子散射。1871年瑞利从理论上讨论了分子散射，他发现散射光频率与入射光的相同，散射光强度与散射方向有关，且与波长的四次方成反比。天空高层大气密度的不均匀，引起短波长的光散射较强，傍晚时太阳光穿过的大气层比较厚，被散射掉的短波蓝光成份也就较多，故落日呈红色；而在白天，大气中气体分子散射太阳光，故天空呈蓝色。因为蓝光散射多，故红光通过薄雾时比蓝光的穿透力强，而红外线比红光更强，因此遥感技术宜用红外波段。

大气中的水滴形成天空中的白云，因水滴的半径与可见光的波长相比已不算太小，不再遵从瑞利散射定律。米氏散射理论证明，当颗粒的半径  $a$  与波长  $\lambda$  的关系满足  $\frac{2\pi a}{\lambda} > 0.3$  时，散射强度与波长的依赖关系不再十分明显，因此天空中的云雾呈白色。

**光的色散 (dispersion of light)** 媒质的折射率随波长而变的关系。白光通过棱镜后分解为彩色光谱就是一种色散现象。色散的原因是不同频率的光在同一媒质中的传播速度不同。我国北宋年间的杨亿早在 11 世纪就有关于天然晶体的色散现象的记载。媒质色散的程度用折射率  $n$  随波长  $\lambda$  变化的快慢来表示。色散本领就是用来描述这种性质的物理量，它定义为

$$D = \frac{dn}{d\lambda}。$$

色散本领表示某一指定波长区域中的色散。媒质对波长为 0.4861 微米的氢 F 线与对波长为 0.6563 微米的氢 C 线的折射率之差  $n_F - n_C$ ，称为平均色散。如果媒质对波长为 0.5893 微米的钠 D 线的折射率为  $n_D$ ，那末把  $(n_F - n_C) / (n_D - 1)$  称为色散系数。它的倒数  $(n_D - 1) / (n_F - n_C)$  则称为倒色散系数，又称为阿贝数或  $v$  值。函数关系  $n = f(\lambda)$  称为色散方程，而把  $n \sim \lambda$  的曲线称作色散曲线。在折射或衍射中，若两条相隔很近空间线距离为  $d$  的谱线，其波长间隔为  $\Delta\lambda$ ，则它们的比值  $\frac{dI}{d\lambda}$  称为线色散，

类似地还有角色散  $\frac{d\theta}{d\lambda}$ 。色散不仅指光分解成光谱的现象，广义上说，任何物理量随波长而变的现象都可称为色散。

**正常色散** 大多数透明物质的折射率和色散本领随波长变短而增加，这种色散称为正常色散。科希于 1836 年建立了描述正常色散的经验公式：

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots，$$

式中  $\lambda$  为真空中波长， $a$ 、 $b$ 、 $c$ ... 都是物质常数，由实验确定。在一般情况下，取前两项就足够了。于是有色散本领近似地与波长三次方成反比的关系：

$$\frac{dn}{d\lambda} = -\frac{2b}{\lambda^3}。$$

**反常色散** 在吸收带附近正常色散被破坏的现象。在吸收带长波一方折射率高；短波一方折射率低。在吸收带附近折射率随波长的变化很迅速。

**光的吸收** (absorption of light) 光在媒质中被减弱并使其能量转变为其它形式能量的现象。最主要的是转变为热；也可以转变为化学能，这时称为光化吸收；也可以转变为电能，这时称为光电吸收。如果吸收很少且在给定波段内对各波长光的吸收相同，称为一般吸收，或中性吸收。这样的媒质对该波段光为透明媒质。如果对某一波段范围的光具有强烈吸收，称为选择吸收。

**朗伯定律** 光通过均匀媒质后其强度减弱的程度与入射光强和媒质厚度的乘积成正比。朗伯定律的数学表示为  $I = I_0 e^{-kx}$ ，其中  $I_0$  和  $I$  分别为入射和透射光强， $x$  为媒质厚度， $k$  为吸收系数。对于一般吸收， $k$  值很小且近似为常数。对于选择吸收， $k$  值很大且随波长而变。 $k$  的单位为  $\text{米}^{-1}$ 。

**比尔定律** 光通过溶液后强度减弱的程度，与入射光强、溶液浓度和厚度的乘积成正比。比尔定律的数学表示为： $I = I_0 e^{-k_c C x}$ 。其中  $C$  为浓度， $k_c$  称为分子吸收常数或比吸收常数。

对于溶液， $k = k_c C_0$  有时在纯物质中也用比吸收常数。这时  $k = k_c \rho$ ，其中  $\rho$  为媒质的密度，这里的比吸收常数  $k_c$  也称为质量吸收常数。

比尔定律只在溶液浓度较小时成立。浓度很大时，分子对光的吸收本领受四周邻近分子的影响很大，分子间的相互影响不能忽略，比尔定律不再成立，但是朗伯定律始终成立。

**光的相干条件** (coherent condition of light) 产生干涉现象的两束光所必须满足的条件。它们是：频率相同、偏振方向一致且相位差保持恒定。两光波在相遇点的振幅差别不大。两光波在相遇点的光程差不大于光波的相干长度。

任何波动发生干涉的必要条件是其频率相同，光的干涉当然也不例外。偏振方向如果相互垂直，则两列波叠加后仅仅出现其强度相加，不存在干涉效应。只有偏振方向一致的两列波叠加时才会出现干涉项。如果偏振方向既不垂直，又不平行，而是相交成某一角度，则仅仅在它们的平行分量之间才发生干涉。至于相位差恒定，这是光波干涉的特有问题。因为光波是由原子或分子等微观客体发射的，它们的持续时间通常约为  $10^{-8}$  秒。所以 1 秒钟内同一发光客体可能会发出  $10^8$  个波列，其中每一个波列都有自己特定的初相位。这表明，1 秒钟内由于波列初相位无规跃变  $10^8$  次，干涉图样也会闪变  $10^8$  次。干涉图样无非是一些亮暗条纹，如果亮暗交变如此频繁，人们根本无法看到干涉图样，接收器也无法记录这种干涉效应。

光波的干涉过程实质上是一种能量的重新分配过程，亮条纹处光能分配多些，暗条纹处光能分配少些。若两光波在相遇点的振幅大小相差悬殊，则该点合振动的振幅与原来一列光波的很大振幅相差极小，也就观察不到明显的干涉条纹。

第三个相干性条件也是专门针对光波的。实际光波不是无限长的正弦波，而是有限长的波列。如果光程差很大，一个波列已经通过，从另一条光路上传来的波列尚未到达，这样它们根本不曾相遇，当然就不会出现干涉现象。波列的长度就是相干长度。只有光程差不大于波列的长度，它们



才可能相遇。

**光的衍射 (diffraction of light)** 光绕过障碍物偏离直线传播并使几何阴影区和几何照明区的光强发生重新分布的现象。衍射现象是否出现,主要决定于障碍物线度与光的波长的对比。只有当障碍物的线度与波长可以比拟,或者障碍物的线度虽比波长大得多,但光源距离障碍物足够远时,才会出现明显的衍射现象。声波的波长为几十米,无线电波波长为几百米,它们所遇到的障碍物线度通常小得多,因而它们可以绕过障碍物传播,表现出明显的衍射现象。微波波长只有微米或厘米量级,可见光波波长更短,为 0.4~0.7 微米,这些波长通常远小于地面上障碍物线度,因而表现出直线传播。只有遇到厘米或微米量级的小孔或狭缝这样的障碍物时,微波或可见光才会呈现出明显的衍射现象。

衍射现象可分为菲涅耳衍射和夫琅和费衍射两类。光源和考察点至障碍物的距离中有一个或两者为有限时的衍射称为菲涅耳衍射;两者距离均为无限远或(通过透镜系统)相当于无限远时的衍射,称为夫琅和费衍射。

**光的折射定律 (law of refraction of light)** 确定折射现象中折射光线方向的定律。是几何光学的基本定律之一。光线从第一种媒质入射到第二种媒质时,通常在两种媒质的界面上发生折射。光的折射定律是:

折射光线在入射光线和过入射点的法线所决定的平面内; 折射线和入射线位于法线两侧; 入射线和折射线与法线的夹角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别称为入射角和折射角; 第一媒质和第二媒质的绝对折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ , 则有  $n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$ 。这公式又称为斯涅耳折射定律。由于第二媒质对第一媒质的相对折射率为  $n_{21} = n_2/n_1$ , 故斯涅耳折射定律又可表示为  $\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = n_{21}$ , 即对于给定的两种媒质来说,入射角的正弦和折射角的正弦之比为常数,且取决于这两种媒质的相对折射率,而与入射角的大小无关。人们在游泳时戴上防护目镜看东西比较清楚。这是因为眼睛和水的绝对折射率近似相等,光线几乎不发生折射。当戴上防护目镜后,眼睛前有一层空气,这样有利于光线的折射,从而在视网膜上形成清晰的物像。

历史上早期的光的微粒说对折射定律也能作出解释。微粒说假设媒质界面存在一种力,使光微粒弹性小球通过界面时法向速度发生改变,而切向速度不变。如果第一、第二媒质中光的速度分别为  $v_1$  和  $v_2$ ,速度的方向为光线的传播方向,则可得  $v_1 \sin \alpha_1 = v_2 \sin \alpha_2$ 。就是说,入射角正弦和折射角正弦之比值为一个与入射角大小无关的常数。这样便解释了折射定律。但是将此结果与上述斯涅耳折射定律表示式比较后可以看出,微粒说必然导致光微粒弹性小球在绝对折射率大的光密媒质中的速度大,在绝对折射率小的光疏媒质中的速度小。这一结论为后来的实验所否定。惠更斯用波面传播的次波理论正确地解释了光的折射定律并且推断出光密媒质中光的速度小的正确结论。

**光的直线传播定律 (law of rectilinear propagation of light)** 几何光学的基本定律之一,表明光在均匀媒质里沿直线传播。日蚀和月蚀现象,物体的本影和半影以及针孔成像等,都是光的直线传播定律的明证。此定律只有在障碍物的几何线度远大于光的波长,光的波动性不太明显时才成立。当障碍物的几何线度与波长可比拟时,光的衍射使它的传播明显地偏离直线,光的直线传播定律这时不再适用。在非均匀媒质中,光将因

折射而弯曲。普通光学仪器以及天文和大地测量中，通常都以光的直线传播定律为基础。

**光电倍增管 (photomultiplier)** 利用光电效应原理制成的对光电流具有放大作用的真空光敏电子器件。它有一个抽空的泡壳，内设光电阴极、若干个倍增极和阳极等部分。这些电极的电势逐级升高，能将前一电极发出的电子吸过来。当光照射光阴极时，从光阴极发射光电子。在电场加速下光电子束射向第一个倍增电极，引起次级电子发射。每个光电子能从这个倍增电极上打出 3~6 个次级电子，被打出的次级电子再经电场加速后打在第二个倍增电极上，光电子数又增加 3~6 倍。这样，每一个倍增电极都产生放大作用，直到最后一个倍增电极，如图所示。倍增电极

光电倍增管示意图

数通常为 13~14 级。阳极最后收集到的光电子数将达到阴极发射的光电子数的  $10^5 \sim 10^7$  倍。因此光电倍增管的灵敏度要比光电管高几万倍到几百万倍，只要有极微弱的光照射，就能产生很大的光电流。

光电倍增管常用于探测紫外、可见和近红外（小于 1 微米）波段的微弱光及高频调制光和光脉冲信号，广泛应用于自动控制，录音、电视摄像等设备中，也用于夜视仪。在天文学上用于测量微弱星光的强度，在核物理学中用于探测微弱的闪光。

**光电管 (Phototube)** 利用光电效应原理制成的光电转换器件。

**光电发射管** 应用外光电效应制成的光电管。主要部分是一个阳极和一个阴极。阴极在光照射下发射电子，阳极吸收电子并通过导线引到管外。多于一个阳极的光电发射管又称光电倍增管。中间阳极称倍增靶极。如果每个电子经过一次靶极可以释放五个新电子，如有十级靶极，则电子数可增  $10^6$  倍。玻璃管内是真空的，称为真空光电管；如充有气体，则称为充气光电管。有时也可按其外形、材料、波段或光敏部分材料来称呼光电管，如环形光电管、石英光电管、红外光电管以及铯或镉光电管等。

**光电导管** 应用内光电效应制成的光敏电阻。有些半导体受光照后，其导电性能将会改变，一般情况是导电性提高，电阻降低。若半导体是纯物质，制成的光电导体称内禀或本征光电导体。半导体含杂质时，称外赋或非本征光电导体。半导体光电导管的时间常数约为几微秒至几毫秒，灵敏度极高，通常比光电发射管高百倍以上。最常用的在可见光区的光电导材料是硫化镉，其感光极大在 0.5 微米。在红外区是锗，其感光极大在 1.6 微米。含锌或铟杂质的锗在低温下可应用于几十至一百微米的远红外区。

**太阳能电池** 根据内光电效应制成的将太阳能转化为电能的装置。把表面敷有氧化铜的铜片放在铜网下，当阳光照射在氧化铜表面时，光电子只能流向铜片内，这是因为氧化铜与铜网之间存在一极薄的阻挡层。由此造成的电动势可在外电路中形成电流。这种效应称为光生伏打效应。利用这种效应制成的电池称光生伏打电池，也称整流光电池或阻挡层光电池。具有上百年历史的光生伏打效应在半导体技术发展后的今天，才有可能被用来制造太阳能电池。通常在半导体材料上设置一个掺染料的塑料窗口，使太阳光中的短波转变为适合光电效应的 0.7 微米较长的波，可望提高效率。较新的产品有硒光电池和硅光电池。

**光电计时器 (Photoelectric timer)** 是物理实验中用光电控制的最精确计时仪器。用光电信号控制计时的开始和结束，可大大减小因操作

的延迟而带来的误差。用光电控制时，延迟带来的误差大约为 10 微秒，甚至更小。由于光电计时器中采用了晶体振荡器和脉冲数字电路，所以准确度也大为提高，时间的相对误差不大于  $10^{-7}$ 。并且数字电路很容易实现得到  $1\mu\text{s}$ 、 $10\mu\text{s}$ 、 $100\mu\text{s}$ 、 $1\text{ms}$ 、 $10\text{ms}$ 、 $100\text{ms}$  以及其它 10 分频的计时脉冲。因此光电计时器操作简单、精确度高，是物理实验中最重要计时仪器。

光电计时器的种类较多，计时的精确度各不相同，可根据需要选择购买，其基本指标如下：

计时脉冲的周期应选择在  $1\mu\text{s} \sim 1\text{s}$ 。

计时精确度不大于  $10^{-6}$ ，即  $\frac{\tau}{T} < 10^{-6}$ ，式中  $T$  为计时值， $\tau$  为计时值的误差。

“计”时和“停”止的输入脉冲幅度不高于 5 伏，通常为 0.5 伏，上升沿不低于  $10\mu\text{s}$ 。

显示数字位数通常为六位。

计时方式选择应该种类越多越好。

显示时间可连续调节，也可置“ ”以及手动复位。

**光电效应 (photoelectric effect)** 金属表面受光束照射后有电子逸出现象。所逸出的电子称为光电子。光电子形成的电流称为光电流。从实验中总结出来的光电效应的基本规律有下列四条：单位时间内被照射光击出的光电子数与入射光强成正比。光电子的最大初动能与入射光强无关，只与入射光频率有关。频率越高，光电子的能量越大。入射光有一个极限频率值，频率低于极限值的入射光，不论光的强度多大，照射的时间多长，都不能击出光电子。只要入射光的频率大于极限频率值，即使光强很弱，击出光电子的延迟时间也不会超过  $10^{-9}$  秒。

对这些规律，经典理论不能解释。爱因斯坦提出光子概念后才圆满解释了光电效应。根据爱因斯坦的假设，光是光子的集合。当光子与金属中的电子碰撞后，其能量 ( $h\nu$ ) 为电子所吸收，其中一部分能量 ( $A$ ) 用于挣脱金属对它的束缚，这部分能量称为电子的脱出功；余下的部分能量变成离开金属表面后电子的初动能  $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$ ，故有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A,$$

此式称为爱因斯坦光电效应方程。有些物体受光照时，内部原子释放电子。这些电子并不从表面逸出，而只逗留在内部，使物体导电性增加。这称为内光电效应。与此相对应地，把有电子逸出的称为外光电效应。

**光度计 (photometer)** 测量发光强度并通过它测定光通量、亮度、照度等物理量的仪器。有目视比较法和物理比较法两种。前者称主观测量；后者称客观测量测定光通量的光度计称流明计；测定照度的光度计称照度计，又称勒克司计。将一个发光强度已知的光源作为参考源，把待测光和参考光分别照在光屏上左右两半个视场上。用眼睛目视比较左右两边的照度。当照度相等时，两个光源的发光强度之比等于它们与光屏的距离之比。于是可获得待测光源的发光强度。物理比较法是用光电管、光电池、热电探测器和照相片等物理器件代替眼睛进行比较，可避免主观测量中由于观测者不同而造成的误差，得到更准确的结果。光度计中提供比较两个光源

的照度的光屏，称为光度头。两半个视场称为光度场。我国古代科学家赵友钦在 14 世纪研究针孔成像现象时，就注意到光的强弱的规律。他认为针孔成像中的像的暗黑程度，与孔的大小和屏至孔的距离有关。四百多年后法国物理学家布格提出光度场的最初形式，两部分有些间隔，后来，德国物理学家朗伯作了改进，使两部分紧紧相挨。陆末—布洛洪光度计的光度头中，光度场的两部分互相包围，测量灵敏度最高。也有不用比较法而直接进行测量的仪器，如用光电池制成的流明计和照度计，曝光表就是这种仪器。

**光度学 (photometry)** 研究可见光强弱的学科。它所研究的量有些既与客观的物理量，如能量有关，又与人眼的主观视觉因素有关。这些量的单位组成独立的系统，与一般物理量的计量单位不同。光度学认为光能量通过光线传播，且遵守能量守恒定律。研究各种电磁辐射强弱的学科称为辐射量度学，因此光度学只是辐射量度学的一个部分。

#### 与辐射有关的物理量

**辐射通量** 又称辐射功率，单位为瓦。若  $( )d$  是波长在  $\lambda$  到  $\lambda+d$  范围内的辐射通量，则所有波长的总辐射通量即为

$$= \int_0^{\infty} ( ) d \lambda$$

其中  $( )$  为辐射能的频谱分布，称为辐射通量谱密度。

**辐射度和辐射出射度** 投射到单位面积上的辐射通量为辐照度，单位面积上投射出去的辐射通量为辐射出射度。它们的单位都是瓦/米<sup>2</sup>。

**辐射强度** 在某一特定方向上单位立体角内发出的辐射通量，单位为瓦/球面度。在均匀辐射情况下，所有方向上的辐射强度都相同，所以向各方向发出的总辐射通量为辐射强度的 4 倍。

**辐射率** 又称辐射亮度，单位为瓦/球面度·米<sup>2</sup>。若辐射面元的法线为  $n$ ，与法线成  $\theta$  角的  $r$  方向上的辐射率是辐射面元在垂直于  $r$  的平面上单位投影面积的辐射强度。

#### 视见函数

**视见函数曲线** 在较明亮的环境中，人眼对波长为 0.5550 微米黄绿光最敏感，规定其视见函数值为 1；对其它波长的光，视见函数值小于 1；对红外和紫外光，视见函数值为 0。知道了眼睛对各种不同波长的光的视觉灵敏度，才能够研究客观的辐射通量与它们在人眼中所引起的主观感觉强度之间的关系。视见函数曲线即为视见函数值对可见光波长的分布曲线，这可通过对正常人眼视觉灵敏度测量而得到。在较昏暗的条件下，视见函数曲线的最大值所对应的波长为 0.5070 微米，比明亮环境中的最敏感波长短约 0.05 微米，且整个视见函数曲线向短波方向有一位移。它们分别称为适光性和适暗性视见函数曲线。

**视见函数** 以波长为 0.5550 微米的黄绿光为参考标准，若对此波长和对任一其它波长为  $\lambda$  的光产生同样亮暗感觉所需的辐射通量分别记为  $\Phi_{0.555}$  和  $\Phi_{\lambda}$ ，则视见函数定义为  $V(\lambda) = \Phi_{0.555} / \Phi_{\lambda}$ 。现已从实验测得国际上公认的视见函数值和曲线。例如透光性  $V(0.4) = 0.0004$ ， $V(0.76) = 0.00006$ 。这表明，要引起 1 毫瓦 0.555 微米黄绿光相同亮暗感觉的 0.4 微米紫光，需要 2.5 瓦；而对 0.76 微米的红光，则需要 20 瓦。

**光功当量** 如果波长在  $\lambda$  到  $\lambda+d$  范围内的辐射通量，产生相应的光

通量，则后者对前者之比称为光谱光效能，也称为光功当量，单位为流明/瓦特。光功当量随波长而变。因为对波长为 0.5550 微米黄绿光的视见函数值为 1，故该波长的光功当量具有最大值，用符号  $K_m$  表示。适光性最大光功当量  $K_m=683$  流/瓦。

### 光度学基本概念

**光通量光源** 表面的客观辐射通量对人眼所引起的视觉强弱称为光通量。当光源的辐射通量相同但波长不同时，由于视见函数值不同，因而光通量不同。光通量用某一波段的辐射通量和该波段的视见函数值的乘积来量度，单位为流明。

**发光强度** 光源在某一方向单位立体角内发出的光通量称为发光强度，单位为坎德拉。大多数光源的发光强度随方向而异，但总光通量对于确定的光源来说是一定的，它表征了该光源的发光特征。光学系统的作用是把光通量作重新分配，但并不能增加总光通量。例如增加某些选定方向上的发光强度，同时相应地减少其它方向上的发光强度。发光强度常用  $I$  表示。

**亮度** 光源发光面面元在法线方向单位立体角发出的光通量，常用  $B$  表示，单位为流明/（米<sup>2</sup>·球面度）。它表征了发光面发光强弱的特性。因此，亮度通常应用于扩展光源，而发光强度则应用于点光源。它们不仅适用于自身发光的物体，还可描述反射体。

亮度不随发射光方向而改变的光源称为遵从朗伯定律的光源，简称朗伯发光体或余弦发射体。太阳看起来像一个亮度均匀的发光盘，它接近于余弦发射体。理想的漫反射面是朗伯反射体。

**面发光度** 光源单位面积向各个方向（即在立体角  $2\pi$  范围内）发出的光通量称为面发光度。它也适用于反射体。

**照度** 落在受照物体单位面积上的光通量称为密度。单位为勒克斯。点光源所造成的照度与光源到受照面距离的平方成反比（平方反比律），且与光束和受照面法线方向之间夹角的余弦成正比。照度常用  $E$  表示。

### 光度学单位

**基本单位** 在光度学的一系列光度单位中，发光强度的单位常作为基本单位。早年规定发光强度的单位为烛光，它所采用的基准是标准蜡烛、标准火焰灯或标准电灯。1948 年第 9 届国际计量大会规定用绝对黑体作为发光强度单位标准，定名为坎德拉。该单位也是国际单位制（SI）的七个基本单位之一。在以后的历届国际计量大会上，都不断对坎德拉的定义作了修改。1979 年第 16 届国际计量大会规定的新定义为：“发出频率为  $540 \times 10^{12}$  赫的单色辐射源，若在给定方向上的辐射强度为 1/683 瓦/球面度，则该光源在该方向上的发光强度为 1 坎德拉。”

**导出单位** 发光强度为 1 坎德拉的点光源，在某方向上单位立体角内发出的光通量定义为 1 流明。1 流明的光通量均匀分布在 1 平方米面积上所产生的照度为 1 勒克斯。1 平方米发光面沿着它的法线方向的发光强度为 1 坎德拉时，该面积的亮度为 1 尼特。以上是国际单位制。它们与实用单位制的关系为：

1 勒克斯=10<sup>-4</sup> 辐透，

1 尼特=10<sup>-4</sup> 熙提。

**光幻视** (optical illusion) 由于主观的生理或心理原因，对所观

察的景物得到不正确的认识。例如图 1 中，看上去似乎白框中的黑块比黑框中的白块要小些，但实际上却是稍大些。在图 2 中，一组辐射线形

图 1 左边的白块比右边的黑块小

成强视觉结构，一对平行直线形成弱视觉结构；强结构使弱结构产生变异，两条实际上平行的直线看上去似乎外凸或内凹。有人认为这是一种光渗效应，如图 1 所示，因为亮点在视网膜上成小圆斑像，而不是一点，所以白方块的像会侵入到黑框区域，而白框的像

图 2 两条平行直线

也会侵入到黑块区域。许多光幻视现象至今尚不能得到圆满解释。

**光极 (optical polar)** 一种新型的传感器，产生于 80 年代。其作用是接受并传递光子，这和电极接受并传递电子有类似之处。常用来把化学反应所产生的光、激光透过有色溶液所射出的光耦合到光导纤维中去。优点为：抗电磁场干扰能力强，应用面广，构造简单，价格低廉。一般的光极由发光二极管或半导体极光器、试剂相、入射光纤、出射光纤与检光器组成。它的工作过程是：光源经入射光纤发出的光，受试剂相的调制后进入出射光纤，达检光器被检出。为此光极特别适应于在恶劣环境下作监测用，此时把光极放在待测定的环境中，而把检光器置于安全的地方进行分析，其中试剂相由被测定的化学成分与其相应的化学试剂组成。

**光具组 (optical system)** 按某种方式排列使光线折射或反射的一系列光学元件的组合。又称光学系统。光学元件采用各种光学材料制成的各种形式的反射镜（平面镜、凹面镜、抛镜面镜等）、透镜（凸透镜、凹透镜等）、棱镜（正棱镜、直角棱镜、尼科耳棱镜等）、吸收片（如玻璃色片、干涉滤光片、偏振片等）及光阑等。从物和像离光学系统的远近，可分为四种类型：物和像均在远处的望远系统；物在近处，放大像亦在近处的显微放大系统；物在远处而像在近处的摄影系统；物在近处而像在远处的放映系统。

**光阑 (diaphragm)** 光学系统中一些开有圆孔的不透明屏。圆孔中心在光轴上，孔面垂直于光轴，其作用是对进入光学系统的光束进行限制。透镜或反射镜的边框也可看作光阑。有些光阑具有特殊的形状。照相机中的光阑并非严格圆形的，且大小可变，称为可变光阑，又称为光圈。光圈上附有刻度，表示光阑口径的大小，常称为光圈数。

**孔径光阑** 一个光学系统中有不止一个光阑，其中实际上起限制光束作用的那个光阑，称为有效光阑，又称孔径光阑。有效光阑随物点的位置而变化，因此有效光阑总是对某一参考点而言的，这个参考点为物平面与主轴的交点。把光学系统中每个光阑，包括透镜边框在内，当作物，令光线由右向左传播，求出每个光阑的像，即求出每个光阑由其前面那一部分光学系统所成的像。从参考点看第一个透镜边缘和上述各个像所张的各个顶角，其中最小的顶角所对应的光阑即为有效光阑。被有效光阑所限的边缘光线与物方光轴的夹角，称为入射孔径角，简称孔径角；与像方光轴的夹角，称为出射孔径角，简称投射角。有效光阑被自己前面部分的光学系统所成的像叫做入射光瞳；被自己后面部分的光学系统所成的像叫做出射光瞳。

**视场光阑** 孔径光阑对光轴上物点所发出的光束加以限制。对轴外物

点所发光束起限制作用的光阑叫做视场光阑。每一个给定的光学系统都只能对物空间中一定范围的物体成像，该范围即为视场。视场光阑对视场起限制作用。与孔径光阑的情况相类似，视场光阑由其前方和后方部分光学系统所成的像分别称为入射窗和出射窗。

入射线如果通过入射光瞳中心点，其出射线必然通过出射光瞳中心点。轴外物点与其像点之间的共轭光束中通过上述两个中心点的光线，称为此光束的主光线。有些轴外物点离光轴稍远，其主光线被遮挡，但仍有一些光线可以通过光学系统而到达像点，此时的像点会暗些。因此，像平面内视场的边缘变得逐渐昏暗，使像的边缘没有明显的界限。这种现象称为光晕现象。在入射窗与物平面重合或入射光瞳很小时，入射窗可以完全决定视场，避免出现光晕现象。

入射窗直径对入射光瞳中心的张角称为视场角，又称角视场。出射窗直径对出射光瞳中心的张角称为像视角。

**光路可逆原理** (principle of reversibility of light) 几何光学的基本定律之一。说明在同一问题中，如果使光线行进方向反向，即原来的出射光线成为入射光线，则这时的出射光线必然为原来的入射光线。在几何光学成像问题上，光路可逆原理说明物和像可以互换。即当光路反向时，原来的像变成物，则原来的物变成了像。

**光密媒质** (optically denser medium) 两种透明媒质相比较时，折射率较大的一种媒质。折射率较小的媒质称为光疏媒质。由折射率的定义可知，光在光密媒质中传播的速度较小，在光疏媒质中传播的速度较大。把光媒质分为光密和光疏起源于牛顿的微粒说。牛顿微粒说认为，光的弹性微粒在疏密不同的媒质中传播时因受到的排斥阻力不同而发生折射现象。按照这种说法，必须认为光在光密媒质中的速度大于在光疏媒质中的速度，而事实恰好相反。

光密与光密度是两个不同的概念。后者代表感光胶片经曝光后的不透明程度。透射率的倒数是不透明度，而光密度定义为不透明度的对数，是感光胶片曝光后发黑程度的量值。

**光年** (light year) 光在真空中一年内所传播的距离。常用来计量天体间距离的一种单位。缩写为 ly (或 l.y.)。因光速  $c=299792.46$  千米/秒，故 1 光年等于 94605 亿公里，或等于 0.307 秒差距，或等于 63240 天文单位。从地球到一些天体的距离如下表。

天 体	离地球距离
月球 (平均)	1.3 秒 $\times c$
太阳 (平均)	8.3 分 $\times c$
火星 (最近地球时)	3.1 分 $\times c$
木星 (最近地球时)	33 分 $\times c$
冥王星 (最近地球时)	5.3 小时 $\times c$
最近的恒星	4.3 年 $\times c$
仙女座星云	2300000 年 $\times c$

**光盘** (optical disk) 一种新型的光学信息存储装置，由盘基、存储介质和保护层组成的圆形盘片，与磁盘和唱片相似。光盘的构造较复杂，

是一种夹层结构，中间基底是涂有碲（Te）或碲的混合物薄膜的玻璃或塑料圆盘，信息即记录在薄膜上，外表包有保护透明塑料。

下图为光盘记录装置示意图。光学头是记录与读出信息的关键部件，它由聚焦透镜、焦点自动调节装置与轨道自动跟踪装置、光学头传动装置等组成。光盘在记录信息时，输入信号经过编码后对连续输出的激光进行调制，然后使激光束经聚焦透镜聚焦后投射到记录介质薄膜上，使介质膜产生一连串具有新的物理特征的小区域。如使介质膜气化，产生一个个烧蚀

#### 光盘存储装置示意图

微孔，从而引起光反射率的变化或改变磁矢量的取向状态等，这样就

把输入信号记录在介质膜上。在记录信息时，光盘一直旋转，而光学头则沿光盘半径方向缓慢移动，因此，记录信息的轨道实际上在光盘上形成了一条螺线。信息的读出是信息记录的相反过程。使激光束聚焦到记录有不同信息的区域时会有不同的反射强度，由此可读出所记录的信息。读取时所用的光学头与记录用的光学头常常是同一只（或同一种）光学头，使用的激光功率比记录时低一些。记录用的激光器功率约 10~20 毫瓦，光脉冲宽度约 0.2 微秒。

光盘大致可分为三类：只读式光盘，常用于录制电视节目等，其声音和图像远优于磁带系统。档案形光盘，只写一次信息。这两种光盘均采用不可擦型存储介质，如在介质上烧蚀微孔等以不可逆变化的方式记录信息。可反复重写的光盘，录制信息时使记录介质小区域上产生磁光效应或相变等可逆变化，它是光盘存储技术研究的发展方向。光盘有许多优点，受到人们极大的重视。光盘的存储密度高。因激光具有良好的空间相干性，可将光斑聚焦到很小，一般激光束在介质上形成的小孔宽约 0.4 微米，长约为 0.6~1.8 微米，所以存储密度要比磁盘高 1~2 个数量级。目前一张 30 厘米直径的光盘单面可存储  $2.4 \times 10^{10}$  比特信息，相当于 A4 版图书两万页的信息量。光盘的另一显著特点是非接触式读出，不产生机械摩擦，因而光盘的寿命长、噪声小。目前，光盘已进入实用阶段，各种实用化产品不断出现。主要用于：计算机大容量存储器，档案文件存储，图书资料存储，以及由计算机管理的现代图书馆。视频光盘可以放映色彩鲜明的电视图像，声频光盘用于播放宽频带立体声音乐等。

光谱仪（spectrometer）能将复色光按不同波长分成光谱的光学仪器。用光栅或干涉仪作色散系统的光谱仪，分别称为光栅光谱仪和干涉分光仪，用棱镜作色散系统的，称为棱镜光谱仪。

**结构** 光谱仪通常由照明系统、准光系统、色散系统和投影系统等部分组成。由准光物镜和在其物方焦面上的狭缝组成准光系统。来自待测光源的光束经过狭缝后射向物镜，使狭缝成为发射待测光的物。因为狭缝位于物镜的焦面上，故经物镜后成为平行光。色散棱镜把这沿同一方向射来的复色光按波长分成沿不同方向出射的各组分光。由投影物镜和在其像方焦面上的光屏组成投影系统。从棱镜射出的各组分光的传播方向不同，但相同波长的光仍保持平行，因此通过投影系统后，在光屏上获得按波长次序排列的各组分光造成的狭缝的像。这就是光谱。光谱线形成的面称为谱面。

**探测系统** 按探测光谱的手段不同，组成不同的光谱仪器。若用望远



镜来观察光谱，就成为分光镜。若装有角度刻度盘，可以记录望远镜观察不同波长光谱线时的角度，从而求出不同波长光的偏向角，这种分光镜叫做分光计。若用照相机或其它装置来记录光谱，就组成摄谱仪。若用另一个狭缝做探测手段，只让某一个波长的光谱线从此狭缝中射出，就组成单色仪。

**波长范围** 光谱仪光学系统所用的光学材料决定了该光谱仪的波长范围。紫外光谱仪用石英或萤石做光学系统；红外光谱仪则采用氯化钠或溴化钾晶体；可见光光谱仪用光学玻璃。

**色散** 光谱仪色散能力的大小标志着性能的优劣。色散能力由线色散表示，它等于波长相差 1 单位的两条光谱线在谱面上的间隔。间隔大，不同的谱线可以分开，反之则可能重合或部分重叠，不能截然分开。棱镜光谱仪的线色散  $dl/d$  与角色散成正比，因为角色散  $D$  定义为波长相差 1 单位的两条光线在空间分开的角度。棱镜对处于最小偏向角的光线的角色散为：

$$D = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda},$$

式中  $\alpha$  为棱镜的顶角， $dn/d$  是表征棱镜材料性能的色散率。故棱镜光谱仪中常用色散率大的重火石玻璃棱镜。

**分辨本领** 任何光谱线都有一定的宽度，绝不是一条宽度为 0 的几何线。谱线中心的强度最大，逐渐向两边递减。角色散或线色散只是指谱线中心分离的程度，如果每条谱线宽度很大，即使谱线中心分开了，仍无法分辨出有两条线。设能够分辨的最小波长差为  $\delta\lambda$ ，通常定义分辨本领为  $R = \lambda / \delta\lambda$ ，与在该波长附近能被分辨的最小波长间隔  $\lambda$  的比值，并记以  $R$ ，根据瑞利判据，可推断：

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = b \frac{dn}{d\lambda}$$

其中  $b$  为棱镜底边的长度，可见，棱镜的色散率越大，底边越长，棱镜光谱仪的分辨本领就越高。

**光栅 (grating)** 具有等宽等间隔的相互平行的多狭缝光学元件。常应用于衍射方法产生光谱，故又称衍射光栅。一般可通过在玻璃或金属平面上刻划出稠密的等间距平行线而制成。光栅狭缝数目最密可达每毫米千余条，所以原刻光栅很贵重。在原刻光栅上蒸涂一层物质，揭下来便制成一块复制光栅。用全息照相术可制成全息光栅。按光栅平面形状，可分为平面光栅和凹面光栅。按被衍射的光是反射光还是透射光，又可将它分为反射光栅和透射光栅。

设光栅各缝的宽度为  $b$ ，相邻两缝间不透明部分的宽度为  $a$ ，并定义  $d=a+b$  为光栅常数。使用时通常把光栅作为夫琅和费衍射的衍射屏，它的衍射图样中主极大的位置由满足如下光栅方程

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

的衍射角  $\theta$  决定。 $m$  为衍射级， $m=0$  为零级衍射， $m=\pm 1$  为 1 级衍射等。零级即中央亮条纹。除零级外，不同波长的主极大位置不一样，且按波长由短波至长波的顺序从中央亮条纹向左右两侧展开，形成光谱。当平行光

束入射方向和光栅平面法向之间的夹角为  $\theta_0$  时,光栅方程应改写为  $d(\sin \theta \pm \sin \theta_0) = m\lambda$  ( $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )。  $\theta$  仍为衍射角,是衍射方向与法线方向的夹角。  $\theta_0$  在法向同侧时,光栅方程左边括号中取加号;在异侧时取减号。光栅性能由分辨本领和色散本领表征。平均波长与能分辨的最近邻两条谱线波长之差的比值定义为该光栅的分辨本

本领。它与光栅总狭缝数和衍射级成正比,即  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN$ 。色散本领定义为

和  $\pm d$  的两条光谱线的衍射角之差  $d\theta$  与波长差  $d\lambda$  的比值,即

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta}。$$

光栅制造中的某些差错会引起一些附加最大强度值的出现,这些谱线称为鬼线。各级谱线的强度分布,随  $d$  与  $b$  的比值而变。当这比值为整数时,某些级次谱线强度为 0,即这些谱线将消失。例如当  $d=2b$  时,所有偶数级次的谱线消失;当  $d=3b$  时,级次为  $\pm 3, \pm 6, \pm 9, \dots$  的谱线消失。这现象称为谱线缺级。

**凹面光栅** 光栅最早由杨氏于 1801 年发明,为平面光栅。1883 年罗兰将缝线刻制在凹面镜上,称为凹面光栅。利用凹面光栅,可省去用透镜使衍射光聚焦的手续。如果把条状光源和凹面光栅放置在直径等于凹面光栅曲率半径的圆周上,则由此凹面光栅所形成的光谱也将呈现在这个圆周上。此圆称为罗兰圆。

**阶梯光栅** 将 20 至 40 块厚度和折射率都相同的透明玻璃板或石英板胶合在一起,但略有错开且排列得像一个阶梯。在阶梯上涂一层反射膜,便成为反射式阶梯光栅;未涂反射膜的称为透射式阶梯光栅。阶梯光栅利用提高程差,使高级次的亮纹获得最大的相对光强。因此阶梯光栅具有高分辨本领。

#### 闪耀光栅

**闪耀光栅** 在玻璃基板上镀一层铝膜,用特殊形状的金钢石刀在铝膜上刻划出稠密的平行刻槽,便成闪耀光栅。附图为其剖面图,倾角  $\theta_B$  称为闪耀角。它也是槽面法向  $n$  和光栅平面法向  $n_0$  之间的夹角。假如平行光束沿  $n_0$  方向入射,反射光沿原方向返回。单槽衍射的 0 级主极大就在这反射光方向上。而相邻槽面反射光的光程差为  $\Delta = 2d \sin \theta_B$ 。对于波长为  $\lambda_1$  的光,1 级谱线的位置由下式确定:  $2d \sin \theta_B = \lambda_1$ 。故单槽衍射 0 级主极大正好落在  $\lambda_1$  的 1 级谱线上,使  $\lambda_1$  的 1 级谱线强度大大增加。更因  $b < d$ ,  $\lambda_1$  的其它级次都落在单槽衍射的暗线位置,形成缺级,使  $\lambda_1$  的 1 级谱线更为增强,几乎可集中 90% 的光能量。因此  $\lambda_1$  称为 1 级闪耀波长。通过对闪耀角  $\theta_B$  的设计,可使光栅适用于某一特定波段的某级光谱。如果入射光沿光栅平面法向  $n_0$  入射,槽面反射光与原入射方向夹角为  $2\theta_B$ ,在此方向上主极大有最大强度。

透射光栅的零级主极大占有总光能量的大部分,但不存在色散,无应用价值。实际使用的非零级处的光谱强度较弱,闪耀光栅则把光能量集中到这种非零级光谱上,大大提高了光栅的应用价值。

**光束 (light beam)** 光在传播过程中形成的波面的法线束,也可以

说是光线簇的总体。由点光源发出的光束是发散光束。由某个光学系统将光形成实像时将存在会聚光束。两者都称为同心光束，因为都重合于一点。对于发散光束，所有光线直接由一点发出，也可能光束中的所有光线反向延线通过一点；对于会聚光束，所有光线直接会聚于一点，也可能光束中的所有光线的延长线会聚于一点。平行光束可认为是位于无穷远处的点光源所发出的同心光束，它们形成曲率半径为无限大的球面光波（即平面光波）。扩展光源或面光源发出的光束是许多发散光束的综合。一般的光束是指从物体所发出的光中由仪器的入射光瞳或光阑提取出来的部分。从点光源产生的光通过圆形光阑所产生的光束又称变光锥；平行光束称为光柱。通过光锥顶端与出（入）射光瞳中心连线相重合的光线称为主光线；在光柱或光锥表面的光线称为边缘光线。位于光轴上的物点发射的光束称为轴向光束，它的主光线与光轴重合。

如果光波波面既非球面又非平面，则与此波面面元对应的细光束称为像散光束。光线之间既不彼此平行，也不相交于同一点，而是会聚成两条互相垂直的短线段。

**光速**（speed of light）光的传播速度。通常用  $c$  表示。光以有限速度传播以及光速的测定对光的电磁理论的建立起了重要作用。对光速的测定近 300 年来从未间断过，现代许多科学家还在研究采用更先进的技术进行更精确的测量，因为光速是物理学中的一个非常重要的普通常数。按照麦克斯韦电磁理论，电磁波在真空中的传播速度

$c$  等于  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ ，其中  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别为真空电容率和真空磁导率。光速的实

验值是  $c=2.99792458 \times 10^8$  米/秒。

如不特别指明，光速常常是指光在真空中的速度。与任何一种波动的传播速度一样，光速也有相速度和群速度之分。相速度是严格的单色光的相位传播速度。而群速度则是实际脉动波列上一定振幅向前推进的速度。当脉动波在正常色散介质中传播，且其波形变化不大时，群速度代表波的能量传播速度。

**光速不变原理**（principle of invariance of lightspeed）真空中光的速率在任何惯性参考系中都相同的原理。它和相对性原理一起构成了爱因斯坦的狭义相对论的两个基本出发点。这原理迄今已为大量直接的和间接的实验所证实。例如，1966 年一个实验小组在欧洲原子核研究中心的加速器上曾经测量了从高速运动光源发射的光的速度。他们采用加速器实验中所产生的  $\pi^0$  介子作为高速运动光源，因为  $\pi^0$  介子能衰变为两个光子（ $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ ）。实验中  $\pi^0$  介子的运动速率达到  $0.99975c$ 。科学家们使用了极其精密的仪器精心地测量了沿  $\pi^0$  介子运动方向发射的光子的速率。经过多次测量以后，他们所得到的结论是：在万分之一的精度内，这种光子的速率仍然为  $c$ 。

**光通信**（Laser Communication）在通讯技术中，载波频率越高，信息容量就越大。微波频率比无线电波高，故微波通讯携带的信息比无线电波多。光波频率更高，因此光通信的信息量也就更多。激光器诞生后，已使激光通信成为现实。

**数字编码** 无线电波通信是把讯号经调制后发送出去。而光通信首先把讯号数字化，使它成为脉冲波，然后在接收端再进行解码，复现原来的

讯号。数字编码分两个步骤。首先将讯号按短时间间隔  $t$  进行分割，将振幅大小从零到最大值之间分成 255 等分，讯号的大小就可在 0 到 255 等分之间进行编码。再用 8 个脉冲波组合成代表 256 个可能值，例如，1 个脉冲波表示 1，无脉冲波表示 0 等等。每 1 组脉冲波有 8 个二进制信息量，代表一个可能的振幅数值。由于采用二进制，故总共有  $2^8$  种组合方式，表示 256 种可能的振幅值。

**光通信系统** 把讯号（如讲话的声音）进行数字编码后变成电脉冲，放大后驱动光源，使光源发出光脉冲；科用光导纤维将光脉冲传输到接收端；最后变成电脉冲并放大，经解码器还原为原来讯号。

光通信系统主要由三部分组成：光源、光纤传输和光探测器。探测器用普通的半导体探测器，只要能探测讯号 0 和 1 即可。通常采用硅光电二极管，它的量子效率很高，在 1.1 微米波段可达到 30%。即 100 个光子输入，可产生 30 个电子。反应时间为  $150 \times 10^{-12}$  秒。用于传输光脉冲的光导纤维的直径为 100 微米，由 24 根光纤组成一支光缆。每根光纤可同时传输 700 名用户的通话。如果采用不同频率的激光，则传输能力更大。例如用两种频率的激光通信，传输能力便增加一倍。一支光缆的直径约 1.2 厘米，在两种激光频率下可同时传输 33600 名用户通话。所以光缆的通讯能力比电缆通讯提高很多。光源常用半导体激光器，使用在 1.0~1.1 微米波段。因为光纤对这波段的激光吸收最小。激光器的工作电压为 2 伏，电流约 100 毫安。一个好的激光器可使用多年，不必经常更换。

**光纤通信** (optical fiber communication) 利用光导纤维作远距离传送信息的通信手段。一般用激光或发光二极管作光源，光纤作为传输线，雪崩光电二极管作光电检测器，再加上各种电子电路做信号处理，就得到一个点对点的光纤通信系统，其方框图如图 1 所示。电信号经过调制器可直接改变光源的注入电流和光功率输出。光波主要是在光纤芯线里通过反复的反射或折射向前行进。光电检测器把光功率转变为电信号，再经过电子电路作电信号处理后得到输出。

图 1 光纤通信系统方框图

光纤是一种比头发丝还要细的玻璃纤维丝。根据原材料的不同，光纤有全石英、全塑料、石英纤芯（塑料包层）等若干种。其中以石英为基础材料制成的光纤光信号传输衰减最小。图 2 为光纤的立体图。一般芯线材料的折射率大于包层材料的折射率，这样当光以一定的入射角射入光导纤维后，光线就由于在芯线与包层间的全反射而呈“之”字形向前传播。光纤分多模与单模两种，多模光纤可以传播多个电磁场分布形式不同的模式，其芯子直径约 50 微米，包层直径约 125 微米。单模光纤只能传输一个模式，芯子直径在 4~10 微米，包层与多模光纤相同。光纤的主要质量指标为衰减和色散。衰减代表透明度，色散代表传输带宽。现在一般可做到每公里的衰减在 0.2dB 以下。采用单模光纤，其色散和衰减都极小，于是可以传输更多的信息和极长的距离。现在一条单模光纤可同时传输 2 万路以上的电路，传输距离达 100 公里以上。

图 2 光纤立体图

用光导纤维作传输光的媒介的思想是由美籍中国科学家高锟博士于 1966 年首先提出的，20 余年来，经过各国科学家的努力，高质量、高速率的光纤通信业已实现，现正在迅速发展，不久将成为最主要的通信方式。

光纤通信与传统的电通信相比，其通信容量要大成千上万倍。光波是频率达  $10^{14}$  赫的电磁波，在通信中，载波的频率越高，能够携带的信息量越大。一般信号带宽约占中心频率的 30% 左右，因此光波能够携带的带宽就可以高达  $3 \times 10^{13}$  赫，所以利用光束通信能够传输惊人的信息量。一般在两支光缆上可以传送数万路电话或上千路电视。它传递信息的速度快、保密性强。光纤体积小、重量轻，能与原来的同轴电缆同孔敷设，从而敷设费用低。制造光导纤维的材料主要是资源丰富的硅酸盐，可以节省大量的有色金属，成本较低。光纤通信抗电磁干扰的能力很强，且具有很强的耐辐射能力，所以原子弹试验基地必须用光纤通信，还可以在某种特殊环境下使用。光纤通信系统除了能传送电话，还可以传送数据、传真、图像等各种信息。在使用上也非常灵活，既可用于大容量信息传输系统，也可用于中、小容量的系统。目前光纤通信已发展成一门产业。

光线 (light ray) 表示光能量传播方向的概念。不要把这个概念看成可以借助某种仪器从实际光束中分离出来的任意狭窄部分。更不要认为，孔的线度愈小，光透过后所分出的光束就愈窄，在极限情况下，可以得到像几何线那样的光线。实际中由于光的衍射现象，任何企图利用孔径趋于零的小孔产生任意窄的光束是不可能的。通过半径为  $R$  的圆孔后，实际光束不可避免地要发散，它的角宽度由衍射角  $\theta = 0.61 \frac{\lambda}{R}$  决定。 $R$

愈小，发散角愈大。只有在  $R \gg \lambda$  时，衍射现象才不显著，这时才可用光线表示其传播方向。

光波在媒质中沿着光线方向传播时，其相位在不断地改变。同相位的各点组成光的波面。在各向同性媒质中，光的传播方向和波面的法线方向重合。故从点光源发出的光线是以光源为球心的径向光线。位于无限远处的光源，发出平行光线。在许多实际问题中，人们只考虑光的传播方向而不考虑相位，这时的波面是垂直于光线的几何面。因此在实用中，特别是在光学成像技术和照明工程中，仅仅借助于光线或波面的概念就可进行必要的几何光学计算，而不必涉及光的波动性。所以几何光学有时也称为光线光学。

光学 (optics) 研究光的学科。内容包括光的本性、发射、传播以及光与物质相互作用等。光学是物理学中最古老的一个分支，已有两千多年的历史。它的发展大致可分为五个时期。

萌芽时期 在我国春秋战国时代的《墨经》中，就已有光的直线传播和光的镜面反射现象的记载，并提出了某些经验规律，解释了物和像的位置、大小与镜面的曲率的关系。一百多年以后，希腊人欧几里德在《光学》一书中提出平面镜成像时的反射角等于入射角的反射定律。公元 1 世纪希腊人托勒密研究了光的折射现象，测量了光通过两种媒质分界面时的入射角和折射角。公元 10 世纪时，埃及人阿尔哈金认为，光以球面形式从光源发出；反射线和入射线共面且入射面垂直于界面；他还研究了球面镜、抛物面镜和人的肉眼的透镜性质，并首先发明了凸透镜。公元 11 世纪，我国宋代的沈括在《梦溪笔谈》中对凹面镜、凸面镜的成像规律，凹面镜焦点的测定，以及虹的成因等作了创造性的阐述。15 世纪末和 16 世纪初，凹面镜、凸面镜、眼镜、透镜、成像暗箱和幻灯等都已相继问世。

几何光学时期 在这时期中，建立了光的反射定律和折射定律，奠定

了几何光学的基础，发明了助视光学仪器、望远镜和显微镜等。17世纪初荷兰人李普塞发明了第一架望远镜，延森制造了显微镜。1610年伽里略用望远镜发现了绕木星运行的卫星。开普勒用两块凸透镜制成开普勒天文望远镜；提出了照度定律，即点光源照明时的照度与受照面至光源距离的平方成反比；发表了《折光学》一书，系统地阐述了几何光学原理。1621年斯涅耳提出，入射角的余割和折射角的余割之比是常数。1630年笛卡儿给出了现在熟悉的折射定律形式。1657年费马提出光在介质中传播时所走的路程取极值的原理，并根据这个原理推出了光的反射定律和折射定律。

这个时期除了奠定了几何光学的基础外，还开始了向波动光学的过渡。17世纪初意大利人格里马第首先发现光的衍射现象。1672年牛顿发现白光由各种色光复合而成，白光通过棱镜后会在光屏上形成按一定颜色次序排列的彩色光谱。牛顿还解释了白光在空气薄层上干涉时所产生的彩色牛顿圈的现象，提出了颜色和空气层厚度有关的结论。1704年牛顿出版了《光学》一书，提出了光的微粒说。惠更斯则提出光的波动说，并于1690年出版了《光论》一书，认为光是在“以太”中传播的波。尽管当时牛顿的微粒说占有统治地位，但仍然相继发现了光的干涉、衍射和偏振等波动现象。

**波动光学时期** 波动光学在19世纪初形成。1801年托马斯·杨用干涉原理解释了双缝干涉实验和白光照射下薄膜颜色的由来，并第一次成功地测定了光的波长。1815年菲涅耳用杨氏干涉原理进一步说明了惠更斯原理，建立了惠更斯—菲涅耳原理，成功地解释了光的衍射现象。1808年，马吕发现光在两种介质界面上反射时的偏振现象。为了解释光的偏振，杨氏于1817年提出光的弹性波动理论，认为光是横波。1845年法拉第发现光的振动面在强磁场中的旋转，揭示了光学现象和电磁现象的联系。1856年韦伯发现电磁单位和静电单位的比值等于光在真空中的速度。光的波动性的完全确立是在1865年，那一年麦克斯韦建立了电磁理论，并且证明了光是电磁波，在真空中以光速 $c$ 传播。这一理论在1888年被赫兹的实验所证实，从而使人们在认识光的本性方面迈出了一大步。

**量子光学时期** 20世纪初，光的研究深入到光和物质相互作用的领域。光的电磁理论在对黑体辐射和1887年赫兹发现的光电效应的解释中遇到了困难。1900年普朗克提出辐射的量子论，成功地解释了黑体辐射问题。1905年爱因斯坦把普朗克的量子假设进一步推广到整个光的辐射、吸收和传播过程中，提出了光量子理论，从而解释了光电效应。从此光学进入了一个新的阶段。

**现代光学时期** 1948年伽柏提出共轴全息图，1955年建立了光的传递函数的概念，1960年诞生了新型光源激光器，这三件事标志着现代光学时期的到来。全息技术已在显微学、信息存贮、像差平衡、信息编码、声波全息、红外全息和全息干涉量度等方面获得了应用。光学传递函数的概念和理论已普遍应用于光学仪器设计评价、光学透镜质量检验及光信息处理等方面，并成为相干光学计算机的基础。激光技术的发展，在激光物理、激光应用等方面已取得了巨大的进展，并且已经在打孔切割、导向测距、医疗育种、同位素分离、光纤通讯、核聚变和遥感技术等领域开始了广泛的应用。现代光学与其他科学技术的结合，为人们开创了认识自然、改造自然和进一步提高劳动生产率的广阔的前景。

《光学》(Optics) 英国物理学家、数学家、天文学家牛顿的一部重要著作。成书于1704年。该书一开头,牛顿就写道:“在这本书中我的意图不是用假说来解释光的性质,而是用讨论和实验来叙述和证实它们。”一共有8条定义和8条定理,定理都用实验证实。接着全书分为三编。第一编描述了这些实验和讨论,已包括了现代几何光学的基本部分。第二编主要阐述了光的干涉现象,其中包括牛顿环等实验及其讨论,书中对这些问题的24种新奇的观察结果都一一作了详尽的记载。第三编前面列举的实验事实主要阐述光的衍射;后面对光学的一些基本问题作了广泛的探讨,提出了31个发人深思、富有启发性的问题。对此,有的学者指出:“只有对那些引起这些问题和由它们反映出来的思想的全部意义进行仔细的钻研以后,我们作为另一时代的人,或许才可尽力做到去亲切地认识这位超群天才的无比的、巧妙的和坚强的内心思想活动。”

牛顿的这部著作也获得了巨大的成功:在18世纪仅英文版就至少出了4次,拉丁文版出了6次,法文版出了3次。由牛顿亲自负责的最后一版,即第3版在1721年出版;第4版又根据牛顿对第3版的订正于1730年出版。当这部著作第4版于1913年重印时,科学巨匠爱因斯坦为该书写了序言,并高度评价了牛顿的科学活动及其科学成就:“他(指牛顿)把实验家、理论家、工匠和——并不是最不重要的讲解能手兼于一身。他在我们面前显得很坚强,有信心,而又孤独。他的创造的乐趣和细致精密都显现在每一个词句和每一幅插图之中。...牛顿的各种发现已进入公认的知识宝库。尽管如此,他的光学著作的这个新版本,还是应当受到我们怀着衷心感激的心情去欢迎,因为只有这本书,才能使我们有幸看到这位无比人物本人的活动。”

光学倍频(optical frequency doubling) 用非线性晶体使基频入射光波产生倍频光波(又称光学二次谐波)的非线性光学效应。1961年弗兰根首次使光学倍频得以实现。次年,勃罗姆贝根作出了理论解释,为非线性光学奠定了基础。

当入射光很强时,入射光在晶体材料中感生的电极化强度P可能包含非线性项:

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2$$

如果某点处入射光波表示为  $E = E_0 \cos \omega t$ , 则

$$p = \frac{1}{2} \chi^{(2)} E_0^2 + \chi^{(1)} E_0 \cos \omega t + \frac{1}{2} \chi^{(2)} E_0^2 \cos 2\omega t.$$

可见,电极化强度中除了有直流成分外,还有频率为  $\omega$  的基频和频率为  $2\omega$  的倍频成分。与这些电极化强度成分相应,有基频极化波  $P(\omega)$  和倍频极化波  $P(2\omega)$ , 及其相应的基频次波辐射和倍频次波辐射,即  $E(\omega)$  和  $E(2\omega)$ 。

在光学二次谐波产生过程中,非线性晶体的原子或分子的量子状态不发生变化,因此辐射场光子须满足能量守恒和动量守恒,后者在非线性光学中称为相位匹配。基频入射光子的能量为  $h\nu$ , 波矢

$$\text{为 } k = \frac{2\pi n(\lambda)}{\lambda} \alpha_0; \text{ 谐波光子能量 } h\nu', \text{ 波矢 } K = \frac{2\pi n(\lambda')}{\lambda'} \alpha_0. \text{ 这里 } n$$

$n(\omega)$  和  $n(2\omega)$  为非线性晶体对基频光和谐波光的折射率;  $\alpha_0$  和

为基频光和谐波光传播方向上的单位矢量。于是能量守恒要求  $h\nu + h\nu = h\nu$ ，即要求二次谐波的频率  $\nu$  应该是入射基波频率的二倍。动量守恒要求  $\frac{h}{2\pi}k + \frac{h}{2\pi}k = \frac{h}{2\pi}k$ 。若入射光和二次谐波波矢方向相同，即  $\theta_0 = 0$ ，则要求  $n(\nu) = n(2\nu)$ 。或以频率为标记表示为

$n(\nu) = n(2\nu)$ ，即要求晶体对入射基波光和二次谐波光折射率相同。设晶体为负单轴晶体，具有正常色散特性。晶体内 o 光和 e 光折射率满足条件： $n^e(2\nu) > n^e(\nu)$  和  $n^o(2\nu) > n^o(\nu)$ 。则实验中可选择基频入射光以 o 光形式入射，使谐波光以 e 光形式出射，则在与晶体光轴成  $\theta_0$  角的特殊方向上，可以实现  $n^e(\nu) = n^o(2\nu)$ 。还可以用其它方法实现相位匹配条件。

光学倍频目前已广泛使用于激光频率转换，由基波向二次谐波的能量转换效率可达 30~50%。将 1.06 微米红外激光转换成 0.53 微米的绿色激光，已在实验室中实现。

**光学放大率 (optical magnification)** 光学系统中某些互相对应量的比值。垂直于光轴的像长与对应的物长之比，称为横向放大率或垂轴放大率，用  $\alpha$  表示。如果长度为  $d$  的物 AB 与光轴重合，它的共轭量 A'B' 也必与光轴重合，且像长为  $d'$ 。  $d'$  与  $d$  之比的极限为纵向放大率，用  $\beta$  表示，即

$$\alpha = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{d'}{d}。$$

出射光线和光轴夹角的正切与入射光线和光轴夹角的正切之比，称为角放大率，用  $\beta$  表示。如果  $n_1$ 、 $n_2$  分别为入射光线和出射光线所在空间的折射率，在折射系统中，如下关系式成立：

$$\alpha = \beta^2 \frac{n_2}{n_1}，$$

$$= \frac{d'}{d}。$$

在光学仪器中，物通过光学仪器后所成的虚像对人眼瞳孔中心所张的角的正切，与物放在光学仪器所成虚像的平面上对瞳孔中心张角的正切的比值，称为仪器放大率，又称视角放大率。它是光学仪器的特性参数，但并不是光学系统互为对应的共轭量的比值，因此与横向、纵向放大率和角放大率的概念有所不同。

**光学纤维 (optical fiber)** 一种用玻璃、塑料或石英等透明材料拉制成的传光纤维。又称光导纤维或光纤。它是由很细的直径为几微米的高折射率纤维芯和低折射率的介质包层组成的。例如内层芯子的折射率为 1.8，外层材料的折射率为 1.52。当光由内层射到内层纤维与外层介质的界面时，入射角小于临界角的那些光线根据折射定律射出纤维；入射角大于临界角的光线则由于全反射而仍然保持在纤维内传播，并最后传到光纤的另一端。大量这样的光纤组成的光纤束称为光导（或光缆），可用作照明传输或传递图像。由于低损耗和低色散光纤的研制成功，光缆已正在逐步取代电缆，应用于通讯技术。

光纤的种类很多，大致可分为两大类：相干纤维束用于传输图像；非相干纤维束用于传输照明。后者纤维束中各条纤维无需有规则排列。以光纤束中纤维的折射率分布来划分，有阶跃突变型和梯度渐变型两种。此外，



若光纤只能传输某一特定波长的光，则称为单模光纤；若可传输多种波长的光，称为多模光纤。按使用波段划分，除可见光波段光纤外，还有红外光纤和紫外光纤。以含铋的磷酸盐玻璃为芯所制成的光纤可作为激光谐振腔，在泵的作用下可以发射激光，故称为激活光纤。还有用耐辐照光学玻璃制成的耐辐照光纤，它可在强辐照环境中使用。

**光学谐振腔 (resonant cavity)** 由两个或两个以上光学反射镜面组成、能提供光学正反馈作用的光学装置。两个反射镜可以是平面镜或球面镜，置于激光工作物质两端。两块反射镜之间的距离为腔长。其中一个镜面反射率接近 100%，称为全反镜；另一个镜面反射率稍低些，激光由此镜输出，故称输出镜。两者有时也分别称为高反镜和低反镜。

**种类** 按组成谐振腔的两块反射镜的形状以及它们的相对位置，可将光学谐振腔区分为：平行平面腔，平凹腔，对称凹面腔，凸面腔等。平凹腔中如果凹面镜的焦点正好落在平面镜上，则称为半共焦腔；如果凹面镜的球心落在平面镜上，便构成半共心腔。对称凹面腔中两块反射球面镜的曲率半径相同。如果反射镜焦点都位于腔的中点，便称为对称共焦腔。如果两球面镜的球心在腔的中心，称为共心腔。

如果光束在腔内传播任意长时间而不会逸出腔外，则称该腔为稳定腔，否则称为不稳定腔。上述列举的谐振腔都属稳定腔。用两块凸面镜组成的谐振腔为不稳定腔。平凹腔中如腔长太长，使凹球面的球心落在腔内，则腔中除沿光轴的光线外，其它方向光束经多次反射后必然会逸出腔外，故也为不稳定腔。对称凹面腔中，如腔长太长，使两球面球心分别落在腔中心点靠近自身一侧，也是一种不稳定腔。

**稳定腔** 光学谐振腔中任一束傍轴光束离光轴的距离，如果在它来回反射过程中不会无限增加，则这种腔必定是稳定腔。若用  $L$  代表腔长， $R_1$ 、 $R_2$  分别为两球面反射镜的曲率半径，则稳定腔应满足如下条件：

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right)\left(2 - \frac{L}{R_2}\right) < 1。$$

从第一个不等式看，只有  $R_1$ 、 $R_2$  同时大于腔长或同时小于腔长时，才能形成稳定腔。从第二个不等式看， $R_1$  和  $R_2$  必须比腔长小，也不能小得太多。

**功能** 谐振腔中包含了能实现粒子数反转的激光工作物质。它们受到激励后，许多原子将跃迁到激发态。但经过激发态寿命时间后又自发跃迁到低能态，放出光子。其中，偏离轴向的光子会很快逸出腔外。只有沿着轴向运动的光子会在谐振腔的两端反射镜之间来回运动而不逸出腔外。这些光子成为引起受激发射的外界光场。促使已实现粒子数反转的工作物质产生同样频率、同样方向、同样偏振状态和同样相位的受激辐射。这种过程在谐振腔轴线方向重复出现，从而使轴向行进的光子数不断增加，最后从部分反射镜中输出。所以，谐振腔是一种正反馈系统或谐振系统。

谐振腔的另一功能是对激光波型加以选择，使输出激光具有一定的纵模和横模。

**光压 (light pressure)** 光施加于被照射物体上的压力，也称为辐射压力。麦克斯韦的电磁理论已指出光压的存在。1900 年俄国物理学家列别捷夫用实验证实了这一点。用光子概念更易理解光压。光子具有能量

$h\nu$ ，动量  $\frac{h\nu}{c}$ 。如果频率为  $\nu$  的单色光正入射到物体表面上，设光通量

每秒内在每平方厘米上入射  $N$  个光子，则能量为  $Nh\nu$ 。如果受照物体是完全吸收体，则物体表面上每一平方厘米在每秒钟内获得的动量为  $Nh\nu/c$ 。这也就是作用在这个面上的光压。如果受照物体是完全反射体，则一个光子所引起的动量改变为  $2h\nu/c$ ，作用在这个反射体表面上的光压为  $2Nh\nu/c$ 。如果光子以入射角  $i$  入射物体表面，则光压还应乘  $\cos^2 i$ 。光压的存在说明光子是物质存在的一种形式。

**光源 (light source)** 将其它能量转变为光的物体或其表面。光源可以是天然的，如太阳。也可以是人造的，如各种灯和气体放电光源。激光器是一类新型的光源。就发光来说，直接将其他能量转换为光的装置称为初级光源；不是直接发光，仅是通过反射或透射获得的光，称为次级光源。在某些具体问题中，光源可以不是指直接发光体，如被照明的狭缝可以作为光源；用双棱镜形成光源的两个虚像，也可看作两个光源。当光源的几何线度远小于观察点到光源的距离时，称为点光源。在考察的问题中不能忽略发光面积时，称为扩展光源。表征光源发光本领的物理量是发光强度或亮度。单位时间内吸收的能量为  $P$ ，其中可能转化为光的能量为  $P_{\text{光}}$ ，则光源的辐射效率  $P_{\text{光}}/P$ 。

**光轴 (optical axis)** 球面镜曲率中心与该球面通光孔径中心点(又称顶点)的连线。又称主光轴或主轴。过曲率中心但不经过顶点的任意一条直线称为副光轴或副轴。对于薄透镜，通过光心和折射球面曲率中心的直线称为光轴；当入射、出射光线所在的两部分空间的折射率相同时，通过光心但不经过曲率中心的任意直线称为副光轴。

双折射晶体中存在一个特定的方向，称为晶体的光轴。光沿这个方向传播时， $o$  光和  $e$  光不分开，这表明它们的传播速度在该方向上是相同的，这时不发生双折射现象。只有一个光轴方向的晶体为单轴晶体，如方解石、石英、红宝石等；有两个光轴方向的晶体为双轴晶体，如云母、蓝宝石等。

**光子 (photon)** 构成电磁场物质的基本粒子。是一种质量为零、自旋为 1 的电中性粒子，常用希文  $\gamma$  表示。光子也是传递电磁相互作用的媒介粒子。1900 年，普朗克为了解释黑体辐射的频率分布，最早提出了能量子的概念。他认为物质放出或吸收的电磁辐射的能量是分立的，是一份一份的。1905 年，爱因斯坦在解释光电效应时进一步指出，电磁辐射或光是由这种带有一份份能量的光量子构成的。1922~1923 年，康普顿通过 X 射线与电子的碰撞实验(康普顿效应)进一步显示了光的粒子性，光量子的观念于是被普遍接受。1926 年正式出现光子这个名词。光子的能量和动量分别为  $E=h\nu$ ， $p=h/\lambda$ ，其中  $h$  为普朗克常数， $\nu$  和  $\lambda$  分别为光的频率和波长。光子有很宽的能量范围，从高能  $\gamma$  光子、X 射线、紫外线、可见光、红外线，直到微波、射频波等。光子的静质量为零，根据狭义相对论，它在真空中只能恒以光速  $c$  运动。

**广义相对论 (general theory of relativity)** 研究物质间引力相互作用的一种基本理论。爱因斯坦于 1915 年建立了这个理论。该理论的基本原理是：“等效原理”。在任一小区域中的引力与某一加速系统中的惯性力等效。“广义协变性原理”。任何物理现象的基本运动规律在任何参考系(包括非惯性系)中都相同。这一原理显然是狭义相对论中的爱

因斯坦相对性原理的进一步推广。

根据上述原理，引力的存在可用空间的弯曲来描写。弯曲时空空间称为黎曼空间，在这种四维空间中，线元（即无限小四维间隔）的平方一般可表示为  $ds^2=g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$ ，其中分别对  $\mu, \nu$  求和，求和遍及  $0, 1, 2, 3$ ，且  $dx^0=cdt, dx^1=dx, dx^2=dy, dx^3=dz$ 。 $g_{\mu\nu}$  称为“度规张量”，共有 16 个分量，它描述了时空的弯曲程度，因此也就描述了引力场的分布。在特殊情况下，若  $g_{00}=1, g_{11}=g_{22}=g_{33}=-1$ ，其它分量为零，则  $ds^2=c^2dt^2-dx^2-dy^2-dz^2$ ，这就是狭义相对论中的四维间隔的平方。由这一特殊的度规张量所描述的空间是平直空间（称为欧几里德空间），这时不存在引力场。爱因斯坦于是用（黎曼）几何学方法来研究引力场。引力场的基本方程是描述空间弯曲程度的度规张量及其导数与引起时空弯曲的源（物质的能量、动量，以及由于物质运动而产生的能量流和动量流）之间关系的方程。爱因斯坦的引力场方程是一高度非线性微分方程，一般很难严格求解。寻找某些条件下引力场方程的精确解以及建立有效的近似求解方法是广义相对论研究中的一个很重要的课题。

广义相对论导出了如下一些重要的结论。

(1) 引力红移。在引力场作用下，时钟的频率或原子辐射的频率减小或向光谱的红端方向移动的现象。根据相对论，频率为  $\nu$  的光子具有的动质量为  $h\nu/c^2$ ，这里  $h$  为普朗克常数， $c$  为光速。光子在引力场中因此也将具有引力势能。当光子从星体表面向外辐射到远处时，其引力势能将会增加。根据能量守恒定律，光子自身的能量将减小，频率降低，从而出现红移现象。当光子在地球表面的重力场中从高处向地球表面落下时，其重力势能减少，光子自身的能量增加，频率增高（称为“引力紫移”）。引力红移现象在白矮星光谱的观察中已得到证实。白矮星（天狼 B 星）由于引力场很强，其引力红移现象较为明显，实验上观察到的相对频移约为

$$\frac{\nu}{\nu_0} = -6.6 \times 10^{-5}。光子在重力场中的引力紫移现象在 1960 年利用$$

穆斯堡尔效应对  $^{57}\text{Fe}$  的一条谱线的实验中以很高的精度得到了证实。

(2) 行星近日点的进动。太阳系中行星的近日点位置随时间有变化，且以水星的近日点进动最为显著，观察值为  $5599.74$  /百年。其中由于地面观察者的非惯性系效应的贡献为  $5025.65$  /百年；其他行星影响的贡献为  $531.54$  /百年，余下的  $42.55$  /百年可用广义相对论解释。由于太阳质量使它周围的时空发生弯曲，根据广义相对论可以算出，绕太阳运行的行星每公转一周，其近日点的进动量为 
$$= \frac{6\pi GM}{c^2 a(1-\epsilon)}$$
，其中  $G$  为引力常数，

$M$  为太阳质量， $a$  为行星椭圆轨道半长轴， $\epsilon$  为偏心率。由此可以算出各行星的近日点进动量，其中以水星为最大，其值为  $43.03$  /百年。从而很好解释了牛顿理论所不能说明的行星近日点的剩余进动。

(3) 光线偏折。光线经过质量为  $M$  的引力中心附近时，将会由于空间弯曲而偏向引力中心，远处观察者测得的偏转角为 
$$\delta = \frac{4GM}{c^2 r_0}$$
，其中  $r_0$  是光

线路径与质量中心的最短距离。根据这一公式，爱因斯坦曾预言当光擦过太阳边缘到达地球时，由于太阳引力场而产生的星光偏转角为  $1.75$ 。这

—预言最早于 1919 年为日全食时的观察所证实。

(4) 雷达回波延迟。从地球上发出一道雷达波，到达太阳系中的某一行星（如水星或金星），然后再被反射回来，其间由于经过太阳系引力场，其路径将有弯曲。从地面上测得的这种雷达波的往返时间（约 30 分钟）将比无引力场时增长了约 200 微秒，这相当于其光程比真空直线距离长了约 60 公里。这个实验是由夏皮洛于 1964 年最早提出的。至本世纪 70 年代末，这类实验的测量结果已经在 1% 的精度上证实了广义相对论的预言。其后人们又利用人造卫星代替行星做了类似实验，使理论和实验的符合程度达到了千分之一。

《广义相对论的基础》（Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie）爱因斯坦著。1916 年发表。是广义相对论的第一篇完整的论文。当年还出版了一个单行本，是物理学中又一篇具有划时代意义的历史文献。全书除引言外，共分 5 个部分：A. “对相对性公设的原则性考查”；B. “建立广义协变方程的数学工具”；C. “引力场理论”；D. “‘物质’现象过程”；E. 包括“牛顿理论作为第一级近似”、“静引力场中量杆和时钟的性状。光线的弯曲。行星轨道近日点的运动”。

该著作一开头就提出：“狭义相对论使空间和时间的理论所受的修改确实是深刻的，但在一个重要之点却保持原封未动。即...对一个静止（刚）体上两个选定的质点，总对应着一个长度完全确定的距离，这距离同刚体所在的地点和取向都无关，而且也同时间无关。对于一只同（特许的）参照系相对静止的时钟上两个选定的指针位置，总对应着一个具有一定长度的时间间隔，这个间隔同地点和时间无关。我们马上就要指出，广义相对论就不能再固执坚持这种关于空间和时间的简单的物理解释了。”

接着指出，所以要扩充相对论公设的缘由，“是由 E. 马赫最先清楚地指出来的”。爱因斯坦把狭义相对论所考察的作匀速运动的参照系之间的相对性，推广到作任意运动的参照系之间的相对性时认为：“物理学的定律必须具有这样的性质，它们对于以无论哪种方式运动着的参照系都是成立的”，即“普遍的自然规律是由那些对一切坐标都有效的方程来表示，也就是说，它们对无论哪种代换都是协变的（广义协变）”，这就是广义协变性原理。广义协变性对物理定律的内容并没有什么限制，只是对定律的数学表述提出了要求。爱因斯坦后来也是这样认为的：广义协变性只有通过等效原理才能获得物理内容。

在该著作中，爱因斯坦再次强调了时间和空间的几何都不能先验地给定，而应当由物质及其运动所决定的思想。这个思想直接导致他采用黎曼几何来描述具有引力场的时间和空间，建立了正确的引力场方程。在此基础上，导出了作为场方程结果的物质的动量能量定律，进而精确地解释了水星近日点的剩余进动，并预言了“光线经过太阳，要受到 1.7 的弯曲”。著名的 1919 年日全食观测，证实了爱因斯坦关于光线偏折的预言，当时全世界为之轰动，情况之热烈，在科学史上是空前的。随后，广义相对论便被物理界普遍接受下来，并被公认为经典理论物理学中最完善的理论。

圭表（gnomon）中国古代的天文计时器。表是一条直立的杆子，太阳光照射在表上，就在观测面上投射出一条影子。圭是测影长用的工具，多数是用石料或铜料制成的一块平板，一头放在表基，延伸向北，在这块平板上刻凿尺寸。由圭和表合成的整体，称为圭表。《三辅黄图》中载：

“长安灵台有铜表，高八尺，长一丈三尺，广一尺二寸。”这里的“长一丈三尺”，指的是铜圭，这是目前能找到的整体圭表的最早记载。而郭守敬创用的高表为八尺之表的五倍。利用圭表，在白天测量太阳的影长，根据表影的长短，就可以确定冬至和夏至等节气。一年正午表影最长之日，叫冬至；一年正午表影最短之日，叫夏至。再从这些表影最长和最短变化周期中，知道一年是三百六十五又四分之一日。圭表的作用，不但可以定夏至和冬至的时刻，而且在一日内，根据表影长短的变化，也可知道大概的时间。

归纳 (induction) 从个别事实中概括出一般概念、一般规律的思维方法，是一种推理形式。归纳法分三个步骤：搜集材料、整理材料、抽象概括，因此归纳推理实质上就是抽象概括的思维方式。抽象是在思想中抽取事物的本质属性，概括是把这种属性推广到同一类事物上去，形成这类事物的普遍概念。抽象和概括是在对大量事实进行分析、综合的基础上，总结出适用范围更为广泛结论的过程。物理的概述、一般原理和适用范围是运用归纳法，通过抽象、概括形成的。就形成概念而言，一般有两种运用归纳法来定义物理量的方式。一种是在抽象概括基础上形成的理论性定义，例如，物体所含物质的多少叫质量，物体运动的快慢叫速度。理论性定义给出了概念的物理意义。另一种是在抽象概括的基础上形成的操作性定义，例如，质量（惯性质量）是一个物体所受的力与产生加速度的比值，速度是物体运动的位移与所用时间的比值，操作性定义给出了概念的量度方法。就物理教学中运用归纳推理的方式而言，在初中物理教学中常采用简单枚举归纳法，即只根据若干事便就推出一般性结论的或然性推理。简单枚举归纳得出的结论还必须经过实验检验才能成立。在高中物理教学中还常用科学归纳法，即由观察或实验发现一些事物具有某种属性，并分析其原因，然后推出这类事物都有该属性的推理。

近代归纳法是培根提出的。它是在 15 世纪后期适应科学发展的需要而产生的，15 至 17 世纪，自然科学在归纳法的指导下逐渐抛弃了经院哲学的束缚，借助于实验，正确地概括和总结了许多物质运动的特性和规律，获得了辉煌的成就，科学的归纳法也取得了迅速的发展。经典物理学的奠基者伽利略的许多成就，同归纳法联系在一起。例如单摆运动的等时性、加速度的概念、作匀加速运动的物体经过的路程与时间的平方成反比的规律，都是归纳法的结果。牛顿的不少成就也是从经验中找出普遍特性和规律。例如太阳光通过三棱镜得到太阳光谱而归纳出太阳光由多种色光组成。无论经典物理还是现代物理，归纳法都是不可缺少的，现代物理归纳法是对传统归纳法加以改造，应用概率的概念和概率论的数学工具形成的。

归纳法的基础和过程，决定了归纳的结论是一种不够严密的或然性的推理。它虽然深入到事物和实验中去，但不能保证通过感性认识就能全面、正确地把握和反映研究的对象，还要由实践作出裁决。例如伏打认为电池产生电流时本质在于金属接触，提出了“接触说”，是一种错误的归纳。若过分强调归纳法，还容易陷入狭隘的经验之中，有碍于发挥理论思维的作用。而在物理学研究中，理论思维有着重要的作用，现代物理学的发展，越来越依赖于理论思维。由于现代物理学的研究对象很难用经验直接感受到，例如巨大、遥远的天体和极其渺小、存在时间又极其短暂的基本粒子

的运动和变化的研究必须借助于理论思维，而不是单凭简单的归纳法可以得出的。物理学中一些概念如场、熵无法从归纳法中得出，像原子、分子等客体，也不可能从经验事实中直接归纳得到。

**轨迹 (trajectory)** 质点运动时其位矢端点所描绘出的一条连续曲线。质点运动时，其位置矢量连续地随时间变化，使位矢成为时间  $t$  的函数： $r=r(t)$ 。在以位矢起点为坐标原点的直角坐标系中，位矢函数可以表示成

$$r(t) = x(t) i + y(t) j + z(t) k,$$

方程

$$x=x(t), y=y(t), z=z(t)$$

是质点的运动方程，同时也是质点轨迹的参数方程。从运动方程中消去时间  $t$ ，得出联系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  之间的两个方程，这个方程组是质点在空间运动的轨迹方程。如质点在  $z$  平面中运动，这时  $z=0$ ，轨迹方程实际上是由  $x=x(t)$  和  $y=y(t)$  中消去时间  $t$  后所得出

的结果。例如，平抛体的运动方程可表示为  $x = v_0 t$ ， $y = \frac{1}{2} g t^2$  (和  $z=0$ )，这里  $x$  轴为水平轴， $y$  轴竖直向下，抛出点为坐标原点，抛出时刻为  $t=0$ ， $g$  为重力加速度。消去时刻  $t$  后，可得平抛体的轨迹方程为

$$y = \frac{g}{2v_0^2} x^2,$$

它是抛物线。轨迹方程也可用其他坐标表示，例如轨迹为圆周的平面极坐标方程是  $r=a$ ，这里圆心在极坐标的原点，圆轨迹半径为  $a$ ， $(r, \theta)$  是质点的平面极坐标，本例中， $\theta$  可取任意值。

**郭永怀 (1909~1968)** 中国力学家，中国力学科学事业的开拓者之一。山东省荣成县人。1935年毕业于北京大学物理系，后继续在该系攻读研究生。1940年赴加拿大留学。1941年获多伦多大学硕士学位。1941年底赴美国加州理工学院航空系，在著名力学家冯·卡门的指导下，从事可压缩流体力学，特别是跨声速流体力学的研究。1945年获博士学位。1946年被聘为美国康乃尔大学教授。1956年回国后，被聘为中国科学院力学研究所研究员、副所长，同时担任中国力学学会副理事长，中国科学技术大学化学物理系教授、系主任。1957年当选为中国科学院数学物理学化学部学部委员。1968年12月5日因公出差过程中飞机失事不幸牺牲。毕生致力于流体力学、空气动力学、爆炸力学以及新兴力学学科的研究。1945~1947年从事跨声速流体力学解的不连续性问题研究，并与著名力学家钱学森共同提出了“上临界马赫数”的概念，发表了《可压缩流体二维无旋的亚声速和超声速流动以及上临界马赫数》的论文，用超越几何函数展开，发展了查普雷金的速度图法，使解在整个流场中很快收敛。此后又进一步研究了绕物体跨声速流动的稳定性问题，为飞机速度如何突破“声障”，以及对提高超声速飞行速度作出了贡献，博得了国际上的普遍重视与公认。1953年发表《在中等雷诺数下绕平板的不可压缩粘性流动》的重要论文，将变形坐标法与匹配渐近展开法结合起来，处理了平板边界层前缘的奇异性问题。这一开创性工作，被钱学森命名为“庞加莱—莱特希尔—郭永怀 (PLX) 方法”。回国后，他继续指导学生研究湍流边界层方面的工作，对钝体头部湍流传热给出了较好的计算方法。1963年阐明了对钝锥绕流，

在一定情况下，其后身流场可能产生“悬挂”激波，并给出了产生二次激波的条件。此外，对高超声速气动力学的研究，对弹头外形、烧蚀、热环境和气动特性的研究，核爆力学的研究以及发展我国导弹、核弹、宇航事业和力学科学人才培养等方面，都作出了重要贡献。

**国际物理奥林匹克竞赛** (International Physics Olympiad, IPhO) 一项国际性的中学物理竞赛。它始于 1967 年，开始时仅东欧五国参加，后扩展到包括原苏联在内的八个国家。自 1972 年开始有非东欧国家参加，以后逐渐扩大，21 届竞赛 (1990 年) 已有欧洲、美洲、亚洲和澳洲约 32 个国家参加，使它真正具有国际性。

根据竞赛章程，它的举办是为了促进学校物理教育方面国际交流的发展，主办竞赛和参赛都由各国教育部委托各该国物理学会负责组织。代表队一般由五人组成，参赛者年龄不得超过 20 岁，由领队和教练各一人陪同赴赛。竞赛则为个人之间的竞赛，不计国家名次。

竞赛分两天进行，理论、实验竞赛各占一天，各考 5 小时。理论试题为三道，总分为 30 分，实验试题为一道或两道，总分为 20 分。应试范围编有大纲。从近年试题水平发展情况看，所涉及内容深度和对解题的创造性要求都很高，已超过许多国家中学教学的目标。参赛者一般都需经过一段时间的特殊培训。评奖办法如下：竞赛成绩最佳的三名参赛者所得积分的平均值计为 100%；积分在 90% 以上 (含 90%) 的参赛者，授予一等奖 (金奖)；积分低于 90% 而在 78% 以上 (含 78%) 的参赛者，授予二等奖 (银奖)；积分低于 65% 而在 50% 以上 (含 50%) 的参赛者，给予表扬；积分低于 50% 的参赛者，发给参赛证书。还可设理论成绩最佳奖、实验成绩最佳奖、女生成绩最佳奖等。竞赛的工作语言是英语和俄语，由领队负责将试题译成参赛者的母语。

我国从 1986 年起组队参赛。为了组队参加国际物理奥林匹克竞赛，我国每年通过全国中学生物理竞赛挑选 15 名左右物理学习优秀的中学生进行强化训练，最后选拔出参加国际物理奥林匹克竞赛的中国代表队队员。中国科学技术协会和国家教育委员会共同负责与国际物理奥林匹克竞赛的常设机构和每届的组织者联系，并承担集训及出国参赛经费，国家自然科学基金会支持此项活动，给以经费赞助，中国物理学会委托北京大学物理系负责代表队的集训。

在 1986 年 ~ 1992 年间，我国共派参赛者 33 人，其中得一等奖 13 人，二等奖 10 人，三等奖 8 人，表扬 2 人。1994 年将在北京举行第 25 届竞赛。

**国际物理教育研究组织** (International Organizations of Physics Education) 国际物理教育委员会 (International Commission of Physics Education)，简称 ICPE，是国际性的物理教育组织。它是国际性的物理学会组织“国际纯粹和应用物理学联合会 (International Union of Pure and Applied Physics，简称 IUPAP)” 下属的第 14 个专门委员会，负责推动物理教育方面的国际交流，成立于 1960 年。它主办过多次国际性的物理教育学术会议，如关于普通教育中的物理教学、物理教师培养、物理研究生培养等专题的讨论会。近几年曾举办过三次国际性的“近代物理教学会议” (分别在瑞士、美国、德国举行)，研究讨论如何将物理学的最新成果纳入大学基础课和中学课程，并促进在前沿学科作研究的物理学家与大、中学教师间的沟通、结合。它也参与和资助在各国举办国际性的

物理教学会议，例如 1986 年在南京举行的“国际物理教育学术讨论会”，1990 年在天津举行的“国际物理实验教育学术会议”等。它还出版《国际物理教育通讯》(International Newsletter in Physics Education)，传播有关信息。现任主席是 E.L.Jossem(美)，副主席 G.Marx(匈牙利)，秘书长 J.Barojas(墨西哥)。委员会成员有我国赵凯华等。

国际物理教育研究组织(Groupe International de Recherche sur l'Enseignement de la Physique)，简称 GIREP。原是由欧洲国家发起的研究物理教育的组织，后来发展成为国际性。每隔一、二年举办一次国际性学术讨论会，大多在欧洲举行。议题一般都是在当前各国物理教育改革中大家感兴趣的问题，例如，中学物理中统计和概率的教学，熵的教学，代用能源与风险教育，在大学中学讲授非线性现象，从各人角度看力学教育，从哥白尼到爱因斯坦等。现任主席是 P.Black(英)。

还有一些地区性的物理教育研究组织，如：

亚洲物理教育联络网(Asian Physics Education Network)，简称 ASPEN。成立于 1981 年，现有亚洲和太平洋地区的 17 个国家参加。致力于推动亚太地区内大学物理教育有交流、合作。每年主办或资助举办一系列地区性物理教育会议和讲习班。重点放在第三世界国家物理教师最感兴趣的问题上。例如，如何使教学计划适合国家对物理人才的需要、实验教学(1983 年北京会议的主题)、大中学衔接、微机视听等设备在物理教学中的应用等。出版刊物《亚洲—太平洋物理新闻》(Asia-Pacific Physics News)。现任主席是李椿(中)，副主席 M.Zawawi Ismail(马来西亚)，执行秘书 V.Talisayen(菲律宾)。

欧洲物理学会(European Physical Society)所属物理教育咨询委员会(Advisory Committee of Physics Education)，是欧洲方面的交流合作组织，兼顾大、中学物理教育。1983 年曾组织欧洲 20 国中学物理教育调查，也举办物理教育学术会议。出版刊物《欧洲物理教育新闻》(Europhysics Education News)。

南北美洲方面，美国物理教师协会(Association of American Physics Teachers)，简称 AAPT，实际上是美国和加拿大的物理教育组织。拉丁美洲各国也经常举行各种地区性的物理教育研究活动和学术讨论会。例如 1987 年曾在墨西哥举行讨论物理教育合作联络网等问题的全美洲讨论会。

联合国教科文组织(简称 UNESCO，总部设于巴黎)和国际理论物理中心(简称 ICTP，设于意大利的特里雅斯特)也经常资助或组织物理教育方面的国际会议或活动。例如，联合国教科文组织目前正在推行一项适合第三世界国家的“大学现代科学基础课程”计划，在最近阶段集中于物理和化学方面。它把这一物理课程革新计划作为促进“北南东西四方的接触和合作”的活动。

国内外物理教学主要刊物(magazines of physics teaching) 在国内外公开发行的、以探讨物理教学为主要宗旨的出版物。

国内有关中学物理教学的主要刊物有：

《学科教学》(双月刊)，由国家教委中小学教材审定委员会办公室和北京师范大学主办。编辑部：北京师范大学教育科学研究所。

《物理教学》(月刊)，由中国物理学会教学研究委员会主力。编辑



部：华东师范大学。

《物理教师》（月刊），中国教育学会物理教学研究会会刊。编辑部：苏州大学。

《物理通报》（月刊），涉及中学到大学普通物理的广泛教学问题。编辑部：河北大学。

《中学物理》（双月刊），由中国教育学会物理教学研究会、哈尔滨师范大学主办。编辑部：哈尔滨师范大学。

《物理教育研究》（季刊），哈尔滨师范大学主办。

《国际物理教育通讯》（International Exchange Program），每年5月、11月定期出版两期。中国物理学会教学研究委员会国际交流组主办。编辑部：东南大学物理系。主要刊登国外大、中学样教育的经验、改革及发展趋向，刊登国际著名物理工作者有关物理教育的专论，报导国外大、中学校物理教育研究的重要活动及国际物理教育会议的有关信息。

国外讨论研究物理教学的刊物主要有：

《物理教师》（美）（Physics Teacher）（月刊，6、7、8三个月停刊），由美国物理教师协会（AAPT）和马里兰大学物理和天文系主办。刊物宗旨是加强各级各类学校的基础物理教学，属于教育类刊物。

《物理教育》（英）（Physics Education）（双月刊），英国出版的一份讨论中学、大专和大学低年级基础物理教学的杂志。介绍物理教学中新方法、新仪器、各种专题文章、物理在其他学科和工业中的应用，以及教学难点讨论。

海森伯 (Werner Karl Heisenberg 1901~1976) 德国物理学家。生于维尔茨堡。1920年入慕尼黑大学,在索末菲、维恩、普林舍姆和罗森塔尔等名师指导下攻读物理学。第一学期在解释反常塞曼效应的谱线中与众不同地首先引进了半量子数。第二学期结合流体力学,写出一篇关于“卡门”涡流的绝对大小的论文。1923年获哲学博士学位。1924年赴哥本哈根大学深造,协助玻尔工作。1927年任莱比锡物理学院教授。1942年任柏林理论物理研究所所长,兼任格丁根大学教授。1958年任慕尼黑大学教授,兼任普朗克物理和天体物理研究所所长。

海森伯是矩阵力学的创始人,获1933年诺贝尔物理学奖。1925年,提出用实验所能观察的光谱线的频率和强度(即振幅)的整体来代替看不见的电子轨道,以计算氢原子谱线的强度。为了对这个整体作数学处理,建立了有关计算符号和规则。这个规则把普朗克常数作为决定性因素引入,并写成《关于运动学和力学关系的量子论新释》一文。随即,与玻尔、约旦合作建立了矩阵力学。1927年,在玻恩观点的基础上,提出了不确定关系。这个关系表明,一个微观粒子的某些物理量,如位置和动量,不可能同时具有确定的数值,其中一个量愈确定,另一个量不确定程度愈大。或者说,同时确定位置和动量时必有误差,两误差之积不能小于量子常数 $h_0$ 。尽管按照一般人的标准,这些误差是微不足道的,但在研究微观粒子时就不能忽略它们。不确定关系和玻恩的波函数概率解释一起,奠定了量子力学诠释的物理基础。

1928年,与狄拉克同时提出交换相互作用的概念,引入交换力。与弗伦克尔各自独立地提出铁磁性的第一个量子力学理论,该理论以电子的交换相互作用为基础。1929年,与泡利一起试图引入场量子化的普遍方案,给出量子电动力学的表述形式,为量子场论的建立打下基础。1932年,提出原子核由质子和中子构成,并把它们看作是同一种粒子(核子)的两种不同状态,这是基本粒子特性同位旋概念的先驱。1934~1936年,发展了狄拉克的空穴理论,假定真空极化效应的存在。1958年,认为凡是符合能量和动量守恒定律以及有关粒子的“耦合”对称性的这些粒子,总是能够互相转变,它们不过是同一“物质”层次的不同特殊状态。把伊万年科的非线性自旋方程量子化,被称为伊万年科-海森伯方程。著有《量子论的物理原理》(1930)、《原子核物理学》(1943)、《基本粒子物理导论》(1962)、《基本粒子统一场论导论》(1966)。

海洋光学(ocean optics) 光学与海洋学之间的边缘学科。主要研究海洋的光学性质、光辐射与海洋水体的相互作用、光在海洋中的传播规律等。海洋光学历史可追溯到20世纪30年代,当时着手研制了测定海洋水体光学性质的海洋光学仪器,对各大洋光学性质进行了现场测量和调查。20世纪60年代以来,海洋光学进入发展阶段。在理论方面,主要是研究海洋水体对光辐射的散射、吸收、光谱等性质及光辐射在海洋中的传播规律。由于海水光散射函数的复杂性,使方程难以解析求解。近年来在理论上用蒙特-卡罗法求解,使海洋辐射传递的基础研究日趋完善,并对光散射方程取得了精度达5%的结果。在应用方面,主要是研究海洋-大气非均匀系统的光信息传递、海洋水体激光光谱、海洋水体光学传递函数等。

其中海洋的光学遥感模式研究是现代海洋光学应用研究的重要内容之一。利用多光谱遥感资料，可测得海浪波高、波长、方向谱、海面粗糙度、海洋叶绿素含量和浅海水水深。河口泥沙分布、海区峰面运动、水团分布等也可由多光谱遥感信息经过数据处理获取。海洋光学目前使用的测量仪器主要有：海洋探测激光雷达系统；水中观察系统，包括水中照度计、水中准直光透射率计、水中光散射仪、水中分光光度计；水下摄影系统；空中-水下激光通信系统。

**海洋能 (oceanic energy)** 海水中蕴藏着的可再生能。包括潮汐能、波浪能、海流能、温差能、盐浓度差能。其中除潮汐能源于月球、太阳和其他星球引力外，其他海洋能均源于太阳辐射，或太阳辐射与大气的相互作用。

潮汐能、波浪能、海流能都属机械能。前两者是水面随时间作上、下运动的位能变化。海流是具有动能的流动水路，动能功率与流量及流速的平方成正比。海水温差是一种热能，海水的温度随着水深而变化，它的表面温度与深层温度之差达 20 。近海水域及江河水的入海处的海水盐度差能是海洋的物理化学能。若在有盐度差的两种海水中隔以半透膜或阴离子透过膜，则在两种海水之间会产生压力差或电位差，见图 1、图 2。

图 1 渗透压示意图

图 2 浓差电池的原理图

上述海洋能均可经能量转换装置而被利用。把潮汐能变换为电能的“潮汐发电系统”就是利用潮差的水力发电系统。即将潮汐能以位能的形式储存在水库内，然后利用水力推动水轮机，再由水轮机带动发电机变成电能。潮差越大，电能就越大。世界上最大的潮差为 15~16 米，目前法国的朗斯电站是世界上最大的潮汐电站，最大潮差为 13.5 米，总输出功率为 24 万千瓦。

海上的波浪能发电装置，就像一个倒置着的打气筒漂浮在海面上，其活塞连接着浮标，随着波浪的上下起伏，浮标带动活塞上下运动，波浪的机械能就转换成压缩空气的动力，然后再冲动空气涡轮机，带动发电机，最后转化为电能。也有直接利用装置将波浪变成巨浪而发电的。日本于 1964 年制成了世界上第一盏用波浪发电的航标灯。

海流能的变换需将单向性的水流变成其他形态的运动，如旋流运动，进而通过增速装置使之能驱动发电机旋转。目前世界上对海流的利用还没有实际运转的成套设备。

海水温差能的利用是从海水的温度差异中提取有用功来推动热机，然后再转化为电能。目前在夏威夷海面上已建成的海洋温差电站是闭式循环系统（见图 3）。温热的海水使低温汽化的液体变成气体，从而冲击汽轮发电机发电，冷海水使气体冷却凝结。

图 3 温差电站的闭式循环系统

盐度差能的能量转换装置之一是利用电化学中的浓差电池原理，而河流入海口是最理想的地方。另一种装置是利用海水和淡水间的盐份浓度差产生的渗透压来推动水轮发电机发电。目前，浓差能转化为电能这一课题尚属研究阶段。

海洋能是一种能循环不息地为人类所利用的可再生能源，单是温差能的可用功率估计就达  $10^{10}$  千瓦数量级。可是海洋能的能量密度较低，致使

利用海洋能的装置极为庞大，耗资巨大。此外，海洋能量不稳定，如潮汐发电的间隙性及波浪能的显著随机性、海水温度变化的季节性等。海洋能的利用目前虽很昂贵，但它不占农田、不污染环境、不消耗任何燃料和资源，在能源严重缺乏的沿海地区或岛屿，将它作为一种补充能源加以利用还是十分可取的。

**海洋卫星** (seasatellite) 用于观察海洋，为海洋研究和资源开发提供海洋信息资料的一种人造地球卫星。研究重大的海洋学问题需要大范围的水域资料，但由于大洋与大气间复杂的热动力相互作用引起的不稳定的各种尺度的海流和涡旋系统，使得海洋结构具有明显的分散性，海洋的各种参数也具有空间分布的不均匀性与时间上的多变性，而海洋卫星可提供从宇宙空间对海洋的大面积、长期、连续甚至于同步的系统观测。

利用海洋卫星电视像片可获大量海流信息，若配以卫星导航设备，能直接测量海流流速。根据云涡旋与风浪的关系，卫星云像片可用于研究密云下的风浪、与海洋地质有关的津浪（也称海啸）参数，例如对于传播速度约为 700 公里/小时的津浪，飞行在 200~300 公里高空的卫星完全能观测津浪所经过的路程，获得各种参数，并能预报津浪的运动趋向。海洋卫星上装备的红外辐射仪可根据海表面水释放的辐射能量来测定海面温度，它几乎能同时记录整个洋面的温度场，正确反映海洋温度特征。这类海洋卫星还可研究海洋与大气的相互作用，使长期天气预报的准确性大为提高。对海洋污染程度和性质进行系统测量是环境保护的一项具体重要措施。石油及其产品是海洋的主要污染物，鉴于油膜荧光的光谱特性以及油膜能减少面蒸发量的特征，从卫星上的可见光谱仪、冷发光遥测记录仪所获得的信息还可显示石油及其产品对海洋的污染程度。

美国于 1978 年 6 月发射了海洋卫星—1，这是一颗海洋监测实验卫星，它能全天候地监测全球海面的温度、有效波高、海面风速、风向和与海洋动力过程相应的海洋水准面的偏差。海洋卫星—1 每天在绕地球的轨道上转 14 圈，每 36 小时监测达 96% 的洋面。卫星上装备有多台仪器，短脉冲雷达高度计可测定有效波高，波高为 20 米左右时，精度达 10 厘米。风场散射计可测量近海风速和风向，在风速为 40~50 米/秒时，精度为 2 米/秒，角度差为 20 度。扫描式多通道微波辐射计用于测量全球海面水温，精度为 1~2K。卫星上还有合成孔径图像雷达用来监测海冰。

**海震** (oceanic earthquake) 发生在海洋地区的地震，地下岩石突然断裂而引起地面剧烈摇动。海洋大震发生时，不仅地面摇动，而且会使海岸隆起形成沙滩或下沉于海面以下，或者造成海啸，同时在陆地上发生断层、裂隙和地滑等大地变形和破坏现象。此外，还有余震不断发生。

#### 海底地形示意图

海底地震主要分布在陆架狭窄、陆坡陡峭、陆隆不发育而被海沟代替的活动大陆边缘和大洋中脊。活动大陆边缘地震带的主体是环太平洋地震带，它释放的地震能量占全球总量的 80%。大洋中脊地震带释放的能量占全球总量的 5%。

海底大震的能量包括以地震波的形式被辐射出来的动能，地壳变动时的重力所具有的势能，因地壳变形产生或释放出的弹性应变能以及被消耗的热能。这些能量可以根据弹性波理论、地壳隆起和下沉量相应重力所做的功及弹性理论来估算。

**亥姆霍兹** (Hermann Von Helmholtz 1821 ~ 1894) 德国物理学家、生理学家。生于玻茨坦。中学毕业后由于经济原因未能进大学。1838 ~ 1842 年，以毕业后需在军队服役 8 年的条件，取得公费在柏林皇家医学院学习。1842 年发表了有关生理学的论文，并获得医学博士学位。1843 ~ 1848 年在玻茨坦任军医。1849 年任柯尼斯堡大学生理学副教授。1855 年任玻恩大学解剖学和生理学教授。1857 年任海德堡大学生理学教授。1871 年任柏林大学物理学教授。1860 年被选为英国皇家学会会员。

主要贡献是发现能量守恒和转化定律。1847 年，在新成立的德国物理学会发表了著名的《关于力的守恒》讲演，系统地论述了能量守恒和转化定律。主要论点是：一切科学都可以归结到力学，给出了不同性质的力或能量的定量表示式；把牛顿力学同拉格朗日力学统一起来，指出可用拉格朗日的方法以力所传递的能量或它所作的功来量度力；把当时生理学的“有生命力的”能量同物理学的能量统一起来，并给出了数学表示式；所有这些能量是守恒的；能量守恒定律不仅在机械运动中适用，而且在其他物理过程中也适用，主要包括：无摩擦的力学过程，引力作用下的运动，不可压缩的液体和气体的运动，理想弹性体的运动，光的干涉中出现的明暗条纹并不表示能量的消失而是能量的重新分布。这次讲演的内容后来写成专著《论力的守恒》出版。

亥姆霍兹在物理学的其他众多领域中也作出了重要贡献。生理光学方面，对眼睛的光学结构、色觉理论都有极为出色的研究。1851 年，发明了检眼镜，用于眼科检查，并提出了这种仪器的数学理论。生理声学方面，提出听觉的共振理论，建立了耳朵的模型，并利用共鸣器（称亥姆霍兹共鸣器）来分离和加强声音的谐音。流体动力学方面，提出有关涡旋守恒的基本定律，奠定了流体涡动理论的基础。化学过程的热力学方面，提出区别化学反应中的自由能和束缚能的概念，从而使前者成为判断等温过程进行方向的重要物理量。电磁学方面，1869 年，研制出由电感和电容组成的振荡电路。1870 年，发展了不规则导体中电动力学过程的理论。著有《音调的生理基础》（1863）、《生理光学手册》（1867）、《化学过程的热力学》（1882）。亥姆霍兹线圈

**亥姆霍兹线圈** (Helmholtzcoil) 用以产生均匀弱磁场的装置。由半径相同、且结构完全一样的两个圆形线圈（通常是多匝线圈）组成。两线圈共轴平行放置，间距等于各线圈的半径（如图）。由毕奥—萨伐尔定律和磁场叠加原理可以证明，在两线圈中通以强度相同的同向电流时，在中央区域产生非常均匀的磁场，公共轴线中点 P 处的磁感应强度大小为

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 NI}{R},$$

式中 R、N 分别是每只线圈的半径和匝数， $\mu_0$  为真空磁导率，I 为电流强度。

在实验室和工厂中，常用亥姆霍兹线圈产生不太强的均匀磁场，作为磁场基准。

**氦氖激光器** (helium-neonlaser) 一种能连续运转的气体激光器。工作物质为氦气。1961 年由杰文研制成功。图 1 所示为常见的内腔式结构氦氖激光器。谐振腔、放电管和激励电源是这种激光器的三个主要组成部分。直流高压使由铝筒阴极发射出来的电子加速，使它在气体放电管内向

阳极运动。高速电子与氦原子相撞,使基态氦原子跃迁到  $2^1S_0$  态和  $2^3S_1$  态。图 2 为氦和氖的能级图。氦的  $2^1S_0$  和  $2^3S_1$  能级的能量为 20.61 和 19.82 电子伏特,分别与氖的 3S 和 2S 能级的能量接近,因此很容易使氦的能量转移到氖原子。于是在氖原子的 3S—3P、3S—2P、2S—2P 等三对能级间可形成粒子数反转,实现波长为 3.39、0.6328 和 1.15 微米的三条激光谱线。这些激光的下能级都不是氖原子的基态,氦氖激光器是一种四能级系统。

一般实验室使用 0.6328 微米的可见光激光。它的谐振腔长度有 250 毫米到 1 米等多种规格,放电管直径在 1 毫米左右,储气套玻管直径约 45 毫米。阳极用钨棒,阴极用铝皮圆筒。反射镜反射率为 99.85%和 98%。氦氖气压比为 5 : 1 到 7 : 1,总气压为 266 帕。

图 2 He 及 Ne 部分能级图

为了输出波长为 0.6328 微米的激光,须抑制 3.39 和 1.15 微米波长的光振荡。常用的方法是使反射镜只对 0.6328 微米波长的光有高反射率。还可采用其它方法,如在谐振腔中放置对 3.39 微米光有吸收而对 0.6328 微米光为透明的甲烷气体吸收盒,或者在谐振腔中插入一块棱镜,利用它对不同波长的光的色散作用,只让 0.6328 微米光在腔中往返而让 3.39 微米光逸出腔外。

氦氖激光器由于其频率稳定性高、相干性和方向性好,经常应用于实验、测量、准直和全息照相。缺点是输出功率较小,约在 1 毫瓦到 100 毫瓦之间。

航天飞机 (spaceshuttle) 可往返于地球表面与近地轨道之间,运送有效载荷和人员,并能重复使用的航天器。它用火箭送入轨道,在轨道上像飞船一样运行,完成任务后,利用机上的小型推进器再入大气层,然后像飞机一样滑翔与着陆。航天飞机是航天与航空技术相结合的产物。

用火箭助推飞机的设想,始于本世纪 20~30 年代。现代航天飞机研制计划的实际执行,则由美国在 1972 年开始。1981 年 4 月,“哥伦比亚”号航天飞机试飞成功,1982 年 11 月投入实际使用。此后又有“挑战者”号、“发现”号、“亚特兰蒂斯”号等多架相同型号的航天飞机往返于地面和太空执行任务。航天飞机的出现标志着航天运载器由一次使用的运载火箭转向多次重复使用的航天推进器的新阶段。

航天飞机一般由轨道器、助推器和外贮箱三部分组成。助推器实际上是两枚固体火箭,为航天飞机垂直起飞和飞出大气层提供大部分推力,它们平行地安放在外贮箱两侧(图 1)。固体火箭助推器完成助推任务以后,与外贮箱脱离,由降落伞减速,溅落在海面上被

图 1

回收,经适当整修以后,可以重复使用达二十次以上。外贮箱在起飞阶段将轨道器和助推器连结在一起,待固体火箭完成助推任务以后,将箱内贮存的液氢、液氧供轨道器的主发动机使用,将轨道器送入轨道后,自行脱落,它是航天飞机上的一次性使用的部件。轨道器是可返回地面的部分,它是一个类似于飞机的薄壁结构,外表的大部分覆以陶瓷防热瓦,能承受再入大气层时的气动加热,完成运载任务返回地面后能再次使用。轨道器分为前机身、中机身、后机身和机尾及尾翼几部分。乘员舱在前机身中。中机身是一个大型货舱,舱中装有各种有效载荷如人造地球卫星等,在轨道器入轨后,可通过操作设备(如机械手等)将它们直接送入近地轨

道，或由轨道器送入近地轨道后，再从这个轨道发射进入高轨道，或者，轨道器可以把在近地轨道上运行的航天器回收，置入这个大型货舱中，再带回地面。轨道器的货舱很大，例如“哥伦比亚”号航天飞机，可以把 29.5 吨重的有效载荷送入近地轨道，并可把 14.5 吨重的载荷带回地面。轨道器的后机身装有三台可重复使用五十次以上的主发动机和二台轨道机动发动机，是入轨和出轨的动力装置。轨道器内还装有控制、导航、数据处理、通讯、生命保障和电源等分系统。航天飞机的飞行程序如图 2 所示。

航天飞机具有多种功能。它具有载人宇宙飞船的作用，也能与各种有效载荷相配合，进行通讯、侦察、

图 2

空间救生和攻击以及空间科学实验等一系列工作。与火箭相比，航天飞机所涉及的科学技术问题更为复杂。火箭发动机通常是一次使用的，工作时间一般不超过几分钟，而航天飞机的发动机却要使用多次，累计工作时间大为加长，因此，在发动机的设计、工艺和材料等方面的要求大大高于一般的火箭发动机。航天飞机的外形远比火箭复杂，因此在升空和轨道器返回大气层的过程中，所遇到的空气动力学问题也远较火箭的空气动力学问题复杂。一般航天器只使用一次，再入防热问题比较容易解决，航天飞机的轨道器是重复使用多次的，所以对防热材料的要求更高。固体火箭和轨道器的无损回收，也是一个难题，尤其是因技术上的原因，在轨道器上往往不再安装一般飞机在大气层中飞行所使用的空气喷气发动机，轨道器在稀薄大气层中以高速、大攻角的飞行姿态，转变到在稠密大气层中以接近零度的小攻角用通常飞机的速度进行复杂的滑翔飞行，包括寻找机场、对准跑道、下滑、放襟翼和起落架等，都只有一次机会，这要求地面导航系统具有极高的精度和可靠性。以上都是航天飞机设计、制造、出入轨道、发射和回收中所遇到的高技术问题。但因航天飞机可以重复使用，且有多种功能，因而为人类的航天活动开辟了更广阔的前景，使航天活动和航天技术进入了一个新的阶段。

**毫伏表 (millivoltmeter)** 一种测量电压的电子仪器。由于毫伏表中在指示仪表前面加上放大电路，因此具有灵敏度高、量程大、输入阻抗大等优点。整机一般由检波电路、放大电路、表头和稳压电源四个环节组成。图 1 为检波—放大式，其特点是被测电压  $U_x$  加到仪表输入端后，先检波，后放大。由于检波后的电压已是直流，所以频率测量范围可以做得很高，达几十兆

图 1 检波—放大式

赫，但是被测电压未经放大先检波，在测量较小电压时，受外界干扰影响较大，因此只能作伏特表。图 2 是放大—检波式，其特点是被测电压  $U_x$  先作交流放大，后检波，便于对弱电压的测量。毫伏表具有测量范围大

图 2 放大—检波式

( $1\text{mV} \sim 1000\text{V}$ ，分十档左右)、输入阻抗高(约  $1\text{M}$  左右)、被测电压频率范围宽( $20\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ )等优点，它是实验室中常用的仪器之一。

**耗散结构 (dissipative structure)** 热力学系统远离平衡时可能出现的宏观自组织有序结构。以比利时科学家普里戈金为代表的布鲁塞尔学派在 1969 年首次提出了关于耗散结构的理论，把只涉及热平衡状态和近平衡的线性不可逆过程的热力学理论，推广到远离平衡的非线性非平衡

区，揭示出非平衡和不可逆过程在建立自组织有序结构方面所起的重要作用。自然界中发生的许多实际过程，尤其是生命过程，都是某种远离平衡的不可逆过程，因而耗散结构理论不但在物理学，而且在化学和生物学等其他领域中，都有广泛的应用前景。

从热力学观点看，自然界中存在两类有序结构。一类是在分子水平上形成的有序结构，它可以作为孤立系统而存在。例如固体中的晶格点阵结构。另一类是在宏观层次上的有序结构，它只能通过与外界交换物质和能量才能得以实现。例如生物体在结构和功能上高度复杂的有序行为。传统热力学可以解释前一种有序结构的成因，但不能说明第二种有序结构的起源。因为在平衡态热力学中，非平衡是暂时的，不可逆过程只能起着耗散能量和破坏有序结构的作用。本世纪 30~40 年代，虽然已形成了不可逆过程热力学，但它仅限于讨论接近平衡态的非平衡过程，因而又称为线性不可逆过程热力学。它的主要理论成果是美国科学家昂色格提出的“倒易关系”（见不可逆过程热力学）。他发现，在不可逆过程的线性范围，与各种不可逆过程分别对应的唯象系数的矩阵是对称的，这种对称性的存在也是与各种不可逆现象联系的元过程的时间反演不变性的严格结果。根据这种倒易关系，可以讨论非平衡体系的种种不可逆过程。普里戈金等人成功地把平衡态热力学以及不可逆过程热力学推广到远离平衡的非线性区，他论证了，当系统远离平衡时，有可能通过与外界交换物质和能量以及依靠内部的不可逆过程形成宏观上的有序结构——耗散结构。耗散结构的典型例子是贝纳德对流。它的实验装置和结果大致如下：在两块很大的平板之间充满流体，然后使两板产生温度差，并在液体内部形成温度梯度。当温度梯度较小时，液体内的热流以热传导方式传递；一旦当温度梯度超过一定的临界值时，流体内部便开始出现有序排列的六角形晶胞，并伴随有宏观上的对流，这就形成了贝纳德花纹。之所以称它为耗散结构，正是为了强调这种结构的形成必须依靠外界提供热量或物质的交换，没有足够的热流或物质流，耗散结构就不会出现。普里戈金还指出，这类有序结构的出现，总可以被看成是某种无序状态（例如均匀的稳定状态）失去稳定性并且被涨落放大的结果。当非平衡系统处于外界条件的临界值附近时，它可能对外场（例如电磁场、引力场）的扰动特别敏感，从而导致对描述该系统的宏观非线性方程的机制上的涨落，引起系统状态的改变。

在耗散结构的热力学理论中，非平衡是有序之源，涨落触发新结构，因而它不是抛弃传统热力学的基本结论，而是对传统热力学作了重要的补充和推广。这种理论不但为弄清自然界的各种自组织现象指出了方向，也为阐述生命起源、宇宙演化等复杂问题提供了启示。由于普里戈金的这一杰出成就，他荣获了 1977 年诺贝尔化学奖。

**核磁共振**（nuclear magnetic resonance）核磁矩受外加交变磁场作用而出现的强烈吸收能量的现象。原子核磁矩在外界恒定磁场作用下将绕着磁场方向作进动，这时如果再在沿着垂直于磁场的方向上施加一高频交变磁场，则当其频率与原子核磁矩的进动频率相等时，便会发生核磁共振。从量子论的观点来看，核磁矩在外场中的取向是量子化的，由于原子核与外磁场的相互作用将使其能级发生分裂。当外加高频交变电磁场光子的能量  $h\nu$ （ $h$  为普朗克常数， $\nu$  为频率）等于某两个分裂能级的间距时，原子核使可能从较低能级的状态跃迁到较高能级的状态。因此在该电磁场



频率  $\nu$  附近存在一个能量共振吸收峰。

核磁共振频率与外加恒定磁场的强度与原子核磁矩的乘积成正比，所以核磁共振技术可用于磁场和原子核磁矩的精确测量。对于实际材料来说，样品核所在处的磁场除外加磁场外，还有内磁场。内磁场来源于样品核周围的其他核以及电子和离子的场。内场的作用使物质的核磁共振谱线呈现复杂结构。所以原子核可视为安置于物质内部的微小探针，通过对它的共振谱线结构的分析来探测物质的微观结构以及微观相互作用。核磁共振技术已成为一种重要的材料无损分析手段。若在样品的不同位置处外加不同强度的磁场（如线性梯度磁场），则样品材料不同位置处的原子核具有不同的磁共振频率，共振吸收谱线强度的频率分布便对应于共振核的空间分布。再借助于计算机，便可重新组建出原来物体的图像，这就是核磁共振成像技术。

与核磁共振原理相同的其他磁共振现象还有电子顺磁共振和铁磁共振。顺磁质离子或顺磁质点缺陷的电子磁矩与外磁场作用而出现的磁共振现象称为电子顺磁共振。铁磁质中的电子磁矩所产生的磁共振现象称为铁磁共振。

**核磁共振成像**（nuclear magnetic resonance imaging）简称 MRL，是 70 年代末随电子计算机技术、电子技术和超导技术的发展而出现的新颖医疗诊断技术。它利用核磁共振原理，采用精确的磁场扫描技术，由电子计算机完成复杂的信息处理工作。它可以把生物体和人体内各部分的元素分布和不同状态显现出来，从而得到运动器官、组织细微改变（如癌的扩散）以及其他成像方法难观察到的病变（如脑瘤）的像。该技术与 X 射线断层成像、正电子断层成像和超声断层成像相比，无辐射伤害，使用安全，目前已广泛应用于临床研究和诊断。

核磁共振原理是由美国的 Purcell 和 Bloch 首先于 1946 年发现的，此后在物质的化学分析方面得到了广泛应用。核磁共振技术最早应用于生物学中是利用其高分辨谱来研究生物大分子的结构。由于它具有非破坏性、测量迅速、分辨率高等特点，因此发展很快。1972 年 Damadian 首先提出把核磁共振成像用于医学诊断的可能性。1973 年 Lauterbur 首先用投影重建技术得到 MRI 图像。1979 年他又提出在均匀磁场上附加一个梯度磁场，使磁场成为空间函数。如果改变梯度对样品的取向，并积累各方向上的波谱数据，就可得到样品中某一截面上的共振核密度分布图形，从而奠定了核磁共振成像技术的理论基础。核磁共振成像仪可以在不改变被测者位置的情况下，通过改变脉冲序列，完全自由地按照医生所需成像层面的方位，获得任意方向断面的图像，而且可以任意取出任何角度切片的图像进行研究，给临床诊断工作带来极大的方便。因此，核磁共振成像被称为是诊断医学上的一种技术革命。

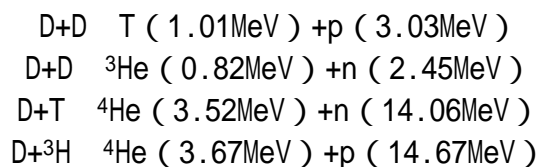
我国于 1982 年开始研制 MRI，1984 年组建了科健公司，于 1988 年开发成功第一套永磁式 MRI 系统，其图像质量达到国外同类机型水平。目前正在研制性能更完备及适应多种场合使用的核磁共振成像仪。

**核反应**（nuclear reaction）具有一定能量的粒子与原子核碰撞，发生相互作用后使原子核的状态发生变化或成为另一种原子核的过程。一般核反应可用符号记为  $A(a, b)B$ ， $A$  为靶核， $a$  为入射粒子， $b$  为出射粒子， $B$  为剩余核。按照参加反应粒子的能量，可将核反应区分为低能核反

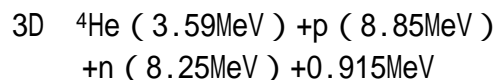
应(小于  $10^2\text{MeV}$ ),中能核反应( $10^2 \sim 10^3\text{MeV}$ )和高能核反应(大于  $10^3\text{MeV}$ )。按照入射粒子的种类,核反应又可区分为中子核反应,光核反应,电子引起的核反应,轻离子(指  $\alpha$  粒子以及比它更轻的离子)核反应,重离子(指比  $\alpha$  粒子更重的离子)核反应等。

为了描写反应过程的能量关系,核反应  $A(a, b)B$  常记为  $A+a \rightarrow B+b+Q$ ,其中  $Q$  称为反应能,是核反应过程中释放的能量。 $Q > 0$  时,反应中将放出能量,称为放热反应; $Q < 0$  时,反应中将吸收能量,称为吸热反应。对于吸热反应,只有当入射粒子的动能大于某一值(称为阈能)时,反应才可能发生。对于一定的入射粒子和靶核,可能发生多种核反应。产生各种反应的概率用“反应截面”这一物理量来描述。研究原子核反应对于了解原子核的性质、核反应机制、新原子核的形成以及核技术应用等方面都有重要的意义。

**核聚变 (nuclear fusion)** 轻核结合成质量较大的核的反应。从原子核中核子的平均结合能(参见原子核)来看,质量小于  $\alpha$  粒子的轻核结合成较重的核时将放出能量。几种典型的放能聚变反应是



其中  $D$  为氘( ${}^2\text{H}$ ),  $T$  为氚( ${}^3\text{H}$ ),  $p$  为质子,即氢核,  $n$  为中子。在上述第三个氘—氚反应中,释放的能量为  $17.58\text{MeV}$ ,平均每个核子放出  $3.5\text{MeV}$ 。上述第一和第二种氘—氘反应概率相等,以纯氘为燃料的反应当温度足够高时,上述四种反应都可发生,总效应为



即每燃烧掉一个氘核可得  $7.2\text{MeV}$  能量,或平均每个核子放出  $3.6\text{MeV}$ 。作为比较,铀—235 裂变时放出的能量为  $200\text{MeV}$ ,平均每个核子放出约  $1\text{MeV}$ 。除上述氘—氘和氘—氚反应外,未来可能采用的聚变反应还有锂—氘、锂—氚、以及锂—氘反应等。

**核力 (nuclear force)** 使核子能够紧密束缚为原子核的相互作用。核力并不是一种基本力,它具有较复杂的性质。

**核力的性质** 核力的性质主要是它的短程性、电荷无关性与饱和性。核力主要是一种吸引力,但是随着距离的不同,核力的表现有所不同。当两核子间的距离大于  $5 \times 10^{-15}$  米时,核力便消失,所以它是一种短程力。当核子间的距离为  $2 \sim 5 \times 10^{-15}$  米时,它是一种弱吸引力(称为长程弱吸引力)。当距离为  $0.8 \sim 2 \times 10^{-15}$  米时,它是一种很强的吸引力,其强度比该距离上两质子间的库仑力大得多,因此足以克服静电斥力,从而使核子紧密地束缚在一起而形成原子核。当两核子间的距离小于  $0.8 \times 10^{-15}$  米时,核力又表现为排斥力(称为排斥芯)。

核力本质上不是电磁力,所以核力与核子所带电荷无关。质子—质子、质子—中子、中子—中子间的核力相互作用都是相同的,这就是所谓核力的电荷无关性。最后,较重( $A > 40$ )原子核中每个核子所占体积大致相同,每个核子的平均结合能也大致相同。这一事实表明,每个核子仅仅与最邻近的几个核子发生较强的吸引力作用。因此核力与分子之间的作用力一样

具有饱和性。

**核力的起源** 1935年，日本物理学家汤川秀树建立了“核力的介子理论”，认为核力是通过交换后来被定名为介子的粒子而发生作用的。60年代后人们开始认识到核子和介子等粒子都具有内部结构，它们都是由更基本的粒子——夸克所构成。核力并非一类基本力。存在于夸克之间的通过交换胶子的强相互作用力才是一种基本力。核力是组成核子的夸克之间强作用力的一种次级作用力或剩余作用力。不过，怎样用夸克理论导出核力在目前尚不清楚。

**核裂变 (nuclear fission)** 重原子核分裂成两个（或多个）中等质量原子核（亦称碎片）的过程。可分为自发裂变和感生裂变。自发裂变是没有外界作用时的裂变，是重核不稳定性的一种表现。在一般情况下，重核的自发裂变是一个十分缓慢的过程，且常常不是这种核的主要衰变方式（主要是衰变）。感生裂变是指外来粒子，如中子、质子、氘、 $\alpha$ 粒子以及光子等诱发的裂变，其中由中子引起的裂变最为重要。中子不带电，穿透性很强，因此很容易接近重核并诱发裂变反应。裂变产生的碎块可以有多种组合方式，例如中子引起的铀—235的裂变，可以分裂为钡—144和氪—89，也可以分裂为氙—140和锶—94，以及其他多种可能性。

核裂变现象可用核的液滴模型和复合核反应机制来解释。中子被核俘获后形成复合核，复合核处于激发态，它将发生集体振荡并改变其形状。此时存在两种作用，表面张力将试图使原子核恢复球形；库仑斥力将使核的形变增大，并最终使它一分为二。库仑能与表面能的比值愈大，裂变的可能性也愈大。

原子核裂变过程中不但释放出巨大能量，而且每次裂变时还伴随着中子的发射。发射的中子数有多有少，平均来说，铀—235裂变产生的中子是2.5个。这些中子又可能被附近的核吸收，引起这些核的裂变。只要中子没有损失或损失很少，铀—235的裂变反应就会持续不断进行下去，这就是所谓裂变链式反应。这种链式反应的发现，使原子能的大规模利用成为可能。例如作为估计，当重核分裂成两块中等质量原子核时，平均结合能将增加1MeV。精确的数值将依赖于裂变碎片的具体情况，但平均来说，每个铀—235裂变时将释放出约200MeV的能量。1千克铀—235约有 $2.55 \times 10^{24}$ 个原子，因此1千克铀—235通过链式反应所释放的全部能量约为 $(2.55 \times 10^{24}) \cdot (200 \times 10^6) \cdot (1.6 \times 10^{-19}) = 8.2 \times 10^{13}$ 焦耳。

**核模型 (nuclear model)** 原子核物理学研究中反映原子核的结构及其性质的物理图像。由于目前对原子核的结构及其性质尚无完整的统一理论，各种核模型都并不完整，只是各自根据部分已知事实而建立起来的。目前最重要的核模型有液滴模型、壳层模型、综合模型，以及光学模型和统计模型等。

**液滴模型** 根据各种原子核中每一核子的平均结合能和占有体积几乎是常数这些事实，将原子核看成是一种不可压缩，且有很大表面张力的带有电荷的理想“液滴”，根据液滴的运动规律对原子核的行为进行描述。这一模型可以解释原子核的结合能、核裂变和某些核反应等。

**壳层模型** 一种半唯象的原子核结构模型。原子核的某些性质随中子或质子数的增加显示出周期性变化，当质子数或中子数等于某些值（这些值称为“幻数”）时，原子核特别稳定。因此人们设想整个原子核与原子

的情况类似，也存在壳层结构。该模型假设原子核中每一核子都独立地处在其余核子的球对称势场中运动。在计入核子的自旋和轨道相互作用后，利用量子力学中处理原子结构的类似方法，便可导出原子核的壳层结构。幻数即相当于完整壳层的核子数。此模型能解释原子核的基态和低激发态的宇称和角动量等性质，但无法解释另一些性质，如激发态能量、磁矩、电四极矩等。

**综合模型** 能统一描写原子核内核子的单粒子运动和集体运动，兼有液滴模型和壳层模型优点的一种原子核结构模型。该模型假设，原子核内满壳层（亦称核实）中的核子具有液滴模型所描述的集体运动性质，存在整体的振动、转动和变形运动。满壳层外的价核子则在核实的平均势场中运动，具有壳层模型所描述的单粒子运动性质。该模型能够解释原子核的磁矩、电四极矩以及原子核的转动和振动等性质。

**核污染 (nuclear pollution)** 由于人们活动所引起的剂量超过自然本底辐射或规定标准的放射性物质的排放。放射性物质能自发地发射射线、 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线，实际上它们分别是氦的原子核、电子和波长在毫微米以下的电磁波。射线与受照物质会产生相互作用，主要形式表现在电离和激发，使受照物质的状态发生变化，对生物体来说，会造成损伤。

在周围环境中到处都有天然存在的放射性物质及电离辐射，这构成了自然本底辐射，其中来自地面的辐射有 50%，海平面的宇宙射线为 30%，人体内的辐射为 20%。来自 X 光机、钟表夜光装置及电视机的人工辐射，即使是核设施向大气和水环境的常规、连续的放射性气体和液体的排放，其剂量都远小于天然本底辐射。因此可以认为这是放射性对环境的正常影响。

随着核工业的日益扩大、核电站的不断建立，污染可能增加，若核企业的放射性物质的排放超过允许标准以及核设施发生事故，逸出大量放射性物质，则会造成严重的环境污染。

在核工业体系中，铀矿的开采和加工以及核燃料后处理是环境污染的重要环节。前者所造成的废物放射性较低，但排放量大、分布广。固体废物有废矿石、矿渣和尾矿。液体废料是作业过程中的废水，废水中含有较高浓度的放射性物质，它所携带的放射性泥沙沉积在排放口附近又会造成新的污染源。废液的长期、任意排放会使河水不能饮用，鱼类与水生生物绝迹。某些水生生物具有浓缩环境中的放射性物质于自己体内的能力，这些生物若被食用，大量放射性同位素就会进入人体。利用污水灌溉的土壤，会使农作物中含放射性物质的含量提高。铀矿山排放出的有害气体主要是氡及其衰变子体和放射性粉尘等。通常在排风口浓度较高，超过居民容许标准，引起环境大气污染。

核燃料的后处理是指从反应堆取出的含有大量裂变产物的核燃料元件中提取钚 239 和回收铀。作业过程中的大量工艺冷却水、设备去污水和洗涤水经简单的沉淀、过滤等处理后排入河流，这是后处理过程最易造成环境污染的一环。至于生产过程中产生的高放射性水平的酸性废水，则通过浓缩后贮存在不锈钢罐内。中等放射性水平的废液经处理后也可排入具有较好离子交换性能的土壤结构的渗坑内。

核事故的发生会造成环境的严重污染，如反应堆运行发生故障、操作不当、放射性物质运输事故、废液贮存容器泄漏等。1957 年，英国温茨凯

尔后处理厂 1 号反应堆由于操作不当引起事故。共排放出放射性物质 3 万多居里，其中碘 131 为最高，工厂周围牧场牛奶中的碘 131 浓度迅速升高，使牛奶报废，造成一定的经济损失。居民甲状腺受照射的剂量显然高于非事故区的居民受照量。污染范围也超出英国国界而波及到法国、西德、荷兰、挪威等国。1986 年 4 月，原苏联切尔诺贝利核电站因工作人员违反操作规程而使反应堆熔化燃烧，安全壳被爆破，死亡 2 人。辐射受伤 204 人。当地的核辐射值为正常允许量的 1500 倍。

核试验也会带来全球性污染。在核爆炸的瞬间能产生穿透性很强的中子和  $\gamma$  射线，而后还会留下不断放射  $\alpha$  和  $\beta$  射线的放射性物质。大气层核试验所产生的放射性物质有裂变产物、没有起反应的核材料以及核弹体材料与中子反应生成的感生放射性物质，它们以小颗粒形式随烟云升到对流层顶以至到达平流层，并随高空的大气环流流动，最后慢慢地沉降到地面。这种全球性沉降产生于当量足够大的地面爆炸和低空爆炸，或者当量较小但爆炸高度较高的核试验。受气象条件的影响，在爆炸区附近和下风方向可能造成较为严重的污染。1954 年，美国在太平洋比基尼岛上进行氢弹试验，由于风向的突然变化，使放射性沉降物落到附近的岛上以及日本渔船上，总受害人员达 260 人。

地下核试验主要对地下水产生污染，当地下水流经地下爆炸空腔和“烟囱”区时，核爆炸产生的放射性物质会溶入水中而被带走。“泄漏”也是地下核试验时有可能发生的问题。在核试验后的一段时间内，近地面空气中的放射性浓度明显增高，通过降雨、降雪，大气层中的放射性同位素沉降到地面土壤中，其含量高低与核试验有关。海洋中放射性同位素的主要来源也是核试验所产生的放射性沉降物，核工业排出的废水和核动力船舰所排出的放射性废物也会引起海洋污染。

由于大气、土壤及水域的核污染，人类的体内、外通过户外活动、饮水、呼吸等直接受到放射性物质的照射，并且因植物直接、间接地得到污染，通过食物链人类体内也会摄入更多的放射性同位素。当放射性物质与生物体作用时，引起机体细胞、组织、体液等物质的原子或分子电离，从而可以直接破坏机体内某些大分子结构，扰乱、破坏机体细胞及组织的正常代谢活动。如使蛋白分子链断裂，破坏一些对物质代谢有重要意义的酶等。当人类机体受到短期的大剂量照射时，各组织、器官和系统受到损伤，并有恶心、呕吐、腹泻、内脏出血等症状，严重的会衰竭死亡。辐射损伤的远期效应是会引起各种脏器的癌症、寿命缩短以及遗传效应。

**核武器** (nuclear weapon) 原子弹和氢弹的通称。原子弹或氢弹可以直接从飞机上投下，也可作为弹头，安装在导弹或鱼雷上，以便投向预定目标。

**原子弹** 亦称裂变弹。利用重元素原子核裂变时释放的巨大能量而引起大规模杀伤破坏作用的一种核武器。最主要部分是两块用纯铀—235 或纯钚—239 做成的核燃料(见图)，其中每块燃料的体积小于“临界体积”。临界体积是指核燃料裂变链式反应能持续进行所需的最小体积。若一次裂变反应释放的中子数平均

#### 原子弹示意图

能引起一次新的裂变，反应就能持续进行下去。在核反应中，中子的产生量通常与反应区域的体积成正比，而中子的逃逸量与反应区域的表面

积成正比。如果反应区域体积太小，其表面积与体积之比很大，中子逃逸量与产出量之比很大，裂变反应便不能继续进行。只有当反应区具有一个最低限度的体积，使逃逸量与产出量之比足够小，反应才能继续进行。这一最低限度的体积就是临界体积。

将两块裂变燃料先分开安装在炸弹中，其中一块固定，另一块后面安上普通炸药和引爆装置。当引爆装置引起普通炸药爆炸时，迫使两块核燃料迅速挤压在一起，这时核燃料体积大于临界体积，裂变链式反应便迅速进行，在瞬间释放出巨大能量。典型裂变弹的能量大致按如下分配：爆震和冲击波 50%；热辐射 35%；早期辐射 5%；剩余辐射 10%。

**氢弹** 亦称聚变弹。利用轻元素原子核聚变反应（热核反应）瞬间释放的巨大能量而引起大规模杀伤破坏作用的一种核武器。主要由氘、氚和氘化锂等核聚变燃料和一个作为引爆装置的原子弹组成。当原子弹爆炸时，产生几千万度高温，诱发更剧烈的热核聚变反应。纯聚变反应不产生剩余辐射，但早期瞬间核辐射则大量增加，特别是其中的中子辐射。为了使核武器爆炸释放的能量分配中，早期中子辐射能量百分比大大增加，同时爆震和冲击波、热辐射等部分能量百分比相对减少，就必须设法增加氢弹中聚变与裂变所释放的能量值之比，使聚变贡献大大超过裂变贡献。这种“纯氢弹”也称为“中子弹”或“增强辐射武器”。

**核子 (nucleon)** 质子和中子的总称。原子核的性质以及质子-质子和质子-中子散射实验的数据表明，它们之间的核力作用与它们是否带电无关，这就是核力的电荷无关性。根据这些实验结果，人们把质子和中子看作同一种粒子，即核子的不同状态。当只考虑强作用时，这两种粒子没有什么不同。质子和中子的质量差以及其他性质的差别均来源于电磁作用和弱作用。

**核子的电磁半径 (electromagnetic radius of nucleon)** 核子的电荷和磁矩的分布半径。1956 年美国物理学家霍夫斯塔特通过高能电子对核子的散射实验（类似于卢瑟福实验，但散射粒子的能量要高得多）发现，核子（质子和中子）并非点状粒子，这表现在散射截面的表式中出现所谓“电形状因子”和“磁形状因子”。在散射过程中，被散射的电子将部分动量转移给核子。若核子是点状粒子，没有内部结构，则这些形状因子将是不随动量转移而改变的常数因子，与卢瑟福实验（即点状粒子对点状原子的核的散射）结果相同。但实验结果表明，在核子线度上其电磁形状因子不是常数，质子的电荷和磁矩分布以及中子的磁矩分布均随其半径大致按指数规律衰减，平均分布半径为  $0.84 \times 10^{-15}$  米。后来人们又对介子作了类似的研究，测量了介子的平均半径。核子和介子的电磁形状因子和电磁半径的测量为强子具有内部结构提供了有力的证据。

**河外星系 (external galaxy)** 银河系以外的星系，是和银河系同级的恒星系统，一般即简称为星系。1917 年美国天文学家里奇在所摄的 NGC6946 的照片中发现了一颗新星，因这新星极其暗弱，认为应在极遥远处，属银河系以外的天体。1924 年美国天文学家哈勃发现造父变星，并根据造父变星的周光关系定出这几个星云之间的距离，终于肯定它们是银河系以外的天体系统，于是称它们为河外星系。目前观测到的河外星系有着对称和规则的形态，它们的直径约为 5 万光年，而其亮度约为太阳的  $5 \times 10^{10}$  倍。星系的特征质量还不是一个普遍知道的量，但其值据估计介于  $10^{10}$

到  $10^{12}$  太阳质量之间。离我们最远的星系约为  $10^{10}$  光年。河外星系是人类研究宇宙大尺度结构的界标。

何育杰（1882~1939） 中国较早的物理学工作者之一。字吟若，浙江省慈溪县人。1901 年入京师大学堂师范馆学习，1903 年赴英留学，1909 年回国。

何育杰的重要贡献是在中国开拓物理学的教学和人才培养工作。在此以前，尽管西方的力学、热学、电学、光学等著作已输入我国，但时至 1901 年，江南制造局才刊印了我国第一次称为物理学的著作《物理学》（由日本人饭盛挺造编纂）。何育杰回国后不久，就在北京大学任理科物理门、物理系教授（1912~1927），不仅讲授普通物理、数学物理、热力学、气体动力学等课程，而且编写了普通物理学中文讲义，培养了一批中国早期的物理学人才。此后在东北大学任物理系系主任期间（1927~1931），还讲授相对论和量子力学等课程，翻译有《自然与机构》、《物质与量子》二书。

荷质比（charge-mass ratio） 又称比荷（specific charge）。带电粒子的电量与质量之比。1897 年汤姆孙最早利用阴极射线管实验测定了电子的荷质比。电子的荷质比的测定在一定意义上说就是电子的发现。任何粒子在测定电荷的基础上，测得荷质比就可算出其质量。电子的荷质比为  $1.759 \times 10^{11}$  库仑·千克<sup>-1</sup>。汤姆孙于 1913 年还利用同一种元素不同同位素的荷质比不同而实现了同位素分离。

合成孔径雷达（composed aperture radar） 又称为成像雷达，利用无线电波照射物体并接受其回波的幅度信息和相位信息来成像的新型遥感雷达，采用的是全息成像原理。由于无线电波具有全天时和全天候辐射及穿透沙土植被的能力，因而合成孔径雷达在矿产资源普查、工程地质勘探、地形测绘、洪水灾害监测、森林资源和农作物普查、军事侦察、边境巡逻等领域得到广泛应用。

合成孔径雷达成像的基本原理是：指目标的回波信号和雷达系统中的基准信号进行相位检波，获得带有多普勒相位信息的视频信号，通过飞点扫描管显示出来，并记录在照相用的胶片上，成为数据胶片，然后用单色光（激光）照射数据胶片，经数据胶片产生衍射波，再送往一套透镜组成的光学处理系统，调整聚焦，就得到图像胶片。由于合成孔径雷达是依据全息原理成像，即不仅接收经目标反射的回波的幅度信号，同时接收相位信号，故其分辨率与目标至雷达的距离无关，而仅取决于全息图的大小。这一优点尤其适宜于将合成孔径雷达装载于高空航天器或人造卫星上。星载或机载合成孔径雷达通常采用侧视工作方式，即雷达向航线的侧向发射波束并接收地物回波。这种雷达用于军事侦察或边境巡逻，可侦察到敌方纵深几十到几百公里的目标；若用于地质勘探，侧视方式可显示地形、地貌特征，对探矿具有十分重要的意义。所谓合成孔径是指用真实小天线来合成大天线阵的意思。近代天线理论研究表明，天线的孔径越大、雷达的分辨率就越高，因此在作远距离的天文观察中，往往建造庞大的天线阵来探测更远的星体，以提高分辨能力。运用合成孔径原理，1 米天线的载机作均速直线飞行就能“合成”数百米乃至上千米的天线阵，分辨率得到成百成千倍的提高，从而达到成像的水平。

成像雷达的概念起始于 50 年代初，随着技术的发展，人们将全息原理

引入雷达，找到了光学成像方法，从而在 60 年代诞生了第一代实用的合成孔径雷达。1978 年，美国发射海洋卫星一号，标志着合成孔径雷达进入宇航领域。随着地球资源和环境监测科学的发展及对气象预测的需要，且由于星载合成孔径雷达测绘带很宽、测绘效率极高，因而世界各国竞相发展星载合成孔径雷达。我国于 70 年代末开始研制合成孔径雷达，于 1979 年研制成我国第一台机载合成孔径雷达，获得首批雷达图像，1983 年和 1987 年研制成单测绘通道、单极化成像及多带多极化成像两代合成孔径雷达，达到 80 年代国际先进水平，目前正在研制星载合成孔径雷达。

**合金 (alloy)** 一种或多种元素溶解在金属中而形成的固溶体。合金有两种：一是溶质原子占据金属原子间的间隙位置而形成的填隙式合金，如碳进入铁中而形成钢；另一种是溶质原子替代占据金属原子的位置而形成的替代式合金，如锌加入铜中形成黄铜。

通过冶炼合金，可以增加材料的机械强度，克服纯金属太软和易变形的缺点，因而合金在工业上有广泛应用。

#### 二元合金相图

合金的相图，也称平衡图。是合金熔解特性的一种直观的图形表示。二元合金 AB 相图如图所示。图中横轴代表 B 种金属的浓度，纵轴代表温度。固线和液线把合金的相分成三个区域：固线下面，具有各种可能组分的合金均呈固相；液线上面，合金将呈均匀的液相；固线和液线之间，合金的状态由固相和液相互平衡的两个相组成。例如，组分为 C 的合金加热逐渐熔解过程如箭头所示，在到达 D 点前，其状态是均匀的固体，当温度进一步提高，就有更多的固相成份转变成液相，D 和 F 点之间是液相和固相共存的区域。E 点处状态中的液相组分可用液线上的 G 点给出，其浓度为  $C_L$ ；固相组分用固线上的 H 点给出，其浓度为  $C_S$ 。从图中可见  $C_S > C_L$ ，即固相比液相具有更多的元素 B。

**合力 (resultant of forces)** 见力的合成。

**赫歇耳 (Frederick William Herschel 1738 ~ 1822)** 英国天文学家。生于德国汉诺威。早年跟随父亲学习音乐，后在近卫军团中担任乐师。1757 年迁居英国，担任过音乐教师、演奏员、作曲家和琴师。1781 年当选为英国皇家学会会员。1821 年任英国皇家天文学会会长。

1781 年 3 月 13 日夜，用自制的望远镜在作巡天观测时，发现了太阳系的一颗新行星——天王星。当时，人们一直以为太阳系只有金、木、水、火、土和地球六颗行星。天王星的发现大大开阔了人们的视野。1783 年，考察天狼等七颗恒星的运行规律后，发现太阳系不是静止的，而是向着武仙座方向的空间运动。1784 年，提出太阳系所在的银河系的形状是盘形的，中间厚、两边薄，同时还在旋转。他还发现了红外线，并研究了它的性质。著有《双星表》、《第二双星表》、《一千个新星云和星团表》等。

**赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz 1857 ~ 1894)** 德国物理学家。生于汉堡。早年向往当一名建筑工程师而进入德累斯顿工程学院学习工程，不久产生对自然科学的爱好，转入慕尼黑大学学习数学和物理。1880 年毕业于柏林大学获博士学位，成为亥姆霍兹的助手。1885 年任卡尔斯鲁厄大学物理学教授。1889 年起任玻恩大学物理学教授。1894 年因患血中毒而逝世，年仅 36 岁。

主要贡献是证实电磁波的发现。1884 年，证明了麦克斯韦方程组与所



有电动力学的物理假设相一致。1886年，进行阴极射线管放电效应的实验时，发现近旁未闭合的线圈也出现火花，由此开始直到1888年持续进行了关于电磁波的多项实验。设计了与感应线圈连接的未闭合电路产生电振荡，并且设计了探测器，用实验发现探测器气隙中能产生微弱电火花，从而证实了电磁波的存在。后又测得电磁波的波长，该电磁波被称为赫兹波。1888年，进行了一系列关于电磁波与光波类比的实验，证明了电磁波能够穿透障碍物，并且具有反射、折射和偏振等性质，同时还测定了电磁波的速率和光速相等，从而完全证实了麦克斯韦的电磁场理论，为无线电通信的发展创造了条件。1887年，观察到如果用富含紫外线的光照射电极之间的火花隙时，两个电极之间的放电会增强的现象，即发现了光电效应，并认为这一效应对光与电的联系具有深刻的理论意义。1892年，发现阴极射线能够穿透薄金属片，为深入探讨阴极射线的性质，提供了新课题。

**赫兹实验 (Hertz experiment)** 历史上首次直接验证电磁波存在的实验。由德国物理学家赫兹所作，因而得名。麦克斯韦于1865年由电磁场理论预言了电磁波的存在。由于他的电磁场理论是在两个假设的基础上得到的，需要通过实验证实。因此，能否获得电磁波，成了一个关键性问题。为此，柏林科学院1879年悬赏征求证实电磁波存在的实验。赫兹在其老师——柏林科学院院长亥姆霍兹的鼓励和支持下，受命致力于这一实验研究，经数年努力终于成功，并于1888年公布了他的实验结果。

#### 赫兹实验装置示意图

该实验的装置如图所示。装置可分为两部分。一为发射电磁波的振荡器。将感应圈的两端接在一对铜棒上，棒端焊有一对黄铜球，两球间留有适当间隙。当感应圈的电流突然中断时，数万伏感应高压使间隙产生火花，两段金属杆连成一条导电通路，这就相当于一个振荡偶极子。根据麦克斯韦理论，此时应产生电磁波辐射。另一部分称为谐振器，是将一段导线弯成圆环，两端也装有金属小球，球间留有间隙，距离可作微小调节。赫兹的预想是电磁波应在此线圈内产生感应高压，从而使间隙内出现火花。实验开始时，赫兹在暗室中将振荡器和谐振器放在相距10米左右的地方，结果观察到在振荡器的间隙中有火花跳过的同时，谐振器的间隙中也立即有火花发生，从而确证了电磁波的存在。赫兹继而又用改进了的振荡器和谐振器作了一系列实验，证明了电磁波与光一样，都有反射、折射、干涉、衍射和偏振等现象。他还利用入射波与反射波叠加产生的驻波，测了电磁波的波长和传播速度。

赫兹实验直接证明了麦克斯韦关于电磁波的预言，使麦克斯韦电磁场理论终于被公认为经典电磁学的最高成就。赫兹在这一实验和此后进行的一系列实验中所发明的电磁波发射和接收装置，也成为无线电技术的开端，促进了通讯和广播事业的迅速发展。

**黑洞 (blackhole)** 星体在完全引力坍缩后所形成的一种看不见的天体。在黑洞内，引力非常强，任何物质（包括光）都不能从中逃出，而外界的物质却能进入其中。因此观察者无法看到来自黑洞内部的辐射。但是黑洞与外界仍有引力作用，可通过引力场探测黑洞的存在。

早在18世纪末，物理学家拉普拉斯根据牛顿引力理论就曾预言，只要天体质量足够大，其引力就有可能强到连自身发出的光都无法逃逸到远处的程度，以致成为看不见的天体。由于黑洞的引力极强，必须用广义相对

论才能有效地描述。

然而，根据热力学的一般原理，黑洞既然是非零温度热体，就应当向外辐射能量。但是经典意义下的黑洞只能吸收辐射，而不能向外发射任何物质，包括光和热辐射。这对于从热力学原理描写黑洞是一个根本性困难。1974年，物理学家霍金利用黑洞引力场中的量子效应，克服了困难。由于真空的量子场涨落和物质的量子隧道效应，黑洞也可以像一个黑体那样向外发出光。考虑到量子效应后，经典黑洞的一些性质需要作相应的改变。

从天文学观察中寻找黑洞，是当前相对论天体物理学的一个非常感兴趣的课题。现在，天鹅座 X—1 被认为可能是一个黑洞。此外，在椭圆星系 M87 的核心部分可能存在  $10^8 \sim 10^9 M_{\text{太阳}}$  的大质量黑洞。也有人用黑洞来解释类星体或太空中的一些星体爆发现象，但均无定论。

**黑光灯 (black lamp)** 一种透紫外光的灯。一个封闭的圆柱筒内安装着高压或低压水银灯，窗口设置一块黑色滤光片，它由含氧化镍的玻璃制成，可以通过  $0.4 \sim 0.32$  微米的紫外光，这个波段称黑光区。黑光灯只让紫外光射出，用来激发发光物质，以便研究这种物质的发射光谱，而不被灯的可见光扰乱。

一些害虫最喜爱  $0.35$  微米附近的紫外光，因此可以制成诱杀害虫的黑光灯。一般用由铊做激活剂的磷酸锶钙作发光体。它发射的光，波长极大值在  $0.35$  微米附近。黑光灯的外形、规格与普通日光灯相同。但效率比普通电灯约高三倍。适用于环境卫生和农业。

**黑体辐射 (black-body radiation)** 绝对黑体在受热时以电磁波的形式向外辐射能量的现象。

当电磁波入射到一个物体上时，一般说来其中有一部分被吸收，另一部分被反射。如果一个物体能把入射到它上面的各种频率的电磁波全部吸收，这个物体就称为绝对黑体。

按照热力学理论，具有某一温度  $T$  的物体都能够以电磁波形式辐射能量。对一个绝对黑体来说，如果在单位时间内辐射的能量正好等于它吸收的入射能量，则这个黑体将达到辐射平衡，具有确定的温度。

绝对黑体是一种理想物体，而从一个几乎封闭容器中发生的辐射其性质与绝对黑体的辐射非常相似，研究在这样一个空腔内的平衡辐射就可得出黑体辐射的全部特性。

**空腔辐射的能量密度** 利用热力学理论可以得到空腔辐射的能量密度  $u$  与平衡辐射时空腔壁的绝对温度  $T$  的四次方成正比： $u = \sigma T^4$  ( $\sigma$  为常数)，这就是斯忒藩—玻耳兹曼定律。

**空腔辐射场的熵** 从热力学基本等式出发，可得到空腔辐射场的熵  $S = \frac{4}{3} \sigma T^3 V$  ( $V$  为空腔体积， $\sigma$  为常数)。在可逆的绝热过程中，辐射场熵不变，因此  $T^3 V = \text{恒量}$ 。如果空腔体积在该过程中膨胀增大一倍，则空腔辐射温度将下降为原来温度的  $0.79$  倍。

**空腔辐射的辐射通量密度** 空腔壁上单位面积在单位时间内向一侧辐射的总辐射能量即辐射通量密度  $J_u$  与辐射能量密度  $u$  之比是  $\frac{c}{4}$  ( $c$  为光速)。

通过测量一个物体的辐射通量密度随频率的分布可以确定物体的温度，光测高温计正是依据这个原理制成的。

亨利（Joseph Henry 1797 ~ 1878） 美国物理学家。生于奥尔巴尼。自幼勤奋好学。13岁时准备学习演戏，16岁时开始对自然科学发生兴趣。1819 ~ 1822年在奥尔巴尼学院学习，后来在该校工作。1832 ~ 1846年任新泽西学院（今普林斯顿大学）物理学教授。1846年起任史密孙研究院秘书和首任院长。1867 ~ 1878年，任美国科学院院长。

主要贡献在电磁学方面。1827年，开始研究电磁现象。1829年，最先用由绝缘导线绕成的多层绕组，制成蹄形强力电磁铁，起重量达1吨，这为电磁铁提供了改进的条件，也为发电机的实用发明奠定了基础。1830年，曾独立地观测到电磁感应现象，但没有及时发表。1832年，发现了自感现象和额外电流，确立了影响电路电感的原因。1835年，发表了解释自感现象的论文，受到普遍的重视。1842年，发现二层楼上的电火花，能使一层楼的指针磁化，这实际上是人们最早发现的电磁波辐射现象。

亨利一生先后发明了电动机（1829）、模型电报机（1831）和电磁继电器（1835）。他还改进了当时的互感器，发明了无感应线圈，并指导莫尔斯发明了第一架实用电报机。著有《亨利科学著作集》（共2卷，1886）。

横波（transversal wave） 见波。

横模（transverse mode） 激光光束横截面上光强的分布情况。激光谐振腔两端有反射镜，腔内激光物质也有一定大小的横截面。光在腔内传播相当于不断经过光阑，因此会引起衍射，使振幅和相位的空间分布发生畸变。最后当振幅和相位的空间分布达到稳定状态时，才从输出镜输出激光。取激光器轴向为直角坐标系的z轴，以谐振腔中心点为原点，在与z轴垂直的平面上取互相垂直的x轴和y轴。用符号 $TEM_{mn}$ 表示各种横向模式。m、n均为正整数，分别表示在x轴和y轴方向上光强为零的那些点的序数，称为模式序数。输出激光束横截面上横模的光斑图表示在下图中。基模又称 $TEM_{00}$ 模，其光斑中任何一点光强都不为零。若光斑在x方向上有一点光强为零，称为 $TEM_{10}$ 模；在y方向上有一点光强为零，称为 $TEM_{01}$ 模。以此类推，模式序数m和n越大，光斑中光强为零的点的数目越多。除基模为低次模式外，其它的模式都称为高次模式。

仅有基横模的激光束称为单横模激光，其平行性好，发散角小。有不同横向模式的激光束称为多横模

横模光斑图

激光，其发散角较大，平行性较差。从空间相干性来说，各次横模的空间相干性都很好，但高次横模多数伴随多横模运转，因而空间相干性比基横模差些。

恒流源（constant current source）能提供恒定电流的电源。它是一种理想电源，不管负载电阻如何变化，它总是提供不变的电流 $I_s$ 。该电源的路端电压V则是任意的，由负载电阻 $R_L$ 和电流 $I_s$ 确定。电源的外特性曲线将是与纵轴平行的一条直线，如下图所示

(a)恒流源电路 (b)恒流源的外特征

恒流源图

如果一个电源的内阻 $R_0$ 远较负载电阻 $R_L$ 大（ $R_0 \gg R_L$ ），则电路中的电

流强度

$$I = \frac{\varepsilon}{R_0 + R_L} \cong \frac{\varepsilon}{R_0},$$

即不随外电阻而改变，基本上恒定，可以认为是恒流源。例如，晶体三极管就可近似地认为是一个恒流源，因为它的输出特性基本上平行于电压轴，当基极电流为某个值时，集电极电流可近似地认为不随集电极与发射极两极间的电压而变。这在电子电路中经常采用。

**恒星 (star)** 由内部能源产生辐射而发光的大质量球状天体。太阳就是一颗典型的恒星。太阳以外的其他恒星，距离地球非常遥远，最近的也有 4.3 光年，因此，用最大的望远镜观察也只是一些光点。恒星实际上都在不停地运动，但因离我们太远，在短时期内感觉不到它们相互位置的改变，故古时候称其为“恒星”，沿用至今。

**结构** 恒星的结构可分外层大气和内部结构。恒星大气可直接观测，从里往外，可分为光球、色球和星冕。正常恒星的大气处于流体静力平衡态。光球之下到内核中心称为恒星内部。恒星内核以核反应方式产生巨大的能量。

**演化** 现代天体演化理论认为，恒星的起源是由星际弥漫的物质如尘埃、微粒、某些元素及其分子集聚而成“原恒星”。内核温度不断增高，密度不断增大，开始发出越来越强的辐射。最初发出射电波和红外线，随着温度升高发出可见光，此时演化成年轻的恒星，称为主序星阶段。正常恒星在这阶段占绝大部分时间，它们的质量不一样，表面温度有高有低，因而恒星有不同的颜色。随着内核的氢燃料枯竭，恒星外壳膨胀，光度增大，颜色变红而成为红巨星，以后的演化要视恒星的质量、角动量以及是否为密近双星的成员而定。对于单星，当红巨星的外壳消散，残存质量小于 1.3 个太阳质量时，它将演变成高密度的白矮星。若剩余质量在 1.3~2.0 个太阳质量之间，则会进一步塌缩为致密的中子星。若残存质量大于 2.0 个太阳质量，根据天体理论认为会塌缩成一奇点，形成黑洞。对于密近双星的双子星，由于演化过程中有物质交流，两子星各自的形态和结构都在迅速改变，当一子星演变为白矮星，又吸积另一子星的物质时，白矮星会爆发为新星或其他类型的激发变星。密近双星的演变还有可能导致灾变爆发，即一子星因失去平衡而变成超新星，塌缩的残核可能成为高速自转并向外幅射各种波段（射电、光学或 X 射线等）的脉冲星。

**恒星参量** 恒星参量有 4 个方面：光度、质量、直径、温度。可以通过天文观测得到方位、亮度与光谱这些参数来推算恒星的这些参量。由天文观测可确定恒星的方位，现代多利用河外星系作为固定不动的参照系来确定恒星的坐标位置，根据恒星方位，可确知恒星垂直视线方向运动（即自行），再利用多普勒原理，直接从恒星的光谱谱线位移求出恒星沿视线方向的运动速度，由恒星的自行与视向速度，可确定太阳的运动、太阳附近恒星的运动和银河系自转的情况。光度表示恒星发光的强弱，是其本身的性质；而天文观测得到的是恒星的亮度（称为“视星等”），它不仅与恒星的光度有关，还与它离观测者距离有关。由于恒星离我们的距离可测量，根据视星等的大小就可比较恒星本身发光的强弱。天文学上假定把恒星置于 32.6 光年的距离处，此时地球上看到的亮度表示恒星的本身光度，称为绝对星等。与视星等一样，绝对星等的数值越小，表示恒星越亮，光

度越大。例如太阳的视星等为 $-26.9$ ，若把太阳置于 $32.6$ 光年处，则表示其光度的绝对星等便是 $4.7$ 。恒星的光谱中含有恒星温度、化学组成和本征光度的信息，由此可判断恒星是否成双和定出自转速度，判明恒星是否有大气、物质抛射和强磁场。恒星的直径可从恒星的光度和表面温度推算得知。根据恒星光谱特征、元素的电离度和激发态，得知恒星的电离温度或激发温度。根据恒星的光度和半径算出的是有效温度。例如太阳的有效温度是 $5800\text{K}$ ，M4红矮星的有效温度是 $3200\text{K}$ 。

**恒星日 (sidereal day)** 春分点相继两次通过地球子午线的时间间隔。与太阳日的情形相似有视恒星日和平恒星日之别，前者受岁差和章动的影响，后者仅受岁差影响。一平恒星日等于平太阳日 $23$ 小时 $56$ 分 $4.09054$ 秒。某一恒星在天球上连续两次由东向西通过同一子午线所需的时间，即是地球自转的周期，它比恒星日约长 $0.0084$ 秒。

**恒压源 (constant voltage source)** 又称定压源。路端电压不随负载而变的电源。无内阻电源是理想的恒压源。这种电源，不管负载如何，电源提供的电压总是恒定值。

实际电源都有内阻，当电源内阻和负载电阻相比可忽略时，该电源可近似看作恒压源。在实际应用中，可通过电子技术人工制造恒压源，如稳压电源，就是一种电压随负载改变极不明显的电源。

**虹吸管 (siphon)** 见虹吸现象。

**虹吸现象 (siphon phenomenon)** 在重力作用下，利用曲管将液体经过高出液面的地方引向低处的现象。液体流过的那根曲管称为虹吸管。在虹吸管内装满液体，用手指按住两端管口，然后把管子一端放入液面较高的容器中，另一端放入液面较低的容器，松开手指，液体会从液面较高的容器经过虹吸管流入液面较低的容器，如图所示。液面高度差(图中 $h_2 - h_1$ )越大，管中流速也越大。

我国在公元2世纪毕岚就发明了“渴乌”，即虹吸管，逐渐广为应用。我国黄河中下游的水面大都高出堤外的地面，因此在河南、山东一带都用虹吸管把黄河里的水引到堤外灌溉农田。虹吸现象广泛应用于从不能倾倒的容器吸取液体，例如汽车司机常用虹吸管从油桶中吸取汽油或柴油。

一般认为虹吸现象是大气压作用的结果，其实虹吸现象与大气压无关。因为虹吸现象在真空中也照样会发生。

**虹吸现象**

**红宝石激光器 (rubylaser)** 1960年梅曼最早研制成功的一种激光器，其工作物质是红宝石晶体，基质成分为三氧化二铝(又称刚玉或蓝宝石)，渗入少量三氧化二铬后形成带正三价的铬离子，于是使晶体呈粉红色，称为红宝石。铬离子起激光发射作用，它的能级图如图1所示。

激励源采用高压脉冲氙灯。图2为聚光器截面示意图。氙灯和红宝石棒分别置于椭圆柱面反射聚光器的两个焦点处，以便提高氙灯的光能利用率。铬离子吸收了氙灯的光能后，从基态 $^4A_2$ 跃迁到两个强吸收带 $4T_1$ 和 $4T_2$ 。这两个能带寿命极短，大部分铬离子通过无辐射跃迁到达激光上能级 $^2E$ 。 $^2E$ 为亚稳态，寿命较长，从而在 $^2E$ 与 $^4A_2$ 之间形成粒子数反转。在满足振荡阈值条件后，发射出中心波长为 $0.6943$ 微米的激光。脉冲氙灯内光持续时间为 $1$ 毫秒，在这时间内激光器将输出一系列激光尖峰脉冲，尖峰

脉冲的持续时间约为 1 微秒。氙灯每次闪光提供 500 ~ 1000 焦耳的能量，激光输出能量约 1 焦耳，故效率低于 0.1%，大量的能量转化为热能，使激光器发热。为此必须使用冷却系统，并限制氙灯闪光的速率，不能太快。一般采用水冷的系统，重复频率为每分钟几次；采用空气冷却时，重复频率只能几分钟一次。

图 1Cr 能级图 2 椭圆柱面聚光器

红宝石激光介质的荧光线宽很宽，例如腔长为 10 厘米的激光器输出的纵模可达 100 个。发散角约 5 毫弧度。因此时间和空间相干性均比气体激光差。

**宏观 (macrocosm)** 指空间线度大于  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  厘米的物体，由极多的分子、原子组成。肉眼可见的物体都是宏观物体，包括地球上的物体、卫星、行星、恒星以及和它们相应的场所所构成的系统。宏观虽与微观有区别，但又有联系。宏观以微观为基础，宏观物体都由微观的原子、电子、基本粒子等组成，宏观和微观的物体都统一于物质之中。宏观现象一般指宏观物体和场在宏观的空间范围内的各种现象。宏观物体和宏观现象统称宏观世界。宏观世界是经典物理学研究的对象，其运动规律可用牛顿力学、麦克斯韦电磁理论以及光学、热力学的规律加以描述。从哲学角度，有人对宏观的本质特征作出概括，认为宏观是人们可以直接观测、且能以物质手段加以影响和变革的时空区域。

**宏指令 (macro instruction)** 在汇编语言中，对于多次重复出现的程序段，可以用宏定义伪指令（如 MACRO，MEND）把这个程序段定义为一条新的指令，这种自己定义的指令称为宏指令。对宏指令的定义过程称为宏定义。宏指令一经定义，就可以用一条指令的形式出现在后继程序中，在汇编程序中使用自己定义的宏指令，称为宏调用。

宏定义的一般格式：

```
<宏指令名>MACRO<#参数 1, #参数 2, ...>
    宏指令体
MEND
```

其中夹在 MACRO 和 MEND 之间的指令序列称为宏指令体（宏体），可以由助记符、伪指令和其它已定义的宏指令构成。宏定义中的“#参数”类似于高级语言过程说明中用的形式参数，在宏体中要使用。例如宏定义

```
ROTATE :          MACRO  #REG
RLC              #REGRLC #REGRLC
RLC              #REGRLC
RLC#REG
MEND
汇编程序
```

```
START  LDA, B      ⇒  { RLC A ; B → A
                       RLC A ; 将A内容左
                       RLC A ; 转四次
                       LDH, L
                       RLC A ; L → H
ROTATEH ⇒ { RLC H ; 将H内容
            ADD A, H  { RLC H ; 左转四次
            END      { RLC H ; A + H → A
                       RLC H 结束
```

在上述例子中，把四条 RLC 指令重新定义为一条名为 ROTATE 的宏指令。

宏定义和宏调用都允许嵌套，但嵌套层次有一定限制，在设计前必须查清楚。

**厚膜混合集成电路**（thick film hybrid integrated circuit）用丝网印刷和烧结等工艺在同一基片上制作无源网络，并在其上组装分立的半导体器件芯片或单片集成电路或微型元件，再外加封装而成的一种微型电子功能部件。它具有设计灵活、工艺简便、成本低廉等特点，特别适宜于多品种小批量生产。在电性能上，与薄膜混合集成电路相比，它能耐受较高的电压、较大的电流和功率。其工作频率可达  $4 \times 10^9$  赫以上。适用于各种电路，特别适用于民用和工业电子产品中的模拟电路。

厚膜混合集成电路最常用的基片是含量为 96% 和 85% 的氧化铝陶瓷，当要求导热性特别好时，则用氧化铍陶瓷。

在基片上制造厚膜网络的主要工艺是印刷、烧结和调阻。常用的印刷方法是丝网印刷。烧结在烧结炉内完成。在烧结过程中，有机粘合剂完全分解和挥发，固体粉料熔融、分解和化合，形成致密坚固的厚膜。调阻的目的是使厚膜网络达到最佳性能，在烧结后进行。常用的调阻方法有喷砂、激光和电压脉冲调整等。

厚膜是指在基片上用印刷烧结技术所形成的厚度为几微米到几十微米的膜层。制造这种膜的厚膜材料是一种涂料或浆料。按厚膜的性质和用途，浆料有五类：导体、电阻、介质、绝缘和包封浆料。

导体浆料用来制造厚膜导体，在厚膜电路中形成互连线、多层布线、微带线、焊接区、厚膜电阻端头、厚膜电容极板和低阻值电阻。电阻浆料用来制造各种电阻，要求电阻率大，阻值温度系数小，稳定性好。介质浆料用来制造微型厚膜电容器，要求介电常数大，损耗角正切值小，绝缘电阻大，耐压高，稳定可靠。绝缘浆料用作多层布线和交叉线的绝缘层，要求绝缘电阻高，介电常数小，而且线膨胀系数能与其他膜层相匹配。

**胡刚复**（1892～1966）中国物理学家、教育家。江苏省无锡县人。1909 年赴美，1918 年获哈佛大学哲学博士学位。同年回国，任东南大学（1923 年以前为南京高等师范学校）物理学教授、物理系系主任。1926 年创办厦门大学理学院并任院长。1927 年筹建第四中山大学并任理学院院长。1928 年协助创办中央研究院物理研究所并任专任研究员。1936 年任浙江大学文理学院院长和理学院院长。1918～1950 年兼大同大学教授、理工学院院长、校长。1946～1949 年再度赴英美考察，并率一批中国学者在英攻微波雷达技术。建国后，先后任唐山交通大学、北洋大学、南开大学教授。

胡刚复的重要贡献是在中国开拓物理学的教育事业。他在南京高等师范学校创建了中国最早的物理实验室，使中国物理教学走上正轨；嗣后在东南大学首先开设近代物理课程；在浙江大学把理学院办成国内著名的理学院之一。他先后培养出中国自己的一大批物理学家，如吴有训、严济慈、赵忠尧、钱临照等，备受他的几代学生的称颂，他是电位、熵等大批物理学名词的最早定名者，也是中国近代度量衡制的最早制定者，订出长度单位 1 尺=1/3 米，质量单位 1 斤=1/2 千克，时间单位 1 秒，使中国度量衡与国际单位制间有了简单的换算关系，为中国沿用公制开辟了道路。

胡克 (Robert Hooke 1635 ~ 1703) 英国物理学家。生于弗雷斯沃特。曾在牛津大学学习，并在该校给玻意耳当助手。1665 年起任格雷沙姆学院物理学教授。1677 ~ 1683 年任英国皇家学会秘书。

主要从事热学、光学和力学方面研究，并作出贡献。1659 年，协助玻意耳，改进了盖利克发明的空气泵，改进后的空气泵和近代使用的空气泵形式相近。1665 年，与惠更斯合作，确定了温度计的固定点——冰的熔点和水的沸点，并建议以水的结冰温度为温度计的零度。他还认为，热是物质粒子机械运动的结果。

1665 年，改进了显微镜，这使他能够进行一系列显微镜研究，特别是在光束中观察薄膜（肥皂膜、油膜等）的彩色，使他给出了有关颜色的解释。他反对牛顿的光的微粒说，反对白光是由单色光组成的说法。1672 年，完成了关于光的衍射的实验，这些实验支持了光的波动说，从而也使他成为光的波动说的创始人之一。

1678 年，在讲演集《态势的恢复》中首次公布了固体弹性定律：有多大的伸长量，就有多大的力。这个定律经过柯西于 1822 年引入应力和应变这一对概念，及格林于 1837 年的改进，成为胡克定律的现代形式，奠定了弹性理论和材料力学的基础。胡克虽然没有发现万有引力定律，但他的研究和想法对牛顿发现万有引力定律却是有力的促进。1674 年，在《试证地球周年运动》的报告中，提出一切天体都具有倾向其中心的吸引力或重力。1679 年，在给牛顿的信中，进一步提出引力与距离的平方成反比。

胡克有精湛的实验才干。有人认为，17 世纪每一项重要仪器的发展，几乎都有他的贡献，例如真空泵、钟表、显微镜和望远镜中的十字丝、光栅等。他的物理思想也很活跃，但数学素养不够，因而对问题研究往往不够透彻。于是他在钟摆、引力、光学等方面都没有像惠更斯或牛顿那样获得深入而系统的理论成果。著有《显微图集》（1665），《胡克遗著》发表于 1705 年。胡克定律 (Hooke law) 在弹性限度内，物体的应变与应力成正比变化。它是材料力学的基本定律之一，由英国物理学家胡克于 1660 年发现（1678 年发表），故名。严格地说，自然界中的任何物体都不是刚体，在外力作用下其质点之间距离都会发生一定变化，引起物体形状的改变，这种变化称为形变。若外力撤去，物体形变也随之消失，因而恢复原来形状，这种物体称为弹性体，相应的形变称为弹性形变。实验表明，在弹性形变条件下，形变的大小  $x$  与作用力  $F$  成正比，即

$$x=kF,$$

$k$  为比例系数，由物体材料性质决定。实验还表明，同一作用力作用于不同截面和长度的物体，其形变也不相同，但单位面积上的力  $\left( = \frac{F}{S} \right)$  与长度的相对变化  $\left( = \frac{\Delta l}{l} \right)$  成正比，即

$$= \frac{1}{E},$$

为弹性系数， $E$  为弹性模量（或称杨氏模量），两者互为倒数，均由材料性质决定。

互感系数 (coefficient of mutual induction) 简称“互感”。表示两导体回路间产生互感应能力的物理量。常用符号  $M$  表示。等于一回路中电流强度的时间变化率为 1 单位时，在另一回路中产生的感应电动



势，即

$$M = \frac{\varepsilon_1}{dI_2/dt} = \frac{\varepsilon_2}{dI_1/dt} ,$$

式中 1、2 是回路的序号， $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $dI_2/dt$  等均以绝对值计。往往也定义互感等于一回路中的电流强度为 1 单位时，在另一回路所产生的磁通链数，即

$$M = \frac{N_1 \Phi_{m1}}{I_2} = \frac{N_2 \Phi_{m2}}{I_1} ,$$

式中 N 为匝数， $\Phi_m$  为每匝数线圈中的磁通量。对于介质的磁导率不随电流的磁场发生变化的两个确定回路系统，上述两定义式是一致的。此时的互感决定于两回路的形状、大小、线圈匝数、相对位置以及回路空间的介质分布。在国际单位制中，互感的单位为亨利，符号为 H。

**互感现象** (phenomenon of mutual induction) 简称“互感”。一回路中的电流发生变化时，在邻近的另一回路中引起感应电动势的现象。所引起的感应电动势称互感电动势。若两回路的形状、大小、相对位置以及回路空间介质分布都不随时间变化时，则一回路中的互感电动势将与另一回路中的电流的时间变化率成正比，即

$$\varepsilon_1 = -M \frac{dI_2}{dt} ,$$

式中 1、2 是回路的序号，比例系数 M 称为该两回路间的互感系数。负号则是楞次定律所要求的，它表示互感电动势总是反抗对方回路中的电流在自身回路中引起的磁通量变化。

互感现象在邻近回路之间总是存在的。互感现象有广泛的应用。例如，变压器就是利用互感原理制成的。实验室中使用的获取高压的感应圈、测量强交流电的钳形电流表等也都属于互感器。在电工、无线电和电子技术中，各种类型的互感器担负着信号的传输、放大、缩小、转移、倒相等功能。另一方面，互感现象有时十分有害，特别在电子技术中尤为突出。元器件间的互感耦合会产生干扰，甚至不能正常工作，引起损伤或损坏。密集电路中各回路间的互感会使电路的噪声加剧。可以采用多种方法减少互感，包括磁屏蔽、改变元器件间的相对位置、调整电路计等。

**滑线变阻器** (rheostat) 一种线绕可变电阻器。它是由康铜丝(或新康铜丝)在瓷管上绕制而成。滑线变阻器在实验室和电力设备中，常用来调节电压或电流。也可用作负载。选用滑线变阻器时应注意电阻值和额定电流值。在超过额定电流情况下过载使用，会引起过热，使绕线松动，影响正常使用。

**华氏温标** (Fahrenheit thermometric scale) 参见温标。

**化学热力学** (chemical thermodynamics) 研究化学变化中能量转换以及与能量转换有关的物质参数间相互关系的一门学科。研究内容包括化学反应中能、热、功之间的相互转化，物质在各种条件下的物理和化学变化。

化学热力学是伴随着热力学的发展而开始的。将热力学应用于化学过程，就形成了化学热力学。热力学在化学过程的应用中，主要解决两大问题：化学过程中能量转化的衡算。如某一种燃料燃烧时，能释放多少能

量？燃烧时的最高温度是多少？因要保证化工生产顺利进行，必须计算出每生产一定数量的产物时，应该移去多少反应热，或者补充多少能量，才能控制反应器的温度。这些都涉及到能量衡算。判断化学反应进行的方向和限度。如为了试制某一产品，需要判断根据所建议的某条合成路线，能否制得所需的产品，这里涉及的是反应的方向。如果该反应能行，则其最大产量是多少，应该在什么条件（温度、压力、浓度等）下才能提高产量。又如试制一个新的化学电源，它的电动势是多少？能提供的电能最多是多少？这些问题都属于反应的方向与限度。由于热力学是一种宏观理论，不需要对物质的内部结构作出某种简化的假设，就能得到许多普遍有用的结论，因此在研究化学反应中是一种有用的理论工具。但热力学的局限性在于只能指出化学反应向某方向进行的可能性，而无法指出完成该反应所需的时间以及反应历程。所以热力学只能计算出反应达到平衡时的最大产量，而不能告诉我们在某有限时间内的实际产量。

《淮南子》及《淮南万毕术》中的物理知识（Ph-yysics knowledge in Huainanzi and Huainan-wanbishu） 《淮南子》及《淮南万毕术》均是中国西汉时期的淮南王刘安及其门客的著作。前者是哲学书，后者内容十分庞杂，两者都包含物理知识。

声学方面。《淮南子》记述：“风雨之变，可以音律知也。”用现代知识解释，就是大气湿度变化会引起琴弦伸缩，从而使它所发的音调改变。该书还论述了七音十二律及其相生之说，提出了音乐声学中一些值得探讨的问题，在音律学上具有一定的意义。

热学方面。《淮南万毕术》中说：“取鸡子，去其汁，然艾火纳空卵中，疾风因举之飞。”即利用鸡壳，中间用艾绒点火燃烧，利用热空气浮升的原理，使蛋壳迎风飞上天。现据实践和计算，这样的东西是飞不起来的，但它却说明中国古代对利用火所产生的热空气举起重物已有了可贵的设想，并进行试验。

光学方面。《淮南子》写道：“阳燧金也，取金杯无缘者，熟摩令热，日中时以当日下，以艾承之则燃得火也。”这是中国典籍中第一次介绍的阳燧使用方法。《淮南万毕术》写道：“削冰令圆，举以向日，以艾承其影，则火生。”用冰作透镜，会聚太阳光取火，这是一项十分精巧的发明。又云：“取大镜高悬，置水盆于其下，则见四邻矣。”这是潜望镜的雏形。

磁学方面。《淮南子》指出：“若以慈石之能连铁也，而求其引瓦，则难矣”，“及其于铜则不通”。表明早在中国汉代已知道磁石虽能吸铁，但不能吸引其它一些物质，这是用磁石辨认物质的一种最初尝试。《淮南万毕术》还指出：“取鸡血与针磨寿之，以和磁石，用涂棋头，曝干之，置局上，即相距不休。”最早记载了同性磁极相斥的事实，并试图以胶合磁石粉末的办法来制作人造磁体。

还原论（reductionism）把高级运动形式归结为低级运动形式，用低级运动形式的规律去代替高级运动形式的规律的一种观点。如法国哲学家拉美特利主张把一切运动都简单归结为机械运动，并得出“人是机器”的结论。他继承和发展笛卡儿的动物是机器的观点，认为人也是机器，人与动物没有本质的区别，人只是多几个齿轮，多几条弹簧，更精巧一些而已。他的《人是机器》一书，既是18世纪法国第一部以分开的无神论形式出现的系统的机械唯物主义的著作，也是宣扬还原论观点的用低级运动形

式的理论去概括高级运动形式的本质的著作。辩证唯物主义认为，自然界的运动形式有高级、低级之分；高级运动形式包含低级运动形式，但不能归结为低级运动形式；低级运动形式是高级运动形式的基础，但低级运动形式的规律不能代替高级运动形式的规律。

**环境 (environment)** 在环境科学中，环境是指除人类以外的所有外部自然因素及其对人类的生存、发展产生的影响。从生态学角度讲，环境是一切有机体生存所必需的外部条件的总和。用环境工程术语来表达时，环境可以指全球范围，也可以指某一局部区域。

全球环境是由大气圈、水圈、岩石圈、生物圈和太阳辐射能所组成。大气圈是包围地球外部的的气体圈层。它是由空气、水汽、悬浮着的液体微粒及固体杂质组成的混合体。地球上原始大气圈几乎是和原始地壳在同一过程中形成的。当原始大气圈和原始水圈在地球上出现的时候，地球上还是一个没有生命的世界。但是，自从地球上有了水和空气，就给生命的产生和生物的发展创造了条件。大气圈供应生物呼吸，并防止外层空间的宇宙线对生物的伤害。水圈是由海洋、河流、湖泊和溪流以及地表水所组成，它供应生物以水分。岩石圈是包围着地球的土壤、岩石圈层，为人类及其他生命有机体的生存与繁殖提供了基地。生物圈是地球表面有机体及其生存环境，这是太阳系九大行星中地球特有的圈层，它含有可维持人类生命的物质条件。阳光为生物生命活动提出了能源。

人类与环境的关系极其密切，为了维持生命，人类需要从周围环境中获得空气、水和食物，同时也将气态、液态和固体废料排放到周围环境中去。周围环境能够接收和吸收人类和动、植物生命所产生的废料，扩散森林火灾和人类炊烟等所产生的烟气，稀释动植物、人类粪便等到溪流和河中以及将死去的动植物肢体转化到土壤中使之含有养分以增加土壤肥力，从而维持人类生活和生产的需要。这种人类与环境的协调平衡关系已维持了千百万年。只是近二、三百年来，尤其是 19 世纪末和 20 世纪初，人们的注意转向了超越生存所需的其它需求。汽车、电器及经过处理的食物和饮料开始普及。与自然生存所需不同，它们都是与处理、提炼、制造等工业过程相联系。虽然这些需求已成为现代工业社会的主要推动力，但同时它所产生的废料却难于被周围环境所吸收。再加上世界人口的猛增，源于人类及其活动的大量污染物已使得周围环境处于超负荷运行状态。这就是人类对环境的冲击，造成了环境污染与公害问题，反过来这又引起了环境对人类的惩罚。水、空气、陆地、生物等环境要素都可以作为有害的影响来损害人类的健康和生存。所以人类在利用、改造环境的同时，必须注意保持与周围环境的平衡关系，按环境科学和生态平衡的客观规律办事，使人类和环境两者协调发展。

**环境保护 (environmental protection)** 利用行政、法规、教育和科学技术等措施，合理开发与使用自然资源，防治环境污染和其他公害，保护自然环境，发展有用的自然资源。

随着工业的飞速发展，在许多国家产生了日益严重的环境污染问题，并由环境污染造成了公害。到了 60 年代，环境公害已发展成世界性的重大问题。1972 年 6 月联合国在瑞典斯德哥尔摩召开人类环境会议，世界各国政府共同讨论当代面临的环境问题，探讨全球的环保战略。许多国家将环境保护、消除公害列为急需解决的重大课题，对环境保护采取一系列重大

措施。不少国家先后建立环境保护机构，负责环境保护的行政管理工作，制定法律、规章制度等。同时，运用与推广现代科学技术控制污染，例如建立大、中型的污水处理厂进行二级生化处理；改革生产工艺，不排放或少排放废物；建立闭路循环用水系统等以保护水源。此外，由废弃物的单纯处理转向废物资源化，如用垃圾发电。发达国家于70年代后期，尤其是80年代初，对基础性环境问题开展了多学科的综合研究，特别重视生态环境的研究。在制订国家或地区的经济发展规划的同时，结合考虑地球物理系统、生态系统和社会经济系统等各个方面，达到既发展经济又维护生态平衡的目的。各环保机构在监测调查和科学研究的基础上制定出各类环境标准及法规，如《河流污染防治法》、《水资源法》、《废水税法》等以保持水质。制定合理的废料排放标准，建立环境监测网络，以了解环境质量状况，评价环境要素，监督执行环境法规。

我国于1973年召开第一次全国环境保护会议，1974年成立了国务院环境保护领导小组，1982年成立城乡建设环境保护部。1984年成立国务院环境保护委员会，而后又建立了国家环境保护局。先后颁布了《中华人民共和国环境保护法（试行）》、《海洋环境保护法》、《草原法》、《矿产资源法》、《风景名胜区管理暂行条例》等重要法律和条例。

由于环境保护的各项措施的实施，环境污染状况在一些国家有所改善，但仍有相当多的地区和国家的环境污染尚未得到有效的控制。这种状况还需依靠环保政策、科学管理来改变，使发展生产与改善环境协调一致。

**环境物理学**（environmental physics）研究各类物理环境对人类的影响及其评价，以及消除影响的技术途径及控制措施，旨在为人类创造一个适宜的物理环境的科学。环境科学中的一个分支。

人类所生存的环境可分为社会环境和自然环境两大部分。物理环境是自然环境的重要组成部分。它是由那些形式表现为能量的交换与转化的物质运动所构成，如机械运动、分子热运动、电磁运动等。具体来讲，就是声、光、热、电等人类生存所必需的环境要素。这些要素是永远存在的，并且对人无害，只是在环境中的含量过高或过低的才造成对人类的危害。如电焊强光对人的视觉功能的损害，大电流切断时的强脉冲放电对电子仪器正常运行的干扰等。但是这些物理性污染只是局部性的，而且一旦污染源消除，污染也随即消失。

物理环境又分为天然环境和人工环境两大类。火山爆发、地震、台风、雷电等自然现象会产生振动和噪声，在局部地区内形成天然声环境和天然振动环境。太阳黑子活动引起的磁暴现象造成天然的电磁干扰环境。天然光环境则是由直射日光和天空散射光形成的，由于气象因素及大气污染程度的差异，各地的天然光环境特性不同。自然热环境取决于太阳辐射状况，也与大气和地表之间的热交换有关。除了有些天然环境外，人类的生产实践活动又为自身造成了一个人工的物理环境，这也是环境物理学的主要研究对象。由于物理性污染程度是由声、光、热、电等在环境中的量决定的，所以环境物理学一般更侧重于物理现象的定量研究。

**简史** 人们研究声、光、热、电等对人类生活和生产活动的影响始于20世纪初，通过研究逐渐形成在建筑物内部为人类创造适宜的物理环境的学科，即建筑物理学。

随着城市工业和交通运输业的发展，物理性污染日益严重，在建筑物

外部的环境对人们的生活、生产也产生了危害，因而促进了与物理学各分支学科对应的物理环境的研究。其中除了研究室内音质改善的建筑声学以外，还建立了减少噪声干扰与振动控制技术这一分支学科。20 世纪的 30 ~ 40 年代，国际上还组织、开展了抗电磁干扰问题的研究，在电磁学各分支学科的基础上发展了环境电磁学。

环境物理学就是在各分支学科分散研究并取得一定成果的基础上逐渐汇拢而成的一门新兴边缘学科。

**学科内容** 环境物理学主要包括环境声学、环境振动学、环境光学、环境热学、环境电磁学等研究分支。

环境声学主要研究对人类需要的声环境与人类活动的相互作用。内容包括声的产生、传播和接收；声对人类的心理效应和生理效应；声环境的测试和评价、改善和控制技术；噪声控制标准和管理措施以及厅堂音质等。

环境振动学研究有关振动的产生、测试、评价以及旨在消除振动危害的隔振、防振等措施；研究振动环境及其对人类的影响。

环境光学研究适宜于人类活动的光环境，包括天然光环境和人工光环境。前者的研究主要是对天然光进行观测、统计、分析，为建筑和环境工程提供数据、资料，研究日光的控制方法、光学材料和光学系统以及日光照明的充分利用。后者则主要研究和控制对人类生理有益的人工光源的光谱。

环境热学研究适宜于人类活动的热环境，揭示热环境和人类活动的相互作用，控制热污染。与环境光学一样，它还要创造出比自然环境更好的人工热环境以满足人类身体上、生理上和心理上的需要。

环境电磁学的研究内容是电磁干扰的产生、它对人类生产和科研活动的影响、对人类生理的危害以及如何防治和消除电磁干扰；电磁辐射在环境中的分布特点和规律；电磁环境质量的监测、评价、控制及安全标准的制定。

环境物理学的基础知识除了声学、机械振动学、光学、热学和电磁学外，还需要生理学、心理学、音乐、建筑学、医学、社会学等方面的知识。迄今为止，环境物理学就其自身学科体系而言，尚未完全定型。在它的各分支学科中，发展也不平衡，其中环境声学发展较快、较全面，近年来在理论和实验技术方面都有重大进展。

**环境遥感** (environmental remote sensing) 利用各种遥感仪器了解环境的形状、种类、性质及其变化。表面看来，遥感仪器与所研究的环境目标之间没有直接接触，但实际上，在遥感仪器和被测目标之间还是有一定的物理联系的，其媒质就是电磁波、声波以及与重力、磁力有关的力场。目前使用的遥感概念是指从所获得的电磁波信息来研究目标物。“环境遥感”一词最早是在 1962 年的国际科学遥感讨论会上被引用的。

遥感的主要传感手段有摄影方式和非摄影方式两种。摄影方式是利用光谱的可见光、近红外波段及多波段对目标物进行摄影。它是应用得最广泛、最有用的遥感手段。人们在分析地球照片方面已很有经验。通常，摄影是由短期运行的飞船如阿波罗号、空中实验室等和长期运行的不载人飞船如卫星等来完成的。空中摄影对于描述和辨认地球各种特点提供了有价值的信息。摄影方式的主要优点是信息存储能力大、地面分辨率高、灵敏度高、可靠性好。但它只能在白天曝光，此外，云会使目标物的细节模糊。

利用多个波段的摄影方法称为多光谱摄影，即在底片上记录从地物表面上所反射的一些已知波段的能量。而波段的选择应使地物照相获得最大反差，从而也增加了系统的有效光谱分辨率。这种方法可以收集大量特殊信息。非摄影方式是指多光谱扫描、雷达探测等。多光谱扫描系统是一种先进的多光谱技术，它是在所选择的几个波段处用光电方法记录被测目标的光谱反射率。这类仪器已在地球资源技术卫星上使用。它对每一像素（即最小可分辨的单个区域）的光谱反射率可实时地用电子学方法传递到地面接收站或储存在磁带内到接收站上空再发送。如果扫描波段在 8~14 微米，就是红外辐射仪，可用来遥测河流、湖泊、海洋的水体污染和热污染。由于可见光和红外波段受云、雨等大气条件的影响较大，因此微波辐射计作为一种全天候测量仪器，在海洋、地表测量方面有着广泛的用途。激光雷达、微波雷达是分别发射光学波段和微波波段的电磁波，然后接收其回波的主动遥感系统，也是大气、地面等环境遥感的常用手段。遥感仪器的站台有地面的、机载的和卫星的三类。最后一类即为气象卫星、海洋卫星等。卫星遥测能从宇宙空间对环境进行几乎是同时的、大面积的监测，可以获得大量有用的环境资料，是非常有效的环境遥测手段。

遥感技术在环境科学中主要用于：大气环境遥感、陆地环境遥感和海洋环境遥感。除了卫星技术外，地面遥感和机载遥感系统也是大气、陆地环境遥感的辅助手段。如激光雷达测云底高度，监测大气中的痕量气体及污染气体，微波雷达测雨滴、云滴、冰、雪等。地面上的地形分布、植被情况及地表水系图等，也可以用机载测视雷达来获得。

环境影响评价（environmental impact assessment）对一个建设项目或一种土地利用方式将来可能给环境带来的影响作出评价，进行开发建设项目的环境可行性研究。

环境影响评价的对象主要是大型工业开发建设项目（发电厂、化工厂等）、高速公路、飞机场、大型水利工程、森林开发等。它是一个在经济、环境、社会三者之间进行平衡决策的手段，也为工程决策提供了依据，是一项十分重要的环境保护措施。由于所评价的对象是开发项目及其环境所组成的大系统，故环境影响评价具有系统性、多学科的特点，为了使应考虑的环境因素都包括在研究范围之内，必须采用系统工程和系统分析方法。

环境影响评价的主要内容有：拟建工程剖析。包括建设规模，主要原料、燃料，水的用量及来源，主要生产工艺过程，废气、废液、废渣的排放量及排放方式等。区域环境条件，有关环境的变化规律。包括周围地区的地形、地貌、水文、气象等情况，周围地区的森林、草原、矿藏、野生动植物等自然资源状况，周围地区的自然、风景等保护区情况，居民生活区及其他厂矿企业分布情况等。工程主要环境影响。主要是工程建成投产后对上述各类周围区域可能产生的影响，如废物排放对周围地区的环境质量影响程度和影响范围，电磁辐射、噪声对生活居住区的影响程度和范围等。影响的评价。根据环境质量标准评价受工程影响后的环境质量，其影响的长、短期性，可恢复性，对生态系统的影响属主导性还是诱发性。防治对策分析及监测系统的建立。防治对策分析的提出是针对所产生的影响是长期性的、不可恢复的或主导性的工程建设项目。为了验证环境影响评价的结果和掌握环境质量评价区域的状况，需建立监测系统。

**环境质量评价** (environmental quality assessment) 根据一定的评价标准和评价方法对某区域的环境质量进行调查、分析、评价, 是对环境质量优劣的定量评述。环境质量评价是一种认识和研究环境的科学方法, 其目的是控制环境污染, 为制订环境规划、搞好环境管理提供科学根据。

环境质量评价可分为以下几类: 按评价的时期分, 有回顾评价、现状评价和预测(影响)评价; 按环境要素分, 有单个要素评价、部分要素联合评价、整体环境的综合评价; 按评价的区域分, 有城市环境评价、流域环境评价、海域环境评价和全球环境评价等; 按评价对象分, 有自然环境评价、农业环境评价、风景游览环境评价; 根据评价参数选择, 有化学评价、物理评价等等。

环境质量评价的内容主要有三个方面: 污染源的调查与评价, 找出评价区内的主要污染源及主要污染物; 环境污染现状, 污染的时空变化规律及污染物在环境中的转移; 环境污染的影响分析, 包括污染引起的生态效应、对人体健康的影响以及经济损益。

环境质量评价的原理是选择一定数量的评价参数, 将其转换为可比指标, 最后进行加权综合, 得到环境要素的质量指标。

**回声** (echo) 声波经障碍物反射或散射回来同原发声能辨别的声音。若回声同原发声传到入耳的时间相差二十分之一秒以上, 且强度衰减不是很大时, 就能够清楚地听到回声。回声是山谷中或大厅内常有的现象。例如, 山间放炮, 虽然发声时间极短, 但人耳听到的却是炮声不绝, 这就是回声所造成的。回声会妨碍听音, 是影剧院或大厅等建筑中必须避免的缺点。但短时间的回声(与原发声的时间间隔在二十分之一秒以内) 不但妨碍听音, 反而有使声音加强的作用。室内听音较广场响亮, 就是这个道理。从广义上讲, 回声是指可与直达声区别的一切反射或散射回来的声音。在许多科学技术问题上, 利用回声现象制成回声测深仪、水声定向器、超声探伤仪等, 用于矿床勘探、材料探伤、水深测量、鱼群探测等。

#### 回转仪

**回转仪** (gyroscope) 又称陀螺仪。利用物体在无外力矩作用下高速旋转时转轴方向不变的特性所制成的仪器。回转仪的主要部件是一个支于座架上的常平架和一个支于常平架上能绕对称轴高速旋转的物体。这个物体又称为陀螺或转子。常平架由内圈 B 和外圈 A 组成。固定在 B 圈直径两端的两个短轴 a 和 b 套在 A 圈某一直径两端处的两个轴承内, 使 B 圈可以绕着 A 圈上的 ab 轴线自由转动。固定在 A 圈上的两个短轴 c 和 d 则套在框架上的轴承内, 使 A 圈可绕 cd 轴线自由转动。ab 和 cd 互相垂直。高速旋转物体可绕 B 圈上的轴线 ef 旋转, ef 与 ab 垂直。这种机构可以被转子的轴在空间中自由地取任意方向。当转子转动时, 根据角动量定理, 转子的转轴在空间取不变的方向。因此, 支架的取向若有任何变动, 都不会影响转子转轴的方向。回转仪通常用来作为定向装置, 例如回转罗经等; 或稳定装置, 例如陀螺稳定器等。

**汇编语言** (assembly language) 面向机器的低级程序设计语言, 用符号表示。由基本字符集、语句(即指令)、标号以及它们的使用规则所组成。不同类型的机器所配的汇编语言各不相同, 不能通用。

汇编语言的基本字符集通常为 26 个英文字母, 十个数字 0~9, 算术

运算符+—\*/等，有的还包括关系运算符：GT，GE，LT，LE，EQ，NE，逻辑运算符：NOT，AND，OR，XOR等。

汇编语言的语句（指令）可分为如下三类。用符号助记的机器指令，简称为助记符。每一条机器指令都有一个对应的助记符，例如一条加法指令对应的助记符为ADC\$0B，其意义是累加器的数与十六进制0B房间内的数和上一位运算结果的进位值相加，结果再存在累加器中。伪指令（用于向汇编程序说明有关信息）。宏指令（程序员自己定义的指令）。

汇编语言把指令、地址和数据都加以符号化，因此比二进制的机器语言容易懂，容易记，容易修改。但用汇编语言写的程序必须经汇编程序翻译以后才能为机器所接受。

与高级语言相比，用汇编语言编制的程序具有节省内存储器、执行速度快，并可精细地控制和使用机器资源等优点，因而常常用于系统程序、实时控制、测量程序和常用标准子程序的设计。特别在微型机应用系统的设计中，汇编语言是最常用的程序设计语言之一。

汇编语言程序（assembly language program）用汇编语言按一定格式编写的程序称为汇编语言程序。要编写出正确的汇编语言程序必须掌握程序设计方法，熟悉程序的基本结构和汇编语言的使用。

程序的基本结构有线性结构、分支结构、循环结构和子程序结构等，任何程序都由这些基本结构所组成。

汇编语言程序是用汇编语言书写的，程序中只能使用汇编语言所规定的各种指令、变量。常数、标号、表达式的构成必须符合汇编语言的语法规则。通常汇编语言程序由若干语句构成，最后用END伪指令结束。每个语句行分成四个区：

	标号：	操作码	操作数；	注解
例如	LD1：	BEQ \$	293F；	结果为零转到 293F 地址

标号即符号形式的地址，用来标志转向或调用入口，标号不是每个语句都必须有的。操作码可以是各种助记符、伪指令或宏调用指令。注释部分可作为文本的说明，汇编时不作处理，自动略去。

惠更斯（Christian Huygens 1629 ~ 1695）荷兰物理学家、数学家、天文学家。生于海牙。曾在莱顿大学和布雷达学院学习。1663年被聘为英国皇家学会第一个外国会员。1666年刚成立的法国皇家科学院选他为院士。1681年起居住海牙。

主要对力学的发展和光学的研究作出了重要贡献。1652年，开始弹性物体碰撞的研究。1665年，发明摆钟，研究了它的理论和一系列有关问题。发表了《摆钟》（1658）及《摆式时钟或用于时钟上的摆的运动的几何证明》（1673），提出了著名的单摆周期公式，解决了物理摆的振动中心的确定，推出了有关圆周运动及离心力的若干重要结果，包括向心加速度概念和向心加速度公式，从而有助于牛顿得出万有引力定律。研究了弹性体的碰撞，成为1668~1669年英国皇家学会为解决对心碰撞问题悬赏征文的得奖者之一，首次提出了这种碰撞前后的  $mv^2$  守恒。

惠更斯是波动光学的创始人。1678年，在他提交给巴黎科学院的回忆录中，详细阐述了光的波动理论。出版了《光论》（1690）一书，说明光的传播机制。提出他的著名原理：光波发射时，传播光的每一物质粒子不



只把运动传给前面的邻近粒子（与原始粒子和光源位于同一直线上），而且还应传给周围所有其他和自己接触并阻碍自己运动的粒子。因此，在每一粒子周围就产生以此粒子为中心的波。该原理被称为惠更斯原理，是波动光学中的一个重要原理。以此原理为基础，引入了子波概念，推导出了光的反射和折射定律，解释了冰洲石的双折射现象。1678年，发现光的偏振，但未能解释。

惠更斯在热学方面也有成就。1665年，与胡克合作，确定了温度计的固定点——冰的熔点和水的沸点。1667年，表述了水结冰时膨胀的现象。1673年，首次提出利用火药、风力等为动力的各种机器雏形。在天文学方面的贡献有：1659年，研究了引力问题，并推证地球为扁球形。同年，改进了望远镜，特别是物镜；制成一种效果很好的目镜，被称为惠更斯目镜，至今通用。1665年，利用自己制成的望远镜发现土星光环和土星的第一颗卫星——土卫六，确定了它绕行星转动的周期。著有《惠更斯著作全集》（共22卷）。

**惠更斯-菲涅耳原理 (Huygens-Fresnel-principle)** 菲涅耳对惠更斯原理的发展。惠更斯用次波概念来描述波的传播。菲涅耳进一步考虑了次波振幅按相位不同而叠加的原理。惠更斯-菲涅耳原理可表述为：波面S上每个面元dS都可以看成新的波源，它们发出次波，空间某一点P的振动是所有次波在该点的相干叠加。

设dS处的光振动为 $dS \sin \omega t$ ，dS为面元的面积，现在也用来作为次波的振幅，因为两者成正比。该次波到达P点时，其振幅与传播距离r成反比，且与dS的倾角有关。所谓倾角是指面元dS的法向与dS到P点连线之间的夹角。P点的振幅随r的增大而减小，可用k( )表示这种关系。

次波到达P点处的相位为 $\frac{2\pi}{\lambda}r$ ，所以P点的光振动为

$$A = \int_s dA = C \int_s k(\theta) \frac{\sin(\omega t - Kr)}{r} dS,$$

式中C为比例系数， $k=2\pi/\lambda$ 为波数。

菲涅耳在1818年建立了这个理论。1882年基尔霍夫用严格的数学理论证明倾斜因数

$$k(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos\theta),$$

当 $\theta = \pi$ 时， $k(\pi) = 0$ ，即没有后退的次波。基尔霍夫还证明比例系数

C的表达式为 $C = \frac{1}{\lambda} e^{-i\frac{\pi}{2}}$ 。

**惠更斯原理 (Huygens Principle)** 描述波阵面在媒质中传播规律的原理，由荷兰物理学家惠更斯于1690年首先提出。惠更斯原理认为，在波传播的任何时刻，波阵面上的每一点都可看作新的波源，它们都会发出球面次波。次波所形成的包络面又形成新的波阵面。惠更斯原理能够解释同一媒质中波阵面的单向传播问题，也可以解释光的反射和折射定律。运用惠更斯原理可以证明，在光密媒质里，光波的传播速度应当比在光疏媒质里小。这个正确结论否定了根据牛顿的微粒说所得到的推论，为确立光的波动说起了积极作用。惠更斯原理也可以用来解释波的衍射现象。

惠斯通 (Charles Wheatstone, 1802 ~ 1875) 英国物理学家、发明家。多年在伦敦任物理学教授。主要贡献在电磁学方面。1834 年, 通过对电流速度的测量, 得出电流速度约为光速的一半, 为否定电的超距作用观念提供了实验依据。1837 年, 发明了实用电报机, 并在英国获得广泛使用。同年, 与法拉第、亨利等共同进行了自感现象的实验。1843 年, 为了解决精确测量电阻的问题, 发明了一种由电阻元件联结成的桥式电路——单臂电桥, 又称惠斯通电桥。该电桥由四个臂 (支路) 组成, 其中一个臂连接待测电阻, 其余三个臂连接标准电阻, 在电桥的一个对角线上连接灵敏的检流计, 在另一对角线上连接直流电源。测量时, 调节一个臂或几个臂的电阻, 使检流计中无电流通过, 电桥达到平衡时, 就可求出未知电阻, 它的测量范围为 0.1 欧到 1 兆欧, 为电阻的精确测量提供了有用的工具。1845 年, 获得了用电磁铁代替永久磁铁的专利权, 解决了发电机发展的一个关键环节。1866 年, 发明了自激发电机, 从而完成了交流和直流发电机的最后定型。

惠斯通电桥 (wheatstone bridge) 是测量电阻最准确的仪器。其原理如图所示。图中  $r_1, r_2, r_3, r_4$  为桥臂电阻,  $R_g$  为检流计内阻,  $R_B$  是可变电阻器和电池电源的内阻之和。根据计算可知道流过检流计的电流为:

$$I_g = E_B / [R_B + R_g + R_1 + R_2 + \frac{1}{R_3} (R_B R_2 + R_1 R_2 + R_1 R_g + R_B R_g)],$$

式中,

$$R_1 = \frac{(r_1 + r_2)(r_3 + r_4) - (r_2 r_4 - r_1 r_3)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4},$$

$$R_2 = \frac{(r_1 + r_4)(r_2 + r_3) - (r_2 r_4 - r_1 r_3)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4},$$

$$R_3 = \frac{r_2 r_4 - r_1 r_3}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}.$$

当平衡指示器两端电位相等时, 即  $I_g=0$ , 则  $R_3=0$ , 即  $r_2 r_4=r_1 r_3$ 。

由上式可知, 电桥的平衡条件仅仅是由桥臂各参数之间的关系确定的, 而与电源及指零仪内阻无关。所以电桥线路对电源稳定性的要求可以降低, 这是补偿法线路无法做到的。

#### 惠斯通电桥

从图可以看出, 若将电源和指零仪位置互换, 指零仪两端的电位仍会相等, 即平衡条件与电源及指零仪位置无关。

从平衡条件 ( $r_2 r_4=r_1 r_3$ ) 的对称性可得, 平衡电桥的相对臂的位置互换时, 平衡条件不变。从平衡条件可知, 一个对角线的状态 (开路、短路、接有某一个电阻) 不会影响另一对角线的状态 (电流的大小)。

混沌 (chaos) 动力学系统在失去稳定平衡后可能出现的一种貌似混乱、其实“乱中有序”, 且具有简单规律性的运动状态。在这类动力学系统中出现的随机性, 与大量粒子无规则热运动中出现的随机性是不同的, 它们之间的明显区别在于动力学系统的随机性会在只有几个自由度的系统中显露出来, 而且在描述这类系统的方程中没有任何外在的随机因素, 因而又称为内在的随机性。这类随机性的一个特征是, 如果两个初始

条件只有“差之毫厘”的微小偏差，则由它们定出的方程的解却以指数增长的方式随时间而互相迅速分离。这种特征现在被广泛称为“对初始条件的敏感性”。美国气象学家洛仑兹在一次演讲中把这种行为形象地比喻为一只蝴蝶在巴西拍动一次翅膀，会在美国得克萨斯州引起一场龙卷风，因而又称“蝴蝶效应”。在一大类非线性确定性方程中出现的这种随机性就称为“混沌”。

受周期力驱动的阻尼摆的运动，是可能出现混沌的一个简单例子。它的运动方程是

$$\ddot{\theta} + \gamma \dot{\theta} + g \sin \theta = A \cos \omega t,$$

是摆的偏转角， $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 分别是 对时间的一阶导数和二阶导数，

是阻尼常数， $A \cos \omega t$  是幅值为 A、频率为  $\omega$  的周期驱动外力矩。由于  $g \sin \theta$  ( $g$  是重力加速度) 的存在，这是一个非线性的运动方程。在固定阻尼的外力作用的情况下，当外力矩的幅值 A 小于某个阈值  $A_c$

### 图 1 摆的运动

时，摆的运动呈现周期行为（见图 1(a)）。一旦当  $A > A_c$  时，摆的运动就由周期运动走向一种似乎很混乱的非周期运动（见图 1(b)）。尤其当摆开始处于  $\theta = \pi$  即不稳定平衡点上时，整个摆的运动明显体现出对初始扰动的敏感性，由此产生的非周期运动就是一种混沌运动。

1963 年美国气象学家洛仑兹首次从两块无限大平板间的热对流问题中得出了一个一阶非线性常微分方程组

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -10x - 10y, & \dot{y} &= 40x - y - y - xz, \\ \dot{z} &= -\frac{8}{3}z + xy. \end{aligned}$$

他发现，这个方程组体现的运动轨道显示出令人注目的行为。一方面轨道随时间逐渐被吸引到一个有界区域内，另一方面任意两个初始靠近的轨道随时间以指数形式分离开去。这种整体上稳定与局部不稳定并存的结果导致了混沌运动，轨道的空间集合形成了具有分形结构的奇怪吸引子（见图 2）。

### 图 2 洛仑兹奇怪吸引子

在上述微分方程中固定一个变量，就可以将连续变化的“流”约化为不连续变化的变量迭代过程。最简单的一维非线性迭代过程是  $x_{n+1} = x_n(1 - x_n)$ ，选取适当的参数  $r$ ，可使这个迭代的结果限制在线段  $[0, 1]$  之间。美国物理学家费根鲍姆发现，在这个迭代方程中，随着  $r$  的增加，迭代结果在经历二周期、四周期、... 的倍周期分岔以后，在一确定的  $r_c$  处进入没有任何周期的混沌区，而且混沌区是一种“结构中有结构”的分形，即在混沌区内存在周期“窗口”，在周期“窗口”又有倍周期分岔...（见图 3）。费根鲍姆还得到一些普适常数，例如从倍周期分岔进入混沌过程中相应  $r_n$  参数之间的间隔之比在极限情况下收敛于常数

$$\delta = 4.6692016091029\dots$$

不同的迭代函数从分岔进入混沌的参数值可能不同，但对于一大类函数上述收敛常数却是相同的。这些普适常数的发现是动力学理论的重大突破，它不仅揭示了通向混沌的一条道路——从倍周期分岔进入混沌，而且证实了混沌确实不是混乱，而是一种有待人们进一步认识的运动状态。

### 图 3 倍周期分岔进入混沌

混沌在自然界中有种种表现。一般说来，混沌比有序更为普遍。现在不但已经在诸如非线性电路、流体的不稳定流动、光学双稳态以及超导约瑟夫森结等许多实验中观察到混沌运动，而且在生物学、医学等其他领域中也发现了混沌的种种表现。混沌的研究向人类打开了自然界宝库的又一个新天地，过去曾收集到的一部分随机信息常常被认为太混乱、太复杂而被“束之高阁”，现在已可归入混沌之列而采用新的方法加以处理，从而进一步深化人类对自然界发展演化的认识。

**混响 (reverberation)** 又称交混回响。声源停止发声后，声音延续所引起的交混现象。通常以平均声能密度减弱到原始值的百万分之一所需的时间来衡量其延续时间，称为混响时间。混响常常是由于声音的连续多次反射成为多重回音，交混在一起而形成的。适当的混响可加强讲话者的声音，或使音乐和歌唱悦耳动听。但混响时间过长，会使前后声音交混，就听不清楚；而混响时间太短，则音量不够，听起来声音干涩、单薄，对于音乐演奏特别不适宜。例如在空旷的田野上讲话就是如此。因此混响时间是评定建筑物声音质量的一个重要指标。一般认为，小音乐厅（小于  $350\text{m}^3$ ）的最合适交混回响时间为 1 秒左右；如果体积增大，则交混回响时间按  $\sqrt[3]{V}$  倍增加（ $V$  为建筑物体积）。北京首都剧场，坐满观众时交混回响时间为 1.36 秒，空坐时为 3.30 秒。海水中由于海底和水中浮悬物以及不均匀层对声音的反射、折射、衍射等原因，也能形成混响，这对于水中通讯是一种严重干扰。

**混响室 (reverberation room)** 一个能在所有边界上全部反射声能，并在其中充分扩散，使形成各处能量密度均匀、在各传播方向作无规分布的扩散场的实验室。该室的形状不规则（例如三组对立面互不平行的长方体等），六个壁面由声反射系数很大（99%以上）的坚硬材料做成，有时在室内还安装加速扩散的扩散体。要求在各个频段的混响时间均在 1 秒以上。混响室的用途很广，主要用于测量声源的功率和频谱，测定材料的声吸收系数，测定电声器件的效率等声学性能以及隔音构件的隔音量等。

**火花发生器 (spark generator)** 能够按照一定的时间间隔产生脉冲高压的装置。使用时，只要在两电极间放上记录纸，或者记录纸本身就是电极，另一极通上脉冲高压，当两极间达到一定距离（通常为 0.5 厘米）时，开始击穿空气打出火花，烧焦记录纸，留下微小的火花孔。如果记录纸相对运动，则一系列火花记录点就留在记录纸上了。所以在力学实验中，可用来记录运动物体的等时轨迹点，由此推算出各时刻的位移、速度和加速度。如果火花发生器用在气垫导轨上作振动研究，可以记录滑块的振幅、周期，加上纸带的传动装置还可以记录正弦形的振动曲线。

火花发生器的型号有多种，使用时，要注意安全！使用前需详细阅读使用说明。

**火箭 (rocket)** 依靠发动机向后喷射高速气体而获得向前推力的运载工具。高速气体可以由燃烧固体或液体推进剂产生。火箭发动机与其他喷气发动机的不同点是，其他喷气发动机本身只携带燃料，要依靠空气中的氧助燃，而火箭发动机的燃料和氧化剂都是自带的，所以既可以在大气中，又可以在大气层的外层空间航行。

火箭最早由中国发明（见古代火箭）。中国发明的火箭传到欧洲以后，

主要用于战争。第一次世界大战后，随着技术的进步，各种火箭武器迅速发展起来。第二次世界大战末期，德国研制成功并实际应用的 V-2 火箭是火箭技术上划时代的成就。在战后年代中，美国、原苏联和其他一些主要国家集中力量研究和开发了包括洲际导弹在内的各种火箭武器和运载火箭，使最近数十年成为火箭技术蓬勃发展的时代。中国在 1970 年用“长征”1 号火箭成功地发射了第一颗自制的人造地球卫星。1975 年，用更大推力的“长征”2 号火箭发射了可回收的重型卫星。1980 年向南太平洋海域成功地发射了新型的运载火箭。1984 年和 1986 年用装有液氢和液氧发动机的“长征”3 号火箭先后发射了地球同步试验通讯卫星。中国火箭技术的发展，使她正在跨入火箭技术先进国家之列。

火箭有许多不同种类。按推进剂性质可分为固体和液体火箭；按是否可控制可分为无控火箭和有控火箭；按射程可分为近程、中程和远程火箭；按推进级数可分为单级火箭和多级（2~4 级）火箭等。现在，除了依靠燃烧化学推进剂的所谓化学火箭外，还出现了用其他能源的火箭，例如电火箭、核火箭，同时人们也在设想光子火箭的方案。各种火箭均由壳体、有效载荷（卫星和弹头等）、推进系统、电源系统和有控火箭的制导和控制系统等组成。设计火箭的总体要求是用最小的起飞重量把最大的有效载荷安全、远距离并准确地运送至指定地点。这要求发动机有优越的性能，能在单位时间内燃烧并高速喷射尽量多的物质，同时发动机本身则越轻越好。选用什么推进剂是充分发挥发动机性能的重要因素。火箭的壳体应有合理的空气动力外形，用质轻和有良好机械性能和耐热性能的材料制造。制导和控制系统须能准确并有效地随时调节飞行中火箭的方向、高度、距离、速度以及飞行姿态等。目前各种火箭武器正在向更高精度、反拦截、抗干扰和提高生存能力的方向发展；运载火箭正朝着高可靠、低成本、多用途和多次使用的方向发展。巡航导弹和航天飞机的诞生，说明了这种发展趋势。火箭技术的迅速发展，不仅将提供更加尖端和完善的武器系统，而且使建立空间站以及实现星际航行等成为可能。

#### 金属导体的霍耳效应图

**霍耳效应 (Hall effect)** 当导体或半导体中通有电流，并且在与电流相垂直的方向存在外磁场时，在导体与电流和磁场相垂直的两侧间产生电势差的现象。1879 年由美国物理学家霍耳发现。霍耳效应的产生，是由于作漂移运动的电子或其他载流子在磁场中受洛伦兹力作用的结果。实验表明，霍耳电势差  $U_H$  与电流强度  $I$ 、磁感应强度  $B$  的乘积成正比，而与导体沿磁场方向的厚度  $d$ （见图）成反比，即

$$U_H = K_H \frac{IB}{d}$$

式中  $K_H$  称为霍耳系数。可以证明， $K_H = \frac{1}{nq}$ ，其中  $n$  为载流子浓度，

$q$  为载流子的电荷。由于半导体材料的载流子浓度远比金属小，故半导体的霍耳效应显著，而金属和电解质的霍耳效应微弱。霍耳效应有广泛的应用。例如，由霍耳系数的正负号可以判定半导体材料的导电类型；通过测定样品霍耳系数的值，可以确定材料载流子的浓度及其迁移率。利用半导体的霍耳效应还可以制成测量磁场强度的磁强计。各种类型的霍耳元件经常应用于微波和电子学、计算机以及自动控制等技术中。这类元件的优点

是结构简单、使用方便、性能可靠、成本低廉，缺点是对温度比较敏感，故测量结果往往要作温度修正。

**基本单位** (fundamental units) 见物理量。

**基本粒子** (elementary Particle) 在物质结构层次中属于比原子核更深层次的物质单元,如光子、电子、质子、中子、介子等。迄今已确认有 400 余种基本粒子,它们都是通过宇宙线和加速器实验发现的。基本粒子的性质可用一系列描述其内禀性质的物理量,如质量、电荷、自旋、宇称、同位旋、轻子数、重子数、奇异数、超荷等表征。基本粒子之间存在弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用(参见基本相互作用)。通过这些相互作用,基本粒子可发生创生、湮灭以及相互转化等现象。

按照参与相互作用的类型,通常将基本粒子区分为三大类:轻子、强子和规范玻色子。轻子如电子、 $\mu$ 子和中微子等,它们仅参与弱作用和电磁作用。强子如质子、中子、介子等,它们参与上述全部三种作用。规范玻色子如光子、中间玻色子( $W^\pm, Z^0$ )、胶子等,它们是传递相互作用的媒介粒子。光子传递电磁作用,中间玻色子传递弱作用,胶子传递强作用。

基本粒子中除光子、电子、中微子和质子以及它们的反粒子等极少数几类粒子是稳定粒子外,绝大多数都是不稳定粒子,经历一定平均寿命后,将通过相互作用而转化为其他粒子。平均寿命大于  $10^{-16}$  秒的粒子包括稳定粒子只有 30 余种,粒子物理学中常常把这些粒子都称为稳定粒子。其余约百余种粒子的寿命约为  $10^{-20}$  秒,另外 200 余种粒子的寿命约为  $10^{-23}$  秒,相当于接近光速运动的粒子穿越  $10^{-15}$  米距离所需时间。

随着实验和理论研究的不断深入,本世纪 60 年代以来已发现许多基本粒子具有内部结构(参见强子结构)。这个发现使人们认识到,基本粒子这一名称并不确切。所以目前物理学界常常把原来所谓基本粒子的物质统称为粒子,把研究基本粒子性质及其相互转化规律的学科称为粒子物理学。

**基本相互作用** (fundamental interaction) 自然界普遍存在的物质间相互作用的现象。亦称基本力。迄今发现自然界中存在四种基本相互作用,即引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用。其中引力作用和电磁作用广泛地存在于微观、宏观及宇观现象中,而弱作用和强作用则仅仅存在于比原子核更深层次的微观领域中。物理学中的一切现象和一切相互作用都可归因于这四种基本相互作用。

**引力相互作用** 物质间最普遍存在的一种基本相互作用。牛顿于 17 世纪用万有引力定律描述这种作用。爱因斯坦于 1916 年建立了广义相对论,利用时空弯曲来描述这种相互作用,并引进了引力场的概念。引力作用在四种基本作用中其强度最弱。例如两个质子之间的引力与它们之间在

同样距离上的库仑力之比为  $4 \frac{GM_p}{e^2} 10^{-38}$ , 式中  $\epsilon_0$  为真空电容

率,  $G$  为引力常数,  $M_p$  和  $e$  分别为质子的质量和电荷。由于引力作用的强度很弱,在微观现象和不少宏观现象中通常可不考虑。但是在天质量和电中性的天体和宇宙学等宇观领域中,引力相互作用常常是决定性的。

**电磁相互作用** 带电粒子间的相互作用,这种作用是通过电磁场传递

的。在量子理论中，电磁场由光子构成，所以实质上说，电磁作用是荷电粒子间通过光子传递的一种相互作用。从牛顿的万有引力定律和电磁学中的库仑定律可以看出，引力和电磁力的值都与两个质点或两个点电荷的距离平方成反比，即它们都是“平方反比的力”。这种力称为长程力，它们广泛地表现在微观和宏观等现象中。在原子线度（ $\sim 10^{-10}$ 米）、分子线度（ $10^{-10}$ 米 $\sim 10^{-8}$ 米）以及宏观线度上所发生的许多物理现象都可归因于电磁相互作用。通常所说的分子力、范德瓦尔斯力、摩擦力、附着力、弹性力等实质上都是电磁力的表现。宏观电磁相互作用的理论是1864年麦克斯韦建立的电磁理论，这个理论也常称为“经典电动力学”。该理论与量子力学原理相结合，便产生了“量子电动力学”，它是描写微观电磁相互作用的理论。电磁相互作用是目前人们研究得最多，认识最为深刻，应用也最为广泛的一种基本相互作用。

**弱相互作用** 人们对于弱作用的研究开始于20世纪30年代初关于衰变现象的研究，衰变是一个中子衰变为一个质子、一个电子和一个相应的反中微子的过程。中子的寿命很长（约15分钟），所以导致中子发生衰变的作用强度很弱，这种作用便称为弱相互作用。弱作用与电磁作用相比，有如下两个特点：一是其作用强度小，电磁作用的强度比弱作用的强度大 $10^3$ 倍；另一特点是，其作用范围很小（ $< 10^{-16}$ 米），是一种“短程力”，当粒子间的距离一旦达到或超过 $10^{-16}$ 米时，弱力便很快减小为零。所以弱相互作用仅仅发生在比原子核更深层次的微观世界中。现在已经知道，所有轻子（如电子、 $\mu$ 子、中微子等）和夸克都参与弱作用。由于强子由夸克构成，所以一切强子当然也参与弱作用。

本世纪60年代末又进一步发现，电磁作用和弱作用是一种统一相互作用（称为电弱相互作用）的不同表现。在这种理论中，传递弱作用的媒介粒子是中间玻色子 $W^\pm$ 、 $Z^0$ 。

**强相互作用** 最早研究的强作用是原子核内核子间的核力相互作用。现在发现，强作用是存在于构成强子（如质子、中子、介子等）的更基本组分粒子——夸克之间的一种作用。夸克带有色或色荷，这种色或色荷就是强作用的源。强作用也是一种媒介作用，传递强作用的媒介粒子是胶子。夸克的色荷有3种；胶子也带有色荷，胶子的色荷有8种。作为比较，在电磁作用中电荷只有2种（正或负电荷）；传递电磁作用的光子则不带电。由此可知，强相互作用将显示出非常不同的特征。首先，强力是一种短程力，其作用距离 $< 10^{-15}$ 米，即小于强子的线度。所以强相互作用仅仅存在于基本粒子领域中。另一个特点表现在它的作用强度随距离的变化。当夸克之间的距离达到 $10^{-15}$ 米或更大些时，强作用将显示为一种很强的吸引作用，使构成强子的夸克无法分离而成为自由夸克（夸克囚禁）；当距离变小时，相互作用的强度反而变得愈来愈弱（渐近自由）。描述强相互作用的理论是“量子色动力学”。强相互作用使夸克紧密束缚为强子。原子核内核子间的核力实际上是构成质子或中子的夸克之间的强相互作用的一种剩余效应，犹如分子力得构成原子的原子核和电子之间电磁作用的一种剩余效应一样。核力虽然是强作用的一种剩余效应，但其强度通常比电磁力大两个数量级，从而能够克服原子核内质子间的静电斥力而使核子束缚在原子核内。下表简要列出了四种基本相互作用的特征。



四种基本相互作用的比较

基本作用		引力作用	弱作用	电磁作用	强作用
力程		$< 10^{-16}$ 米	$10^{-5}$	$< 10^{-15}$ 米	
相对强度		$10^{-14}$	$10^{-5}$	$10^{-2}$	1
参与作用的粒子		一切粒子 轻子、夸克带电粒子夸克			
传播子	粒子质量自旋	引力子 ( ? )	$W^{\pm}$ 、 $Z^0$	光子	胶子
		0	$\sim 80\text{Gev}$	0	0
		2	1	1	1

**基尔霍夫** (Gustav Robert Kirchhoff 1824 ~ 1887) 德国物理学家。生于柯尼斯堡。1847年毕业于柯尼斯堡大学。1850年任布雷斯劳大学教授。1854年任海德堡大学教授。1875年任柏林大学理论物理教授。同年当选为英国皇家学会会员。

主要贡献在电磁学和光谱学方面。1845年，发表了关于电路计算的两个定律：基尔霍夫第一定律又称节点电流定律，它是建立在稳恒条件之上的；基尔霍夫第二定律又称回路电压定律，它是建立在稳恒电场的环路定理之上的。后来又阐明了电路中两点间的电势差和静电学的电势这两个物理量在量纲和单位上的一致性。基尔霍夫两定律及其研究，是对欧姆定律的重大发展，在解决各种复杂电路问题中，占有重要地位。1859年，得出物体的发射本领和吸收本领的比值与物体的性质无关；对于所有物体，这个比值是波长和温度的普适函数的规律，被称为基尔霍夫辐射定律。同年，与著名化学家本生合作，创立了光谱分析方法，为光谱学的发展作出了贡献。1860年，说明了夫琅和费线的起源，指出太阳光谱的暗线是太阳大气中元素吸收的结果。通过对太阳光谱进行多次测定分析，还证明了太阳上的元素与地球上的元素的一致性。1862年，提出绝对黑体的概念，并且给出绝对黑体的模型。基尔霍夫的热辐射定律和绝对黑体概念，成为普朗克提出量子论的基础。基尔霍夫的光谱分析方法奠定了天体物理学的基础。其所著的《数学物理学讲义》(共4卷，1876~1894)，对德国理论物理学的发展有重大影响。

**基尔霍夫定律** (Kirchhoff law) 计算多回路电路问题的基本定律。由德国物理学家基尔霍夫在1845年首先提出，故名。包含两个定律。

(1) 基尔霍夫第一定律：又称节点定律。在任一节点(电路中三个或三个以上支路联接的点)处，流向节点的电流之和等于流出节点的电流之和，或者说，汇合于任一节点处的各支路电流代数和等于零，即

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0。$$

通常规定流向节点的电流为正，离开节点的电流为负。基尔霍夫第一定律来源于电荷守恒定律。

(2) 基尔霍夫第二定律：又称回路定律。对于多回路电路中的任一闭合回路，各段电路上电压降之和等于零，即

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0。$$

列出基尔霍夫第二定律的步骤是：先选定回路绕行方向。对于电阻，当假设的电流方向与回路的绕行方向一致时，该电阻上电压取正， $U_k = I_k R_k$ ；当假设的电流方向与回路的绕行方向相反时，该电阻上的电压取负， $U_k = -I_k R_k$ 。对于电源，当电源的电动势 $\varepsilon_k$ 的方向（即电源的负极指向正极的方向）与回路绕行方向一致时， $U_k = -\varepsilon_k$ ；当与回路绕行方向相反时  $U_k = \varepsilon_k$ 。

基尔霍夫定律是网络分析中重要定律之一，适用于交直流电路。对于交流电路，该定律应用复数形式表示，即

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0,$$

$$\sum_{k=1}^n \dot{V}_k = 0,$$

式中  $I_k$  和  $V_k$  为复数电流和复数电压。

**基矢 (unit vector)** 构成原胞的平行六面体的边矢量，如图所示的  $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$ 、 $\mathbf{a}_3$  三个矢量。基矢是从一个格点到另原胞一格点的位置矢量。原胞六面体的每一个顶角均为原子所占有，原胞内部没有原子。整个晶格就是原胞沿基矢方向的周期重复。

**基音 (fundamental tone)** 又称第一谐音。物体振动往往是复合振动，它同时发出频率不同的音，其中频率最低的音称为基音，它好比是其他声音的基础。一般来说，基音总较其他谐音强，决定着复音的频率。但某些弦乐器（如小提琴、古琴）和铜管乐器（如长号、圆号）可用特殊的拉、拨、吹、按的演奏方法使个别谐音特别突出。

**期刊管理系统 (Periodical manage system)** 是用计算机完成下列工作的系统。

(1) 建立期刊文档。文档中记录可以包括反映期刊特征的现刊名、副刊名、原刊名、创刊年代或终刊年代、出版频率、文种、原刊物分类号、国际标准连续出版物号、检索号以及馆藏年、卷、期等十几种标识字段内容。

(2) 期刊的订购。包括选书、订购、查核、续订、寄发、索补缺期单。

(3) 编制期刊目录。建立期刊编目的子系统，编制刊名、主题、地点、供应者等各种顺序的目录，以及缺期目录、装订目录、收到刊物目录等，同时还可以编制书本式期刊联合目录。

(4) 登录。像登录专著一样，连续出版物管理系统也能记录收到的每一期刊物，并要求供应者供给未收到的各期和更新馆藏资料档案，自动登录过程中的有用副产品是编制新书目录，这种目录可对用户流通，因而可作为新到资料通报服务。

(5) 期刊订购管理。由计算机查阅征订目录选书，同时打印征订单和办理续订手续。

(6) 期刊装订管理。期刊是分册出版的刊物，一般需按年或卷装订成合订本，计算机可以作出有关装订的必要决定，印出装印通知单，当合订本送回时，更新装订记录等。

(7) 期刊流通。主要包括两方面的工作，一是馆藏期刊的出借和归还工作；二是由计算机进行期刊定期定题发送处理工作。

(8) 期刊检索。主要利用刊名、题内关键字和收藏单位代号等来实现各

种检索，一般是采用对话式检索。

积分矩形近似 (integration by rectangle) 近似计算中的一种方法。设  $f(x)$  在区间  $(x_0, x_a)$  上是连续的，将  $x$  区域分成  $n$  个相等

的子区间 (参见图)，每一子区间的宽度为  $\Delta x = \frac{x_a - x_0}{n}$ ，并且在各子

区间内找这样一组数：

$$\begin{aligned} & x_0 \quad c_1 \quad x_1, \\ & x_1 \quad c_2 \quad x_2, \\ & x_2 \quad c_3 \quad x_3, \\ & \dots \\ & x_{n-1} \quad c_n \quad x_n, \end{aligned}$$

然后写出其求和公式

$$\sum_{i=1}^n f(c_i) \cdot \Delta x,$$

如果  $n$  取得非常多，上式变为定积分计算公式

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f(c_i) \Delta x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(c_i) \cdot \Delta x.$$

如果  $c_i = x_{i-1}$ ，则  $f(c_i) = f(x_{i-1})$ ，上述积分变为：

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f(x_{i-1}) \Delta x = \Delta x \cdot \sum_{i=1}^n f_{i-1} = \Delta x \sum y_{i-1}.$$

图中阴影区表示矩形近似的误差。计算积分值变为函数分立值的累加，最后乘以子区间的大小。

积分矩形近似图

积分抛物线近似 (integration by parabola) 近似计算中的一种方法。设函数  $f(x)$  在子区间  $(x_{i-1}, x_{i+1})$  内用二次插值函数即抛物插值多项式表示，则可写成

$$\int_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} f(x) dx = \int_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} (Ax^2 + Bx + C) dx,$$

把积分限改为  $-x$  到  $x$  可使数式简化，即

$$\begin{aligned} \int_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} f(x) dx &= \int_{-x}^x (Ax^2 + Bx + C) dx, \\ &= \frac{1}{3} Ax^3 + \frac{1}{2} Bx^2 + Cx \Big|_{-x}^x \\ &= \frac{2}{3} A \cdot x^3 + 2C \cdot x. \end{aligned}$$

根据二次插值多项式的计算，

$$A = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{2 \cdot \Delta x^2}, \text{ 因此}$$

$$\begin{aligned} \int_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} f(x) dx &= \frac{\Delta x}{3} [y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}] + 2 \Delta x \cdot y_i \\ &= \frac{\Delta x}{3} [y_{i-1} + 4y_i + y_{i+1}], \end{aligned}$$

积分变量向  $x_1$  到  $x_n$  时， $n$  是奇整数，则

$$\int_{x_1}^{x_n} f(x)dx = \frac{x}{3}(y_1 + 4y_2 + y_3) + (y_3 + 4y_4 + y_5) + \dots + (y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n) \\ = \frac{x}{3}[y_1 + 4y_2 + 2y_3 + 4y_4 + 2y_5 + \dots + 4y_{n-1} + y_n]$$

这就是计算面积的辛浦生法则。

积分梯形近似 (integration by trapezoid) 近似计算中的一种方法。设函数  $f(x)$  在子区间  $(x_i, x_{i+1})$  内, 用线性插值多项式来表示, 则在  $(x_i, x_{i+1})$  范围内曲线下 (参见附图) 的面积是

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x)dx = \int_{x_i}^{x_{i+1}} (Ax + B)dx \\ = \left[ \frac{Ax^2}{2} + Bx \right]_{x_i}^{x_{i+1}} \\ = \frac{A}{2}x_{i+1}^2 + Bx_{i+1} - \frac{A}{2}x_i^2 - Bx_i$$

根据插值多项式, 有关系式:

$$A = \frac{y_{i+1} - y_i}{x}, \quad B = \frac{x_{i+1} \cdot y_i - x_i \cdot y_{i+1}}{x}, \quad x = x_{i+1} - x_i,$$

所以改写为:

积分梯形近似图

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x)dx = \left\{ \frac{y_{i+1} + y_i}{2} \right\} (x_{i+1} - x_i) \\ = \left\{ \frac{y_{i+1} + y_i}{2} \right\} \cdot x_0$$

最后扩展到区间  $(x_0, x_n)$ , 那么积分的梯形近似为:

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x)dx = \frac{x}{2}(y_0 + 2\sum_{i=1}^{n-1} y_i + y_n)$$

激光 (laser) 60 年代初出现的受激辐射过程的新型光源。与普通光相比, 它具有方向性强、亮度大、单色性和相干性好的特点。自从 1960 年在实验室制成第一台红宝石激光器以来的 30 年里, 激光技术的发展突飞猛进。研制成功的各种激光器, 其波段范围从 0.24 微米以下的紫外到 774 微米的远红外区。输出功率从几微瓦到几兆瓦。激光技术的应用和发展已对物理学和其它自然科学领域, 以及工农业、医学和国防工业等部门产生了巨大的影响。从光学学科本身来看, 近 30 年来关于激光物理和激光光谱的研究已取得了巨大的成果, 开创了许多新的研究领域。激光技术已成为现代科学技术的重要组成部分。

历史上激光器是从微波量子激射器发展而来的。美国物理学家汤斯于 1951 到 1954 年之间研制成功第一台微波量子激射器, 那时亦称“脉塞”。1958 年, 肖洛和汤斯把微波量子激射器的原理推广到光学波段, 促使梅曼于 1960 年成功地产生了激光。激光的产生过程是一种光的受激辐射放大过程, 按英文词汇第一个字母拼成“laser”(light amplification by stimulated emission of radiation), 我国原来译为“莱塞”, 1964 年后改评为“激光”。

激光测距 (laser ranging) 利用激光测量远处目标的距离。大体

上可分为适用于工程的短程测距，适用于大地测量和地震预报的中长程测距，以及适用于导弹、人造卫星、月球等空间目标的远程测距。激光测距是测量激光束发射至待测目标再返回的传播时间，再乘以光速，便可算出距离。

**脉冲测距** 用测距仪对准目标，使激光器发出一个强而窄的光脉冲。经发射望远镜压缩发散角后，一部分直接进入接收望远镜作为参考信号，用来标定激光脉冲出发的时间；另一部分光脉冲则射向目标，然后经目标反射后返回，进入接收望远镜，经光电转换后进入时间记录系统。测得的时间由显示器标出，或者经过校正后，在显示器上可直接读出被测目标的距离。脉冲测距过程中，要求激光脉冲有足够的强度，并要求方向性和单色性好。光脉冲宽度要窄，避免反射回来的光和发射出去的光互相重叠。一般远距离测距采用固体激光器，近距离测距采用半导体激光器，激光雷达则常采用二氧化碳激光器。

**相位测距** 测量连续的调制激光在待测距离上往返过程中的相位差，再求出激光传播时间。为了便于相位测量，信号频率要低，因为低频信号的相位变化 2 需要的时间长。相位测距比脉冲测距在技术上复杂些，因为任何测量交变信号相位变化的方法，不能确定整周期相位变化，只能测定小于 2 的相位变化。因此必须采用种种补偿办法。

**激光雷达** 激光测距仪的进一步发展，便是激光雷达。它既要求测定目标的距离，还要求测定目标的方位及其运动状态，以便对目标进行跟踪。激光雷达的优点是保密性好，抗干扰性强，测量精度高。但它的工作常常受到气候条件的限制，而且由于激光发散角小，不可能进行大面积搜索。

**激光大气监测** (laser monitoring of atmosphere) 基于大气中物质对光的吸收和散射，用激光雷达和长程吸收激光辐射的方法对大气进行监测。是大气遥感探测的新兴分支。

由于激光具有很好的单色性、方向性、相干性和高强度，所以它是光学探测大气方法中的理想光源。激光雷达方法就是将激光束经发射望远镜射向大气，当激光在大气中传播时，将与大气中的气体分子、粒子、水滴等相互作用，产生激光辐射能量的吸收和散射，其中后向散射光由接收望远镜接收，经光电探测器检测，最后将检测到的信号作为时间的函数加以记录或输入示波器，或记录在磁带上以便输入电子计算机进行信息处理。为适应大气探测的不同需要，在激光雷达基本结构的基础上发展了基于激光辐射和分子、原子不同相互作用机制的各类激光雷达，如拉曼激光雷达、共振激光雷达和差分吸收散射激光雷达。激光雷达常用的激光器是固体激光器，如 YAG (钕铝石榴石) 激光器、钕玻璃激光器和二极管激光器，对于要求具有波长调谐的激光雷达，染料激光器也常被采用。为了有效地探测极低的回波强度，高灵敏的多级光电倍增管是较理想的探测器件。在有的激光雷达中，也采用光子计数和光外差探测技术来检测微弱信号。通常，激光雷达采用的是单端系统，即激光束的发射和信号接收望远镜放在一起。

激光雷达和长程吸收等遥测技术主要用于以下几个方面：污染气体探测。用激光遥测技术可以探测大气污染的时空分布，是大气监控的有效手段。根据拉曼散射和差分吸收的原理，已相应建成了监测污染气体的拉曼散射激光雷达和差分吸收激光雷达。分子的拉曼散射光波长不同于照射

光的波长，二者的差异只决定于散射分子的成分而与照射光的波长无关。由此可根据后向散射光的频移来鉴别污染气体的成分，并根据后向回波幅度的大小测定污染物的浓度。如日本在 1971 年建成的一台移动式拉曼激光雷达用来监测烟囱排放的  $\text{SO}_2$ ，激光器的工作波长为 532 纳米，接收望远镜直径为 50 厘米，光电探测部分是高灵敏度的同步单光子计数设备。估算的  $\text{SO}_2$  浓度为 1850ppm (1ppm 相当于百万分之一的体积比)。差分吸收激光雷达能灵敏地探测大气污染分子的浓度，这是由于大多数污染气体分子在中红外光谱区 (2.5 微米 ~ 25 微米) 具有特征结构的吸收谱线，这种激光雷达发射波长仅差百分之几微米的两种激光，其中之一恰好位于待测分子的中心吸收谱线上，另一波长则偏离此中心吸收线，而且尽可能位于该待测分子的吸收低谷。激光雷达接收到这两种波长的回波信号后，通过除法器处理，可以消除大气衰减和激光雷达仪器参数对探测精度的影响，从而获得待测气体分子的浓度。这类激光雷达对所发射激光的波长要求苛刻。在用差分吸收法测量时，如果接收的信号不是距离分辨的回波信号，而是远距离的固定目标如山、树林或角反射器等的回波信号，此时所获得的是待测气体的全程积分浓度。西德首次用差分吸收激光雷达测量环境大气中的二氧化氮。差分吸收的长程监测可用于进行现场定域监测，如使用可调谐染料激光器与远距离后向反射器通过差分吸收探测烟囱羽中的二氧化硫；用分立可调谐激光器与远距离反射器探测二氧化氮，并可研究浓度随时间的变化规律。

云、降水和能见度的探测。用激光探测云的高度具有准确、快速的特点。激光雷达向云底发射一束激光脉冲，经过  $t$  时刻后，收到云层的回波信号。根据光速  $c$  和时间  $t$ ，可求出激光雷达至云底的斜距，再由激光雷达的仰角，可求得云底离地面的垂直高度。如激光束遇到云层后继续在云中传输，直至穿过云层，遇上第二层或第三层云，就能接收到第二层或第三层云的激光回波，由此可确定各个层次的云层高度和厚度。用弹性后向散射激光雷达很容易完成云的一般观察或云层厚度和云顶高度的测量。光辐射在大气介质中传输时，大气吸收和散射使光强受到衰减。若距离度量  $r$  处的光强为  $I(r)$ ，光在大气中传输距离元  $dr$  后，光强衰减量为  $-dI(r)$  与乘积  $I(r) dr$  成正比，比例系数  $K(r)$  就是距离  $r$  处的大气消光系数。由激光雷达探测雨滴消光系数的分布后，可求得降水强度的分布。能见度是人眼视程的标度，根据理论推算及考虑到人眼的生理特点，水平能见度与水平方向大气平均消光系数的乘积等于 3.912。利用激光雷达探得大气消光系数的分布后，可求出各个方向的水平能见度。根据脉冲激光雷达探得不同仰角的激光大气回波信号后，可求得大气消光系数随高度的分布，从而可获得斜视能见度。

高层大气探测。主要是指对臭氧层和 80 千米 ~ 100 千米高度范围中的钠原子的探测。近十几年来，由于氟里昂等含氟氯烃化合物的大量排放，使得南极上空的臭氧层浓度几乎降低一半，形成所谓臭氧层空洞。如果空洞不断扩大，则将使地球丧失对太阳紫外辐射的屏蔽能力，从而引起生命平衡失调。因此密切监测南极上空的臭氧浓度，研究其变化规律及成因是十分必要的。通常用差分吸收散射激光雷达来进行监测。共振荧光激光雷达在探测高层大气中的原子成分方面显示出明显的优点，此时由于高层大气空气稀薄，又加上原子的散射截面比分子大得多，所以共振荧光效应突出。用一台闪光灯泵的若丹明 6G 染料激光器和孔径为 97 厘米的接收反射镜，能以高信噪比发现存

在于 90 千米 ~ 100 千米高空附近的钠层。

此外，激光雷达还可以用来探测风、湍流和飘尘，若将激光雷达安装在气象卫星上，它还能探测大气的温度、湿度和气压，使气象卫星获得更为丰富的全球气象资料。

### 激光的特性 (features of laser)

**方向性** 点光源发出球面波，可以说没有方向性。平行光束的方向性最好，光束没有发散角。从光学谐振腔方面讲，只有平行于腔轴的光才能在腔内振荡而形成激光输出，因此激光束应该是方向性最好的平行光束，没有发散角。理论证明激光束是高斯光束，它在光斑尺寸最小的束腰处是平面波，向前传播过程中又逐渐变成球面波。因此激光束的发散角既不是像平面波那样为零，也不是像球面波那样完全发散。激光的发散角与谐振腔结构有关，一般为毫弧度量级。这是指平面角。折算成立体角，约为  $10^{-6}$  立体角。所以激光的方向性比普通光好得多。

**亮度** 对于一定的光源来说，其发光面上的亮度与该光源发光的面积、发光时间和发光立体角均成反比。这里说的亮度与人眼对不同波长的感光灵敏度无关，所以是辐射亮度而不是光亮度。人眼看不见红外激光，但亮度仍很高，甚至可以用来切割金属。普通光源发光立体角为  $4\pi$ ，而激光的立体角可小至  $10^{-6}$  数量级。激光的发光时间也可以压缩在极短的时间内。如红宝石脉冲激光器为  $10^{-4}$  秒，调 Q 红宝石激光器则为  $10^{-9}$  秒。锁模激光器的发光时间可短至  $10^{-12}$  秒。因此，激光的亮度（有时候指功率密度，是同样的意思）可以达到太阳亮度的  $10^{10}$  倍以上。如果再用透镜把激光会聚在更小的面积上，则可得到每平方厘米  $10^{12}$  瓦的功率密度。

**单色性** 理想的单色光是正弦波，频率和波长完全确定。实际的光都是波列，由各种频率成份组合而成。只包含很小范围频率成份的光称为准单色光，频率宽度（也即波长宽度或谱线宽度）越小，单色性越好。由于激光谐振腔的反射镜具有波长选择性，加上激光是原子某一对固有能级间的受激跃迁，因此激光的频率宽度很窄。例如氦氖激光器输出的 0.6328

微米激光谱线，线宽为  $\Delta\lambda = 10^{-11}$  微米。一般用  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  或  $\frac{\nu}{\Delta\nu}$  作为单色

性的标志。于是氦氖激光的  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  约为  $10^{11} \sim 10^{12}$  数量级。而  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 0.6438$

微米的红镉线的  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  约为  $1.4 \times 10^6$ ；波长  $\lambda = 0.6057$  微米的氦 86 线，

$\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  为  $8 \times 10^7$ 。可见氦氖激光的单色性要好得多。在各种激光器中，

单色性最好的是气体激光器，其次为固体和半导体激光器。如果再采用选模和稳频技术，则更可大大提高输出激光的单色性。

**相干性** 普通光的谱线宽度大，单色性差，因而时间相干性也差。普通光源发光面上不同两点所发出的光互相独立，因而没有空间相干性。对于激光，谱线宽度窄，单色性和时间相干性好。而且激光是在谐振腔内经反射镜多次来回反射振荡放大形成的。每经过一次反射，因反射镜的有限大小而引起衍射发散，向外衍射使光强减弱；向内的衍射使光束截面上各点发出的光互相混合。在经历多次衍射后，激光光束截面上各点的光彼此

都有联系，故空间相干性也很好。

**激光加工 (laser machining)** 利用激光的高功率密度对材料进行加工。在 60 年代，激光主要应用于微型加工，例如轴承打孔、微型焊接、划片和切割等。后来又应用于微电子元件制造中，例如硅片退火、外延、掺杂、光刻等。到 70 年代后期，由于高功率激光器的研制成功，已发展到对大工件进行加工，如切割、热处理、表面合金化、深穿透焊接等等。

**激光焊接** 当高强度激光照射在材料表面上时，部分光能将被材料吸收而转变成热能，使材料熔化，从而达到焊接的目的。一般要根据金属的光学性质（如反射和吸收）和热学性质（如熔点、热传导率、热扩散率、熔化潜热等）来决定所使用的激光的功率密度和脉宽等，对普通金属来说，光强吸收系数大约在  $10^5 \sim 10^9$  厘米<sup>-1</sup> 数量级。如果激光的功率密度为  $10^5 \sim 10^9$  瓦/厘米<sup>2</sup>，则在金属表面的穿透深度为微米数量级。为避免焊接时产生金属飞溅或陷坑，要控制激光功率密度，使金属表面温度维持在沸点附近。对一般金属，激光功率密度常取  $10^5 \sim 10^6$  瓦/厘米<sup>2</sup> 左右。激光焊接有许多优点。它的突出优点在于高熔点金属或两种不同金属的焊接，而且光斑小，热形变小，还可对透明外壳内的部件进行焊接，适于实现自动化。

**激光切割** 用高功率激光照射材料，使材料瞬间气化并形成孔。移动激光束便可在材料上形成深而窄的切口。激光切割的优点是：切缝窄而平整，材料变形少，适用于机械强度高、熔点高的不锈钢或合金钢。

**激光热处理** 用激光照射材料，使表面迅速加热。控制加热温度在材料的临界温度以上、熔点以下。移去激光后，材料便迅速自淬冷却。对材料进行热处理后，可使表面的结晶结构发生变化，提高表面硬度。用来进行表面硬化的激光，其功率密度一般在  $10^3 \sim 10^4$  瓦/厘米<sup>2</sup> 的数量级。优点是可处理各种形状的零件，而且加热速度快，因此工件变形小。

利用激光能进行局部加热的特点，可对工件表面进行合金化。主要是在金属表面进行碳、氮、铬的扩散或其它元素的气相沉积，从而获得所需的物理化学性能。

**激光理论 (laser theory)** 研究激光形成机制和激光与物质相互作用的理论。将激光场看成由麦克斯韦方程组描述的经典电磁波场，将介质原子或其它微观粒子看作由薛定谔方程描述的量子力学系统，场对介质的作用使原子的状态发生变化因而表现为微扰哈密顿量，而介质所产生的极化强度又成为电磁波场的源。这种相互作用反复进行，达到自治。这就是兰姆的激光半经典理论。用此理论可以满意地解释激光振荡的阈值条件、增益饱和、频率牵引和推斥、模式竞争和模式锁定，以及烧孔效应、兰姆凹陷等等许多有关激光的问题。半经典理论不能说明激光场由真空场建立，也不能解释辐射场噪声所引起的激光线宽以及激光场的光子统计学规律。激光的全量子理论把原子体系和辐射场都作量子化处理，建立激光场的约化密度矩阵运动方程，可以对半经典理论不能解释的三个问题作出满意的说明。另外，还有一种简化的量子理论，称为速率方程。该理论忽略光子数起伏和量子化激光场的相位特性，描写光子和原子体系的相互作用，可以对激光的有关问题作定性的解释。

**激光疗法 (laser therapy)** 利用激光治疗疾病的方法。激光光束作用于机体，可在极短时间内产生热、光、机械压力和电磁场等效应，从而产生治疗作用。激光的热效应是指利用激光的能量集中，使被照射部位



产生很高的温度，有时在极短的时间内可达千度以上，这样高的温度足以使机体组织受到烧灼而裂开或汽化而实现医疗作用。如激光刀就是按照这一机理来完成外科手术的。激光的光效应是指生物体吸收激光后，使生物体发生化学变化。如将激光用于对癌的诊断和治疗等都是激光光效应的结果，目前这一领域正在深入研究。激光的压力效应是由于激光束很细而光强很强，因而聚焦后投射到生物体上就产生很大的压力，这种压力有时可大到几千个大气压，从而会使病灶爆炸，而把病毒细胞分离出来。激光作为一种特殊的电磁波，当光的强度很强时，其电磁场强度也很强，因此激光的电磁效应也很明显。这种电磁波作用在机体细胞上，细胞会受到一种作用力，因此对病理组织的细胞产生抑制作用。

激光医疗与激光技术的进步密切相关，最初应用的是红宝石激光，并在眼科、牙科率先进行尝试。Ar 激光器出现后，由于它发出的绿光或青光很少被眼睛的玻璃体吸收，而能为眼底视网膜组织吸收，并通过光-热作用凝固止血，因此成功地治疗了视网膜剥落、眼底出血等疾病，使激光医疗跨出了第一步。后来利用石英光纤传递激光光束，再配以内窥镜，实现了体腔内病巢的非手术切开治疗。随着激光技术和医疗仪器的发展，目前几乎在所有医疗领域都可以看到激光治疗的例子：成形外科，用 CO<sub>2</sub>、Ar、Nd : YAG 以及染料激光可去除痣等皮肤表面的异物。肺外科，Ar、YAG、Ar-染料等激光与支气管镜相配合，可治疗肺癌、气管狭窄等疾病。心血管外科的激光治疗也有进展，用高功率激光在心肌打贯穿孔治疗因冠状动脉狭窄而造成冠状动脉不能回路。CO<sub>2</sub>、YAG、Ar 激光还可进行血管吻合术和血管形成术。整形外科和一般外科，主要使用 CO<sub>2</sub> 激光。脑外科则常将 CO<sub>2</sub> 激光和手术显微镜配合进行微细手术。内科，采用掺钕钇铝石榴石激光和内窥镜的凝固治疗已占绝对优势，对于消化系统的早期癌症、胃溃疡、动脉出血等体腔疾病的非剖腹治疗也正在发挥威力。还可利用激光治疗结石、膀胱癌、前列腺癌、尿道狭窄以及妇科等疾病。激光疗法作为一种新颖、安全、高效的医疗手段正受到人们广泛的重视，并不断得到发展。

**激光器 (laser)** 产生激光光源的器械装置。激光器由三部分组成：工作物质、光学谐振腔和激励系统。工作物质用来产生激光，常常把工作物质名称放在激光器之前，例如氦氖激光器、红宝石激光器等等。并非各种物质都能实现粒子数反转。在能实现粒子数反转的物质中，也不是任何两个能级间均能实现粒子数反转。因此寻找适当的工作物质和适当的能级就非常重要。激光是一种受激辐射。但是在一般情况下，受激辐射总是远小于自发辐射。光学谐振腔的作用是使某一方向上的受激辐射产生正反馈并实现振荡，以便使受激辐射超过自发辐射。激励系统是能源，又称抽运或泵。意思是把处于激光下能级上的粒子，泵到上能级去，以便实现粒子数反转。

按工作物质分类，有气体激光器、液体激光器、固体激光器和半导体激光器等。按激励方式分类，有热激励、光泵激励、化学激励、核激励和放电激励激光器等。按谐振腔结构分类，有稳定腔、亚稳腔和非稳腔激光器等。按工作方式分类，有连续、脉冲、调 Q、锁模激光器等。按激光输出特性分类，有单模、多模激光器等。按输出波段分类，有红外、可见和

紫外激光器等。还有很多其它的控制方式，如可调谐激光器，稳频激光器，环行激光器，折叠式激光器，等等。

激光器在生产、科研和国防上都有重要的应用。

**激光医学 ( laser medicine )** 激光在医学上诊断和治疗等方面的应用。利用波长为 10.6 微米的二氧化碳红外激光作外科手术刀，已取得很好效果。这一波长的红外光容易被水吸收，而生物组织都含有 75% 以上的水。用 50 瓦的二氧化碳激光连续照射在生物组织上，使生物组织升温汽化，以达到切割的目的。激光手术刀的优点是可将激光聚焦在很小的范围而不致伤害周围的组织，出血量较少。眼科上常用这种技术治疗网膜裂孔、青光眼、白内障等。用弱激光如氦氛激光照射穴位或病灶区，具有消炎、镇痛、散瘀、消肿、促进伤口愈合等作用。

**激光育种 ( laser breeding )** 激光在农业上的一种应用。例如，实验上用红宝石激光照射蚕豆种子，能使发芽期从 26 天缩短至 16 天。其它各种种子经激光照射后，都有类似的情况。其原因是，激光光子激活了生物分子中某种特定的生物键，从而改变了分子结构，影响了遗传密码。这种激光对生命物质的影响有可能通过细胞分裂传至后代。激光诱发突变的成功率较高，但不易做到定向诱发突变。有些昆虫经激光照射后，会丧失繁殖能力，这对农业上病虫害防治有作用。

**几何光学 ( geometrical optics )** 在不涉及光的发射和吸收等与物质相互作用过程的微观机制，将光的波长视为极短，从而其波动效应不明显时，仅仅研究光在透明介质中传播规律的光学分支。它的理论基础是：光的直线传播定律，光的反射和折射定律，光的独立传播定律，以及光路可逆原理。几何光学是波动光学在光的波长趋于零时的极限。在实际应用中，大多数光学元件的线度比所涉及的光的波长大得多，这时就可应用几何光学。几何光学是光学系统设计的理论基础，但即使把所有几何像差全部消除，由于存在着衍射效应，光学系统仍不可能理想成像。因此，对光学系统的像场分布、分辨本领、成像质量等问题进行讨论时，仍然需要应用波动光学。

**机器人 ( robot )** 具有类似某些生物器官功能、用以完成特定操作或移动任务的应用程序控制的机械电子自动装置。机器人 ( Robot ) 一词来源于捷克语。1920 年，捷克作家卡列尔·查培克创作的幻想剧《洛桑万能机器人公司》( Rossum ' s Universal Robot )，第一次使用“ Robot ”一词。后来被许多科学家所采用。

现代机器人问世于本世纪 50 年代。美国联合控制公司是开发工业机器人的先驱。1958 年该公司利用德威尔的专利，首先研制出数字控制的自动编程装置。1961 年美国尤尼梅逊公司制成世界上第一台往复式工业机器人。到 1979 年，随着微电子技术的一系列突破，人们开始赋予机器人更多的才能，使他们能说会走，有视觉、听觉、嗅觉、触觉，甚至有一定思维能力。全世界机器人的产量也以 30% 以上的年率递增。因此，人们常常把 1979 年称为“机器人的元年”。

现代机器人必须具备两个特性：首先要具有类似于人的上肢功能，即可做空间多自由度运动；其次是要使用计算机控制，能灵活地适应不断变化的工作情况。由此不难看出，机器人本身是机电一体化的产物。

机器人的“大脑”是一部电脑，存储器中存放着程序和资料；机器人

的“眼”是电视摄像机，通过图像识别装置把接收的电信号进行分类，辨别出所识目标；机器人的“耳”是话筒或录音机，用来收集声音信号；机器人的“嘴”是扬声器，用来发音和说话；机器人的“鼻”是用半导体气敏传感器制成的电子鼻，能灵敏地测出有毒气体或可燃气体的含量，以便人们及时预防；机器人的“手和脚”能运动，手上装有力敏、热敏等传感器，使手具有触觉和力感，脚可移动。手和脚的活动由受电脑指挥的运动执行机构完成。

机器人分类的方法很多，若按用途分类，有如下几种类型：工业机器人；医疗福利机器人；教育娱乐用机器人；特殊作业用机器人；其他。

机器人能适应各种艰苦和危险的环境，酷暑高温中不产生疲劳，凛冽寒风中也不缩手缩脚，不嫌噪音刺耳，也不介意有毒的烟雾，动作准确，节奏明快，误差极小。机器人的使用可大大提高劳动生产率，实现多品种小批量生产的自动化，保证产品质量的稳定，减少工伤事故等。

**机械能 (mechanical energy)** 物质机械运动的量度。一般指动能或势能，或动能与势能之和。

**机械能守恒定律 (Principle of conservation of mechanical energy)** 经典力学的一条基本定律。当力学系统所受外力和内力都是保守力，或虽有非保守力但它不作功时，系统的动能  $T$ ，它在外力场中的势能  $V_e$  和在内力场中的势能  $V_i$  之和，即系统的机械能，在运动过程中保持为常量，即

$$T+V_e+V_i=\text{常量。}$$

对一个质点来说，机械能守恒定律表述为：质点在保守力场中运动时，其动能  $T$  和在此力场中的势能  $V$  之和，即机械能保持不变：

$$T+V=\text{常量。}$$

机械能守恒定律一方面是牛顿定律的推论，另一方面又是自然界普遍规律——能量守恒定律在机械运动中的表述。

**机械效率 (mechanical efficiency)** 机械输出功与输入功之比。任何机械在工作时由于摩擦和其他原因必有能量损失，故机械效率恒小于 100%。机械效率也就成为用以衡量机械摩擦损失和损耗功率的大小。常用百分数表示。例如，一机械系统的机械效率为 30%，是指对机械输入的功为 10 焦耳时，它输出的有用功是 3 焦耳，其他 7 焦耳的功被用来克服例如摩擦力而转化为无法利用的热能。

**吉伯 (William Gilber 1544 ~ 1603)** 英国物理学家。生于英格兰的科尔切斯特。14 岁入剑桥圣约翰学院学习，1569 年获医学博士学位。1601 年任英国伊丽莎白一世女王御医。

吉伯是近代磁学和电学的创始人之一。1600 年发表了他的著作《磁性、磁体和巨大地磁体》，叙述了他对磁现象和电现象的研究（包括 500 多个实验），建立了最早的磁学和电学的理论。他通过磁石球实验证明地球为一大磁体，磁针指南北是由于地球为磁体，而不是天体（如北极星）吸引；发现磁铁永远有两个极——北极和南极，分割磁铁时，永远不会得到只有一个磁极的磁铁；发现利用磁铁会使天然磁性加强的现象。用自己设计的第一台验电器证明，不仅是琥珀，而且如金刚石等多种物体摩擦之后都能吸引轻小物体；首次明确区别了电的吸引与磁的吸引，指出电和磁

是两种不同性质的力；最早提出“电”、“电力”和“电吸引”等概念；还观察到火焰能使物体被摩擦时所获得的电性质消失。吉伯的工作是实验和学术相结合的典范，对后来英国科学的发展产生过很大的影响。

**吉布斯相律 (Gibbs phase rule)** 参见相和相变。

**吉布斯佯谬 (Gibbs paradox)** 经典统计物理学从计算系统微观状态入手，在得出不同种类理想气体混合前后熵改变的公式以后再讨论相同种类理想气体混合前后熵改变时而得到的不合理推论。

按照经典统计物理学，对于一个能量  $E$ 、粒子数  $N$  和体积  $V$  给定的孤立系统，它的熵函数  $S$  与系统可能存在的微观状态数  $\Omega$  之间有如下关系  $S = k \ln \Omega$  ( $k$  为玻耳兹曼常数)。吉布斯设想了初始温度都是  $T$  的两种理想气体，分别处于用隔板隔开的两个容器中 (见图)，然后抽去隔板，使两种气体混合。利用上述关系式可以得出，在气体混合以后的熵  $S_f$  大于混合前两种气体熵的总和  $S_i$ ，即  $S = S_f - S_i > 0$ 。这个结论是必然的，因为这种混合过程是热力学的不可逆过程，在混合以后，不能用任何简单手续在不引起外界任何变化的条件下把两种气体重新分开，而在绝热的不可逆过程中熵一定增大。如果被隔板分开的同种理想气体，按上述方法混合后，同样可以得到熵增大的结果。然而这个结论是不合理的，因为这种混合过程是热力学的可逆过程，在混合以后，重新放入隔板，气体依然恢复到混合前的状态，而不引起外界的任何变化，而在绝热的可逆过程中熵应保持不变。这个不合理的结论就称为吉布斯佯谬。

为了消除这个佯谬，吉布斯对系统的微观状态的计数进行了修正，加上一个  $\frac{1}{N!}$  的因子，从而使  $N$  个粒子系统的熵的表示式中减去一个特

定量  $k \ln N!$  用这个修正以后的熵来计算同类气体混合前后的熵变，就得出了合理的结论，不再出现吉布斯佯谬。这样做的物理原因在于组成系统的微观粒子是不可分辨的全同粒子，而经典统计理论恰恰给微观粒子编了号，使微观粒子成为可分辨的，从而使  $N$  个粒子互换产生出  $N!$  个新的不同的微观状态，导致了吉布斯佯谬。在量子统计理论中，考虑到粒子的不可分辨性以及由此导致的波函数的对称性，在涉及微观状态的计数时自动地出现因子  $\frac{1}{N!}$ ，从而根本上解决了吉布斯佯谬。

**集成电路 (integrated circuits)** 把二极管、晶体管以及电阻、电容等元件同时制备在一块薄薄的硅单晶片上，并把它们按电子线路的要求连接起来，使它具有电路的功能，这就是集成电路。集成电路是在 1958 年由美国德克萨斯公司的科学家吉尔比首先发明的。

集成电路按集成元件数目的多少可区分为小规模、中规模、大规模和超大规模集成电路等。小规模集成电路所包含的元件数约为 10 个 ~ 100 个；中规模约为 100 个 ~ 1000 个；大规模约为 1000 个 ~ 100000 个；而超大规模集成电路的元件数则常常在  $10^6$  个以上。

根据制造工艺的不同，可将集成电路分为半导体集成电路、薄膜集成电路，厚膜集成电路和混合集成电路。目前世界上产量最多、应用最广的是半导体集成电路。

**极光 (aurora)** 在晴朗的夜晚，北极地区和南极地区的上空会浮现和闪耀绚丽多彩的道道强光，通常黄绿相映，有时还出现红、蓝、紫色，

其强度作时慢时快的浮动，这就是极光。极光出现时，景象壮观，道道极光平行列成长排，好似光彩熠熠的帷幕。

极光起因于太空中带电粒子与地球大气层中原子和分子的碰撞。太空中带电粒子进入地磁场时，由于洛伦兹力而倾向于运动到地磁两极处，当这些运动电荷与大气层中的原子、分子碰撞时，会撞出原子和分子中的电子。在游离电子与离子结合时，便发出强光。极光现象与太阳表面活动有密切联系。太阳常发生大量炽热气体的猛烈喷发（耀斑现象），此时有大量的带高能带电粒子流射入太空，部分进入地球大气层被吸引到地球磁极附近，随即出现极光现象。

**计算机辅助物理教学**（computer-assisted instruction in physics）运用计算机作为信息交流和信息处理工具的物理教学辅助系统。计算机辅助物理教学的主要方式有以下几种。

(1) 人机对话。运用不同项目的学习软件，通过学生操作计算机学习有关物理知识，进行自测、反馈和再学习。计算机是实现物理教学过程个别化的一种重要工具，而人机对话是实现教学过程个别化的一种重要方式。

(2) 模拟物理现象和过程。运用设计好的软件，计算机可形象地模拟许多物理现象和过程，尤其是能把一些课堂上不能演示的物理现象和过程（例如随机性质的物理现象）直观地模拟出来。由于微机画面能模拟物理过程的动态特性，并能运用声光结合的手段，因此模拟效果比挂图、板画好，能给学生留下较深印象，有利于学生对物理知识的理解和提高学习兴趣。

(3) 实验信息的适时处理。利用各种传感器将实验中的非电信号（如时间、温度、压力等）转换成电信号，再通过微机接口变换信号，经一定程序软件处理，即可在显示屏上适时显示物理量的变化情况和某些物理量间的关系。例如，利用微机可适时显示温度、压力、冲力、动量、动能、势能等物理量随时间变化的关系。用计算机适时处理演示实验的信息，迅速显示演示实验效果，能大大提高教学效率和增强教学效果。

(4) 处理实验数据。将实验中记录下的数据输入计算机进行运算和作图，可大大减少某些费时的数据处理工作时间。但在中学阶段仍应加强学生处理数据能力的基本训练，不宜完全由计算机代替学生的实验数据处理工作。

计算机辅助物理教学必须与其他教学手段配合使用。它毕竟只是一种教学手段和工具，不能代替教师和真实实验的作用。

**计算机图形学**（computer graphics）研究和利用计算机生成、处理和显示图形的一门学科。计算机图形学是随着计算机硬件、软件技术的飞速进步以及计算机的应用逐步由数值计算、数据处理向信息处理和知识处理领域拓宽而产生的一门新学科。它主要涉及图像处理、模式识别和计算几何。图像处理是将客观世界中物体的原始映像处理成新的数字化图像，如气象预报中的云图和海图处理等，其核心技术是消除噪声，使模糊图像变得清晰，突出图像中某些特征和重建三维图像。模式识别是分析和识别所输入的图像，找出其特征，如数字、字母及汉字的自动识别等。计算几何则着重研究如何使用计算机进行表示和处理几何形体，实现三维造型、曲面的构造与拼接等。

计算机图形学一般包括图形信息的输入、输出、显示，图形的变换、增强、识别，图形与图形间的运算以及人机交互式绘图等方面内容。它利

用计算机及其外部设备如数控绘图机、光笔图形显示器、图数转换器、坐标读取装置等，能高速度、高精度地自动绘制各种图样和进行辅助设计。计算机产生图形的过程大体上分成两步：首先为被研究的对象建立模型，即使用计算机对该对象进行描述，研究对象可以是各种实际物体如汽车、房屋等，也可以是抽象的或假想的事物如天气形势、人口分布等。计算机图形学根据研究对象的几何性质和外貌特征（形状、大小、位置、结构、颜色等），在计算机中建立起它的几何模型。然后根据实际问题的需要，像照相一样，选择适当的观察位置和视角，设定取景范围和深度，布置光源的数目、种类、颜色及强弱等，最后产生该对象的图形输出。图形输出可通过彩色显示器或绘图机、激光印字机等设备进行。

利用计算机生成图形是自从发明照相和电影、电视技术以来一种最重要的产生图形的机械手段。与照相和影视技术相比，它的主要优点有：计算机不仅能生成实物对象的图形，还能生成假想或抽象对象的图形，如科幻片中怪兽、飞行器，构思中的新产品外形图等；计算机除了能生成静态图形外，还能生成各种动态图形，反映各种运动和变化，并可在生成图形过程中进行人机对话实施各种控制和修改。目前计算机图形学已得到广泛应用，主要有：计算机辅助设计和辅助制造（CAD/CAM）、地理信息和自然资源、自然现象的图形制作、作战指挥和军事训练、计算机动画和计算机艺术、计算机辅助教育和计算机辅助教学（CBE/CAI）、科学计算形象化技术、电子印刷排版等。

计算机在人事资料管理中的应用（application of computer in personnel management）用计算机管理人事资料，具有查询迅速、使用方便、安全可靠、输出格式多样、保密性强等优点。常用的人事资料信息一般分为两个部分：履历表文件和档案资料文件。履历表文件的信息按编号顺序（由小到大）存放在数据文件（Datafile）中。一个数据文件存放一个单位（教研室、研究所、工厂、车间或处、科）人员的履历表。一个成员的履历表信息称为一个记录（Record）。一个记录包含有若干字段。整个数据文件的全部记在履历表文件中。记录中某些项可能是空的，有些可用代号（或者字符）来表示。例如性别可用M代表男性，而没有M的代表女性。在输出信息时，由输出程序作相应的转换，因而不影响查询。履历表信息是按编号顺序一个记录接一个记录地记入存储介质的。而读出时可以从第一个记录开始，也可以从中间任意一个记录开始。每一次读出的记录个数不受限制。但是通常要考虑显示屏幅面的容量或打印机行宽的限制。档案资料文件较详细记载了每个人的情况。其内容包括：经历（学历、工作经历等），技术情况（发明创造、论文、译著、职称晋升情况等），工资级别变迁情况等。为了节省存储空间，档案资料文件应尽可能精炼。对人事档案通常要进行以下几方面的操作： 查阅。查阅是通过查询程序查阅所需的人事资料，查询的速度及灵活性极为重要。由于人事资料有一定的保密要求，因此在进入查询程序之前要进行保密审核，并要进行用户登记审查。查阅有三种方式：成批查阅、单个查阅和条件查阅。成批查阅是对一批记录进行查阅。这批记录可以是一个组、科或车间人员的履历表。单个查阅是为用户找出他所指定的某一成员信息并且显示或者打印出来的一种方式。条件查阅方式是根据用户所规定的某些条件来查阅有关成员信息。用户规定的条件可以是一项，也可以是多项。条件的内容就是履

历表中的各个项目，在调查某类人员情况时，往往就要用条件查阅方式。

统计数据，打印报表。使用统计程序可实现对某类人员情况的统计。用户提出的条件或项目的个数是任意的，履历表中所有的项目都可以作为条件。用户造表输出可根据具体需要，用户提出造表要求，由输出程序编制表格并显示出来，或者在打印机上打印。更新。由于情况的变化，人事调动等，履历表信息和档案资料文件就要作相应的更新。更新有三种方式，删除、增加和修改。删除是从履历表中抹去一个或一批记录的一种更新方式。给履历表文件增加一个或多个记录的更新方式叫做增加工作方式。例如招收一批职工，这就需要将这职工的记录存入到适当的位置。修改是修改已有记录中的项目内容。在操作过程中首先要求用户给出相应记录中想要修改的项目内容及新内容，然后进行修改操作。

加速度 (acceleration) 是描述物体运动速度变化快慢的物理量。在从时刻  $t$  到时刻  $t + \Delta t$  的时间之内，质点的速度增量为  $v = v(t + \Delta t) - v(t)$ ，比值  $\frac{v}{\Delta t}$  是速度矢量在时间  $\Delta t$  内的平均变化率，称为质点在  $\Delta t$  中的平均加速度，记为  $a_{\text{平}}$ ：

$$a_{\text{平}} = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} = \frac{v}{\Delta t},$$

平均加速度的方向与时间  $\Delta t$  内质点速度增量的方向一致。平均加速度反映质点运动速度在时间  $\Delta t$  内的平均变化率。

当时间  $\Delta t \rightarrow 0$  时，平均加速度的极限称为在时刻  $t$  的瞬时加速度，以  $a$  表示：

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dr}{dt} \right).$$

瞬时加速度又称为即时加速度或简称为加速度。加速度是速度矢量对时间的一阶导数，也是位矢对时间的二阶导数。

加速度的方向是速度增量  $v$  的极限方向，也是速端图中速端连线的切线方向，在质点作曲线运动时，加速度方向指向轨迹的凹侧。

曲线运动中 指向轨迹的凹侧

在直角坐标系中，加速度可以用质点的直角坐标表示为

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} i + \frac{d^2y}{dt^2} j + \frac{d^2z}{dt^2} k.$$

加速度的量纲是  $MT^{-2}$ ，其 SI 制单位是米/秒<sup>2</sup>。

加速度计 (accelerometer) 测量加速度的仪表。固定在作加速物体 (例如火箭) 的内部，以测量此物体在运动中各时刻的加速度。加速度计的一个应用是，可判断物体及所载的仪器设备等受到的动载荷，即它们在获得此加速度情况下所受的力。常见加速度计的构件 (见下图) 和工作原理大致如下：外壳 (与被测物体

加速度计原理

固连)，参考质量，敏感元件与讯号输出器等。当外壳被加速时，被弹簧连接在外壳上的参考质量对外壳有一相对位移，其大小与外壳的加速度有关。这个相对位移作为信号被传感到敏感元件，变成一定形式的电讯号被输出。

**加速器 (accelerator)** 加速带电粒子，使其动能增加的装置。被加速的带电粒子通常是电子、质子或重离子。从加速器得到的粒子束的动能可以很高，其速度接近光速。

**加速器的结构** 加速器有三个基本组成部分：粒子源，用以提供所需加速的各种粒子；真空加速系统，如加速管，加速腔等，它提供某种类型的加速电场，使粒子在高度真空的条件下不断地获得能量，达到加速目的；引导、聚焦系统，如电磁透镜，主导磁场和偏转磁场等，它们的作用是使被加速粒子束沿预定的轨道运动，并按计划引入实验室。

**加速器的种类** 按照加速电场和被加速粒子的轨道形态，大致可将加速器分为四大类：直流高压式加速器，电磁感应式加速器，直线谐振式加速器和回旋谐振式加速器。

(1) 直流高压式加速器。这类加速器将直流高压加在一对或一系列串接的加速电极上，带电粒子通过电极间隙时受到高压电场的作用而被加速。按照取得高电压的方式，又可将这类加速器分为倍压加速器、静电加速器、绝缘转子式静电加速器等。这类加速器由于高压绝缘的限制，加速能量不高，但粒子束流量很大。这类加速器主要应用于核物理和表面物理学的研究，以及作为制造半导体器件的离子注入机等。

(2) 电磁感应式加速器。利用交变磁场产生的感应电场加速带电粒子（通常是电子）。由于回旋电子辐射效应的限制，这类加速器的能量通常只能达到 25MeV 左右。这类加速器目前主要应用于肿瘤的辐照治疗和金属无损探伤等。

(3) 直线谐振式加速器。粒子在高频电场作用下沿直线轨道加速的加速器，简称直线加速器。电子直线加速器的原理是，利用电子的质量小，其速度很容易接近光速的特点，设法使电磁波在传播中与电子速度一致，从而达到不断加速电子的目的。质子或重离子直线加速器的原理则不同。一系列一个比一个长的称为漂移管的铜管电极排成一直线，质子或重离子在漂移管内匀速运动，当它通过漂移管间隔时就被不断加速。直线加速器可产生很高能量的粒子束，应用于粒子物理和高能核物理学的研究。大型电子直线加速器的长度达到 2 千米。质子直线加速器还可产生很强的介子流，所以有关的加速器和实验设备常称为“介子工厂”。介子在医学、中子武器和固体物理学等领域中有广泛的用途。

(4) 回旋谐振式加速器。被加速粒子在导引磁场控制下作回旋运动，在此过程中使粒子重复通过加速电场区而多次被加速，直至达到额定能量后通过偏转磁场将它引出。回旋谐振式加速器又可分为两类：一类是导引磁场的强度不改变而加速粒子的曲率半径随能量的增加而增加，如“回旋加速器”；另一类是导引磁场的强度随粒子能量的增加而不断增加，但粒子的轨道半径保持不变，如“电子同步加速器”、“质子同步加速器”等。目前的大型回旋加速器圆周直径可达 2 千米以上，可将质子的能量加速到  $10^2\text{GeV}$  以上。大型同步加速器主要应用于粒子物理学和高能核物理学的前沿领域研究工作。电子在环形轨道上运动时会沿切线方向发出很强的电磁辐射，称为“同步辐射”。同步辐射有很宽的频谱范围，目前已被广泛地应用于固体结构、表面物理、生物化学和非线性光学等领域的研究中。某些早期建造的电子同步加速器现在已专门用于产生供实验用的同步辐射，故常称为“光子工厂”。



近来在加速器的建造中已广泛采用超导磁体，这一措施可极大地增大加速器的能量，减小加速器的直径和规模。此外，许多科学家还正在探索新的加速粒子的原理和方法，如利用激光代替高频或微波电磁场来加速粒子等。

**伽伐尼电 (galvanism)** 原先是指由伽伐尼发现的在特定条件下激发的“动物电”，后来泛指不同物质的接触面产生的电位差现象。1780年意大利解剖学家伽伐尼在观察青蛙解剖时，当用手术刀轻轻触及蛙腿时，蛙腿立即发生抽动，而此时附近的电机正好出现电火花。伽伐尼大惑不解，不知道这种现象到底是由于放电所致的感应现象，还是由于手术刀触动蛙腿神经引起的一种生理现象。为了找出这一现象的原因，他重复多次做了一系列的实验，结果意外地发现若用两种金属分别接触蛙腿的神经和肌肉，则当两种金属相碰时，蛙腿也会发生抽动。伽伐尼的解释是：“在动物的神经和肌肉中存在着与普通电相同的电流体，可称之为‘动物电’。它在脑血管中制造出来，通过神经送到肌肉中。在神经和肌肉中间放置金属或是发生火花，就会破坏肌肉的电平衡，肌肉纤维在这时会激烈收缩。”后来伏打指出这种解释是错误的，特别是伏打电堆的发明，从根本上否定了伽伐尼的“动物电”的存在。

**伽利略 (Galileo Galilei 1564~1642)** 意大利物理学家、天文学家。科学革命的先驱，经典力学的开创者，实验科学的创造人。

**生平** 伽利略 1564年2月15日生于比萨。17岁入比萨大学学医。21岁回到佛罗伦萨，在家勤奋自学。1589年，在友人古杜巴尔多伯爵推荐下，赴比萨大学任教。1592年移居威尼斯，任帕多瓦大学教授。1611年访问罗马，成为林赛研究院院士。1615年三访罗马，要求不公开压制他讲述哥白尼学说，结果受到教会法庭的警告。次年2月，罗马宗教裁判所发出所谓“1616年禁令”，不许宣传哥白尼的学说。伽利略并未服从，继续著书立说。1632年发表《关于托勒密和哥白尼的两种世界体系的对话》，反对托勒密的地心说，支持和发展了哥白尼的日心说，因而触怒罗马教皇。1633年2月，到罗马宗教法庭受审；6月，被判处终身监禁，监外执行。在监禁期间，他仍坚持科学著述，于1638年完成《关于力学和位置运动的两种新科学的对话和数学证明》，总结了自己一生在力学科学和实验科学上的研究成就。晚年，他双目失明，死于幽禁之中。

### 学术成就

**经典力学的开创者 关于运动的描述。**伽利略高度评价和论证了哥白尼把坐标系与太阳系中心相结合做法的优越性，从而对质点位置的描述确立了伽利略系。他又进一步以匀速直线运动的船舱中物体运动规律不变的著名论述，第一次提出了惯性参照系的原理。这一原理被爱因斯坦称为伽利略相对性原理。可以说，如果没有这个原理，力学的任何重大进展都是不可能的。**加速度概念的确立。**伽利略通过周密观察，以速率的增量  $v$  和用去的时间  $t$  成正比的运动作为匀加速运动的定义，并第一次把外力和“引起加速或减速的外部原因”即运动的改变联系起来，从而第一个提出加速度这个全新的概念，有力地促进了力学的研究。**落体定律的提出。**伽利略早在比萨大学任教时，就对亚里士多德的落体观点提出疑问，反对重物比轻物下落要快的论断。他采用小球沿斜面滚动的实验，得出了物体下落的行程与它经历的时间平方成正比，而与它重量无关的结论，即

落体定律： $S = \frac{1}{2}at^2$ 。 惯性原理的发现。亚里士多德认为推一个物体的

力当不再去推它时，原来运动的物体便归于静止。伽利略不同意这个单凭直觉得到的结论。他通过观察一个沿着光滑斜面向上滚动的小球的运动，发现当该斜面成为水平面时，小球就永远达不到原来的高度，它将以不变的速率沿平面永远运动下去。由此他写下了这样出色的推论：“如果这样一个平面是无限的，那么，在这个平面上的运动同样是无限的了，也就是说，永恒的了。”第一次表述了惯性原理，并预示了以后由牛顿把它写成的惯性定律。 抛物体运动的研究。伽利略通过研究弹道，发现水平与垂直两方面的运动各具有独立性，互不干涉，但通过平行四边形法则又可合成实际的运动径迹。他从垂直于地面的匀加速运动和水平方向的匀速运动，完整地揭示了抛物体运动的规律，这也是运动合成研究的重大收获，并具有实用意义。 力的作用的两种估计。伽利略对力的作用主要从两个方面来加以认识：一是按力在给定的时间间隔内产生的速度的意义来理解；二是按物体克服给定阻力的能力来理解。总之，这一系列开创性的重大发现，对物体运动和运动原因所作深刻而正确的描述，使得从亚里士多德时代以后近两千年的一直没有重大进展的运动学和动力学别开生面，取得了重大的突破，标志着经典力学的真正开端。伽利略作为经典力学的开创者也是当之无愧的。

实验科学的创始人在伽利略看来，自然科学的结论必须是正确的、必然的，不以人们意志为转移的。自然科学的结论要从客观事实出发，就离不开观察和实验。因此，实验方法在自然科学的研究中始终占据着很重要的地位和作用。伽利略极力主张要用实验科学的知识来武装人们。综观他的物理实验研究，从方法论上来说，有以下几个特点： 把实验和数学演绎结合起来，这是科学方法的一大发明。在哥白尼和开普勒那里，数学的简单性与谐和性被看作物体运动应该符合的先验原则。伽利略既继承了重视数学演绎的正确方向，又抛弃了数学先验论的观念。他强调既要进行观察和实验，又要对获得的材料进行确切的数学分析，把各个物理量之间的关系用简洁的数学形式表达出来，从而去揭示各个物理量之间的内在联系，把实验结果上升到普遍理论的高度。 有意识地在实验中丢开一些次要因素，而抓住问题的根本。如在小球滚动实验中，他知道存在空气阻力的影响，而这种阻力也是可以测量的，但是在实际测量过程中却大胆地把它忽略掉了。这样，就可以获得超越这一实验本身的特殊条件的认识。 设法改变实验的测量条件，使之易于获得精确的结论。如由于物体自由坠落速度太大，不容易测得精确的结果，伽利略就设法“冲淡引力”，设计了小球在倾斜平面上滚动，从而把物体在一定高度下自由下落的时间“放大”，以致在他当时的实验条件下变得可以测量。 首创了所谓“理想实验”。这些实验虽然只是想象中的实验，但它们是建立在可靠的事实的基础上的，并通过“理想实验”的归纳和分析，往往能得出惊人的又是正确的科学结论，这就为实验科学的发展提供了新途径。 重视用实验去验证理论。他指出，从观察到的材料中提出规律，然后用实验验证；如果发现与事实不符，立即反过来考查自己的结论。以往的知识要用这种方法加以检验。他还认为，科学实验不应该是偶然的和无计划的，而是具备了进行实验的理论概念之后，为了证明它才去做的。 十分注意科学仪器在实

验中的作用。当时望远镜、显微镜已相继发明。他认为，这些科学仪器在实验中能够帮助人们克服感觉器官的局限，使过去观察不到的现象显示出来了，过去分辨不清的东西变得清晰了，人的认识因而进入到了新的领域。

**伽利略变换 (Galilean transformation)** 经典力学中两个惯性系之间时间和空间坐标的变换。若惯性系  $S'$  相对于另一惯性系  $S$  以匀速度  $v$  沿  $S$  系的  $x$  轴运动，并设  $S'$  系的  $x'$  轴与  $S$  系的  $x$  轴重合， $S'$  系的  $y'$  轴和  $z'$  轴与  $S$  系的  $y$  轴和  $z$  轴分别平行，并用  $(x, y, z, t)$  和  $(x', y', z', t')$  表示一件事在  $S$  系中发生的地点和时刻，以及在  $S'$  系中发生的地点和时刻。假定  $t = t' = 0$  时  $S'$  系的原点和  $S$  系的原点正好重合，则有

$$\begin{aligned}x &= x' + vt', \\y &= y', \\z &= z', \\t &= t',\end{aligned}$$

这就是伽利略变换式。按照这一变换：时间间隔在任何惯性系中都一样，空间距离在任何惯性系中都一样，时间坐标与空间坐标相互无关。伽利略变换是人们对时间和空间性质认识的一个阶段，认为时间的流逝和空间的间隔是绝对的，与观测者的运动状态无关。科学发展表明，这种认识实质上是机械唯物主义的，它只是在低速运动情况下时空性质的近似描写，在讨论高速物体的运动规律和电磁现象时，就不能用这种变换而应该用洛伦兹变换。

#### 伽利略变换

**伽利略相对性原理 (Galilean principle of relativity)** 亦称力学相对性原理。力学基本原理之一。该原理断言：力学定律在所有惯性参考系中的形式都相同。也就是说，在一惯性系内部所作的任何力学实验都不能确定该惯性系相对于其他惯性系的匀速运动速度。实验证明，伽利略相对性原理是内容更为广泛的相对性原理的一种特例，后者断言，一切物理定律在所有惯性系中的形式都相同，这个相对性原理称为爱因斯坦相对性原理。

**假说 (hypothesis)** 科学研究中假定性的说法。物理事实、物理理论、在理论基础上的逻辑推导，三者都是物理假说的客观依据，物理学假说大体上有三种类型。根据已知的物理原理和事实，对新出现的物理事实作出的假定性说明，很多物理假说都属于这一类型。在已知物理理论的基础上进行逻辑推导，预测可能出现的现象、特性、规律，这种方式多见于现代物理假说。因为现代研究的物理运动比之于早期研究的物理运动更深入，特别是引进了现代的数学工具，使现代物理理论更概括和抽象。如麦克斯韦关于电磁理论的假说，狄拉克提出的正电子假说等。这种假说不一定依赖于新事实。根据新的物理事实提出与已往的理论观念根本不相容的假定性说明。普朗克提出的量子假说和爱因斯坦狭义相对论的新时空观假说，都是突出的例子。这类假说多发生在新的科学发现与传统观念相冲突的时候，这类假说为数不多，但却成为物理学发展史上的重要的里程碑。上述形成假说的三种方式，不是绝对的，而是互相渗透的。

一个物理假说的提出没有某种特定的形式，它们常常通过归纳、演绎、类比、综合等方法形成。运用归纳方法提出假说，就是根据实验得来的大

量材料，总结概括出可能的物理特性和规律。这是提出物理假说初步和基本的方法，在经典物理学发展的初期，普遍使用。例如玻意耳定律、欧姆定律，开始时都是通过归纳方法提出的假说。通过归纳提出的假说把握性较大，运用演绎方法提出假说，就是从一般物理原理到个别物理现象的推理。例如，费米和泡利立足于能量守恒定律，进而提出中微子假说。运用类比方法提出的假说，是根据未知和已知的物理事实之间某些方面的相似或相同而推出它们在其他方面也可能相似或相同。例如多普勒根据声和光的类比，提出光源移动时，观察者接收到的光波频率也会改变的假说。运用综合方法提出假说，一般都是以物理学某一领域积累的大量感性材料和理论材料为基础。通过综合，提出一些更本质更具有普遍意义的认识。牛顿提出万有引力假说，就是综合了开普勒和伽利略力学的实践及理论成就，通过综合形成的假说。

物理学假说有两重验证，一是理论逻辑验证，二是实践验证。理论逻辑验证不能作为判别物理假说的最终标准，物理假说最终只能以实践来验证。例如李政道、杨振宁提出的弱相互作用下宇称不守恒的假说，吴健雄成功地用实验验证了李、杨的假说，于是，弱相互作用下宇称不守恒得到确认。一些物理假说以比较抽象的数学形式出现，难以用实验直接验证，但也要用实验间接验证，即验证由这些假说推论到的必然结论。间接验证的实验，往往都能起到判别一个假说真伪的作用。例如直到赫兹用实验验证了麦克斯韦方程组的必然结论——电磁波的存在，麦克斯韦的理论才为人们接受。

物理假说是物理学发展的形式，任何一个物理真理都经历过假说的形式，由假说脱胎出来。在物理学发展史上，不同假说的争论从来没有停止过，这种争论推动着物理学的发展。有些对立的假说一方是正确的，另一方是错误的，有些假说双方都是错误的，也有双方都是正确的，光粒子说和光波动说的争论是一个典型的例子。光的粒子说和光的波动说，实际上是从不同的角度反映了光的本质。对于统计的平均现象，光表现为波动；对于瞬时涨落现象，光表现为粒子，即波粒二象性，它是整个微观世界最根本的特性。从粒子说和波动说的争论出发，到掌握波粒二象性，是认识上的伟大飞跃。这个过程中一系列重大的研究和发现，直接或间接地根源于粒子说和波动说的争论。

**尖端放电** (point discharge) 带电导体尖端附近大气中所发生的放电现象。大致说来，带电孤立导体表面凸出而尖锐处(曲率很大，且为正)的面电荷密度很大；较平坦处(曲率较小)的面电荷密度较小；表面凹进处(曲率为负)的面电荷密度更小。因为导体表面外侧电场的强度与该处电荷面密度成正比( $E=$

$\frac{\sigma}{\epsilon_0}$ )，所以在导体尖端附近的场强很强，很容易导致该小区域内的空

气电离并被击穿，从而产生火花放电现象。夜间在高压输电线附近往往可看到笼罩着一层绿色的光晕(电晕)，这是一种微弱的尖端放电现象。这种放电增加了高压输电中的能量损耗，因此要求高压输电线表面光滑。为避免尖端放电，通常需将高压设备中的电极设计成光滑的球面形状。

尖端放电现象也有许多应用。例如，避雷针，感应起电机的喷电针尖，以及静电除尘和静电喷漆等设备，都应用了尖端放电效应。

检波 (detector) 参见解调。

简谐波 (simple harmonic wave) 见波。

简谐振动 (simple harmonic vibration) 最简单、最基本的振动，是振动的理想模型，是物理量随时间按正弦或余弦规律变化的振动。以  $x$  表示位移， $t$  表示时间 (图 1)，简谐振动的数学表示式是

$$x = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中  $A$  是振动的最大幅度，称为振幅。 $\omega$  是 2 $\pi$  时间单位中振动的次数，称为角频率或圆频率。 $T = 2\pi / \omega$  是振动一次所需的时间，称为周期。 $\nu = 1/T$  是单位时间内振动的次数，称为频率。 $\omega t + \varphi$  表示在一次往复的振动过程中，在时刻  $t$  的运动状态，称为位相。 $t=0$  时的位相  $\varphi$  称为初相。振幅  $A$ 、角频率  $\omega$  和初相  $\varphi$  称为简谐振动的三要素，它们完全地描述了简谐振动。

图 2

如图 2 所示，轻弹簧的倔强系数为  $k$ ，一端固定，另一端连结在光滑的物块上，物块和弹簧构成了一个振动系统。当弹簧形变不超过一定限度时，弹簧对物块的作用力是与物块离开平衡位置的位移成正比的回复力。以  $x$  表示物块离开平衡位置的位移，则此回复力为  $-kx$ 。物块的运动方程是

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \text{ 或 } \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2)$$

式中  $m$  是物块质量， $\omega_0^2 = k/m$ 。这个方程的解就是 (1) 式，说明物块的运动是简谐运动。物块运动的振幅和初相由  $t=0$  时物块的位置  $x_0$  和速度  $v_0$  决定：

$$A = \sqrt{x_0^2 + v_0^2 / \omega_0^2}, \quad \varphi = \arctan \frac{\omega_0 x_0}{v_0}$$

$\omega_0$  只由振动系统本身的性质  $m$  和  $k$  决定，所以又把频率  $\nu = \omega_0 / 2\pi$  称为此系统的固有频率，同时把周期  $T = 1/\nu$  称为此振动系统的固有周期。在简谐振动中，当经过的时间为周期的整数倍时，该物理量又恢复原值。任何复杂的自由振动都可以由许多不同频率和振幅的简谐运动来合成。

建筑声学 (architectural acoustics) 声学的一个分支。主要研究房间内的声学过程，包括室内音质和建筑环境的噪声控制，基本任务是保证房间里任何地方都能有很好的语言与音乐的可闻度，并降低城市环境和建筑中所产生的各种噪音，以满足人们听觉上的要求。为此，首先必须保证在房间里每一处都能有适当的响度，同时要考虑减少过度的回声，并消除或削弱来自外界透入到房间的各种杂声和噪声。解决这些问题的主要途径是正确选用吸音材料与房间的形式，以及创造特殊的隔音结构等。各种戏院、影院、会场对声音的要求很高，设计时都必须应用建筑声学的原理。

交流电 (alternating current) 通常指大小和方向都随时间作周期性变化的电流。其大小和方向都随时间按正弦 (或余弦) 函数作周期性变化的交流电称为正弦交流电。下页图中显示了某些典型非正弦交流电的波形图，不同形式的交流电有不同的用途。例如电力工业中常用的是频率为 50 赫的正弦交流电；广播和电视中用来载送讯号的则是频率高达数百千赫到数百兆赫的交流电；在示波器的示波管、电视机的显像管和电子计算

机的终端显示屏中，用来使电子束作水平扫描运动的是锯齿波交流电（图(b)）；数字和脉冲电路中大量采用持续时间极短暂的脉冲波（图(c)）等。交流电的最基本形式是正弦交流电，其他非正弦交流电都可以表示为不同频率成份的许多正弦交流电的叠加。

**交流电的电功率** (electric power of alternating current) 在单位时间内交流电流在一段电路上所做的功。常用  $p$  或  $P$  表示。在交流电路中，由于电压

#### 交流电波形图

和电流是不断变化的，电压和电流间又存在相位差，因而常用瞬时功率、平均功率、有功功率、视在功率和无功功率等概念来描述交流电路的电功率特征。

**瞬时电功率** 负载两端瞬时电压  $u$  与流经负载的瞬时电流  $i$  的乘积。常用字母  $p$  表示，则有  $p=ui$ 。若正弦交流电的电流和电压分别表示为  $i=I_m \sin t$ ,  $u=U_m \sin(t+\varphi)$ ，式中  $I_m$ 、 $U_m$  是电流、电压的最大值，是交流电的角频率， $\varphi$  是电压和电流的位相差，则瞬时电功率为

$$P=ui=U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t+\varphi) \\ =UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t+\varphi)。$$

瞬时电功率随时间的变化如图所示。可以看出，瞬时电功率  $p$  有时为正，有时为负。电功率为正值表示负载

#### 交流电瞬时功率图

在吸收电能；电功率为负值表示电路中有某些储能元件，将原来它所吸收的电能放出，送回电源。

从图中还可以看出， $p > 0$  的时间比  $p < 0$  的时间要长些，在一个周期中电路从电源吸收的电能通常大于所释放的电能。这是因为一般电路总具有电阻，在电阻上有电能转化为热能的过程，且这个过程是不可逆的。

**平均电功率** 交流电一周内在电路上所消耗掉的电功率的平均值。平均电功率又称有功功率，简称“功率”。若交流电的瞬时电功率为  $p=UI[\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]$ ，式中  $U$ 、 $I$  分别是电压和电流的有效值， $\varphi$  是电压与电流的位相差，是交流电的角频率，故一周期  $T$  内的平均电功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \\ = \frac{1}{T} \int_0^T UI[\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] dt \\ = UI \cos \varphi。$$

即在单相交流电路中，平均电功率等于电压的有效值、电流的有效值和功率因素三者的乘积。单位为瓦、千瓦。

**视在功率** 交流电路中，电压有效值与电流有效值的乘积。用符号  $S$  表示。即  $S=IU$ 。它的含义与直流电路不同，它不能代表交流电路中的有功功率。视在功率  $S$  乘以功率因素  $\cos \varphi$  等于有功功率  $P$ ，即  $P= S \cos \varphi$ 。视在功率的单位用伏安 (VA)、千伏安 (kVA)、或兆伏安 (MVA) 表示。

视在功率表示交流电器设备的容量。交流电器设备都是在额定电压下工作的，工作时受额定电流的限制，电器设备在运行中的视在功率也能表

示它的工作状态，并受其额定值的限制。例如，变压器容量的大小就是用视在功率表示的，额定电压 220 伏、额定电流 5 安的变压器，它的视在功率是 1100 伏安。

无功功率具有电感或电容的交流电路中，电感的磁场和电容的电场在一周期的一部分时间内从电源吸收能量，另一部分时间内将能量返回电源的这部分功率。常用符号  $Q$  表示。数值上  $Q=UI\sin\varphi$ ，式中  $\varphi$  为电流和电压之间的位相差， $U$ 、 $I$  分别为电压和电流的有效值。

在  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联的电路中，电感  $L$  两端的电压  $u_L$  与电容  $C$  两端的电压  $u_C$  位相相反，它们瞬时电功率的数值的正负号亦相反，当电感吸收能量时，电容正在放出能量，反之电感放出能量时，电容正在吸收能量，二者互相补偿，故电路对外进行能量交换的最大瞬时电功率（即无功功率）也就减小了。

**交流电动机** (alternating current motor) 将交流电能转变成机械能的动力装置。种类繁多。主要结构包括定子和转子两部分。在定子绕组中通以交流电产生旋转磁场，其磁场线切割转子绕组回路中的导线，产生感应电动势和相应的感应电流。感应电流在旋转磁场中受安培力作用而产生迫使转子转动的力矩，由此形成机械能输出。按正常运转时转子与旋转磁场转速是否相同，分为同步电动机和异步电动机两类。动力用电动机中以交流异步电动机使用最为广泛。在自动控制技术中使用的微型电动机的输出功率较小，常作为动力以及受控信号的传递与转换器件之用。

**交流电桥** (alternating current bridge) 可用来测量交流元件例如电阻、电感、电容值及其组合件参数的最准确仪器。形式与惠斯通电桥相同，但是指零器和电源都是交流仪器和信号源。桥臂电阻换成阻抗组件，因此交流电桥的平衡和相应一些性质表现出许多

#### 交流电桥

特殊之处，交流四臂电桥线路如图所示。交流电桥的平衡条件是对臂阻抗乘积相等，故必须同时满足对臂阻抗幅值乘积相等以及对臂相角和相等两个条件：

$$(R_1 + jX_1)(R_3 + jX_3) = (R_2 + jX_2)(R_4 + jX_4),$$

写成分式，变为：

$$\begin{cases} Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \\ \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \end{cases}$$

由于平衡条件是含两个未知数的二元联立方程组，所以使电桥平衡必须至少有两个可调元件。注意：既不是任意配置四个臂就能使电桥平衡，也不是任意

选两个独立可调参数就可将电桥调至平衡，而必须是满足上列式子中的两个可调参数才能使电桥平衡。要适当选择可调量，使被测阻抗中的两个被测分量 ( $Z$ 、 $R$ 、 $X$ 、 $\varphi$  四个量中的任意两个) 分别只与一个调节参数有单值关系，这样便实现了交流电桥的分别读数。

常用的阻抗比平衡电桥分为电容电桥和电感电桥两大类。每类电桥中有多种线路和应用特点以及计算表达式。可参看下列表。表中未画出检测器和电源。通常检测器接在  $cd$  间，电源接  $ab$  端。

**交流发电机 (alternating current generator)** 将机械能转变成交流电能的电源装置。基本结构主要包括产生磁场的磁极和产生感应电动势的线圈 (称为电枢)。其中转动的部分称转子, 固定部分称定子。此外还有金属滑环、电刷与机座等。只有一组电枢绕组的称为单相交流发电机, 电枢有三组绕组从而产生三相交流电的称为三相交流发电机。它们的工作原理相同。

图示为旋转电枢式发电机工作原理。在线圈匀速转动过程中, 通过回路面积的磁通量随时间不断变化, 从而产生感应电动势

式中  $\omega$  是在外力作用下电枢的转动角速度, 即交流电的角频率。 $\varepsilon_m$  是感应电动势的最大值, 它与  $N$  及磁感应强度  $B$  的乘积成正比, 即

$$\varepsilon_m = NB\omega,$$

式中  $C$  是由电枢线圈的匝数和面积等决定的结构参数。通过转轴与磁场线垂直的平面称为中性面。线圈处于中性面时的瞬时感应电动势为零。电刷通过弹簧机构压靠在与电枢相连的滑环上, 从而将电能源源输出。如果电压很高, 电刷与滑环间将发生火花放电, 易使电机发热烧毁。同时, 电枢可能占据的空间将受到磁极间隙的限制, 匝数不可能太多, 故旋转电枢式发电机提供的电压一般不超过 500V。旋转磁极式发电机克服了上述缺点, 能提供输出功率高达数十万千瓦、电压高达数万伏的交流电, 故大多数发电机均采用此种方式。由于交流电, 特别是正弦交流电, 是现代用电最主要的方式, 故交流发电机也就成为最主要的电源装置。

**交流欧姆定律 (Ohm law for alternating current)** 表述交流电路中电流、电压和阻抗三者关系的定律。在一段电路中, 用复数  $\mathcal{E}$  表示这段电路两端的正弦交流电压, 复数  $\mathcal{I}$  表示通过该电路的正弦交流电流, 复数  $Z$  表示这段电路的阻抗 (复数阻抗  $Z$  的实部是电阻  $R$ , 虚部是电抗  $X = X_L - X_C$ )。则交流欧姆定律可表示为

$$\mathcal{I} = \frac{\mathcal{E}}{Z},$$

这一表达式与直流电路中的欧姆定律形式相同。

**胶子 (gluon)** 传递夸克间强相互作用的媒介粒子, 常用符号  $g$  表示。质量为零, 自旋为 1。胶子不带电荷, 但带有色或色荷。胶子的色共有 8 种。由于胶子带有色荷, 所以胶子与胶子间将存在相互作用, 与胶子相应的场 (胶子场) 存在自作用。与此不同, 光子不带电, 也不带色, 光子之间不存在相互作用, 与光子相应的场 (即电磁场) 不存在自作用。所以, 胶子的性质与光子的性质有很大差别, 由胶子传递的强作用与由光子传递的电磁作用也存在很大的差别。迄今已有许多实验证实了胶子的存在。例如高能电子与质子的散射实验表明, 质子内部不仅存在点状的荷电粒子 (即夸克), 还存在电中性物质 (即胶子)。定量测量还表明, 质子的一半动量是由这种电中性物质所携带。另一类典型的证实胶子存在的实验是所谓 “三喷注实验”。高能电子——正电子对撞后, 从中心沿径向方向会出现三束粒子流, 通过分析发现, 其中两束粒子流分别由夸克和反夸克演化而来, 第三束粒子流则是由胶子演化而来。

**焦耳 (1) (James Prescott Joule 1818 ~ 1889)** 英国物理学家。生



于曼彻斯特。少年时未能上学读书。青年时向道耳顿学习，并在他的鼓励下从事自然科学研究工作，利用一切空闲时间钻研物理、化学和数学，终于自学成才。1850年当选为英国皇家学会会员，后又成为法国科学院院士。1872年和1887年两次担任英国科学促进协会主席。

主要贡献是发现能量守恒和转化定律。开始从事电磁学方面研究，1840年，发现电流在一定时间内通过导体时所放出的热量，与导体电阻成正比，与通过导体的电流的平方成正比。楞次也于1842年独立地发现了这一定律，后被称为焦耳-楞次定律。1843年，钻研并测定了热和机械功之间的当量关系，写了《论水电解时产生的热》和《关于电磁的热效应和热的功值》两篇论文。后者通过用磁电机发出的电流通入导体以产生热量，比较在通路时转动磁电机所作的功，和在断路时所做的功之差，与所得的热量来决定热功当量的数值。该论文在考尔克举行的英国学术协会上宣读时宣布：自然界的能是不能毁灭的，那里消耗了机械能，总能得到相当的热，热只是能的一种形式。这一宣布在当时立刻引起轰动。

此后，焦耳继续改进实验方法，将压缩某定量空气所需要的功与压缩时产生的热量作比较。又根据水通过细管运动放出的热量来确定热功当量。1847年，做了迄今认为确定热功当量的最好实验：在量热器里装了水，中间安上带有叶片的转轴，然后让下降的重物带动叶片旋转，由于叶片和水的摩擦，水和量热器都变热了，根据重物下落的高度，以及量热器内水的升高的温度，就可计算出热功当量的数值。不仅用水作实验，还用鲸油进行实验，测得热功当量的平均值为428.9千克重米/千卡。接着又用水银来代替水，并不断改进实验方法，直到1878年还有测量结果的报告，测得热功当量的平均值为423.9千克重米/千卡。这个值比现在的公认值：427千克重米/千卡约小0.7%，如此精确的实验结果为能量守恒和转化定律的建立，提供了无可置疑的实验证据。

焦耳对分子运动论的发展也作出了重要贡献。1845年，研究了气体压缩和膨胀时的热现象，并用稀薄气体膨胀实验证明理想气体的内能与体积无关。1848年，首次计算了有关气体分子的速度，确定了这个速度与温度的关系。还认为气体的压强是气体粒子对容器壁碰撞的结果。1853年~1854年，与W·汤姆孙合作，发现气体自由膨胀时温度下降的现象，被称为焦耳-汤姆孙效应。

(2) (Joule) 国际单位制中能量和功的单位，常用符号J表示。1J相当于1牛顿的力使物体在力的方向上移动1米过程中所作的功。

焦耳定律 (Joule law) 又称焦耳-楞次定律。确定电流通过导体时产生热量的定律。是能量守恒和转化定律在电能转换成热能这一特殊情况下的形式。由焦耳在1840年和楞次在1842年各自独立发现。其内容为：电流通过一段导体时放出的热量Q与电流I的平方、导体的电阻R及通电时间t成正比，即

$$Q=KI^2Rt。$$

若电流强度的单位为安培，电阻的单位为欧姆，时间的单位为秒，热量的单位为焦耳，则实验测定比例系数K=1，这时焦耳定律表示为

$$Q=I^2Rt。$$

应该指出，热量单位“焦耳”和“卡”之间的换算关系为

$$1 \text{焦耳} = \frac{1}{4.1868} \text{卡} \approx 0.24 \text{卡},$$

所以，如果焦耳定律公式中  $Q$  的单位取卡，则比例系数  $K=4.1868 \text{卡/焦耳}$ 。

**焦耳实验定律** (Joule experimental law) 参见理想气体。

**角动量** (angular momentum) 又称动量矩。描写系统转动状态的物理量。如质点的质量为  $m$ ，运动速度为  $v$ ，对某点  $O$  的位矢为  $r$ ，则质点对该点的角动量定义为  $L=r \times mv$ 。角动量是动量  $mv$  对点  $O$  的矩。质点对空间某一轴的角动量，定义为质点对该轴上任一点  $O$  的角动量在该轴上的投影值，此值并不因  $O$  点在轴上位置的不同而改变。质点对空间某一轴  $z$  的角动量还有一等价的定义 把动量  $mv$  分解成沿轴的和垂直于轴的两个分矢量  $mv_{\parallel}$  和  $mv_{\perp}$ ，垂直于轴取  $mv_{\perp}$  所在的对轴的角动量平面，与轴  $z$  交于  $O$  点。 $O$  到  $mv_{\perp}$  矢量线的垂直距离为  $h$ ，则质点对轴  $z$  的角动量  $L_z$  的大小是  $mhv_{\perp}$ ， $v_{\perp}$  是  $v$  的大小；当  $h > 0$  时，如  $mv_{\perp}$  对  $O$  点构成逆时针关系， $L_z$  取正值，否则取负值。若系统为一质点组，它对空间一点的角动量或对空间某一轴的角动量是质点组中每一质点对空间中同一点或同一轴角动量之和。若系统是一个绕着某一轴以角速度  $\omega$  转动的物体，它对转轴的角动量是转动物体中的每一部分对转轴角动量之和，等于  $I\omega$ ， $I$  是物体对转轴的转动惯量， $\omega$  是角速度在转轴上的投影。

质点系统或物体对空间中某一点  $O$  的角动量可分解成两部分之和。一部分是质心对  $O$  点的角动量，也就是把质点系统或物体的质量全部集中于其质心时，它对  $O$  点的角动量。另一部分是质点系统或物体相对于质心的角动量，也就是，在随着质心一起平动的参考系中观测时，它们相对于质心的角动量。角动量的量纲是  $L^2MT^{-1}$ ，其 SI 单位是  $\text{千克} \cdot \text{米}^2/\text{秒}$ 。

**角动量定理** (theorem of angular momentum) 又称动量矩定理。表述角动量与力矩之间关系的定理。质点系在惯性系中运动时，对固定点的角动量时间变化率等于质点系中各质点所受外力对同一点的力矩的矢量和。角动量定理中不出现质点系中各质点相互作用的内力，这是因为每一对内力对同一点的力矩矢量和永远等于零。如果计算力矩的参考点(矩心)在惯性系中运动，上述角动量定理一般不成立。如果考察运动的参考系不是惯性系，此定理一般也不成立。但对质心和质心系来说是例外。质心系是坐标原点在质心上，并在惯性系中平动的参考系。这时角动量定理表述为：质点系相对于质心系运动时，对质心角动量的时间变化率等于该质点系中各质点所受外力对质心力矩的矢量和。力学系统中只有单独一个质点时，此定理称为质点的角动量定理。

**角动量守恒定律** (law of conservation of angular momentum) 又称动量矩守恒定律。自然界的普遍定律之一。任何物质系统在不受外力矩作用或所受外力矩之和为零时，其总角动量保持不变。在力学中，角动量守恒定律只是角动量定理的推论：在角动量定理中令外力矩的矢量和等于零，即得出总角动量保持不变。但若物质系统不仅只有力学运动时，角动量守恒定律就变成了一条普遍定律，这时定律中所涉及的角动量是一切运动形式的总角动量。

**角加速度** (angular acceleration) 描写角速度变化快慢和方向的物理量。在时刻  $t$  以后的时间间隔  $\Delta t$  内，刚体的角速度由  $\omega$  变化到  $\omega + \Delta\omega$ 。

, 则

$$= \frac{\omega}{t}$$

称为刚体在时间  $t$  至  $t + \Delta t$  中的平均角加速度。当  $\Delta t$  趋近零时, 平均角加速度的极限

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}$$

称为刚体在时刻  $t$  的瞬时角加速度, 简称为角加速度。角加速度是一个矢量。在定轴转动时, 的方向沿固定转轴, 若  $k$  表示沿转轴某指定方向的单位矢量, 则

$$= \frac{d\omega}{dt} k$$

当刚体加速转动时,  $d\omega/dt > 0$ , 与  $k$  同向; 当刚体减速转动时,  $d\omega/dt < 0$ , 与  $k$  反向。在刚体作定点转动时, 由于瞬时转轴方位时刻变化, 亦即角速度的方向时刻变化, 所以角加速度方向与角速度方向一般不相重合。无论在定轴转动还是在定点转动情况中, 刚体上一点的加速度均可由下式给出

$$= \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}。$$

这里  $r$  是此点对固定转轴上任一点的位矢, 或是对定点转动中固定点的位矢,  $v$  是此点的速度。角加速度的量纲为  $[T^{-2}]$ , 其国际制单位为弧度/秒<sup>2</sup>。

**角速度 (angular velocity)** 描写刚体转动快慢和方向的物理量。设定轴转动刚体或定点转动刚体在无限小时间间隔  $dt$  内绕着固定转轴或瞬时转轴转过一无限小角位移  $d\theta$ ,  $d\theta$  是无限小转角的大小,  $n$  是一单位矢量, 与刚体的实际旋转方向构成右手螺旋关系, 角速度  $\boldsymbol{\omega}$ , 定义为

$$= \frac{d\theta}{dt} n。$$

转动刚体上一点的速度  $v$  与转动刚体的角速度  $\boldsymbol{\omega}$  之间有确定的关系。设点  $P$  对于固定转轴上任一点的位矢为  $r$ , 或  $P$  点对定点转动中的固定点的位矢为  $r$ , 则  $P$  点的速度是

$$v = \boldsymbol{\omega} \times r。$$

角速度的量纲为  $[T^{-1}]$ , 其国际制单位为弧度/秒。

**角位移 (angular displacement)** 描写刚体转动时位置变化的物理量。刚体在作定轴转动或在定点转动中绕瞬时轴转动时, 转过一个无穷小角度  $d\theta$ , 按右手法则根据旋转方向决定单位矢量  $n$ ,  $n$  必沿转轴,  $d\theta n$  称为无穷小角位移矢量。在定点转动的一般情况中, 无论刚体的初位置和末位置如何, 对于指定的初末位置, 总可以找到通过固定点和有一定指向  $n$  的一根轴线, 刚体可以绕着这根轴线按右手法则从初位置转过一个角度  $\theta$  到达末位置,  $\theta n$  和  $n$  两者构成了从初位置到末位置的角位移。定点转动的有限大小角位移并不是一个矢量。角位移的国际制单位为弧度, 其他常用单位为度。

**角坐标 (angular coordinate)** 描写刚体转动时的

图 1 定轴转动刚体的角坐标图 2 圆周运动的角坐标位置的物理量。定义为刚体上通过固定转轴的一个平面 与通过此轴的另一

一固定平面  $\phi_0$  之间的夹角 (图 1), 面对指定了方向的固定转轴看, 如果  $\phi_0$  逆时针向转过  $\phi$  角到达  $\phi$ ,  $\phi$  取正值; 否则  $\phi$  取负值。对于质点的圆周运动, 角坐标  $\phi$  定义为通过质点 P 的半径 OP 与沿指定方向的半径  $OP_0$  之间的夹角  $\phi$  (图 2), 如从  $OP_0$  逆时针向转过  $\phi$  角到达 OP,  $\phi$  取正值; 否则  $\phi$  取负值。

**教材结构图示**(chart of structure of instruction materials) 是利用网络图的形式显示教材知识结构、思维方法训练要求、数学手段运用等相互关系的一种形象化表示方法, 是物理学学科结构在教材分析中的具体体现。教材结构图示方法的作用是: 表明教材的知识体系结构。指出该部分知识的核心内容、重点以及各部分知识之间的相互联系, 还可以反映知识逐步深化的过程。表明科学方法训练和能力培养的要求。在表明教学流程的同时还可以标明各部分内容在教学过程中应当贯穿哪些科学方法训练, 如观察实验, 分类比较, 概括归纳, 类比和等效替代, 分析推理、假设和物理模型, 以及综合、评价能力等。表明数学手段的运用。在表明教学流程的同时指出教学过程中要运用哪些数学手段, 如平面几何知识, 立体几何知识, 一次函数, 二次函数, 一元一次方程, 一元二次方程, 二元一次方程, 三角函数, 三角方程, 函数图象等。利用图示法还可以反映其他要求。

下页图是高中力学教材的两种结构图示举例。图 1 是单一的知识体系结构图。它反映了高中力学中有关力和运动部分的知识系统。结构图体现了力是改变物体运动状态的原因, 合力的情况不同就有不同的运动状态。自上向下表示由简单到复杂的知识进程。横向表示某种因果关系或延伸扩展。图 2 是一种包含项目较多的结构图示, 它既反映知识结构, 又包含能力目标和数学手段运用。图示纵向以知识进程为序。左边是有关科学方法训练和能力培养的目标, 右边是有关数学手段的运用。

**教科书评介**(evaluating textbook) 对物理教科书进行的分析和评鉴。以下是美国《物理教师》杂志组织的教科书评价委员会对美国十几种常用高中物理教科书进行评价的标准。它对我国物理教科书的编写和评价, 有一定的参考价值。

评价教材的依据建立在下面七条准则上: 内容、可接受性、可读性、版面设计、科学性、社会问题、课外作业。每个方面都附有详细说明。

**准则一: 内容、内容的准确性和合适性。** 教材的内容是否与当前物理学界的思想相吻合。基本概念的定义是否准确, 课文是否尽可能地应用了基本概念。是否始终如一地应用了 SI (国际单位制)? 所选的内容是否适合于高中学生学习? 内容的安排顺序是否连贯, 是传统的结构还是其他的形式? 前后内容是否有联系而不需要死记硬背? 解释原理的实例是否恰当?

**准则二: 可接受性, 对中学生的合适性。** 数学方法是否限于中学生所掌握的数学? 书中所出现的思想中学生是否能够接受? 是否体现了学生的典型直观经验? 课本是否能激发学生的兴趣? 是通过物理现象之间的关系使学生思考, 还是要求学生机械地接受课文的思想?

**准则三: 可读性, 学生可以方便地阅读。** 句子、段落是否简短? 语言是否有趣味性而且丰富多采? 用词是否通俗恰当? 是否有足够的

图片和图解，这些图片和图解是否有助于对课文的理解？ 书中是否避免应用不必要的技术词汇？ 数学表述是否用恰当的

图 2 关于“功和能”的能力要求和数学手段运用结构图示  
语言解释出来？ 为了加强记忆，必要的物理术语是否重复使用？

准则四：版面设计，对视觉的吸引力。 所使用的照片能否引起学生的注意？ 版面设计得是否拥挤？ 颜色的运用是否易于想象？ 每节内容是否都附有标题？ 图是否能吸引学生的注意？ 所设计的插图是否强调了重要概念？

准则五：科学性，课本是否体现了物理学是一门正在发展中的科学。

理论的发展有没有充足的实验材料做基础？ 学生参与实验和研究过程的程度。 理论是实践的指导有没有得到充分的体现？ 对于有待于用实验或理论来解决的、但目前还属于未知世界领域的问题，有没有给出一些例子？ 有没有认识到现存理论只是对自然规律的近似解释？ 有没有写物理理论的历史进程和发展趋势？

准则六：社会问题，物理对社会的影响。 有没有充足的关于基础科学对技术贡献的材料？ 图片及说明是否提供了典型人物？ 言词中是否含有性别歧视？ 有没有提到物理对社会的影响？比如废物处理、能源利用、核武器等。

准则七：课外作业，适当给学生布置一些课外学习材料。 需要查看的文献资料是否列出了？ 有无学生课外活动的建议？ 有无要求经分析和推导才能得到答案的问题？ 每章的结束有无足够的与课文结合紧密的问题？ 有无要学生把两个概念或更多个概念联系起来才能解决的习题？

习题中的数据在日常生活中能否找到？ 问题表达得是否很清楚，学生能否确切地知道在问什么？ 有没有激励好学生进一步学习的习题？

根据每条准则，相应地把书评为差、一般、良好或优秀。在评价差别比较大的地方，则给出了等级范围，并尽可能地说明分歧的原因。不同的教科书适合不同类型的学生，教科书的编选和评价极易受编选者个人好恶的影响，而不是看学生喜欢还是不喜欢。随着我国教材向多样化方向的发展，根据大多数教学对象的特点和他们的需求，对可供选择的不同教科书作出尽可能客观和适当的选择，是一个物理教师面临的重要课题。就我国来说，教材是否在渗透德育教育方面做了应有的努力，也应当是评价的一个重要方面。

**教学研究报告** (research report in teaching) 物理教学研究实施后，得到关于研究对象的数据、情况描述等结果，对结果进行整理和分析的学术性文件。

数据的整理，常用图表法，分为统计表和统计图两种。数据分析必须运用教育统计的基本方法对数据进行处理。通过分析、比较、抽象和概括，得出一个比较客观公正的结论。

研究报告要反映研究工作的全过程。一篇良好的研究报告，必须有较好的理论价值，在实际中能被人应用。研究报告必须符合客观性和科学性原则，所作的结论必须严格以研究中得到的资料为依据，不能用主观愿望去代替科学结论。研究报告必须目的明确、内容充实、措词严谨、文字精

炼、符合规范。撰写研究报告的格式，一般来说，可包括以下几个部分：  
文献综述、问题的提出； 研究的目的； 研究的方法和程序； 研究的结果； 讨论； 总结和结论； 参考资料； 附录。

**教学研究的课题** (the topics of research in teaching) 选择中学物理教学某方面的特定问题，有计划有目的地探索物理教学的规律、方法以及有关具体教学问题。物理教学研究属于学科教育研究的范畴，它将教育研究的一般理论和方法运用于物理教学。选择研究课题是进行物理教学研究的起点。中学物理教学研究的课题一般包括以下几个方面。

(1)物理教学的一般问题研究。这类研究问题的涉及面很广，包括物理教学理论和实践、物理课程设计和实践、物理学习水平评价、物理教学水平评价、物理教学与其他学科教学的联系、物理教学与环境教育、物理教学如何渗透思想政治教育等方面的一般性问题。

(2)物理教材的分析研究及开发、推广。包括对现行国内外各种教材的整体和局部的分析研究以及新教材的开发和推广使用。

(3)物理教学法的研究。包括物理课堂教学的分析研究，各种教学方法的试验和对比，新教学方法研究，物理学中某些专题的教学方法改进等。

(4)学生学习物理中的思维特点和思维障碍的研究。包括学生学习物理中先入为主的概念和错误概念的分析研究，性别差异与学习物理过程中思维特点及差异的研究等。

(5)物理实验和教学手段的研究和开发。包括演示实验、学生实验、学生课外实验的改进和开发，新仪器、新教学软件的开发等。

(6)测验和评价技巧的研究。物理测验中的命题技巧和 method 的研究，各种测试手段及可靠性的研究等。

物理教学研究的课题应面向实际需要，有物理教学中的事实根据和教育理论的根据，并具有一定的可行性。

**教学研究方法** (research methods in teaching) 在物理教学研究中运用的几种基本教育研究方法。常用的研究方法有调查法、实验法和经验筛选法。

(1)调查法。调查法的基本步骤是： 确定调查课题、调查对象和调查范围，制订调查计划、调查手段和调查程序； 实施调查手段，搜集资料； 整理资料； 撰写调查报告。常用的调查手段有：问卷、测验、观察。其中问卷法使用较为普遍。问卷法也叫填表法。它是用表格的形式，要求调查对象笔答问题。最为重要的是编制问卷。常见的方式有：是非式(对命题表示个人是否同意)。 选择式(从规定的多种答案中挑选出最适宜的，加一记号)。 排列式(用数字表示答案按某种看法，例如重要性前后的排列顺序)。 评判式(表示个人对命题的判断。例如，五级态度量表是一种常用的评判式问卷，它要求被调查者从对某项命题的强烈肯定、肯定、不置可否、否定、强烈否定五项评判中选取一项)。问卷的措词必须特别准确、清楚。调查对象对每一问题会有哪些回答，事先必须进行周密估计，事后必须便于分类统计。对大规模调查，可先作小样本尝试性调查，及时修改问卷，然后再进行正式调查。问卷的卷首应附有“说明”，强调调查的目的、意义和具体要求。一般说来，问卷的回收率要达到 70% 以上。调查法可分为全部调查、抽样调查和分类调查三种。抽样调查要特别注意样本的代表性。调查必须在正常教育、教学环境中进行。

(2)实验法。实验法是用人为控制某种因素，建立实验条件，对某种物理教学方式，进行研究的方法。实验法通常采用等组法和轮组法两种方法。等组法常称为对照实验法。选择的两个组条件应基本相同。一个作为试验组，采用某种特定的教学方法，确定它对试验组的影响。另一个作为对照组，作为比较的标准。实验后进行效果测定，作对比分析。轮组法是选用A、B两个实验组，第一次A组用甲法，B组用乙法，教学后进行效果测定；第二次B组用甲法，A组用乙法，教学后再次进行效果测定。综合两次统计，比较甲、乙两法的差别，作出分析。运用实验法，要注意排除无关因素的影响。必要时进行重复实验或扩大试验，方可取得较好的成效。

(3)经验筛选法。对教学实践中创造的各种经验进行反复的筛选，探索教学规律，为理论研究提供原材料。筛选法的顺序一般为：总结先进的教学经验，对各种经验加以分析，制订出筛选计划。按预定计划，在授课中实施这些方法。并对实施过程进行系统的考察和评价。根据考察、评价的结果，对原有的经验进行比较、淘汰、筛选和优化。

一项教育研究，特别是一个比较复杂的研究课题往往需要用几种方法进行较长时期的综合探讨，构成一个方法组合的有机体系。

**接触电** (contact electricity) 伏打在发明电堆过程中发现的两种不同金属的接触会产生的正负电。意大利物理学家伏打从1791年开始研究伽伐尼电现象。开始他也接受伽伐尼关于动物电的假说，结果实验工作进展不大，但这一系列实验本身使伏打日益相信动物电、蛙腿只具有次要意义。1792年，伏打从实验上证明伽伐尼电本质上是两种不同金属与湿的动物电联接在一起而引起的，蛙腿只是起到验电器的作用。1793年，伏打便向伽伐尼关于动物电的观点进行挑战，即他完全排除了动物电的存在。他指出：“用不同的导体，特别是金属导体接触在一起，包括黄铁矿、其他矿石以及炭等，我们称之为干导体或第一类导体，再与第二类导体或湿导体接触，就会扰动电液，引起电激励。”同年，伏打对各种金属相互间的接触电动势进行全面研究，结果发现在锌、锡、铅、铁、铜、银、金、石墨的这一系列中，每一种金属当与其后面任何一种金属接触时，其本身的电位将高于其后面任何一种金属的电位，由此表明了接触电的由来，并揭示了伽伐尼电的全部秘密都隐藏在两种不同金属的接触点上。然而这一发现是在伏打发明电堆的过程中引发的，1799年，伏打终于发明了第一个能够产生持续电流的化学电池，其装置为一系列按顺序叠起来的银片、锌片和用盐水浸泡过的硬纸板组成的柱体，叫做伏打电堆。

**接触电现象** (contact electric phenomena) 原来不带电的两种金属互相接触时，在接触处分别带有正负电荷的现象。两金属间由此而存在的电势差称为接触电势差。其值仅与相互接触的金属导体的化学成分和温度有关，通常很小，一般只有十分之几伏，最多也只有几伏。

依照两种金属相接触时其相对电动势的高低，可将金属排成一个序列。1797年，意大利物理学家伏打首先根据实验结果确定了下述序列：铝 (Al) — 锌 (Zn) — 锡 (Sn) — 镉 (Cd) — 铅 (Pb) — 锑 (Sb) — 铋 (Bi) — 汞 (Hg) — 铁 (Fe) — 铜 (Cu) — 银 (Ag) — 金 (Au) — 铂 (Pt) — 钯 (Pd)。当这序列中的任意两种金属接触时，前者带正电，后者带负电。可以证明，当几种不同金属A、B、C、D依次相互接触时，接触电势差的总和仅与两端处的金属A和D的性质有关，而与中间金属B和C的性质无关。

接触电势差产生的原因是由于不同金属的功函数不同，亦即电子脱离不同金属表面所需的功不同，因而当两种金属互相接触时，温度相同，功函数较小的金属由于失去电子而电势增高，功函数较大的金属由于获得电子而电势降低。

**接口 (interface)** 中央处理机和外部设备之间的连接通道及有关控制电路，也可泛指任何两个系统之间的交接部分，或两个系统之间的连接设备。

接口一般应具备以下功能。 传送数据：数据通常分为三种类型。a. 数字量，即以二进制形式表示的数或以 ASC 码表示的数和字符；b. 模拟量，由传感器输出，经过 A/D 转换变为数字量再输入计算机，计算机的控制输出也必须先经过 D/A 转换才能去控制执行机构；c. 开关量，即有两种状态的量，可控制电机的启动和停止，阀门的开和关。 传递状态信息；在输入时，输入设备的传送信息是否准备好；在输出时，输出设备是否空闲。这些“已准备好”、“闲”、“忙”等设备状态信息要向主机“汇报”。

传送控制信息：控制输入输出设备的启动、停止和定位。

**结构式问题 (structured question)** 围绕同一问题情景给出若干子问题的试题形式。其中每个子问题可视为一个简答题、计算题、论证题等，它们的答题要求和方式都有明确的要求。子问题的构成方式可以是连续的或独立的。例如：质量为 2 千克的物体，位于粗糙水平面上，在大小为  $F=5$  牛、方向与水平成  $37^\circ$  角的斜向下的推力作用下，从静止开始运动，在 2 秒内通过 2 米的路程。第 2 秒末撤去力  $F$  ( $\cos 37^\circ = 0.8$ ,  $\sin 37^\circ = 0.6$ ,  $g$  取  $10$  米/秒<sup>2</sup>)。求： 在开始 2 秒内物体所受的摩擦力。 物体与水平面间的摩擦系数。 从撤去力  $F$  直到物体停止运动，物体克服摩擦力所做的功。

结构式问题是目前国内外基础物理测试中使用最多、最广泛的一种评价技巧，它能有效地测试学生对基本物理概念和规律理解的深、广度和灵活应用能力。由于结构型问题中每个简答题都有较专一的评价目标和明确的评分标准，它能较有效和细致地检测应试者达到评价目标的程度，因此适合标准参照的物理测验。从教学角度看，结构型问题的设计实际上给考生提供了一条简捷有效的解题思路，这对引导和训练学生进行有条理的逻辑思考有重要的意义。

**结型场效应晶体管 (junction field effect transistor)** 利用外加在 PN 结上的偏置电压来控制电流传输的半导体器件。如图所示，一块 N 型半导体的两端作为电极，一个称为源极，用 S 表示；另一

**结型场效应晶体管**

个称为漏极，用 D 表示。在两电极间外加一漏源电压  $V_{DS}$ ，D 接正，S 接负，此时在半导体内将有电流  $I_{DS}$  从漏极流向源极，形成了一条导电通道。如果此时再在该 N 型半导体的底部和顶部各扩散一层 P<sup>+</sup>层(上标符号+表示 P 区的浓度大于 N 区的浓度)，以形成 PN 结，并制一金属电极，称为栅极，用 G 表示，这样就构成了一个 N 沟结型场效应晶体管。沟道长为  $L$ ，宽度  $W$ 。利用外加在栅极 G 上的电压在 PN 结上形成的偏置电场来控制沟道宽度，从而改变沟道电阻和漏源电流，以实现结型场效应晶体管的功能。

**节拍器 (metronome)** 一种低频振荡器，产生频率为 0.6Hz 到 3.5Hz 左右的机械接触声或者调频节拍声。节拍器有机械节拍器和电子节拍器两



种。可用作进行等时间测量的控制信号。例如研究布朗粒子在不同时刻的位置分布，就是利用节拍器的时间信号，记下跟踪布朗粒子的位置，最后画出布朗粒子轨迹图，为研究分子运动的规律取得重要的实验资料。

机械节拍器的原理就是摆的等时性原理。节拍器摆是较复杂的物理摆，并外力策动下作强迫振动。为了取得物理摆的某种特定频率，在物理摆上设有可调节位置的摆锤。摆锤位置与频率刻度线有对应的关系，所以可方便地调节摆锤位置得到所需要的节拍数。为了补充物理摆在摆动时的能量耗散，在节拍器的下部装有卷簧，开始时卷紧卷簧，即外力做功贮藏弹性势能，摆动时，棘轮强迫物理摆振动，使节拍器按照本身机械结构所产生的质量分布作来回摆动。

由于物理摆的对称轴不能像单摆可任意取，并且物理摆的重心必须低于支点，摆在对称轴两边偏离的最大幅度尽可能相同，因此机械节拍器放置时，摆杆在静止时尽可能垂直于水平面，否则容易衰减幅度最后停止。

电子节拍器有音响清晰、频率调节范围宽、使用方便、放置位置任意、不怕振动等优点。电子节拍器的工作原理就是晶体管或者集成电路振荡器。振荡频率由电路中的电阻、电容元件的数值决定，常用的电子节拍器有十种频率段，即每分钟振荡有 20、40、60、80、100、120、140、160、180 和 200 等次等，调节微调旋钮可得到 20~200 中的任意一种节拍数。

不论是机械还是电子节拍器，频率的不稳定性为  $10^{-4}$ ，即相对误差为 0.01%，不稳定性误差是一种偶然性误差，所以不能修正和补偿。

**解调 (demodulation)** 从携带信息的已调信号中恢复信息的过程。发送端用已调制的波发送、传输信息，接收端必须恢复所传送的信息才能加以利用，这就是解调。解调是调制的逆过程。调制方式不同，解调方式也相应地有所区别。解调可分为“正弦波解调”（有时也称为“连续波解调”）和“脉冲波解调”。正弦波解调又可分为幅度解调、频率解调和相位解调。

在无线电广播收音机、电视机以及雷达或其它接收机中，都有一级解调器，实现从载波信号中分离出需要的话音、图像等信号。解调器又称为检波器。在高放式无线电接收机中，检波器将声频信号从放大后的输入射频载波信号中分离出来。在超外差接收机中，变频器又称为第一检波器，它将射频信号变为已调中频载波信号。而第二检波器才将声频信号从载波信号中分离出来。在调频接收机中，解调器又称为鉴频器，它将载波频率的变化变为相应的声频信号。在彩色电视接收机中，解调器从输入的已调载波信号中提取色差信号。

**解决物理问题的能力 (ability to solve Physics problem)** 运用物理学知识和思想方法、基本技能分析、解决具体物理问题的能力。解决物理问题的能力不只是一般意义上解书面习题的解题能力。因为所要解决的具体物理问题有两类，一类是实际问题，即问题情景包括真实给出的实验装置、仪器或其他实物，学生应按照问题的要求综合运用观察能力、实验能力和思维能力，给予分析和解决。对学生讲，这类问题的情景应当是新的，而不应是过去做过实验的简单重复。问题的解决过程应该是简捷明了、力所能及的，这类问题能有效地培养手脑并用的能力和灵活应用知识的能力。另一类是书面问题，即以书面方式设置一个假想的问题情景，包括实验情景，让学生解决。这是训练学生运用知识的主要手段和方式，学

生基本上只运用思维能力分析、解决问题。在解决这类问题时，要防止不从物理概念出发，不分析物理过程和物理规律适用条件就乱套公式，要强调以下分析和解决问题的方法。首先要明确题意，找出问题情景中的有关的显性和隐性的因素，即有关的物理量和物理条件。确立研究对象，将问题情景抽象成可以运用有关概念和规律解决的物理图景和物理过程。

形成解决问题的思维中心，按一定思路解决问题。

学生解决物理问题能力的提高，不仅有赖于提高问题的质量，防止问题情景的程式化和抽象化，使学生在解决问题过程中能有效、全面地提高观察、实验能力和各种思维能力，而且有赖于持之以恒的训练，以养成科学地分析、解决问题的习惯。

介质 (medium) 又称“媒质”。物质系统在其间存在或物理过程在其间进行的物质。一般分为电介质、磁介质等。电介质是指主要以极化方式而不是以传导方式传递电的作用和影响的媒质。电介质可分为气态电介质 (如氢、氧、氮及一切在非电离情况下的气体)、液态电介质 (如油、纯水、漆、有机酸等)、固态电介质 (如玻璃、陶瓷、橡胶、纸、石英等)。磁介质是指在磁场作用下能发生变化并能反过来影响磁场的媒质。磁介质按其磁性可分为铁磁质 (如铁、钴、镍及含铁的氧化物等)、顺磁质 (如氧、一氧化氮、空气及某些碱性元素、碱土元素、稀土元素的盐等)、抗磁质 (如铜、铅、银、水、氮及碱金属盐类、卤素等)。广延的实物，如空气、水等也被称为媒质，声音就在这种媒质中传播。不存在实物的真空，有时也称为媒质，电磁场就是在这种媒质中传播的。

**金属—半导体接触** (metal-semiconductor contacts) 金属和半导体接触可以有两种形式：欧姆接触和整流接触。整流接触时，金属和半导体之间将形成一个势垒，这一观念最早是由肖特基于 1938 年提出的，故称为肖特基势垒。所有半导体器件和集成电路都要通过金属引线使之与电子线路中的其它元器件相连接，这种金属和半导体之间的接触是一种欧姆接触。

若 N 型半导体的功函数  $W_x^{(n型)}$  小于金属功函数  $W_m$ ，即  $W_x^{(n型)} < W_m$ ；或 P 型半导体的功函数  $W_s^{(P型)}$  大于金属功函数，即  $W_s^{(P型)} > W_m$ ，则这时所形成的金属—半导体接触就是肖特基接触，它使电子从半导体流向金属。这时只有当正向偏置时才有较大的正向电流，而反向电流非常小。这就是肖特基势垒的整流作用。

**精密度 (Precision)** 用来描述测量者在测量过程中的判别和估计能力。测量值可能比仪器的准确度高，也可能相等或者低。例如用米尺测量物体的长度时，准确度为 1 毫米，但是测量者如果准确地估计最小分度间的读数，可能使测量结果准确度提高到 0.1 毫米。但要在更准确的仪器测量后才能确认，在没有更准确的仪器复核时，不能说准确到 0.1 毫米，只能说精密到 0.1 毫米。所以精密不一定是准确的。如果测量者不顾米尺的最小分度，只读到厘米，显然读数没有达到仪器的准确度，这就是测量精密度低于仪器的准确度。其实不需要高精密度读数时，选用的仪器准确度也可适当降低，只有当精密度稍稍高于仪器的准确度时才算是合适的测量，而精密度的要求与其它待测量的相对不确定量有着相同的量级，整个实验才算安排得合理和准确。

**晶格结构 (structure of crystal lattice)** 晶体内原子周期性排列的形式。不同晶体其原子规则排列的具体形式不同，因此具有不同的晶格结构。原子在晶格内占有的位置称为格点。自 1912 年劳厄发现了 X 射线对晶体的衍射现象以来，用 X 射线衍射分析等方法已探明了数以万种的晶体的结构，从简单的金属到结构极其复杂的蛋白质。下面给出几种常见的典型晶格结构。

**简立方结构** 在立方体的八个顶角上都有原子的一种最简单的原子排列形式，如图 1(a)所示。如金属钋 (Po) 就是这种晶格结构。

**体心立方结构** 如图 1(b)所示。除在立方体的八个顶角均为原子所占外，在体心还有一个原子。如金属锂 (Li)、钠 (Na)、钾 (K) 等都具有这种晶格结构。

**面心立方结构** 如图 1(c)所示。除在立方体的顶角有原子外，在立方体六个面的面心处各有一个原子。如金属铜 (Cu)、银 (Ag)、金 (Au) 等都是面心立方结构。

(a)

简立方晶格 (b) 体心立方晶格 (c) 面心立方晶格 (d) 六角密排晶格

图 1 几种典型的布拉伐晶格结构

**六角密排结构** 如图 1(d)所示，图中每一个黑点表示原子占有的位置。如镁 (Mg)、锌 (Zn)、铍 (Be) 等，它们的原子就是按六角密排结构排列。

上述几种简单晶格都属于布喇菲格子。但是有些晶体的晶格结构是由两种布喇菲格子套构而成的，这种晶格称为复式格子。氯化钠、金刚石、砷化镓的晶格结构就是三种典型的复式晶格结构。

**氯化钠晶格结构**如图 2(a)所示，它是由  $\text{Na}^+$ 和  $\text{Cl}^-$ 两种面心立方格子沿立方体边长方向移动  $1/2$  长度套构而成。

(a) NaCl 晶体结构 (b) 金刚石晶格结构图 2 典型的复式晶格结构

**金刚石晶格结构** 如图 2(b)所示，它是由价键取向不同的两种碳原子的两个面心立方布喇菲格子沿立方体体对角线移动  $1/4$  长度套构而成。若碳原子换成硅原子或锗原子，就形成半导体硅或半导体锗的晶格结构。

**闪锌矿结构** 若把化合物中两种原子如砷化镓 (GaAs) 中 Ga 和 As 原子分别替代金刚石结构中价键取向不同的碳原子，那么这种晶格结构就称为闪锌矿结构。砷化镓就是具有闪锌矿结构的晶体。

了解晶体的微观结构对于固体物理学、化学、分子生物学、矿物学和材料科学等都有重要的意义。

**晶格振动 (crystal lattice vibration)** 晶体中的原子在其平衡位置附近的振动。由于晶体中原子间的相互作用使这种振动互相耦合，所以晶格振动是一种集体运动。固体中许多与温度有关的性质，如固体的比热和热传导、金属的电阻、离子晶体的光学性质、铁磁—顺磁转变以及超导现象等，都与晶格振动有关。

实际的晶格振动很复杂。在固体理论中常采用简谐振动近似，即假设原子间的作用力是弹性力。这时，在由同种原子组成的简单晶格中，若某个原子以频率  $\nu$  振动，则晶格中的其他原子亦以相同的频率和振幅振动，且相互间具有特定的位相关系，也即在晶格中呈现出一种波的运动。这种

波称为“格波”或“点阵波”，格波的波矢量  $q$  的方向代表格波的传播方向，其值（即波数）与格波的波长  $\lambda$  有关： $|q| = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。晶格振动频率与波量之间的函数关系  $\omega(q)$  称为“晶格振动谱”或“格波的色散关系”数矢。可以证明在  $N$  个全同原子所组成的三维晶体中存在  $3N$  种独立的格波振动模式，实际的晶格振动可近似地用这  $3N$  个基本格波的叠加描述。对于每一原胞中有几个原子的复式晶格来说，独立的振动模式中除原胞之间的相对振动外，还包括原胞中原子间的相对振动。前者称为“声学波”；后者频率较高，可达到光频范围，称为“光学波”。根据量子理论，格波的能量是量子化的，它的能量量子称为“声子”，声子概念的引进可使晶格振动的表述简化。

简谐近似的格波理论可解释低温下晶体的比热与温度关系的实验结果，但对于晶体的热膨胀、热传导等性质必须考虑原子间相互作用的非简谐力成份。在非简谐效应影响下，各格波不再是独立的，它们之间存在着相互作用。当晶体中存在杂质或缺陷时，它们会使格波发生散射，并在杂质或缺陷附近形成局域振动，其振幅随着与杂质或缺陷的距离增加而按指数规律衰减。在晶体的表面或界面，会出现晶格振动沿表（界）面的传播，这种表（界）面波的振幅也将随着与表面或界面的垂直距离的增加而按指数规律下降。

**晶面和密勒指数 (crystal plane and Miller index)** 通过布喇菲格子的格点作一系列平行而等距的平面；所有格点都可包含在这平面系内。这种平面系可以有无限种。

如果在任一晶面系中取晶面 ABC，它与基矢  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  的截距分别为  $ma_1$ 、 $la_2$ 、 $na_3$ ，取整数  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  使  $h_1 \cdot h_2 \cdot h_3 = \frac{1}{l} \cdot \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{n}$ ，于是就以这 3 个整数加圆括号，即  $(h_1 h_2 h_3)$  来表征该晶面位置，并称此整数为密勒指数。

经常用到的晶面有  $(100)$ 、 $(110)$  和  $(111)$ ，分别见图中(a)、(b)、(c)中打斜线的面。其中如  $(100)$  晶面的密勒指数是这样确定的：这个晶面与基矢  $a_1$  轴的截距为  $a_1$ ，并由于与  $a_2$ 、 $a_3$  轴平行，截距为  $\infty$ ，

因此  $\frac{1}{a_1} \cdot \frac{1}{\infty} \cdot \frac{1}{\infty} = 1 \cdot 0 \cdot 0$ ，故密勒指数为  $(100)$ 。把与  $(100)$  晶面等效的  $(010)$ 、 $(001)$ 、 $(\bar{1}00)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(00\bar{1})$  晶面共 6 个归为一类等效晶面，用花括号  $\{100\}$  表示；同样把与  $(110)$  晶面等效的  $(011)$ 、 $(101)$ 、 $(\bar{1}10)$ 、 $(1\bar{1}0)$ 、 $(0\bar{1}1)$ 、 $(01\bar{1})$ 、 $(\bar{1}01)$ 、 $(10\bar{1})$ 、 $(0\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}0\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}0)$  共 12 个晶面归为另一类用  $\{110\}$  表示的等效晶面，与  $(111)$  晶面等效的  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}11)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 、 $(11\bar{1})$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}1\bar{1})$  共 8 个晶面归为由  $\{111\}$  表示的等效晶面。

#### 几种典型晶面

与晶面垂直的法线方向称为“晶向”。从一个原子沿晶向到最近邻原子的位移矢量若为  $l_1 a_1 + l_2 a_2 + l_3 a_3$  则可用  $l_1, l_2, l_3$  一组数来表示晶向，称数组  $[l_1 l_2 l_3]$  为晶向指数。

已经证明在立方晶格中，晶面的密勒指数与该晶面法向的晶向指数完

全相同。因此与立方体边长[100]晶向，立方体面对角线[110]晶向，立方体体对角线[111]晶向相垂直的晶面分别为(100)晶面、(110)晶面和(111)晶面。

**晶体 (crystal)** 由结构基元 (原子、离子、分子等) 在空间按规则的周期性排列而成的固体。晶体又分单晶体和多晶体。在科学和技术领域中，晶体常常是专指单晶体，而将单晶体和多晶体统称为晶态固体或结晶固体。在自然界中存在的大多数固体物质都是晶态固体。例如，岩石、泥土、金属甚至棉花和肌肉纤维等等，都具有晶态结构。

一些单晶体，特别是天然矿物单晶体 (如石英、方解石等) 是一些表面光滑的凸多面体，其外形最显著的特征是表面 (晶面) 的配置是有规则的：同一品种晶体的两个对应晶面间的夹角是恒定的。最初，人们把具有规则几何外形的固体称为晶体。这一定义显然是不严格的，事实上不少单晶由于生长条件的限制，其规则的晶面并未充分暴露；而多晶体的外形看上去更是不规则的。规则的几何外形仅仅是晶体内部结构规律的外在反映，区别晶体与非晶体的根本判据是其内在结构是否具有周期性。

单晶体中的结构基元在三维空间作不间断的周期重复排列，其物理和化学性质是各向异性的。多晶体则是由许多大小不一、取向不同的单晶体颗粒 (晶粒) 组成的。多晶体物质的性质不仅取决于所包含晶粒的性质，而且还与晶粒的大小及相互取向等密切相关。如果各小晶粒的取向无规则，那么该多晶体便是各向同性的。晶态固体的熔解过程就是其长程序结构的解体过程，无论是单晶体还是多晶体，都有确定的熔点。

**晶体的对称性 (crystal symmetry)** 晶体的外形和其内部结构的一个极其重要的几何特性。晶体中原子有规则的周期性排列一方面使晶体的结构和性质随方向变化；另一方面使晶体在某些等效方向上具有完全相同的结构和性质，即晶体具有对称性。晶体的几何外形和物理性质的宏观对称性是其内部结构对称性的反映。

一个对称几何图形的等效方向可通过各种几何对称操作来识别。例如对立方体，以其对面中心的连线为转轴，每转动角度  $\frac{2\pi}{4}$  后可与其自身重合一次，这表明与这轴垂直的四个依次相垂直的方向是等效的。我们称该图形具有 4 重轴对称性。这种绕某一固定轴的转动能使图形回复到原来位置的操作称为轴对称操作。对称操作所依赖的几何要素 (点、线和面等) 称为对称元素，这里的对称元素是旋转轴，并称为 4 重旋转轴。一种几何图形往往可能有多种对称性操作。显然对称性操作愈多，图形的对称性就愈高。

晶体的对称性包括晶体外形的宏观对称性和晶体结构的微观对称性。晶体的宏观对称性除轴对称性外还有旋转—反演对称性。旋转—反演对称性是指图形绕一转轴转动角度  $\frac{2\pi}{n}$  并再经轴上一点作中心反演后能与自身重合的性质，其对称元素即该操作所依赖的转轴，称为 n 重旋转—反演轴，记作  $n$ 。晶体的宏观对称操作受其内部原子排列周期性的限制。例如，一个正 5 边形不可能相互紧贴并实现周期性重复排列，因此晶体没有 5 重对称性。可以证明，晶体也不可能具有 7 重和 7 重以上的对称性。晶体的旋转轴只有 1、2、3、4 和 6 重 5 种轴对称性。同样旋转—反演对称性也只

有

$\bar{1}$ 、 $\bar{2}$ 、 $\bar{3}$ 、 $\bar{4}$ 和 $\bar{6}$ 重5种。晶体的宏观对称性可用上述10种对称元素的组合来描述，它们可能有32种不同的组合。也就是说，晶体宏观对称性只有32种类型，可用32种点群来概括。晶体中原子的排列具有三维周期性结构。由于晶体的线度要比晶胞大得多，因此可将其看作为一个无限周期图像。一个无穷大的周期性图形作一定平移操作后仍能复原，因此具有平移对称性。这是晶体结构的微观对称性。考虑了所有各种情况后，晶体结构的对称操作共有230种不同的类型，因此所有的晶体结构按对称性可分为230种不同的类型，可用230个空间群来描述。

**晶体的结合 (crystal binding)** 构成晶体的原子或分子之间的相互作用。晶体中的原子之所以能够结合成具有一定几何结构的稳定晶体，是由于原子间存在着结合力。设想把分散的原子或分子结合成晶体。当

斥力引力

斥力势引力势

图1 原子间的相互作用(a)相互作用力与原子

间距的关系；(b)相互作用势能与原子间距的关系

分散的原子相互接近到数纳米的距离时，原子间带正电的原子核和带负电的电子之间的库仑净作用将使原子相互吸引，且引力的值随原子间距离的减小而增加。其后，随着原子间距的进一步减小，由于价电子云相互重叠和两核电荷间的相互作用而出现斥力，斥力随距离缩短而迅速增加。原子间的相互作用包括引力和斥力两部分，它们与原子间距的关系如图1(a)所示。其中 $r_0$ 为晶体中原子的平衡距离，这时引力和斥力相抵消。相应地，两个原子间的相互作用势能亦随原子间距的改变而变化，如图1(b)所示。在 $r_0$ 处，相互作用势能最小。这时体系的总能量最低，相应的晶体结构最稳定。分散的原子在结合成晶体时释放出的能量 $W$ 称为晶体的结合能或内聚能。

晶体中原子间的结合力与原子的电子结构有关，不同类型的原子间具有不同形式和大小的结合力。按结合力的性质和特点，晶体的结合有5种基本类型：离子结合，共价结合，金属结合，范德瓦尔斯结合和氢键结合。

**离子结合** 当容易失去电子的金属原子与容易接受电子的非金属原子相互靠近时，金属原子的价电子转移给非金属原子，形成具有较稳定电子结构的正、负离子，且正、负离子通过它们之间的静电库仑作用结合在一起。由这种类型结合而成的晶体称为离子晶体，它以离子为结合单元，正、负离子相间排列。典型的这类晶体结构有NaCl结构和CsCl结构。离子晶体的结合能较大，一般是每个离子几个电子伏。它们的熔点较高，硬度较大，膨胀系数较小。一般是良好的绝缘体。

**共价结合** 电子束缚能力相近的两同种原子相互靠近时，各自贡献一个自旋相反的电子，形成两个原子所共有的电子对，这对电子主要局域在两个原子之间，它们通过静电作用把两个带正电的原子核吸引在一起，这种电子结构称为共价键。以共价结合而成的晶体称为共价晶体，也称为原子晶体或同极晶体。共价结合有两个特点：一是饱和性，即一个原子只能

形成一定数目的共价键；二是方向性，即各共价键之间有确定的取向关系。

族元素 C (金刚石)、Si、Ge 的晶体是典型的共价晶体，这些晶体中每个原子与处在四面体顶角方向的四个相邻原子之间各形成一个共价键，形成金刚石结构。共价晶体有较大的结合能，其熔点高，坚硬但性脆，导电性能差，一般是绝缘体或半导体。

**金属结合** 对价电子束缚较弱的原子结合成晶体时，原来分属于各个原子的价电子将脱离原子的束缚，而在整个晶体内自由运动，为所有原子所共有。共有化电子形成的负电荷云和浸没在电子云中的带正电的原子实之间的库仑吸引作用促使原子聚合在一起。这样的结合称为金属结合。第

族、第 族及过渡元素的晶体都是金属晶体。金属晶体中原子排列紧密，结构多为面心立方或六角密排结构。它的结合能略低于离子晶体和共价晶体。金属晶体的主要特点是具有高的导电性和导热性，有金属光泽和较好的可延展性（范性）。

**范德瓦尔斯结合** 具有稳定电子结构的原子或分子，例如具有满壳层结构的惰性气体元素或价电子已形成共价键的饱和分子（如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{CH}_4$ ）等结合成晶体时，原子或分子的电子结构基本保持不变。中性原子或分子之间的结合力称为范德瓦尔斯力。这种结合力很弱，它的主要来源是组成粒子间电偶极矩相互作用或瞬时偶极矩间互相感应作用产生的吸引力。由范德瓦尔斯结合形成的晶体称为分子晶体。分子晶体的结合能很小，它的主要特性是低熔点、低硬度、大的热膨胀系数和大的压缩率、低的电导率和热导率。

**氢键** 在一些含有氢的化合物中，氢原子可以同时和两个对价电子束缚较强但半径较小的原子（如 O、F、N 等）相结合。氢原子(H)只有一个电子，当它与其他原子(X)形成结合较强的共价键后，裸露的氢核可通过库仑作用再与另一对电子束缚较强的原子(Y)形成弱结合。这种由氢参加的特殊形式的结合称为氢键结合，表示为  $\text{X-H}\cdots\text{Y}$ 。由氢键结合成的晶体，称为氢键晶体。冰 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 是典型的氢键晶体，其结构如图 2 所示。每个氢原子与两个氧原子结合成氢键，而每个氧原子通过氢键与四个氧原子相邻接。冰的这种四面体堆积的结构十分畅开，因此冰的密度小于水。在铁电晶体磷酸二氢钾 (KDP)、固态氯化氢和硼酸等晶体中，也都有氢键存在。

实际晶体的结合，以这五种基本形式为基础。但许多晶体往往不是单一形式的结合，一种晶体可能兼有几种结合形式；或者处于两种基本结合形式之间的过渡状态，例如部分离子结合部分共价结合、部分金属结合部分共价结合的混合性质的状态。

图 2 冰中氢键结构的四面体构型

氧原子 氢原子

**晶体二极管 (crystal diode)** 利用半导体的特性而制成的一种二端器件。这些器件主要的特征是具有非线性的电流—电压特性。晶体检波器早在第一次世界大战末期已经使用。1930 年已成批生产半导体整流器。1949 年，美国物理学家肖克莱建立了 PN 结理论，为半导体器件奠定了科学基础。此后随着半导体材料和工艺技术的发展，利用不同的半导体材料、掺杂分布和几何结构，研制出结构种类繁多、功能用途各异的多种晶体二极管。硅和锗是二极管中最常用的半导体，化合物半导体，如硫化镉、硒化镉、磷化镓、砷磷化镓以及碳化硅等，常用于制造特种用途的晶体二极

管。晶体二极管以结构类型划分，有半导体结型二极管、金属—半导体接触二极管、体效应二极管三类。

**半导体结型二极管** 导电类型不同的（常见的有 N 型和 P 型）两种材料相互接触制成的 PN 结的器件。根据 PN 结的基本特性，可以制作多种功能的二极管。利用 PN 结的单向导电性，可以制作整流二极管、检波二极管和开关二极管。利用 PN 结的齐纳击穿特性，可制成稳压二极管，它可在电源电路中提供固定偏压或进行过压保护。利用雪崩击穿特性，可制成雪崩二极管，用作固体微波功率源。利用高掺杂 PN 结的隧道效应，可制作隧道二极管，它可用于低噪声放大或振荡，也可用作超高速开关，频率可达毫米波段。利用结电容随外加电压非线性变化特性，可制作变容二极管，在微波电路中用于参量放大、电调谐及产生谐波等。利用 PN 结受光照射时产生的光生伏特效应，可制作光电二极管。

**金属—半导体接触二极管** 利用半导体与金属接触形成的势垒而制成的晶体二极管。包括点接触二极管和肖特基势垒二极管。适用于高频，具有高频损耗小、噪声低、检波灵敏度高、性能稳定可靠等特点。在微波通信及雷达中用于混频、检波、调制、超高速开关、倍频及低噪声参量放大等。

**体效应二极管** 利用半导体某些体内性质受外界作用而发生变化的原理制成的器件。除欧姆接触之外，它不含有 PN 结及其他界面。可用于光电导型探测器、热敏电阻、霍尔元件和电子转移器件等。

**晶体三极管 (transistor)** 由半导体材料制成的有源三端器件。晶体三极管几乎能完成电子管的所有功能，诸如放大、整流、振荡、开关等，它也是集成电路、大规模集成电路和超大规模集成电路的基础和关键器件。晶体三极管是在 1948 年由美国人巴丁、布喇顿和肖克莱发明。次年肖克莱提出 PN 结和面结型晶体管理论，推动了晶体管的研制。1953 年制出硅结型场效应管。1960 年出现了硅的金属—氧化物—半导体场效应管 (MOSFET)。1960 年 ~ 1962 年制成硅平面型晶体管，为低噪声和大功率器件以及大规模集成电路的发展打下了基础。1966 年制成砷化镓的肖特基势垒栅场效应晶体管 (MESFET)，它是新一代计算机、超高速集成电路的关键器件。

**面结型三极管** 发射结和集电结均在导电类型相反的两种半导体区域之间形成。是一种电流控制器件，有 NPN 和 PNP 两种结构形式。以 NPN 晶体管为例（如图 1 所示），它由三个区域（即发射区、基区和集电区）构成，这三个区域分别称为发射极、基极和集电极。含有两个 PN 结，分别称为发射结和集电结。在正常工作条件下，发射结被正向偏置，集电结被反向偏置。发射结正向偏置使发射极—基极势垒降低，造成电子向基极注入和空穴向发射极注入。注入的空穴构成发射极空穴电流，注入的电子在基区是少数载流子，其中一些电子在基区中与空穴复合，但大多数未复合的注入电子经扩散和漂移作用抵达集电结。抵达集电结的电子被集电极吸收成为集电极电流，因此，发射结注入的载流子能使反偏的集电结流过大电流，这就是晶体管作用的基础。但这种作用只有在两个结相距很近时才存在，因此其基区一般均做得很薄。

图 1 面结型晶体三极管

**结型场效应晶体管** 有两个栅 PN 结，N 型沟道（或 P 沟道）夹在两



个栅 PN 结的空间电荷层之间，沟道两端加上欧姆接触（称源极和漏极），利用场效应原

### 图 2 结型场效应管

理工作的晶体管。结构如图 2 所示。在漏极加正偏压，则有电子从源极流向漏极。在栅 PN 结加上负偏压时，空间电荷区宽度和沟道厚度随之变化，从而沟道电阻、沟道电流（或称漏电流）也发生变化，这就是结型场效应管的栅极电压控制作用的原理。结型场效应管可用作放大器，在低频下噪声很低，常用于海底通信、红外接收等低频低噪声电子设备中。

**金属—氧化物—半导体场效应晶体管** 又称绝缘栅场效应管，简称 MOS 场效应管（或简称为 MOSFET 管）。是利用半导体的表面场效应现象制成的器件。按其工作状态可以分为增强型与耗尽型两类，每类又有 N 沟道和 P 沟道之分。现以 N 沟道增强型绝缘栅场效应管为例说明其原理。如图 3 所示，在 P 型半导体上有两个重掺杂的 N<sup>+</sup>区，其上有两个欧姆接触电极，分

### 图 3 N 沟道增强型绝缘栅场效应管

别称为源极和漏极。源—漏之间覆盖一层很薄的绝缘膜（如二氧化硅或多晶硅等），膜上淀积金属形成栅极。栅极无外加电压时，源漏之间不导通。栅极上加一相当大的电压时（源接地），栅极下面的 P 型半导体表面上出现 N 型反型层，成为导电沟道。改变栅压可以改变沟道的宽度和电子密度，电流随之改变。这种在零栅压下不导通，在正栅压下才出现导电的 N 型沟道的管子称为 N 沟道增强型场效应管。反之，如果 P 型衬底表面不加栅压时已有 N 型沟道存在，外加栅压可使沟道电阻增大或变小，此种管称为 N 沟道耗尽型场效应管。同理，如果衬底是 N 型半导体，也可构成增强型和耗尽型两种。MOS 场效应管结构简单，具有很高的输入阻抗，在电路中适于直接耦合，广泛应用于集成电路和大规模集成电路。

**晶体声学 (crystal acoustics)** 声学与晶体学之间的边缘学科，主要研究声波在晶体中产生、传播、接收等各种效应与规律。由于晶体在宏观上呈现弹性各向异性，微观上则具有空间周期分布的有序结构，因此声波在晶体中产生、传播、接收的规律就比较复杂。它涉及：沿不同方向传播的声波有不同的速度和衰减系数；晶体原子或晶胞的振动会有特异的现象产生；晶体内部还往往存在位错等缺陷，它们对声波的吸收和衰减系数亦有影响。

晶体声学的研究内容，从总体上来说可分为两大部分：一是当机械扰动的波长远大于晶体原子尺度和间距时，晶体可视为弹性各向异性连续介质，其中弹性波的产生、传播、接收的规律，由各向异性连续介质力学与晶体本构方程描述。二是当机械扰动的波长可与晶体原子尺度和间距比拟时，晶体必须视为具有空间周期分布的有序结构，即所谓晶格结构。根据晶格动力学理论，在简谐近似下，原子与晶胞振动能量是量子化的，称为声子，声子的传播即为晶格波。晶格波的产生、传播、接收的规律，由以量子力学和量子场论为基础的晶格动力学方程描述。晶体声学研究具有重要意义：通过对声波在晶体中传播的研究，可以确定晶体在各个方向上的弹性性质，也可以了解晶体中缺陷的情况。通过对声子及其与晶体中各种微观结构的相互作用的研究，可以揭示晶体物理中的许多重要现象和规律。有些晶体的压电性能或声光性能都较显著，也就为超声换能器和

声光器件、表面声波器件的制作提供了性能良好的材料。

**晶体中的缺陷 (defects in crystal)** 晶体结构中包含的周期性晶格结构破缺或不完整区域。晶体是以原子周期性规则排列为其主要特征。为了获得理想晶体，人们希望尽量减少缺陷；但另一方面微量的杂质缺陷可以改变晶体的物理性质。因此研究和制造缺陷为我们制备性能优良的固体器件提供了依据。

晶体中的主要缺陷有点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

**点缺陷** 晶体结构中一种局部的不规则性。如晶体中的外来杂质原子就是一种点缺陷，它们通常是在晶体生长过程中引入的。如果杂质代替了基质原子而占有某些格点，则称为“替代杂质”，如硼(B)、磷(P)等在硅晶体内就会形成这类杂质。另一种替代杂质铬(Cr)，在白宝石三氧化二铝中掺入少量氧化铬粉末，使铬离子替代少量的铝离子形成替代缺陷，这时白宝石就变成了红宝石。如果杂质占据了基质原子间的间隙位置，则称为“填隙式杂质”，如金在硅晶体中就是间隙式杂质。另一种点缺陷是“空位”，即在规则排列的原子中移去一个原子而留下一个空格点。空位是由热激发产生的。因为原子围绕格点作振动，倘若温度足够高，就有可能使某些原子获得足够的能量而离开格点位置，留下了空位。空位周围的区域此时会发生畸变，如晶格松弛。

**线缺陷** 也称位错。晶格内部周期性的破坏发生在一条线上，错位的原子位于这条线的附近。线缺陷可分为“刃型位错”和“螺旋位错”。位错可以用适当方法对晶体腐蚀后在显微镜下观察到。位错与晶体的生长过程直接有关，它能改变晶体的力学、电学、光学等性质。

**面缺陷** 设原来晶体以ABC三层为一组的原子堆积方式重复堆积： $\widehat{ABC} \widehat{ABC} \dots$ ，现在变成 $\widehat{ABC} \widehat{ABC} ABABC \widehat{ABC}$ ，少了一层C面，这就形成

了面缺陷，这种面缺陷称为“层错”。面缺陷还可发生在多晶体内，多晶体由大量的单晶小块（或颗粒）组成，在每一颗粒的边界，晶体取向突然改变，这个边界就是面缺陷，又称为“晶粒间界”。

缺陷的存在对晶体的许多性质有很大影响。例如，半导体的导电类型和电导率完全是由主要杂质的性质和数量决定的；离子晶体的颜色来源于缺陷（色心）；晶体的范性形变是位错运动的结果等等。因此研究缺陷的结构、形态、性质、生长、运动以及它们与晶体性质的关系等，都具有重要的理论和实际意义。

**经典电动力学 (classical electrodynamics)** 电磁现象的经典的动力学理论。简称电动力学。它研究电磁场的基本属性、运动规律以及电磁场和带电物质的相互作用。它以麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式为出发点，运用数学演绎方法，结合有关物质结构的知识，建立完整的电磁场理论。由此可从宏观或微观的角度来阐明各种电磁现象的本质和规律。

电动力学的内容通常包括：麦克斯韦方程组和包含电磁场后物理过程的能量、动量和角动量守恒定律；静电学和静磁学问题；电磁波的辐射和传播；带电粒子在电磁场中的运动；电磁场和媒质的相互作用等。另外，狭义相对论的建立与电动力学研究密切相关。因此，其内容中通常还包括狭义相对论基础、相对论力学以及电动力学的相对论协变形式等。

**经典力学 (classical mechanics)** 亦称牛顿力学，是研究宏观低

速（速度远小于光速）物体的运动过程的力学，是以牛顿运动定律为基础的力学体系。经典力学区别于量子力学的主要特征是，量子力学研究普朗克常数起作用的运动过程，而经典力学则把这个常数忽略不计，因此，由普朗克常数带来的影响，例如波粒二象性和不确定原理，在经典力学中不复存在。经典力学和相对论力学也不同，相对论力学是研究物体运动的速度接近光速的运动过程的力学。有时，经典力学泛指包括牛顿力学和相对论力学在内的而区别于量子力学的力学总称。

作为经典力学的基本假定，也是经典力学所依据的时空观被假定为：时间和空间是绝对的，长度和时间间隔的测量与观测者的运动无关。20世纪初，对某些电磁学和光学现象应如何作理论解释使人们对这个经典时空观发生怀疑。1905年，爱因斯坦通过分析许多新的实验事实与旧的理论体系之间的矛盾，一方面提出了关于时间和空间观念的革命性见解，另一方面把力学中的相对性原理推广到适用于一切物理现象，在此基础上建立了狭义相对论，并把牛顿的经典力学改造成也适用于高速运动的相对论力学，同时也使牛顿力学成为相对论力学在低速下的极限情形。因此，以经典时空观念和牛顿运动定律为基础的经典力学，至今仍然是物理学、天文学和许多工程学的基础，而且也是机械、建筑结构、飞机、航天器和舰艇等的合理设计的出发点。

经典力学的普遍原理被表达成数学形式，利用数学逻辑推理，可以导出许多具体条件下的具体结论，把这些结论与已有的实验相比较，可以验证理论的正确性并在此基础上预言尚未发现的现象。经典力学的这种研究方法以及经典力学所阐明的物理内容，在整个物理学的发展中具有极为重要的作用。

**经典物理学**（classical physics）通常指19世纪末以前已建立起来的研究各种物理现象的学科，如经典力学、热学和分子物理学、经典电磁学、光学等。其后，爱因斯坦关于相对论的研究（1905）发现，牛顿力学仅仅适用于低速（ $\ll c$ ）情况，在接近光速时需要应用相对论力学。热学和热力学现象中存在同样情况。相对论力学通常也包括在经典力学中。至于电磁学和光学，它们所研究的对象涉及到以光速运动的电磁场，所以这些学科的基本规律满足爱因斯坦的相对论要求。

经典物理学通常与量子物理学相对应。量子物理学能反映实物粒子的波动性和波场的粒子性，或者说它能正确反映出已为大量精确实验所证实的客观世界的波粒二象性。经典物理学则忽略了实物粒子的波动性和场的粒子性。经典物理学和量子物理学的区别可用普朗克常数  $h$  来标志，在量子理论的公式中通常会出现  $h$ ，且当  $h$  趋于零时便转化为相应的经典物理学公式。经典物理学是量子物理学的一种近似理论，在比原子线度大许多的宏观现象中，这是一个非常好的近似。

经典物理学是整个物理学的基础，是19世纪末20世纪初之前几千年来人类对自然界各种物理现象研究工作的总结。虽然这个理论的基本框架已经完善，但是它的某些分支以及它的许多应用方面都还在继续发展。

**经典物理学在近代中国的传播**（Propagation of classical physics in modern China）17世纪以来，正当经典物理学在欧洲各国获得重大进展的同时，东方的中国却饱受着帝国主义和封建主义的奴役，科学技术明显落后，经典物理学的研究几乎是空白，这就为西学之一的经典物理学

的传播提供了场所。明万历中叶以后，一批耶稣会传教士来华，他们之中有的人以天文学、数学和物理学的述介，作为打开局面的一种手段，于是近代兴起的经典物理学知识便开始传入我国。

**早期传播的概况** 最早输入西方经典力学的是意大利的艾儒略。天启三年（1623年），他编著了《职方外积成》一书。早年就喜欢钻研古器与机械制作的王征读了该书，看到里面所载的奇人奇器很多，引起了极大的兴趣。其后瑞士人邓玉函，德国人汤若望也把有关西方奇器的书籍供王征阅看。结果由邓玉函口授，王征笔译并绘图，写成了《远西奇器图说》一书，并于1627年刊出。全书分为重解、器解、力解三卷，其内容是论述力学知识、简单机械原理和各种实用机械的构造，属静力学范畴。这本书可以说是我国出版的第一部论述力学和机械原理的专门书籍，也是当时西方物理学、力学与机械学方面知识的汇编。

天启六年（1626年），德国人汤若望译著了《远镜说》，并于1632年出版，它的问世标志着西方光学输入中国的开始。所谓“远镜”就是望远镜。该书只有15页，仅5000字左右，内容十分简略。全书首讲远镜用法，次讲原理，末讲制法；对于光在水中折射，光经过远镜的折射，凹镜散光，凸镜聚光，以及凹凸镜组合以放大物像的光学现象都作了解释。但书中的光路图是错误的。

在此期间，由传教士带进中国的图书达7000余部，可考的中文译著约有370余种，科技方面占120余种。其中以天文学为主，数学次之，物理学又次之。在明代后期出版的《天学初阶》的“西学凡”中，物理学被称为“弗西加”，所包括的内容主要是上述的力学和光学两个分支。

鸦片战争以前，在我国传播的早期经典物理学知识，无论从内容上，还是对我国学术界的影响方面，都是比较肤浅的。这主要原因在于传教士信奉的教义和近代科学的对立，他们的述介和译著在不违背教义的前提下，不能不有所选择，因而传入我国的经典物理学知识是相当零碎的。另一个原因也在于中国封建统治阶级愚昧、专制和推行了森严的闭关锁国政策，使得即使是一鳞半爪的经典物理学知识，在我国也难以得到较广泛的传播。

**继续传播的内容** 鸦片战争以后，帝国主义的大炮迅速打开了中国闭关自守的大门。我国也由一个封建社会逐步沦为半殖民地半封建社会。第二次鸦片战争以后，清政府为了镇压太平天国革命和巩固封建统治，以练兵和制器为主要内容，开始引进西方资本主义国家的科学技术，掀起了洋务运动。他们创办近代工业，与此同时建立了北京京师同文馆，上海、广州方言馆，江南制造局翻译馆等教学、翻译机构。招聘了一批具有科学素养的知识分子和外国传教士，从事译著西方科技书籍的工作。

力学方面。随着西方各种科技书籍的翻译，我国出现了《重学》、《重学浅说》、《重学图说》、《重学器说》等著作。其中以1858年出版的《重学》为我国第一部较完整的经典力学著作。此书原本为英国人胡威立所著的《初等力学》，由艾约瑟口述，李善兰笔译。《重学》一书共为四个部分：卷一至卷七为静力学；卷八至卷十七为运动力学；卷十八至卷二十为流体动力学；最后一部分是附录，介绍了数学方法。运动力学部分阐述了有关动力学的基本原理，即牛顿三大运动定律，该书表述如下：“动量第一例：凡动，无他力加之，则方向必直，迟速必平；无他力加之，则无变

方向及变迟速之根源故也。”“动量第二例：有力加于动物上，动物心生新方向及新速。新方向即力方向，新速与力之大小率比例相同。”“动量第三例：凡抵力正如动力，动力与抵力比例恒同，此抵力，对力相等之理也。”

其后有英国人伟烈亚力口译、李善兰删述的《谈天》一书，1859年出版。该书虽主要为介绍近代天文学，但有明确叙述万有引力定律的内容。书中的序言，李善兰曾扼要介绍了牛顿所创立万有引力定律的缘由。在该书卷四、八、九、十三中，则多处论述了万有引力定律及其具体应用。《谈天》原作是赫歇尔撰写的《天文学纲要》，此书在西方曾风行一时，流传甚广。

电学方面。19世纪80年代，江南制造局刊印了《电学》、《电学纲目》等著作。其中由傅兰雅翻译的《电学》一书于1880年出版，共分10卷。计有：卷首总论源流；卷一论摩电气；卷二论吸铁气；卷三论生物电气；卷四论化电气；卷五论电气吸铁；卷六论吸铁杂理；卷七论吸铁电气；卷八论热电气；卷九论电气极；卷十论电气时辰钟及诸杂法。总观卷首及全书的内容，作者介绍了电学的研究对象、概念及有关规律，初步阐述了电学发展各个阶段的主要线索，并列出了吉伯、富兰克林、伽伐尼、伏打、奥斯特、法拉第等人对电学的贡献。这些内容对于当时中国的经典物理学的研究来说，都有可取之处。但是该书卷首内容中，对于电学定量研究，最有代表意义的法国电学家库仑所发现和总结的两个点电荷间的相互作用规律，却只字未提。在全书内容中，对于电磁学最光辉的篇章，即在该书传入我国前20年由英国物理学家麦克斯韦提出的著名方程组，作者和译者也均未提及。

热学方面。主要有《汽机发轫》、《汽机必以》、《汽机新制》、《热学图说》、《热学须知》等著作。其中由伟烈亚力、徐寿译的《汽机发轫》于1871年出版。该书共有九卷，但原作者只是介绍了一些最简单的热现象，如热胀冷缩、热传导、热循环、热发散、热容量、热源等。显然，这仅是相当于计温学和量热学的一些知识。当时热学的发展也是相当快的。首先是对于热的本性的认识，西方已普遍承认热的唯动说而否定了热质说，可是该书的阐述中仍有热质说的错误观点在流露。其次是当时热力学的规律——热力学第一定律、第二定律都已建立，可是该书均未提及。所以，该书所传播的内容是相当陈旧粗浅的。事隔20年以后，即1890年，由傅兰雅翻译的《热学图说》一书所阐述的内容才稍有进步。

光学方面。在此期间有《光论》、《光学》、《光学图说》、《光学须知》、《光学揭要》等著作，其中田大理（今译丁铎尔）辑、金楷理口译、赵元益笔述的《光学》一书于1876年译出，共分二卷，502节。卷上主要为几何光学；卷下为波动光学。卷下部分论及色差与色差的消除，紫外线与红外线，色散，光的发射与吸收，太阳光谱及夫琅和费线；还首次向我国介绍了光的衍射、干涉、偏振；以及详尽论述了这些光学现象产生的实验方法、原理及其应用。时至1899年，由赫斯口译、朱葆琛笔述的《光学揭要》一书，已超出光学范围，及时向我国介绍了现代物理学的新成就，即X射线的发现。该书中附有一张用X射线拍摄的手的骨骼的照片，引起人们的注目。

20世纪初的《物理学》。1901年起，江南制造局又刊印了我国第一次

称为物理学的著作《物理学》。该书分上、中、下三编。由日本人饭盛挺造编纂，滕田丰八翻译，王季烈重编。卷一是总论，作者在谈及物理学的研究方法时指出：“凡研究物体之形状变化，即物理学之现象，当分次序为三级：第一，体察其现象；第二，寻检其定律；第三，核明其原因。”往后各卷，作者较详细地阐述了力学、波动、热学、光学以及电磁学等各个物理学分支学科的内容，体现了较高的科学性。

**对我国影响的概述** 19 世纪中叶以后，通过译著传播的经典物理学知识，就其体系和内容来说，较之明末清初时期无疑是前进了一步，它对我国的影响也就迥然不同，经典物理学开始在中国植根，并产生了一系列的连锁反应： 尽管不少经典物理学的译著带有科普性质，但却广泛地改变了我国知识界对西方科学技术的态度； 对我国的康有为、谭嗣同、章炳麟等思想家也发生影响，特别是在他们的哲学理论中获得了种种反映；

促进人们对封建主义旧学、“中学”的批判，冲击了当时的科举制度，出现了科学教育和科学团体的萌芽； 还引起人们对科学方法的重视。然而，当时虽然把西方物理学知识与成就介绍过来，但不仅大部分内容是肤浅和陈旧的，而且基本上没有深入的定量研究方面的内容，这样对实际应用就无法产生很大效果，即使对理论的发展也促进甚微。因此，我们不能过高地估计这一时期经典物理学在我国传播所产生的影响。可是，对于当时经典物理学传播到我国所形成的一些积极意义又是不能低估的。

**静电场 (electrostatic field)** 见电常。

**静电场的环路定理 (circuital theorem of electrostatic field)** 关于静电场的一条重要规律。静电场中场强沿任意闭合环路的线积分等于零。或单位正电荷绕闭合环路一周，静电场力所作的功为零。用公式表示为

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0,$$

其中，L 为任一闭合曲线。也可表述为

$$\int_{L_1} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_{L_2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l},$$

$L_1$  和  $L_2$  分别为空间 P、Q 两点间的任意两条路径。以上两种表述是等价的。可以证明，静电场的环路定理是库仑定律和场的叠加原理的必然结果。

任何做功与路径无关的力场是保守场或势场。静电场的环路定律说明静电场是势场，可以引入电势能、电势差、电势等概念。

**静电沉淀 (electrostatic precipitation)** 应用静电感应原理沉淀工业废气中的微粒（包括煤炭、炭尘和烟雾）的方法。1824 年霍耳菲德尔首先指出电可使烟粒沉淀。1905 年科特莱尔研制出第一台高效静电沉淀器。其工作原理是：使夹带废物粒子的煤烟和其他气体从一根接地的导管（即无源电极）内通过，在导管中间有一些吊有重物的金属线，它们与 3 万伏高压线连接，成为有源电极。通电后，该电极在气体中放电，并在其周围产生气体离子，这种气体离子又使它们附着废物粒子带电，于是这些混合物就会聚集在导管壁上。定期地敲击导管，残留物就会落入漏斗。静电沉淀最早应用于冶炼、硫酸与水泥厂，以后又用于大型热电厂。使用高效的静电沉淀器，按重量计算，沉淀效率可以超过 99%，这表明采用此法使空气保持洁净是卓有成效的。

**静电复印 (electrostatic reprography)** 利用静电感应复制图像的一种方法。静电复印机产生于 30 年代，由卡尔森发明。它主要由涂硒圆筒、光学系统、纸页传送机构、显影机构、定影圆筒等部件组成。其工作原理是：涂有半导体材料（如硒）的旋转圆筒先在暗箱中充电，然后由光学系统把复印原件的图像聚集在圆筒上。当光照射圆筒时，半导体材料就放出电子，把复印原件上白色基底上的所有电荷清除掉，只有印刷品中出现图和字的那些黑色区域才有电荷，这些图像可吸引在显影机构中称作色剂的黑色粉末。把预先充电的复印纸送进去，使之与圆筒接触，它就吸收圆筒上的色剂，再经过定影圆筒的加热，使色剂融化粘在纸上，便得经过复制的印刷品。

**静电感应 (electrostatic induction)** 导体在外界静电场作用下其内部自由电子重新分布，从而在导体表面出现电荷的现象。如果将原来不带电的导体放入另一带电体的电场中，该导体内的自由电子因受外电场的作用将逆着外电场方向移动，结果导体在靠近带电体的一端处会出现与带电体异号的电荷，远离带电体的一端处会出现与带电体同号的电荷，这些电荷称为感应电荷。这种感应电荷会在其周围产生附加电场，这种附加电场在导体内部的方向与外电场方向相反。最后，当导体内部的外电场和这种附加电场互相抵消时，导体中的自由电子不再继续移动，导体两端的正负感应电荷不再继续增加，于是便达到“静电平衡”状态，这时导体内部的总电场强度为零。

导体在静电平衡时内部的电场强度为零，电荷只能分布在导体外表面。根据这一特性，可利用金属壳或金属网制作静电屏，用以隔离物体间的静电影响。例如将电器、仪表或电缆等设备放置在接地的金属壳或金属网里，就能使它们不受外界电场的干扰，也不对外界产生静电影响。此外，利用静电感应原理还可制造“感应起电机”。

**静电计 (electrometer)** 用静电法测量静电场中电势差的仪器。根据静电作用使仪器中的可动部分发生偏转的原理制成的。静电计有多种型式，如验电器，象限静电计（如图 1 所示）等。现代测量静电电量或电

图 1 象限静电计 图 2 静电计

势的静电计常由有极高输入阻抗的放大器及灵敏电压表组成。在中学教学中常用的静电计如图 2 所示。C 是与地面相连的金属外壳，金属球 A 通过绝缘塞 B 与中心杆 M 连结，Z 为可动指针，待测物体与之并联，由于金属外壳（电势零点）与指针间的电势差不同，指针受静电力作用而发生偏转，其偏转度与电势差成正比。通常将偏转度经过校准转换成电势差刻在面板上，于是从指针的偏转便可直接读出电势差。静电计是一种常用的演示仪器，例如在研究电容器的电容与哪些因素有关的实验中就要用到它。

**静电屏蔽 (electrostatic shielding)** 利用金属空腔隔离静电场相互影响的措施。如果把带有空腔的导体放入电场中，由于静电感应的效应，导体空腔内部场强必为零，故导体空腔“保护”了它所包围的区域，隔绝了外电场的作用，使外电场不能透入空腔内部。

在静电屏蔽现象中，无论导体壳是否有电荷，壳外电荷如何分布均不影响壳内的场。但这并不意味着壳外电荷不在壳内空间产生电场。实际情况是，壳外电荷与导体壳表面的感应电荷在壳内空间都会产生电场，但它

们的合电场为零。

若导体壳接地，则有双向屏蔽作用，这时壳内电荷不影响壳外区域的电场；壳外电荷分布并不影响壳内区域的电场。若导体壳不接地，虽然这时壳外的电荷不影响壳内的电场，但是壳内的电荷将影响壳外的电场，不过这种影响与壳内电荷的分布位置无关。例如对于孤立导体球壳，其壳内点电荷  $q$  在球心处或者在偏离球心处所产生的电场在壳外的分布相同。

静电屏蔽在实际中应用广泛，例如，仪器外壳接地，收音机中周外壳接地，变压器中间隔离层接地等，均是为了静电屏蔽。实际上静电屏蔽的外壳不一定要严格封闭，甚至用金属网作外罩就能起到静电屏蔽作用。如无线电实验室和无线电生产厂中的测试室，就是用金属铜网围成的小房间，它可以完全屏蔽外界电场和电磁场的影响。

**静电平衡 (electrostatic equilibrium)** 静电场中导体系的电荷分布与电场分布都不随时间而变化的状态。导体系的静电平衡条件是所有导体内的电场强度处处为零。

导体处于静电平衡时有如下几个性质：导体是等势体，导体表面是等位面；导体内部不存在电荷，电荷只能分布在表面，包括导体壳的内表面（例如在导体壳内空间有电荷存在时）；导体表面外侧电场的场强方向与导体表面垂直，其值与导体表面该处面电荷密度  $\sigma$  成正比：

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}。$$

若导体内部除了存在静电作用外，还存在其它作用（常称为非静电力），则达到静电平衡时，导体内部的场强并不为零，此时静电场对自由电子的作用力与其它来源作用力达到平衡。如非均匀的金属或两种不同金属接触在一起，达到静电平衡时、导体内部或其局部存在电场（参见温差电效应、接触电现象）。

(a)示意图 (b)实物图感应起电机

**静电起电机 (electrophorus)** 借用人力或其它动力使电荷分离以获得静电的装置。早在 17 世纪，盖利克便想到用摇柄使一个硫磺球（后改为玻璃球）迅速旋转，用人手（或皮革）与之摩擦达到起电目的。到 19 世纪，这种“摩擦起电机”被维姆胡斯的感应起电机所取代。其构造和实物如图所示。它由一对可以用相同转速朝相反方向旋转的平行玻璃圆盘构成，每块玻璃盘的外围均匀分贴着数十张互相绝缘的锡箔，互相垂直的金属杆  $n_1n_2$  及  $n_3n_4$  位于圆盘的两侧，分别由两片固定在金属杆两端的金属刷与圆盘上锡箔保持接触。 $a_1$  和  $a_2$  是两对用导线联在一起的呈齿状指向圆盘的集电极。由于大气中经常存在微量电荷，工作时可假定外圆某锡箔片上带有微量的正电荷，当该锡箔片转到对应于  $n_3$  的位置时，在  $n_3$  处相对的内圆的箔片上将感应出负电荷，并通过金属杆使  $n_4$  处的箔片上出现正电荷。由于圆盘的转动和一系列类似的感应作用，在外圆上对应于  $n_4$  的箔片上又会出现正电荷。两圆盘反向旋转，每当一部分电荷转到集电极  $a_1$  或  $a_2$  处时，正负电荷将被集中到正负两个电极上。通常将这两个电极与莱顿瓶相连，以贮存电荷。当一对直径约 60 厘米的玻璃圆盘以 100 转/分的速度旋转时，大约可产生  $5 \times 10^4$  伏的电压。这种感应起电机可以在空气中产生 10 多厘米长的电弧，同时发生强烈的噼啪声，常用于演示实验。



**静电印刷** (electrostatic printing) 利用静电感应原理进行印刷的总称。它主要包括：用于凹凸印，即在凹凸面上的印刷。其工作原理是：在承印材料表面进行静电感应处理（充电），使之带有电荷；通过对原图照相曝光，形成静电潜像，再利用正负电荷相吸的特性，将带有相反电荷的色彩吸附上去，经固着后成为印刷品。用于胶印，亦称静电制版。其工作原理是：在纸或金属版基上涂上硒或氧化锌等光电材料，充电后经照相曝光，形成静电潜像，将带有相反电荷的粉墨吸附到版面，然后经处理使图纹部分亲油，非图纹部分亲水，成为印版，便可用于胶印。

**静力学** (statics) 经典力学的一部分。研究作用于物体的力的合成规律及其平衡的条件，即包括力的合成和分解，平衡的条件和性质，平衡时力系的分布及其特征等。在这里，所说的物体包括质点、刚体、流体和可变形体。质点静力学内容比较简单，不是静力学讨论的重点。流体和可变形体静力学相当复杂，已经成为力学中的特别分支。刚体静力学的复杂程度介于上述两种静力学之间，是静力学中通常讨论的一个课题。在静力学中，所谓保持平衡，是指位置相对于某一惯性系保持静止。质点保持平衡的条件是，作用于此质点的合力等于零。刚体保持平衡的条件是，作用于此刚体上各点外力的矢量和等于零，和这些力对任何一点力矩的矢量和等于零。在一般情况下，流体和可变形的平衡不仅只指力学平衡，还包括密度和温度的稳定分布，其平衡条件由一组比较复杂的方程限定。但是，在不计及热运动并对流体和可变形的物理性质做某些简化的假设后，这些方程可大为简化，例如液体的水压公式和帕斯卡定律，弹簧的胡克定律等。静力学是许多工程技术问题的理论基础，例如在桁架、桥梁、水坝和机械的设计中，都离不开静力学。

**静止** (rest) 从特定的关系考虑运动时，运动所表现出来的特殊形式。具体来说，静止是指事物运动到一定阶段时物质的相对稳定状态。在物理学中，一物体对于另一物体不发生相对运动时，则称这两个物体处于相对静止状态。但是这种静止状态仅仅是从一定的参照系看来才是如此，从别的参照系看来又是运动的。当物体的运动处于相对静止状态时，它只有数量的变化，没有性质的变化，如当原子核内质子数没有改变时，它仍然是某种化学元素的原子，而不是别种化学元素的原子。

**居里点** (Curie point) 铁磁质转变为顺磁质时的临界温度，亦称“居里温度”。由法国物理学家 P. 居里发现而得名。现常泛指铁磁质、铁电体和超导体等发生相变时的临界温度。当温度超过居里点时，铁磁质转变为顺磁质，铁电体由铁电相转变为顺电相，超导体由超导态转变为正常态，等等。铁磁质居里点的存在可简单解释如下：当温度达到临界温度时，热运动将破坏铁磁质中电子自旋磁矩的自发有序排列，磁畴消失，从而失去铁磁性。不同铁磁质的居里点不同，铁的居里点是 769 ，镍为 358 ，钴为 1140 。

**居里夫人** (Marie Curie 1867~1934) 法国物理学家、化学家。生于华沙·又名玛丽·居里。父亲是中学理科教师。她 9 岁丧母，16 岁时以金质奖章毕业于华沙中学后，家庭已无力供她继续读书。她不得不去担任家庭教师。1891 年考进巴黎大学理学院，1894 年以优异的成绩毕业，留在巴黎准备博士论文时，认识了青年物理学家皮埃尔·居里。1896 年，也就是居里夫妇结婚后几个月，法国科学家贝克勒尔发现铀盐会自发放射出

一种射线，它可以透过黑纸使照相底片感光，还能使空气电离。这个重要的发现立刻引起了居里夫人的注意。她仔细检查了其它许多元素、化合物和矿石，发现钍元素也具有这种放射性，还发现沥青铀矿的放射性比纯铀还要强得多。她猜想在沥青铀矿里一定存在着某种未知的、放射性极强的元素。于是夫妇俩废寝忘食，昼夜不停，从成吨的沥青铀矿里寻找这种未知的微量元素。1898年7月他们找到了一种放射性比纯铀强400倍的新元素，命名为钋，来纪念她的祖国波兰。几个月后他们又发现了新元素镭，镭的放射性比纯铀强900倍。居里夫妇与贝克勒尔共获了1903年诺贝尔物理学奖。

1906年比埃尔·居里不幸去世，年仅39岁的居里夫人勇敢承担起家庭和工作两副重担。她继承了丈夫的讲座，继续了镭的研究。1907年她提炼出纯氯化镭，1910年她提炼出纯金属镭，并因此荣获1911年诺贝尔化学奖。

居里夫人为人谦虚，不计名利。她放弃申请镭的发明专利。在第一次世界大战期间，她亲自驾驶装备了X光的汽车在前线巡回，为伤员服务。爱因斯坦赞扬她说：“在所有著名人物中，居里夫人是唯一不为荣誉所颠倒的人。”1934年她因长期受放射性辐射，病逝于法国阿尔卑斯山疗养院。著有《放射性》等。

举力 (lift force) 见升力。

聚合物 (polymer) 由许多称为单体的结构单元重复排列而成的链状分子所构成的物质。这种链状分子的长度可达几百纳米，故常称为大分子。一般都是有机物。

如聚乙烯就是一种有简单结构的普通聚合物。它由单体乙烯基 ( $C_2H_3$ ) 联合而成。

乙烯基结构 聚乙烯结构

单体的个数称为聚合度。常见的聚合物有天然橡胶，塑料，合成尼龙，涤纶纤维，材料粘合剂等。

聚合物对温度很敏感，高温时聚合物呈液态；温度降低，聚合物便进入过冷液体状态，其行为像具有高度粘性的液体，可塑且有韧性；温度再降低，就变为玻璃态，犹如无定形固体，性硬而脆。

聚合物的电导率小。加入杂质会使电导率明显增加。通过掺杂它还可成为N型或P型半导体。聚合物有高的介电常数，可用于制造电容器。另外它还有光的双折射特性。

倔强系数 (coefficient of stiffness) 又称刚度系数或劲度系数。描写轻质均匀弹簧硬度的物理量。弹簧作为一个可以拉伸和压缩的弹性物体，在比例极限范围内，其伸长量或压缩量  $l$  与弹簧所受外力  $F$  成正比，比例系数记为  $k$ ：

$$F=k \cdot l。$$

$k$  的物理意义是使弹簧伸缩单位长度所需的外力，称为此弹簧的倔强系数。一段这样的弹簧被截成长度相等的两段以后，每一段的倔强系数是被截前整个弹簧倔强系数的两倍，说明倔强系数非但与弹簧的材料有关，而且与弹簧的结构有关。

绝对黑体 (absolute black body) 能在任何温度下吸收所有电磁辐射的物体，简称黑体。黑体处于热平衡状态时，具有最大的吸收本领，

因而也就有最大辐射本领。黑体是理想化的物体，任何实际物质都不可能是真正的黑体。许多看起来是黑色的物体，仅仅对可见光有强烈的吸收。而可见光只是所有电磁辐射的一部分。

实验室里用耐火材料做一个空腔，再在空腔上开一个小孔。通过小孔照射到空腔里去的任何辐射，需经过内壁的多次反射，才有很小可能从小孔中重新射出。孔径越小，射出的光越微弱。这种带有小孔的空腔就可作为黑体。

黑体辐射用电炉把空腔加热到一定温度，就有辐射从小孔射出。用光栅光谱仪把出射的辐射按波长分开，用热电偶记录各波长的辐射强度，便可得到光谱能量随波长的分布曲线，如图所示。实验表明：随着空腔温度增加，黑体的发射本领迅速增大；每条曲线都有一极大值；温度增加时极大值向短波方向移动。由于实验中都采用带有小孔的空腔作为黑体，故黑体辐射亦称为空腔辐射。

**斯忒藩—玻耳兹曼定律** 从物体表面单位面积发出的、频率在  $\nu$  附近单位频率间隔的辐射功率叫做发射本领，常用  $E(\nu, T)$  表示，它是频率和温度的函数。

对  $E(\nu, T)$  在所有频率范围内求积分，可得到温度为  $T$  的物体在单位时间内，从单位面积上向各方向发出的所有频率的辐射能量

$$E_T = \int_0^{\infty} E(\nu, T) d\nu,$$

这个量称为辐射通量，单位为瓦/米<sup>2</sup>。斯忒藩和玻耳兹曼先后从实验和理论上证明，黑体辐射的辐射通量与绝对温度四次方成正比，即

$$E_T = \sigma T^4.$$

为普适常数，它的值是  $5.67 \times 10^{-8}$  瓦/米<sup>2</sup>·开<sup>4</sup>，称为斯忒藩—玻耳兹曼常数。

**维恩位移定律** 1893年维恩研究了内壁为理想反射面的密闭容器内的辐射，得到函数  $E(\nu, T)$  曲线上极大值  $\nu_m$  与绝对温度  $T$  成反比的结论：

$$\nu_m T = b,$$

式中  $b = 2.8978 \times 10^{-3}$  米·开，是一个和温度无关的量，也是普适常数。这个称为维恩位移定律的规律表明：当温度升高时，最大发射本领向短波方向移动。

热辐射物体因自身温度而向外发射电磁能，温度越高，辐射越强。这称为热辐射，又称温度辐射。温度是物理系统达到热平衡状态的宏观标志，故热辐射是热平衡系统的辐射。黑体辐射是热辐射，因此也就是平衡辐射。普通白炽灯是热辐射，灯丝温度在 2000K 左右， $\nu_m$  在红外波段，所以颜色发黄。要使白炽灯发白光，必须使灯丝温度达到 5000K ~ 6000K，目前很难做到。日光灯通过气体放电而激发出荧光，这是一种非平衡的辐射过程，它不遵循黑体辐射定律。因此日光灯虽然发射白光，但温度不必像白炽灯那样高。

利用黑体辐射规律来测量很高的温度，称为光测高温法。测量物体热辐射能谱中极大值所对应的波长  $\lambda_m$ ，从而求出温度，这种方法称为色温法，所测得的温度称为色温度，记为  $T_c$ 。在望远镜物镜像方焦面上安置特

制的灯丝，调节灯丝电流，使目镜中看到的灯丝从被测物的背景中消失，此时灯丝的温度即为物体的温度，而灯丝的温度可事先标志在电流计上。这种方法称为亮温法，所测得的温度称为亮温度，记为  $T_b$ 。用光学系统把待测物成像于热电偶的感温端，直接读出物体的温度，这种方法称为辐射温度法，所测得的温度称为辐射温度，记为  $T_r$ 。如果待测物是绝对黑体，应有  $T_c = T_b = T_r$ 。但实际中待测物并非绝对黑体，假定它的真正温度为  $T$ ，则按上述诸方法测得的温度并不相同。如果对测量精度要求较高，要对测量结果作适当的修正。

**瑞利—金斯定律** 1900年瑞利和金斯把能量均分定理应用到黑体辐射。他们假设空腔黑体辐射场由驻波构成，每一种驻波是电磁场的一种

波型。每一种振动平均能量为  $kT$ ，从而求得  $E(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT$ ，其

中  $k$  为玻尔兹曼常数。瑞利—金斯定律与黑体辐射实验结果相比，在长波区符合很好。但是随着波长减小，瑞利—金斯定律中的  $E(\lambda, T)$  无限增大，因而辐射通量  $E \rightarrow \infty$ 。而实验曲线表明这时应趋向于零。经典理论的这种失败称为发散困难或紫外灾难。普朗克提出量子假设，解决了黑体辐射理论的这个困难。

**绝缘体 (insulator)** 电的非导体。它们的电阻率极高，约为  $10^8 \sim 10^{30} \Omega \cdot m$ ，比金属的电阻率大  $10^{14}$  倍以上。绝缘体的种类很多，有气体，如空气、氮、二氧化碳、六氟化硫等；有液体，如各种天然矿物油、硅油、三氯联苯等；有固体，如塑料、橡胶、玻璃、陶瓷、云母、绝缘漆、绝缘纸等。固态绝缘体广泛应用于导线和电工设备的绝缘。它还作为电容器极板间的填充材料（电解质），以增加它的电容值。液态绝缘体主要应用于大功率断路器（俗称油开关）、变压器及某些电缆等电工设备中，这时不仅利用其绝缘作用，而且还利用液体对流所起的散热作用。

某些绝缘材料可作为隔热材料，如玻璃纤维、软木和石棉。某些气体也是很好的隔热材料。这些低导热性物质可减缓热量的流动速度，利用它们对热辐射的阻隔性，可用来阻断热量的流通过程。

绝缘体的导电性和导热性都不是恒定的。绝缘体在某些外界条件（如加热、加高压等）影响下，绝缘性能会被破坏而“击穿”，该受破坏的区域就转化为导体。因此绝缘体的击穿场强是一个重要指标。如空气的击穿场强约为  $3 \times 10^6$  伏/米。

**均匀分布 (uniform distribution)** 测量值服从的一种分布规律。分布密度函数的形式为

$$y(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{当 } a \leq x \leq b \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } x < a, x > b \text{ 时} \end{cases}$$

均匀分布的数学期望：

$$M(x) = \int_a^b xy(x)dx = \int_a^b \frac{x}{b-a} dx = \frac{a+b}{2}。$$

均匀分布的均方根差

$$\sigma = \sqrt{\int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 \cdot y(x) dx} = \frac{b-a}{2\sqrt{3}}。$$

在区间  $[a, b]$  内服从均匀分布的随机变量  $x$ ，在给定区间  $[a, \quad]$  内取值的概率为

$$P(a \leq x \leq \beta) = \frac{\beta - \alpha}{b - a}。$$

上式表示任一小区间的取值概率与该区间的长度成正比，而与具体“位置”无关。

如果均匀分布的给定区间为  $[-e, e]$ ，则概率密度函数为：

$$y(\delta) = \begin{cases} \frac{1}{2e} & |\delta| \leq e \\ 0 & |\delta| > e \end{cases}$$

实验数据在  $[-\sigma, \sigma]$  内出现的概率

$$P(|\delta| < \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{2e} d\delta = \frac{\sigma}{e} = \frac{e}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{e} = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 58%。$$

一般情况下，误差落在  $\pm \omega$ （置信限）内的概率为：

$$P(|z| \leq \omega) = 2 \int_0^{\omega} \frac{\sigma}{2e} dz = \omega / \sqrt{3}。$$

当  $\omega = \sqrt{3}\sigma$  时， $P(|z| \leq \sqrt{3}\sigma) = 1$  说明：服从均匀分布的随机误差，其极限误差为  $\sqrt{3}\sigma$ 。

注意：测量列中的数据，首先检验属于哪种分布，然后利用分布函数求出  $P(|\delta| \leq \sigma)$ 、 $P(|z| \leq \omega)$  以及极限误差等有关量。

卡诺 (Nicolas Léonard Sadi Carnot 1796 ~ 1832) 法国物理学家、工程师。生于巴黎。其父 L·卡诺是著名数学家、将军和政治活动家。1807 年退出政界后，在家专门对卡诺及其弟弟进行数学、物理、语言和音乐等方面的教育。1812 年，卡诺考入巴黎工艺学校，师从泊松、盖—吕萨克、安培和阿拉哥等著名物理学家。1814 ~ 1819 年和 1826 ~ 1828 年，作为工程师在军队中服役。

卡诺是热力学的创始人之一。1824 年，提出一个理想热机模型 (后称卡诺可逆热机)，该热机设想由汽缸、活塞以及两个维持在不同温度的热源组成，以理想气体为工质。此热机的循环分四个阶段：第一阶段工质和高温热源相接触，工质受热等温膨胀；第二阶段工质与热源脱离，绝热地继续膨胀，温度随之降低；第三阶段工质和低温热源相接触，并等温地压缩，向低温热源放出热量；第四阶段工质和低温热源脱开，继续绝热地被压缩，工质温度升高，直至回升到第一阶段开始时的情况，这时工质和热机都回复到各自的初始状态，完成了一个循环。在这个循环过程中，热机对外作了功。这种循环后来被称为卡诺循环，从而奠定了热机理论的基础。卡诺热机的效率仅由高温热源与低温热源的温度差决定，而与工质的性质无关；在工作于两个给定温度之间的所有热机中，以上述理想热机所产生的效率为最大，这个结论称为卡诺定理。从永动机的不可能性出发，最先证明，只有在热从较热物体转移到较冷物体的情况下，才能得到有用的功，提出了热力学第二定律的最早基本思想。1830 年，意识到热质说的错误，并且否定了热质说。认识到热不过是改变了形式的运动，明确提出了在自然界中动力在量上不生不灭的思想。著有《谈谈火的动力和能发动这种动力的机器》(1824)。1834 年，由于克拉珀龙赋予卡诺的思想以易懂的数学形式，使卡诺的这一著作获得盛名。

卡诺循环 (Carnot cycle) 由两个等温过程和两个绝热过程组成的可逆循环。它是卡诺提出的一种理想热机的循环过程。这种热机的工作物质只同两个热源 (高温热源和低温热源) 交换热量，既没有其他散热也不存在摩擦。卡诺循环中的能量的转换情况如图 1 所示。工作物质从高温热源吸收热量  $Q_1$ ，一部分用于高温热源

工作物质  
低温热源

图 1

对外做功  $A$ ，一部分热量  $Q_2$  放给低温热源。图 2 是理想气体可逆卡诺循环的  $P-V$  图。图中  $A-B$  是等温膨胀过程，工作物质从温度为  $T_1$  的高温热源吸收热量  $Q_1$ 。 $B-C$  是绝热膨胀过程，在膨胀中工作物质的温度从  $T_1$  降低到  $T_2$ 。 $C-D$  是等温压缩过程，工作物质向低温热源放出热量  $Q_2$ 。 $D-A$  是绝热压缩过程，在压缩中工作物质从温度  $T_2$  升高到  $T_1$ ，从而完成一个可逆循环。在循环过程中，工作物质内能不变，所作的功为  $A=Q_1-Q_2$ ，循环的效率

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

而理想气体卡诺循环的效率则为

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

仅跟两个热源的温度有关。

卡文迪什 (Henry Cavendish 1731 ~ 1810) 英国物理学家、化学家。生于法国尼斯。1749 ~ 1753 年在剑桥大学圣彼得学院学习,未及毕业。1753 年到巴黎留学,主要研究物理学和数学。不久回伦敦,在他父亲的实验室中从事科学研究工作。1760 年被选为英国皇家学会会员,他还是法国科学院的外国院士。

在物理学方面,1771 年,得出电相互作用力与电荷之间距离的平方成反比的结论。引入电容概念,发现介质对电容器电容的影响,确定了某些物质的介电常数。在对导体的实验中,发现导体两端的电势与通过它的电流成正比。后来,欧姆在 1827 年确切地阐明了这个定律。更不平凡的是,当时无法测量电流的强弱,他就把自己的身体当作测量仪器,用手抓住电极的一端并注意是他的手指还是从手指一直到腕关节或从手指一直到肘全感到电振,从而估计电流的强弱,可惜这些成果当时没有完全发表。1798 年,通过著名的扭秤实验,测量了两个不大的球体(直径分别为 2 英寸与 12 英寸)的引力,然后由测算得到的引力推算出地球的质量和密度。他所获得的地球密度为水密度的 5.481 倍,仅比现在的数值(5.517g/cm<sup>3</sup>)略小一点。由这一实验可推算出引力常数 G,因此使万有引力定律不再是一种概述性的陈述,而是一条定量的适用于地面上一切物体的精确定律。这个实验所用的方法,构思精巧,至今仍可应用,并成为精微测定技术的先河。在化学方面,1766 年,制备出纯氢,确定了它的性质,测定出水的组成,并且表明能用人工方法制备水。

卡文迪什是一个过惯孤独生活的科学家,晚年在知识界是孤立的,没有形成一个学派。然而,他在英国科学界的地位是牛顿以后最高的,有人认为他所具有的数学才能和实验才能可与牛顿媲美。卡文迪什把自己毕生精力献给了科学事业,一生过着俭朴的生活,逝世后留下一大笔财产。他的后代为了纪念他,捐赠基金,在剑桥大学建立了举世闻名的卡文迪什实验室(1871),该实验室在接连若干任杰出的科学家的领导下,对现代物理学的发展作出了重大贡献。

**卡文迪什扭秤实验 (torsion steelyard experiment of Cavendish)** 英国物理学家卡文迪什于 1798 年设计并首先用来测定万有引力恒量和检验万有引力定律的实验。该实验采用他自己设计的高灵敏度扭秤完成。扭秤的主要部分是,用一根长约 40 英寸的金属丝吊起一根长约 6 英尺的轻质横杆,横杆两端各固定一个直径为 2 英寸的小铅球。金属丝、横杆和两个小铅球构成一悬吊装置。先使悬吊装置处于平衡状态,然后在两个小铅球附近对称地安放两个直径为 12 英寸的大铅球。大铅球对小铅球作用的万有引力使悬吊装置的金属丝扭转。当万有引力对吊丝的力矩与金属吊丝因扭转而产生的扭转力矩平衡时,横杆和小球绕着吊丝转过了一个角度。为了测量这个扭转的角度,在横杆中央固定一小平面镜,在一定方向上用光源照射小镜,使反射光斑落在一直刻度尺上,横杆带动小镜转过一定角度后,光斑在刻度尺上移动过一段距离。根据光源、小镜和刻度尺的相对位置及光斑在刻度上移动的距离,可算出金属丝下端相对于上端

扭转的这个角度。再根据预先求出的金属丝扭转力矩和扭转角度之间的关系，即可算出扭转力矩，进而求出小球与大球之间的万有引力。卡文迪什利用这个实验测得的结果推出了万有引力常数，并由此推算出地球的平均密度是水的密度的 5.48 倍，与现代测量结果相差不大。卡文迪什扭秤实验之所以出名，是因为它开创了测量弱力的新时代，实验的基本原理至今仍在应用，所不同的只是技术上的改进而已。

#### 扭秤实验装置原理图

**卡文迪什实验室 (Cavendish laboratory)** 世界上最有声望的物理学研究和教育中心之一，筹建于 1871 年。麦克斯韦既是该实验室的创建人，也是第一任主任。实验室开放后，他便花费很多时间督促大学生们从事研究，与此同时主持了标准电阻的测定、库仑定律的验证，以及整理卡文迪什留下的大量资料的工作。麦克斯韦虽然过早离开了人世，但他创建的该实验室经过瑞利、汤姆孙、卢瑟福、布拉格、莫脱、皮帕德、考克、爱德华等的主持成了驰名世界的第一流的科学研究中心。该实验室的优良传统是：力求在新的领域里作出新的发现；实验所用的关键性实验装置都是由实验人员自己设计和制造；以实验为根据的理论探索同样受到重视；研究风格强调独创性；十分注重人才的培养。在这个实验室中已造就了 20 余名诺贝尔奖金获得者，它对 100 多年来的物理学的发展作出了重大贡献。

**开尔文 (William Thomson 1824 ~ 1907)** 英国物理学家。生于贝尔法斯特。10 岁时考入格拉斯哥大学预科。15 岁时写了第一篇论文《地球的图形》，获大学的金质奖章。1845 年毕业于剑桥大学彼得豪斯学院。1846 年起任格拉斯哥大学自然哲学教授，长达 53 年之久。1851 年当选为英国皇家学会会员，1877 年被选为法国科学院院士。1890 年起连任英国皇家学会会长。1892 年被封为开尔文男爵，故后来常称他为开尔文。

开尔文是热力学的奠基人之一。1848 年，基于完善卡诺的热机理论，引入绝对温度的概念和绝对热力学温标，这是热力学发展中的一个重要突破。1851 年，提出热力学第二定律的另一种表述方法：“不可能从单一热源吸取热量，使之完全变为有用的功而不产生其他影响。”根据热力学第二定律的这种表述，证明了第二类永动机是不可能的。1852 年，与焦耳合作进行了多孔塞实验（焦—汤实验），成为当时获得低温的主要方法之一。

开尔文在电磁学研究中也成果卓著。1845 年，对库仑定律进行详尽的论证。1846 年，成功地完成了表示电力、磁力和电流的“力的活动影像法”。1851 年，推算了莱顿瓶振荡放电的频率。在研究温差电现象中，发现电流在温度不均匀的导体上通过时导体吸收热量的效应，被称为汤姆孙效应。1853 年，得出电路中固有振荡的周期与电路的电容、电感之间关系的公式，被称为汤姆孙公式。1858 年，由他负责的装设大西洋海底电缆取得成功。1861 年，在他的建议下，英国科学协会设立了一个电学标准委员会，为近代电学单位标准奠定了基础。1875 年，预言了城市路灯将采用电力照明。1879 年，提出了远距离输电的可能性。1881 年，对电动机进行改进，提高了电动机的实用价值。1887 年，发明了镜式电流计的双臂电桥，有力地促进了电工测量仪器的发展。著有《数学和物理学论文集》（共 6 卷，1882 ~ 1911）。

**开放型试题 (open work)** 一种典型的自由应答式试题，在解答中



考生可以根据有关的物理学知识较自由地阐述和论证自己的观点，组织材料和设计方法。开放型试题的评分有很大的主观性因素，从而影响测试的信度，但作为一种评价考生灵活应用物理知识和探究创造能力的测试方式，仍是其他形式问题所难以取代的。例如：分别给出力、电、光、声、原子系统中“共振”的例子，并分别说明影响共振频率和影响宽度的因素。

开普勒（Johannes Kepler，1571~1630）文艺复兴时期的德国天文学家和占星家。生于威尔。幼年体弱多病，少年时在符腾堡的德语学校和拉丁语学校学习过。1587年进蒂宾根大学学习神学。1588年获学士学位，1591年获硕士学位。1594年中断学业去奥地利格拉茨神学校担任数学和天文教师。1600年到布拉格担任天文学家第谷的助手。翌年第谷去世，他继承了宫廷数学家职位。晚年贫病交加，1630年11月病逝。

开普勒在大学读书的时候就接触到哥白尼的日心说，成为哥白尼的忠实信徒。后来又从柏拉图的哲学和毕达哥拉斯的数学中得到启示，试图用几何图像来描述行星轨道。1596年他出版了《宇宙的神秘》一书。书中阐述了他的宇宙和谐思想。书中丰富的想象力和计算才能受到了当时大天文学家第谷的赏识。第谷聘请开普勒当他的助手。1601年第谷逝世，开普勒继承了第谷遗留下来的职位和一套有史以来最精确的行星位置的数据资料。开普勒在这个基础上开始了他的研究。他承担的第一项重要任务就是确定火星的轨道细节。他沿用了偏心轮、均轮等各种组合，花了一年半时间，经过70余次试探之后，找到了一个较好的方案。按照这个方案来预测火星的位置，与第谷的观察记录在黄经度上还相差8弧分。由于他对第谷的记录数据深信不疑，终于放弃了圆形轨道的模型，把火星的运动轨道看成是椭圆。开普勒后来说：“凭这8分差异，便引起了天文学的全部革命。”1609年他出版了《新天文学》一书，发表了他的前两个定律：椭圆轨道定律和面积定律。又经过十年含辛茹苦的探索，在1619年出版的《宇宙和谐论》一书中，发表了他的第三定律：周期定律。开普勒三大定律以简明的结论替代了原来庞大、复杂的系统，使行星轨道和位置的计算大为简化。他还在第谷工作的基础上，利用自己的三大定律，完成了《鲁道夫表》（1627）的编纂。

开普勒对光的照度、视觉机理、光的折射和小孔成像等均有研究，还改进了望远镜。著有《哥白尼系统天文摘要》、《宇宙的神秘》、《新天文学》、《宇宙和谐论》等书。《开普勒全集》（1~18卷）于1937年~1969年间在慕尼黑出版。

开普勒定律（Kepler laws）行星运动所遵循的定律。由开普勒在分析第谷·布拉赫多年观测资料的基础上发现。开普勒定律由三条定律组合而成：第一定律（轨道定律）——行星的轨道是椭圆，太阳在椭圆的一个焦点上。第二定律（面积定律）——行星和太阳的连线在相等的时间内扫过的面积相等。第三定律（周期定律）——行星公转周期的平方与它们轨道半长轴的立方成正比。这三条定律为牛顿发现万有引力定律打下了基础。实际上，开普勒第三定律只是一条近似定律，利用后来发现的万有引力定律作的理论计算表明，只有在认为太阳质量与行星质量相比为无限大时，第三定律才是正确的。由于行星质量与太阳质量相比本来就十分微小，例如太阳系中最大的行星——木星的质量

仅是太阳质量的  $\frac{1}{1047}$ ，所以第三定律仍然是一条精确程度很高的定律。

康普顿 (Arthur Holly Compton 1892 ~ 1962) 美国物理学家。生于伍斯特。1913 年毕业于伍斯特学院。1916 年获普林斯顿大学博士学位。1920 年任华盛顿大学教授。1923 年任芝加哥大学教授，1940 年任该校物理系主任和理学院院长。1945 年任华盛顿大学校长。

主要贡献是发现了康普顿效应，获 1927 年诺贝尔物理学奖。1917 年 ~ 1919 年，用实验确定了 X 射线强度与散射角的关系。根据晶体的反射 X 射线的强度，提出可用来研究电子和原子的排列状态。1920 年，发现 X 射线被晶体散射后，散射波中除原波长的波外，还出现波长增长的现象，这现象以后被称为康普顿效应。但当时用经典理论来解释得不到合理的结论，即使用他自己提出的有限大小的电子散射去解释也困难重重。接着，用单色 X 射线和布拉格晶体光谱仪作实验，同样发现有康普顿效应。1922 年，采用量子论，即以具有能量为  $h\nu$ 、动量为  $h\nu/c$  的光子和自由电子的简单碰撞来解释该效应时，获得了与实验结果相符的合理结论。此后，同合格诺夫合作，发现了 X 射线的全反射和全偏振现象，使测定原子的电子数目更为精确。同多恩合作，首次用刻线光栅获得了 X 射线谱，为测量 X 射线波长提供了一种直接的方法。1930 年后，在领导宇宙射线强度地域变化的世界范围的研究中，发现了逆康普顿效应和宇宙线的纬度效应。著有《X 射线和电子》(1926)、《X 射线的理论和实验》(1935)、《科学的人类意义》(1940)。

康普顿效应 (Compton effect) 1923 年康普顿在 X 光被石墨散射的实验中出现的现象。这个实验表明：散射光中除了有原波长  $\lambda_0$  的成份外，还有大于  $\lambda_0$  的波长为  $\lambda$  的散射光；波长差  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  随散射角  $\theta$  增加而增大，与散射物质无关； $\lambda_0$  散射光强度随  $\theta$  增加而减小，随散射物质原子序数增加而增加；波长为  $\lambda$  的散射光则相反。康普顿因发现此效应而获得 1927 年诺贝尔物理学奖。

康普顿把 X 光散射看作是光子和自由电子间的弹性碰撞，利用能量和动量守恒定律可得到散射光波长改变量为 
$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta)$$
，与实

验值一致，其中  $m_0$  为电子静止质量。 $\frac{h}{m_0c}$  称为康普顿波长，是一个具有长

度量纲的常数。碰撞后的光子称为康普顿散射光子，碰撞后的电子称为康普顿反冲电子。

《考工记》中的物理知识 (physics knowledge in Kaogongji) 《考工记》亦称《周礼·冬官考工记》，作者不详，中国先秦时期的手工艺专著，战国时期已经流传。该书卷首叙述“百工之事”的由来和特点，列举攻木、攻金、攻皮、设色，刮磨和抃植等 6 类的 30 个工种，几乎包括了当时官方管理的手工业主要部分，全书所阐述的科学道理含有较丰富的物理知识。力学方面。《考工记》“轮人”、“舆人”、“人”条中，详细记述了为使车行轻快，车轮要“微至（圆）”、轮径不能过小等有利于减小摩擦力的要求；列举直辕牛车上坡费力且车不稳，上下坡时均不利于牛驾车等缺点，表明对当时车在斜面上的受力情形已有所认识；指出曲辕马

车的种种优点，以至“马力既竭，犹能一取焉”，这是对惯性认识的最早记载。“矢人”条中，专门叙述箭的各部分需要按一定比例制作，才能使它在空中飞行时保持稳定；记载了箭杆、箭羽的轻重影响箭在空中飞行的情况：“前弱则俯，后弱则翔；中弱则纤，中强则扬；羽丰则迟，羽杀则”；表明对飞行体的形状大小、重量分布会怎样影响运动状态已有正确的认识。

声学方面。《考工记》“鳧氏”条中，周密介绍了编钟的形制，记载了“钟大而短，则其声疾而短闻；钟小而长，则其声舒而远闻”这两种不同的声学效果，说明了钟壁厚薄、钟口形状、钟柄长短等对发声的影响。“人”条介绍了几种鼓的形制，记载了鼓形“大而短”及“小而长”的不同声学效果。“磬氏”条介绍了编磬的形制，指出若音调太高，则磨其旁；若音调过低，则磨其端，可见古人在制造乐器时，已初步具有保证音调准确的一些知识。

热学方面。《考工记》涉及了一些热工技术知识，如关于“六齐”的记载，反映出中国古代利用热工技术，掌握不同的温度，根据各种金属的不同的特性，冶炼出性质和用途各异的合金。又如“氏”条中载：“凡铸金之状，金（铜）与锡，黑浊之气竭，黄白次之；黄白之气竭，青白次之；青白之气竭，青气次之；然后可铸也。”表明在中国古代，人们已经用颜色来判断被加热金属的温度。

科里奥利加速度（Coriolis acceleration） 质点相对于动参考系（动系）运动，且动参考系又在视为固定的参考系（定系）中旋转时，质点的相对运动和动系的旋转运动互相影响所引起的加速度。为法国科学家科里奥利首先发现。当质点相对于动系的速度为  $v_r$ ，而动系相对于定系旋转的角速度为  $\omega$  时，科里奥利加速度是

$$v_e = 2(\omega \times v_r)。$$

地面上相对于地球运动的物体，只要其相对速度的方向不和地轴平行，此物体就具有科里奥利加速度。因此，对于大气和河流的运动往往都要考虑此加速度，而在一般工程问题中，由于地球自转角度很小，故可以不考虑此加速度。

科学方法（process of science） 在科学研究中经常反复运用的、在获取科学知识的过程中不断重复和再现的某些认知心理活动和技能。掌握和运用科学方法是现代理科教育的一个重要目标。联合国教科文组织编纂的理科教师手册列出了以下 13 项基本的科学方法。 观察：运用仪器、感官有目的、有计划地感知客观现象和事物。在科学研究中除了进行一般的观察外，还必须进行比较观察和动态观察。 分类：发现事物间的某方面的共同点、相似点和因果关系，对事物按某种原则分类。 数量关系：从量的角度认识事物和事物间的某种联系，也就是用数学手段分析认识事物。 测量：运用工具对事物某方面特征进行定量比较，或不用工具根据经验和比较而作出粗略的估测。估测有时往往比精确的测量更有意义，在科学教育中要教给学生估测的技巧。 空间/时间关系：了解事物的空间关系和时间关系，涉及对诸如物体形状、空间距离、运动速度等的了解和运用。 交流：用科学语言进行口头和书面的表述、交流的技巧。在现代教育中，这是一项重要但又常常被忽略的基本科学技能。教师的一项重要任务是在教学中为学生创造充分的机会，用口头、文字、图形、图线、草图、

代数式等来表述自己的思想。 预测：根据直觉对所观察的现象和研究的问题直接给出推测性的结论。科学教育中要特别注意保护和诱导学生作出某些大胆的预测性结论。 推断：对观察结果作出合理的主观逻辑推断和试探性的说明。 作出操作性定义：根据某科学量的测量方式或产生的效果，对该科学量表示的科学概念作出定义。例如用加在一导体两端的电压和通过它的电流强度的比值来定义该导体的电阻。 形成假设：对所研究的问题作出某种可以进一步检验的猜测。(11)数据收集和解释：根据所研究的问题收集必要的的数据，对所收集的数据作出处理，并由此概括、归纳某些结论。(12)识别和控制变量：认识影响或决定事物某种特性的若干变化因素，通过控制变量来逐一研究每个变化因素所起的作用。(13)进行实验验证：通过实验手段来检验所提出的假设是否正确。现代科学实验方法对科学的发展起了关键性的巨大推动作用。伽利略则是创始这一科学方法的鼻祖。

科学记数法 (science record number) 是一种记数的方法，主要用于测量、实验数据处理等场合。这种格式表示清楚，处理简单，运算速度快。科学记数法的数表示形式为：

$$*. ** \times 10^* (\text{单位})。$$

注意：小数点前取一位除了零以外的数；小数点后取几位，由实验的精确度决定；幂值的大小与所取的单位有关，通常都用国际单位制表示。

例如物体的长度为  $3.650 \times 10^{-2}$  (米)，其中单位取国际单位制中的长度单位。如果取厘米，则可写成：3.650 (厘米)。习惯上  $\times 10^0 = \times 1$ ，所以省略不写。小数点最后位的零不可忽略，因为测量时，该位值是有意义的，有参考价值。

科学态度 (scientific attitudes) 学习科学知识和进行科学工作时表现出的良好心理特征和素质。培养科学态度是现代理科教育的目标之一。我国物理教学大纲中也明确指出要重视科学态度的教育。科学态度有以下一些主要特征：相信科学，反对迷信，探求真知。 客观求实、尊重事实。 尊重并按科学的思想、方法和观念办事。例如重视实验、数量化、精确性和概率性。 对科学信息的敏感，探求新的事物和观点，想做新的试验。 具有科学的批判精神。 能独立思考和独立作出判断。 敢于接受挑战。 不固执己见，善于听取和了解不同的观点、方法。 良好的协作精神。 严肃认真，一丝不苟。这些特征是一个科学工作者应该具有的。科学态度不是短期内能培养、训练起来的。在中学物理教学中，应有意识地逐步开始培养。现代理科教育改革重视实验教学，探索法教学以学生为中心的讨论式、独立学习式教学等，其目的固然是为了帮助学生更好地掌握知识，另一方面则是为了更好地培养学生的科学态度。

可控闸流管 (controlled thyristor) 以硅单晶为基本材料、具有三个 PN 结的四层结构硅芯片和三个电极组成的半导体可控整流器，简称可控硅。其结构如图 1 所示。三个电极分别称为阳极 A、阴极 K 和控制极 G。器件的阳极和阴极间的电流—电压特性如图 2 所示。加反向偏压 (阳极接负) 时，可控闸流管特性与 PN 结二极管的反向特性相似。当加正向偏压时，在一定电压范围内，管处于阻抗很高的关闭状态 (正向阻断)。当正向电压大于转折电压  $V_1$  时，器件迅速转变到低电压 ( $V_B$ ) 大电流的通导状态。

图 1 可控闸流管结构示意图。图 2 电流电压特性

当器件处于关闭状态时，如果使控制极有适当大小的电流，则器件可迅速被触发而转变到通导状态，此后控制极失去作用。当器件的电流减小到低于维持电流（图 2 中点 2 处的电流），或使阴极—阳极电压减小到零或负值，器件又恢复到关闭状态。

可控闸流管的工作电流从几安至几百安，工作电压从几十伏到几千伏。塑封管的工作电流较小，螺旋型可控闸流管电流小于 100 安；平板型可控闸流管一般在 200 安以上。可控闸流管多用于整流相位控制、低频开关、逆变、变频、斩波、调速以及脉冲调制等。

**可逆过程**（reversible process） 一种理想化的热力学过程。一个系统，由状态 A 出发，经过某一过程到达另一状态 B。如果存在另一过程，它不仅能使系统从状态 B 恢复到状态 A，而且可以完全消除原来过程所产生的对外界的所有影响，则称系统从 A 到 B 的过程为可逆过程。反之，如果用任何方法都不可能使系统和外界都恢复原状，则称这个过程为不可逆过程。

热力学第二定律的克劳修斯表述和开尔文表述的等效性，揭示出自然界中一切与热现象有关的宏观不可逆过程都是互相关连的，由某一过程的不可逆性可以推断出另一过程的不可逆性。

在准静态过程中，热力学系统所处的每一个状态都可以看作是平衡态。如果该过程由外界对系统做功引起，系统的压强必然与外界压强相差一个无限小量；如果该过程由外界传递热量引起，系统的温度必然与外界温度相差一个无限小量，当过程中不存在其他耗散影响（如摩擦阻力）时，这种准静态过程就是可逆过程。

实际过程可以接近于可逆过程，但不能达到可逆过程在计算不可逆过程的熵差时，由于初态和终态给定后，熵差与经历的过程无关，因而可以假设一个或几个接连的可逆过程来代替原来的不可逆过程进行计算。

**刻漏**（clepsydra） 中国古代的漏水计时器，又称漏壶。《周礼·夏官》中载：“挈壶氏：掌挈壶以令军井，… 凡军事，县（悬）壶以序聚柝。… 皆以水火导之，分以日夜。”这里的“挈壶”就是上部有一个提梁的漏壶，作计时用。“序聚柝”是说根据漏壶的标示按时敲木梆报时的意思。“水火”操作是控制水温的措施。为了较精确地计量时间，古人还用一根箭放在壶里，箭杆上标有刻度，下端装在一个浮体上，水退到哪里，就知道现时是几刻了。由水面下降显示时刻的漏壶属沉漏一类。沉漏的水压随水面而降低，流速很难均匀，以致箭的分度不易准确。以后便发明了浮漏：从一个漏壶流出的水，流入一个直柱形容容器里，箭在其中便逐渐上浮。只要流柱均匀，箭杆就可均匀上升，计时易于精确。为了得到均匀水流，若在贮水壶之上再加一把漏壶，就能使贮水壶流出去的水可以随时得到补充，并能较自然地保持水面稳定。据记载，二级漏壶的出现不晚于东汉初年。以后发展为三级漏壶直至六级漏壶，这样就会使最下面漏壶的出水更为稳定。宋代沈括在前人多级漏壶的基础上制成了无壶浮漏，具有较高的计时精度，每昼夜的误差可小于 20 秒，这是非常了不起的成就。

**克尔效应**（Kerrefect） 英国人克尔于 1875 年发现的一种电光效应。某些各向同性的透明物质在电场作用下变成各向异性，从而产生双折射的效应。又称平方电光效应或二次电光效应。因为媒质变成各向异性后，两个主折射率之差与电场强度平方成正比，即  $n_e - n_o = KE^2$ 。K 称克尔常数。

通常的实验装置是在一对透振方向互相垂直的偏振片之间，放入一个克尔盒。克尔盒是一个有通光玻璃窗的小盒，盒内充满硝基苯液体，并装有一对电极。电极电场与两偏振片透光方向各成  $45^\circ$ 。用平行光照射起偏器，在未加外电压时，因两偏振片正交，没有光从检偏器射出。当加上强电压（ $\sim 10^4$  伏/厘米）时，就有光射出。这说明盒内液体在强电场下已变成双折射物质，使透过起偏器的光分解成 e 光和 o 光。对一定的克尔盒来说，o 光和 e 光之间的相位差与电压平方成正比。使克尔盒相当于半波片时所需要的电压，称为半波电压。

克尔效应的优点是相位差与电场取向无关。硝基苯克尔效应的弛豫时间只有  $10^{-9}$  秒数量级，所以可用作电光调制器和高速光闸，在激光通讯、光束测距、高速摄影等方面有重要应用。

克拉珀龙 (Benoit Pierre Emile Clapeyron 1799 ~ 1864) 法国物理学家。生于巴黎。1818 年毕业于巴黎工艺学校。1820 年 ~ 1830 年，在俄国彼得堡交通道路工程师学院工作。回法国之后，1844 年起任巴黎桥梁道路学校教授、校长。

主要贡献在热学方面。1834 年他重新发现了瓦特的压强—容积图，指出 p-V 图的曲线所围的面积为一个循环变化所作的功提供了估计。并用图解法发表了卡诺的单循环过程，确立由蒸汽机所作的功和这一循环中所供应的热量之比，定出一台蒸汽机的效率。正是由于克拉珀龙的工作，使得卡诺所作的贡献逐渐为人们所理解。他还提出了比一定质量的理想气体的状态方程应用范围更为广泛的状态方程：
$$pV = \frac{M}{\mu} RT。$$

克拉珀龙方程 (Clapeyron equation) 在相平衡时，单元双相系统的平衡压强随温度变化关系遵循的方程，又称克拉珀龙—克劳修斯方程。

在没有化学反应的情况下，单元双相系统的两相平衡条件为温度相等（热平衡条件）、压强相等（力学平衡条件）和化学势相等（相平衡条件）。由此可以得出，两相平衡时所处的压强 p 和温度 T 之间存在一定的函数关系： $p = p_s(T)$ 。在 (p-T) 图上这个关系式就表示为相平衡曲线，该相平衡曲线的斜率满足的方程是

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(v_2 - v_1)}$$

这就是克拉珀龙方程。式中 L 是单位质量的物质从 相转移到 相过程中吸收的潜热， $v_1$  和  $v_2$  分别是单位质量的物质在 相和 相的体积（即比体积）。图 1 示意地绘出了大多数物质的 p-T 相平衡曲线，其中 OA 为气固平衡曲线，又称“升华线”。AB 为固液平衡曲线，又称“熔化线”。

AC 为气液平衡曲线，又称“气化线”。从“升华线”上可以看出  $\frac{dp}{dT}$

$> 0$ ，当物质从固相（相）转变为气相（相）时，需要吸收潜热（ $L > 0$ ），因此由克拉珀龙方程可得到  $v_2 > v_1$ ，即气相比体积大于固相比体积，类似地可得到气相比体积大于液相比体积、液相比体积大于固相比体积。然而有少数物质在熔化过程中液相比体积小于固相比体积，吸收的

潜热仍大于零，因此熔化线的斜率  $\frac{dp}{dT} < 0$ ，水就是其中之一。从日常

生活中知道，冰能漂浮在水面上，寒冷季节自来水管容易爆裂，这就是由于水结冰时体积膨胀而造成的，图 2 就是水的 p-T 相图。

图 1 一般物质的 p-T 相图

图 2 水的 p-T 相图

克劳修斯 ( Rudolf Julius Emanuel Clausius 1822 ~ 1888 ) 德国物理学家。生于普鲁士的克斯林。1840 年入柏林大学，1847 年在哈雷大学得主修数学和物理学的哲学博士学位。1855 年任苏黎世工业大学教授。1867 年任维尔茨堡大学教授。1869 年后任玻恩大学教授。1865 年被选为法国科学院院士，1868 年被选为英国皇家学会会长。

克劳修斯是分子运动论和热力学的奠基人之一。19 世纪初，分子运动论开始得到发展，时至 1857 年 ~ 1858 年，克劳修斯为此作出重要贡献，主要包括：沟通了原子论和热学之间的联系，用微观的原子—分子模型来解释宏观的热现象；推导了著名的压强公式，这一推导比他之前的任何推导都更为合理与严谨；首次明确地提出了物理学中的统计概念，由这新概念发展了以后的统计物理学；指出气体分子的平均动能只是全部内能的一部分，为气体比热的经典理论奠定了基础；通过引入分子在单位时间内所发生的碰撞数和分子的平均自由程两个概念，解决了由分子运动论计算出的分子速度和气体扩散现象所显示的速度两者之间的矛盾，从而开辟了研究气体的输运现象的道路。

热力学第一、第二定律的确立，标志着热力学基本理论的完成，克劳修斯对此都有重大贡献。1850 年，提出在“一切只由热产生功的情况，必有和所产生的功成正比的热量被消耗掉；反之，消耗同样数量的功也就会产生同样数量的热”的热力学第一定律的同时，还应增加下述原理：“不可能把热从低温物体传到高温物体而不产生其他影响”作为热力学第二定律。1854 年，发现在热机循环过程中，如果把  $Q_1/Q_2=T_1/T_2$  的比值改换为  $Q_1/T_1=Q_2/T_2$  的比值，却是一个常数，从而引入了后来定名为熵的状态参量。1865 年，正式把该状态参量叫作熵，表述了著名的熵增加原理：“当物体系统，经绝热过程由一态到达另一态时，它的熵不减少，在可逆过程中不变，在不可逆过程中增加”，成为热力学第二定律的又一表达形式。著有《论热的动力以及由此推出的关于热学本身的诸定律》(1850)，《力学的热理论的第二定律的另一种形式》(1854)，《力学的热理论的主要方程之便于应用的形式》(1865)。

课程结构 ( structure of curriculum ) 物理课程的目的、任务、基本要求、基本内容、教学原则等要素构成的基本框架。是物理学科结构转化为学生认知结构的阶梯。根据“课程论”的基本理论，中学物理课程结构应决定于社会结构、学生心理结构和物理学科结构三者的交叉和结合 ( 图 1 )，这三方面的因素也确定了：社会要求与社会条件：包括生产力 ( 科学技术 ) 水平，经济、社会制度对基础教育的要求，表现为教育

图 1

社会结构物理学科结构学生心理结构方针、制度、政策和培养目标。这就大致决定了课程设置的目的是与任务，形成教学计划和教学大纲的基础。物理学的学科知识体系：这是决定物理课程和教材内容的主要依据，应体现物理知识结构的基本方面和考虑物理学知识体系的相对完整性。学生原有的认知水平和心理发展特点：中学阶段是青少年身心发育和认知

发展的重要时期，课程和教材内容特别是教学方法要充分考虑不同年龄学生的认知水平和心理特点，促使学生能力和个性的健康发展。

中学物理课程结构的集中反映是中学物理教学大纲（课程标准）。它应同时考虑适应社会进步的需要、学科知识体系的需要和学生发展的需要这三个方面。

中学物理课程内容按年级递升安排的结构模式大体有直线式和螺旋式两种。直线式结构是随年级的递升，物理学同一范畴和课题（如力学、运动和力）的教学内容前后不重复，直线上升。螺旋式结构则是随年级的递升，将同一范畴和课题的教学内容按难易程度并根据学生认知水平的发展，从现象到本质，从定性到定量，逐级深化或有序化。

根据不同物理知识内容的教学要求不同，中学物理课程体系还常采用核心课程的结构模式，即把中学物理课程分为核心课程、延展课程（又称外围课程）和选修课程三部分（图 2）。核心课程由每个学生必修的最基本的重点物理知识构成，延展课程是在核心物理知识的基础上，适当延拓和加深的物理知识。延展课程

图 2

还常按不同课题采用单元课程的形式给出，学生必须从延展课程中选取若干内容或单元作为核心课程的补充。选修课程的教学内容，往往根据当地社会经济发展的需要、教学对象的不同志向和兴趣，开设以加深或以拓宽为主的物理选修课或专题系列课供学生选择。与中学物理课程体系的这种核心结构模式相对应，中学物理教学大纲还必须规定核心教学内容和延展教学内容。某些国家、地区和学校还常常把物理知识作为综合理科课程内容的一部分。

课时教学计划（syllabusforclassroomteach-ing）每一课时或每一课题教学过程的设计方案，即教案。课时教学计划是教师备课的总结，教学的依据。课时教学计划要能反映教学的主要内容和方法，能反映师生教与学的动态过程。编写教案前首先必须备好课，备课包括以下工作：精读这一课题教材，亲自动手做有关的实验和习题，明确所教内容在整个物理教学中的地位、作用，知识内容深度、广度的要求，进而明确本课题的重点和教学的目的要求。分析研究学生学习该课题内容的障碍和容易出现错误，从而确定教学的难点。处理教材、确定教法。处理教材就是在分析教材的基础上，根据学生的特点，从教学最优化角度考虑，重新组合编排知识信息，把教材的文字系统转换成适合于学生接受的语言动作和教学活动系统。选择教法就是为了突出重点、克服难点、达到预定的教学目的所需要采用的各种手段措施，包括教师教的方法和学生学的方法。

写出教案。教案一般应包括以下几个方面：教学课题：章节标题或核心内容，注明授课时间。教学目标：包括基础知识、能力培养和思想教育等方面的要求。教具：包括演示实验和随堂实验器材。教学过程：包括教学的内容（知识、公式）、教学程序的安排、时间分配、习题作业、技能训练等。课后分析：课后记录可以包括教案的执行情况、教学目的是否达到、教法的选择和应用效果如何、学生的反映、疑难问题和典型错误、存在的问题、合理的建议、资料索引等。一个编写得好的教案应是简明扼要，突出重点的。

课堂教学评价（evaluation of classroom teach-ing）对课堂（包



括实验室)中的物理教学活动过程进行观察和评价。物理课堂教学评价是对物理教师教学能力评价的重要依据和基本手段。

教学目标是课堂教学评价的基本标准。然而由于课堂教学是涉及面很广的一种心智活动,它包括知识、技能、发展、课的结构和形式、师生的心理素质和特点、教具(学具)、教材、课堂条件等诸多因素,所以对课堂教学的评价不可能靠简单划一的标准来评判,而涉及诸多的因素指标。对于从整体上来评价一堂课,目前国内较普遍采用的标准是由原苏联教育科学院院士巴班斯基提出的“教学过程最优化”的标准:

(1)让每个学生按照所提出的任务,于该时期内在教养、教育和发展三个方面获得最高可能的水平。这就是效果标准、质量标准。

(2)学生和教师遵守学校卫生学和相应指标所规定的课堂教学和家庭作业的时间定额。这就是时间标准、效率标准。

在运用上述标准时需要注意:

(1)“最优化”并不是“最理想化”或“绝对好”,而是指在一定的条件下,诸多技能、方法、方案中相对而言的“最优”。

(2)要求教师能针对程度不同的各类学生的情况因材施教,使各类学生都能在原有基础上获得最佳收效。但并不排斥根据反馈信息需要补课的学生,比其他学生多花费一定的时间来补课。

要求整堂课的质量、效果达到最优,则课的各个环节、各个方面的质量和效果都应是最优的。为此,也可以从课的结构、方式、方法等因素来评价课堂教学。

为了便于对课堂教学的各方面进行全面评价,可以把评测的项目、标准、权重等汇编成表,以使被评测的教师和所有评测人员掌握评测的目的、要求和标准。下面是一种评价项目、标准列表的示例。

评价中的注意事项:

(1)评价的项目、子项目及各项的权重,应根据评价的目的、要求而制定,除一些基本的项目和标准外,大多数项目和标准可由评价人员根据评价目的来确定。

(2)物理课堂教学观摩课的评价一般过程是教师印发讲课教案(包括教学目标、班级情况、组织教学的目的、意图、有关说明等),专家、同行听课(即观摩

#### 物理课堂教学质量评价表

##### 物理课堂教学质量评价表

评价主项目\序号\评价子项目\评测标准\权重\评判\

评价主项目\序号\评价子项目\评测标准\权重\评判

\\优\良\一般\较差\

\\优\良\一般\较差

教学目标\1-1\落实教学大纲中认知、技能、情意各方面的要求\全面、符合实际\\教学原则和方法\3-1\启发思维、揭示物理学科的方法、思维特点\点拨恰当、诱导得法\\1-2 教学目标的实施\措施合理有效\\3-2\教学过程的条理性\循序渐进、逻辑性\\

\1-3\教学目标转化为学习目的程度\良好\\3-3\对学生的表扬、批评、引导\针对性、教育意义\\

教学内容\2-1 教学内容的整体安排\合理性\3-4\课的结构设计\合理性\

\2-2\教材深广度处理\适宜性、可接受性\3-5\板书、板画设计、安排\整洁、形象有特色\

\2-3\展示的内容、信息\科学性、兴趣性\3-6\实验、教学仪器的操作、示范\熟练、可见度好、有效\

\2-4\实验的选择和运用\切题、生动\3-7\检查作业、知识的方式\迅捷、有效\

\2-5\习题(例题、问题)的选择、讲解\典型性、思维性\3-8\课堂反馈方式及对反馈信息的处理\有效、灵活\

\2-6\物理知识的讲解\科学性、逻辑性、联系实际\

\2-7\学生技能和能力的培养\重视、措施有力\

\2-8 知识教学中的德育美育\针对性、协调性\

\评价主\序\评价子项目\评测标准\权\评判\评价主\序\评价子项目\评测标准\权\评判\项目\号\重\优\良\一\较\项目\号\重\优\良\一\较\

\般\差\般\差\

\教\4-1\教学态度\认真、自信\教\5-1\目标完成情\达标率\

\学\4-2\服装、仪表、\亲切\学\5-2\况\百分率\

\的\4-3\举止\朴实、大方、\效\5-3\学生对知识\学生自觉、\

\组\4-4\语言\有美感\果\5-4\的掌握程度\活跃程度积\

\织\4-5\声音、神态\文明、简练、\5-5\学生学习意\吸、自信\

\和\4-6\师生情感交\有幽默感\识、体现学生\有否拖堂、\

\教\4-7\流\清晰、饱满\为主体的思\浪费\

\学\对待学生的\自然、融洽\想、发挥学生\热烈有序\

\态\提问和回答\认真倾所、\能动作用\

\度\处理课堂突\处理有方\时间利用率\

\发事件\灵活、妥贴\课堂气氛、\

\秩序

活动),进行评议、评价。

目前国内外也有用摄像机作为评价活动中的“辅助仪器”,将教学的全过程摄录下来,使课堂教学中瞬息即逝的现象重现。

物理课堂教学的评价是教学评价的重要方面,是物理教学法研究活动的有效方式之一。

空化作用(cavitation) 由于液体中形成空穴而局部产生高压、高温、放电、发光或激震波等的作用。空化作用可由超声波获得。这是因为超声波频率高、能量大,在液体中传播时,可以产生大量的小空腔。这些空腔存在时间极短,当它们骤然收缩时,在液体中会产生高达数千大气压的巨大压强,从而产生大量的热能,形成局部的强压力和高温度,足以引起液体的化学变化。同时,在小空腔形成过程中,其外壁往往带有电荷,而迅速收缩时,电荷来不及消失,就会发生急剧的放电现象。在极短时间内,大量的小空腔同时放电,就使液体(如水)的某些区域发出荧光。工业上利用超声波引起的空化作用以促进化学反应、粉碎液体内的悬浮物

体、制造乳剂、清洗精密机件、杀灭病菌、去除织物表面的污垢等。船用螺旋桨和涡轮翼片等表面由高速流体产生的空化作用会使固体表面受到腐蚀和损伤，应设法避免。

**空间 (space)** 物质存在的广延性和伸张性，被用以描述事物的位形。空间的物理性质主要通过它与物体运动的各种联系而表现出来。在经典力学中，牛顿的《原理》认为：“绝对空间，就基本性来说，与任何外在的情况无关。始终保持着相似和不变。”另一方面，物体的运动性质和规律却与采用怎样的空间来量度它有着密切的关系。相对于绝对空间的静止或运动，才是绝对的静止或运动。只有以绝对空间作为度量运动的参照系，或者以其他作绝对匀速运动的物体作为参照物，惯性定律才成立。

在狭义相对论中，爱因斯坦否定了绝对空间的存在，指出不同惯性系的空间之间遵从洛伦兹变换，以及长度变成相对量，运动的尺相对于静止的尺变短。在广义相对论中，爱因斯坦进一步指出一个惯性参照系只能适用一个非常局部的范围，不可能适用于大的范围，或全宇宙。用几何的语言来说，各个不同的局部惯性参照系之间的关系，可以通过空间曲率来规定。空间弯曲的程度取决于物质分布状况，空间曲率体现了引力场的强度。空间的量度一般是以米 (m) 或其分数 (cm、 $\mu\text{m}$ ) 或倍数 (如 km) 为单位。

**空间光学 (space optics)** 光学与空间学之间的边缘学科。主要研究在高层大气中和大气外层空间中来自天体的可见光、红外线、紫外线和软 X 射线，探测它们的存在，测定它们的位置，探索它们的结构、运动和演化规律。空间光学历史可追溯到 19 世纪中叶，如 1858 年在巴黎上空，利用气球拍摄了第一张空中照片。事隔 90 年，1946 年利用 V—2 火箭发射摄谱仪探测来自空间的紫外线，标志空间光学开始形成。1957 年原苏联发射了第一颗人造卫星，人们开始利用卫星对空间和地球进行观测与研究。自此，空间光学进入蓬勃发展时期。1973 年美国发射了载人天空实验室，上面装有一组观测太阳的光学设备，从而把空间光学发展推向一个新阶段。1983 年由荷兰、美国和英国联合研制的红外天文卫星发射成功，可接收来自遥远天体红外区的辐射，且灵敏度比至今所使用的同类仪器高 100 倍。空间光学目前使用的测量仪器主要有：在红外波段使用的空间光学系统主要是红外望远镜。在紫外波段使用的空间观测设备主要有太阳远紫外掠射望远镜，远紫外太阳单色光相机，远紫外分光计。在 X 射线波段上使用的仪器主要有各种 X 射线望远镜，太阳 X 射线分光计，太阳 X 射线单色光相机以及各种类型的 X 射线探测器。

**空间探测器 (space detector)** 一种脱离地球引力、飞往月球或其他行星、或在星际间运行的航天器，又称“深空探测器”。它是用运载火箭加速到接近第二宇宙速度 ( $11.2 \times 10^3$  米/秒，探测月球) 或第二宇宙速度以上 (探测行星及行星际) 沿设定的轨道飞向目标星体。一般采用三种形式进行探测：从目标星近旁飞过作远距离观察；成为目标星的人造卫星作反复观察；在目标星表面着陆考察，甚至还可取样返回。

空间探测的目的主要是：了解太阳系的起源、演变和现状；进一步认识地球环境的形成和演变；探索生命的起源和演变。

自 1969 年 7 月 20 日美国实现载人登月计划后，世界各国已发射了数百个空间探测器，对金星、水星、火星、木星和土星等各大行星进行研究，有不少新的发现，如，不管白天还是黑夜，金星表面的气温经常处于 450

左右，金星是个高温世界；火星上既没有生命，更没有“火星”；木星像土星和天王星一样，它的周围也有一个光环，由黑色碎石组成，宽几千公里，厚约30公里，离木星表面约58000公里；木星的一颗卫星上，有活火山正在爆发。

由于空间探测器的飞行距离远，其控制、导航、通讯和电源等均更为复杂，技术要求比人造卫星高。

空吸作用 (suction) 见射流技术。

空穴 (hole) 按照能带理论，半导体的能带结构包括电子占满的价带和全空着的导带，其中间被禁带所隔开。由于热运动，价带电子有可能被激发到导带，从而使价带内留下了一个空位。这样，在外电场作用下已激发到导带的电子可以运动而产生电流；同时，价带中的电子因为有了空位也就可以运动，从而对导电作出贡献。随着价带中电子运动状态的不断变化，空位也相应地不断移动。为了描述方便，人们常常把这种空位粒子化，并称它为“空穴”。空穴是一个带正电荷  $q$  并具有正的有效质量的“粒子”。这样，价带中的电子在外场作用下的运动就可用空穴的运动等效。

库仑 (Charles Augustin de Coulomb 1736 ~ 1806) 法国物理学家。生于昂古莱姆。在中学时期就爱好数学和物理，后来在梅济耶尔进工程学校学习。离校后入皇家军事工程师队，任工程师，先后在西印狄兹、埃克斯岛、瑟堡等地服役多年。1772年回国，从此开始科学研究工作，1781年被选为法国科学院院士。

主要贡献在电磁学方面。1773年，应法国科学院的悬赏，进行航海指南针的改良工作。他从解决磁针在支架上受到摩擦力问题着手，提出用丝线悬挂磁针的方法。这一改进使他获得1777年法国科学院的奖金，并发现丝线在扭转时的扭力和磁针转过的角度成正比关系，从而能计算磁力的大小，这就使他提出了一种可以精确测量微小力的扭秤。1784年~1785年间，用扭秤非常精确地测量了静电力和静磁力，得出两个点电荷之间的吸引或排斥力的大小同它们的距离二次方成反比，同每一个点电荷的电荷量成正比的定律，被称为库仑定律。该定律是电学中第一个被发现的定量规律，它在电磁学的发展史中占有极为重要的地位。在对磁学的研究中，根据等效磁荷的观点，也同样通过扭秤实验，得到两个点磁荷之间的相互作用规律，即磁的库仑定律。还证明了导体上的电荷全部集中在表面上。在力学方面，1773年，提出了使各种物体经受应力和应变直到它们的折断点，依次可以计算物体上应力和应变的分布情况，这种方法成为结构工程的理论基础。1779年，做了一系列测定摩擦力的实验，依次可以计算各种摩擦力的大小，并得到后来以他的名字命名的摩擦定律。他也是测量人在不同工作条件下做的功（人类工程学）的第一个尝试者。由于这些卓越成就，他被认为是18世纪欧洲伟大工程师之一。

库仑定律 (Coulomb law) 表示两静止点电荷间相互作用力的定律。库仑定律是静电学的基础，也是电磁学的基本定律之一。库仑定律的内容是：两静止点电荷间的作用力（即库仑力） $F$ 的大小正比于两点电荷  $q_1$  和  $q_2$  的乘积，反比于它们的距离  $r$  的平方，作用力的方向沿着电荷  $q_1$  和  $q_2$  的连线方向，同号电荷为斥力，异号电荷为引力。可以用公式表示为：

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}, \text{ 式中 } K \text{ 为比例系数，在SI单位制中，} q、r、F \text{ 的单位分别}$$

为库仑、米、牛顿，实验测得 $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.98755179 \times 10^9$  米 / 法，其中 $\epsilon_0$ 称为真空介电常数，其值为 $\epsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-12}$  法 / 米。在 CGS 静电系单位制中， $K=1$ ，没有量纲，所以库仑定律这时可表示为： $F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 。静电相互作用服从牛顿第三定律， $q_2$  作用于  $q_1$  的力为  $F_1$ ，与  $q_1$  作用于  $q_2$  的力  $F_2$ ，大小相等，方向相反，且作用在一条直线上。

库仑定律是法国物理学家库仑于 1785 年通过扭秤实验的结果分析所得。近代许多精确的实验已经证明，静电力的平方反比关系其偏差不大于  $(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ ，而且随着实验精度的提高，这种偏差越来越小。从适用范围来说，大量实验结果表明，库仑定律在 1 厘米  $\sim$   $10^{-9}$  厘米的范围内精确成立，在更小的线度上 ( $10^{-9}$  厘米  $\sim$   $10^{-16}$  厘米)，用量子理论处理，也与实验相符。

对于一个电荷系统，每对点电荷间的作用力都服从库仑定律，而任一点电荷所受到的力等于所有其它点电荷单独作用于该点电荷的库仑力的矢量和，这一结论称为叠加原理，叠加原理与库仑定律相结合构成了整个静电学的基础。

#### 库仑扭秤图

**库仑扭秤 (Coulomb torsion balance)** 测量点电荷间相互作用力的仪器。库仑最早用它来研究分析总结出库仑定律，故名。其结构如图所示。扭秤的主要部分是一根金属丝，其下端悬挂着一根玻璃秤杆，杆的一端有一金属小球 A，另一端有一平衡体 B，在离 A 球旁某一距离放置一个与它同样的金属球 C。实验时，先使 A、C 两小球带有同种电荷，这时秤杆因小球 A 受到库仑力作用而偏转，扭秤悬丝被扭转而产生反抗力矩，并试图使小球 A 回到原位。当库仑力在小球 A 上产生的力矩与悬丝的扭转力矩相等时，扭秤便处于平衡状态。若已知悬丝的扭转力矩与扭角的定量关系，并测出秤杆的长度，就可以求出带电小球 A 和 C 在这一距离上的相互作用力。

库仑扭秤实验在电学发展史上具有重要意义，它是人们对电现象的研究从定性阶段进入定量阶段的转折点。

**夸克 (quark)** 参见强子结构。

**夸克模型 (quark model)** 参见强子结构。

**夸克囚禁 (quark confinement)** 对于迄今尚未从实验上发现自由夸克的一种解释。1964 年夸克模型建立以来，粒子物理学的理论和实验的成功使人们普遍相信，强子（如质子、中子、介子等）是由更基本的组分——夸克构成的，夸克是比强子更深一个层次上的粒子。但是迄今的所有实验尚未发现带有分数电荷的自由夸克。对此，物理学家常常采用如下两种解释。一种解释认为，夸克的质量很大，目前加速器实验的能量还不足以将它们从强子中分离出来。另一种目前或许更为普遍的解释是，夸克由于通过胶子传递的强相互作用的特点而被囚禁在强子内部，不可能以自由状态存在。

夸克带有色或色荷，夸克间的强相互作用是通过传递胶子产生的。但胶子也带有色荷，所以强作用也就是色荷之间的相互作用。这种强相互作用

用理论称为“量子色动力学”。根据这一理论，自然界中可以自由存在的粒子应是“无色的”或“白色的”。因此强子是白色的，即构成强子的所有组分夸克的色荷总和应等于0。例如构成 $\pi^+$ 介子的正反夸克(u夸克和d夸克)应带有相反的色，如果u夸克带有红色，d夸克应带有反红色。与电场的力线相类似，夸克的色场也可用假想的力线描述，两个带有相反色荷的夸克之间有力线相连。但是这种胶子场力线不像两种相反电荷之间的电力线那样分散在整个空间，而是集中在两个色荷的连线上而形成一根弦，这是因为胶子本身带有色荷，它们之间存在相互吸引作用的缘故。胶子场力线带有正比于其长度的能量，当两个夸克间的距离增加时，这种弦所带有的能量也随之无限增加。在此过程中，这种胶子弦或许有可能断裂而产生一对相反色荷的夸克对。因此，无论怎样都无法使这种带有正反色荷的夸克对分开到大的距离而形成自由夸克。这就是色禁闭的通俗图像。

**昆特实验 (Kundt experiment)** 用来测定声音在空气或其他气体中传播速度的一种实验方法。由德国物理学家昆特于1866年设计，故名。该实验用一根长1.5米、直径3~4厘米的玻璃管，管内撒以很轻的粉末，管两端各塞一个软木塞，在一个塞中穿一根细的黄铜棒。固定棒的中心，并用涂有松脂的柔软皮革对棒作纵向摩擦，使铜棒发生纵向振动，则棒发出很强的声音。此时，玻璃管内气体形成驻波，在波腹处粉末明显地聚集在一起（见附图）。测出杆的纵向振动频率 $\nu$ 和两相邻波腹的平均距离 $d$ ，根据公式 $v=2\nu d$ ，即可算出空气中的声速 $v$ 。玻璃管内充以其他气体，就可测定声音在该气体中的传播速度。

昆特实验

**拉格朗日** (Joseph Louis Lagrange 1736 ~ 1813) 意大利数学家、物理学家、天文学家。生于都灵。青年时期曾在都灵炮兵学校学习，未毕业 19 岁时便在该校当了几何学教师。由于数学和物理学上的一系列成就，1759 年他 23 岁时就被选为柏林科学院院士。1766 年到柏林科学院工作，1776 年接替欧拉任柏林科学院院长的职务。1787 年离柏林到巴黎，先后任巴黎师范学校和巴黎工艺学校教授。

拉格朗日是 18 世纪后期出现的几位最负盛名的科学家之一，他在数学、物理学和天文学等方面都有卓越的贡献。在物理学上的主要贡献是在力学方面，最为突出的是在其名著《分析力学》(共 20 卷)中，通过总结历史上力学的各种基本原理，发展达朗贝尔、欧拉等人的研究成果，引入势、等势面、广义坐标等概念，进一步把数学分析应用于质点和刚体力学中，建立了拉格朗日方程，创立了分析力学的基础，为把力学理论推广应用到物理学其他领域开辟了道路。他还和拉普拉斯共同研究了牛顿的太阳系学说，解决了三体在万有引力作用下的复杂运动问题。他对振动问题的研究，奠定了现代振动理论的基础。提出了描述流体运动的拉格朗日方法，即把研究的流体看作是连续介质，研究某一流体质点在各个不同时刻的位置、速度、加速度。该方法和通常力学里所采用的方法相同，但对于流体运动的研究具有十分简捷而方便的特点。

**拉普拉斯决定论** (Laplace determinism) 机械还原论的一种观点，由法国数学家、力学家拉普拉斯提出。他认为对于任何一个封闭的质点系，只要知道它在某一时刻的所有质点的坐标和动量，根据牛顿力学就能够精确地知道质点系所有质点的过去和今后的任何时刻的坐标和动量。这种观点虽有其合理的内核，但把牛顿力学的适用范围作了不恰当的推广，最终导致错误的结论。这种观点实际上主张自然界的一切运动形式，无论是机械运动还是热、光、电磁、化学运动，以至生命、社会运动，最终都可用物质的最小单元——原子的机械运动来表述，掌握了原子系统的力学状态，就能说明这个系统的一切性质，因而错误地把高级运动形式归结为低级运动形式，用低级运动形式的规律去决定高级运动形式的规律。此外，这种观点在处理分子、量子、微观粒子运动时也遇到了极大的困难。

**喇叭** (loudspeaker) 扬声器的俗称。

**莱顿瓶** (Leyden jar) 以玻璃瓶为电介质的一种存储静电的器件。1746 年由荷兰莱顿城的莱顿大学物理学家穆申布鲁克发明，故名。莱顿瓶的最早形式是一只盛有一部分水的玻璃瓶，瓶口用软木塞封住，用导线或钉子穿过木塞并插入水中。为了充电，把导线的外端与产生静电的摩擦器件相接触。断开时，可用手触导线而受到震动来表明电的存在。

**莱顿瓶**

莱顿瓶通常是一只里面和外面都贴上金属箔的玻璃瓶，如图所示。把外面贴的箔片与大地连接，另有一金属棒从瓶塞插入，上端附一金属球，下端附一金属链，使之与内层金属箔接触，用以使它带电或放电。这种装置的电容量很小，但所能承受的电压却很高：为当时的静电实验所不可缺少的装置，是目前广泛应用于电气和电子装置中的电容器的原型。现在，它常应用于课堂演示。

朗之万 (Paul Langevin 1872 ~ 1946) 法国物理学家。生于巴黎。1897 年以第一名成绩毕业于巴黎高等师范学院，后到英国剑桥大学，在卡文迪什实验室跟随汤姆孙作研究工作。回国后与居里共事多年。1902 年在巴黎大学获博士学位。1909 年任法兰西学院物理学教授。1903 年兼任巴黎理化学校教授，1925 年起直至晚年任该校校长。1918 年当选为英国皇家学会会员，1934 年当选为法兰西科学院院士。他还是中国物理学会第一名名誉会员。

主要贡献是对磁学和超声的研究。1905 年，提出关于磁性的理论，证明抗磁性的普遍性和它与塞曼效应的联系，并从理论上论证了抗磁性温度无关。根据磁矩在磁场中的取向作用，对顺磁性也作了理论分析，提出了朗之万理论和朗之万函数，奠定了顺磁理论的基础。1911 年，从索末菲关于力学作用量子化的思想出发，提出这种量子化导致磁矩的量子——磁子，并计算了磁子的值。第一次世界大战期间，应用超声波原理，研制成水下信号发射和超声回声探测器，以发现潜水艇，这一方法很快在军事和其他科学研究中得到广泛应用。

朗之万还从事电动力学、电子论和量子论方面的研究，积极参加发展狭义相对论的工作。1903 年，他研究了电离气体的性质，提出在高压和低压下放电的复合理论。1904 年，在研究运动电荷的电磁场辐射时，独立于爱因斯坦而得到了质量与能量的关系式。1905 年，在看到爱因斯坦的文章后，对相对论立即表示了热烈的兴趣，并和爱因斯坦结下真挚的友情。1913 年，他最先得出质量亏损概念，并对核能的释放进行了一定的推测。当德布罗意提出物质波的理论时，他率先表示支持并及时转告了爱因斯坦，这对薛定谔波动力学的创立起了促进作用。

**雷达 (radar)** 利用无线电波对目标进行探测和定位的无线电设备。“雷达”一词是英文 Radar (Radio Detection And Ranging) 的音译。用无线电波传输中的反射或再辐射的能量探测飞机或其它物体的设想，早在第二次世界大战前几十年在英、美、法、荷、意、日、俄等国已经出现。1935 年英国人威尔金斯首先成功地用 49 米 BBC 发射机探测到飞行中的轰炸机。一部最简单的脉冲雷达由发射机、接收机和天线等组成。发射机产生的雷达脉冲信号，经过收发开关由天线定向辐射到空间，天线转换开关 (收发开关) 使单个天线可兼作发射和接收之用。从目标或其它反射物反射的回波被天线收集，并由接收机检测，然后送到指示器显示，如图所示。通过回波能量的检测，可发现目标的存在；通过回波信号同发射信号的比较，可获得有关目标的信息 (诸如目标的距离、方位和高度、速度大小和形状等)。

第二次世界大战以来，雷达技术发展十分迅速，目前世界上主要国家使用和研制的不同型号的雷达约有 1500 种。雷达的探测范围不断扩大，远至几十万公里，

#### 雷达工作原理方框图

近至几十米；其工作波段越来越宽，低至几个  $\text{MHz}$ ，高达  $3 \times 10^9 \text{MHz}$ ，进入可见光频率范围，60 年代出现激光雷达就是一例。

雷达的军事应用主要有：搜索和引导，跟踪测量和火控，敌我识别，战斗机下视、下射和测绘，分辨导弹弹头的真假以及飞机的机型和架数。雷达的民用和科研应用主要有：机场和海港的管理，气象预报，天文研究，



导航，监视和控制汽车的速度，地图测绘和探矿等。随着雷达应用范围的扩展，战术要求的提高，以及计算机技术的发展，雷达技术在探测距离、目标空量、测量精度，抗干扰性能，数据处理能力、机动性和可靠性等方面正在不断地发展。

**雷电 (lightning and thunder) 闪电与响雷。**它是大气中瞬间的、光亮的放电现象以及由此产生的声波。

闪电通常是由积雨云 (或称雷雨云) 产生的。这类云容易在大气状态不稳定的条件下由冷、热空气上、下对流运动时形成。在这种云内有许多因素导致电荷的产生与分离，最后形成的电荷分布为：云的上部带正电，中部和底部带负电。当云内的起电作用达到相邻两电荷中心 (云与云或云与地) 之间的电场强度为击穿值时，就产生了称为闪电的大型火花。当空气内存在水滴时，击穿的场强值约为 10,000 伏/厘米。

对于雷电现象，中国早在秦、汉时期就有记载，但首先揭示闪电性质的是美国科学家富兰克林。他于 1752 年 7 月进行了著名的风筝探测雷电的实验，观察到通过风筝引线由积雨云产生的火花，从而证实自然闪电和摩擦产生的电的本质的一致性。

闪电按产生的部位来分类有云内放电、云际放电和云地放电。前两种称为云闪，第三种称为地闪。人眼所看到的地闪似乎是一次由云中曲折行进到地面的瞬间闪光，实际上它是由多次相继放电所组成，这些放电彼此间隔约为百分之几秒，并且通过同一通道。闪电过程中的每一次放电称为闪击，一次闪电所含的闪击数可多达三四十次。闪击含有先导和回击两个过程。其中先导是为闪电放电建立电离通道的准备过程，它又分为梯级先导和直窜先导两种，梯级先导是像阶梯一样逐级伸向地面的暗淡光柱，它的平均速率为  $10^6$  米/秒数量级，当先导离地面 5 米 ~ 50 米时，地面上某点将产生沿此通道向上行进的回击过程，回击的发光度要比先导强得多，平均在约 6 微秒左右的时间内，回击的电流达极大值，通常超过 30 000 安，有时高达 200000 安。人们见到的闪光即为回击，经百分之几秒后，有第二次回击，自第二次回击开始的先导都为直窜先导，因为此时已无梯级，先导由云到地直窜而下，其平均速率比梯级先导约高一个数量级，整个闪电约持续 0.2 秒，由云中向地面输送的电荷量约为数十库仑。用流光理论可以较好地解释闪电过程。

闪电所产生的电场有静电场、感应场和辐射场。在放电近处，静电场作用大；离放电很远处，辐射场作用大。闪电时的强电流会产生磁场，在接近闪电区的铁或含铁石甚至会成为永久带磁。

闪电的形状有多种，一般有线状、带状、火箭状、片状、球状等，最常见的是线状闪电，其特征是细亮的发光光柱。

闪电也是一个辐射源。通过对从紫外到红外波段的闪电发射光谱的研究发现：在 0.36 微米 ~ 0.62 微米波长范围内有电离氦的分立发射谱线，0.6563 微米处是由原子氢引起的强光谱线  $H_{\alpha}$  线，中性氧、氮的明亮光谱线及少数中性氩的微弱光谱线位于红外区，电离氧和氮的分立发射谱线、氰 (CN) 和分子氮的发射带位于紫外区。被加热的空气作为热辐射源形成微弱的连续光谱背景。

闪电光谱的定量分析表明，闪电通道处的空气温度在几微秒的时间内最高可达 25 000 ~ 30 000 ，气压可达 10 个大气压，电子密度为  $10^{17}$  ~

$10^{18}$  每立方厘米，几乎达到完全电离。其间，闪道中的空气因突然受热而迅速膨胀并产生冲击波，经传播一定的距离后冲击波退化为声波，即为雷声。由于放电路径的斜向与弯曲，产生闪电的部位与观察者的距离是不等的，所以距离观察者最近部分的声音比来自其它部分的声音先被听到，又加上几个放电常常接连发生，声波的叠加造成了隆隆响声的连续声波。测定闪电与响雷之间的时间差可以估算闪电与观察者之间的距离，用现代化的设备观察雷，可发现雷的频率分布范围从低于 10 赫到 150 赫。

虽然大部分闪电是由自然引起的，但偶然也能被很高的建筑物、电视天线或烟囱所触发，穿入雷暴中的飞机和火箭也能触发闪电，这时闪电从金属飞行器的某一部分进入，然后从另一部分出来。

闪电的突然高温、高压及强电流使得它具有很大的危害性，因为燃烧、电击都直接具有杀伤力。据统计，在世界范围内，每年有数以千计的人畜被闪电击伤、击毙。大部分的森林、草地及人工建筑物的起火也归咎于闪电。由于闪电而产生的强电流还能破坏电气设备。然而闪电在大自然的形成及维持生态平衡等方面却起了重要作用，它形成了大气中的含氮化合物，这些物质既对植物生长有利，又为地球上的生命起源作出了贡献。闪电起火可以维持森林地区和草地间的平稳，闪电也能促使雨的形成。

雷诺数 (Reynolds number) 表征粘滞流体特征的一个重要的无量纲参数。由英国物理学家雷诺于 1882 年发现，故名。常用符号  $R_e$  或  $R$  表示，其公式为  $R_e = \frac{\rho v L}{\eta}$ 。其中  $\rho$  为流体密度， $v$  为流体速度， $L$  为物体的

特征长度（例如流管的直径、渠道的深度、机翼的厚度等）， $\eta$  为流体的粘滞系数。它表示流体的惯性力与粘滞力之比。当粘滞流体相对于几何形状相似的物体流动时，只要其比值 ( $vL/\eta$ ) 相同，它们的流线具有相同的分布，因而流动情形相似。由于这一性质，可用各种模型代替实物来研究飞机、轮船在空气或水中的运动性能，只要使模型试验与真实物体的运动具有相同的雷诺数，其结果与实际的飞机或轮船相符。

雷诺数又是流体层流稳定性的一个判据。当雷诺数增大到某一临界值时，流体的流动就从层流变为湍流。例如管流中，雷诺数小于 2000 的流动为层流；雷诺数大于 4000 时为湍流。

类比 (analogy) 用已知的现象和过程（包括物理学以外的现象和过程）同未知的物理现象和过程相比较，找出它们的某些共同点、相似点或共同属性，然后以此为根据推测未知的物理现象和过程也可能具有已知的现象和过程的其它属性或规律的间接推理方式。它是将一种特殊对象的知识推到另一特殊对象的思维方法，是从个别的结论推出个别的结论。它的主观因素是人们总是习惯于用已知的图景去设想未知的图景。类比是以比较作前导的，得出的结论仅仅是一种推测。如果对象的相同点较多，又是本质的东西，或然性就小一些。

在物理学研究中，常见的类比形式有以下几种。在物理现象之间进行类比。例如开普勒弄清光的强度与光源的距离的平方成反比之后，就与太阳和行星之间的作用力作类比，推测该力也是与距离平方成反比。惠更斯用光、声类比说明光传播的物理机制是波。在现代物理研究中，物理现象之间的类比也是屡见不鲜的。例如汤川秀树研究高能粒子相互转化的机制时，将原子核内中子和质子的作用同原子内原子核和电子的作用相类

比。物理现象同其他事物的类比。无论经典物理还是现代物理都存在这种类比。原子结构的研究就用其他事物作类比，如汤姆孙把原子结构比作果子面包；卢瑟福在实验基础上，通过类比提出了原子结构的太阳系模型。通过这种类比，往往可以更形象更直观地揭示研究对象的特性和规律，使之更容易为人们理解。数学形式的类比。例如爱因斯坦提出光量子论之后，德布罗意提出物质波的预言直接依赖于数学形式的类比。数学形式的类比是在物理现象进行抽象的基础上，更深刻地概括了物理现象的特性和规律。物理学的规律一般都可以用数学关系式表示出来，数学形式相同的物理现象往往遵循一种更深刻、更本质的规律。在具体的研究过程中，由两对象有若干属性相似且两者的数学形式相同，可推知它们其它属性相似；反之，两对象的主要属性相同，它们的数学形式相同。

类比方法的过程和基础都决定了它的结论的或然性，因此在任何情况下通过类比得出的结论，都必须由实践检验，证明其正确性。在物理教学中，常用类比推理阐述知识，在类比时，既要注意相类比的事物间的相似处，也要注意事物间的差异，因为差异可以限制类比的结论。

类星体 (quasar) 又称类星源。形状如恒星而光谱有巨大红移的一类天体。它们亮度极高，相距又极遥远。其大小不足 1 光年，而亮度比直径约 10 万光年的巨星系还大 1000 倍。巨大的发光本领使它在 100 亿光年之外仍能被观测到。1960 年，美国天文学家桑德奇发现了第一个类星体 3C48，1963 年，美籍荷兰天文学家施米特又证认出类星体 3C273 的光谱是正常光谱红移后的结果，红移值为 0.158。天文学家估计天空中的类星体有成千上万个。类星体的共同特征是：在照相底片上具有类似恒星的像；它们的光学像是恒星状的点，角直径小于 1 弧秒；具有很大的红移量。已测到的类星体中红移量最大的为 3.53，紫外线经过红移变成绿光；最小的红移量为 0.15。类星体虽是在射电源中发现的，但只有部分是射电源，另一部分类星体并不辐射无线电波，有些类星体（如 3C273 等）还能发射 X 射线。从光谱看，类星体有明亮的发射谱线，有些还有吸收谱线。类星体由体积很小、质量很大的核和位于核外的广延气晕组成。中心体辐射出能量，激发气晕中的气体，谱线产生于气晕的不同部位的辐射。导致中心体发出频谱很宽的辐射机制是同步加速辐射。

关于类星体的巨大红移有几种理论解释。一种认为是宇宙学红移，即认为红移产生于类星体的退行，反映了宇宙的膨胀；另一种认为是大质量天体的巨大引力场造成的引力红移；还有的认为是多普勒红移，至今尚无定论。若红移是宇宙学的红移，则类星体每秒释放的能量高达  $10^{39} \sim 10^{40}$  焦耳，按类星体发光期为  $10^6 \sim 10^7$  年计，一个类星体释出的总能量高达  $10^{49} \sim 10^{55}$  焦耳。至今尚无令人满意的理论模型能说明这么巨大能量的来源，类星体的惊人能量目前仍是个谜。

棱镜 (prism) 有两个以上平面表面的透明媒质多面体。它可以是玻璃或晶体，也可以是在一定形状的容器中放入某种透明液体。按用途分类，有改变光线行进方向的偏向棱镜、将多种波长的复合光分离为光谱的色散棱镜、产生偏振光的起偏棱镜等。按形状分类，有三棱镜和多角棱镜等。按使用性质分，有反射棱镜和折射棱镜等。反射面和折射面统称为工作面，相邻两工作面的交线为棱，垂直于棱的截面为棱镜主截面。反射光线或折射光线与原入射光线方向的夹角，称为偏向角。光线在等腰三棱镜

主截面内折射时，偏向角随入射角而改变。当入射角取某值时，偏向角为最小，称为最小偏向角。棱镜的最小偏向角与棱镜的顶角和折射率有关，实验上常利用最小偏向角的测量来求出棱镜材料的折射率。材料的折射率与光的波长有关。通常棱镜具有正常色散，即折射率随波长的减小而增大，故白光通过三棱镜后形成的光谱中，紫光偏折最大，红光偏折最小。利用棱镜的这种分光作用可制成研究光谱的重要仪器，即棱镜光谱仪。顶角很小的三棱镜称为光楔。当入射光垂直或近似垂直射入光楔时，偏向角  $\delta$  与顶角  $A$  和折射率  $n$  的关系为： $\delta = (n-1)A$ 。光楔也称为光劈或薄棱镜，由于  $A$  很小，故  $\delta$  也很小。在光学仪器中，光楔常作为一种补偿装置，使光线通过它以后稍微改变其方向。

**楞次** (Heinrich Friedrich Emile Lenz 1804 ~ 1865) 俄国物理学家。生于爱沙尼亚的多尔帕特。中学学习成绩优异，16岁进入多尔帕特大学。19岁时被推荐作为地球物理观测员参加由俄国主办的第二次全球性科学航行(1823 ~ 1826)。1836年 ~ 1865年任圣彼得堡大学教授。他是彼得堡科学院院士。

主要贡献在电磁学方面。1831年，法拉第发现电磁感应现象后，楞次对电磁感应现象进行了深入的研究。1833年他发现感生电动势阻止产生这一感应的磁铁或线圈的运动，此结论于1839年发表，后称为楞次定律，该定律表明电磁现象也同样遵守能量守恒和转化定律。1842年他与焦耳分别发现了电流通过导体时的热效应规律，即电流在一定时间内通过导体时所放出的热量，与导体电阻成正比，与通过导体的电流的平方成正比，被称为焦耳—楞次定律。1844年他导出包含电动势和电阻的归一并联电路中电流分布的定律。此外在电化学、地球物理学等领域的研究中，他也取得了一系列重要成果。著有《物理学手册》(1864)。

**楞次定律** (Lenz law) 确定感应电流(或感应电动势)方向的定律。由俄国物理学家楞次于1833年提出。该定律指出，闭合回路中感应电流的方向，总是使它在回路面积上产生的磁通量能够补偿或反抗引起感应电流的原磁通量的变化。若从某侧穿过回路面积的原磁通量增大，则感应电流所产生的磁场对于该侧的磁通量必为负值；反之，若从某侧穿过回路面积的原磁通量减小，则感应电流所产生的磁场对于该侧的磁通量必为正值。因此，也常把楞次定律简单地叙述为：感应电流总是采取反抗回路中原来磁通量变化的方向。

在产生感应电流的各种情形中，若设想感应电流采取违反楞次定律的方向，则将出现第一类永动机的情形。这是违反能量守恒定律的。所以，楞次定律实际上也是能量守恒定律在电磁感应现象中的一种表现形式。

**冷反射镜** (cold mirror) 只反射可见光而让红外热辐射透过的多层膜系镜片。电影放映机中常用它来防止胶片过热燃烧。相应地有仅反射红外辐射的反射镜，称为反热滤光镜或反热镜。

**离子光谱** (ionic spectrum) 离子的发射光谱。“类氢光谱”，即类氢离子的光谱，是最简单的离子光谱。类氢离子是指原子核外只有一个电子的离子，但原子核带有  $Z > 1$  的正电荷。例如氦(He)、锂(Li)、铍(Be)等中性原子的核外分别有2、3、4个电子，所以一次电离的氦离子(He<sup>+</sup>)，二次电离的锂离子(Li<sup>2+</sup>)，三次电离的铍离子(Be<sup>3+</sup>)都是类氢离子。类氢离子的光谱特性与氢光谱类似。一次电离氦离子光谱在可

见光区的一组线系称为“毕克林系”，是天文学家毕克林于 1879 年观察船座星的光谱中首次发现的。此外，当重原子受到带电粒子或强度（如激光）照射时，其核外电子可能被大量剥离而形成“高离化态原子”。高离化态原子光谱的特征主要决定于电离后余留在核外的电子的行为。在极高温度的天体上，在核聚变或者在强激光与物质相互作用等过程中，都会产生高离化态原子。因此对离子光谱的研究是很有意义的。

离子注入（ionic implanted）是近年来发展起来的制造浅结器件的一个重要掺杂技术。一束被加速到一定能量的杂质离子在超高真空中投射到半导体基片上，这些能量高达几 keV 到几 MeV 的离子将会穿透基片表面而深入到体内，并最终停止在基片的某一深度上以达到掺杂的目的。这种穿透深度称为射程，其值可以控制在几纳米到一微米左右。

离子注入制作 PN 结具有低温、浅结、可控等优点。但在离子注入过程中，高能离子与半导体晶体原子的碰撞会引起晶格完整性的破坏，造成晶格损伤，使器件性能变坏。为此必须采用热退火或激光退火（即用加热或激光辐照方法，使晶体局部熔融后再结晶，以恢复晶格的完整性）来消除离子注入引起的损伤。

离子注入技术目前已被广泛应用于微波集成电路和大规模集成电路的制造生产中。

里德伯（Johannes Robert Rydberg 1854 ~ 1919）瑞典物理学家。生于哈尔姆斯塔德。1879 年毕业于隆德大学获数学博士学位，并留校任教。1897 年起任教授。1919 年当选为瑞典科学院院士。

主要贡献在光谱学和原子物理学方面。当时人们已经发现，原子光谱的谱线分布通常是组成一定的线系，如何找出其规律性，是摆在物理学家面前极为迫切的任务。1890 年，里德伯最早采用波数代替波长，通过引入一个普适常数（被称为里德伯常数），确定了原子光谱的不同线系的关系，给出了描述任意谱线的公式，从而深刻揭示了原子光谱的谱线分布的规律性。他还认为各种元素的光谱项都与氢光谱项具有相似的形式，发现了碱金属有三个不同的线系，分别称为主线系、第一辅线系和第二辅线系。主线系的第一条线一般最能表征该元素的光谱。里德伯的上述发现，导致里兹于 1908 年提出了任一条谱线的波数都可以表示为表征该元素的许多光谱项和两项之差的原则，被称为里德伯—里兹组合原则。里德伯的成就为原子物理学的发展奠定了重要基础。

理论物理学（theoretical physics）通常指高等学校中为物理学专业高年级学生开设的理论力学、热力学和统计物理学、电动力学以及量子力学等课程的总称。从各类学科的普遍规律出发，较系统而深入地介绍各类学科的基本内容及其应用。这类课程常采用演绎法，并使用较多数学。

理想共轴球面系统（perfect coaxial spherical system）由多个反射或折射球面组成且能使任何单心光束保持单心性的共轴光学系统。由物点的全体组成的空间称为物方或物空间，像点的全体则组成像方或像空间。物和像都有虚实之分，因此不能简单地认为光学系统的前面（在图上是左面）为物方，后面（在图上是右面）为像方。在某一问题中，与入射光束相联系的为物方，与出射光束相联系的为像方。对于理想光学系统，物方和像方的点一一对应，称为共轭点。根据光路可逆原理，若把物点移到它的像点位置上，则新的像点必位于原来的物点上。同理，理想光学系

统要求物空间内每一条直线，在像空间内有一条直线像作为共轭线与它对应；物空间内任一平面，在像空间内有一平面像作为共轭面与它对应。理想共轴系统的特点还有：光轴上任何一点的共轭点必然在光轴上；垂直于光轴的平面的共轭面必然与光轴垂直；与光轴垂直的同一平面内横向放大率相同；在垂直于光轴的不同平面内，只要有两个平面内的横向放大率相等，则横向放大率处处相等。

基点和基面理想共轴球面系统物像之间共轭关系由三组点和面决定：即焦点和焦面；主点和主面；节点和节面。无穷远物平面的共轭面称为像方焦面，它与光轴的交点称为像方焦点 ( $F'$ )。与无穷远像平面共轭的面称为物方焦面，它与光轴的交点称为物方焦点 ( $F$ )。横向放大率为+1 的一对共轭面称为主面；属于物空间的主面称为物方主面，属于像空间的称为像方主面。它们与光轴的交点，分别称为物方主点 ( $H$ ) 和像方主点 ( $H'$ )。光轴上角放大率为+1 的一对共轭点称为节点；属于物空间的节点称为物方节点 ( $K$ )，属于像空间的称为像方节点 ( $K'$ )。过节点垂直于光轴的平面分别称为物方节面和像方节面。对于任何复杂的理想共轴光学系统，只要知道这些基点和基面的位置，在求像的位置等时可不必考虑系统的具体结构。

单一光学元件也有基点和基面，如球面反射和球面折射元件，此时球面的顶点即为主点，球面的曲率中心即为节点。在物、像方折射率相等时，薄透镜的光心既是主点，又是节点。至于焦点，各种情况都有公式可以确定其位置。如果知道两个单一光学元件的基点基面，根据特定的公式可以求出其组合光学系统的基点基面。这样，原则上任何复杂的理想光学系统的基点基面都可以求出。

作图法给定光学系统的焦点  $F$  和  $F'$ ，主点  $H$  和  $H'$ ，节点  $K$  和  $K'$ ；过这些基点且垂直光轴的平面为各相应的基面。如果物点  $P$  位于光轴上，可利用物方焦面作图求出像点  $P'$ ，见图 1。过物点  $P$  作任意线  $PM$ ，交物方焦面于  $B$ 。入射线  $PM$  的共轭线必从像方主面  $M'$  点出发，而  $M'H' = MH$ 。作辅助线  $BK'$ ，它的共轭线必过  $K$  且与  $BK'$  平行。过  $M'$  作平行于  $NK$  的线，交光轴于  $P'$  点，即为像点。

图 1 利用物方焦平面作图

图 2 利用像方焦面作图

也可利用像方焦面作图求像点  $P'$ ，见图 2。作任意光线  $PM$ ，它的共轭线出自  $M'$  点，且  $M'H' = MH$ 。过物方节点  $K$  作平行于  $PM$  的线  $NK$ 。过像方节点  $K'$  作平行于  $NK$  的线  $N'K'$ ，交像方焦面于  $B'$ 。连  $M'B'$  交主轴于  $P'$ ，即为像点。

图 3 主轴外  $P$  点作图

如果物点  $Q$  位于主轴外，可利用基本作图法求像点  $Q'$ ，见图 3。从物点  $Q$  作平行于主轴的线  $QM$ 。它的共轭线  $M'F'$  必通过像方焦点  $F'$ ，且  $M'H' = MH$ 。过物点  $Q$  作光线经过物方节点  $K$ ， $QK$  的共轭线  $K'Q'$  必经过像方节点  $K'$ ，且与  $QK$  平行。 $H'Q'$  与  $M'F'$  的延长线的交点即为像点  $Q'$ 。也可以另选第三条线，即过物点  $Q$  和物方焦点  $F$  的光线交物方主平面于  $B$  点。它的共轭线  $B'Q'$  必平行于主轴，且  $B'H' = BH$ 。 $B'Q'$  与  $M'F'$  和  $K'Q'$  必交于同一点  $Q'$ 。当然，实际上仅需作任意两条相交即可。

理想化方法 (idealized method) 舍弃次要非本质因素，突出主要

因素，对现实进行高度抽象和概括的处理方法。各种形式的物理运动处于广泛的联系之中，物理研究对象受很多因素的影响，在一定条件下可以将其他因素撇开，抓住它的主要因素。理想化方法来源于人们对物理运动的实践，是以物理真理的相对性和人们对物理运动认识的阶段性为基础的。它的具体应用，决定于研究对象的实际情况，受特定的研究范围和条件的制约。例如，物体处在永恒的运动中，但在一定的条件下又可以把它看作“静止的”；又如在一项研究人造卫星绕地球运转的情况时，就不必考虑二体运动问题。在具体研究中，考虑什么因素，舍去什么因素，是随研究对象的实际情况、研究范围的改变而改变的。例如大炮发射炮弹，如果只研究炮弹运动的轨迹，可以把炮弹当作质点来处理；如果要使炮弹获得最有利于前进的转动性质，就应把它看作一个刚体来处理；如果要研究炮弹如何击穿钢板，钢板和炮弹的弹性和塑性都必须加以考虑。

物理学研究中，理想化方法被广泛应用。它的作用主要反映在以下几方面。第一，理想化模型：在物理学研究中，有些研究对象的范围和条件很接近理想状态，将研究对象理想化，建立理想化模型，从而使整个现象和过程更加纯粹、简单，由此总结出的特性和规律与客观实际较为接近，而误差在具体应用中可以忽略。质点、刚体、理想气体、理想流体、点电荷等是理想化模型的典型例子。第二，理想化过程：对一些比较复杂的物理过程，存在许多因素和联系。若都加以考虑就会难以甚至无法对问题进行全面综合的研究。为了深入考察研究对象的内部过程，就要让研究对象主要的、基本的过程充分暴露出来，建立理想化物理过程。这样做对于深刻地认识所研究的对象往往是十分重要的，因为它更接近纯粹的原型。例如卡诺为了解决蒸汽机最高效率问题，设想了服从理想的卡诺循环的蒸汽机，它与真实蒸汽机有明显差异，在现实中根本不存在。但通过对理想化蒸汽机的研究，卡诺深刻地概括抽象出真实热机的本质特性，简单而明确地阐明了热机效率的极值问题。此外，匀速直线运动、自由落体运动、简谐振动等都是理想化物理过程的典型例子。第三，理想实验：在物理学研究中，运用理想化方法在头脑中进行的假想性实验。实质上是使用理想化方法进行的逻辑推理过程，例如惯性定律就是伽利略通过理想实验的方法揭示的。

日常的具体的事物虽然直观，但是各种现象和过程往往掩盖着事物的本质。用理想化方法进行研究所揭示的特性和规律，只能以抽象的形式出现，虽然它离具体的事物远了，但离真理近了。例如惯性定律就是从具体的事实通过理想化方法抽象出来的，它离开的只是具体的事实，但深刻揭示了事物的本质属性。量子力学的奠基人普朗克说：“物理世界观之愈益远离感性世界无非就是与现实世界愈益接近。”

**理想流体** (ideal fluid) 参见流体。

**理想气体** (ideal gas) 对实际气体性质加以简化而得出的一种假想的气体模型。

在许多气体的早期实验中，人们发现实际气体并不严格遵循玻意耳定律等实验定律。气体的压强越低，实验结果与上述定律的偏离程度越小。由此可以合理地推论出，在气体压强趋于零的极限情况下，玻意耳定律才完全正确地反映了气体的状态变化。这种严格遵循玻意耳定律的气体就称为理想气体。

除了以上的实验定律外，在热学发展史上还有一些互相独立的实验定律，它们也只有在压强趋于零的情形下才是正确的。其中一个就是有名的焦耳实验定律。焦耳在 1845 年对气体的自由膨胀过程进行了研究，并从其温度随体积的变化关系中得出了如下结论（焦耳定律）：气体的内能仅仅是温度的函数，而与体积无关。但是后来又进一步发现，这个论断并不严格正确。1852 年焦耳和汤姆孙进一步作了节流膨胀实验，证实了实际气体的内能只是在压强趋于零的极限情况下才严格遵循焦耳定律。另一个实验定律是 1811 年提出的阿伏伽德罗定律，该定律可表述为“在相同温度和压强下，相等体积的各种气体所包含的质量与它们各自的分子量成正比”，或者表述为“在相同温度和压强下，相同体积的气体所包含的摩尔数相等”。后来发现这个定律对于实际气体也只是近似成立，或者说它只是实际气体在压强趋于零时所满足的一个定律。

由于这些实验定律是互相独立的，因此可以说理想气体是严格遵循玻意耳定律、焦耳定律和阿伏伽德罗定律的气体。实际气体，特别是那些不易液化的气体（如氢气、氧气和氮气等），在通常压强和温度下可以近似作为理想气体来处理。

从微观上看，理想气体是完全忽略分子本身体积大小、完全不计分子之间相互作用力的气体。与质点、刚体等力学模型一样，理想气体是热学中的一种有用的气体模型。

理想实验（idealized experiment）是一种假想实验或思想上的实验。它不同于具体实验，不是一种实践活动，只是人们在思想中塑造的一种理想过程，是逻辑推理的一种方法和形式。

理想实验是物理学研究中常用的方法。伽利略就是通过理想实验的方法，揭示了惯性定律的物理本质。在现代物理学中，也常运用理想实验。例如海森堡就提出过观察粒子轨迹的理想实验，并由此证明不能同时确定微观粒子的位置和速度。在物理学研究中，很多场合都需要作逻辑推理上的证明和反驳。使用理想化实验可以进行具体而形象的推理，从而使逻辑证明和逻辑反驳更有说服力。伽利略运用了理想化实验在逻辑上驳斥了亚里士多德关于重的物体较轻的物体更快坠落的观点以及爱因斯坦和玻尔通过理想实验对不确定关系的争论都是生动的例子。

在物理学发展史上，一些重大理论的产生，或者新旧理论交替时，理论思维往往以理想实验的方式起着重要的作用。爱因斯坦狭义相对论的基础和出发点——同时性的相对性，就是通过理想实验形象地加以说明的。围绕着相对论，爱因斯坦还提出过很多巧妙的理想实验。

理想实验一般很难立刻实施。随着实验手段和工具的提高，某些理想实验可以转化为具体的实验。例如量子概率波的单电子衍射实验，又如爱因斯坦狭义相对论中关于时间膨胀的结论，都已被真实实验所证实。也有一些理想实验无法实施，或者在遥远的将来也无法实施，例如关于惯性的理想实验。有时理想实验也可能导致错误的结论，例如伽利略从理想实验中得出了惯性运动必须是圆周运动的错误结论。

李政道（1926~）美籍华裔物理学家。生于上海。1942 年至 1945 年曾在国立浙江大学和西南联合大学物理系学习。尚未毕业获得中国政府的奖学金，于 1946 年赴美留学。在费米指导下于 1950 年获芝加哥大学哲学博士学位。1951 年至 1953 年受聘入普林斯顿大学高级研究院进行科学



研究。1956 年任哥伦比亚大学教授。1960 年重返普林斯顿高级研究院任教授。1963 年任哥伦比亚大学物理学讲座教授、费米物理学讲座教授、全校讲座教授。同时担任美国国家科学院院士，暨南大学、中国科学技术大学、复旦大学、清华大学等校名誉教授。

主要贡献是提出弱相互作用中宇称不守恒，获 1957 年诺贝尔物理学奖。早在西南联大时，与杨振宁合作共同提出了对宇称守恒定律的疑问。在美国普林斯顿大学高级研究院，二人相遇，又继续合作从事这一课题的研究。1956 年，提出了在弱相互作用中宇称不守恒的假说，并进一步提出了几种检验弱相互作用中宇称是否守恒的实验途径。这一假说于 1957 年被吴健雄的实验所证实。同年获诺贝尔物理学奖。李政道是到那时为止历史上第二个最年轻的诺贝尔奖获得者。

李政道对理论物理学作出了一系列贡献，取得突出的研究成果，主要包括基本粒子、核物理、统计力学、流体力学、天体物理等领域。1949 年与罗森布拉斯和杨振宁合作提出普适费米弱作用和中间玻色子的存在。1951 年提出水力学中二维空间没有湍流。1952 年合作研究了固体物理中极化子的构造，并提出了统计物理中关于相变的两个杨振宁—李政道定理和李政道—杨振宁单圆定理。1954 年提出了可精确求解的著名的量子场论模型（李政道模型）。1957 年合作提出了 CP 不守恒和时间不反演的可能性。同年与杨振宁合作提出了二分量中微子理论。60 年代合作研究了带电矢量介子电磁相互作用的不可重整化性。合作提出了李—璠恩伯定理，即研究解决了无静止质量的粒子所参与的过程中，红外发散可以全部抵消问题。提出了场代数理论。70 年代初期研究了 CP 自发破缺问题。又发现和研究了非拓扑性孤立子，并建立了强子结构的孤立子袋模型理论。70 年代后期至 80 年代研究了格点规范，并建立了离散力学的基础。李政道在促进中美科学技术交流方面做了大量出色的工作。发表研究论文与报告 200 多篇，并有《场论与粒子物理学》（上、下册，1980 年、1982 年）等专著多部。

**立体声（stereophony）** 使人感觉到声源分布在空间的声音。人的双耳不仅能判断音调的高低和响度的大小，还能辨别声源的方向和距离，因而听音有空间感觉。适当组合和安排传声器、放大系统和扬声器，就能产生立体声效果。宽银幕、全景电影和环幕电影，由于银幕宽度增大，如果单方向发音，跟画面的真实情景就不协调。为了使宽银幕电影的伴音听起来有立体感，要设法让传入耳朵的声音有明显的时间和响度差别。为此，录音时常在发出声音的人或物的前面几个不同的位置上放置几个话筒，这样录下的声音在时间和响度上就有差别；在电影院放映时，也在相应位置放同样数目的喇叭，分别把这些录音放出来，这样听到的声音就有立体感了。

常用的有双声道立体声、四声道立体声等。与单声道相比，立体声有如下优点：使各声源具有方位感和分布感；提高了声音的清晰度；增强了节目的临场感、层次感。

**粒子数反转（population inversion）** 高能态粒子数大于低能态粒子数的非热平衡状态。在热平衡状态下，粒子数按能态的分布遵循玻耳兹曼分布律：

$$\frac{N_2}{g_2} = \frac{N_1}{g_1} \exp[-(E_2 - E_1) / kT],$$

式中  $k$  为玻耳兹曼常数,  $N_2$ 、 $g_2$  和  $N_1$ 、 $g_1$  分别为高能态  $E_2$  和低能态  $E_1$  的粒子数和统计权重。由于  $E_2 >$

$E_1$ ,  $T > 0$ , 故  $\frac{N_1}{g_1} > \frac{N_2}{g_2}$ , 即高能态上的粒子数总是少于低能态上的粒

子数。于是原子系统的受激吸收过程总占优势, 原子系统单位时间内从辐射场所吸收的光子数总是多于受激发射产生的光子数。如果采用适当的激励,

破坏热平衡状态, 使高能态粒子数多于低能态粒子数, 即  $\frac{N_2}{g_2}$

$-\frac{N_1}{g_1} > 0$ , 就说实现了粒子数反转, 称为反转粒子数。

粒子数反转是相对于热平衡分布而言的。当体系处于粒子数反转状态时, 受激辐射光子数多于被吸收的光子数, 因此对光子数具有放大作用。一个激光器要实现激光运转, 粒子数反转是必要条件之一。

从  $> 0$  可知, 体系处于粒子数反转状态时, 体系的温度  $T < 0$ , 因而说体系处于负温度状态。这是形式上的一种说法。实际上, 在热平衡状态下,  $T$  不能取负值。但是体系处于粒子数反转状态时, 它并不处于热平衡状态。

**二能级系统** 如果激光器运转过程中有关的能级只有两个, 用有效的激励手段把处于下能级  $E_1$  的原子尽可能多地抽运到上能级  $E_2$ 。设能级  $E_1$  和  $E_2$  上单位体积内的原子数分别为  $N_1$  和  $N_2$ , 自发辐射、受激吸收和受激辐射的概率分别为  $A_{21}$ 、 $W_{12}$  和  $W_{21}$ 。如果能级统计权重相等, 则受激吸收系数  $B_{12}$  和受激辐射系数  $B_{21}$  相等, 因而  $W_{12}=W_{21}=W$ 。  $E_2$  能级上粒子数  $N_2$  的变化率为

$$\frac{dN_2}{dt} = W(N_1 - N_2) - A_{21}N_2。$$

当达到稳定时,  $\frac{dN_2}{dt} = 0$ , 故有

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{W}{A_{21} + W}。$$

可见, 不管激励手段如何强,  $(A_{21}+W)$  总是大于  $W$ , 所以  $N_2 < N_1$ 。这表明, 对二能级系统的物质来说, 不能实现粒子数反转。

图 1 三能级系统

**三能级系统** 图 1 所示为三能级系统。如果激励过程使原子从基态  $E_1$  以很大概率  $W$  抽运到  $E_3$  能级, 处于  $E_3$  的原子可以通过自发辐射跃迁回到  $E_2$  或  $E_1$ 。假定从  $E_3$  回到  $E_2$  的概率  $A_{32}$  大大超过从  $E_3$  回到  $E_1$  的概率  $A_{31}$ , 也超过从  $E_2$  回到  $E_1$  的概率  $A_{21}$ , 则利用泵浦抽运使  $W > W_{23}$  或  $W > W_{12}$  时,  $E_2$  和  $E_1$  之间就可能形成粒子数反转。

先写出  $E_3$  和  $E_2$  上的粒子数变化率方程:

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= WN_1 - A_{31}N_3 + W_{23}N_2 - A_{32}N_3, \\ \frac{dN_2}{dt} &= W_{12}N_1 - A_{21}N_2 - W_{23}N_2 + A_{32}N_3, \end{aligned}$$

当达到稳定状态时，可推得

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{W}{A_{21}}$$

可见当  $W$  足够大，且  $W > A_{21}$  时，便有  $N_2 > N_1$ ，从而使三能级系统中的两个能级  $E_2$  和  $E_1$  实现粒子数反转。红宝石激光器就是以红宝石为工作物质的三能级系统。它的  $E_3$  能级寿命很短，约为  $5 \times 10^{-8}$  秒；而  $E_2$  能级寿命很长，约为  $3 \times 10^{-3}$  秒，于是在  $E_2$  和  $E_1$  之间可能形成粒子数反转。寿命较长的能级  $E_2$  称为亚稳态。由于  $E_1$  为基态能级，总是集聚着大量粒子，要实现  $N_2 > N_1$  需要的激励动力相当强，这是三能级系统的缺点。

#### 图 2 四能级系统

**四能级系统** 图 2 所示是四能级系统。在外界激励下，基态  $E_1$  的粒子大量地跃迁到  $E_4$ ，然后迅速转移到  $E_3$ 。 $E_3$  能级为亚稳态，寿命较长。 $E_2$  能级寿命较短，因而到达  $E_2$  上的粒子会很快回到基态  $E_1$ 。所以在  $E_3$  和  $E_2$  之间可能实现粒子数反转。由于激光下能级不是基态，而是激发态  $E_2$ ，所以在室温下激光下能级的粒子数很少，因而  $E_3$  和  $E_2$  间的粒子数反转比三能级系统容易实现。氦氖激光器、二氧化碳激光器、钕玻璃激光器以及 YAG 激光器都是四能级系统激光器。

**粒子探测 (detection of particle)** 通过实验仪器和装置对粒子进行辨认，并测定其各种性质，如质量、电荷、寿命，以及能量、动量等。

利用带电粒子与物质原子的电离或激发作用可直接显示或探测出带电粒子的径迹，并由此可测定其性质。中性粒子不能使物质原子电离或激发，因此对它的检测只能通过间接方式，例如通过其衰变的带电粒子来进行测量。记录或探测带电粒子径迹的装置设备种类很多，如早期的云室、电离室，以及目前常用的气泡室、流光室、多丝正比室、漂移室等。

**粒子质量的测量：**确认一个粒子最主要的是要测量其质量，不同粒子有不同的静质量。一般是通过测定粒子的动量、动能和速度等量中的两个量，然后通过计算来确定该粒子的质量。当粒子速度很高，接近光速时需要用相对论公式进行计算。

**粒子动量、动能和速度的测量：**通过对带电粒子在外加磁场中运动轨迹曲率半径的测量可确定粒子的动量。带电粒子在物质中行进时由于库仑散射而消耗能量，粒子行进单位距离时其能量损失与该粒子的动能有确定的关系，根据这个关系可测定粒子的动能。粒子的速度可通过飞行距离与时间之比直接测定，也可利用“切伦科夫效应”测量。当粒子飞行速度超过媒质中的光速时，会沿运动方向的很小锥角内出射强烈的辐射。发射角  $\theta$ 、媒质折射率  $n$  及粒子速率  $v$  之间存在如下关系： $\cos \theta = c/nv$ ，其中  $c$  为真空中的光速。

**粒子电荷的测量：**粒子电荷的正负号可简单地通过观察该粒子的径迹在外磁场中的偏转方向确定。如果还要确定电荷的绝对值，则需采用特殊方法，例如在云室或气泡室中测量其电离度。电离度与粒子电荷数  $Z$  的平方成正比。

**粒子寿命的测量：**粒子的衰变过程是一种概率过程，粒子的寿命是指它的统计平均寿命。对于其寿命为  $10^{-10}$  秒量级的粒子来说，可在探测器

中同时看到其产生点和衰变点，因此可由它的径迹飞行时间来确定其寿命。对于长寿命粒子，如  $\mu$  子 ( $\sim 10^{-6}$  秒)，需通过宇宙线实验测量其寿命。对于短寿命粒子 ( $\sim 10^{-22} \sim 10^{-24}$  秒)，在探测器中所观察到的它的产生点和衰变点是重合的，因此不能根据飞行距离来确定其寿命。这时可利用不确定关系 ( $\sim 10^{-22}E \sim 10^{-24}$ ) 通过其能谱宽度  $\Delta E$  来确定它的寿命。


**粒子物理学** (particle physics) 又称高能物理学或基本粒子物理学。物理学的一个分支，是当代物理学发展的一个前沿学科。在这一领域的研究中，不断产生出新的思想、新的方法和新的实验技术。所谓“粒子”，是泛指比原子核更深层次的物质单元，包括电子、质子、中子、光子、介子等。粒子物理学研究这些粒子的基本性质，在很高能量下它们之间的相互作用和转化，以及这些粒子更深层次的结构（见强子结构）等。高能加速器是目前粒子物理学实验研究的一种基本设备。现在世界上已建成多处大型高能加速器实验中心，作为各国粒子物理学家的实验基地。这些中心所得到的实验结果常常很快公布，为世界各国科学家所分享。粒子物理学的理论基础是量子场论。

**利萨如图形** (Lissajou figures) 由互相垂直的方向上的两个频率成简单整数比的简谐振动所合成的轨迹图形，因由法国物理学家利萨如发现而得名。在互相垂直的方向上，两个频率不同的简谐振动的合运动一般比较复杂，其运动轨迹一般是不闭合的。当两振动的频率成简单的整数比时，其合运动的轨迹才是一条闭合曲线。曲线的形状决定于两分振动的振幅比、频率比和相位差。在已知一个分振动的频率时，根据利萨如图形的花样可以推测另一分振动的频率及它们之间的相位差。

利萨如图形。

图中左边的数学表示纵向振动频率和横向振动频率之比

**力** (force) 物体间的一种相互作用，其效果可使物体的运动状态或形态发生变化。它是物理学中使用最广泛的基本概念之一，在经典力学中占有极重要的位置。

力概念的形成人们对力的认识最初是与人在推、提、拉物时的肌肉活动联系在一起的。在这些活动中肌肉感到紧张，就认为肌肉对其他物体有作用。“力”这个字的起源，可追溯到殷商时代的甲骨文中，甲骨文的“力”字写作，表示像耒那样的尖状起土农具。将一根削成尖状的木棒插入土中把泥土翻起，这种劳动需要人的体力。在中国的《墨经》中对力作出了具有物理意义的定义：“力，形之所以奋也”，即力是使物体奋起运动的原因。在西方，力的概念最早产生在古希腊的哲学争论之中。在古希腊的宇宙论学派（代表人物为泰勒斯）中，认为自然是有生命的，像人体一样，是自己运动的活的组织，因此在这种哲学思想指导下，并不存在运动的起源命题，也没有“力”的概念。而反对者提出了运动源泉是“力”来证明运动是存在的，这样就无形中承认了“力是因，运动是果”的原始的因果论观点。

关于物体运动的原因，亚里士多德从解释日常现象出发，认为力能决定物体运动的速度。例如要使马车有较大的速度，马就要施以较大的拉力。亚里士多德还认为，自然界万物各有其天然的处所，其自然倾向是回归本位，运动就是在物体回归其本位而发生的。如石头下坠而重回本生的土地，火向高飞而接天火，这是物归其位，相应的运动称为天然或本性的运动。

物体下落时，若它越重，下落倾向越大，落得越快；若它较轻，下落倾向小些，落得就较慢，这就是亚里士多德从天性论导出的有名的落体理论。在整个中世纪，由于思想上深受亚里士多德的束缚，在力的概念上并没有什么进展。

对力的科学概念首先作出重要贡献的是伽利略。他指出了物体运动有匀速与变速之分，并把力与物体速度的变化联系起来，破除了亚里士多德把力与速度联系在一起的长期的思想束缚，开辟了牛顿把力与加速度联系在一起的道路。开普勒与伽利略一样，对牛顿建立力的科学概念起着重要的作用。开普勒根据第谷长期的星象观测资料和对这些观测的反复研究，提出行星轨道运动是因行星受到了吸力而造成的，这种吸力是通过空间从吸引中心（太阳）到达行星的，其大小与距离的二次方成反比，但对吸力的性质以及如何通过空间作用，并不清楚。

牛顿继承与发展了伽利略、开普勒等人的观点，提出了三条运动定律，力的科学概念才最后被确定下来。牛顿于 1664 年提出了力的定义是动量的时间变化率（动量等于质量和速度之积）。牛顿第一定律即惯性定律是力的定性定义，它规定力在什么条件下存在和在什么条件下它的作用不存在的定性条件。牛顿第二定律给出了力的定量定义，即力等于动量的时间变化率，当质量不变时，力等于质量与加速度之积。牛顿第三定律指出了力的依存性，对于每一个力而言，必有一大小相等方向相反的反作用力存在，这两个力分别作用在不同物体上。在牛顿时代，人们对力的认识还仅限于万有引力和相互接触物体之间的各种常见力（如摩擦力、弹性力、粘滞力、张力、正压力等），并且认为力的作用带有超距性质。直到 19 世纪麦克斯韦总结了前人对电磁现象的研究，提出了场的概念，以及爱因斯坦于 1905 年提出了狭义相对论，指出一切物理作用传播都是需要时间的，其最大速度为光速，此时人们才认识超距作用的力的概念有着根本的局限性。

力的性质和种类力是矢量，力的作用效果不但与它的大小、方向有关，还与力的作用点有关，力的大小、方向和作用点这三者是力的三个要素。其中任何一个因素改变，力的作用效果就会跟着改变。

按力的性质来分，当前人们所认识的自然界中各种力可归结为四种基本相互作用：引力相互作用——由于物体具有质量，因而物体之间有万有引力相互作用；电磁相互作用——存在于静止电荷之间的电力和运动电荷之间的磁力相互作用，总称电磁相互作用。通常所说两物体间存在着摩擦力，实际上是两物体分界面两侧分子（原子）之间电磁相互作用的宏观表现，弹性力、张力和正压力等也是如此；强相互作用——存在于核子（中子与质子）、介子和超子等基本粒子之间的一种相互作用，其特点是力程短（约  $10^{-15}$  米）、强度大（比库仑力大  $10^2$  倍），核力就是核子之间的强相互作用；弱相互作用——存在于基本粒子间的另一种相互作用。其特点是力程更短，强度更弱（约为强相互作用的  $10^{-13}$  倍），衰变放出电子（或正电子）和中微子就是弱相互作用的结果。上述四种基本相互作用中，前两种主要存在于宏观物体之间，后两种则存在于基本粒子间的近距作用中。

**力的单位制** 在采用国际单位制以前，常用的单位制有绝对单位制和引力单位制。绝对单位制：规定质量为基本量，再由牛顿第二定律  $F=ma$  来确定力的单位，因此力是导出量，它的量纲是  $MLT^{-2}$ ，其中 M 是质量，L

为长度，T 为时间。常用的绝对制中又有两种，一种称为米·千克·秒制（MKS 制），另一种称为厘米·克·秒制（CGS 制）。在 MKS 制中，力的单位是牛顿，1 牛顿力的定义是：在 1 牛顿力作用下，使质量为 1 千克的物体获得 1 米/秒<sup>2</sup>的加速度。在 CGS 制中，力的单位是达因，1 达因力的定义是：在 1 达因力的作用下，使质量为 1 克的物体获得 1 厘米/秒<sup>2</sup>的加速度。可见，1 牛顿=10<sup>5</sup> 达因。引力单位制：把力作为基本量，质量则为导出量。质量单位由牛顿第二定律通过力和加速度单位导出，用标准物体所受地球引力作为标准力，引力加速度为 g，任何物体的重量均用标准物体的重量来量度。由于地球表面各处的引力加速度不尽相同，因此规定地球表面某一特定地点（纬度 45° 的海平面）作为测量标准物体的标准重量之处。工程单位制就是引力单位制的一种，力的单位是千克力，1 千克力相当于在地球纬度 45° 的海平面上千克原器的重力，即 1 千克力=9.80665 牛顿。选定了力的单位就可导出质量的工程制单位：一物体在 1 千克力的力作用下，获得 1 米/秒<sup>2</sup>的加速度，该物体的单位即为 1 质量工

程单位，即： $1\text{质量工程单位} = \frac{1\text{千克力}}{1\text{米/秒}^2}$ 。不难得到，1 质量工程单位 =

9.81 千克。国际单位制：国际单位制中的力学单位，采用 MKS 制的力学单位。

**力的独立作用原理**（principle of physical independence of force）几个力同时作用在一个质点上，则此质点的加速度等于这些力分别作用于此质点所得各加速度的矢量和。这原理首先由牛顿提出，表明了某一力系中任一力的作用，与其他力是否作用无关，力系的总作用是每个力分别作用的叠加。根据力的独立作用原理和牛顿第二定律可以推论，作用在同一质点上的多个力对此质点的作用，相当于由这些力的矢量和所表示的单独一个力的作用。或者说，作用在一个质点上的各力的合力，等于这些力的矢量和。例如，一个质点受到两力  $F_1$  和  $F_2$  作用，则其合力  $F$  的力矢量是以力矢量  $F_1$  和  $F_2$  为边的平行四边形的对角线， $F$ 、 $F_1$  和  $F_2$  方向如图所示。写成矢量等式就是

$$F = F_1 + F_2。$$

**力的平行四边形法则**

表示这种关系的定律，称为力的平行四边形法则。

**力的多边形法则**（Polygon law）多个力矢量相加的法则。把力矢量  $F_1, F_2, \dots, F_n$  依次首尾相接，则从  $F_1$  的起点向  $F_n$  的终点引出的矢量  $F$  就是  $F_1, F_2, \dots, F_n$  的矢量和。由于  $F_1, F_2, \dots, F_n$  与它们的矢量和  $F$  构成一封闭的多边形，所以称为力的多边形法则。如  $n=2$ ，这个多边形变成了三角形，这时力的多边形法则称为力的三角形法则。

**力的多边形求和法则力的三角形求和法则**

**力的分解**（resolution of a force）将一个力化成

**力的分解图**

与之等效的两个或两个以上的分力。根据力的平行四边形相加法则或力的多边形法则，以及根据作用在刚体上的力可沿其作用线移动而不改变对刚体作用效果的性质，可以按需要把一个力分解成由许多分力构成的力系。把一个力分解成许多分力，在一般情况下有无数组解，只有当给出足

够的附加条件时，才能得到唯一解。例如，在力矢量所在的平面中，可以把此力  $F$  唯一地分解成沿两指定方向的两个分力  $F_1$  和  $F_2$  (图 a)；给定已知力  $F$  及两分力中的任一分力  $F_1$ ，可以唯一地求出另一分力  $F_2$  (图 b)；可以把已知力  $F$  沿直角坐标轴的三个互相正交的方向唯一地分解成三个分力  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  (图 c)。

**力的合成 (composition of forces)** 将作用在物体上的力进行简化，用一个力等效地代替两个或两个

以上作用在同一刚体或同一质点上的力。这个力称为原力系的合力；原力系中的任一力称为这个合力的一个分力。空间任意力系不一定有合力，例如力偶就不能用一个力等效替代。共点力系、汇交力系和同向的平行力系一般都可以合成为一个合力。

共点力系是几个力的作用线通过一公共点所构成的力系。作用在同一质点上的力系是共点力系，作用在刚体同一点上的力系也是共点力系。根据力的平行四边形相加法则，将力系中的各力顺次相加，或者用求力矢量和的多边形法则，可求出作用在同一点的合力。

汇交力系即是共点力系。汇交力系合力的作用点在力系中各力作用线的交汇点上，合力的大小和方向是力系中各力的矢量和，可以按力的平行四边形相加法则或求力矢量和的多边形法则求出。根据力的可传性，合力沿着其作用线移至刚体上的任一位置，对刚体的作用效果不变，所以按上述方法求出的合力沿其作用线移至另一位置后，仍为该力系的合力。

平行力系是各力的作用线彼此平行的力系。两同向平行力或大小不等的两反向平行力合成的方法是：在两力  $F_1$  和  $F_2$  作用点  $A_1$  和  $A_2$  上沿  $A_1A_2$  连线添加大小相等和方向相反的力  $f_1$  和  $f_2$ ， $F_1$  和  $f_1$  的合力为  $R_1$ ， $F_2$  和  $f_2$  的合力为  $R_2$ ， $R_1$  和  $R_2$  构成一汇交力系，

#### 平行力的合成图

可按求汇交力系的方法求出其合力  $R$ ， $R$  即为原力系  $F_1$  和  $F_2$  的合力。如两力  $F_1$  和  $F_2$  同向，合力  $R$  的方向与  $F_1$  或  $F_2$  相同，其大小为两分力大小之和，即  $R=F_1+F_2$ ，合力作用线内分两分力作用线  $A_1A_2$  为两段  $A_1A$  和  $AA_2$ ，

使这两段长度之比和两分力大小成反比，即  $\frac{A_1A}{AA_2} = \frac{F_2}{F_1}$ ；如两力  $F_1$  和  $F_2$

反方向，设  $F_1 > F_2$ ，则合力方向和较大分力方向相同，其大小为两分力大小之差，即  $R=F_1-F_2$ ，合力作用线外分两分力作用线  $A_1A_2$  为两段  $A_1A$  和  $AA_2$ ，使这两段长度之比与两分力大小成反比，即

$$\frac{A_1A}{AA_2} = \frac{F_2}{F_1}。$$

若同向平行力系中有不止两个力，可按求两平行力合力的方法顺次将力系中的各力合成为整个力系的合力；如平行力系中各力方向不完全相同，只要有合力存在，即可按相同方法求出整个力系的合力。

**力的平行四边形法则 (Parallelogram law)** 两力矢量合成的法则。把两力  $F_1$  和  $F_2$  的作用点移至同一点  $O$ ，以矢量  $F_1$  和  $F_2$  作为平行四边形的两条边，从  $O$  点引出此平行四边形的对角线  $OA$ ，矢量  $OA=F$  就是两力  $F_1$  和  $F_2$  的矢量和： $F=F_1+F_2$ 。如  $F_1$  和  $F_2$  是作用在  $O$  点的共点力系，则  $F$  就是这

力系的合力。该法则最早由斯台文提出。

力的平行四边形法则

力的三角形法则 (triangle law) 见力的多边形法则。

力矩 (moment of a force) 表示力对物体作用时产生转动效应的物理量，是力对轴线的矩和力对点的矩的统称。力  $F$  对有向轴线  $l$  的矩  $M_l(F)$  是一个数量，定义为

$$M_l(F) = \pm F_l \cdot d。$$

其中  $F_l$  是力  $F$  在垂直于轴线  $l$  的平面上的投影绝对值， $d$  是  $F$  在上分力  $F_l$  的作用线与轴  $l$  之间的距离，称为力臂。面对有向轴线  $l$  看，若  $F_l$  的指向相对于  $l$  与  $l$  的交点  $O$  是逆时针向的，双重符号中取正号；如为顺时针向，取负号。力对轴的矩是用来度量刚体在此力作用下绕这轴的转动效应的。如刚体是一个绕  $l$  轴做定轴转动的物体， $F$  是作用在此刚体上某一

力对轴的矩

点的力，则此刚体绕  $l$  轴转动的角加速度只与  $M_0(F)$  有关。力  $F$  对某一点  $O$  的矩是一个矢量  $M_0(F)$ ，定义为

$$M_0(F) = r \times F，$$

$r$  是从  $O$  点引到力  $F$  的作用点的位矢。 $r \times F$  是矢量  $r$  与矢量  $F$  的矢性积，其大小为  $rF \sin \theta$ ， $\theta$  是  $r$  与  $F$  之间所夹不大于  $90^\circ$  的角， $r$  和  $F$  分别是  $r$  和  $F$  的大小。

$M_0(F)$  的方向垂直于  $r$  和  $F$  所决定的平面，面对  $M_0$  看，从矢量  $r$  的方向逆时针转过一个不大于  $90^\circ$  的角，可与  $F$  的方向重合。力对点  $O$  的矩是量度刚体在此力作用下绕  $O$  点转动效应的物理量。

力对轴的矩又是此力对轴上任一点的矩在此轴上的投影，此投影值与点在轴上的位置无关。力矩的量纲为  $L^2MT^{-2}$ ，在 SI 单位制中，它的单位为牛顿·米 ( $N \cdot m$ )。

力偶 (couple) 大小相等、方向相反但不在同一直线上的两个力。图中两个力  $F$  和  $-F$  组成了一个力偶。力偶中两力作用线之间的距离  $d$  称为力偶臂。力偶对刚体的作用效果是使刚体转动，但不能使刚体质心产生加速运动，所以力偶对刚体的作用效果与一个力对刚体作用的效果是绝不相同的，它不能与一个单独的力等效，也不能用任何一个力来平衡。

力偶对刚体的作用效果是用力偶矩来度量的，一个力偶 ( $F, -F$ ) 的力偶矩  $M$  定义为这样一个矢量：

$$M = r \times F，$$

式中  $r$  是从力  $-F$  的作用点引到力  $F$  的作用点的位矢。 $M$  的大小等于  $Fd$ ， $d$  为力偶臂， $M$  的方向垂直于力偶中两力作用线所在的平面，面对矢量  $M$  看， $F$  和  $-F$  两力的排列构成逆时针关系。在图中，力偶矩的方向垂直纸面并指向外。

力偶

力学 (mechanics) 物理学的分支学科。研究宏观物体低速机械运动规律及其应用的学科。宏观是相对于原子等微观粒子而言的。低速是相对于光速而言的。机械运动是指物质在时间、空间中的位置变化，包括移动、转动、流动、变形、振动、波动等，而平衡或静止则是机械运动的一



种特殊情形。人们日常生活直接接触到的并首先加以研究的都是宏观低速的机械运动。

**发展简史** 人类从古代开始，通过生活与生产等方面的实践活动和对天文、物理现象的观察，已经在力学方面积累了一定的知识。我国的墨翟（约公元前 468 ~ 前 376 年）及其所代表的墨家学派在《墨经》一书中，已有关于时空和物质的运动、力和重、平衡和重心、物体的沉浮等知识和斜面、杠杆、滑车等简单机械的记

载。古希腊的阿基米德对杠杆平衡、物体的重心位置和物体在水中所受的浮力等作了系统的研究。古代力学知识，大多是属于现象描述或经验总结性质，即使有理论形式，也大部分是属于思辨性的。真正用实验及演绎方法研究力学现象及规律，则从伽利略开始。伽利略在实验研究和理论分析的基础上，阐明了自由落体的运动规律，提出了加速度概念，发现了惯性原理、力学的相对性原理，从而开创了近代力学研究的新纪元。17 世纪，牛顿继承和发展了前人的研究成果，提出了万有引力定律和牛顿运动三大定律，引入一系列物理概念和推理法则，发表了巨著《自然哲学的数学原理》，从而奠定了经典力学的基础。牛顿经典力学体系的建立标志着 17 世纪力学发展达到一个高峰。此后力学的进展在于它所考虑的对象从单个自由质点过渡到受约束的质点和质点系。通过丹·伯努利、达朗伯、欧拉、拉格朗日、拉普拉斯、哈密顿等人的工作，使力学向着解析的方法发展，力学的这个阶段称为分析力学。在这期间，欧拉把牛顿运动定律推广应用于刚体和理想流体。欧拉建立的理想流体的力学方程可以看作是连续介质力学的开端。在此之前，有关固体的弹性、流体的粘性、气体的可压缩性等物性方程已陆续建立。牛顿运动定律和物性方程两者的结合，使弹性固体力学和粘性流体力学的基本理论应运而生。另一方面，在分析力学基础上发展起来的哈密顿体系继续在物理学中发挥作用，形成了物理学中的经典力学理论体系。弹性力学和流体力学的基本方程建立后，由于一时难以求解，工程技术问题中的许多应用性问题还须依靠经验和半经验的方法解决，这使得材料力学、结构力学也有较快的发展。20 世纪初，在固体力学和流体力学中，实际应用和数学理论开始结合，促进了力学的蓬勃发展，不仅创立了许多新理论和新方法，而且也解决了工程技术中的大量关键问题。约在 20 世纪 60 年代后，力学更进入了它的现代时期，由于电子计算机的广泛应用，力学科学与技术科学的互相渗透，以及宏观和微观相结合的研究途径的开拓，使现代力学出现了崭新面貌。

**学科内容** 力学可以按力、运动和它们之间的相互关系分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学主要讨论物体在外力作用下的平衡问题；运动学讨论运动的描述方法而不涉及发生运动的原因；动力学讨论运动和物体之间相互作用的关系。力学也可以按研究对象的力学模型分为质点力学、刚体力学和连续介质力学。其中质点力学包括质点系力学，刚体力学包括多刚体力学，通常把它们合称为一般力学。连续介质力学又分成固体力学和流体力学两部分。在一般力学中，有理论力学、分析力学、振动理论、刚体动力学、陀螺力学、外弹道学和运动稳定性理论等。属于固体力学的有材料力学、结构力学、弹性力学、塑性力学、断裂力学等。流体力学包括水力学、水动力学、空气动力学、渗流力学等。上述各分支学科之间的交叉又产生粘弹性理论、流变学、气动弹性力学等。力学也可以按研

究方法分为理论分析、实验研究和数值计算三个方面。实验力学包括实验应力分析、水动力学实验和空气动力学实验等。应用数值计算手段的有计算力学，它以广泛使用电子计算机作为计算手段。力学和其他基础科学的结合则产生了诸如天体力学、岩石力学、爆炸力学、生物力学、地质力学、磁流体力学、等离子体力学等分支学科。

**研究方法** 力学研究的基本方法是，根据对自然现象的观测，结合对实验结果的分析，揭示出力学量之间的规律性（定性或定量）的关系。为了使这种关系能反映事物本质，实验的设计应该突出所要研究的现象，例如采用高温、高压、风洞、激波管等实验，以便从中获得可靠的信息。由于实际的研究对象都很复杂，但又要揭示出事物的本质，就必须抓住一些带有本质性的主要因素，摒弃一些影响很小的次要因素，建立理想化的力学模型作为研究对象。例如质点、刚体、理想流体、粘滞流体、连续介质等都是力学模型。在力学模型的基础上，运用已知的力学或物理学基本规律以及合适的数学工具进行演绎工作，导出新的结论。依据第一实践环节所得出的理论结论，判断建立的力学模型是否合理，有待于新的观测或进行新的实验来加以验证。如果力学模型的确反映了事物的本质，而物理根据或新的假设又是正确的，那么所得到的理论结论至少是相当好的近似理论。可以在这个基础上，进一步考虑原先被摒弃的次要因素，使得理论进一步精确化。人们还可以根据这种理论，进一步预言尚未观测到的自然现象，用于指导解决工程和技术中的关键问题。所以，在力学的研究中，一方面要着重于观察分析和数学推理，另一方面，又要建立相应的实验，给理论提供新的源泉和新的证据。这种实践——理论——实践的研究方法并非是力学所特有的研究方法，不过由于力学所研究对象的特点以及力学学科的性质，使得力学和数学、实验以及工程问题的联系十分紧密。所以在力学研究中既有细致的、独立的分工，又有综合的、全面的协作，这已成为现代力学研究中不可缺少的方法。

《力学史评》（Die Mechanik in ihrer Entwicklung Historisch-Kritisch Dargestellt）奥地利物理学家、哲学家马赫著。1883年出版。全书共分5章：“静力学原理的发展”、“动力学原理的发展”、“力学原理的推广运用和力学的演绎发展”、“力的形式发展”、“力学和其他知识领域的关系”。前四章，马赫详细地介绍了牛顿力学的基本观点，充分肯定了牛顿在力学上的巨大成就。他认为牛顿在力学发展中有两大贡献：第一，通过万有引力的发现大大扩展了力学的范畴；第二，完成了现今所公认的力学原理的建立工作。马赫还盛赞牛顿的《自然哲学的数学原理》表述的明晰性，特别是万有引力概念的确立，“它不仅使行星系统的千年之谜解决了，而且使其他过程也成为可以理解了。”因此“人们取得了物理概念的一种丰收和一种自由，这是牛顿以前所意想不到的”。至于作用与反作用定律的建立，马赫认为“这也许是牛顿在力学原理方面最重要的功绩”，并指出“这里所作的思考，应当有助于使我们感觉到牛顿论著对于力学的巨大意义”。

尽管马赫注意肯定牛顿在力学方面的巨大功绩，但在该书中仍不时流露出对牛顿力学的基本概念和基本原理的怀疑和批判。首先，马赫不喜欢牛顿的质量概念，认为所谓“物质的数量”这个观念根本不适合于说明和揭示质量的概念，主张质量的定义只能从物体的力学关系中推导出来。第

二，在马赫看来牛顿关于力的定义，在原则上是没有什么可非议的，然而他主张把力定义为质量与加速度的乘积，这样质量和力都变成可观察物体的可观测特性，从而“消除了所有形而上学的朦胧”。第三，马赫不赞成把惯性看作是物体固有的性质，而把惯性看作是物体与宇宙之间的力相联系所规定的本质。第四，马赫更是反对牛顿的绝对时间、绝对空间的观念，他运用相对性思考的方法，认为任何人都不能说什么绝对时间、绝对空间和绝对运动的东西，它们只是思想的产物，在经验中不能显示出来，因此既无科学价值，也无实践价值。马赫认为时空概念也是相对的和可变的，它们的量度依赖于确定的参照系，进而反复强调了一切运动、一切速度，因而一切力都是相对的，并提出了物质的惯性依赖于宇宙中物质的分布及它们之间的相对运动的原理，后称为马赫原理。

最后一章，马赫主要是批判力学先验论，断言力学并不具有凌驾于其他学科之上的特权，指出机械自然观是毫无道理的。阐发了经验批判主义的科学方法论，强调科学具有经济功能，思维形式具有经济性质，主张科学家在他的研究工作中，应用尽可能少的思维上的消耗，尽可能简单的方法，尽可能短的时间，去获得尽可能多的科学知识。马赫还提出用感觉或感觉的复合的命题来表达一切科学命题，并用它来构成一个贯彻一致的逻辑体系，也就是宣称一切存在的东西都是感觉或感觉的复合，由此直接导致了主观唯心主义的经验批判主义哲学。

该书是马赫最重要的代表作之一，由于运用了科学批判和经验思辨的方法，进一步破除了力学先验论，提出了对质量、力、惯性、时间、空间、运动等物理概念的崭新理解，因而在科学家、哲学家中产生了极大的影响。该书在马赫在世时就先后出了七版，马赫逝世后又出了第八版和第九版。围绕该书的出版还引起当时科学家、哲学家对经典物理学历史及其哲学基础的热烈讨论。所以，这部著作又成了研究科学史和方法论的重要文献。

**连续性方程** (equation of continuity) 流体力学的基本方程之一，根据质量守恒定律，用以表明流体流动性的方程式。对于稳定流动可表述为：流体中的任一流管，通过其任一截面的质量流率（单位时间内流过某一截面的质量）恒定不变，即  $sv = \text{恒量}$ 。其中  $\rho$  为流体密度， $S$  为流管横截面， $v$  为流速。对于不可压缩的流体， $\rho$  为恒常量，上式可简化为  $Sv = \text{恒量}$ 。例如“过堂风”的流速大就是因为夹道的横截面积小的缘故。

**《两种新科学的对话》** (Discourses on two New Sciences) 意大利物理学家、天文学家伽利略的代表作，成书于1638年，原著用意大利文写成，后被译成多种文字。该书采用对话的形式，参加对话的共有三个人。伽利略借用三人的对话，以新颖奇特、耐人寻味的笔调，驳斥了当时流行的古老天文学、古老物理学和哲学中一系列错误见解；相当系统地总结了他的一系列的科学新发现，特别是在力学科学和实验科学上的研究成就。该书书名全称是《关于力学和位置运动的两种新科学的对话和数学证明》，这里所说的两种新科学是力学与局部运动，也就是现在所说的动力学与运动学。前者研究支配宏观物体机械运动的规律，后者是对物体运动状态的描绘。这是伽利略毕生从事研究物体运动的成果总结。书中对于动力学、弹性力学、材料力学、声学、弹道学与科学方法论等均有生动活泼的叙述。该书是伽利略在监禁中，利用夜晚的灯光甚至月光撰写的，花费了整整三年时间，由他的学生秘密偷运到法国，再由荷兰的一家书商出版。此时的

伽利略已经双目失明，永远不能亲眼看见凝聚着自己心血的新书了，然而整个欧洲却看到了它。这部极有价值的著作奠定了近代物理学的基础，并为近代实验科学开辟了广阔的道路，被有的学者誉为“近代物理学的第一部伟大著作”。

**量纲** (dimension) 见物理量。

**量热器** (calorimeter) 测量热量以及物质的比热、潜热等热学量的装置。

#### 水量热器

实验室中常用的水量热器是一种最简单的量热器，结构如图所示，它由两个互套的同轴圆筒组成。实验时，内筒盛一定质量的水，筒内插有搅拌器和温度计。内外圆筒之间是空气或填以羽毛、玻璃纤维等绝热材料，以减少热传导引起的损失。内筒一般用导热性能好的紫铜等金属制成，并镀铬，以减少辐射引起的热损失。外筒一般用绝热材料制成，并配有盖子，以减少热对流引起的热损失。其他类型的量热器有冰量热器、蒸汽量热器、真空量热器和爆炸量热器等。目前最精确的量热器的精度可达 0.01%。

**量糖计** (saccharometer) 一种测量溶液浓度的偏振计，亦称旋光计。最简单的量糖计由起偏器、盛溶液的管子和检偏器组成。专门用于测量含糖量时，检偏器上的刻度可以直接读出含糖量。使用时开启钠光灯，使发出的自然光经起偏器后成为平面偏振光。转动检偏器，使视场全暗。再把待测溶液装入盛液管，由于平面偏振光经过待测液后振动面旋转一个角度，检偏器的视场由全暗变成稍亮。再次转动检偏器，使视场回复到全暗。从检偏器上的刻度可读出待测液引起的平面偏振光振动面旋转的角度，从而求出溶液浓度。若盛液管长为  $l$ ；待测液旋光本领为  $\alpha$ ，浓度为  $C$ ；旋转角度读数为  $\theta$ ，则可用下式求浓度值：
$$C = \frac{\theta}{l \alpha}$$

**量子场** (quantum field) 物质存在的形式。各种实物粒子和场都可用量子场描述。在空间中充满着由场量子组成的各种量子场，它们相互渗透并且相互作用着。量子力学建立后，人们把描述电磁场和带电体间电磁相互作用的电动力学按照量子力学的一些基本要求进行改造，而形成量子场论，再用量子场论去研究微观电磁过程，即光子和电子间的相互作用和相互转化，很有成效。这一成功，使人们尝试用类似方法，即把场加以量子化的方法去研究其他微观粒子的场。量子场的激发态代表粒子的产生，场激发态的消失代表粒子的湮没。不同激发态代表了粒子的数目和状态的不同。场的相互作用可以引起场激发态的改变，表现为粒子的各种反应过程。这样量子场论就在实物粒子与场之间建立了逻辑关系。量子场论本质上是无穷自由度的量子力学，它深刻地揭示了微观世界中丰富生动的辩证联系和相互转化关系，从而成为现代物理学各个分支的共同基础理论。

**量子场论** (quantum field theory) 考虑了量子性后的场的理论。按照量子场论的观点，每一种粒子都与一种量子场相对应。例如与光子相对应的量子场是光子场（即量子化电磁场），与电子相对应的量子场是电子场，此外还有  $\mu$  子场，中微子场，介子场等等。量子场是物质存在的基本形式。量子场的基态就是不存在粒子的状态，即“真空态”，一切物理测量都是相对于这个背景进行的。一个粒子、二个粒子、...的状态是量子场的激发态。因此量子场的激发和退激表示了粒子的产生和消灭。各种

量子场之间还存在相互作用。例如电子场和光子场之间的相互作用将产生正负电子对湮灭而转化为光子 ( $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$ )，两光子湮灭转化为电子对 ( $2\gamma \rightarrow e^+e^-$ )，以及电子和光子散射，即康普顿散射 ( $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$ ) 等物理过程。通过对这些物理过程的富有成效的讨论，使人们对微观粒子间的相互作用和相互转化规律有了深刻的认识。量子场论已成为微观物理现象的基本理论。物理学家借助于量子场论的基本观念和基本方法已将物理学的研究范围从分子和原子领域推进到了原子核和基本粒子领域，以及更深层次的强子内部结构的领域。

**量子光学 (quantum optics)** 研究光场的相干、统计性质及光与物质相互作用量子特征的新兴学科。本世纪 60 年代初期，激光诞生和对汉·白朗—特威斯实验的深入研究为量子光学奠定了基础。传统光学认为光场产生干涉是相干光的标准，以干涉条纹的可见度判断光场为完全相干、部分相干或非相干。这种相干性仅仅反映光场的相位关联，只与一阶相干度有关。而汉·白朗—特威斯实验测量了光场强度之间的关联，它开创了对光场高阶相干度的研究，进而引入相干态概念，并由相干态表象导出非经典光场的量子实质。量子光学的新近发展表现在下列四个方面：光场压缩态、腔量子电动力学、超辐射和强光物理。

**量子化 (quantization)** 从经典理论过渡到量子理论所采用的方法。例如在玻尔模型中，玻尔采用附加一种所谓“角动量量子化条件”的办法建立了他的氢原子理论。在量子力学中，微观状态的分立性和微观现象的概率性均来源于微观客体的波粒二象性。例如由于物质粒子的波动性，对它的坐标和动量便不能同时作完全精确的测量。对它们测量结果的平均偏差要受到不确定关系的限制。物理学家们发现，为了体现出这一特点，可将坐标和动量等物理量用某种算符表示。这种算符可以是“微分算符”，也可以是“矩阵”。于是可通过将经典物理学中的物理量用满足某种不对易性的算符表示的办法将它过渡到量子力学。类似地，可通过将经典场理论中的场函数或波函数（如电磁场的电场和磁场强度）用满足某种不对易性的算符表示的办法将经典场论过渡到量子场论，从而不仅体现出场的波动性，而且体现出场的粒子性。

**量子化学 (quantum chemistry)** 利用量子力学的基本原理和处理方法来研究分子的微观结构所形成的一门学科。是介乎物理学、化学、生物学、数学四门学科之间的一门边缘学科。它的基础理论包括化学键理论、密度矩阵理论、传播子理论、多级微扰理论以及群论和图论在量子化学中的应用，其研究对象为稳定和不稳定的分子。

量子化学是随着量子力学的创立而诞生的一门新型学科，它从薛定谔方程式出发研究分子的结构，经历了 60 余年的发展历史，其发展大体上可分为两个阶段。从 30 年代到 50 年代近 20 年间，量子化学的基础得到奠定，着重于化学键的基础研究，偏重于较简单分子的理论探讨。从 50 年代到目前的 40 余年间，量子化学发展较快，借助于计算机，对较大的分子作理论计算，从而使现代化学的面貌发生了根本的改变。量子化学的最重要贡献是建立和发展了三种化学键理论：鲍林所发展的价键理论。他把海特勒处理氢分子的结果推广到比较复杂的分子，强调了分子中电子的定域性质，指出原子中未成对的反平行电子在化合中可以结合成电子对，并通过原子轨道的最大重叠形成一个共价键。原子轨道重叠愈多，所形成的共价

键就愈稳定。这一研究解决了共价键的饱和性和方向性问题。休克尔提出的分子轨道理论。是指能量相近的原子轨道可以组合成分子轨道。能量低于、高于和等于原子轨道的分子轨道分别称为成键轨道、反键轨道和非键轨道。在不违背每一个分子轨道只能容纳两个自旋反平行的电子的原则下，分子中的电子将优先占据能量最低的分子轨道，并尽可能分别占据不同的轨道和自旋平行。在成键时，原子轨道重叠愈多，生成的化学键就愈稳定。该理论对于处理共轭分子起重要作用，因计算方法较简单，又得到光电子能谱实验的验证，并解决了氧的顺磁性等问题，在量子化学理论中占据主导地位。配位场理论。它可用来讨论过渡金属离子在晶体场中的能级分裂。后来配位场理论与分子轨道理论相结合，发展成为现代配位场理论，比较满意地解释了许多过渡元素络合物的结构与性能之间的关系。

我国科学家对量子化学的发展作出了重要贡献。70年代量子化学家唐敖庆、江元生对简单分子轨道理论进行总结，提出和发展了分子轨道图形理论，使简单分子轨道理论大为简化，对结构类似的系列化合物提供了比较次序，并预言共轭分子稳定性和反应活性。随着量子化学的推广应用，人们看到了一种前景，即应用量子化学的原理和方法，可根据对新物质性能的需求来设计新的分子结构，并找到合成它们的最佳途径，这就是“分子工程学”，或称为“分子设计”，从而使化学和有关科学技术产生新的飞跃。

**量子霍尔效应 (quantum Hall effect)** 二维电子系统的霍尔电阻随磁场作阶跃式的变化。

如果在三维固体(如金属或半导体)中沿X-轴方向通以电流  $I_x$ ，同时又在垂直于电流方向，例如z-轴方向加一磁场  $B_z$ ，则在y-轴方向上就

会产生电势差  $V_y$ 。这个现象是霍尔效应， $R_{xy} = \frac{V_y}{I_x}$  称为霍尔电阻，它

与外加磁场  $B$  成线性关系。1980年，冯·克利青等人用MOS沟道区的二维电子系统为样品在极低温(1.5K)和强磁(18.9T)下进行测量，发现二维电子系统的霍尔电阻随外磁场的变化呈现出一系列

的台阶，台阶处的霍尔电阻为  $\rho_{xy} = \frac{h}{ie^2}$ ，其中  $i$  为正整数， $i = 1, 2,$

$3, \dots$ ， $h$  是普朗克常数， $e$  是电子电荷。这个现象与三维体系的霍尔效应不同，故称为量子霍尔效应。

1984年崔琪等用GaAs/GaAlAs异质结二维电子系统为样品，在更低的温度(0.09K)和更强的磁场(150T)的条件下进行测量，发现二维电子

系统霍尔电阻的平台不仅出现在  $i$  为正整数的地方，在  $i = \frac{4}{5}, \frac{2}{3}, \frac{8}{5},$

$\frac{4}{7}, \frac{3}{7}, \frac{2}{5}, \frac{1}{3}, \dots$  等分数处也出现

$$R_{xy} = \frac{h}{ie^2}$$

的台阶，这就是分数量子霍尔效应。

冯·克利青等人因发现量子霍尔效应而荣获1985年诺贝尔物理学奖。

**量子阱 (quantum well)** 由两种不同的半导体薄膜做成超晶格时，在生长方向上形成的对于载流子的势阱和势垒。在能隙宽度较小的薄膜材

料内，电子处于势阱之中。当超晶格的周期小到可与电子的德布罗意波长相比拟或更短时，每个势阱中的电子在垂直于结面方向运动的能量不再连续，电子的运动将明显呈现量子性，在势阱内出现分立的量子能级，故称这种势阱为量子阱。

**量子力学** (quantum mechanics) 物理学的一个分支。与经典力学相对应，是描述微观粒子的状态及其运动规律的理论，也是研究原子、分子、固体和凝聚态物质以及原子核和基本粒子的理论基础。该理论的主要框架由法国物理学家德布罗意，奥地利物理学家薛定谔，德国物理学家海森伯和玻恩，以及英国物理学家狄拉克等人于 1923 年 ~ 1927 年间建立。

**德布罗意的物质波假设** 量子力学的基础是德布罗意于 1923 年提出的关于物质粒子具有波粒二象性的假设：实物粒子（如电子、质子等）不仅具有粒子性，而且还具有波动性。有两个理由可解释德布罗意当时之所以提出该假设。首先，由于他受到普朗克和爱因斯坦关于光的波粒二象性假设的启发。另一个理由是，这个假设可以为玻尔模型中非常人为地引进的角动量量子化条件给出简单的回答。如果氢原子中绕核运动的电子具有波动性，那么为了在圆轨道上通过相长干涉而形成稳定的驻波，以下条件显然必须满足：圆轨道周长应等于电子波波长的整数倍，即  $2\pi r = n\lambda$ 。再利用普朗克关系  $\lambda = h/p$ ，其中  $h$  为普朗克常数， $p$  为电子的动量值，于是便得到如下结果： $L = rp = n\frac{h}{2}$  ( $\eta = h/2$ )。这就是玻尔模型中的角动量量子化条件。

**波函数** 由于微观粒子具有波粒二象性，对它的描述就不同于经典粒子。在经典力学中，用粒子的坐标和速度来描述它的运动状态。在量子力学中，则要用波函数  $\psi(x, t)$  来描述微观粒子的状态。波函数是坐标和时间的函数。应当注意的是，物质波不同于经典物理学中的波。经典波的能量与波的振幅有关，而物质波的能量则与它的频率有关 ( $E = h\nu$ )。物质波是一种概率波，其模的平方与  $x$  点处体积元的乘积  $|\psi(x, t)|^2 dV$  给出了  $t$  时刻粒子在该体积元中出现的概率。概率性是微观现象的一个特征，量子力学需要应用统计性解释。量子力学给出的微观粒子的运动规律性是一种统计规律性。

**薛定谔方程** 微观粒子运动状态的规律性可用波函数所满足的一个方程式表示：

$$i\eta \frac{\partial}{\partial t} \psi = \left( -\frac{\eta^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \psi。$$

该方程称为薛定谔方程，是薛定谔于 1926 年首先建立的。该方程在量子力学中的地位与牛顿第二定律在经典力学中的地位相当。

**力学量算符** 由于微观现象的统计规律性，量子力学中的物理量，如坐标、动量、能量和角动量等通常不具有确定的值，而只能取一系列的可能值，且按一定的概率取某种可能值。为了反映这一特点，量子力学中的力学量不能像经典力学中那样采用代数量表示，而需要用“算符”表示。算符是对波函数进行运算的符号。作为例子，当一维运动粒子状态的波函数表示为  $\psi(x, t)$  时，坐标算符就是  $x$ ，而动量算符为

$$p = -i\eta \frac{\partial}{\partial x}；$$

当波函数表示为  $(p, t)$  时，坐标算符是  $x = i\hbar \frac{\partial}{\partial p}$ ，而动量算

符是  $p$ 。其他力学量则可表示为坐标和动量算符的函数。

利用力学量算符和状态波函数可计算在该状态中测量该力学量所得到的可能值，取某种可能值的概率，以及平均值。量子力学感兴趣的正是如何从理论上算出这些可能值（亦称“本征值”）、概率以及平均值，因为这些量是与实验上的可测量相联系的。例如原子中的能级就是当测量该原子的能量时所得到的系列可能值。再如，原子谱线的强度，原子激发态寿命，电子或  $\alpha$  粒子对原子的散射截面等实验上的可测量，则均与跃迁概率有关。量子力学正是通过力学量算符和波函数的引进，建立了微观现象的理论和实验之间的联系。

**波动力学和矩阵力学** 量子力学有两种表述方式，即波动力学表述方式和矩阵力学表述方式。用波函数描写微观现象的状态，用作用于波函数的微分算符表示力学量，这就是波动力学。上面所介绍的就是这种表述方式。在矩阵力学中，微观粒子的状态和力学量都用矩阵表示。所以，波动力学中的基本方程都是微分方程，而在矩阵力学中则都是矩阵代数方程。矩阵力学是海森伯和约旦等人于 1924 年 ~ 1925 年间建立的。1927 年，狄拉克发现矩阵力学和波动力学这两种表述方式是等价的。

《量子力学演讲集》(Lectures on Quantum Mechanics) 狄拉克著。1964 年发表。是对他本人在 50 年代中发展起来的约束体系量子化方法所作的系统而简明的阐述。全书就量子力学的几个基本问题作了四次演讲：哈密顿方法，量子化问题，曲面上的量子化，平面上的量子化。

该书一开头就提出：“量子场论是相当困难的；而且迄今为止，人们也只能对相当简单的几种场和它们之间的简单相互作用建立起量子场论。很可能这些简单的场以及它们之间的简单相互作用并不足以描述自然界。...为了能够从处理更一般的场这一问题着手，我们必须考察经典理论。如果我们能够将经典理论纳入哈密顿形式，那么也就总能够用一定的标准规则得到量子理论的一级近似。我的演讲要涉及的主要是如何把一个普遍的经典理论纳入哈密顿形式的问题。”

事实上约束体系在经典力学中并非罕见，但进行量子化却十分困难，直到 50 年代末，才由狄拉克等应用推广的哈密顿方法予以解决，本书的四讲基本上概括了狄拉克在这方面所作的工作，即从经典作用量原理出发，并将作用量积分取成洛伦兹不变量，由这个作用量得出拉格朗日量，接着将拉格朗日量过渡到哈密顿量，最后再按照一定规则得到了量子理论。可以说这是量子力学在 20 年代创立以来的又一重大发展。

60 年代末，应用狄拉克这一方法解决了杨—密耳斯规范场的量子化这一著名难题，此后约束动力学问题就日益受到物理学界的普遍重视，并用它来研究各种复杂问题。全书思路清晰，叙述严谨，无论对物理思想或数学结构的论述，都反映出作者独特的观点和风格，是关于约束体系量子化问题的经典著作。

**量子论 (quantum theory)** 亦称旧量子论。通常指本世纪最初 20 年由普朗克、爱因斯坦和玻尔等人所建立的研究微观现象的初步理论。这种理论揭示了经典物理学在微观领域的不适用性，并且从基本观念上为本



世纪 20 年代量子力学的建立和发展奠定了基础。

**普朗克的能量子观念** 1900 年为了解释黑体辐射的能量与波长的函数关系（即能谱）的实验结果，普朗克首先提出了“能量子”观念。他认为物质吸收或发射电磁辐射的能量是不连续的，只能取  $0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots$  等分立的值，其中  $\nu$  为辐射场的频率， $h$  称为普朗克常数，其值可通过凑合实验数据而得到。可见， $h\nu$  是在黑体辐射现象中出现的能量的最小单位，称为能量子。普朗克在这里首次引进了能量量子化观念，而这种观念是与经典物理学的观念相矛盾的。黑体器壁吸收或发射电磁波的过程实际上涉及到构成器壁物质的原子与电磁场的相互作用问题，这是一种微观现象。因此普朗克在这里也首次揭示了经典物理学在微观领域的不适用性。

**爱因斯坦的光量子观念** 爱因斯坦于 1905 年应用普朗克的能量子观念成功地解释了光电效应，并且进一步认为，电磁辐射或光的能量不仅仅在物质吸收或发射时显示出它的分立性，而且在其传播过程中亦是如此。爱因斯坦于是首先建立了“光量子”（即后来所谓的“光子”）观念，电磁波或光是由一份份光量子构成，或者说光量子是构成电磁场或光的基本粒子。每份光量子的能量为  $E=h\nu$ ，动量为  $p=h/\lambda$ ，这里  $\nu$  和  $\lambda$  分别为光的频率和波长。

**爱因斯坦的固体比热理论** 按照经典物理学，固体的定容比热是常数（杜隆—珀替定律，1819 年）。但是后来的实验发现，在极低温度下固体比热将趋于零。1907 年，爱因斯坦应用量子论概念解释了这种固体比热在低温区随温度下降的现象。

**玻尔的氢原子模型** 1913 年，玻尔将量子化观念应用到原子结构领域，认为原子光谱的分立性暗示了原子内部电子运动稳定状态的分立性，从而建立了玻尔模型，成功地解释了氢原子光谱的规律性。在玻尔的工作中，还引进了定态、能级、量子跃迁等概念，这些概念后来被证明对于微观粒子状态的描述是非常有用的。在玻尔建立氢原子理论之后不久，德国物理学家索末菲等人又将玻尔的圆轨道理论推广为椭圆轨道理论，提出了普遍的量子化规则。

量子论的基本观点是革命性的，但是在处理具体问题时又处处显示了经典物理学的影响，所采用的方法基本上还是经典物理学方法，只是对某些量（如氢原子中电子的轨道角动量）引进了附加的“量子化条件”。所以，量子论虽然在解释黑体辐射、光电效应以及氢原子光谱等方面取得了一定的成功，但是却存在根本性的困难。例如，它不适用于非周期性运动系统；不能解释光电效应的频率分布和角分布；不能解释光谱线的强度；对于氢原子光谱中的精细结构，以及对于稍许复杂些的原子的光谱，也都无法给出解释。这些困难后来为 20 世纪 20 年代建立起来的量子力学所解决。不过由于量子论的直观性，现在仍常用来定性解释某些现象。

**量子数（quantum number）** 微观现象中用以表征某些只能取分立值的物理量的数。量子理论中表征微观粒子可能状态的有些物理量（如坐标、动量）可取连续值，但是一般更重要的物理量（如轨道角动量、自旋角动量、能量、同位旋、色等）只能取某些分立的值。例如，一维简谐振子可能状态的能量为

$$E_n = \eta\omega\left(n + \frac{1}{2}\right),$$

其中  $\eta = h/2\pi$ ， $h$  为普朗克常数， $\nu$  为频率， $n$  就是与能量相应的量子数，它可取  $0, 1, 2, \dots$  等非负整数值。再如有心力场中运动的粒子系统（如氢原子），其轨道角动量  $L$  以及它沿  $z$  轴方向的分量  $L_z$  都是守恒物理量，它们的值分别为  $L = \sqrt{l(l+1)}\eta$ ； $L_z = m\eta$ ，其中  $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ，称为“轨道角动量量子数”； $m = -l, -l+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, l-1, l$ ，称为“磁量子数”。对于电子的自旋状态来说，它的自旋角动量为  $s = \sqrt{s(s+1)}\eta$ ，其中  $s$  称为“自旋角动量量子数”，其值恒等于  $\frac{1}{2}$ 。

电子自旋沿空间任一  $z$  方向的分量为  $s_z = m_s\eta$ ，其中  $m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ ，称为“自旋磁量子数”。

微观粒子的运动状态可用量子数表征。例如一维线性谐振子的可能状态可用波函数表示为  $\psi_n(x, t)$ ，或者简单地用符号表示为  $|n\rangle$ 。对于氢原子来说，绕原子核运动的电子是在三维空间中运动的，有三个自由度。再考虑到电子的自旋自由度，这时就要用四个物理量，或者相应地用四个量子数来表征氢原子中电子的运动状态。这四个量子数在简单的情况下是  $n, l, m_l, m_s$ ，其中  $n$  称为“主量子数”，它与氢原子能量可能

值  $E_n = -I \frac{1}{n^2}$  ( $I = 13.6\text{eV}$ ) 相对应。因此氢原子中的电子状态可用波函数  $\psi_{n l m_l m_s}(x, t)$ ，或者用符号  $|n l m_l m_s\rangle$  表示。

**量子态 (quantum state)** 微观粒子系统的状态。这种状态常常可表示为几个或一系列可能状态的叠加态。叠加系数的模的平方就是在该系统状态中出现某种可能状态的概率。这是微观现象概率性的表现。微观粒子系统所具有的可能状态是指某个力学量或某些力学量具有确定值的状态，它们常常是分立的。这也是微观现象的分立性或量子性的表现。概率性和量子性实质上均来自波粒二象性。

**量子统计 (quantum statistics)** 研究服从量子力学规律的全同微观粒子集合的统计方法。

自然界中存在的微观粒子集合（或由微观粒子构成的系统）按照状态波函数的对称性质可分为两大类：一类系统的状态波函数对任何一对粒子位置坐标的互换是对称的，这些微观粒子称为玻色子。玻色子具有整数自旋量子数。任意数目的玻色粒子可以共同占据任何一个量子状态。在物质粒子中例如介子就是玻色子，它的自旋量子数是零。光子在作为物质粒子处理时也是玻色子，它的自旋量子数是 1。玻色子遵循的统计方法称为玻色—爱因斯坦统计，它是由玻色和爱因斯坦在 1924 年先后提出的。另一类系统的状态波函数对任何一对粒子位置坐标的互换是反对称的，这些微观粒子称为费米子。费米子具有半整数的自旋量子数。费米子在占据量子态时必须服从泡利不相容原理，每个量子态至多只能被一个费米子占据。在物质粒子中例如电子、 $\mu$  子、质子和中子都是

费米子，它们的自旋量子数都是  $\frac{1}{2}$ 。费米子遵循的统计方法称为费米

—狄拉克统计，它是由费米和狄拉克在 1926 年先后提出的。

有些粒子集团中的粒子十分紧密地结合在一起，以至可以把整个集团

作为“粒子”看待。当每个“粒子”由偶数个费米子组成时（例如氦原子核就由两个质子、两个中子和数目不定的中子构成），这些“粒子”集合遵循玻色—爱因斯坦统计；当每个“粒子”由奇数个费米子组成时，则“粒子”集合遵循费米—狄拉克统计。

考虑一个处于平衡状态的由大量近独立粒子构成的孤立系统，它具有确定的粒子数  $N$  和体积  $V$ ，其能量在  $E \sim E + \Delta E$  ( $\Delta E \ll E$ ) 之间。以  $\epsilon_i$  和  $\omega_i$  分别表示单粒子的第  $i$  个能级和该能级的简并度，以  $a_i$  表示处于这个能级上的粒子数，这时可实现的粒子数分布  $\{a_i\}$  显然必须满足如下条件：

$\sum_i a_i = N$ ， $\sum_i \epsilon_i a_i = E$  ( $i = 1, 2, \dots$ )。由于玻色子的全同性以及任意多玻色子可以共同占据任一量子态，因此全同玻色子系统可能出现的不同的微观状态数为

$$\Omega = \prod_i \frac{(\omega_i + a_i - 1)!}{a_i! (\omega_i - 1)!}$$

对于全同费米子系统，至多只有一个费米子可以占据任一量子态。由此可得，全同费米子系统可能出现的不同微观状态数为

$$\Omega = \prod_i \frac{\omega_i!}{a_i! (\omega_i - 1)!}$$

根据统计物理的等概率假设，对于处在平衡状态的孤立系统，每一个可能的微观状态出现的概率是相等的，因此，使  $\Omega$  为极大的分布，出现的概率最大，称为最概然分布。

利用拉氏乘子法可以得到全同玻色子系统中粒子的最概然分布为

$$a_i = \frac{\omega_i}{e^{(\epsilon_i - \mu)/kT} - 1}$$

全同费米子系统的分布为

$$a_i = \frac{\omega_i}{e^{(\epsilon_i - \mu)/kT} + 1}$$

以上两式分别称为玻色分布和费米分布。式中  $\mu$  是化学势。利用关系式： $\sum_i a_i = N$  可确定化学势  $\mu$  对温度  $T$  和粒子数  $N$  的依赖关系。玻色统计

中的化学势总是负的 ( $\mu < 0$ )，对于光子气体，由于光子数目不确定，在处于热平衡条件下，给定  $T$  和  $V$ ，光子气体自由能  $F$

为极小，从而有  $\left(\frac{\partial F}{\partial N}\right)_{T, V} = 0$ ，即光子气体的化学势  $\mu = \left(\frac{\partial F}{\partial N}\right) = 0$ 。费

米统计中的化学势  $\mu$  可正可负。

在玻色分布和费米分布的表示式中，如果  $e^{\frac{\mu}{kT}} \ll 1$ ，分母中  $\pm 1$  这一项可忽略，这两种分布都过渡为玻耳兹曼分布  $a_i = \omega_i e^{(\mu - \epsilon_i)/kT}$ ，而且显然有  $\frac{a_i}{\omega_i} \ll 1$  (对所有  $i$ )，此时任一量子态上平均粒子数远小于 1，这就

是玻色分布和费米分布过渡为玻耳兹曼分布的非简并性条件。一般气体的密度越低，所处的温度越高，越容易满足非简并性条件。反之，对于高密度或低温系统，必须采用玻色统计或费米统计。

对全同玻色子系统和全同费米子系统，可以定义巨配分函数：

$$\Xi = \prod_i [1 + \mu e^{(\mu - \epsilon_i)/kT}]^{\mu \omega_i} \quad (\text{式中“ - ”号对应玻色系统, “ + ”号对应费米系统})$$

米系统), 如果求得巨配分函数的对数, 就可以求得系统的基本热力学函数, 从而确定系统的平衡态性质。

**量子物理学 (quantum Physics)** 研究微观现象的物理学, 与经典物理学相对应。其研究领域包括原子和分子物理学、原子核和粒子物理学, 此外还可包括半导体物理学、固体和凝聚态 (如超导、超流态等) 物理学等。在这些领域的现象中, 物质粒子和场的波粒二象性都很显著, 因而常常导致许多重要的物理量只能具有分立的值, 或者说是量子化的。因此常常将这些领域的物理学统称为量子物理学。研究微观粒子的状态及其运动基本规律的量子物理学称为量子力学, 它是量子物理学的基础。在这基础上又发展了量子统计和量子场论等。在某些现象中如果粒子的波动性可以忽略, 则相应的量子力学理论便可近似过渡到经典力学。所以从这个意义上说, 量子物理学包含了经典物理学。量子物理学的基本观点和基本方法现在已被广泛应用到化学和生物学等领域, 从而形成了“量子化学”和“量子生物学”等。

**量子液体 (quantum liquid)** 在绝对零度时, 仍然保持液体的性质, 如氦和氦。所有物体在绝对零度下都应该呈固态, 但是由于氦原子之间的相互作用特别弱, 所以一直到量子效应起重要作用的温度下仍然保持液态, 其后也不会再凝结成固态。

量子液体分为玻色型和费米型两种。玻色型量子液体内的粒子具有整数自旋; 而费米型量子液体内的粒子具有半整数自旋。玻色型量子液体具有一种奇妙的超流动性, 如液态氦在极低温度下呈现的无阻畅通流动的性质, 即它能流过毛细管或狭缝而不显示出任何粘滞性质。

**量子跃迁 (quantum transition)** 微观状态发生跳跃式变化的过程。由于微观粒子的状态常常是分立的, 所以从一个状态到另一个状态的变化常常是跳跃式的。量子跃迁是状态分立性在状态发生变化时的必然结果。与此种情况不同, 在经典物理中粒子的状态常是连续的, 所以从一个状态过渡到另一状态是连续变化的。

量子跃迁发生之前的状态称为初态, 跃迁发生之后的状态称为末态。例如, 原子在光的照射下从高能态放出一个光子而跃迁到低能态就是一种量子跃迁过程, 称为原子的“受激辐射”。反之, 在光照下原子从低能态吸收一个光子而跃迁到高能态, 则称为“吸收”过程。在这些过程中放出或吸收的光子的能量等于原子的初态和末态两个能级之差, 这是能量守恒定律在微观现象中的体现。不受到光的照射, 处于激发态的原子也可能自动跃迁到低能态, 同时放出一个光子, 此过程称为“自发辐射”。此外在原子核和基本粒子现象中也存在许多量子跃迁现象, 如原子核和基本粒子的衰变过程、聚变过程和裂变过程等。

量子跃迁过程的重要特征是它的概率性。例如在自发跃迁过程中, 若初态时有许多原子处于某一激发态, 则跃迁过程的概率性表明人们无法预言其中某个原子自发跃迁到基态的确切时刻。或许有些原子跃迁发生得早些, 而有些发生得迟些。所以每个原子停留在激发态的时间 (称为激发态寿命) 并不相同。但是对于大量某种原子来说, 每一激发态寿命的平均值是一定的, 可以通过实验测定, 也可通过量子理论算出。称为“平均

寿命”，简称“寿命”。寿命的倒数  $1/\tau$  称为“跃迁速率”，其特征是跃迁过程的快慢程度。原子的自发跃迁速率约为  $10^8 \text{ 秒}^{-1} \sim 10^9 \text{ 秒}^{-1}$ ，激发态寿命约为  $10^{-8} \text{ 秒} \sim 10^{-9} \text{ 秒}$ 。高温下原子发光主要是原子内外层电子（价电子）自发跃迁的结果。放射性元素放出射线则是原子核自发跃迁的结果。

量子跃迁是微观状态由于相互作用而产生的变化过程，这种过程应当满足各种守恒定律。因此跃迁前后描述初态和末态的物理量或量子数应满足一定的关系，这种关系称为“选择定则”。

**裂变反应堆**（fission reactor）简称反应堆或堆。一种实现可以控制的裂变链式反应的装置，是人类利用核能的一种重要的大型设备。裂变反应堆除了用于发电（核电站）外，它还可产生大量中子并被引出用于科学研究，可以制造放射性同位素和核燃料（如钚—239，铀—233）。

**反应堆的组成** 反应堆的中心部分由燃料元件、减速剂和载热剂等组成。反应堆中产生核链式反应的物质称为核燃料或裂变材料。只有能大量获得并易于吸收热中子，从而引起裂变反应的核素才能作为核燃料。这类核素有铀—235、铀—233 和钚—239 三种。只有铀—235 存在于天然铀中，而铀—233 和钚—239 都由反应堆生产。在采用铀作为燃料的反应堆中总有铀—238 存在，它本身不易发生裂变，但它吸收中子后可变成钚—239，一部分在堆内作为燃料消耗，另一部分进行化学处理（称为后处理）后可以回收。将钍—232 加入燃料元件中则可以生产出铀—233。

当铀—235 裂变时，放出的中子能量平均值大约为 2MeV，但使铀—235 发生裂变效率高的是能量不到 1eV 的所谓“热中子”。所以通常制成棒状的燃料元件将被插入减速剂（石墨、重水等）中，裂变时放出的中子与石墨或重水的原子碰撞后被减速成热中子，以便使裂变反应得以维持。裂变时放出的能量以热能的形式由载热剂（如普通水、重水、氦、二氧化碳或液态金属钠等）经管道流动而输送到反应堆外，以供利用。

**反应堆的控制** 通过向堆内增加或减少能强烈吸收中子的材料，以达到控制核链式反应强度的目的。硼、镉及其他化合物都可作为控制材料。通常将它们做成棒状，称为控制棒。通过控制棒插入堆芯的深浅程度来控制反应速率。控制棒又可分为安全棒、补偿棒和调节棒。安全棒的作用是，当反应堆发生意外事故时，它可借助于重力或弹簧装置迅速进入堆芯，使反应堆停闭。补偿棒或调节棒则用来调整反应堆的功率，使之达到额定水平。

**反应堆的种类** 按照用途，可将反应堆大致分为三类，即生产堆、研究试验堆和动力堆（包括供热堆）。生产堆主要生产核武器使用的钚—239 和氚，也可生产其他放射性核素。研究试验堆常常主要用于提供中子源，应用于核物理、中子物理、材料物理以及化学、生物学和医学等领域的科研工作。功率极低（通常在 100 瓦以下）的研究堆称为“零功率”堆。这种堆的主要物理性能不随堆的功率高低而发生显著变化，其结构简单，放射性很小，工作人员易于接近操作，改变条件也可进行各种实验研究。零功率堆常作为实际的生产堆或动力堆的模拟进行研究，取得数据。动力堆用来发电或提供军舰或潜艇的动力。目前大型核电站动力堆又有多种型式，如压水堆、沸水堆、重水堆、石墨气冷堆以及增殖堆等。压水堆用普通水作减速剂和载热体，用浓缩氧化铀作燃料。堆芯装在压力壳中，堆内压力可达 150 个大气压，堆芯出口处温度可达 330℃。压水堆已有 30 多年

历史，是目前国际上最多的堆型。沸水堆与压水堆的构造大致相同，主要区别是，沸水堆容许水在堆芯内沸腾，产生蒸汽，并被直接引出推动汽轮机。重水堆则用重水作减速剂和载热体。重水堆的优点是可以采用天然铀作为燃料。但重水价格昂贵，重水循环回路密封要求高，所以重水堆发电成本较高。石墨气冷堆用天然铀或浓缩铀作为燃料，二氧化碳作为载热体。在增殖堆中，天然铀中主要是铀—238，还有一部分钚—239。如果一个钚—239 在中子作用下发生了裂变反应，同时放出几个中子，其中一个引起其他钚—239 发生裂变，余下的中子被铀—238 俘获后蜕变成钚—239。于是这块天然铀中不但有钚—239 的链式反应，而且还有钚—239 的增殖。

**反应堆的防护和安全** 反应堆运行过程中产生大量中子，裂变产物也具有放射性，所以必须采取严格的防护措施。为此，反应堆通常设有三道屏障。第一道是燃料元件的芯片和包壳，它们能将绝大部分放射性屏蔽掉。第二道是反应堆的回路，包括堆芯和回路的密封系统，都要十分坚固，一般情况下不会让放射性核素泄漏到外面去。第三道屏障是钢筋混凝土或钢制成的安全壳，它将整个反应堆和循环回路密封起来，万一前两道屏障失灵，它仍可提供安全保证。此外，为了避免发生事故，在反应堆各部分应安装各种监督信号系统和事故保障系统，还要采取一系列安全措施，严格操作规程及管理制度等。

**磷光和荧光 (phosphorescence and fluorescence)** 发光体受外界激发而发光的一种现象。在历史上曾将这种发光现象分为两类：激发作用一停止，发光随之消失的称为荧光；激发作用停止后，还有余辉的称为磷光。后来发现，所有发光现象都有余辉，于是又常把余辉短于  $10^{-8}$  秒的叫做荧光。余辉长于  $10^{-8}$  秒的叫做磷光。 $10^{-8}$  秒是只考虑电偶极辐射时孤立原子处于激发的时间，但若计及级次更高的辐射，原子处激发态的平均寿命可达  $10^{-4}$  秒甚至更长些。随着测量技术的提高和对发光过程了解的深入，人们已认识到用孤立原子处于激发态的寿命时间作为磷光和荧光的分界是不确切的。在现代，除了习惯上有时还沿用这两个名词外，一般不再把发光划分为两类，发光体受外界激发而发光称为磷光。

**灵敏电流计 (galvanometer)** 测量微小电流的高灵敏度仪表。广泛用作确定某一被测电路是否有电流或电压的指零仪器。又称为检流计。可测量短暂脉冲电量的电流计叫冲击电流计。采用磁电系结构，为消除可动部分轴和轴承间的摩擦，用悬丝（吊丝或张丝）悬挂动圈及光反射的读数装置。其结构示意图如图。悬丝为用紫铜或黄金制成的金属带，厚约几十分之一毫米，宽度在 1 毫米左右。它既作线圈的引线。又产生小的反作用力矩。当线圈通电后磁力矩与悬灵敏电流计结构示意图丝的反力矩平衡时，动圈停留在某一偏转位置。小镜的正前方有产生狭窄光束的小灯和刻度尺，动圈偏转，引起反射镜的转动，使标尺上的光带移动，指示电流的读数。

灵敏电流计的主要参数有：电流灵敏度（电流常数的倒数）、内阻、临界电阻、自由振荡周期和阻尼时间等。为能正确而迅速地读取被测量的数值，必须选择合适的灵敏度及阻尼状态。

**流管 (tube offlow)** 用以描述流体在同一瞬间的流动而引入的管状曲区。稳定流动中由一旋流线围成的管状区域。由于是稳定流动，因此流管内外的流体不会相互混杂，即流管内的流体不会跑出管外，管外的也

不会进入管内。也就是说稳定流动时流线不会相交。将流体划分成许多流管后，只要知道某一流管中的流体的运动规律，根据伯努利方程就可知道整个流体的运动规律。

**流迹 (flow track)** 见流线。

**流率 (flow rate)** 又称流量。单位时间内流过管道某一横截面的流体量。有以下几种情形：若以体积计，则称为体积流率，以  $Q_v$  表示，其数值等于横截面积  $S$  和流体在该面处流速  $V$  之积，即  $Q_v = Sv$ ；若以质量计，则称为质量流率，以  $Q_m$  表示，其数值等于流体密度  $\rho$ 、横截面积  $S$  和流速  $v$  之积，即  $Q_m = \rho Sv$ ；若以重量计，则称为重量流率，以  $Q_w$  表示，其数值等于质量流率  $Q_m$  乘以重力加速度  $g$ ，即  $Q_w = Q_m g = \rho g Sv$ 。

**流体 (fluid)** 液体和气体的总称。流体是由大量不断地做热运动的流体分子构成的，其基本特征是没有固定的形状和具有流动性。流体可分为理想流体和粘滞流体两类。实际流体都具有一定的粘滞性，因此都是粘滞流体。当其相对于固体（如管壁或流体中运动的物体）流动时，由于附着力的作用，贴近固体的一层流体粘附在固体表面上静止不动，其邻近一层则对此作相对滑动，以致相邻各层的流速递减，在与流动相垂直的方向上形成一速度梯度，而呈现出粘滞性。理想流体是忽略了流体的内摩擦力以及附着在同其接触的运动物体表面上的情况，是粘滞流体在某些情况下为便于分析和计算而引入的理想概念。近年来，人们普遍地采用更确切的名词“非粘滞流体”来代替理想流体。

**流体力学 (fluid mechanics)** 经典力学的一门分支学科。主要研究液体、气体、等离子体在平衡尤其是运动时的宏观状态和规律。分为流体静力学和流体动力学两大类。

**发展简史** 对流体力学学科的形成作出贡献的首先是古希腊的阿基米德，他建立了包括物体浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论，奠定了流体静力学的基础。17世纪，帕斯卡首先阐明了静止流体中压力的概念；牛顿研究了在流体中运动物体所受到的阻力与哪些因素有关的问题，得出了牛顿粘滞定律。之后，伯努利建立了联系压力、高度和流速的方程。差不多同时，法国的皮托发明了测量流速的皮托管；瑞士的欧拉在忽略粘性的假定下建立了描写理想流体运动的基本方程。欧拉方程与伯努利方程的建立，是流体动力学作为一个分支学科的标志，但以上研究中都只考虑无粘流体，不能阐明粘性流体的规律。

19世纪，随着生产技术中碰到越来越多的工程问题，尤其是带有粘性影响的问题需解决，因此开辟了另一条与流体力学研究方法不同的途径，即部分运用流体力学、部分采用归纳实验结果的半经验公式，形成了水力学。1822年法国纳维考虑了粘性影响的流体运动方程，1845年，斯托克斯又以更合理的基础导出了这个方程，后来被人们称为纳维-斯托克斯方程，一直沿用至今。雷诺在1876年~1883年间，通过实验阐明了直管道中层流到湍流的过渡条件。

20世纪初，飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。在20至30年代，空气动力学的研究偏重于低速流动，而40年代以后，由于喷气推进和火箭技术的应用，进而实现了航天飞行，使气体高速流动的研究进展迅速，形成了气体动力学、物化流体动力学等分支学科。50年代起电子计算

机的应用和不断完善，使原来用分析方法难以进行研究的课题，可以用数值计算方法来进行，出现了计算流体力学这一新的分支学科。

**学科内容** 在人们生活和生产活动中随时随地都会遇到流体，大气与水是最常见的两种流体。大气运动、海水运动（包括波浪、潮汐等），乃至地球深处熔浆的流动都是流体力学的研究内容，属于地球流体力学范围。

人们利用水做功，船舶一直是人们的交通运输工具，船舶在水中运动时所遇到的各种阻力、船舶的稳定性及船体和推进器在水中引起的空化现象，一直是船舶水动力学的研究课题，这些研究有关水的运动规律的分支学科称为水动力学。

20世纪初飞机的问世以及随之其他飞行器的出现，使人类的活动范围扩展到其他星球和银河系，形成了空气动力学和气体动力学，成为流体力学中最活跃、最富有成果的领域。

石油和天然气的开采，地下水的开发利用，要求了解流体在多孔或缝隙介质中的运动，这是流体力学的分支之一渗流力学研究的主要对象。

研究人体和其他动植物中有关流体力学的问题，例如血液在血管中的流动，心、肺、肾中的生理流动运动，植物中营养液的输送等问题，形成了生物流变学。

因此，流体力学既包含自然科学的基础理论，又涉及工程技术科学方面的应用。

研究方法可分为现场观测、实验室模拟、理论分析、数值计算等方面。

**现场观测**：对自然界固有的流动现象或已有工程的全尺寸流动现象，利用各种仪器进行系统观测，从而总结出流体运动的规律并借以预测流动现象的演变。 **实验室模拟**：在实验室内，流动现象可以在短得多的时间内和小得多的空间中多次重复出现，可对多种参量进行隔离并系统地控制和改变实验参量，寻找其规律。 **理论分析**：根据流体运动的普遍规律（如质量守恒、动量守恒、能量守恒等），利用数学分析手段，研究流体的运动，解释已知现象，预测可能发生的结果。 **数值计算**：对理论分析建立的模型所得方程组进行数值方法求解。电子计算机的出现与发展，使许多原来无法用理论分析求解的复杂流体力学问题有了求得数值解的可能性，可以部分或完全代替某些实验，节省实验费用。

**流线**（stream line）用以描述流体在同一瞬间的流动情形而引入的曲线。流线上任何一点的切线方向就是流体质点在该点时的速度方向。

流迹也是流体质点在空间运动时所描述出来的曲线，但流迹与流线是两个具有不同意义与内容的曲线。流线是同一时刻不同流体质点所组成的曲线；而流迹是同一流体质点在不同时刻形成的曲线。在一般的非稳定流动（也称非定常运动）情形，这两种曲线是不重合的，只有在稳定流动（流体在任一点处的流速不随时间而变化，也称定常运动）时，这两种曲线才重合，此时流线、流迹形状不随时间而变。

**留声机**（phonograph）又称唱机。使唱片发放声音的机器。由旋转机构和唱头两部分组成。旋转部分由弹簧发条或马达驱动，使水平圆盘和放在它上面的唱片做匀速转动，圆盘的转速可由调速器调节。唱头一端装有金属膜片，膜片中心和唱针相连接，随着唱片的转动，由杠杆作用把振动放大，推动膜片作相应的振动，就可以得到与灌片时相同的声音。为了



使唱头上膜片振动有效地发声，可在膜片后接一喇叭。

第一台留声机是美国发明家爱迪生于 1877 年发明的。它的外形并不像现在的留声机，由一个金属圆筒（圆筒外面包着锡箔）、喇叭、薄膜和钢针等组成。录音时，对着喇叭发音，同时用手柄转动圆筒。声音传到喇叭底部，引起金属薄膜振动，同时与金属薄膜相连的钢针也相应振动。由于钢针与锡箔接触，于是针尖在锡箔上刻出深浅不同的痕迹。刻痕的深浅与声音的大小高低相对应，这样就把声音记录下来。如果要使声音重新放出来，只要把喇叭上的钢针放在锡箔上，用手柄转动金属圆筒，此时钢针依次沿着刻槽振动，并使喇叭底部的金属薄膜也做相应的振动，这样就可听到原来录制下来的声音。留声机的这种机械发声机构，灵敏度低、失真大，随着电唱机的出现，留声机已被淘汰。

**卢瑟福**（Ernest Rutherford 1871~1937）英国物理学家，核物理学的创始人。出生于新西兰纳尔附近的一个苏格兰移民家庭。早年就读于新西兰大学坎特伯雷学院，英文学士、文硕士和理硕士。1895 年获奖学金赴英国剑桥大学、卡文迪什实验室。在汤姆孙指导下研究电磁波的发射与接收。1898 年~1907 年，他在汤姆孙的推荐下赴加拿大任麦吉尔大学教授，并当选为英国皇家学会会员。1907 年回英国任曼彻斯特大学教授和物理实验室主任。1919 年起，任英国剑桥大学教授和卡文迪什实验室主任。1925 年~1930 任英国皇家学会会长。1931 年英国政府授予他“勋爵”的荣誉。

卢瑟福对物理学的主要贡献如下。

**放射性** 卢瑟福对于放射性的研究，开拓了原子物理和核物理的新领域。1896 年贝克勒尔发现了铀自动发射出一种穿透力很强的新的辐射，它能使空气电离。这种现象引起了他的重视，于是他将注意力转移到这个新的研究领域。1898 年他发现铀放射性辐射的成分有两种：一种穿透力弱的，他称之为  $\alpha$  辐射，另一种穿透力较强的，他称之为  $\beta$  辐射。1902 年他成功地用磁场偏转了  $\beta$  辐射，确定  $\beta$  辐射是带正电荷的粒子流。后来又测定了  $\alpha$  粒子的速率和荷质比。1907 年，他在助手盖革和马斯顿的协助下，发现千分之一克镭，每秒钟会放射出 136000 个  $\alpha$  粒子。1908 年他确定了  $\alpha$  粒子的电荷数是氢离子电荷数的 2 倍。并用光谱法证实了它就是带电的氦核。卢瑟福对放射性另一个重要贡献是提出了放射性衰变理论。1899 年居里夫妇发现在放射源附近的物体会取得一种感应放射现象。卢瑟福在研究这种感应放射现象时发现：放射性物质钍和它的化合物会衰变成一种气体，接着再衰变成一种未知的“放射性淀质”，是“淀质”造成了感应放射现象。他邀请英国化学家索迪一起对三族放射性元素——镭、钍和锕进行研究，并提出放射性现象乃是一种放射性元素的原子自发地衰变为另一种放射性元素的原子的过程。这就是原子自然衰变理论。这个理论突破了从道尔顿时代以来所牢固建立的原子不变的概念，深化了人们对物质世界的认识。1904 年他编著《放射学》一书，总结了这方面的研究成果。他因研究放射性所取得的成果荣获 1908 年诺贝尔化学奖。

**原子的核式模型** 1906 年卢瑟福在麦克吉耳大学的时候，就注意到粒子的散射问题。他发现用小孔校直了的  $\alpha$  粒子束穿过空气时在照相底板上留下轮廓清晰的光斑，但是，在  $\alpha$  粒子经过的路径上，放置一块厚度仅有 20 微米的云母片时，光斑就变得模糊了。引起模糊的原因是有一部分

粒子偏转了大约  $2^\circ$  的角度。卢瑟福计算了引起粒子偏转的电场强度约为  $10^8$  伏/厘米。他认为“这个结果肯定了物质的原子中应该聚集巨大的电力”。1908年卢瑟福回到英国在曼彻斯特大学任教。他的助手盖革首创了粒子的闪烁计数法，并开始对粒子的散射现象进行定量研究。1909年盖革和马斯顿在卢瑟福的建议下，用粒子轰击金属（金、铝）箔。实验结果出乎意料，有一小部分粒子改变了方向，而且每 8000 到 10000 个粒子中就有一个被反射回来。卢瑟福后来回忆时说：“这是我一生中最不可想象的事情，就好像我们向卷烟纸（薄纸）射去一颗 5 英寸直径的炮弹，而它又被反弹回来一样，不可思议。”卢瑟福按照老师汤姆孙的“葡萄干蛋糕”式的原子模型和多次碰撞理论来计算粒子发生大角度散射的概率，与实际发生的频率相差甚远。于是他认识到，原子必定是仅通过一次碰撞就把粒子挡回去的强电场座。又经过半年的思索，他终于想到了原子有一个核。他估算了金原子的核半径不超过  $3 \times 10^{-12}$  厘米。1911年他提出了原子的核式模型：原子中有一个体积很小的带正电荷的核，核具有原子的绝大部分质量。电子沿轨道绕核旋转，像行星环绕太阳一样。某种元素原子核的正电荷数等于元素周期表上的原子序数，与沿轨道旋转的电子数相同，对原子整体来说，原子呈中性。虽然这种完全建立在经典理论基础上的卢瑟福模型，在能量和稳定性方面尚不能自圆其说，几年后被包含了早期量子论概念的玻尔原子模型所取代，然而，正是由于他的工作，一举把原子结构的研究引上了正确的轨道。他也因此被誉为原子物理学之父。

**原子的人工嬗变** 1919年卢瑟福在实验时注意到这样的事实：在标准气压下，一般粒子在空气中的射程是 2.6 厘米 ~ 11.5 厘米。只要荧光屏距粒子源稍大于这个距离，荧光屏上就观察不到粒子撞击屏时发出的闪光。但若把空气换成氮气后，荧光屏上又看到了闪光，而且当荧光屏距离放射源约 40 厘米时，仍可以看到粒子引起的闪光。卢瑟福认为这是一种由粒子打入氮核内，使氮核发生反应后放出的“新粒子”。经测定它是质子。卢瑟福的实验是世界上第一次用人工方法使原子核发生了转变。从而奠定了现代核物理的基础。1920年他预言了中子和氦核的存在。1933年他与奥利芬合作，用实验证明在核反应中质量和能量相互关系定律的正确性。1934年实现了氦核的聚变反应（生成氦）。

在第二次世界大战期间，他担任学术资助委员会主席，帮助过上千名逃离德国的避难者。他热心培养青年，经他指导和提携的学生有许多人成为杰出的物理学家和诺贝尔奖的获得者。从而在他的周围形成了一个很大的物理学派。著有《放射性》（1904）、《放射性变化》、《放射性物质及其辐射》、《物质的电结构》，与 J.查克威克、C.D 埃利斯合著《放射性物质的辐射》等。《卢瑟福论文集》三卷，于 1962 年 ~ 1965 年出版。

**卢瑟福散射** (Rutherford scattering) 粒子（即氦原子核）束与原子的散射，是原子物理学发展过程中最重要的实验之一。该实验为原子的有核模型提供了坚实的基础。1909年，在卢瑟福指导下，盖革和马斯顿在用粒子束轰击重金属（如铝、金）箔原子的实验中发现“入射的粒子中每 8000 个粒子中有一个要被反弹回来”。这种大角度散射实验事实无法用正电荷均匀分布在整个球体内、电子则嵌在其中的“汤姆孙原子模型”作出解释。1911年卢瑟福在这个实验的基础上经过理论分析，终于

认识到“只有假定正电球的直径小于原子作用球的直径， $\alpha$ 粒子穿越单个原子时才会发生大角度散射。”卢瑟福于是建立了原子的有核模型，原子中的全部正电荷及绝大部分质量集中在原子中心很小的区域内（其线度约为原子线度的十万分之一），电子则在这个原子核的周围运动。当 $\alpha$ 粒子深入原子而接近原子核时，由于原子核正电荷的质量很大，对 $\alpha$ 粒子的很大斥力将迫使它发生大角度散射，甚至反弹回来。根据原子有核模型，卢瑟福还导出了每个原子使 $\alpha$ 粒子散射到 $\theta$ 至 $\theta+d\theta$ 之间立体角 $d\Omega$ 内的“微分散射截面”的公式，被称为卢瑟福公式：

$$d\sigma = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Ze^2}{2E}\right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}},$$

其中 $\epsilon_0$ 为真空电容率， $Z$ 为金属原子的原子序数，即原子核的电荷数， $E$ 为 $\alpha$ 粒子的能量。卢瑟福公式与 $\alpha$ 粒子散射实验的结果一致。

卢瑟福散射使人们发现了原子核以及原子的有核结构，这表明散射实验对于了解物质的微观结构及微观粒子间的相互作用特征是非常有效的。其后，物理学家又通过电子与原子的碰撞实验证实了玻尔的关于原子能级的假设（1914年）；通过高能电子—核子散射实验发现了质子和中子内部的电磁结构（1956年）；通过更高能量的电子—核子散射实验，进一步发现了质子和中子内部的夸克结构（60年代末）。目前世界上建造的各类大型加速器正是用来实现各种粒子之间的散射过程，并由此对各种粒子的性质、它们的内部结构以及它们之间的相互作用和相互转化规律进行探索和研究。

路程 (path) 见位移。

路端电压 (terminal voltage) 电源两极间的电压。等于电场力在外电路中把单位正电荷从电源正极移到电源负极所做的功，它等于外电路上的电压降。当外电路的电流为 $I$ ，负载总电阻为 $R$ 时，路端电压 $U$ 为

$$U=IR。$$

如果电源内阻为 $r$ ，当电源放电时，路端电压等于电源的电动势 $\epsilon$ 减去电源内阻 $r$ 上的电压降，即

$$U=\epsilon-Ir。（电源放电）$$

当电源充电时，它等于电源的电动势与电源内阻上的电压降之和，即

$$U=\epsilon+Ir。（电源充电）$$

当外电路断开（相当于负载电阻 $R$ 为无穷大）时，它等于电源的电动势，即

$$U=\epsilon。（开路）$$

陆学善（1905~1981）中国物理学家，中国晶体物理学研究的奠基人。1933年毕业于清华大学研究院。1934年赴英国留学。1936年获曼彻斯特大学物理学博士学位。同年回国后，先后被聘为北平研究院镭学研究所研究员、晶体学研究室主任，上海暨南大学教授、物理系主任，中国科学院应用物理研究所研究员、副所长、代所长、顾问。同时担任中国物理学会常务理事、秘书长。1955年当选为中国科学院数学物理学化学部学部委员。毕生致力于晶体物理学和X射线晶体物理学的研究。早年首创了利用晶体点阵常数测定相图中固溶度线的方法，至今仍被国内外广泛使用。50年代发表《铝、铜、镍三元合金系中 $\alpha$ 相的晶体结构变迁》论文，被国

际公认该研究成果的精确性。60年代发表《铜金二元系中超结构的形式与点阵间隔的变迁》等数篇论文，得到国内外同行的高度评价。晚年提出标定X射线粉末超相指数的新图解法。此外在多晶X射线衍射方法、粉末衍射照相机的设计、衍射图谱指标化、德拜特征温度、超结构相的理论与实验研究、相图及晶体结构分析，以及创建中国X射线晶体学研究队伍、筹建物理研究所的晶体学研究室和晶体学人才培养等方面，作出了重要贡献。

**录音 (sound recording)** 又称录声。把声音通过不同的方法记录下来。也是把声能变为其他形式加以贮存的一门技术。常用的录音方法有：唱片录音。用机械的方法，将声音变为机械振动的强弱，并在塑料制成的薄膜（即唱片）上刻成深浅不同的槽纹。磁性录音。用电磁的方法，将声音通过传音器（话筒）产生声频电流，通过电磁铁，使电流的强弱变为磁性的强弱变化，然后在磁性材料（磁带或钢丝）上记录下来。

光学录音。将声音变为光的强弱变化，用照相的方法记录下来。例如，现在的有声电影胶片旁边有一条透明程度不同的狭带，即是记录声音的声带。

**滤波电路 (filter circuit)** 接在整流电路之后，以便滤掉输出电压中的交变分量，从而使输出电压尽量平稳的网路。这种电路通常由电感、电容和电阻构成。纯电阻负载整流电路的纹波因数  $r$  都很大，为使输出较为平稳，常采用在负载电阻  $R_L$  两端并联一个足够大的电容器  $C$ ，或用一个与  $R_L$  串联的扼流圈  $L$ ；有时也采用  $\pi$  型 LC 滤波器或  $\pi$  型 CRC 滤波器（如图所示）。电容器的滤波是利用电容器的充放电作用。当外界输入电压升高时，电容器  $C$  将部分能量存储起来；当输入电压降低时，电容将能量释放出来。这样就使负载  $R_L$  上的输出电压不致随输入电压的变化而急剧变化，因而起伏较小。

#### 滤波电路图

电感的滤波作用在于：当通过电感的电流增大时，电感上产生的反电动势阻止电流的增加；而当电流减小时，电感上感生的正向电动势以继续维持电流的流动。因此将电感串联于整流电路与负载之间，可减少负载电流及电压的变化。

$\pi$  型 LC 滤波器由于综合了电容和电感的滤波作用，其滤波效果获得进一步提高。由于低频大电流时，电感体积较大，价格较高，因此常在高频小电流时采用。

$\pi$  型 CRC 滤波器可理解为两级电容滤波，其滤波效果较好，由于电阻、电容价廉，因此在低压直流电源中普遍使用。

电容滤波整流电路的纹波因数与交流电源的频率  $f$  和  $R_L C$  的乘积有关。 $R_L C$  的值越大，纹波因数  $r$  就越小。通常可以使纹波因数  $r$  达到  $10^{-2}$  的量级。

**滤光玻璃 (filterglass)** 具有能够吸收某一波段光的有色或无色玻璃。利用它可以传播的光中滤去不需要的部分，挑选出所需要的部分。按照能够透过的波段分类，有紫外光波段、可见光波段与红外光波段滤光玻璃等。还有一种能透过X射线的滤光玻璃。在各种滤光玻璃中，有些具有短波界限，即只能透过比这短波界限长的波段；有些具有长波界限；有

些既有短波界限又有长波界限，即只能透过两者之间的较窄波段的光。实际中这类具有上下波长界限的有限波段滤光玻璃应用较多，也可将前两类具有短波限和长波限的滤光玻璃组合使用。此外，还有一类是中性滤光玻璃，能对入射光中各种波长的光作同等程度的衰减。

各种滤光玻璃有不同的用途。如用于防止有害光辐射侵害眼睛的防护滤光玻璃，能令所需要波段的光通过的选择滤光玻璃，能使光谱能量分布按照需要改变的改正或补偿滤光玻璃（如照相机黄镜头玻璃），以及单色滤光玻璃等。实际中根据需要常常将两种或多种滤光玻璃组合使用。

**滤光器**（optical filter）用以控制光的强弱或光的颜色的光学元件。通常用色玻璃或滤光玻璃制成，有时也用液体。此外，例如在光度计中用偏振器控制光强时，该偏振器也可称为滤光器。用以控制光的颜色的滤光器也称为滤色器。简单的滤光器常称为滤光镜或滤光片。

滤光器按工作原理可分为色散滤光器、干涉滤光片、偏振干涉滤光片和受抑全反射滤光镜等。按照其功能又可分为紫外滤光器、红外滤光器、氯滤光器、可变滤色镜、三色滤光镜和栅性中性滤光镜以及目镜滤光镜等。对各种波长的光起同等削弱作用的滤光器又称为中性滤光器或灰滤光器；只削弱光谱一端的称截止滤光器；削去低频段光的称短波通滤光器或截长波滤光器；削去高频段光的称长波通滤光器或截短波滤光器；削去中间某一段波长的称带阻滤光器或阻挡滤光器，其中被阻挡的波段称阻挡波段；只准某一段波通过的称带通滤光器或窄带滤光器。

《论动体的电动力学》（Zur Elektrodynamik bewegter Körper）爱因斯坦著，1905年9月发表。是狭义相对论的第一篇论文，也是物理学中有划时代意义的历史文献。全文除引言外共分两大部分：一是“运动学部分”，包括“同时性的定义”、“关于长度和时间的相对性”、“从静系到另一个相对于它做匀速移动的坐标系的坐标和时间的变换”、“关于运动刚体和运动时钟所得方程的物理意义”、“速度的加法定理”；二是“电动力学部分”，包括“关于空虚空间麦克斯韦—赫兹方程的变换。关于磁场中由运动所产生的电动力学的本性”、“多普勒原理和光行差的理论”、“光线能量的变换。作用在完全反射镜上的辐射压力理论”、“考虑到运动的麦克斯韦—赫兹方程的变换”、“（缓慢加速的）电子的动力学”。

这篇论文一开头就提出：“大家知道，麦克斯韦电动力学——像现在通常为人们所理解的那样——应用到运动的物体上时，就要引起一些不对称，而这种不对称似乎不是现象所固有的。”这里所说的不对称，就是统一性遭到破坏，爱因斯坦认为这是难以容忍的。因为麦克斯韦方程只适用于静止的坐标系，类似的各种例子，包括企图证实地球相对于“光媒质”运动的失败，都要求在电动力学中相对性原理也成立，于是论文一下子便深入到问题的核心。在该篇论文中，爱因斯坦这样表述了相对性原理：“凡是对力学方程适用的一切坐标系，对同一形式的电动力学和光学定律也一样适用”。还引入另一条公设：“光在空虚空间里总是以一确定的速度  $c$  传播着，这速度同发射体的运动状态无关”（光速不变原理）。爱因斯坦指出，由这两个原理根据静体的麦克斯韦理论，就足以得到一个简单而又不自相矛盾的动体电动力学。

在接着的讨论中，爱因斯坦提出了同时性的定义。他发现两个在空间

上分隔开的事件的所谓同时，取决于它们相隔的空间距离和光信号的传播速度，在静止的观察者看来是同时的两个事件，在运动的观察者看来就不可能是同时的。因此，空间和时间不是各不相干的，而是存在着本质的联系，并且都同物质的运动有关。由此爱因斯坦得出同时性以及物体长度的概念并非绝对的，从不同的坐标系测量便有不同的值，还用简单的思想实验表明了这一点。进而从两种坐标系测量的同一光信号的传播速度同为  $c$  的条件出发，导出了洛伦兹变换。

爱因斯坦得到坐标和时间变换式后，专门讨论了麦克斯韦方程组。指出如果一个单位点状电荷在一个电磁场中运动，那么作用在它上面的力就等于在电荷所在处出现的一种电力，这种电力是我们把这电磁场变换到这单位电荷相对静止的一个坐标系上去时所得出的。这样在新理论中，电动力只起着—个辅助概念的作用；而由磁体同导体的相对运动而产生电流时所出现的不对称性就不存在了；至于电动力的“位置”问题（单极感应）也不成为问题了。

在论文的其余部分，爱因斯坦求出了速度合成法则，表明相对性原理和光速不变原理可以并存；从相对论的角度说明了多普勒效应和光行差；还论述了光的能量和压力的变换，得出了电子运动方程式。总之，这篇论文以完整的形式提出了等速运动下的相对性理论，引入了时间、空间的崭新概念，不仅引起了时空观的革命，也带来了整个物理学的革命，在 20 世纪人类生活中产生了极为深远的影响。

《论衡》中的物理知识（Physics knowledge in Lunkeng） 《论衡》是王充的一部主要著作。王充是我国东汉著名的唯物主义思想家。他充分运用汉代自然科学知识，批驳了当时风行的种种唯心主义思想。在《论衡》的论证中，他细致地观察与记述了许多物理现象，并对它们作了思辨性的解释。

力学方面。《论衡》已触及到力、物体运动与周围环境的关系。指出“力重不能自称”，初步认识到内力和外力的区别。对圆球运动的观察，载有“圆物投之于地，东西南北，无之不可；策杖叩动，才微辄停。”这段话已隐含有惯性运动概念的萌芽。

声学方面。《论衡》明确指出，声音的产生与死人无关，而是“生人所以言语吁呼者，气括口喉之中，动摇其舌，张歛其口，故能成言。譬犹吹箫笙，…箫笙之管，犹人之口喉也，手弄其孔，犹人之动舌也。”解释了发音的道理：约束在口腔中的气，由于口和舌的活动而振动发声，吹箫笙成音，同样是约束在管中的气振动而成。还指出，声音和鱼在水中振荡—样，离开振荡处远的地方就达不到了，在一定程度上说明了声强和声源距离的关系。

热学方面。《论衡》认为“夫近水则寒，近火则温，远之渐微。何则？气之所加，远近之差也。”说明热传递的承担者是气的作用，以及热传递和距离成相反的变化。还认为“云雾，雨之征也，夏则为露，冬则为霜，温则为雨，寒则为雪。”记述了雨露霜雪与气温之间的关系。

光学方面。《论衡》写道：“阳燧取火于天，…消炼五石，铸以为器，磨砺生光，仰以向日，则火来至。”有人认为，这可能是中国典籍中第一次对玻璃透镜取火的描述。又云：“今妄以刀剑之钩月，摩拭朗白，仰以向日，亦得火焉。夫钩月非阳燧也，所以耐取火者，摩拭之所致也。”实

际上，这就是金属凹面镜向日取火的雏形。

电学和磁学方面。《论衡》对顿牟（即玳瑁）经过摩擦能吸引轻小物体的现象作了记载。对我国最早的磁性指南器——“司南”也作了明确的记述。还对雷电的成因作出解释，特别是列举验尸、投石、肠胃病、电闪、雷击等五个例证来说明雷电的本质就是火，实属了不起的见解，为我国古代电学发展史写下光辉的一页。

伦琴（Wilhelm Conrad Röntgen 1845~1923）德国物理学家。生于伦内普。1865年入苏黎世联邦工业大学，1869年获苏黎世大学博士学位。1875年任霍恩海堡农业专科学校教授。1879年任吉森大学物理学教授。1888年起先后任维尔茨堡大学、耶拿大学和乌得勒兹大学物理学教授。1894年任维尔茨堡大学校长。1900年任慕尼黑大学物理学教授和物理研究所主任。

主要贡献是发现X射线，获1901年诺贝尔物理学奖。1895年11月8日，他从事着当时最流行的在气体稀薄管子中放电现象的试验，当放电电压加到足够高时，发现放在管子附近的涂有铂氰酸钡的纸屏上，有淡绿色的微光在闪烁。这个偶然发现与当时有关阴极射线的一般知识相矛盾。他抓住机遇不放，在实验室里度过了七个星期的紧张研究生活之后，断定发现了一种奇妙的、肉眼看不见的、有很大贯穿能力的特殊辐射，便称这种辐射为X射线。同年12月28日，在《维尔茨堡物理学医学学会会刊》上，发表了关于这一发现的第一篇报告。1896年和1897年，又发表了研究这种射线的新的论文。伦琴射线（即X射线）是一种波长很短（0.1纳米左右）的射线，它是原子中最靠内部的电子跃迁时发射出来的一种所谓“穿透性射线”。在初次发现时，伦琴就用这种射线拍摄了他夫人的手的照片，显示出手的骨骼结构。伦琴射线的发现，揭开了现代物理学革命的序幕，是人类认识世界从宏观通向微观的第一步。

罗兰（Henry Augustus Rowland 1848~1901）美国物理学家。生于洪斯代尔。1870年毕业于伦塞勒工学院。1875年任霍普金斯大学物理学教授，并在这里创办了美国当时最好的实验室。此后，在该校工作直到逝世。美国物理学会的创始人之一，并于1899年任学会的第一任会长。同年当选为英国皇家学会会员。

罗兰是美国的卓越的实验物理学家。早期主要从事磁导率的研究，1873年，通过实验表明磁导率是随着磁感应强度变化的，这个变化呈非线性，从而证实了磁导率并不是个常数。这项研究得到麦克斯韦的高度评价。1876年，证实了运动着的“静电荷”具有磁效应，即将一带电的金属板固定在可旋转的硬橡胶圆盘的边缘上，当圆盘绕轴转动时，靠近圆盘的磁针也动了起来，第一次揭示了运动电荷能够产生磁场。1880年后，主要致力于热学和光学方面的研究。在比热测量中，发现水的比热在不同温度下有差异，而在30℃时为最小。在光学研究中，根据霍耳效应解释了磁致旋光现象，在数学上推导出与麦克斯韦一致的旋光公式。制造出当时最好的光栅：在一块25平方英寸的金属板上刻出每英寸43000条线，极大地提高了光栅的灵敏度。接着又发明了有自聚焦作用的凹球面衍射光栅。他对太阳光谱的研究也取得了当时最好的成就，编制的太阳光谱波长表达达到了当时最高的精确度。

螺线管（solenoid） 绕在圆柱面上的螺线形线圈（图1）。通电时

管内磁场方向可按安培定则等确定。若线圈绕制均匀且排列紧密，则管内轴线上一点 P 处的磁感应强度大小为

$$B = \frac{1}{2} \mu n I (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) ,$$

式中 I 为通电电流强度， $\mu$  为充满管内的均匀介质的磁导率，n 是沿轴线方向单位长度上的匝数， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  的几何意义如图 2 所示。细长螺线管可近似地视为“无限长”螺线管（即  $\alpha_1=0$ ， $\alpha_2=\pi$ ），这时管内磁场接近于均匀，且为

$$B = \mu n I .$$

按自感定义，可计算得细长螺线管的自感系数为

$$L = \mu n^2 V ,$$

式中 V 是螺线管的体积。

在理论上，“无限长”螺线管被视为产生均匀磁场的理想装置。在技术应用中，螺线管常用于各种自感和互感装置中。许多电磁铁也是把螺线管套在铁芯上制成的。

**螺旋测微器**（micrometer caliper）量度物体长度的常用计量仪器。其构造如图所示，由固定和可动两部分构成。可动部分实际是一根高精度的丝杆，丝杆的螺距为 0.5 毫米，丝杆的外旋套上共有 50 个等分刻度线，因此旋动每一个等分刻度，丝杆移动  $\frac{0.5}{50} = 0.01$  毫米，所以螺旋测

微器（又称为千分尺）的准确度为 0.01 毫米。千分尺的最大量程通常为 5 厘米左右。使用前必须先检查零点；测量时听到“嗒、嗒...”的限位声，停止再继续旋紧；读数时可锁紧丝杆防止变动；用毕后复原放置在保护盒内。

#### 螺旋测微器

**逻辑电路**（logic circuit）信号取值为 0 和 1 或有限个值，且输入信号与输出信号之间存在确定逻辑关系的电路。信号值为 0 的通常含义是：电路断开，或低电位，或无脉冲信号；信号值为 1 的通常含义是：电路导通，或高电位，或有脉冲信号。

逻辑电路通常可实现下述三种基本功能：“与”功能；“或”功能；“非”功能，即倒相功能。“与”电路只有当各输入端都有逻辑“1”信号时，输出信号才为逻辑“1”，否则为逻辑“0”。“或”电路中，当至少某一个输入端有逻辑“1”信号时输出信号才为“1”，否则为“0”。“非”电路，或称倒相电路，它的作用是把输入信号在输出端倒相。下表和下图给出了两个输入信号 a、b 与一个输出信号 P 之间的逻辑关系和逻辑图。



逻辑关系表

与运算		或运算		非运算	
ab	$P=a \cdot b$	ab	$P=a+b$	a	$P=\bar{a}$
0 0	0	0 0	0	0	1
0 1	0	0 1	1		
1 0	0	1 0	1	1	0
1 1	1	1 1	1		

逻辑符号图

由各种门电路和记忆元件（如触发器）等组成的电路通称为“数字电路”。研究逻辑电路主要是研究数字电路和其它具有开关特性的元件所构成的电路中各点信号之间的逻辑关系及所实现的功能。

逻辑电路的应用范围十分广泛，特别是在计算机、数字控制、通信、生产过程自动化和仪表方面应用更多。它与大规模、超大规模数字集成电路的研究和发展有密切的关系。

洛伦兹（Hendrik Antoon Lorentz 1853 ~ 1928） 荷兰物理学家、数学家。生于阿纳姆。中学时期学习成绩优异，对物理、历史很感兴趣，并已熟练掌握多门外语。1870 年入莱顿大学，1875 年获博士学位。1877 年，年仅 23 岁便任莱顿大学理论物理学教授，曾长期在该校工作。

主要贡献是发展了物质的带电粒子理论，获 1902 年诺贝尔物理学奖。1892 年起，开始发表有关电子论的文章，认为一切物质的分子都含有电子，电磁波（包括可见光）经过物质时，所呈现的各种宏观现象，是电磁波与物质内受到准弹性力的电子相互作用的结果，从而创立了电子论。这一理论被相对论和量子论扩充后，成为现代原子物理学的重要理论基础。1895 年，证明了运动的带电粒子，在磁场中，将受到力的作用，该力被称为洛伦兹力，其关系用数学式表达为

$$F=qv \times B$$

由于洛伦兹力的方向总是与带电粒子速度的方向垂直，故永远不对带电粒子做功，只能改变其运动的方向，而不改变其速率和动能。1896 年，塞曼发现放在磁场中的光源，其光谱线发生分裂的现象，洛伦兹即用他的电子论对这一现象进行定量解释，产生很大的反响。1892 年 ~ 1895 年，为了解释迈克耳孙-莫雷实验的结果，与爱尔兰物理学家斐兹杰惹各自进行理论研究，同时提出了长度收缩的假说，即认为相对以太运动的物体，其运动方向上的长度缩短了，被称为洛伦兹-斐兹杰惹

收缩，亦称为洛伦兹收缩，长度收缩因子为  $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 。1899 年，在以太说的基础上，讨论了高速运动的参考系与静止参考系之间坐标和时间的变换问题。1904 年，得出了著名的变换公式，被称为洛伦兹变换。上述解释与变换，构成了从经典物理学到相对论理论的重要桥梁。

洛伦兹力（Lorentz force） 运动电荷在电磁场中所受到的作用力，通常指磁场对运动电荷的作用力。由荷兰物理学家洛伦兹最早在他的电子论中作为基本假设而引入。此力可分为两部分：一部分是电场对运动电荷的作用力，等于电荷的电量 q 与电场强度 E 的乘积；另一部分是磁场的作用力，与电荷的电量 q、运动速度 v、磁感应强度 B 的大小以及 v 与 B 间夹

角 的正弦成正比，方向由矢积  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  确定。写成数学表达式为

$$\mathbf{f} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})。$$

由于上述两部分作用力有着各自独立的意义，人们往往把磁场部分的作用力特称为洛伦兹力，即

$$\mathbf{f} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}，$$

其大小为

$$f = qvB \sin \theta，$$

方向可按矢量的右手定则或电动机左手定则确定。

洛伦兹力是可以探测的磁场的基本性质之一，在理论上常用它来定义磁感应强度。

洛伦兹力广泛地存在于各种电磁现象中。载流导体在磁场中所受到的安培力以及伴随出现的霍尔效应都是洛伦兹力作用的结果。洛伦兹力是一种非静电力，由它产生的动生电动势是各种交流发电机、直流发电机和磁流体发电等电力装置的设计基础。洛伦兹力通过安培力形式所表现的机械效应，是电动机和各种电磁仪表的理论依据。洛伦兹力引起的霍尔效应以及由此制作的各种霍尔元件，在半导体、微波、计算机和自动控制等方面应用极为广泛。洛伦兹力不能改变运动电荷速度的大小，但具有强烈的偏转效应，显像管、质谱仪、粒子加速器等众多的装置都是利用这种效应制成的。在非匀强磁场中，运动电荷所受洛伦兹力总有一个指向磁场较弱方向的分力，从而使带电粒子有向磁场较弱方向运动的趋势，称为磁塞或磁镜效应。由此可制成各种磁聚焦或磁约束装置。例如在受控热核反应中，等离子体的温度高达  $10^7\text{K} \sim 10^8\text{K}$ ，不可能将它约束在任何实物材料制作的容器中，这时便采用两端很强、中间较弱的强大磁场或极强的环形磁场，将等离子体约束在一个小区域内。

**MKSA 单位制** (MKSA system of units) 亦称“实用单位制”。在电磁学范围内与现行的国际单位制是一致的。基本量为长度、质量、时间和电流强度。基本单位为米 (m)、千克 (kg)、秒 (s) 和安培 (A)。其他电磁学量的单位均可根据一定的物理关系式从这些基本单位导出。在这单位制中, 真空介电常数  $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ , 真空磁导率  $\mu_0=4 \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

**MOS 场效应晶体管** (metal-oxide-semiconductor field effect transistor) 一种包含金属、氧化物、半导体三层结构的晶体管。它通过外加在金属上的电压来控制氧化层下面半导体内的沟道宽度和沟道电流。MOS 场效应晶体管包括源、漏、栅三个电极, 见图。它的主要特点是栅极 G 和沟道之间被氧化层如二氧化硅隔开, 而源、漏之间的沟道电流由金属栅极上的外加讯号电压控制。栅极正电压达到一定值时会使 P 型半导体表面反型 (即由 P 型变为 N 型), 在漏、源之间形成 N 型导电沟道, 这时改变栅极电压就可以控制漏源之间的电流变化, 从而达到晶体管的放大等作用。

**MOS 场效应晶体管**

**马德堡半球实验** (Magdeburg hemispheres experiment) 见真空。

**马格努斯效应** (Magnus effect) 在不可压缩的粘滞流体中运动的旋转圆柱和圆球受到侧向力的一种现象。这个效应由德国物理学家马格努斯于 1852 年发现, 故名。他在研究炮弹飞行弹道时, 发现旋转飞行的炮弹有时不能按预计的弹道曲线飞行; 经过多次观察试验终于发现了该效应。把转动的圆柱体或圆球, 放入粘滞流体中 (转动体的转轴与流体的流向垂直), 由于流体的粘滞性, 转动体产生环流与流体相互作用, 使转动体周围的流体速度发生变化, 造成流速不均匀。顺着转动方向的流体流速加快; 逆着转向的流体流速减慢, 根据伯努利方程可知, 流速慢的正压力大于流速快的正压力, 因此转动体受到侧向力, 此力与转动轴与流体的流向均垂直, 故使转动体偏离原来运动方向。马格努斯效应曾被用来借助风力推动船舶航行, 用几个高速转动的圆柱体产生侧向力代替风帆推动前进, 1926 年成功地横渡了大西洋。但由于各种条件的限制, 主要是廉价石油的冲击, 所以未能推广使用。足球、排球、网球以及乒乓球等的侧旋球和弧圈球的运动轨迹之所以有那么大的弧度, 也起因于马格努斯效应。

**马赫** (Ernst Mach 1838 ~ 1916) 奥地利物理学家。生于奇尔利茨。1860 年毕业于维也纳大学获物理学博士学位。1864 年任格拉茨大学数学教授、物理学教授。1867 年任卡尔洛瓦大学实验物理学教授, 曾两度被选为校长。1895 年任维也纳大学哲学教授。

马赫对物理学、科学史、科学哲学等领域都有研究。曾利用照相机, 确定了以超声速飞行的炮弹附近空气密度的分布。通过大量实验, 研究了一系列以前不知道的声学过程。在检验声冲击波的破坏力的过程中, 发现了激波, 并拍摄了有关激波的清晰照片。测得了气流在运行中的速度与音速的比值, 被称为气流马赫数; 在流场中如果各点的速度不同, 那么某一点的流速与该点的音速的比值, 被称为当地马赫数。当地马赫数达到 1 时, 将形成激波。第二次世界大战后, 超声速飞行和核爆炸的出现, 他的研究

成果就更受到重视。至于以他名字命名的一系列术语：马赫数、马赫效应、马赫波、马赫角等，在空气动力学和现代飞行器理论中得到广泛应用。

马赫作为科学史家，研究了力学史、热学史、光学史以及能量守恒学说发展史。看出了被人认为已十分完善的牛顿经典力学体系中所包含的无法解释的矛盾。批判了牛顿的质量、惯性、绝对时间、绝对空间等概念以及牛顿的力学基本原理的表述，指出一切质量、速度、力、运动都是相对的，惯性本身也是相对的，是无数遥远天体对物体作用的结果，是物体相对众天体有加速运动的结果。

马赫作为科学哲学家，宣称一切存在的东西都是感觉或感觉的复合，后来又提出用要素代替感觉作为认识论的基础，显然是唯心主义的。著有《力学及其发展的批判历史概论》（1883）、《热学原理》（1886）、《感觉的分析》（1886）、《认识和谬误》（1905）。

**马赫数 (Mach number)** 流体中质点运动速度  $v$  同该点声速  $c$  之比，通常以  $M_a$  表示。马赫数反映了该点流动的快慢和在流动中流体密度变化引起的各种效应，如“压缩性”效应。因此是表征流体可压缩程度的一个重要的无量纲参数。它是在奥地利科学家马赫的姓氏命名的。1887年马赫在他的论文中指出，当气体速率大于或小于声速时，弹丸引起的扰动波形是不同的。但直到1993年，“马赫数”这个名词才在世界范围内广泛应用。

在不可压缩的流体中，声速  $c = \infty$ ， $M_a = \frac{v}{c} = 0$ ；大约从马赫数为0.3起，就不能忽略流体的压缩性的影响。马赫数越大，流体表现出的可压缩性就越大。此外，马赫数大于1或小于1时，扰动在气流中的传播情况也大不相同。因此，从空气动力学观点来看，马赫数比流速能更好地表示流动的特点。

**马吕斯 (Etienne Louis Malus 1775~1812)** 法国物理学家。生于巴黎。1796年毕业于巴黎工艺学校，曾在工程兵部队中任职。1808年起在巴黎工艺学校任教授。

主要从事光学方面的研究。1808年，发现反射时光的偏振，确立了偏振光强度变化的定律（亦称为马吕斯定律）。研究了光在晶体中双折射的理论。1811年，与毕奥各自独立地发现折射时光的偏振。提出了确定晶体光轴的方法。研制成一系列偏振仪器。

**马吕斯定律 (Malus law)** 描述线偏振光通过检偏器后透射光强变化规律的定律。设起偏器和检偏器的透振方向分别为  $P_1$  和  $P_2$ 。通过这两偏振片的振动矢量分别为  $E_1$  和  $E_2$ ，它们的振幅分别为  $A_1$  和  $A_2$ ，故强度为  $I_1=A_1^2$ ， $I_2=A_2^2$ 。当  $P_1 \perp P_2$  时， $E_2 \perp E_1$ ，即通过起偏器的振动矢量全部通过检偏器。所以有  $A_2=A_1$ ， $I_2=I_1$ 。当  $P_2 \perp P_1$  时， $E_1$  不能通过检偏器。所以  $A_2=0$ ， $I_2=0$ 。当  $P_2$  与  $P_1$  成  $\theta$  角度时， $E_2$  是  $E_1$  在  $P_2$  方向的投影。所以有  $A_2=A_1 \cos \theta$ ， $I_2=A_2^2=A_1^2 \cos^2 \theta = I_1 \cos^2 \theta$ 。

**马略特 (Edme Mariotte 1620~1684)** 法国物理学家。生于第戎。曾任第戎附近的圣马丁修道院院长，巴黎科学院创始人之一。

从事热学、力学、光学方面的研究。1676年，确立了在恒定温度下一定质量的气体的体积与压强成反比的定律（玻意耳-马略特定律），预言了这条定律的各种应用，特别是根据气压计读数去计算该地的高度。在实验

证实了托里拆利关于液体的射流速度公式，发现了液体要在一定压力下才能流动，研究了喷泉的上升高度，并编制出上升高度随开孔直径变化的表格。还研究了弹性体的碰撞和摆的振动。1666年，发现了眼睛中的盲点（被称为马略特盲点），研究了颜色，特别是太阳和月球的色环。研究了虹、光的衍射和辐射热，指出热射线和光线的区别。著有《论空气的性质》（1676）、《论物体的碰撞》（1678）、《论水和其他流体的流动》（1686）。他的许多篇论文收载在《巴黎科学院的历史和学术论文》第1卷（1733）中。

**麦克斯韦**（James Clerk Maxwell 1831~1879）英国物理学家。位移电流的提出者，电磁场理论的完成者，光的电磁说的奠基者，分子运动论的完善者。

**生平** 麦克斯韦1831年6月13日生于苏格兰的一个律师和机械设计师家庭。其父亲对麦克斯韦的一生有很大的影响。麦克斯韦的童年是没有多大欢乐的，在8岁那年，母亲就去世了。10岁那年，进入爱丁堡中学。在父亲的关心、指导下，他的第一篇科学论文发表在《爱丁堡皇家学会学报》上，当时还不满15岁。1847年，考入爱丁堡大学。麦克斯韦认为在大学卓有成效地学习除了要虚心求师外，还要做到“三用”：用心、用脑和用手。他说，用心需要充满热情和愿望，用脑需要深入思考，用手需要巨大劳动去经常实践。1850年，进入剑桥大学。该大学著名教授霍普金斯盛赞麦克斯韦是他教过的出色学生中最出色的一个。

1856年至1859年，任马里斯猜尔大学自然哲学教授。1860年起任伦敦皇家学院物理学和天文学教授。伦敦皇家学院和剑桥一样，也是一个闪耀着智慧光芒的地方。伟大的法拉第的科学生涯就是从这里开始的。这次意外的工作调动，又促成了麦克斯韦和法拉第的会见。正是通过这次会见，麦克斯韦到伦敦皇家学院以后的5年成了他一生中最富有创造性和最富有成果的5年。麦克斯韦不仅对电磁学理论，而且对经典物理学的其他分支：土星光环的研究、颜色视觉理论、气体动理论以及热力学和统计物理学都作出了重要贡献。

#### 学术成就

**位移电流的提出者** 1861年麦克斯韦在推导电磁场的运动学方程中，发现磁场中有运动电荷或电流，这是传统观念所不能接受的。为了解释这一现象，麦克斯韦假设在两个相邻的分子涡旋中间夹着一排微小的粒子，这些粒子的力学作用正如机械中的惰性轮一样，它们的转动使得与它们相邻的两边的分子涡流以相同的方向旋转，这就保证了相邻的磁力线的方向相同。麦克斯韦称这些粒子为介质中的电。他指出：“按照我们的假说，磁介质被一种粒子层形成的壁分隔为许多胞，那些粒子起着电的作用，当电粒子在任何一方受到推力时，它们将通过作用于胞的弹性物质的正切力使每一个胞畸变，由于胞的弹性而产生一种相等而相反的力，当这种力撤销后，胞就恢复它们的形状，电将返回原来的位置。”这种畸变的大小便称为“电位移”，有了电位移必然会产生位移电流，但是麦克斯韦又提出：“电位移还不是电流，因为它达到一个确定的值时，它就会保持不变，然而它却是电流的开始，它的变化构成电流。”按照麦克斯韦的这种说法，位移电流应当是电位移对时间的微商，即等于

$\frac{dD}{dt}$ 。将这个物理量代入到安培定律的微分形式方程中，就意味着位移

电流和传导电流一样产生磁场。因此位移电流的核心思想是变化着的电场激发感应磁场，这一概念的提出是麦克斯韦对电磁理论的一项重大贡献。

电磁场理论的完成者 麦克斯韦的最大贡献是建立了电磁场的基本方程——麦克斯韦方程组，从而完成了电磁场的理论体系。当然，麦克斯韦完成电磁场的理论体系同样不是一步成功的，而是通过不断探索，逐步完成的。1855年至1856年，发表《论法拉第的力线》。在该篇论文中，采用的是一种几何观点，即把法拉第力线看作不可压缩的流体的流线，并把电力线比作流管，电场强度比作流速等，这样“我们应该得到一个物理现象的几何图像”。在这个几何图像的基础上，麦克斯韦企图阐明电力线和电力线所在空间之间的几何关系，发现电致紧张状态的几何意义，并证明如何导出在电致紧张状态时磁、电流和电动势之间的数学关系，但未解释物理现象。1861年至1862年，发表《论物理的力线》。在该篇论文中，采用的是一种力学观点，他写道：“现在从力学观点去检验磁学现象，去确定一种媒质中那种张力或运动能够产生观察到的力学现象。”又指出：“在这篇论文中，我的目的是从研究某种媒质的张力和运动的某些状态的力学结果，来澄清在这方面的思考，并把这些结果与观察的电磁现象作比较”，从而获得电磁现象的数学理论。就在这篇论文中，麦克斯韦提出了完成电磁场理论体系的两个极为重要的假设：位移电流和涡旋电场，并预言了电磁波的存在。1864年，完成了《电磁场的动力学理论》，次年发表在《哲学杂志》上。这篇论文的目的，是要进一步使用动力学的方法全面概括电磁场的运动特征和建立电磁场的方程，所采用的是一种场论观点。麦克斯韦在该论文的引论部分写道：“...我提出的理论可以称为电磁场理论，因为这种理论必须处理电或磁体周围空间的问题；它也可以称为动力学理论，因为它假设在那个空间存在着运动的物质，我们所观察的电磁现象就是在这种物质中产生的。”麦克斯韦的场论揭示了电磁场的物质性和运动性。在这个基础上，该论文中提出了一组联系电荷、电流和电场、磁场的基本微分方程，后经赫兹和亥维赛和整理和简化，就成了作为经典电动力学主要基础的麦克斯韦方程组。

光的电磁说的奠基者 1856年，德国的韦伯和柯尔劳斯通过实验测量，发现电荷的电磁单位和静电单位的比值等于光在真空中的传播速度。在此期间，威廉·汤姆孙和基尔霍夫通过计算信号在圆形截面孤立导线中的传播速度，也得出了恰等于电磁单位和静电单位的比值的结果。1861年，麦克斯韦在给法拉第的一封信中，认为对于上述由实验计算得出的这个比值，虽然测量结果不十分满意，但表明这个比值已十分接近当时光速的测量值，因此这个结果具有很大的意义。在这种量值符合性的启发下，麦克斯韦提出了光的电磁说，即认为光是频率介于某一范围之内电磁波；并阐明了电磁波与光波有共同的特性，它以光速在空间传播。这一理论的提出被认为是人类认识光的本性方面的一大进步。也正是在这样的意义上，人们才说麦克斯韦把光学和电磁学“统一”起来。

分子运动论的完善者 麦克斯韦在分子运动论的不断完善方面也做了奠基性的工作。1859年发表了题为《气体分子运动论的例证》的论文，运用建立在概率概念基础上的统计方法对分子运动加以处理，第一次得出

了气体分子的速度分布律，后来被称为麦克斯韦速度分布律。在考虑分子的相对运动的条件下，推算了分子的平均自由程。在内摩擦研究方面，也做了相当突出的工作，得出了内摩擦系数与密度无关的结论。1872年在他的著作《热学理论》中提出了“麦克斯韦妖”的著名佯谬。所有这些使分子运动论达到比较完善的程度。

**麦克斯韦方程组** (Maxwell equations) 描述电磁场运动规律的数学表达式。是电磁学的基本方程。由英国物理学家麦克斯韦于1864年首先提出。

**建立的基础** 由于西方工业革命的推动，电磁学在18世纪末，特别是19世纪以后得到了迅速发展。首先，库仑定律于1785年问世，成为电磁学的第一个重要的实验定律。1820年，奥斯特发现了电流的磁感应，第一次揭示了电现象与磁现象之间的联系，并很快导致又一个重要的实验定律——毕奥-萨伐尔定律的发现。在这两个实验定律的基础上，经过法拉第、安培等多人的工作，静电场和稳恒磁场的规律可用如下方程清晰地表示出来：

$$\begin{aligned} \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} &= q \quad (\text{静电场高斯定理}), \\ \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= 0 \quad (\text{静电场环路定律}), \\ \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} &= 0 \quad (\text{磁场高斯定理}), \\ \oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= I \quad (\text{磁场环路定律}). \end{aligned}$$

1831年，法拉第发现了极为重要的电磁感应现象，电与磁的联系进一步被揭示出来，并经法拉第本人和楞次、诺埃曼、韦伯等人十多年的努力，得出了电磁感应基本定律：

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_m}{dt}.$$

电磁学连续的重大发现和理论进展，推动了工业社会的电气化。电动机、发电机、电弧灯开始出现，电报也被发明并迅速被应用。到19世纪50年代，德国首先建立了电工设备工场。生产实际中出现的大量课题又反过来对电磁理论提出了更高的要求。正是在这样的历史背景下，麦克斯韦开始了他对经典电磁理论的最终总结工作。

两个基本假说除上述实验定律外，麦克斯韦还提出了两个基本假设，作为他的电磁场理论的基本出发点。这些假设后来都被实验所证实。

(1) 涡旋电场假说。麦克斯韦把法拉第电磁感应定律表述成如下形式：

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S},$$

式中的非静电性场强  $\mathbf{E}$  被称为“涡旋电场”或“感应电场”。该定律被赋予了新的解释：“变化磁场将产生感应电场”。这样，电场不仅有静电场，而且出现了第二个新成员——涡旋电场。

(2) 位移电流假说。为了把安培环路定律推广到非稳恒的情形，并且又与电荷守恒定律不发生矛盾，麦克斯韦提出了崭新的与变化的电场相当的位移电流概念，从而形成了一个完全属于他本人的假说：与传导电流或运动电流所产生的磁效应完全相同，位移电流也在周围空间激发磁场。

于是，变化的磁场激发电场（电磁感应现象），变化的电场激发磁场（位移电流假说），两个对称性的假说形成了一套完整的理论，即麦克斯韦电磁场理论。按照这个理论，变化的电场和磁场互为因果，形成一个统

一的物质客体——电磁场，而且它一经产生，便会向四周按光速  $c$  传播。

麦克斯韦方程组 1864 年，麦克斯韦用数学方程式表达了他的电磁场理论。这些方程在 1873 年出版的他的《电学和磁学论》一书中得到最系统的概括，它们是

$$\begin{aligned} \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} &= q, \\ \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} &= 0, \\ \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= -\frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \\ \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= \left( \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}. \end{aligned}$$

式中的各个场强矢量系指实际存在的所有的场，它们既是空间的函数，也是时间的函数。这组方程是麦克斯韦方程组的积分形式，描述了电磁运动的普遍规律。通过数学变换，还可将麦克斯韦方程组写成下列形式：

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \end{aligned}$$

这称为麦克斯韦方程组的微分形式。麦克斯韦方程组构成了一个完整的理论系统，它们与描述介质状态的方程以及边界条件、初始条件等联立起来，可描写各种电磁运动的特征。

**伟大成就与经典缺陷** 以麦克斯韦方程组为核心的麦克斯韦电磁场理论是经典电磁学的最高成就，“是自牛顿以来物理学上经历的最深刻和最有成果的一次变革”。它不仅能全面说明当时已知的所有电磁现象，还成功地预言了电磁波的存在，指出光是某一频率范围内的电磁辐射，这些预言也很快为赫兹实验等证实。以麦克斯韦方程组为标志，经典电磁学达到了它最系统最完美的形式。以这一理论为指导，电磁学的各个分支学科迅速发展，相关学科也受到巨大推动。人类社会开始以前所未有的速度向电气化迈进，生产技术和日常生活都出现了深刻的变化。当然，物质世界是不可穷尽的，人类的认识也是没有止境的。上世纪末叶麦克斯韦理论的成功所激发起来的关于电磁以太问题，黑体辐射能谱分布问题，线光谱起源问题，以及光电效应问题的讨论，又进一步导致了爱因斯坦的相对论以及量子论、量子力学的建立，为 20 世纪物理学的飞速发展作出了巨大的贡献。

**麦克斯韦速率分布律 (Maxwell speed distribution law)** 英国物理学家麦克斯韦在 1859 年得到的关于气体分子速率分布所遵循的统计规律。

按照气体动理论，气体分子以不同的速度沿各个方向作无规则运动，而且由于相互碰撞，每一分子的速度都在不断的改变。因此，如果在某一瞬间去考察某一特定分子速度的大小和方向，所得到的结果完全是随机的。然而，就大量分子整体而言，在一定的条件下，处于某一速度值区间内的分子数与气体分子总数的比值都服从确定的统计规律。

**基本假设** 在近代测定分子速率的实验获得成功以前，麦克斯韦和玻耳兹曼等物理学家就从理论上得到了气体分子速率分布的规律。他们首先根据分子运动的无规则性提出了两个基本假设。

(1) 每一分子速度在某一空间方向上的分量(例如沿  $x$  方向的速度分量



$v_x$ ) 处于某一速率区间内的可能性与在其它方向上处于同一速率区间内的可能性相同, 且相互独立。

(2) 每一分子速度在某一空间方向上的速度分量 (例如  $v_x$ ) 处于某一速率区间内的可能性与在其相反方向上 (例如  $-v_x$ ) 处于同一速率区间内的可能性相同, 且相互独立。

**速率分布** 基于上述假设, 麦克斯韦发现在热平衡状态下, 当气体分子间的相互作用可以忽略时, 分布在任一速率区间  $v \sim v+dv$  内的分子数  $dN$  与气体分子总数  $N$  的比率为

$$\frac{dN}{N} = f(v) dv = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv,$$

式中  $T$  是绝对温度,  $m$  是一个分子质量,  $k$  是玻耳兹曼常量。其中  $f(v)$  称为气体分子的速率分布函数, 它表示在速率  $v$  附近单位速率间隔内的分子数百分比。在一定温度下, 根据  $f(v)$  与  $v$  的函数关系可画出速率分布曲线 (见图 1)。图中在任一速率区间  $v \sim v+dv$  内速率分布曲线下的窄条面积的大小表示在该速率区间内分子数百分比。从图 1 可以看出, 虽然每个分子的速率可以取从零到无穷大的任意值, 但是  $v$  很大或  $v$  很小的分子数百分比实际上很小, 而具有中等速率的分子数百分比很大。

图 1 气体分子速率分布曲线

**三种速率** 最概然速率: 在图 1 中与  $f(v)$  极大值对应的速率称为最概然速率。通常以  $v_p$  表示之。在最概然速率附近单位速率间隔内分

子数百分比最大。最概然速率为  $v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ 。平均速率: 所有分子速率

的算术平均值称为平均速率, 通常以  $\bar{v}$  表示,  $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ 。方均根速率:

利用求平均值的方法可以得到速率平方的平均值, 为  $\overline{v^2} = \frac{3kT}{m}$ , 方均

根速率即为  $\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ 。上述三种速率的大小依次为  $\sqrt{\overline{v^2}} > \bar{v} > v_p$ 。这

三种速率都是大量分子速率分布的统计行为, 但在不同的情况下需应用不同的速率。例如, 在讨论速率分布如何随温度而改变时, 要利用最概然速率  $v_p$ , 当温度  $T$  升高时,  $v_p$  相应增大, 气体分子中速度较大的分子数所占比例就增多; 讨论分子运动的平均自由程时, 要用到平均速率  $\bar{v}$ ; 而在讨论分子平均平动动能时, 则要利用方均根速率。

**实验验证** 麦克斯韦速率分布律可直接由分子束实验进行验证。典型的实验装置如图 2 所示。O 为金属蒸气源, 产生金属蒸气。S 为狭缝, 金属蒸气通过狭缝后形成定向射线。B、C 为两个共轴圆盘, 以同一角速度转动, 圆盘 B 上开一狭缝, 作为射线入口; 圆盘 C 上也开一狭缝, 作为射线出口。这两个狭缝与垂直方向形成的夹角错开一个角度  $\theta$ , BC 之间的距离为  $l$ 。D 是检测器, 接收原子射线并测定其强度。整个实验装置安放在高真空容器中。圆盘转动一周, 分子束就通过 B 的狭缝一次。由于分子具有不同的速度, 因此能通过 B 狭缝的分子不一定能通过 C 狭缝。只有

满足下列条件的速度为 $v$ 的分子才能从B进入并从C射出： $\frac{v}{l} = \frac{\omega}{\phi}$ 。

由于狭缝有一定的宽度，实际上能被检测器D收集到的分子不是严格精确的速度为 $v$ 的分子，而是处于 $v \sim v + \Delta v$ 区间内的分子。调节圆盘转速，就可以测出在不同的 $v$ 附近小区间内的分子数，从而得出分子速率的分布。实验结果与麦克斯韦分布律的理论结果完全相符。

图2 麦克斯韦速率分布实验装置

**麦克斯韦妖 (Maxwell demon)** 由麦克斯韦提出的一个著名的理想实验。1871年，麦克斯韦在他的《热理论》一书中提出设想存在一个能识别和控制冷、热分子运动方向的小生物(小妖)，于是设计了这样的理想实验：“现在让我们假定这一容器被一个带有一个小孔的间隔分成两部分，A和B，并且能看见单个分子的一个小生物打开和关闭这个小孔，以至于仅仅允许较快的分子从A通到B，和仅仅允许较慢的分子从B通到A。于是，它将不消耗功便能提高B的温度和降低A的温度，而与热力学第二定律矛盾。”麦克斯韦妖的提出不仅促进了对热力学第二定律的正确程度和应用范围的研究，而且促使西拉德发现了分子运动信息与熵变化的关系，还导致香农指出以某种符号定义的熵，恰巧与热力这定义的熵相反，在某些不可逆过程中，信息的熵不是增加而是在减小。布里渊在西拉德和香农工作的基础上，对麦克斯韦妖问题做出新的论证和解释。他提出用带奇异眼的自动装置代替小妖，用电池或灯泡作为电炬，小妖只能借助电炬提供的辐射来检测分子运动，它虽然看不到分子，然而能凭借从分子散射得到的信息，操纵隔壁上的活门，以使快、慢分子分离在两个室中。可见这装置与麦克斯韦的设计是等效的。当辐射提供给小妖时，属于熵增过程；当小妖得到信息操纵活门使快、慢分子分离时，属于熵减过程。布里渊发现包括这两个过程的整个过程的总熵还是增加的；至于熵减过程则是由于信息对小妖的作用而引起的。于是他指出：“信息应该看作系统的熵的负项，即信息是负的熵。”正是由于这个负熵的作用，才使系统的熵增减，但总熵仍然有所增加。由此表明，麦克斯韦妖的假想实验只能而且必须是一个可以从外部引入负熵的开放系统，正因为这样，它并不违背热力学第二定律，也说明麦克斯韦所说的它“与热力学第二定律矛盾”并不成立。

**迈尔 (Julius Robert Mayer 1814 ~ 1878)** 德国医生、物理学家。生于符腾堡的海尔布隆。曾在蒂宾根大学学医。1838年获得医学博士学位后，在海尔布隆等地行医。

迈尔是第一个发表能量守恒和转化定律的科学家。1840年2月至1841年2月，他在一艘远洋船上当随船医生，在去爪哇的途中，发现病人的静脉血比在欧洲时的颜色要红些，由此引起注意和反复进行研究。根据拉瓦锡的燃烧说，迈尔认为，热带地区人的静脉血所以红些，是由于其中含氧量较高的缘故，而氧所以多出来，是由于提供体热燃烧掉的食物减少的结果。这使他联想到食物中化学能与热能的等效性。他还听到海员们说，海水在暴风雨时比较热，由此又联想到热与机械运动的等效性。回到德国后，进一步深入研究了这个问题，1842年，发表了题为《论无机界的力》的论文。该论文运用“因等于果”的命题，认为力(即能)是自然界运动变化的原因，而因等于果，自然力在量上是不灭的，只是质发生变化。又运用“有不变无”的命题，指出运动在许多情况下，只不过产生热效应，因而

热的来源只不过是运动。再运用热与气体的体积的关系，以及当时已有的气体比热的实验资料得出：物体从 365 米高的地方下落相当于把同等量的水从 0 加热到 1，即 1 千卡=365 千克·米，但文中没有阐明推导过程。因此迈尔是历史上第一个提出能量守恒和转化定律并计算出热功当量的人。

由于他是个医生，在物理学界并不出名，这篇重要论文当时未引起注意。1845 年，发表了《论有机体的运动以及它们与新陈代谢的关系》的论文。在该文中列举了物理能的 5 种形式：落体力，简单运动与振动，热，电流，某些物质的化合、分解；并指出这些能量相互转化的 25 种方式。迈尔的理论为后来热力学的发展奠定了基础。

**迈克耳孙** (Albert Abraham Michelson 1852 ~ 1931) 美国物理学家。生于普鲁士的斯特雷诺。两岁时全家移居美国。1873 年毕业于安那波列斯国立海军学院。1880 年赴欧洲进修，1882 年回国后任开斯应用科学学院物理学教授。1892 年起任芝加哥大学教授，第一任物理系主任。1910 ~ 1911 年任美国科学促进协会主席。1923 ~ 1927 年任美国科学院院长。1900 年被选为法国科学院院士，1902 年当选为英国皇家学会会员。

主要贡献在于光谱学和基本度量学，获 1907 年诺贝尔物理学奖。1879 年，通过改进傅科的方法，获得光速值为  $299910 \pm 50$  千米/秒。访欧归来于 1902 年和 1923 年，多次进行光速的精密测量，最后利用多面镜反射法，获得光速值为  $299798 \pm 4$  千米/秒，与现代真空光速的可靠值  $299793 \pm 0.3$  千米/秒十分接近。1880 年，在柏林期间，发明了利用干涉条纹精确测量长度或长度改变的仪器，被称为迈克耳孙干涉仪，它在现代物理实验中，具有重要地位。1887 年，与精通物理学和数学的化学家莫雷合用，利用迈克耳孙干涉仪，通过改进实验装置，进行了著名的迈克耳孙-莫雷实验。该实验主要是以光在以太中的速度和地球运动速度的叠加作用，来探测地球的运动。实验结果未发现条纹有任何移动，也就是无法测出地球的“绝对运动”。这是物理学发展史上一个最重大的否定性实验，它动摇了经典物理学的基础。后经多人的反复实验，证明以太是根本不存在的，从而为爱因斯坦建立狭义相对论准备了思想基础。

**迈克耳孙干涉仪** (Michelson interferometer) 迈克耳孙于 1880 年最早设计并制作的一种分振幅干涉装置。

**结构** 迈克耳孙干涉仪主要由四块玻璃板组成，见图。H 为半透明分束镜，G 为全透明补偿板。H 和 G 平行，二者厚度和折射率都相同，且与水平线成  $45^\circ$  夹角。H 的第二平面上镀以半透半反射膜，以便能将入射光分成振幅（或光强）相等的两部分。其中一部分反射光垂直投射到平面反射镜  $M_1$ ，另一部分透射光经过补偿板 G 投射到平面反射镜  $M_2$ 。 $M_1$  和  $M_2$  如图安置在相互垂直的两臂上，其中  $M_1$  可沿臂轴方向移动。

从 H 镀膜面上反射和透射的两束光分别标记为 (1) 和 (2)，它们受到  $M_1$  和  $M_2$  的反射，分别沿原路返回。光线 (1) 透过 H 板两次，然后到达 E 点，补偿板 G 的作用是使光线 (2) 也两次透过与 H 板同样

**迈克耳孙干涉仪**

厚度的玻璃板而到达 E 点。 $M_1'$  是 H 板对  $M_1$  形成的虚像，与  $M_2$  的间隔为 d。于是在 E 点处观察到的干涉图样可以认为起源于厚度为 d 的空气平

板  $M_1M_2$ 。

**干涉图样**  $M_1$  与  $M_2$  相互垂直,  $M_1$  与  $M_2$  相互平行, 于是迈克耳孙干涉仪中将呈现等倾干涉效应。干涉图样为同心圆环。当  $d$  逐渐增大时, 中心圆环向外长出。且每当  $d$  增加  $\lambda/2$  时 ( $\lambda$  为波长), 将长出一个圆环。当  $d$  由大逐渐变小时, 靠近中心的圆环将没入中心。且每当没入一个圆环时,  $d$  的缩小量必定为  $\lambda/2$ 。

若  $M_1$  与  $M_2$  并不严格垂直,  $M_1$  与  $M_2$  形成空气劈, 于是产生等厚干涉效应。干涉图样为等距离分布的亮暗相间的直线条纹。

**应用** 迈克耳孙干涉仪的两束相干光的光路完全分开, 便于在光路中安插其它器件。用这类仪器既可观察等倾干涉, 又可观察等厚干涉。迈克耳孙干涉仪的精确度和灵敏度都很高, 可应用于多种精密测量。迈克耳孙最早利用这一装置测量了地面上的光速, 他的高精度实验结果表明, 沿地球运动方向和垂直于地球运动方向上传播的光的速率相同, 从而为相对论的建立提供了实验基础。迈克耳孙也因发明这种干涉仪并对光速的精确测量而获得了 1907 年诺贝尔物理学奖。1895 年, 迈克耳孙曾用此干涉仪测量了镉红线的波长, 并将光的波长与标准米进行了比较。1920 年又用这类仪器测量了远方星体的直径。迈克耳孙干涉仪也是近代许多干涉仪如泰曼干涉仪和傅里叶分光计的原型。

**脉冲技术 (Pulse technique)** 脉冲信号的变换、产生和应用的技术。脉冲信号的波形在某一时间内有突发性和断续性的特点, 常用的脉冲信号有方波、矩形波、锯齿波、三角波、阶梯波和尖顶脉冲波等, 波形如图 1 所示。脉冲波形种类繁多, 因此表明其特性的参数也较多。矩形脉冲的主要参数有 (参见图 2): 周期  $T$ 、宽度  $t_w$ 、前沿  $t_r$ 、后沿  $t_f$ 、幅度

$V_n$  和脉冲空度  $D(= \frac{T}{t_w})$ 。

脉冲电路的特点有: 抗干扰能力强; 有脉冲电

图 1 几种常用脉冲信号波形

图 2 矩形脉冲参数

路中, 信号是靠脉冲的有无、脉冲宽度或脉冲的重复频率来表达的, 而干扰往往反映在对输出幅度的影响, 因而脉冲电路比较容易地把信号和干扰分开。精确度比较高; 在脉冲数字电路中, 代表信号的数码是靠脉冲的个数来表达的, 而控制脉冲的个数可以作得非常精确。功耗小、便于控制: 在脉冲电路中, 晶体管主要工作在饱和和截止两个状态, 这两种状态功耗都小, 而且这两种状态是很易控制的。允许脉冲功率大: 在脉冲电路中, 元件反承受的功率是瞬时的, 因此元件可以承受比额定平均功率大许多的脉冲功率。

脉冲电路一般含有晶体管和电容或电感器。晶体管用作开关, 它的通断可以改变电路的工作状态。电容、电感用作惰性元件, 可以形成电路中的暂态特性。由此它们可以完成诸如同步、分频、计数、移位寄存、电压比较、延时、扫描、模-数和数-模转换、选通、脉冲编码等功能。

脉冲技术已广泛应用于电子计算机、通信、雷达、电视、自动控制、遥测遥控、无线电导航和测量技术等领域。

**脉冲星 (Pulsar)** 具有短周期脉冲辐射的天体。这种辐射脉冲周期

最短约为 0.033 秒，最长的也只有 4 秒。脉冲本身的持续时间更短。脉冲星和辐射频谱除极少数外均集中在高频无线电波波段，故又称脉冲射电星，它可通过射电望远镜发现。1967 年，英国天文学家休伊什与贝尔在作射电望远镜巡天观测时发现了第一颗脉冲星。这一发现是天体物理学史上的一个重要里程碑。

至今已发现数百颗脉冲星。目前普遍认为脉冲星就是中子星。恒星演化到晚期，在一定条件下将塌缩成中子星。在这种塌缩过程中，恒星的半径从约 100 万公里收缩到仅约 10 公里左右，同时释放出大量引力势能，星体自转速度急剧增加，磁场也大大增强（可达  $10^{12}$  高斯）。电子在磁场中将作螺旋运动，同时发出方向性很强的同步辐射。在磁场高达  $10^{12}$  高斯的中子星表面，电子的螺旋轨道半径极小，其运动轨迹几乎被磁场拉直。在星体磁场最强的两极处，高速电子将沿磁力线向远处喷射，它们所产生的同步加速辐射也沿磁力线方向射出，形成一束细射束。一般中子星磁轴与它的自转轴不重合，因而当中子星自转时，这细束像探照灯一样扫过空间，因而射电望远镜收到的是脉冲信号。中子星转动一周，同步辐射电磁波也在空中扫过一圈，因而脉冲信号周期反映了中子星的自转周期。理论曾经预言，中子星的角速度约为 1 周/秒，这与观测到的脉冲星周期数据一致。但更详细的理论尚待进一步建立。

脉冲星具有超高密度、超强磁场以及超高温、超高压和超强辐射等特性，因此对于研究高密态物理学具有重要意义。

**毛细现象 (capillarity)** 把内径很小的管子插入液体中，润湿管壁的液体在细管里升高，而不润湿管壁的液体在细管里降低的现象。能够发生毛细现象的管子叫做毛细管。润湿管壁的液体在毛细管中升高，液面呈凹状；不润湿管壁的液体在毛细管中降低，液面呈凸状，这是由表面张力和接触角所决定的。

由于管中液面弯曲而在液面下产生的附加压强叫做毛细压强。管中液面为凸状时，附加压强为正；液面为凹面时，附加压强为负。若毛细管的内径为  $r$ ，管壁与液体的接触角为  $\theta$ ，液体的密度为  $\rho$ ，表面张力系数为  $\alpha$ ，则管中液面上升（或下降）的高度  $h$  为

$$h = \frac{2\alpha \cos\theta}{\rho g}$$

式中  $g$  为重力加速度。可见  $h$  与  $\alpha \cos\theta$  成正比，与  $r$  成反比。因而，管子越细，液面上升或下降就越明显，反之管子越粗，就越不易观察到毛细现象。

毛细现象在自然界中普遍存在。纸张、纺织品、粉笔等物体能够吸水，就是由于水能润湿这些多孔性物质产生毛细现象。农作物正是通过根和茎的毛细管的毛细作用把土壤中的水和养分吸收到机体中来才能生长。有的土壤毛细管结构不好，影响了农作物的产量，在农田管理中常常通过增加腐殖质来改善土壤的毛细结构，增加毛细管内水的储量。在石油开采中，控制和克服毛细管压力也是一个重要课题。由于储存石油、地层水和天然气的多孔砂岩的孔道都是极细小的毛细管，而在这些毛细管中，石油和水在和天然气接触处形成的弯曲液面所产生的附加压强阻碍着石油在地层中流动，在油田开采时就要把具有表面活性物质的热水或热泥浆打入岩层，使石油的表面张力变小，从而减小了由弯曲液面而产生的附加压强，使石

油易于流动，以此提高石油的开采量。

媒质 (medium) 见介质。

门电路 (gate circuit) 又称开关电路。用来对数字脉冲信号起开关作用的一种最基本型式的数字电路“门”是对数字电路基本单元的功能的一种形象化的比喻。当这种电路工作时，其输入端和输出端只取“高”、“低”两种确定的电平状态。在集成电路中，由于这两种状态的实现和变换的物理过程好像是电子的开关，所以形象化地把这种电路称之为门电路。在进行二进制数字运算中，人们人为地取门电路的高低电平状态代表“1”和“0”。只要把门电路进行适当的组合，就可以实现二进制的各种数字运算。门电路实现控制的基本条件有两个：一个是信号的时间；另一个是电路和信号的条件。

常用的门电路有：“与”(AND)门、“或”(OR)门、“非”(NOT)门、“或非”(NOR)门及“与非”(NAND)门等。

蒙特卡洛方法 (Monte-carlo method) 适用于所有利用随机数的各种各样过程的一种名称。该方法的基础是一组看来像从一特定的概率分布中随机抽取出来的数列。例如在 0 到 1 区间内的均匀概率分布，其分布密度函数为

$$p(x) \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & x < 0, x > 1. \end{cases}$$

在 BASIC 语言里，已有产生上述随机数的命令，即 RND(0)和 RND(1)，前者每次运行含有需要随机数的程序时，所产生的随机数序列是完全相同的，后者却不相同，即产生的随机数没有序号。在 FORTRAN 语言里，有专门产生随机数的子程序，需要时可以调用。

如果需要产生在区间[a,b]内的随机数，可写成：

$$a + (b-a) * \text{RND}(0)。$$

如果要产生 1~6 的随机整数，可写成形成：

$$K = 1 + \text{INT}(6 * \text{RND}(0))。$$

蒙特卡洛方法主要用于随机游动问题、统计模拟、积分、偏微分方程等多个方面。但蒙特卡洛方法精确度较低，速度较慢，如果要提高精确度，运算的循环次数将大量增加，不但费时，占的内存空间也会相应增加。只有在较为复杂的问题中，其他数值计算有一定的困难时，蒙特卡洛法反而简单和方便。目前正在进一步研究如何提高使用该法的效率。

《梦溪笔谈》中的物理知识 (Physics knowledge in Menxi Bitan)

《笔谈》是沈括晚年所撰的一部笔记文学体裁的百科著作。沈括是我国宋代著名的科学家。其中《笔谈》二十六卷，《补笔谈》三卷，《读笔谈》一卷，共三十卷，计 609 条。此书集沈括一生研究和见闻之精华，内容涉及天文、地理、地质、生物、医药、物理、历法、军事、史学、音韵、文字、考古等。英国科技史家李约瑟称赞它是“中国科技史上的坐标”。

磁学方面。《笔谈》记录了当时指南针的四种装置法：水浮法、指甲旋定法、碗唇旋定法和缕悬法，并指出，前三种方法“不若缕悬为最善。”《笔谈》记录了人工磁化方法：“方家以磁石磨针，则能指南，然常微偏东，不全南也。”后两句是关于磁偏角的最早记载，比西方的记录早四百年左右。当时沈括常在江、浙一带，那时该地区的磁偏角仅 3°~4°，能发现如此小的偏角实属不易。

声学方面。《笔谈》卷五、卷六中记述他关于乐律、古琴制作、古代扁形乐钟的发声等方面的见解；对声的共振现象研究尤多。他写道：“古法以牛革为矢服（盛箭器），卧则以为枕，取其中虚（空的），附地枕之，数里内有人马声，则皆闻之。盖虚能纳声也。”还记录了他做的共振实验：“琴瑟弦皆有应声：宫弦（弦的名称）则应少宫（弦的名称），商弦（弦的名称）即应少商（弦的名称），其余皆隔四相应（隔四根弦的两根弦都能应和）。今曲中有声音，须依此用之。欲知其应者，先调诸弦令声和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦，则纸人跃，他弦即不动。”这比西方同类实验早了五个多世纪。

光学方面。《笔谈》记录了凹面镜成像实验：“阳燧面洼，以一指迫而照之则正，渐远则无所见，过此遂倒。”这里所谓“过此”的“此”指的是凹面镜的焦点，沈括又称之为“碍”。在焦点附近不成像，故“无所见”。《笔谈》还对焦点作了十分形象的描述：“阳燧面凹、向日照之，光皆聚向内，离镜一、二寸光聚一点、大如麻菽，着物则发火，此腰鼓最细处也。”

《笔谈》中对我国古代的光学杰作——透光镜也作了研究，认为“文虽在背面鉴面隐然有迹，所以光中现。”并解释这是由于铸镜时冷缩不均匀而引起的。

**密度**（density）通常指单位体积的质量或物质的质量与体积之比。在国际单位制中，单位是千克/米<sup>3</sup>。

对于质量均匀分布的物质，以上两种定义均可；对于质量分布不均匀的物质，一般用“质量与体积之比”来表示其平均密度。某种物质的密度与水的密度之比称为这种物质的相对密度。以前，习惯上把重量与体积之比称为比重。根据国际单位制的定义，比重应是相对密度，即指某种物质的密度与标准物质（如水）的密度之比值，它是一个无量纲的值。为了与国际上使用一致，现不再用重量与体积之比这一比重概念，而用密度概念。一般地说，某物理量在空间、面上或线上分布的密集程度也用密度表示，分别称该量的体密度、面密度和线密度。如电子数密度表示单位体积中的电子数。

**密立根**（Robert Anderws Millikam 1868 ~ 1953）美国物理学家。生于莫里森。1891年毕业于奥伯林学院。在此之前，读完二年级时，便被聘为初级物理班的教员，他很喜欢这项工作，也增加了对物理学的兴趣。1895年获哥伦比亚大学博士学位。1910年任芝加哥大学教授。1916~1918年任美国物理学会会长。1921年任加利福尼亚工学院布里奇实验室主任。从而使该校成为世界上最著名的科学研究中心之一。

主要贡献是对电子电荷进行精密测定，获1923年诺贝尔物理学奖。1906年，提出用液滴法，对单个电子的电荷进行测定。1910年，发明了油滴法，次年设计了十分巧妙的油滴实验装置：让一个很小的带电油滴，在电场中使处于所受电场力与重力平衡的状态。根据油滴的半径、电场强度和油的密度，计算出油滴上的电荷。1913年，对电子电荷进行多次精密测定，得到电子电荷的数值为

$$e = (4.774 \pm 0.009) \times 10^{-10} \text{esu.}$$

与此同时，证明了电荷是一个孤立的常数，即电荷的不连续性。1914年，在可见光和紫外区验证了爱因斯坦的光电效应方程。1916年，在证实

爱因斯坦光电效应方程的基础上，测出当时最好的普朗克常数  $h$ 。

密立根对宇宙线也进行了大量研究。1921 ~ 1922 年，用气球进行实验，载有自动记录的验电器的气球上升高度达 15500 米。1925 ~ 1929 年，证明了宇宙辐射的致电离作用随着深度的增加而减少，并发现了宇宙线中的  $\alpha$  粒子、高速电子、质子、中子、正电子和  $\gamma$  量子。

**密立根油滴实验** (Millikan oil-drop experiment) 第一个直接测定电子电荷的物理实验。由美国物理学家密立根于 1911 年完成。他设计了一种直接测量附在油雾中许多油滴上的微量电荷的方法。实验装置的原理如图所示，雾状小油滴由喷雾器小嘴喷到两块平板上面的空间，上板有一小孔，实验时使小孔开启足够长的时间，让小油滴穿过该孔而漂移到两板之间的空间。平行板接有可调直流电源。侧面有显微镜通过玻璃窗口观察油滴的运动情况，并首先由此测出在两板间没有电位差时油滴下降的速率，从斯托克斯定律算出油滴的质量  $m$ 。然后，再用 X 射线照射两板间空间使空气电离，从而使油滴带上微小的电荷  $q$ ，调节两板之间电压，使油滴停止在两板间的某点处。这时根据作用于带电油

滴的电场力等于油滴重力的力平衡方程  $a \frac{V}{d} = mg$ ，便求得油滴的电荷  $q$ 。

式中  $V$  为平衡时平行板上的电位差， $d$  为两平行板间的距离。

#### 密立根油滴实验图

重复运用这种方法测定各个油滴的电荷数值，可以发现，这些数值并不是连续分布的，而是分成若干组，每组分别是一个最小电荷值（基本电荷）的某一整数倍。密立根从实验中发现并断定这一最小电荷值就是电子电荷，数值为  $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。

**摩擦** (friction) 两相互接触的物体之间具有相对速度或具有相对运动趋势时，在它们接触面上所发生的阻碍其相对运动的现象。两相互接触的固体之间的摩擦称为干摩擦，其中若两固体之间只存在相对滑动趋势而未发生相对滑动时的干摩擦称为静摩擦；两相对滑动固体之间的干摩擦称为动摩擦。伴随着液体或气体内部各部分相对移动而发生的摩擦称为湿摩擦。当固体在液体或气体中运动时，液体或气体也将在固体表面上产生阻碍运动的摩擦力，这种摩擦实际上是固体表面所带走的一薄层流体与外侧邻近一层流体之间的湿摩擦。

**摩擦的机理** 一般说来，固体之间的摩擦出于两种原因，其一是两固体表面粗糙不平，两接触面上凹凸不平的部分互相啮合，阻碍了两物体之间的相对运动。其二是两固体表面或表面上凹凸不平处互相挤压，使两表面上分子之间的距离进入了分子引力作用范围之内，产生了表面之间的粘合现象，因而阻碍了两物体之间的相对运动。上述两种产生摩擦的原因可能同时存在，也可能以其中一种为主。例如木材之间的摩擦以啮合作用为主，金属之间的摩擦则以粘合作用为主。液体或气体各相对运动部分的摩擦主要可以用分子之间通过碰撞和渗透而产生的动量传递来解释。由于摩擦的产生原因还牵涉到不少其他因素，所以，摩擦作用的一般规律直接由实验决定。

**摩擦力** 两固体表面相互接触时在表面之间所产生的阻碍彼此之间相对运动的切向作用力称为外摩擦力，也简称为摩擦力。如两表面之间尚未发生相对运动，此摩擦力称为静摩擦力；如两表面存在相对运动，则称



为滑动摩擦力。气体和液体内部各部分发生相对运动而引起的阻碍这种相对运动的力称为内摩擦力。

一个物体所受静摩擦力的大小由此物体所受的其他外力和接触面之间没有相对运动的条件共同决定。特别是，静止物体所受的静摩擦力总是与使物体有相对运动趋势的其他外力平衡。在外力和摩擦力的共同作用下，如物体在接触面上趋于滑动，这时静摩擦力达到它可能有的最大值，称为最大静摩擦力。实验表明，最大静摩擦力  $f_{sm}$  与物体在接触面上的正压力  $N$  近似成正比：

$$f_{sm} = M_s N。$$

$M_s$  称为静摩擦系数，由物体和与之接触的另一物体的材料性质决定。实验也表明，滑动摩擦力  $f_k$  也与正压力  $N$  近似成正比：

$$f_k = \mu_k N。$$

$\mu_k$  称为滑动摩擦系数，也由物体和与之接触的另一物体的材料性质决定。当液体或气体各层之间存在速度梯度时，一层和另一层之间存在阻碍彼此相对运动的切向力称为内摩擦力。实验表明，单位面积上的内摩擦力  $f$  和层与层之间的速度梯度成正比：

$$f = \eta \left( \frac{v}{x} \right)。$$

$v$  是相距为  $x$  的两层之间的速度差，比例系数  $\eta$  称为内摩擦系数，也称粘滞系数，由液体或气体的性质决定。

**摩擦的作用** 摩擦是一切现实运动中不可避免的现象，它的作用是减小物体之间的宏观的总体运动，通过摩擦力做功把机械能转化为分子无规则运动的内能。人类的祖先正是利用摩擦生热原理，发明了钻木取火，才得以生存和发展。在日常生活、生产和工程技术中，摩擦力时时、处处都在起作用，离开了摩擦，人类的衣食住行都将发生不可设想的困难。因此，利用摩擦的有利方面和避免它的不利方面，始终是人们关心和研究的一个重要课题。

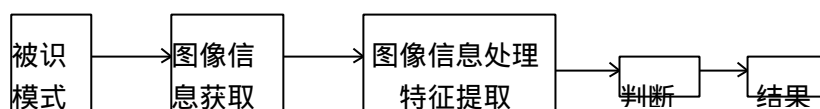
**摩擦力 (frictional force)** 参见摩擦。

**摩擦起电 (triboelectricity)** 用摩擦方法使物体带电的过程。古代就已发现了摩擦起电现象。后来发现存在两类电荷后便规定，用丝绸摩擦的玻璃棒带的电荷为正电荷；用毛皮摩擦的硬橡胶棒所带电荷为负电荷。现代科学指出，从物质的原子结构层次来说，原子由带正电的原子核和绕核运动的带负电的电子构成，通常原子核所带的正电荷与电子所带的负电荷数量相等，原子呈电中性，整个物体也不带电。摩擦起电实质上是物质中的电子从一个物体转移到另一个物体的结果，失去电子的物体带正电；获得电子的物体带负电。由于电荷守恒定律，原来不带电的两个物体互相摩擦起电后，它们所带的电量必定数值相等，符号相反。

**模式识别 (Pattern recognising)** 又称图像识别，以研究某些对象或过程的分类与描述为主要内容的一门技术科学。它主要涉及数学、生物学、心理学、语言学和计算机科学等，是多学科综合的产物。模式识别技术现已在天气预报、生产控制、质量检验、疾病诊断、遥感监测、文字识别、地震探测、指纹分析、细胞分类、遗传工程等方面得到广泛应用，并将在对计算机视觉、机器人和第五代智能计算机的研制工作中起重要作用。

用。目前，具有识别功能的智能产品正逐渐步入国际市场。

模式是对所研究的物理对象或过程的定量或者结构的描述。具有某些共同特征的模式集合称为模式类。数字、声音、文字、各种黑白与彩色图像、遥感图片、手写汉字、指纹图案、空间物体等属于不同种类的模式。用计算机对图像、声音、文字、物体等模式进行分析、分类，对模式或模式类间的结构加以描述和理解，这一过程称为模式识别。模式识别就是用计算机代替和扩展人类的识别功能，解决人类生理器官所不能识别的问题，如自动装配线中零件质量的检测，复杂事故的查寻，人体内病灶和疾病潜伏期的诊断，货物标签、帐单、邮政编码的自动识别等。模式识别过程可分为模式输入、模式鉴别和结果输出三个阶段。下图为模式识别流程图。在模式输入阶段，由光电装置或声电装置等输入设备将模式（图像、图形、声音等）数字化后转换成电信号，再经 A/D 接口变成数字图像送入计算机。计算机对图像进行处理后提取模式特征或对图像基元的结构特征描述，完成模式的分类和判断，然后用一定的语法规则将图像基元连成各类“树”和“链”将结果输出。模式识别的方法有统计模式识别和句法模式识别。统计模式识别以统计决策理论为基础，建立统计学识别模型。句法模式识别又叫结构模式识别，它立足于分析模式的结构，以形式语言理论的概念为基础。



模式识别流程图

模式识别技术虽然只有 20 多年发展历史，但已在各个领域得到广泛的应用。起步较早的字符识别最先用于大量票据的自动处理、商品包装上条码的识别与自动记帐等。在银行系统用于支票上字符识别，便于自动处理各种票据。在邮政系统用于信函的自动分拣，既可减轻人们的劳动强度，又可极大地提高分拣速度，达到准确迅速的目的。近年来，模式识别技术已广泛应用于工业生产，如用于电子、机械制造行业中的自动检验、质量检查等，产品的自动检验已成为模式识别的一个重要分支。在空间技术中，模式识别常用于处理由卫星、飞船等空间探测器发送回的数字图片，对各种影像模式进行分类和判别等。模式识别目前已成为人与机器、社会科学与自然科学、基础理论与应用技术之间的接口区域。随着模式识别技术科学的进一步发展，人们正致力于研制具有听、说、看文字图形能力的机器人和具有思维和联想能力的新一代智能计算机。

**模-数转换器的基本原理** (fundamental Principle of ADC) 模-数转换器的功能是把模拟信号转换成某种代码的数字信号，因此它又称为编码器。实现 A/D 转换的基本思想是以某一参考量 R 为单位去度量模拟信号 A，从而得到数字量 D，用数学形式表达这一过程可以写成下式

$$D = \left[ \frac{A}{R} \right],$$

式中  $\left[ \right]$  表示一种舍零取整的过程。由于多数情况下 A 不能被 R 整除，实际上计算机或数字系统也只能读取有限位数的数字量，因此转换结果所得数字量 D 只是  $A/R$  的一个近似值，近似的程度取决于数字量 D 的位

数。这个过程可用天平称量物体质量的过程来类比。天平称量结果所得数字量是最小砝码的整数倍，小于最小砝码质量的零头被舍去。下图是基于天平称物原理而设计的一种 A/D 转换器原理结构。它用一套比较器将输入模拟电压与一组参考电压  $R_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 同时进行比较，比较器的输出  $V_{oi}$  只有两种逻辑电平(取 0 或 1)，分别代表  $A < R_i$  和  $A > R_i$  两种幅值大小关系。各比较器输出逻辑电平  $V_{oi}$  经过适当编码，即可得到与 A 等效的数字量 D。如果参考电压  $R_1 \sim R_n$  符合二进制关系(即  $R_2=2R_1$ ,  $R_3=2^2R_1$ , ...,  $R_n=2^{n-1}R_1$ )，则 D 为二进制数。比较器在这里担任着模拟电路

#### 用于天平秤的 A/D 转换器原理结构

和数字电路之间接口的任务，它的输入是模拟量，输出是开关量，比较器的分辨力和精度对 A/D 转换器的分辨力有着决定性的影响。ADC 的过程实质是将模拟信号进行幅值整量化的过程。量化过程中的取整舍零所产生的误差称为量化误差，这是 A/D 转换的原理性误差。减少这一误差的唯一途径是缩小度量单位  $R_1$  (又称量化单位)，但要受到比较器分辨力的限制。

**膜振动(vibration of membranes)** 周界张紧的弹性薄膜受到横向扰动后发生的横向振动。当张紧的弹性薄膜中的一部分受到横向扰动，膜的张力总是企图使它返回平衡位置，而它在返回平衡位置时，由于惯性运动，继续向反方向运动，反复如此，就形成了膜的振动。膜振动的频率和具体振动方式由膜的张力 T、厚度 h、面密度  $\rho$  以及膜的周界形状决定。对周界固定的圆形膜来说，振动的最低频率(基频)是

$$f = \frac{0.384}{\alpha} \sqrt{\frac{Th}{\rho}}$$

a 为圆形薄膜的半径。圆形薄膜以上述基频振动时，整个膜面同相地振动，最大振幅发生在膜的圆心。其他各种可能的振动频率并不是基频的整数倍，其中有这样的振动频率存在，它们与基频之比分别是 2.295, 3.60, 4.90 等。当膜按这些频率振动时，膜面上将出现一个或多个节圆(见图)，在各节圆的相邻两侧，膜上各点振动的位相相反。利用膜振动发声的乐器有鼓、芦笛等，这类乐器统称为膜鸣乐器。

#### 膜振动

**《墨经》中的物理知识(physics knowledge in Mojing)** 《墨经》是战国时期墨家著作的总集《墨子》中的一部分。计有《经上》、《经下》和《经说上》、《经说下》4 篇共 179 条。有人认为《墨经》是后期墨家的著作，也有人认为《经》是墨家创始人墨翟主持编定或自著，《经说》则为其弟子们所著录。

力学方面。《经上》分别用“久，弥异时也”与“宇，弥异所也”来定义时间和空间，即综合具体的“时”与“所”，形成“时间”(“久”)与“空间”(“宇”)的观念。并用“动，或(域)徙也”与“止，或(域)久也”来定义运动和静止，即认为“运动”(“动”)就是物体位置的迁移，“静止”(“止”)就是物体在某处停留有一定的时间。由于有了类似于“瞬时”(“无久”)的观念，因此对运动的分析就比较深刻。《经》还最早提出：“力，刑之所以奋也。”即力是使物体由静而动、动而愈速或由下而上的原因。《经说》指出物体的重量也是力，物体之能下落，或被上举。都是基于重力的作用。对于力的平衡，《经》以头发悬物为例，

分析了材料是否断裂，决定于材料的内力与外力是否平衡。对于杠杆的平衡，《经》借桔 和秤为例，用“本”、“标”、“权”、“重”等术语，比较完整地表达了不等臂杠杆的科学知识。

光学方面。《经下》中有相互联系的 8 条论述了几何光学的知识。从头 5 条看，首论影的成因，次述光和影的关系，第 3 条以针孔成像论证光的直进，接着又说明光的反射，最后讨论了光、物、影三者的关系。后 3 条分别论述了平面镜、凹面镜、凸面镜的成像规律。其中关于凹面镜成像的情况，《经》云：“鉴洼，景（影）一小而易，一大而正，说在中之外、内。”按钱临照说，这里“中”指球面镜的中心和焦点之间的一段空间。当人从远处向镜走来，在球心之外时，见到自己缩小的倒像；走在球心和焦点之间，因像在人的背后，故无所见；过了焦点又见到自己放大的正像。这种观察是以人体、人目代替今人用灯烛、白屏的实验方法。在《经说》中与此条相应的一段，还有些难解的文句尚待探索。

墨子（约公元前 468～前 376） 中国先秦思想家、政治家。名翟，相传原为宋国人，长期住在鲁国。曾学习儒术，因不满其繁琐的“礼”，另立墨家学派，聚徒讲学。他博览经典古籍，四处奔走游说，虽一度做官，终不被重用，后来他举荐弟子到各国去推行他的政治主张。墨家成员大多来自社会下层，生活刻苦朴素，喜欢“摹万物之然”以对人们的生产劳动有所帮助，研究科学技术的风气极盛。墨家以兼爱、非攻、尚贤等为中心，与儒家展开一系列的学术和思想斗争。前期墨家以墨翟为代表，其学说对当时思想界影响很大，与儒家并称“显学”。后期墨家发展了该学说中的唯物主义倾向，克服了其中有关宗教迷信的部分。

据汉书《文艺志》著录《墨子》共 71 篇，现存《墨子》53 篇，是研究墨子和墨家学说的基本材料。其中《兼爱》、《非攻》、《尚贤》、《尚同》、《节用》、《节葬》、《天志》、《明鬼》、《非乐》、《非命》10 篇是他的思想精华。《墨子》中的《墨经》是后期墨家进一步发展他的思想的著作，内容包括《经上》、《经下》、《经说上》、《经说下》、《大取》、《小取》6 篇，一说后 2 篇除外。《墨经》概括了墨家关于认识论、逻辑学以及自然科学的研究成果，其中包含有我国最早的关于原子论、力学和光学等多方面的知识，是对世界古代原子论、力学和光学发展的杰出贡献。《墨子》中的《备穴》等篇还载有固体传声和共鸣现象应用的声学知识。

目的论（teleology） 用目的或目的因解释自然的一种学说。它分外在目的论和内在目的论。苏格拉底是外在目的论的早期代表，他否认事物发展的客观因果性和规律性，认为自然界的事物之所以成为它们存在的那个样子，是由于神的有目的的安排；事物都是由理智产生的，并为某种有用的目的而存在。亚里士多德是内在目的论的奠基者，他把目的规定为自然事物本身的内在决定性，认为自然界的事物的存在有其必然性，但它们又是有一定目的的；事物不是由于必然性才存在，目的才是事物存在的真正根据和推动者，目的是比必然性更高的原则。马克思主义的唯物论彻底驳斥了目的论，但是现代的新活力论等唯心主义学派，仍然以不同的方式宣扬目的论。

目镜（eyepiece） 光学仪器中用于观察物镜所成实像的放大镜。在组成光学仪器的透镜中，目镜最靠近人眼。一般的放大镜也可以说是目镜。

和放大镜一样，目镜成虚像于明视距离，有的目镜也成像在无穷远，以便眼睛在最松弛的状态下工作。目镜的第二个作用是形成一个合适的眼位距。

**组合目镜** 由两个或多个透镜组合而成的目镜，具有较高放大率和较大的视场，且可以校正像差。在这组合器件中，靠近眼睛的一个透镜称为视镜，或称接目镜；靠近物镜所成实像的透镜称为场镜，又称向场镜。从视镜到出射点（即出射光瞳与光轴相交的点）的距离称为眼位距。眼睛的瞳孔或眼的转动中心应放在出射点，以便接受视场各方的光，看见明亮广阔的视场，否则将发生部分光束被光阑割截的渐晕现象。眼位距对各种不同的光学仪器来说是不同的，但至少需 10 毫米，以避免眼睫毛的妨碍。组合目镜能提供一个合适的眼位距。

**负目镜** 光焦度是负值的目镜。在天文观察中，像的正立或倒立没有什么影响，故天文目镜没有正像作用。具有正像作用的目镜称“正像目镜”，或称地面目镜。负目镜具有正像作用。

**冉斯登目镜** 由两块相同的平凸透镜、凸面相对且相隔一定距离组成的目镜。物镜的像平面位于目镜的场镜前，与目镜的物方焦平面重合。故物镜所成的实像经场镜成放大的虚像，再通过视镜成一虚像。这种目镜校正了彗形像差和像散，像场弯曲也较小，但不能校正球差和色差。其最大优点是在焦面上放置叉丝或透明的刻度板，以便于测量观察物。这种目镜也可当作一般放大镜用来观察实物。

**惠更斯目镜** 由两块相同材料制成的平凸透镜，凸面都朝向物镜且相隔一定距离组成的目镜。场镜与视镜的焦距之比为 3 : 1，两者之间的距离约为焦距之和的一半。物镜所成的像对于场镜是虚物，经场镜成实像，再经视镜成虚像。主要优点有两条，一是放大率色差改正得较好；另一是目镜的物方焦面在场镜和视镜之间，因而使仪器镜筒长度缩短。缺点是使用刻度板有困难，不能测量观察物，也不能单独做放大镜观察实物。

**穆斯堡尔效应 (Mössbauer effect)** 原子核无反冲 发射和共振吸收现象。德国物理学家穆斯堡尔于 1958 年首先发现，并从理论上作了解释。原子核从激发态  $E_2$  跃迁到基态  $E_1$  时将发射  $\gamma$  光子。对于自由核，当它发射  $\gamma$  光子时将受到反冲，在跃迁过程中所释放的能量  $E_2 - E_1$  这时并不全部转换为  $\gamma$  光子的能量，其中一部分将变为发射核的反冲动能  $E^2/2mc^2$ ，这里  $E$  为光子能量， $m$  为原子核质量， $c$  为光速。这种光子不能为另一处于基态的同类核所吸收。如果将发射核固定而吸收核可自由运动，则吸收核将会受到  $\gamma$  光子的碰撞而发生反冲，这时光子的部分能量将转化为吸收核的反冲动能，所余下的能量也不足以使吸收核激发。如果将发射核和吸收核都固定，例如将它们都制备在固体晶格点阵上并置于低温下，这种无反冲  $\gamma$  光子发射和共振吸收才能实现。因为这时原子核发射或吸收  $\gamma$  光子时受到反冲的是整块固体，反冲动能公式中的  $m$  应代以整块固体的质量，反冲动能因此极其微小。这种方法具有极高的分辨率，可用于观察原子核能级的超精细结构，并由此探知物质的微观结构和微观相互作用。穆斯堡尔效应目前已广泛应用于原子核物理、凝聚态和固体物理、化学、生物学以及医学等领域。20 世纪 60 年代，利用穆斯堡尔效应在地面上测量了源与吸收体在高度上相距 22.5 米时的  $\gamma$  光子能量位移，在 1% 的精度内证实了这个能量位移恰好等于光子的重力势能之差值，从而验证了重力场中光子

频率移动的效应。通过类似的实验还可测量光子频率随温度移动的效应(热红移)。

钠灯 (sodium vapor lamp) 充有金属钠的钠蒸气放电灯。有低压钠灯和高压钠灯两种。低压钠灯主要是利用低压钠蒸气放电,发射 589.0nm 和 589.6nm 的黄光,具有良好的单色性,发光效率高。小功率的低压钠灯主要用作光谱仪器中的单色光源,45 瓦以上的低压钠灯主要用作港口、码头等处的照明或信号灯。高压钠灯是充有一定比例的钠和汞的高压钠蒸气的放电灯,光效率高于高压汞灯。其灯管用抗钠腐蚀的半透明多晶氧化铝陶瓷制成,燃点时发出白色光。由于光效高、寿命长、透雾性好,广泛应用于道路、机场、码头、车站、广场及工矿企业的照明。它作为一种理想的节能新光源,在世界各国受到普遍的重视和应用。显色性改进型高压钠灯是通过高压氙气来实现的,它的光效比普通高压钠灯低,但仍是白炽灯光效的 3~4 倍,而寿命为白炽灯的 10 倍。

内力 (internal force) 系统内各质点之间的相互作用力。内力的特征是,如果某一力是内力,则此力的反作用力也是内力。根据牛顿第三定律,可知每一对作用力和反作用力的矢量和等于零,而且每一对作用力和反作用力对任一点力矩的矢量和等于零。由此可推论,一个系统全部内力的矢量和以及全部内力对任一点力矩的矢量和等于零。内力的这种性质,对研究质点组和刚体的运动带来很多方便。

不是内力的力,即系统外的物体对系统内的物体上作用的力,称为外力。一个力是内力还是外力,随系统的划分而定。所以,对系统的不同选择来说,同一个力在一种选择中可能是内力,而在另一选择中可能变成外力。例如,在两球的碰撞中,对两球组成的系统来说,相碰的一对作用力和反作用力是内力;而对每个球来说,另一球的碰撞力是外力。

内能 (internal energy) 由热力学系统的状态所确定的能量。从微观上看,内能是系统中分子所具有的各种形式的动能、分子内部原子间的振动能和分子之间相互作用势能的总和。

内能是系统状态参量的单值函数。对实际气体,其内能由温度、体积和压强这三个量中的任意两个量确定。对理想气体,内能仅仅是温度的函数。

从 1840 年开始,在长达二十多年的期间内,焦耳进行了多次实验,揭示了内能的物理意义。结果表明,当一个系统经绝热过程由状态  $i$  变到状态  $f$  时,外界对系统所做的功  $A$  仅取决于这两个状态,而与中间经历的过程无关,因而可以用绝热过程中外界对系统所做的功  $A$  定义一个状态函数  $U$ ,该函数在状态  $i$  和状态  $f$  时的值之差即等于  $A$   $U_f - U_i = A$ 。如果系统经历的不是绝热过程,则外界对系统所做的功  $A$  不再等于  $U_f - U_i$ ,但是有  $U_f - U_i = A + Q$ ,其中  $Q$  是系统从外界吸收的热量。态函数  $U$  就称为系统的内能。以上结论表明,内能确实是热力学系统所具有的一种能量形式,做功和传递热量都可以把其他形式的能量转化为内能,这是普遍的能量守恒定律在热运动中的体现,也称为热力学第一定律。

内能作为态函数,在每一个状态下内能的值可以有一个任意的相加常量,这个常量可以视具体问题而选择。内能是广延量,它的单位与功的单位相同,取作焦耳 (J)。

内燃机 ( internal combustion engine ) 参见热机。

能级 ( energy level ) 微观粒子系统处于束缚态 ( 如氢原子中的电子 ) 时所具有的分立的可能能量值。在能量图上可用一系列水平线来表示这些能量可能值, 能量值由低到高, 显示出阶梯状结构。附图显示了氢原子基本的能级图。能量最低的能级称为基态能级, 然后随着能量值的升高, 分别称为第一激发态能级, 第二激发态能级, ... 等。当电子处于高激发态能级时, 会向较低的激发态能级或基态能级跃迁, 跃迁过程中所放出的光的频率决定于两能级能量之差值。当电子处于基态或低激发态能级时, 在外界电磁场的扰动下将会向高激发态能级跃迁。此过程中所吸收的光子的频率也决定于两能级能量之差值。此外, 并非任何两能级之间都会通过发射或吸收光子而发生跃迁。跃迁过程必须满足各种守恒定律 ( 如能量、角动量、宇称守恒定律等 )。只有满足各种守恒定律的能级之间才能发生跃迁过程, 并伴随着吸收或放出相应频率的光。所以从能级图上可以清楚地显示出原子的发射光谱和吸收光谱线系结构 ( 参见氢光谱 )。

#### 氢原子能级图

能力 ( ability ) 顺利完成某种活动所需的个体心理特征, 是探索与运用知识的本领, 是影响活动成效的基本因素。能力是个人智力和知识技能通过实践转化而成的个体素质, 它的基础在于人的社会实践即后天形成的心理特征。能力来源于智力而又高于智力, 它是比智力活动含义更广泛的概念。能力还包括实践——思维——再实践过程中非智力活动的因素。

能力一般大体上可划分为认识能力与活动能力两大类, 又可将认识能力分为观察力、注意力、记忆力、思维力、想象力, 而以思维力为中心。此外, 还有其他各种分类。知识和方法是形成能力的基础, 能力的高低反过来制约着知识掌握过程的速度、深浅和成效。能力一旦形成, 就具有了开发新知识、创造新方法的本领, 因此能力来源于知识和方法, 又高于知识和方法。从能力的培养过程来看, 能力具有以下几个特征。 实践性: 一切间接知识和方法只有通过本人的直接实践活动经验才能转化为能力, 能力是本人的直接实践经验的产物。 综合性: 任何能力 ( 如思维能力、运算能力 ) 都不是靠单项的知识和方法取得的; 反之, 任何一种知识、一项活动或方法光靠一种能力也不能完成。 渐进性: 学习者的稳固能力只有通过多次实践和综合训练才能形成。培养能力要有一个循序渐进、不断提高的过程。

能量 ( energy ) 物质运动的一种量度, 简称能。伽利略时代已出现了“能量”思想, 但还没有“能”这一术语。17世纪由莱尼布兹提出“活力”的概念, 它相当于现在动能的两倍。1807年由托马斯·杨最早提出了“能”这一术语。相应于不同形式的运动, 能量可分为机械能、系统内能、电磁能、化学能、原子能等。机械能一般指动能或势能, 或两者之和。系统内能是系统内各分子无规则运动的动能、分子间相互作用的势能、原子和原子核内能量的总和, 但不包括系统整体运动的机械能。电磁能是指电能或磁能, 或两者之和, 即电场能和磁场能的总和。化学能是原子的外层电子变动, 导致电子结合能改变而放出的能量。原子能即原子核能, 是原子核结构发生变化时所放出的能量。当物质的运动形式发生转化时, 能量形式同时发生转化, 如机械运动转化为热运动, 则机械能便转化为热运动



能（旧称热能）。

能量与质量虽是不同的物理量，但能量与质量却有密切的联系。爱因斯坦的狭义相对论表明：具有能量  $E$  的任何物质（包括实物粒子和场）同时具有质量  $m$ ，物体的总能量与总质量成正比，并满足下列关系： $E=mc^2$ ，式中  $c$  为真空中的光速。人们运用上述的质能关系式成功地解释了原子核的“质量亏损”（原子核的质量小于它所含各核子独立存在时的总质量，这两种质量的差额称为质量亏损）现象，并发现了核内蕴藏着的巨大能量，预示了利用原子能的可能性和重要性。

能量可在物质之间传递。能量的传递过程通常要靠做功来实现。而物体对外做功，就必须消耗本身的能量或从别处得到能量补充。因此，一个物体的能量愈大，它对外做功的本领就愈大。储存于系统内的总能量是该系统温度达到绝对零度之前的静态平衡所能做的功的极大值。

自然界中各种形式的能量都服从能量守恒与转化定律，即各种形式的能量在一定条件下，都必然以直接或间接的方式，按照固定的当量关系相互转化；在转化过程中，能量既不能创造，也不能消灭。

**能量均分定理**（energy equipartition theorem） 经典统计物理学在应用上的一个重要定理。它表明，对于处在温度为  $T$  的热平衡状态的经典系统，哈密顿量中每一个以独立平方项出现的广义坐标或广义动量对系统平均能量的贡献都是  $\frac{1}{2}kT$ 。

从能量均分定理可以立即导出许多经典系统的内能表示式和热容量表示式，其中一个典型例子就是固体内能和热容量。固体中的原子可以在其平衡位置附近作微振动。假设各原子的振动是相互独立的简谐振动，每个原子有三个自由度，而在每一个自由度上的能量表示式中有两个平方项

$(E = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}mw^2q^2)$ ，因此，按能量均分定理，在温度  $T$  时，一个原子的

平均能量为  $\bar{E} = 3kT$ ，固体的内能  $U = 3NkT$ ，定容热容量  $C_v = 3Nk$ （ $N$  为固体中原子的数目）。这个结果与 1818 年杜隆、珀替由实验所发现的定律相符合。然而实验发现，固体热容量在低温下随温度下降而很快减小，这是因为在很低的低温下，每个粒子所处的能级分立的量子本性将会通过热容量对温度的依赖关系而表现出来，尤其是当温度趋于绝对零度时，按照热力学第三定律，热容量将趋于零。这个事实是经典统计理论无法解释的。爱因斯坦和德拜先后提出了固体比热容的量子理论，成功地说明了固体热容量随温度的变化关系。

能量均分定理不仅适用于微观粒子能量表示式中的广义坐标和广义动量，也适用于哈密顿量中以独立平方项出现的、宏观上可观测的“坐标”。例如，动圈式检流计或其他仪器中用细丝悬挂的反射镜会不断地进行无规则的扭摆运动。这种系统的哈密顿函数可以写成  $H = \frac{1}{2I}P_\theta^2 + \frac{1}{2}\alpha\theta^2$ ，式中第一项是系统的动能， $I$  是转动惯量， $P_\theta$  是与偏转角  $\theta$  共轭的广义动量，而第二项是偏转角  $\theta$  引起的势能， $\alpha$  是弹性系数。当该系统处于温度为  $T$  的热平衡状态时，它的平均动能和平均势能分别都是  $\frac{1}{2}kT$ ，特别是由

$\frac{1}{2}\alpha\bar{\theta}^2$  可得到宏观上可观测的偏转角 的方均根值为  $\sqrt{\bar{\theta}^2} = \left(\frac{kT}{\alpha}\right)^{1/2}$ 。

这个结果表明，由于反射镜的无规则运动，将使仪器的灵敏度受到限制，可观测的最小电流引起反射镜的偏转必须等于或大于由于无规则运动引起的偏转，否则就无法区分出所记录的偏转出自何种原因。类似的现象还有电子线路中出现的热噪声。

能量均分定理是关于分子热运动动能的统计规律，是对大量分子进行统计平均的结果。对个别分子而言，在每一瞬间它具有的总能量（各种形式的动能和势能）完全可能不符合能量均分定理得出的结果。对大量分子的整体而言，能量之所以按独立平方项均分是依靠分子的无规则碰撞来实现的。在达到平衡态时，分子在各个方向上碰撞的概率均等，各种形式能量的互相转化也均等，于是就出现了能量均分。

**能量守恒定律的发现** (discovery of conservation law of energy) 19 世纪物理学发展中的一项极其重大的科学发现。该定律是在 5 个国家、由各种不同职业的 10 余位科学家从不同侧面各自独立发现的。其中迈尔、焦耳、亥姆霍兹对发现能量守恒定律作出了主要贡献。

**迈尔的工作** 德国医生迈尔最早是从人体新陈代谢的研究中得出这个重要发现的。1840 年，年仅 26 岁的迈尔在一艘驶往爪哇的船上作随船医生，他在给生病的船员放血时，发现病人的静脉血比在欧洲时的颜色要红些，由此引起他的沉思。他想到热带地区人的静脉血所以红些，是由于其中含氧量较高的缘故，而氧所以多出来，是机体中食物的燃烧过程减弱的结果。这使他联想到食物中化学能与热能的等效性，由此推测如果人体的能的输入同支出是平衡的，那么所有这些形式的能在量上就必定是守恒的。1842 年，迈尔发表了题为《论无机界的力》的论文，进一步表达了物理化学过程中能量守恒的思想，并提出了建立不同的力之间数值上的当量关系的必要性。

**焦耳的工作** 英国物理学家焦耳极力想从实验上去证明能量的不灭。1840~1841 年，经过多次通电导体产生热量的实验，他发现电能可以转化为热能。1843 年，他钻研并测定了热能和机械功之间的当量关系，做了一系列的实验，并宣布：自然界的能是不能毁灭的，那里消耗了机械能，总能得到相当的热，热只是能的一种形式。1847 年，他做了迄今认为确定热功当量的最好实验。此后不断改进实验方法，直到 1878 年还有测量结果的报告，那时测得热功当量的平均值为 423.9 千克重米/千卡。这个值比现在人们公认的值 427 千克重米/千卡约小 0.7%，如此精确的实验结果为能量守恒定律的确立，提供了无可置疑的实验证据。

**亥姆霍兹的工作** 德国物理学家、生理学家亥姆霍兹是从生理学问题开始对能量守恒原理进行研究的。在此基础上，于 1847 年出版了《论力的守恒》一书。在这部篇幅不长的著作中，亥姆霍兹确认“力”的守恒定律在自然界中所起的作用，给出了不同性质“力”的定量表示式，也就是给出了对不同形式的能的数学表示式，并研究了它们之间相互转化的情况，从而这部著作成了能量守恒定律论证方面影响较大的一篇历史性文献。

**能量守恒定律发现的意义** 能量守恒定律的发现，在物理学史上是一个非常有益的事例。因为在该定律发现的过程中，除了上述 3 位物理学家作出主要贡献外，还有法国的卡诺于 1824 年，德国的莫尔于 1837 年，

法国铁道工程师塞甘于 1839 年，生活在俄国的瑞士化学家赫斯于 1840 年，德国物理学家霍耳兹曼于 1845 年，英国律师出身的电化学家格罗夫于 1846 年，丹麦工程师柯耳丁于 1847 年，以及法国物理学家伊伦于 1854 年，都曾独立地发表过有关能量守恒方面的论文，对能量守恒定律的发现作出了贡献。这就生动地告诉我们，物理学上的历史性突破，个人的努力和才能固然是重要的因素，但客观的历史条件（包括社会、生产和科学的状况）则更为根本。一旦等到条件成熟时，一个重大的课题同时由几个人甚至十几个人去突破它，也就不足为奇了，这也就体现了历史的必然。

能量守恒定律的发现，在物理学史上又是一个非常重要的事情：这个定律表达了关于运动量不可创造和不可消灭的普遍规律；这个定律概括了一切物理现象：力、热、电、磁、光的现象，这就有可能用这一定律从同一观点去研究所有这些现象，把它们看成是可以互相转化的运动的不同形式，揭示了这些运动形式之间的统一性，从而达到物理科学的第二次大综合；这个定律的发现也促进对自然现象认识的辩证观点的发展，自然辩证法认为，自然界中的一切现象都应当是相互联系的。

**粘度 (viscosity)** 量度流体粘滞性大小的物理量，又称粘滞系数。做稳定层流的流体，流速不同的相邻流层的接触面上有与面平行而阻碍相对流动的阻力的存在，这种阻力称为粘滞力或内摩擦力。大多数流体的粘滞力  $F$  与接触面积  $S$  及横向（垂直于流速  $v$  的方向）的速度梯度  $\frac{dv}{dy}$

（ $y$  为流层的距离）成正比，即

$$F = \eta S \frac{dv}{dy},$$

**比例系数** 即为粘滞系数。其数值等于速度梯度为一个单位时，流体在单位面积上受到的切向力的数值。单位为泊 (poise)。国际单位制用帕·秒表示。此规律最早由牛顿根据实验发现，因此称为牛顿粘滞定律。

不同流体有不同的粘滞系数。少数液体（如甘油）的粘滞系数可达 15 泊；橄榄油的粘滞系数接近 1 泊。在 20℃ 时水的粘滞系数为  $1.0087 \times 10^{-3}$  泊。粘滞系数显著地依赖于温度，但与压强关系不大。气体与液体的粘滞系数与温度的关系截然不同。对于液体来说，随着温度升高，粘滞系数下降；对于气体而言，随着温度升高，粘滞系数随之上升。

利用各种实验方法可以确定不同温度下流体的粘滞系数。例如，在两个半径不同的同轴圆筒之间，充满待测粘度的液体。当外筒旋转时，最贴近外筒壁的流体也能以相同的速度运动，由于粘性作用，里面的圆筒也随之运动。由于里面的圆筒悬挂在上端固定的金属丝上，所以它在旋转到一定角度后就停止转动。若测得金属丝的扭转角度，就可算出扭力矩。当平衡时，扭力矩与液体切向力所形成的力矩相等，由此可求出切向力和液体粘滞系数的值。

**粘度计 (viscometer)** 测量流体粘滞性的仪器。种类很多，根据测定所用的原理而分有四种类型：**毛细管型**。测量迫使流体按一定速度流过一根窄管所需的压力。**落球型**。测量小球在流体中下落所需的时间。

**旋转型**。用一对同心的圆筒，在两筒之间充满测试的流体，测定使内筒旋转所需的力。**振动型**。测定在液体中振动圆盘的振动衰减速度，或测定浸在流体中的扭摆的振动周期。

粘滯力 (viscous force) 参见粘度。

粘滯流体 (viscous fluid) 参见流体。

粘滯系数 (coefficient of viscosity) 参见粘度。

凝固点 (solidification point) 参见熔解和凝固。

凝固热 (heat of solidification) 参见熔解和凝固。

**凝聚态物理学** (condensed matter physics) 研究凝聚态物质的微观结构、内部运动状态、物理性质及其相互关系的学科。

物质除气、液、固三种常见的状态外，还有介于液固之间的各种中间状态（如液晶、胶体等）、等离子态以及只有在低温下才存在的特殊量子态（如超流态）等。从物理上说，它们都是由大量粒子所构成的多粒子体系。在物质的这一结构层次中，除稀薄气体外，包括稠密气体在内的其他各种物质状态统称为物质的凝聚态。凝聚态物质中粒子间存在相互作用。

从结构上说，理想气体是完全无序的，理想晶体是十分有规则的周期性结构，而介于两者之间的其他凝聚态则是部分有序、部分无序的。人们对凝聚态物质的研究是从结构最有规律性的晶体开始的，这是传统的固体物理学的主要研究对象。随着理论和实验技术的不断发展，固体物理学的研究对象也日益扩大，从周期结构延伸到非周期结构，从三维晶体拓展到低维、高维和具有分数维数的体系，从天然物质发展到各种各样具有独特结构和奇异性质的人工材料等，并进一步深入到非固体领域，所以人们乐于采用含意更为厂泛的“凝聚态物理学”这一名称。从固体物理学演化为凝聚态物理学，当然不仅仅是研究对象的扩大，更为重要的是，在凝聚态物理学的框架内已经逐步建立了不少新的概念和理论。例如，均匀各向同性的气体是完全对称的；而晶体中原子位置的周期则使它对于沿任意方向上的平移变换不再是对称的，因此可以说，晶体是平移对称性破缺的产物。类似地，凝聚态的其他各种有序性质也都可以看作某种对称性破缺的结果。因此，应用诸如对称破缺、序参量、元激发、缺陷、广义刚度以及标度不变性等等一系列新的概念，人们对物质结构的统一性有了进一步认识，从而为建立起一种新的、统一的凝聚态物理学理论体系奠定了基础。

凝聚态物理学是当今物理学中内容十分丰富，应用非常广泛的一个学科。诸如晶体学、金属物理学、半导体物理学、磁学、电介质物理学、低温物理学、高压物理学、发光学、表面物理学、非晶态物理学、液晶物理学、高分子物理学及低维固体物理学等，都是它的分支学科。而且随着研究的不断深入，将不断孕育出新的分支学科。

**牛顿** (Isaac Newton 1642 ~ 1727) 英国物理学家、数学家、天文学家。万有引力定律的发现者、经典力学体系的完成者、近代光学的开创者、微积分的发明者。

**生平** 牛顿 1642 年 12 月 25 日生于英格兰林肯郡一个自耕农家庭。牛顿出生之前，父亲已去世。贫困的境地使牛顿的母亲改嫁给邻村的一个牧师，刚满 3 岁的牛顿只好随外祖母过日子。由于从来没有得到父亲的教导，又长年得不到母亲的爱护，牛顿自幼形成了特别胆小、腼腆、孤僻的性格。牛顿在小学时，资质一般，学习成绩较差，但与众不同的是他喜欢沉思默想，对许多事物都感到新鲜好奇而乐于去观察体验。如有一天注意到，早晨上学时他自己的影子在左边，晚上放学回家时他的影子却转到另一边去了，由此启发他做了一个日晷——一种测日影以定时刻的器具。他

把这个日晷做好后，安放在村子的中央，给村民们指示时刻。后来村民们怀着敬意称它为“牛顿钟”，并一直被使用到牛顿死后好几年。12岁时进离家不远的格兰瑟姆中学。他继续发展了对手工和机械方面的爱好。如他经常钻在自己的小屋里给同学们制作各种各样的风筝，他做的风筝，不仅形式美观，而且在拉线的力点和尾巴重量上都很讲究，因而起飞快、飞得高。他还把一只纸灯笼点了火，系在风筝的尾巴上，夜间村民看见以为是慧星出现。再如在格兰瑟姆镇上有一座高大的风车，人们安装它是为了利用风力来磨面粉。他照葫芦画瓢，做了一架小风车。小风车没有风不能转动，他就用铁丝做了一个圆的笼子，里面关着一只老鼠，当老鼠踩动轮子时，磨子飞快地转动，居然也能磨出面粉来。从保留下来的牛顿的青少年时代的几本笔记中，我们还可以看到，牛顿已对日常生活中发生的一些自然现象、有关的一些自然知识有了整理分类的嗜好。这些笔记也证明，早在中学时代牛顿就对调配颜色、几何问题、太阳时钟以及哥白尼日心说感兴趣，这也为他以后的大学学习打下良好的基础。

1661年，牛顿考入剑桥三一学院。此时三一学院正开始创办自然科学讲座，第一个主持讲座的是被誉为“欧洲最优秀的学者”——巴罗教授。巴罗教授也是最早赏识牛顿才能的人，他发现牛顿对于当时自然科学和数学的尖端成就有着快得出奇的理解力，于是便把自己渊博的学识和精深的专长，悉心传授给他。得力于巴罗的指导，牛顿在剑桥好学不倦，1664年经过考试被选为巴罗的助手。1669年巴罗坦然宣称，牛顿的学识已经超过自己，当年10月便主动让出自己的讲座。致使牛顿在26岁时就成为数学教授，一时传为佳话。1672年起牛顿被接纳为皇家学会会员。1696年谋得造币厂监督职位，1699年升任厂长。1701年辞去剑桥大学工作，1703年被选为皇家学会主席直到逝世。

### 学术成就

**万有引力定律的发现者** 一提起万有引力定律是怎样建立起来的，人们就会联想起“苹果落地”的故事。这种说法来自牛顿卢卡锡讲座的继任者惠士顿、牛顿晚年的密友斯多克雷和潘伯顿的回忆。伏尔泰也曾从牛顿的继姐妹那里听说过：一天，牛顿躺在苹果树下，忽然看到一个苹果落地，引起他的思考。牛顿灵机一动，脑中突然形成一种观点：苹果落地和行星绕日会不会是由同一宇宙规律所支配的？在他还没有吃完苹果，扔掉果核时，就悟出了万有引力定律。其实，任何重大的物理发现，从认识论来说，都要经历一个复杂、曲折的过程。事实表明，牛顿对于万有引力问题的研究，从受伽利略、开普勒的启发不断考虑到初步发现引力平方反比关系，从确立引力的普遍性到追求精确的定量表述，从实际测得数据去验证到最后正式公布万有引力定律，其间大致经历三个阶段，断断续续长达20年之久。所以决不是如人们传说的那样，牛顿一看到苹果落地就悟出一条万有引力定律来（详见万有引力定律的发现）。

**经典力学体系的完成者** 三大运动定律。经典力学体系到了牛顿时代才得以完成，这是因为经典力学体系的核心是牛顿著名的三大运动定律；牛顿是创造三大运动定律的巨匠，然而他的三大运动定律也不是他的匠心独具，而是对伽利略等的研究成果抽象外推，使其带有普遍性，并加以概括和综合的结果。牛顿第一定律：“每个物体保持其静止或沿一直线做等速运动的状态，除非有力加于其上迫使它改变这种状态。”这一定律

产生于伽利略、笛卡儿提出的惯性原理，牛顿发现对这个原理可以普遍化，体现在两个方面：一是任何物体或每一个物体；二是沿一直线。所以第一定律是惯性原理的推广，对于当今的物理学家来说，它几乎自然而然地成了研究力学的基础。牛顿第二定律：“运动的改变和所加的动力成正比，并且发生在所加的力的

那个直线方向上。”这一定律产生于对伽利略思想的继承和发展，即把力的作用同运动状态变化联系起来。当然，在牛顿的原始表述中是把力的作用同运动的改变联系在一起，而当时“运动的量”是用  $mv$  来定义的，所以第二定律的表述为  $F = mv$ 。第二定律定量地描述了力的效果，即确定了受力物体所产生的速度的改变跟外力和物体的质量的关系；定量地量度了物体平动惯性的大小；当物体的质量不变时，从这个定律可产生经典力学的基本运动方程。牛顿第三定律：“每一个作用总是有一个相等的反作用和它相对抗；或者说，两物体彼此之间的相互作用永远相等，并且各自指向其对方。”这第三定律是牛顿的创造，它是牛顿自己根据碰撞问题的研究而得出的。马赫认为，牛顿第三定律的建立是牛顿在力学原理方面最重要的功绩。第三定律从本质上说明了每一个存在的力都有其镜像孪生力，从而对力的概念作了完整的阐述并保证了牛顿力学的普适性。牛顿的伟大功绩还在于把三大运动定律作为一个整体提出来，并作为动力学的主要基础。六大基本概念。牛顿经典力学体系不仅以三大运动定律为核心、为支柱，而且实质上是建筑在一系列物理概念的基础之上的一座大厦。这一系列物理概念是：“质量”、“动量”、“惯性”、“力”、“时间”、“空间”，构成经典力学体系的六大基本概念。四条推理法则。牛顿在完成经典力学体系中提出的推理法则。法则一：“除那些真实而已足够说明其现象者外，不必去寻求自然界事物的其他原因。”法则二：“对于自然界中同一类结果，必须尽可能归之于同一种原因。”法则三：“物体的属性，凡既不能增强也不能减弱者，又为我们实验所能及的范围内的一切物体所具有者，就应视为所有物体的普遍属性。”法则四：“在实验哲学中，我们必须把那些从各种现象中运用一般归纳而导出的命题看作是完全正确的，或者是非常接近于正确的。”牛顿所以能在广泛的自然科学领域内，取得出色的研究成果，以至完成经典力学体系，一个极其重要的原因，正是他身体力行了这些唯物主义的推理法则。时至今日，这些推理法则仍然是有效的。

近代光学的开创者 单凭牛顿在光学方面的贡献，他就已经可以成为科学史上的伟大人物。光的色散的发现和颜色理论的提出。牛顿为了改善望远镜镜头去磨制三棱镜，从而于 1666 年发现了光的色散现象。在此基础上，于 1672 年提出了颜色理论：白光实际上是从红到紫的不同颜色的光线的混合物；光的颜色与光的折射率具有对应性。反射望远镜的发明和牛顿环实验。就在研究颜色理论的实验过程中，牛顿对改进折射望远镜发生了兴趣，于 1668 年制成了第一个反射望远镜的模型，其关键是采用一个金属凹面镜来代替玻璃物镜，这样既可增大物镜的直径，又可避免色差。牛顿在光学研究中又一项精彩的发现是牛顿环。牛顿的高明之处是：他不仅详细定性描述了实验现象，而且作了定量的测定，得出亮环的半径平方是一个由奇数所构成的算术级数，暗环的半径平方是一个由偶数构成的算术级数的结论。从而可算出透镜的半径和各处的空气层厚度。对光的本

性研究。牛顿力主微粒说，反对波动说。由于牛顿的威望和拥护者的坚持，在相当长的时间内微粒说在光的本性争论中占据了统治地位。

微积分的发明者 牛顿在继承前人研究成果的基础上，将两个貌似不相关的问题联系起来，一是切线问题，一是求积问题，从而建立起两者之间的桥梁，称之为“流数术”。1669年，完成了第一篇微积分论文的初稿：《运用无穷多项方程的分析学》。1671年，又写出第二篇微积分论文：《流数术方法和无穷级数》。1676年，写成第三篇微积分论文：《曲线求积论》。这三篇论文标志着牛顿和莱布尼兹几乎同时发明了微积分，开创了数学上的一个新纪元。

综上所述，牛顿是一位极富创造性的科学家，他完成了经典力学体系而奠定了近代物理学的基础；他由于确立了万有引力定律而奠定近代天文学的基础；他进行了日光分解和揭示颜色之谜而奠定了近代光学的基础；他还发明了微积分而为高等数学奠定了基础。牛顿作出了如此众多的开创科学新时代的重大发现，在人类发展科学的征途中，建立了永垂万世的功勋。

牛顿第二定律 (Newton second law of motion) 参见牛顿运动定律。

牛顿环 (Newtonring) 把一个大焦距平凸透镜的凸表面放在一块平面玻璃板上，形成两块玻璃间厚度由零逐渐增大的环状空气光劈。当用单色平行光束垂直照射时，即可在反射光中形成一组同心圆环等厚干涉条纹。这一现象是牛顿在1675年首先观察到的，故称牛顿环。设平凸透镜凸面曲率半径为  $R$ ，与平面玻璃板的接触点为  $O$ ，见图。若  $h$  为第  $k$  级亮圆环所在处空气层的厚度，则第  $k$  级亮环的半径为

$$r_k = \sqrt{(2k+1)\frac{\lambda}{2}R}, \quad (k=0,1,2,3,\dots)$$

其中  $\lambda$  为光的波长。第  $k$  级暗圆环的半径为

$$r_k = \sqrt{k\lambda R}. \quad (k=1,2,3,\dots)$$

在透镜凸面与平面玻璃板的接触点  $O$  处，空气劈的厚度为零，这里不存在因光束路程不同而引起的光程差，这里的光程差仅仅来源于半波损失，其值为  $\lambda/2$ 。所以在反射光中  $O$  点处为暗斑，称为牛顿黑斑。

在透射光中亦可看到牛顿环。但透射光无半波损失，故  $O$  点处是亮斑。透射光牛顿环中的亮圆环半径等于反射光牛顿环中的暗圆环半径；反之亦然。

牛顿环可用来精确检验光学元件表面的质量。当透镜和平面玻璃板间的压力改变，引起空气劈厚度发生微小变化时，干涉图样将发生移动。由此可以确定长度或压力的微小改变。

牛顿运动定律 (Newton laws of motion) 经典力学的基本定律。牛顿在总结前人研究的基础上，在其著作《自然哲学的数学原理》中，系统地建立了经典力学的公理体系，使力学成为一门研究机械运动基本规律的学科。这些公理体系的基础是关于物体运动的三条基本定律，后人便把这三条基本定律称为牛顿运动定律。其中第一定律又称为惯性定律，第二定律又称为运动基本定律，第三定律又称为作用和反作用定律。

牛顿第一定律 其内容是，任何物体将保持静止状态或匀速直线运动

状态，直到其他物体对它施加力的作用迫使它改变这种状态为止。此定律说明力并不是维持物体运动的条件，而是改变物体运动状态的原因。此定律又说明任何物体都有惯性，即有保持它原有运动状态的属性，所以才称为惯性定律。牛顿在第一定律中并没有说明运动状态是相对于什么参考系来说的。然而，按他的本意是，它只适用于在“绝对空间”中的运动，而“绝对空间”是与任何外界事物无关，是永远不变和静止不动的。他把相对于这个空间的运动称为“绝对运动”，把第一定律中所说的运动状态理解为这种“绝对运动”的状态。这并不符合爱因斯坦的狭义相对论观点。因为相对论观点否定了绝对空间的存在。其实，第一定律中描述运动状态的参考系正需要通过这定律本身来引出。因此，牛顿第一定律还表明，如果不存在力的作用，则可能找到一族参考系，相对于这些参考系，物体的加速度为零，这些参考系称为“惯性系”。所以，牛顿第一定律又是对惯性系的描述，只有对惯性系牛顿第一定律才成立。

**牛顿第二定律** 其内容是，物体的动量随时间的变化率与该物体所受的力成正比，并与力的方向相同。定律中所指的动量是物体的质量与它的速度的乘积。以  $m$  表示物体的质量， $v$  表示速度， $p=mv$  是此物体的动量。又以  $F$  表示物体所受的力，第二定律的数学表示式是

$$F = k \frac{dp}{dt} = k \frac{d(mv)}{dt}。$$

在经典力学中， $m$  被理解为常数。又若选取适当的单位，例如采用 SI 单位，这时比例系数  $k=1$ ，第二定律写成

$$F = m \frac{dv}{dt} = ma。$$

$a$  是物体的加速度， $m$  被理解成为质点。这是牛顿第二定律最常用的表达式，常称为质点动力学的基本方程。牛顿第二定律对物体的机械运动的规律作了定量的叙述，确定了力  $F$ 、质量  $m$  和加速度  $a$  之间的瞬时关系。对于有限大小的物体，物体中的每一微元部分的运动都满足第二定律，这时  $F$  是作用在这个微元部分上的合力。第二定律也只对惯性系成立。牛顿第二定律是大量实验观察的总结，它不能由理论推导出来。在该定律中，如作用力  $F=0$ ，得出质点在惯性系中的加速度等于零，即质点的运动状态保持不变。因此第一定律可以看成为第二定律的特例。但第一定律又是第二定律的基础。由第二定律还可引入惯性质量概念，这是因为，如果赋予每个物体一个量值  $m$ ，在两个物体  $i$  和  $j$  施加相同的力，则所得加速度大小之比  $a_i/a_j$  与  $m_i/m_j$  成反比，便可把第二定律写成数学表示式  $F=kma$ 。在选定了某一物体的  $m$  值后，其他物体的  $m$  值随之确定， $m$  就是物体的惯性质量。当物体的速度接近于光速  $c$  时，牛顿第二定律不再成立。这时需根据相对论对它作适当修正。修正后的相应定律取如下形式：

$$F = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \frac{d}{dt} (mv)。$$

$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  称为物体的相对论质量，它随物体的运动速率而变，当  $v \ll c$  时  $m \approx m_0$ ， $m_0$  就是经典力学中的质量，又称为静质量。

**牛顿第三定律** 其内容是，任何物体间的作用力和反作用力同时存在，它们大小相等，方向相反，作用在同一直线上。第三定律中所说的物



体也被理解为质点。这个定律的提出，可以说是牛顿对力学发展的一个独创性贡献。虽然笛卡儿和惠更斯等人在对碰撞问题和动量守恒的研究中已触及到了第三定律的内容，但都没有总结出这个规律。牛顿不仅注意到一个机械系统运动总量保持不变的现象，而且更深入一步地分析了系统内部动量传递的关系，从而发现了一个孤立的物体本身完全不能施力也不能受力，只有当两个物体发生相互作用时才产生力的事实。这个定律的确立，提出了每个力都有其反作用力，从而对力的概念作了完整的概括。第三定律给出两物体之间的相互作用为超距作用的图像。实际上，物体之间的相互作用是通过它们所激发的场来传递的，而场本身具有有限的传播速度。另一方面，根据狭义相对论，同时性是一个相对的概念。在一个参考系中为同时的两事件，在另一参考系中，未必是同时的。所以，原始形式的牛顿第三定律不能不加选择地应用于各种情形，但是在经典力学中，它是研究物体（或质点系）运动规律的一条基本定理。由第三定律导出的孤立系统中动量和角动量守恒定律，却从一个方面反映了自然界的普遍规律。

牛顿三条运动定律是一个统一整体，它们奠定了完整的经典力学基础。牛顿定律一方面只适用于低速（ $v \ll c$ ）情形，另一方面，它们是从那些由大量原子和分子组成的宏观形体的运动中总结出来的。事实证明，牛顿定律并不适用于微观粒子的运动。研究微观粒子的运动要用反映微观世界客观规律的量子力学。然而，在一般的工程技术问题中，所牵涉的都是宏观物体的低速（ $v \ll c$ ）运动，相对论效应和量子效应都微不足道，应用牛顿定律所得的结果都很精确。因此，以牛顿运动定律为基础的经典力学，在工程技术中占有十分重要的地位。

牛顿粘滞定律（Newton viscous law） 参见粘度。

扭摆（torsional pendulum） 见摆。

由第三定律导出的孤立系统中动量和角动量守恒定律，却从一个方面反映了自然界的普遍规律。

牛顿三条运动定律是一个统一整体，它们奠定了完整的经典力学基础。牛顿定律一方面只适用于低速 ( $v \ll c$ ) 情形，另一方面，它们是从那些由大量原子和分子组成的宏观物体的运动中总结出来的。事实证明，牛顿定律并不适用于微观粒子的运动。研究微观粒子的运动要用反映微观世界客观规律的量子力学。然而，在一般的工程技术问题中，所牵涉的都是宏观物体的低速 ( $v \ll c$ ) 运动，相对论效应和量子效应都微不足道，应用牛顿定律所得的结果都很精确。因此，以牛顿运动定律为基础的经典力学，在工程技术中占有十分重要的地位。

牛顿粘滞定律 (Newton viscous law) 参见粘度。

扭摆 (torsional pendulum) 见摆。

欧姆 (Georg Simon Ohm 1787 ~ 1854) 德国物理学家。生于埃朗根。少年时跟随父亲学数学和金属加工技能,后来进入埃朗根大学学习。1806 年中途辍学,当家庭教师。1811 年重返埃朗根大学,并获博士学位。1812 年起在班贝格等地的中学任教。1817 ~ 1826 年,在科隆大学预科教授数学和物理学,以后在柏林从事研究并任教。1833 年任纽伦堡综合技术大学物理学教授。1849 年任慕尼黑大学物理学教授。

主要贡献是建立电路定律。1825 年,开始进行这方面的实验研究。1826 年,利用温差电源进行大量关于电流通过导体的有关规律的实验研究,得出:如果导线的长度和横截面成正比,则它们的电导率相同,并于该年 2 月发表了这一结果的论文。两个月后,在另一篇论文中,将上述结果简化为:导体中的电流等于“所有电张力的总和”(即该导体两端的电势差)除以该导体的“等效长度”(相当于电阻)。这一关系式就是现在闻名的欧姆定律。1827 年,从理论上导出上述定律(对于部分电路和全电路),引入“电动势”、“电压降”和“电导率”这些概念。1830 年,最先测量了电流源的电动势。在声学方面,提出关于声的复杂组成的思想。1843 年,得出声学欧姆定律:人的耳朵仅把简谐振动引起的声感觉为单音,所有其他的声则被感觉为基音和泛音。著有《伽伐尼电路的数学研究》(1827)、《物理学的基本特征》(1854)。

欧姆定律 (Ohm law) 关于金属导体两端电压与导体中电流关系的定律。由德国物理学家欧姆在 1827 年通过实验发现。欧姆定律根据具体电路可表述为以下形式:

(1)部分电路欧姆定律:通过部分电路的电流强度  $I$  等于该部分电路两端的电压  $U$  除以该部分电路的电阻  $R$ , 即

$$I = \frac{U}{R}。$$

(2)全电路欧姆定律:通过闭合电路的电流强度  $I$  等于电路中电源的电动势 除以电路中的总电阻(外负载电阻  $R$  和电源内阻  $r$  之和), 即

$$I = \frac{U}{(R + r)}。$$

(3)欧姆定律的微分形式:表示导体中的电流密度与电场强度之间的关系。用公式表示为

$$j = \sigma E。$$

式中  $\sigma$  为导体的电导率,  $E$  为电场强度,  $j$  为该电场在导体中所引起的电流密度。它表明:在各向同性的导体中,电流密度  $j$  的方向与该点电场强度  $E$  的方向一致,且两者在数值上成正比。因该关系涉及空间同一点处的物理量 ( $j$ 、 $\sigma$  和  $E$ ) 之间的关系,所以称为欧姆定律的微分形式。它较为细致地描述了导体的导电规律。它不仅对稳恒情况适用,而且对非稳恒情况也适用。

欧姆计 (ohmmeter) 测量电阻的电表。在中学里没有专用的欧姆计,而用万用电表的欧姆挡来测量电阻器的电阻值。测量电阻的原理有多种,这里就万用电表测电阻值要注意的事项叙述如下。

测电阻前首先将测试表棒短接,即表棒间的电阻为零,如果指针不能

落在零刻度线上，就需调整“调零”旋钮，以补偿电路所需要的电流值。

如果测电阻的欧姆各挡拨动时，表棒又短接，电表指针在零刻度线附近有较大变化，特别在  $R \times 1$  挡在调零旋钮旋动时，已不能落在零刻度线上，说明万用表内的电池端电压已下降到不能工作，需更换；如果  $R \times 10k$  挡调旋钮不能落在零线，更换的电池是 9 伏，而不是  $R \times 1$  挡需要的 1.5 伏电池。

万用表的内阻就是刻度线中间值与  $R \times ?$  值相乘的结果。例如，欧姆刻度线的中间值，即中心欧姆为 22.5，测阻值的量程选择旋钮，指在  $R \times 1k$  上，则万用表的内阻值

$$R_i = 22.5 \times 1k = 22.5k \text{ }。$$

了解万用表内阻的意义是待测电阻值与内阻值越接近，测量的准确度越高，指针越趋于 0 和 两端，测量值的误差越大，根据这原则可适当调节量程选择的挡位。

万用表的刻度是非线性的，并且读数大小的方向与电流大小方向相反，所以务必认真仔细地反复练习。

万用表的表棒有“+”“-”极，黑表棒的电位高于红表棒，因此测量二极管和 PN 结时要注意极性；此外，非  $R \times 10k$  挡，表棒间的电位差不超过 1.5 伏特， $R \times 10k$  挡，电位差不超过 9 伏特；在  $R \times 1$  挡时，万用表流出的最大电流为  $I_{\max} = \frac{1.5}{R_{\text{中心}}}$ 。要注意有些半导体元器件饱和压降极低，稍

高电压和电流就击穿和变为低电阻，如果测量前没有仔细考虑，会使元器件在测试过程中被烧毁。

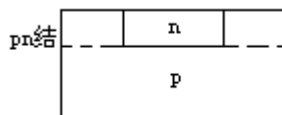
万用表测量的电阻器，必需不接在线路中，否则测量结果是待测电阻与并联线路的阻值的相互作用，如果线路中有电流流进或者流出待测电阻，千万不能用万用表测试，可能待测电阻端电压相当高，部分电流进出万用表，测量结果显然是不准确的。

万用表不使用时，功能选择开关最好不要拨在欧姆测试挡，以保证表棒即使短接，电池也不会放电。

PC-DOS (MS-DOS) 操作系统 (PC-DOS (MS-DOS) operational system) 是美国微软公司为 IBM-PC 个人计算机开发的通用 16 位单用户操作系统。它吸收了 CP/M 操作系统及其长处, 结构优良, 软件上的互换性强。采用层次模块式结构, 由三层程序模块组成: 命令处理模块是用户与计算机沟通的手段, 包含内部命令处理程序, 批文件处理程序, 以及装入和执行外部命令的子程序。主要用于分析键盘命令、中断处理、检测装配程序地址等。磁盘操作管理模块是 PC-DOS 的核心部分, 它由若干个功能子模块组成。它们分别完成键盘输入、控制台和打印机输出、存储管理, 以及磁盘、目录和文件处理等功能, 提供了系统与用户程序的高级接口。用户程序可通过发送中断码的方式来调用这些子模块。输入输出接口模块向打印机发送一字符、从磁盘读入一个记录等最基本的输入输出操作。

这些模块都是以命令文件的形式驻留在磁盘上, 当系统启动时, 由启动程序将其装入内存。

PN 结 (PN junction) 在紧密相连接的 P 型和 N 型半导体交界面处形成的一个特殊结合。实际中通常是在一块半导体基片上利用杂质补偿原理使原来 P 型 (或 N 型) 半导体基片的一部分变成 N 型 (或 P 型), 以形成 PN 结, 如图所示。



PN 结剖面图及符号

PN 结是晶体管、集成电路以及超大规模集成电路等半导体器件的基本单元和核心。如晶体管就是由两个紧挨着的 PN 结构成。在大规模集成电路中包含有成千上万个 PN 结。

PN 结具有以下一些重要特性。整流特性: 当 PN 结正向偏置时, 正向电流较大; 反向偏置时, PN 结中几乎没有电流流过, 因此如果有交流电压加于 PN 结, 则输出电流基本上只是沿一个方向, 于是交流电变成了直流电。这就是 PN 结的整流作用。反向击穿特性: 当 PN 结反向偏置时, 其电流很小, 但当反向电压加到足够大时, 会出现很大的反向电流, 结被击穿。这一极限电压称为 PN 结的反向击穿电压, 是标志 PN 结的一个重要参量。电容特性: PN 结像电容器一样能存贮载流子, 起到电荷“仓库”的作用。帕斯卡 (Blaise Pascal 1623 ~ 1662) 法国物理学家、数学家。生于克莱蒙费朗。受的是家庭教育。少年时期已表现出非凡的数学才能。16 岁时提出了射影几何学的一个重要定理, 后来被称为帕斯卡定理。18 岁时发明了一种二进制的机械计算器, 为后来计算机的设计提供了最初的原理。

在物理学方面, 主要研究大气压强和流体静力学。1646 ~ 1647 年, 用水和葡萄酒重做了托里拆利实验。实验前很多人认为酒易挥发, 其液柱要比水柱低些, 实验结果却相反。这是因为葡萄酒的密度要比水的密度小。所以其液柱比水柱高些, 从而证实了大气压力的存在。1653 年, 表述了流体静力学的基本定律: 对静止液体所加的压力在液体内部沿一切方向均匀地传递 (帕斯卡定律)。在此基础上提出连通器原理和后来得到广泛应用的

水压机的最初设想。演示了空气的弹性，证明空气有重量，发现气压计读数与空气的湿度和温度有关，由此利用它去预报天气。

**帕斯卡原理 (Pascal Principle)** 流体静力学的基本原理之一。密闭容器中的液体，能对加在其上的压强，毫不改变大小地向各个方向传递到液体内的各处和容器壁上。这一原理由法国科学家帕斯卡首先提出，故名。按照这一原理，两个带有活塞的内径不同、底部相连的连通器，里面装满液体，在小活塞（面积为  $S_1$ ）上施加压力  $F_1$ ，其单位面积上的压力

$p = \frac{F_1}{S_1}$  将不变地传到液体的各个部分，这样就可在大活塞（面积为  $S_2$ ）上

得到较大的力  $F_2 = pS_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}$ ， $S_2$  是  $S_1$  的几倍， $F_2$  也是  $F_1$  的几倍。各种液压

机械，如修理车辆的千斤顶、锻压用的水压机，都是根据这一原理设计的。

**拍 (beat)** 由两个频率都很大但略有差异的同方向振动合成时所产生的合振幅作周期性变化的现象。设两个这种振动的振动方程分别为

$$x_1 = A \cos \omega_1 t, x_2 = A \cos \omega_2 t,$$

其中  $\omega_1$  略大于  $\omega_2$ ，则合振动是

$$x = x_1 + x_2 = 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right)$$

式中  $(\omega_1 - \omega_2) \ll (\omega_1 + \omega_2)$ 。这时  $2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right)$  从

趋势上描写了合振动振幅随时间所发生的周期性变化，图中的包络线反映了合振动振幅变化的趋势。这里，合振幅极大值出现的频率是  $(\omega_1 - \omega_2) / 2$ ，称为拍频，或称为单位时间中出现的拍数。两个频率相近的音叉同时发声时，就可听到按一定频率变化的强弱相间的声音，这是声振动合成产生拍的听觉反映，称为拍音。拍音强弱变化的频率，就是合成声振动的拍频。

**庞加莱 (Jules Henri Poincaré 1854 ~ 1912)** 法国物理学家、数学家、天文学家。生于南锡。1871 年入巴黎工艺学院。1879 年获巴黎矿业学院数学博士学位。1881 年任巴黎大学教授。1887 年当选为巴黎科学院院士，1906 年任院长。

庞加莱对物理学、数学和天文学等多方面有贡献。

1902 年，提出相对性原理作为普适的、严格的原理，并将它推广到电磁学。1904 年，预示了新力学的大致图像：惯性随速度增加，光速会变为不可逾越的极限。1905 年，在题为《论电子动力学》的论文中，从以太概念和麦克斯韦—洛伦兹方程出发，证明不可能发生绝对运动，从而预见了爱因斯坦在狭义相对论中获得的若干结果，阐述了相对论的部分思想，为此被认为是相对论的先驱。

庞加莱在数学方面，几乎对数论、代数学、几何学、拓扑学、概率论等数学分支学科都有开创性的工作。尤其在分析方面，如函数论、微分方程等分支的贡献更为突出。还把数学理论有效地应用到物理学和天文学中去，确立了数学物理积分方法的基本性质，研究了有关热传导、流体动力学、位势理论、电磁振动等许多问题。在天文学方面，提出了天体力学的新方法，即用渐近展开和积分不变量等方法解决三体问题，从而发展了严

格的天体力学计算技术。1885年，研究了运动稳定性和旋转液体的平衡图形。1899年，研究了太阳系的稳定性，即多体问题，这些研究在天体力学中具有重要意义。

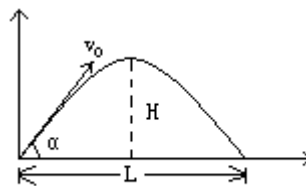
庞加莱对物理学的发展趋势有独到见解。他认为，世纪之交出现的物理学危机，恰恰是物理学就要出现变革的先兆；要摆脱物理学危机，就要在实验的基础上对经典物理学重新进行改造；然而对经典物理学的价值又必须充分肯定，科学破产论和绝对怀疑论都是站不住脚的。庞加莱在哲学上倾向于马赫主义，是约定主义的创始人。他主张：科学定律和理论只是科学家之间的一种约定和默契；约定是人们精神的一种自由活动的产生，科学家只要找到各种符号之间的对应不变性，就可以由一种约定转换为另一种约定，同样把宇宙中各部分之间的关系表达出来；约定不是随心所欲，科学家在不同的定律和理论之间进行选择，不仅要受到无矛盾性要求的限制，还要受到实验事实的引导，实验向人们表明它们是方便的。约定主义既要求摆脱康德的先验论，又要求摆脱马赫的狭隘的经验论，反映了当时科学界自由创造、大胆假设的要求，在科学和哲学上虽都有其积极意义，但约定主义仍带有一定的唯心主义色彩。

**抛体运动 (Projectile motion)** 在重力场中具有一定初速度的自由运动，特别是指不存在空气阻力时的这种运动。初速度方向向上的抛体运动称为上抛运动，初速度方向向下的抛体运动称为下抛运动，初速度沿水平方向的抛体运动称为平抛运动，初速度既不沿水平方向，又不沿竖直方向的抛体运动称为斜抛运动。在不存在空气阻力时，无论是什么抛体运动，它们的轨迹形状和速度随时间的变化关系虽然各有不同，但它们的加速度  $a$  相同：方向竖直向下和大小不变的重力加速度，也就是

$$a=g。$$

如果把加速度  $a$  理解为位矢的二阶时间导数，取  $x$  轴水平向右， $y$  轴竖直向上，抛体在初时刻由坐标原点抛出，初速度的大小是  $v_0$ ，初速度方向与  $x$  轴夹角（见下图），则抛体运动的规律是

$$x = v_0 \cos \alpha, y = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2}gt^2。$$



抛体运动

由这两式消去时间  $t$ ，得出抛体运动的轨道方程是

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{1}{2} \frac{gx^2}{v_0^2 \cos^2 \alpha}，$$

这是抛物线方程。由这方程可以算出抛高  $H$  和射程  $L$ （见图）分别是

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}, L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}，$$

$\alpha = \pi/2$  时有最大抛高  $v_0^2/2g$ ， $\alpha = \pi/4$  时有最大射程  $v_0^2/g$ 。 $\alpha = 0, \pi/2, \pi - \pi/2$  相当于平抛、上抛和下抛运动， $\alpha = 0$  和  $\alpha = \pi/2$  时相当于斜抛运动。

**泡克尔斯效应 (Pockels effect)** 1893 年德国人泡克尔斯发现的线性电光效应。平面偏振光通过压电晶体时，如果没有在压电晶体上加外电场，便不发生双折射；如果在压电晶体上加外电场，便发生双折射。实验证实，压电晶体两个主折射率之差与电场强度  $E$  成正比，即  $n_e - n_o = PE$ ，其中  $P$  为比例常数。外电场方向垂直于压电晶体两侧面，从而使外电场方向与光的传播方向垂直，这种装置称为横向调制泡克尔斯盒。外电场方向平行于压电晶体两侧面，从而使外电场方向与光传播方向一致，这种装置称为纵向调制泡克尔斯盒。二者都简称电光调制器或电光开关。

泡克尔斯效应的优点是工作物质为压电晶体，当作半波片使用时的电压只有克尔盒的半波电压的  $1/10$ 。通常使用的由磷酸二氢钾 (KDP) 晶体制成的泡克尔斯盒，其弛豫时间约  $10^{-9}$  秒，在激光技术中用来产生激光短脉冲，在卫星通讯系统中用作电光调制器。

**泡利 (Wolfgang Pauli 1900 ~ 1958)** 奥地利物理学家。生于维也纳。1921 年毕业于慕尼黑大学，获博士学位。1922 年在格丁根大学成为玻恩的助手，并结识了玻尔。1928 年任苏黎世联邦理工学院理论物理学教授。1940 年任普林斯顿高级研究院访问教授。第二次世界大战后，回到苏黎世任教。

主要贡献是发现不相容原理，获 1945 年诺贝尔物理学奖。1924 年，为说明光谱线的超精细结构，提出了核自旋的假设。1925 年，通过对光谱实验结果的深入分析，从波函数的对称性出发，提出下列原理：在一个原子中，不能有两个或更多的电子处在完全相同的状态，即它们的四个量子数：主量子数、角量子数、磁量子数和自旋量子数，不能一一相同，被称为泡利不相容原理。按此原理解释原子内部的电子分布状态和元素周期律，获得圆满成功。1927 年，把自旋引入量子力学，得出了描述电子自旋而引入的矩阵，被称为泡利矩阵，建立了电子自旋的理论。1929 年，与海森伯合作引入场量子化的一般方案，从而为场量子化的理论研究开辟了道路。

泡利又一重大贡献是中微子概念的提出。1930 年，在研究  $\beta$  衰变时，发现一种电子形成的连续光谱，在这个过程中，能量似乎不守恒，由此提出了原子核在  $\beta$  衰变中不仅放出电子，而且还放出一种质量甚小、穿透力甚大的中性粒子的假说。当时他把它叫做“中子”。1932 年后，费米把它改称做中微子。1933 年，表述了中微子的基本理论。1956 年，中微子的存在被实验所证实。泡利在量子场论、粒子物理学、核力的介子理论等方面也都作出了重要贡献。著有《波动力学的普遍原理》(1933)、《量子力学中的连续群》(1956)、《泡利科学论文集》(共 2 卷, 1964) 等。

**泡利不相容原理 (Pauli exclusion principle)** 简称泡利原理。费米子 (自旋为半整数的粒子，如电子) 系统所遵循的一个普遍原理，是微观现象的一个重要规律。由物理学家泡利于 1935 年首先提出。该原理可表述为：全同费米子系统中不能有两个或两个以上的粒子处于完全相同的单粒子状态。多电子原子是一种处于原子核库仑势场中运动的全同电子系统，应遵从泡利原理。泡利原理也是费米-狄拉克统计 (参见量子统计) 的基础。

**喷气发动机 (jet engine)** 通过吸入空气，经压缩加热燃烧产生高温高压气体，然后再把燃气高速喷出产生推进力的一种动力装置。

喷气发动机可分为涡轮发动机、冲压式喷气发动机和火箭发动机等。



按工质接收热量的方式，它们应属于内燃机，但其做功方式与内燃机不同。根据动量守恒定律可以得出，当喷气发动机喷出高速气流时，发动机本身会受到一个与气流运动相反方向的作用力，正是这个作用力推动以喷气发动机为动力的各种装置对外做功。

喷气发动机具有体积小、重量轻和工作过程简单等优点，因而适用于航空、航天的飞行。1947年10月14日投入飞行的世界上第一架超声速飞机就是由贝尔公司制造的装有火箭发动机的X-1研究机，以后英、法两国联合制造出装有火箭发动机的第一架超声速协和式客机，速度达1920千米/小时，1976年1月21日投入定期航班飞行。当喷气发动机以空气作氧化剂时，在做功过程中需要机外供应空气，这类发动机只使用于在大气层中高速飞行的喷气式飞机中，而火箭发动机本身携带燃料和氧化剂，不再需要外界供给空气，因此适用于在宇宙中航行的各种飞行器中。

**碰撞 (collision)** 相对运动着的物体或粒子由于相互作用在极短时间内运动状态发生显著变化的过程。例如小球互撞、子弹射入沙袋等。微观粒子的碰撞又称散射。例如 粒子在原子核附近的散射等。宏观物体碰撞时，从宏观上看，它们的表面互相直接接触；微观粒子碰撞时，彼此趋近到一定程度时常发生显著的相互作用而分离。碰撞的过程是相碰的宏观物体或相互作用的微观粒子之间动量和能量传递的过程。碰撞前后的总动量和总能量分别保持不变。若碰撞前后的总动能保持不变，称为弹性碰撞或完全弹性碰撞。碰撞前后总动能发生变化的，称为非弹性碰撞。一般宏观物体之间的碰撞均属非弹性碰撞，这时有部分的机械能转化为内能或其他形式的能量。若两宏观物体在碰撞后不再分离，称为完全非弹性碰撞。微观粒子之间涉及能态激发或粒子的种类或性质发生变化时，也属于非弹性碰撞。

**皮托管 (Pitot tube)** 测量流体流速的一种装置。是18世纪法国工程师皮托发明的，故名。用实验方法直接测量气流速度较困难，但气流的压力可用测压计方便测出。因此，皮托管实际上是测量压力，再应用伯努利方程即可算出气流的速度。皮托管由一个圆头的双层套管组成，外套管直径为D，在圆头中心2处开一个与内套管相连的总压孔，连接测压计的一端；同时在外套管侧表面2处约3D的距离的1与1'处沿周向均匀地开一排与外管壁垂直的静压孔，连接测压计的另一端，见附图所示。测量时将皮托管放在欲测速度的稳定流体中，并使管轴与气流方向一致管子的前缘对着来流，测得两者的压力差  $p_2 - p_1$ ，即可得出流速：

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_2 - p_1)} = \sqrt{\frac{2}{\rho}\rho_{液}gh}$$

式中  $\rho$  为气体的密度， $\rho_{液}$  为测压计液体的密度。皮托管常用于测量飞机相对于空气的速度，但仅在飞机速率远小于声速时有效。

### 皮托管

**片流 (laminar flow)** 即层流。

**偏振光 (polarized light)** 电矢量和光的传播方向所构成的平面称为偏振光的振动面。与振动面垂直的平面称为偏振面（为避免混乱，一般不用偏振面；与此类似的还有振动方向与偏振方向）。偏振光有四种类

型：线偏振光，部分偏振光，圆偏振光和椭圆偏振光。线偏振光电矢量振动只限于某一确定的方向。也称为平面偏振光，因为它的振动面不变。部分偏振光电矢量在某一确定方向上的振动占相对优势的偏振光。

**圆偏振光** 电矢量的端点在垂直于光传播方向的平面上的轨迹是一个圆。圆偏振光可视为两个存在一定相位差的相互垂直的线偏振光叠加而成。

**椭圆偏振光** 两矢量的端点在垂直于光传播方向的平面上的轨迹是一个椭圆。原因与圆偏振光同。

**偏振光的作图表示** 图(a)表示电矢量在图面内的平面偏振光；(b)表示电矢量垂直于图面的平面偏振光；(c)表示自然光或非偏振光；(d)表示部分偏振光，但图面内电矢量较强；(e)表示垂直于图面方向上电矢量较强的部分偏振光。(f)振动方向垂直入射面的电矢量分量称为 s 分量，平行入射面的分量为 p 分量。

### 偏振光表示法

**偏振度** 描述偏振光偏振程度的物理量。它定量表示了线偏振光占全部光的比例。完全线偏振光的偏振度为 1，或 100%。可用检偏器测定偏振度。当部分偏振光通过检偏器时，透射光的强度随检偏器的透振方向而变。如果测得的强度极大值和极小值分别为  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$ ，则偏振度 P 的值为

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

对于自然光，不管检偏器的透振方向设置在什么方向，透射光强度不变，故其偏振度为 0。所以自然光亦称完全非偏振光。部分偏振光的偏振度在 0 与 1 之间。

**偏振光干涉 (interference of Polarized light)** 偏振光叠加后产生的光学现象。在杨氏实验装置的两束相干光束传播途径上，各放置一块偏振器，分别记为  $N_1$  和  $N_2$ 。当  $N_1$  和  $N_2$  的透光方向平行时，观察屏上可观察到明暗交替的干涉图样。当  $N_1$  和  $N_2$  的透光方向垂直时，干涉图样消失，观察屏上呈均匀明亮的视场。如果用检偏器作检测，可发现叠加后的光为椭圆偏振光。

用白光做偏振光干涉实验，会出现彩色的干涉图样，此现象称为显色偏振或色偏振。

**偏振计 (polarimeter)** 测定线偏振光经过旋光性物质后振动面所旋转的角度的仪器。又称旋光计。主要由起偏振器和带有圆刻度盘的检偏振器组成。待测物质放在两偏振器之间，由刻度盘读数测出振动面所转过的角度。其结构如图，S 为一单色光源，F 为准直透镜， $N_1$ 、 $N_2$  为两尼科耳棱镜，前为起偏振器，后为检偏振器。 $N_1$  固定， $N_2$  可沿光路旋转，旋转角度由刻度盘 R 读出。D 为半荫片，一半为玻璃，另一半为石英半波片，H 是盛放溶液（旋光物质）的容器。T 为短焦距望远镜。旋光计主要用于研究旋光性物质的性质或测定溶液中旋光性物质的浓度。制糖工业中用于测量糖溶液浓度的偏振计称为糖量计。

### 偏振计

**漂移与扩散 (drift and diffusion)** 半导体中载流子运动的两种形式。在电场作用下,载流子的定向运动,即空穴沿着电场方向的运动,电子逆着电场方向的运动统称为漂移运动。由于热运动而使载流子从高浓度区域向低浓度区域的流动称为扩散运动。描述载流子漂移运动特征的物理量是“迁移率”。

迁移率  $\mu$  定义为单位电场强度作用下,载流子的运动速度。因此考虑两种载流子后材料的电导率可表示为  $\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$ ,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  分别称为电子迁移率和空穴迁移率。描述载流子扩散运动特征的物理量是“扩散系数”  $D$ 。不同材料的扩散系数是不相同的。

由于两种运动形式的内在联系,因此同一材料的  $D$  和  $\mu$  之间有确定的关系,即爱因斯坦关系:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}, \text{ 其中 } k \text{ 是玻耳兹曼常数, } T \text{ 是温度, } q \text{ 是电子电荷的绝对值。}$$

**频率计 (frequency meter)** 对周期电信号进行频率测量的仪器。周期电信号可以是脉冲信号,也可以是正弦信号、三角波、锯齿波或其他不规则波形的信号,但是周期电信号的最低电平应该是零伏,最高电平必须大于某一仪器所规定的确定值。如果最高电平低于规定明确定值,频率计内的计数器就计不到脉冲输入。如果周期电信号的最低电平高于 0 伏,即周期信号中含有直流成分,则信号必须先经过  $0.1 \sim 1.0 \mu\text{F}$  的隔直流电容,再与频率计的测量输入端连接起来,如果高电平仍大于规定的幅度,频率计就能进行正常的测试工作。

频率测量的基本原理就是计时器中的“计”时和“停”止间的时间间隔为严格的一秒钟,即一秒钟内周期信号出现的个数就是该周期电信号的频率值,其单位为赫兹。如果周期信号的频率太低,为了增加低频信号的频率值有效数字位数,那么“计”时和“停”止间的时间间隔可由一秒改为十秒钟,这样测到的周期信号重复的次数是该信号频率的十倍,所以将重复的次数除以 10 就是低频信号的频率值。

**频闪观测仪 (stroboscope)** 对旋转物体或振动物体进行间歇照相,以研究物体的运动或确定其旋转速度或振动频率的仪器。早期的频闪观测仪利用间歇目视或断续光线照射的方法,它是用一个旋转的或振动的圆盘,上面沿径向开一条狭缝,使物体只有经过规定的时间间隔才能被看到,或者只有在依次出现的瞬间内才让光线照射物体,即在某个精确的时刻,物体到达其运动的某一预定点时,才让它暴露在光线下。现代电子频闪观测仪是一个充气式闪光灯,产生极短促的、反复出现的、明亮的闪光。闪光灯电路原理如图所示。L 通常是氙气闪光灯,它是有一个外电极和两个内电极并充满氙气的玻璃管。闪光灯直接跨接在主闪光电容器  $C$  上,它把电容器所存储的电能为光能。变压器  $T_1$  的次级获得交流高压,经二极管整流后得直流电压,电容器充电至变压器  $T_1$  的次级的峰值电压。开关  $S$  闭合时(照相机快门的一个触点可以用作这样的开关),电容器  $C_2$  放电,升压变压器  $T_2$  的次级线圈获脉冲高压加到灯的外电极,启动闪光灯起辉并快速气体放电,发出短暂而又明亮的辉光。闪光持续时间通常为 1 微秒,频率为每分钟 110 次至 15 万次。采用特殊设备后,闪光频率可达每分钟 50 万次。

### 电子闪光灯基本电路图

**品质因素 (quality factor)** 亦称优值或 Q 值。反映阻尼振动系统能量衰减情况的物理量。定义为：

$$Q = 2 \frac{\text{振动系统储存的能量}}{\text{振动一周期损失的能量}} = 2\pi \frac{E}{\Delta E},$$

Q 是一个无量纲的物理量。Q 等于系统储存的总能量与系统在振动一周期中损失的能量之比。振动系统的阻尼越大，振动一周损失的能量越多，Q 就越小；反之，Q 越大，损失的能量越小，系统的阻尼就越小。对于受迫

振动系统  $Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}$ ，式中  $\omega_0$  为系统固有频率， $\omega_2 - \omega_1$  为共振曲

线的频带宽度，Q 值与频带宽度成反比。Q 值越大，共振峰越窄越陡。对于不同条件下的不同振动系统，Q 值有不同的具体表示式，因而具有不同的物理意义。对电感或电容等储能元件，Q 值越大，表示用该元件组成的电路或网络（如滤波器等）的选择性越好。因此对于电振动系统，品质因素是反映系统性质的重要参数。常见的几种力学、电学、光学等谐振系统的品质因素，其量级如下表。

钢琴弦	$10^3$
微波谐振腔	$10^4$
半导体收音机天线回路	$10^2$
氦—氖激光器	$10^8$
激发态原子	$10^7$

**平动 (translation)** 亦称平移运动或平行移动，机械运动的一种基本形式。刚体在平动过程中，连结其任意指定的两点的连线始终保持平行。平动刚体上每一点的运动情况（包括轨道形状、速度和加速度）完全相同，所以平动刚体的运动可以用此刚体上任一点的运动来代表。做平动的刚体，不论其大小如何，可以看成质点。

**平方反比律 (inverse square law)** 两个物体之间的作用力与物体之间的距离的平方成反比。在力学研究中，法国天文学家布里阿德于 1645 年最早提出以太阳为中心并与太阳有关的和取决于物质的力，必定与离这个中心的距离的平方成反比的思想。牛顿在 1665~1666 年间，受布里阿德思想的启发，试图用开普勒行星运动第三定律、落体定律和离心力定律从理论上论证引力平方反比定律，没有取得成功。直至 1684 年，牛顿才发现了椭圆轨道上的引力平方反比定律，并在《原理》中证明了万有引力符合这个定律。胡克在 1680 年也提到“中心引力以与距离的平方反比的关系产生一切距离上的物体由切线或等速直线运动落下的速度”，于是出现对该定律的发现要求优先权的争论。许多史料表明，由于胡克数学能力的欠缺，未能发现椭圆轨道上的引力平方反比定律，但在用几何图形法证明引力平方反比定律方面，确实对牛顿有所启发。

**平行光管 (collimator)** 一种能发射平行光束的光学仪器。是分光计、分光镜等光学仪器的一个组成部分，也用作检测和调整光学机构的

同轴性，又称为准直管。其外形结构是一金属圆筒，为避免光反射，内部涂黑，筒一端装一物镜，另一端在物镜的焦平面上放置一块分划板（带有十字准线或其他刻线的透明平玻璃板）。分划板通过小电珠经聚光镜再经 $40^\circ$ 反射透明玻片反射后照明。分划板的发散光束经过物镜后能转换成平行光束发散出去。若平行光管附有目镜，则称为自准直平行光管，它既能发射平行光束，又能接收平行光束，并可用目镜观测形成在分划板上的十字准线像。

#### 自准直平行光管结构示意图

平行力系 (system of parallel forces) 见力的合成。

平均速率 (mean speed) 参见麦克斯韦速率分布律。

平面波 (plane wave) 见波。

普朗克 (Max Karl Ernst Ludwig Planck 1858 ~ 1947) 德国物理学家。生于基尔。1874年入慕尼黑大学。三年后转到柏林大学，成为亥姆霍兹和基尔霍夫的学生。1879年获物理学博士学位。1895年任基尔大学理论物理学教授。1892年任柏林大学理论物理学教授。1930年起任柏林威廉研究所所长。1918年当选为英国皇家学会会员。

普朗克是量子论的开创者和奠基人，获1918年诺贝尔物理学奖。早期，主要研究热力学。1897~1899年，发表了总题目为《论不逆的辐射过程》的5篇论文，试图通过能量交换而达到平衡的情形入手，研究辐射理论。1900年，为克服经典物理学对黑体辐射现象解释上的困难，提出了物质辐射（或吸收）的能量只能是某一最小能量单位（能量子）的整数倍的假说，即著名的量子假说。还第一次测定了能量子的大小，从而发现了自然界一个新的普适常数——普朗克常数。量子假说的提出，对现代物理学特别是量子论的发展起了重大作用，为人类认识微观世界打开了大门，使人们对自然界的认识进入一个更深入的层次。

在相对论方面，普朗克是最先理解和支持相对论的物理学家之一。1905年，看到爱因斯坦的文章时，立即看出爱因斯坦文章的价值。1906年，导出了相对论动力学的方程，得出电子能量和动量的表达式，从而完成经典力学的相对论化。同年，是他引入“相对论”这个术语。1907年，根据新的实验结果，进一步断定狭义相对论的正确性，并在狭义相对论的框架内扩充了热力学。

普朗克的方法论贯串着自发的唯物主义倾向。他认为：我们的思维规律和我们从外部世界获得印象的过程的规律性，是完全一致的，所以人们就有可能通过纯思维去洞悉那些规律性。在这个事实中，具有重要意义的是，外部世界乃是一个独立于我们的绝对东西，而去寻找那些适合于这个绝对东西的规律，是科学生涯的最美好的使命。他主张：要找出不同量度所遵守的共同定律都非常困难，唯一有效的方法就是采用假说。至于如何找到最适当的假说，在这方面并无普遍的规则。唯一可能的办法是直接掌握问题或抓住某种适当的概念。这种智力上的跃进，唯有创造力极强的人生气勃勃地进行独立思考，并在有关事实的正确知识指导下走上正轨，才能实现。著有《关于正常光谱中能量分布律的理论》（1900）、《热力学讲义》（1905）、《热辐射理论讲义》（1906）、《物理世界的统一性》（1908）、《理论物理学导论》（共5卷，1916~1930）等。

**普朗克常数 (Planck constant)** 物理学中的一个普适常数，具有角动量量纲，常用符号  $h$  表示。其值可通过各种实验测定，为  $6.626176 \times 10^{-34}$  焦耳·秒。1900 年德国物理学家普朗克为了解释黑体辐射的实验结果而首次引入。普朗克常数是微观物理现象的一个特征常数，几乎出现在所有量子力学的公式中。当  $h$  趋于零时，量子力学公式便化为相应的经典力学公式。

**普朗克公式 (Planck formula)** 普朗克把黑体看成是由许多带电的谐振子组成，每个谐振子发出一种单色波。整个黑体发出连续的辐射。空腔黑体处于热平衡时，腔内的辐射场由各种频率的驻波构成。他假设频率为  $\nu$  的谐振子的能量值只取某个基本单元  $\epsilon_0$  的整数倍，即

$$= \epsilon_0, 2\epsilon_0, 3\epsilon_0, \dots$$

在热平衡态中，能量为  $\epsilon_0$  的状态所出现的概率正比于  $e^{-\epsilon_0/kT}$  (玻耳兹曼正则分布定律)，由此求出每个振子平均能量为

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_0}{\exp(\epsilon_0/kT) - 1}$$

普朗克用  $\bar{\epsilon}$  代替瑞利—金斯定律中的  $kT$ ，即用量子化的能量子取代经典理论的振动平均能量，于是有

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{\epsilon_0}{\exp(\epsilon_0/kT) - 1}$$

为了得到与实验相符的黑体辐射公式，普朗克不得不再假定  $\epsilon_0 = h\nu$ ，即基本能量子与频率成正比。 $h$  是比例常数，是一个与频率无关，也与辐射性质无关的普适常数，称为普朗克常数。现在精确测定的值为  $h = 6.626176 \times 10^{-34}$  焦耳·秒。用  $\epsilon_0 = h\nu$  代入后得到

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

此即普朗克的黑体辐射公式。当  $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$  时， $\exp(\frac{h\nu}{kT})$  用级数展开，略

去高次项后有  $\exp(h\nu/kT) = 1 + \frac{h\nu}{kT}$ 。这表明在长波区(低频)普朗克公式与瑞利—金斯定律符合。在短波区，普朗克公式也与实验曲线一致。普朗克用辐射能量的量子性克服了经典理论的紫外灾难，并由此开创了量子理论的新纪元。普朗克也因为这一成就而获得了 1918 年诺贝尔物理学奖。

**普通物理学 (general physics)** 通常指高等学校教学中所开设的力学、热学与分子物理学、电磁学、光学和原子物理学等课程的总称。通过有关现象和研究对象的介绍，引进确切的能够描写有关现象和研究对象基本特征和基本性质的物理量及物理概念(常称为运动学描写)；然后从特殊到一般，建立这些物理量之间的联系，总结出这类现象所满足的基本规律。这类课程常常为物理系较低年级的学生或非物理专业的学生开设。这类课程的特点是，注意基本概念、基本知识和基本方法的培养，常采用归纳法，从特殊到一般，并较少使用数学。

图 1 自发电式曝光表

曝光计 (exposure meter) 摄影时用来确定物镜光圈和快门速度的

指示仪器。亦称测光表。它也可用在暗室中洗印或放大照片时确定大致的印影时间，或者通常与摄影机联用以确定胶片的曝光量。现代曝光表基本上分为两类：自发电式（或称光电池式）和可变电阻式（或称光电导式）。在自发电式中，光电池把光子转换成电子并产生电流，其大小与接收到的光照成正比，电流可从灵敏的微安表读出，如图 1 所示。它的特点是：光电池响应速度快，光谱灵敏度非常接近全色胶卷，并有很长的使用寿命。在可变电阻式曝光计中，将硫化镉光敏电阻或硅光电二极管与以电池为动力的线路连接起来，光敏电阻和光电二极管的电阻随光照的强度而变化，再用毫安表测出电流的变化，由此显示光照度大小，如图 2 所示。它的特点是，功率灵敏度高，表头运转稳定。但受强光照射后，恢复较慢，因此在不用时要完全遮盖好。目前大部分手提式照相机内均装有曝光表。使用半自动照相机时，通过调节曝光控制机构，使取景器中的两个指针重叠一起，以确定正确的曝光。在全自动照相机中，则由机构本身自动调节。

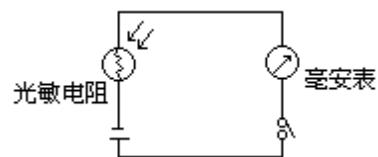


图 2 光电导式曝光表

**欹器** (Qī qì) 中国古代利用重心调节平衡的器物。它是由民间生活用品——盛水陶罐，又称提水壶，逐步演变而成的一种宫廷贵族的玩物。这种玩物由于重心略近于支点之上，且制作不匀，因此空的时候倾斜；装水不多不少时，重心下降至支点之下，就直立；继续装水时，重心升高到支点之上，就翻倒。这正如《荀子·宥坐》中记载的“虚则欹，中则正，满则覆”。它作为朝廷的奇物在我国长期传袭，从周直到汉末，经三国之乱而绝。到了西晋，杜预造出新欹器，同时代的刘徽著《鲁史欹器图》，后者虽已佚失，但说明这一时代又有人掌握了一些关于重心的知识和技巧。

**奇异粒子** (strange particle) 参见奇异数。

**奇异数** (strangeness number) 一种描述强子内禀特性的量子数，常用符号  $S$  表示。本世纪 40 年代末至 50 年代初，通过加速器实验发现了一批新的粒子 ( $K$  介子、 $\Lambda$  和  $\Sigma$  超子)。这些新粒子是在  $\pi$  介子—核子或核子—核子碰撞过程中产生的，然后又主要衰变为  $\pi$  介子和核子。在实验中这些粒子显示出某些奇特性质，主要表现在“产生快，衰变慢”，以及“产生的协同性” (如  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^+$ )，但另一些协同产生过程如  $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^+ + K^-$  却又从未观察到。

随着实验资料的大量积累，人们发现这些性质可通过引进一种新的量子数作出解释，这种新的量子数称为奇异数。这批新粒子具有非零奇异数，统称为“奇异粒子”。普通强子，如核子 (质子  $P$  和中子  $n$ ) 和  $\pi$  介子 ( $\pi^{\pm}, \pi_0$ )，它们的奇异数为零，是非奇异粒子。反粒子和粒子的奇异数互相反号 (见下表)。

在强相互作用某些奇异粒子的奇异数

粒子	奇异介子	奇异重子 (超子)			
	$K^+, K^0, K^-, \bar{K}^0$	$\Lambda^0$	$\Sigma^0$	$\Sigma^-$	$\Sigma^+$
$S$	+1      -1	-1	-1	-2	-3

用过程中，奇异数守恒；在弱作用过程中，奇异数不守恒。由普通强子碰撞产生奇异粒子的过程是强作用过程，因此产生速度很快 ( $\sim 10^{-20}$  秒)，而且必须有两个或几个奇异粒子同时产生，且它们的奇异数之和为零。另一方面，奇异粒子衰变过程 (如  $\Lambda \rightarrow P + \pi^-$ ) 中奇异数不守恒，因此可判定这是弱作用过程。通过弱作用的衰变过程速度当然慢，因此粒子的寿命长 (约为  $10^{-8} \sim 10^{-10}$  秒)。通过奇异数的引入，使当时一段时间内困扰物理学家的这类粒子的奇异性质得到了很好的解释。

**起偏器** (polarizer) 使自然光变成线偏振光的器件。同样的器件也可用来对光波是否为偏振光进行检测，这时便称为检偏器。起偏器和检偏器统称为偏振器或偏振片。偏振片中有一个特殊的方向，称为透振方向。当入射光波中的电矢量振动方向 (即偏振方向) 与透振方向一致时，便可通过偏振片。

**天然偏振片** 天然电气石晶体呈六角形片状，长对角线方向为其光轴



方向。光波的电振动方向与光轴平行时可以通过，与光轴垂直时不能通过。这种性质叫做二向色性。利用晶体的这种性质，可利用自然光产生线偏振光。

**人造偏振片** 把具有显著二向色性的碘化硫酸奎宁晶粒蒸镀在聚氯乙烯膜上，再将薄膜加热并拉伸，此时薄膜基片的应力可使晶粒的光轴作定向排列，使之成为具有某一特定透振方向的人造偏振片。

汽车驾驶员前面的车窗玻璃和车灯的玻璃罩如果都改装为人造偏振片，并使它们的透光方向与水平方向成夹角  $45^\circ$ ，且向同一方向倾斜，这样，驾驶员将会看到自己车灯射出的光很强，而从对面驶来的汽车车灯光很弱。

**渥拉斯顿棱镜** 将两块直角方解石晶体棱镜按斜面粘在一起，使它们的光轴互相垂直，便构成了渥拉斯顿棱镜。自然光通过这种棱镜后射出的是两束按一定角度分开的偏振光，它们的振动方向互相垂直。

**尼科耳棱镜** 1828年由英国物理学家尼科耳发明。天然方解石晶体有一个锐角是  $71^\circ$ ，将它磨成  $68^\circ$ ，然后沿钝角的对角线切开，再用加拿大树胶将它们粘起来。它利用双折射性质，将自然光分成寻常光和非常光。然后利用全反射把寻常光反射掉，只让非常光通过，从而获得线偏振光。

当自然光连续通过两个尼科耳棱镜时，第一个尼科耳棱镜  $N_1$  作起偏器，第二个尼科耳棱镜  $N_2$  作检偏器。设两个尼科耳棱镜的主截面之间的夹角为  $\alpha$ ，当  $\alpha=0$  时，由  $N_1$  产生的偏振光能通过  $N_2$ 。这种装置称平行尼科耳棱镜。当  $\alpha=\frac{\pi}{2}$  时，由  $N_1$  产生的偏振光完全不能通过  $N_2$ 。这时称正交尼科耳。尼科耳作起偏器用时，入射角限制在  $14^\circ$  左右范围内，否则寻常光也将从尼科耳中透出。作检偏器用时，通光孔径角为  $28^\circ$  左右。

**玻璃片堆** 参见布儒斯特定律。

**气垫 (air cushion)** 在做相对运动的两物体的接触面间充以高压气流，使它们脱离直接接触以减少摩擦的一种装置。广泛应用于力学实验和工程技术中。实验室常用的气垫有两种：气体由物块本身喷出，叫做气垫滑块；气体由机械装置喷出，常见的有气垫导轨和气桌。利用气垫装置做力学实验，摩擦力的影响可忽略。

作交通工具用的气垫船，就是利用以上的原理。1959年出现了世界上第一艘气垫船，当时船速可达 110 公里/小时，用作短途高速的交通工具。气垫船不但可在浅水河流上行驶，还可在沙砾、草原、冻土带和北极的雪地上行驶。70年代初，在英吉利海峡有 170 吨的气垫运输船，以取代该处的渡轮和航空运输。此外在军事上也有广泛用途，如反潜艇、干扰水雷、运载飞机和发射导弹等。但气垫运载器的研究与发展，还未达到预期目的，工业上仍未能达到经济实用的地步，有些技术问题尚待解决。

**气垫导轨 (air track)** 是力学实验中研究物体作一维运动时的辅助实验设备。所谓导轨，就是引导运动物体在一维方向上运动的器具；气垫是使运动物体悬浮的方法。若作相对运动的两物体直接接触，其间存在着相互作用，势必产生摩擦力，使实验的内容复杂化。用气垫法，使摩擦力有很大的消除，所以使运动学的规律更加明显。气垫导轨能将压缩机输出的压缩空气从导轨的一端进入，从导轨的表面小孔喷出，喷出的气体把

导轨上运动的滑块托起相当距离，即在导轨表面与

1—导轨 2—光电门 3—气垫滑轨 4—刻度尺 5—进气管 6—计时器 7—滑块

滑块间形成很薄的气膜，该气膜把滑块和导轨之间的由接触而产生的滑动摩擦变成空气层之间的内摩擦，这就大大地减少了许多力学实验中无法避免的摩擦力影响。

气垫导轨的整体结构由以下四部分组成：导轨、滑块、光电测试系统和供气装置。

导轨通常由一根长 1.2 米或 1.5 米的三角形但中空的铝型材制成。在导轨表面钻有直径为 0.6 毫米的许多喷气小孔，导轨的一端装有进气嘴，另一端呈封闭状。导轨上部的两端装有弹簧片，使滑块滑动到导轨边缘时，与它进行弹性碰撞，改变方向。气垫导轨的上部端部也可装气垫滑轮，“气垫滑轮”的转动惯量，及轮轴间的摩擦几乎可完全忽略，因此气垫滑轮两端的绳

子拉力可以认为相等。整个导轨安装在矩形或者 I 字型横梁上，导轨下面的螺丝适当调整，使导轨的平整度达到无视差。

滑块由长约 20cm 的角铝组成，角铝内表面与导轨的两个侧面精确吻合。滑块的两端装有弹簧片，供弹性碰撞用，滑块上还装有挡光片，附加质量、弹簧挂钩等附件，以适应各种实验的需要。

光电测量系统由光电门和计时器组成。光电门由红外发光二极管和接收红外光的光敏三极管组成。当光敏管受到红外波长的光照射时，在光电门控制电路中输出低电平；不受到照射时，输出高电平。在可见光（不包含红外波长的光）照射时，输出也是高电平。根据这个原理，当运动物体遮盖了红外波长的光时，光电测量系统输出为高电平，没有遮盖时为低电平。用来控制计数器的计数和停止计数，以求得时间的测量。

假定滑块挡片的宽度为  $l$ ，遮光时间为  $t$ ，由于  $l$  值非常小，势必  $t$  也很小，因此取  $l/t$  为某一点或者某一时刻的即时速度。有时在导轨上设置两个光电门，可测量运动滑块在两光电门间运动通过的时间。如果一个光电门输出的脉冲作为计时器的“计”时操作，则另一个光电门输出的脉冲作为计时器的“停”止计时操作，实现了位移的时间测量。

如果滑块在导轨上做来回振动，可用单个光电门，放在振动的平衡位置附近，调节计时器的功能选择开关，使得完成第一个脉冲开始计时，第三个脉冲停止计时，显示第一、三脉冲间的时间就是滑块做振动的周期。利用这个原理可连续计多次振动的周期，然后除以做全振动的次数，最后得到平均周期。通常由于计时器的时钟频率较高，所以测周期很容易得到三至四位，甚至更多位的有效数字，不必用多次法测平均周期。事实上，做阻尼振动的滑块，在振幅衰减过程中，周期逐渐变长，因此求平均实际上是不准确的。

气源通常用吸尘器代替，亦可用空气压缩机。前者功率较小，每一架气垫导轨带一个吸尘器；后者功率较大，一个排量为 0.6 米<sup>3</sup>/分的空气压缩机可同时带动四架气垫导轨。气源应该压力稳定，振动小，噪声电平低，效率高。在空气入口处要设置清洁过滤器。风力也不要太大，通常调节阀门控制气体流量，使得滑块托起  $10\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$  就可有效消除摩擦力对

机械运动的影响。

**气候 (climate)** 大气平均物理状态及其在空间与时间上的统计变化。具体来说是指某一地区多年的、综合的天气状况。全球气候受到太阳辐射、大气环流和下垫面性质 (如海洋、陆地、植被等) 三个因子的影响, 但起主要作用的是太阳辐射。

到达地球表面的太阳辐射能与地理纬度有关。一般说, 纬度低, 得到太阳辐射能多, 气温高; 纬度高, 得到太阳辐射能少, 气温低。大气环流是指地球上具有一定稳定性的各种气流运动的综合, 通过大气环流使在高低纬度和海陆之间的热量及水汽重新分配。下垫面的特性会影响辐射过程及气团的物理性质, 例如由于海洋、陆地对太阳辐射的反射率不同, 热容量、热导率不同等, 形成了两种不同的气候: 海洋性气候和大陆性气候。除了这些自然因素外, 人类活动对气候的影响也日益增强, 这些活动使得下垫面性质改变, 如滥伐森林、海洋石油污染。随着城市工业的发展, 大气污染也日益严重, 二氧化碳、尘埃等增多, 影响了局部气候。

**气体的输运现象 (transport phenomena in gases)** 处于非平衡状态下的气体各部分之间由于物理性质的不均匀性而引起的宏观变化过程。

气体的输运现象主要研究粘滞性、热传导和扩散。

当气体各部分运动速度不同时, 不同速度的相邻两气体层之间将产生互相作用力; 这种作用力称为粘滞力, 它将使流动慢的气体层加速, 而使流动快的气体层减速。由于粘滞力的存在, 气体各部分的流动就表现出粘滞性。实验结果表明, 相邻两流体层界面上互相作用的粘滞力  $f$  与该界面面积  $dS$  和该处垂直于截面方向上的速度梯度  $(\frac{du}{dz})_{z_0}$  之乘积成正比:

$$f = \eta \left( \frac{du}{dz} \right)_{z_0} dS,$$

这个经验定律称为“牛顿粘滞定律”, 式中比例系数称为粘滞系数 (又称内摩擦系数), 它与气体的性质和状态有关, 其单位是牛·秒·米<sup>-2</sup>。从效果上看, 粘滞力的作用使流速不同的相邻两部分气体之间产生动量传递, 传递的方向垂直于流速方向, 且从流速大的部分指向流速小的部分。如果以  $dK$  表示在时间  $dt$  内通过截面和  $dS$  传递的动量, 则根据动量定理 ( $dK=f dt$ ), 有

$$dK = -\eta \left( \frac{du}{dz} \right)_{z_0} dS dt,$$

式中负号表示动量是沿流速减少的方向运输的。

当气体各部分温度不同时, 相邻两部分气体之间就会有热量的传递, 这种现象称为热传导。考虑两个温度不同的平行的气流层, 如果以  $dQ$  表示所传递的热量, 则实验结果表明, 在时间  $dt$  内  $dQ$  与该热量传递所通过的截面面积  $dS$  以及该处在垂直于截面方向上的温度梯度  $(\frac{dT}{dz})_{z_0}$  之乘积成正比:

$$dQ = -K \left( \frac{dT}{dz} \right)_{z_0} dS dt.$$

这个经验定律称为“傅里叶热传导定律”, 式中比例系数  $K$  称为导热

系数（又称热导率），它与气体的性质和状态有关，其单位是瓦·米<sup>-1</sup>·开<sup>-1</sup>。式中负号表示热量是沿温度减少的方向运输的。

当气体各部分密度不均匀时，将有气体分子的转移，这种质量传递的现象称为扩散。对同一种气体来说，在温度均匀的情况下，密度的不均匀将会导致压强不均匀，从而出现气体的宏观流动，这时在气体中发生的就不是单纯的扩散现象。对两种不同气体（例如 N<sub>2</sub> 和 CO）可设想它们起初具有相同的温度和压强，放置在同一容器中，但用隔板分开，容器中总的气体密度处处一样，然后抽去隔板，虽然每一种气体在两部分容器中密度不同，但是不会产生宏观气流，这时每种气体分子的移动就是单纯的扩散。对任一种气体来说，在时间 dt 内通过截面积 dS 迁移的质量 dM 与密度梯度

$(\frac{d\rho}{dz})_{z_0}$  成正比：

$$M = g\rho(\frac{d\rho}{dz})_{z_0} dSdt。$$

这个经验定律称为“斐克扩散定律”，式中比例系数称为扩散系数，其单位是米<sup>2</sup>·秒<sup>-1</sup>。式中负号表示质量是沿密度减少的方向运输的。

以上三个实验定律虽然反映了三种不同物理过程的行为特征，但具有同样的规律性。这些现象均起因于气体内部的某种不均匀性以及消除这种不均匀性的内部作用。这种作用最终使气体趋于处处均匀的状态。

气体运输过程的发生从微观上说，首先是由于分子不停的热运动，而影响运输过程进行快慢的另一个决定性因素是分子之间互相碰撞的频繁程度。一般说来，分子间碰撞越频繁，分子运动经过的路线就越曲折，分子运动引起的“搅拌”作用使这种从非平衡态到平衡态的转化过程就进行得越缓慢。

气体放电（gaseous discharge） 又称气体导电。

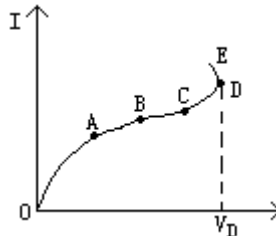


图 1 气体的导电规律

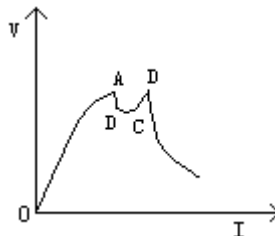


图 2 辉光放电特性曲线

气体中通过电流的现象。在通常情况下，气体中的自由电荷极少，是良好的绝缘体。但在外界某些因素（如紫外线、X 射线以及放射线的照射，或者气体加热）的作用下，气体分子可发生电离，气体中出现电子和离子，这时在外电场作用下，电子和离子做定向漂移运动，气体就导电。通常把气体放电粗分成两种类型：依靠外界作用维持气体导电，且外界作用撤除

后放电即停止的，称为气体的被激导电；不依靠外界作用，在电场作用下能自己维持导电状态的，称为气体的自激导电。

气体的导电规律如图 1 所示。在充有气体的密封玻璃管内装两个电极，把它们与电源的正负极相连，并逐渐增加电压。当电压  $V$  较小时，电压  $V$  与电流强度  $I$  的关系如图中曲线 OA 段所示，服从欧姆定律。当  $V$  增加到曲线中的 BC 段时，电流达到饱和值。如果电压继续升高，电流又随着电压的升高而升高，即曲线的 CD 段。在这一阶段中，因为电子与正离子在分别向阳极和阴极运动的过程中获得了较大的动能，当它们与中性分子碰撞时，足以使中性分子电离，从而产生出新的电子和离子。上述的导电过程都是必须依赖于外界的电离作用而维持的，属于气体被激导电。

当两电极间的电压进一步增加到  $V_0$  时，电流将突然增加，同时极间电压突然下降，即曲线中的 DE 段。这是因为产生了雪崩式碰撞电离。此时即使撤去外界的电离作用，导电过程仍然继续进行，这种现象称为气体的自激导电。

在气体自激导电时，往往伴有发声、发光等现象。当气体由被激导电过渡到自激导电时，我们说气体已被击穿或已被点燃。使气体击穿的最小电压  $V_0$  称为击穿电压。气体击穿后，由于气体的性质、压强、电极的形状和距离、外加电压以及电源的功率的不同，而可能采取辉光放电、弧光放电、火花放电及电晕放电等形式。

**辉光放电** 低压气体中伴有辉光出现的自激导电。在低压（约 133 帕）气体放电管中，两电极间电压逐步增加，并控制电流的变化，气体击穿后将会出现如图 2 所示的导电规律。图中的 AD 段就是辉光放电，其中 AC 段称为“正常辉光放电”，CD 段称为“异常辉光放电”。在正常放电时，极间电压几乎不随电流而变。在异常辉光放电时，极间电压将随电流的增加而增加。当电流超过 D 点时，电压会突然下降，这时便从辉光放电过渡到弧光放电。辉光放电时，气体放电管中。从阴极至阳极之间将出现交替分布的几个特殊的亮区和暗区，如图 3 所示。

图 3 辉光放电这区和暗区

1. 阿斯顿暗区，2. 阴极光层，3. 阴极暗区，4. 阴电辉，5. 法拉第暗区，6. 阳电辉，7. 阳极暗区，8. 阳极辉区

辉光放电的主要应用是利用它的发光效应，可制造荧光灯和霓虹灯等。利用正常辉光放电的稳压特性（特性曲线 BC 段）制造氖稳压管。氦氖激光区就是利用辉光放电的阳电辉产生激光的。

**弧光放电** 伴有强烈的弧光并产生高温的一种气体自激导电。当电源提供较大功率时，在不高的极间电压（约几十伏）下，两极间的气体或金属蒸气中可以持续地通过较强的电流（几安到几十安），并发出强烈的光辉，产生几千到上万度的高温。

弧光放电与辉光放电的主要不同，在于弧光放电时阴极产生热电子发射（称为热阴极弧光，如碳弧）或场致发射（称为冷阴极弧光，如汞弧）。产生热阴极弧光放电的方法通常是使两电极接触后随即分开，因短路发热使阴极表面温度大增，产生热电子发射。热电子发射使碰撞电离及阴极的二次电子发射急剧增加，因而两极间的气体具有良好的导电性。弧光放电的重要特性是：当电流增大时，两极间的电压反而下降。在冷阴极弧光放

电中，电极由低熔点的材料（如汞）做成。阴极表面蒸发出的蒸气被电离而在阴极表面附近形成空间正电荷层。阴极附近出现的强电场引起场致发射，从而使极间电流剧增，形成电弧。

弧光放电的主要应用有：用作强光源（如弧光灯）；光谱分析中用作激发元素光谱的光源；在工业上用于冶炼、熔化、焊接和切割高熔点金属（如电弧炉、电弧焊）；医学上用作紫外线源（如太阳灯）；用作将交流电变为直流电的整流器（汞整流器）等。另一方面，在大功率电路的开关电器中，由于触头分开时会引起电弧，这种电弧有烧毁电器触头的危险，必须采取灭弧措施。火花放电在通常气压下，当在曲率不太大的冷电极间加高电压，但电源不能持续输出大功率时所形成的间歇性气体自激导电。火花放电时，碰撞电离并不发生在整个电极间的区域内，而只是沿着狭窄曲折的发光通道进行。火花放电常常伴有爆裂声。由于气体击穿后电流强度猛增而电源功率不够，电压随即下降，放电暂时熄灭，电压恢复后又进行放电。因此，火花放电具有间歇性。雷电就是自然界大规模的火花放电现象。

在其它条件不变时，引起火花放电的击穿电压完全取决于电极形状及其间的距离。当间距相同时，电极的曲率越大，其击穿电压越低；而电极形状一定时，间距越大，击穿电压越高。由此可以利用火花放电时的击穿电压来测量高压。火花放电也应用于金属加工、钻细孔以及内燃机点燃装置等设备中。它也是用作高能粒子探测器的火花室所依据的原理。另一方面，高电压设备则必须设法防止电火花出现，电火花将会引起设备损坏及电能的损耗。

**电晕放电** 一种气体自激导电现象。在曲率半径较小的导体表面或电极表面（其他导体或电极距离较远），当电场强度升高到某一临界值以上时，在非均匀强电场作用下，表面附近的气体电离，引起气体导电并发光，从而形成自激导电。

电晕放电常常发生在高压导线的周围和带电体的尖端附近。电晕放电时，气体的电离和发光仅局限在电极表面附近的大气薄层里，这薄层称为“电晕层”。在电晕层外空间，由于电场较弱，不发生碰撞电离。当电极与周围导体间的电压增加时，电晕层逐步扩展到附近的其它导体，从而过渡到火花放电。因此可以说电晕放电是一种不完全的火花放电。

电晕放电时伴有嗤嗤声，产生臭氧，造成能量损耗，影响绝缘性能，它是高压输电线上漏电的主要原因。利用电量放电，可使积聚在导体或电极上的电荷逐渐消失，这就是避雷针泄放电荷的道理。电晕放电可用于静电过滤器中，以消除气体中的尘粒。

**气体分子平均自由程** (mean free path of gas molecules) 气体分子在连续两次碰撞之间所通过的自由路程的平均值。根据气体动理论，气体分子之间存在相互作用力，正是这种相互作用使得气体分子不断地改变运动的速度。作为一种简单的模型，可以把分子看成具有一定体积的刚球，把分子之间相互作用过程看作刚球之间的弹性碰撞。在发生碰撞的短促时间内，气体分子的运动状态发生改变，而在其他时间内，分子做直线运动。在相继两次碰撞间分子走过的路程称为分子的自由程。由于分子数目极大，碰撞频繁，因此在任意两次连续碰撞之间分子通过的自由程的大小具有很大的偶然性，引入气体分子的平均自由程，对于描述气体的

扩散、热传导等气体内的输运过程，可以给出一些与实验近似符合的重要结论。

如果用  $\bar{v}$  表示分子的平均速率，以  $\bar{z}$  表示每个分子平均在单位时间内与其他分子碰撞的次数，按照定义，气体分子的平均自由程就是  $\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}t}{z} = \frac{\bar{v}}{z}$ ，

由此可以得出的平均自由程为  $\bar{\lambda} = \frac{0.7071}{\pi n d^2}$ ，这里  $n$  是分子的数密度， $d$  是分子的有效直径。显然，分子密度越高，分子的碰撞就越频繁，平均自由程也就越小。利用理想气体状态方程，还可以用温度  $T$  和压强  $p$  表示  $\bar{\lambda}$ ：

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

当温度恒定时，压强越高，分子平均自由程越小。在标准状态下 ( $T=273K$ ,  $p=1.0$  大气压) 取分子有效直径为  $d=3.5 \times 10^{-10}$  米，由上式得出分子平均自由程  $\bar{\lambda}=6.9 \times 10^{-8}$  米。约为有效直径的 200 倍。

选定一组  $N_0$  个分子，每个分子的自由程有长有短，然而处于任一给定长度区间  $x \sim x+dx$  间的分子数服从分子按自由程分布的规律，特别是，从这个规律中可以得到，在  $N_0$  个分子中，自由程大于分子平均自由程  $\bar{\lambda}$  的分子数为  $N=N_0 e^{-1}=0.37N_0$ ，而小于分子平均自由程  $\bar{\lambda}$  的分子数为  $N'=N_0 - N=0.63N_0$ 。

按照气体动理论的观点，加上一些简化的假设，可以得出在扩散过程中，扩散系数  $D=\frac{1}{3}\bar{v}\bar{\lambda}$ ；在热传导过程中，导热系数  $K=\frac{1}{3}\bar{v}\bar{\lambda}c_v$  ( $\rho$  为气体

密度， $c_v$  为定容比热)；在粘滞现象中，粘滞系数  $\eta=\frac{1}{3}\bar{v}\bar{\lambda}\rho$ 。这三个系

数的关系是  $\frac{K}{\eta c_v} = 1$ ， $\frac{D\rho}{\eta} = 1$ 。但是实验结果表明， $\frac{K}{\eta c_v}$  介于 1.3 和 2.5

之间， $\frac{D\rho}{\eta}$  介于 1.3 和 1.5 之间，具体数值视气体的不同而异，因此用平均自由程方法讨论气体内输运过程，可以得到较好的定性结果，但是还不够精确。

气体实验定律 (experimental laws of gas) 确定理想气体状态方程所依据的玻意耳定律、盖—吕萨克定律和查理定律的总称。

(1) 玻意耳定律 一定质量的气体，当其温度保持不变时，它的压强和体积的乘积是一个常数，即  $pV=C$ ，其中常数  $C$  的大小由气体的质量和温度决定。

(2) 盖—吕萨克定律 一定质量的气体，当其压强保持不变时，它的体积的绝对温度成正比，即  $V=V_0 a_v T$ ，或  $V=V_0 (1+a_v t)$ ，式中  $V$  和  $V_0$  分别是气体在温度为  $t$  和  $0$  时的体积， $a_v$  为压强不变时气体的体胀系数， $a_v=\frac{1}{273}$ 。按盖—吕萨克定律。压强不变时，一定质量的气体的温度每升高

摄氏一度，其体积将增加它在  $0$  时体积的  $\frac{1}{273}$ 。

(3) 查理定律 一定质量的气体，当其体积保持不变时，它的压强和绝对温度成正比，即  $p=p_0 a_p T$  或  $p=p_0 (1+a_p t)$ ，式中  $p$  和  $p_0$  分别是温度为  $t$

和 0 时气体的压强,  $a_p$  为体积不变时气体的压强温度系数  $a_p = \frac{1}{273}$ 。按查理定律, 体积不变时, 一定质量的气体的温度每升高摄氏一度, 其压强将增加它在 0 时压强的  $\frac{1}{273}$ 。

实验表明, 对于通常压强和温度下的实际气体来说, 以上三个定律并不精确成立。压强越低, 温度越高, 实际气体的行为越接近三个定律。 $a_v = a_p = \frac{1}{273}$  也是近似的, 不同气体的  $a_v$  和  $a_p$  略有不同, 同一气体在不同温度下, 它们的值也略有差别。不过, 压强越低, 温度越高, 以上这些差别就越小。

三个定律来自对实验事实的概括和总结, 它们是实际气体状态变化的很好的近似规律, 在压强趋于零的极限情形下, 一切气体状态变化将严格遵循这三个定律。正是依据这三个定律, 人们引入了理想气体的模型, 建立了理想气体的物态方程。

**气体物态方程** (equation of state for gases) 对于质量一定的气体, 在平衡态下往往可以用少数独立的参数来描写平衡态的宏观性质, 而其他的参数则可以看作是这些独立参数的函数。这种函数关系就称为气体的物态方程。对简单的气体系统, 可以选用两个独立的参数, 例如用压强  $p$ 、体积  $V$  来表征平衡态, 这时温度  $T$  就是  $p$ 、 $V$  的函数, 可写作  $T = T(p, V)$  或  $f(p, V, T) = 0$ , 这就是物态方程。

**理想气体物态方程** 根据玻意耳定律、理想气体温标的定义和阿伏伽德罗定律可以得出, 理想气体的物态方程是

$$p_v = \frac{M}{\eta} RT。$$

式中  $M$  是气体的质量,  $\mu$  是气体的摩尔数,  $R$  是气体普通常数。对于同一质量的某种气体, 当它分别处于 A、B 两个不同的平衡态时, 由上式得到理想气体物态方程的另一种形式

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_B V_B}{T_B}$$

**实际气体物态方程** 在实际应用中, 利用理想气体物态方程得到的结果往往与实验结果存在偏离, 因此必须进行修正。目前对实际气体已建立起许多物态方程, 其中应用较广泛的是一类经验的和半经验的物态方程, 这类方程仅在某一特定的温度和压强范围内适用, 它们有较高的精确性, 但也存在一定的局限性。

(1) 范德瓦耳斯气体物态方程

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V-b) = RT \quad (\text{对一摩尔气体})。$$

这是以理想气体物态方程为基础进行修正而得到的。其中  $a$  是考虑到分子之间相互作用力而引入的一个参量,  $b$  是考虑到气体分子的固有体积而引入的另一个参量, 对一定的气体,  $a$ 、 $b$  都是常量;  $V$  是摩尔体积。实验表明, 例如对氮气在 0 时, 压强一旦超过  $1.013 \times 10^7$  帕即 100 个大气压, 理想气体状态方程就不再适用, 但即使压强增大至  $1.013 \times 10^8$  帕即 1000 个大气压, 利用范德瓦耳斯方程所得的结果与实际测量所引起的误差



还不到 2%。

(2) 昂尼斯方程。对一摩尔气体，可用下列  $p$  的幂级数或  $\frac{1}{V}$  的幂级数形式作为物态方程

$$pV = A + Bp + Cp^2 + Dp^3 + \dots$$

$$\text{或 } pV = A' + \frac{B'}{V} + \frac{C'}{V^2} + \frac{D'}{V^3} + \dots$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  和  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 、 $D'$  都是温度的函数，分别相应地称为第一、第二、第三和第四维里系数，它们之间的关系里

$$A' = A, B' = AB, C' = A^2C + AB^2,$$

$$D' = A^3D + 3A^2BC + AB^3。$$

当气体压强很小或气体的体积很大时，昂尼斯方程的形式就和理想气体物态方程的形式相近。昂尼斯方程不但在实际问题中有着广泛的应用，而且在统计物理学中可以严格在推导出这个方程，因此它在理论上也有重要意义。

无论理想气体物态方程，范德瓦尔斯物态方程或昂尼斯方程，都是只有两个独立变数的物态方程。对于处在外场中的气体系统以及液体或固体，往往需要更多的独立变数才能描写平衡态的性质，因此物态方程的函数形式也比较复杂。

**气象卫星** (meteorological satellite) 携带各种大气遥测仪器，从空间对地球进行气象观察的人造地球卫星。大部分气象卫星用于常规分析，提供天气资料、情报，其他的则用于研究和开发。

按照不同的运行轨道，气象卫星分为极轨气象卫星和地球同步气象卫星两大类。极轨气象卫星的运动采用近极地太阳同步轨道，卫星轨道平面和太阳光线保持固定的相对取向，这样卫星在同一地方时通过每一纬度两次。极轨气象卫星的轨道接近圆形，飞行高度约为 600 ~ 1500 公里，卫星轨道所在平面与赤道平面的夹角约为  $81^\circ \sim 130^\circ$ ，每条运行轨道都经过极地附近。从极轨运行的卫星上可获得全球的气象观察资料，并且由于轨道高度较低，图象的空间分辨率较高。

地球同步气象卫星又称静止卫星，它的轨道平面与地球的赤道平面重合，运行周期与地球自转周期相等，运行高度约为 36,000 公里。静止卫星的有效观测视野为南纬  $60^\circ$  到北纬  $60^\circ$ 、经度横跨约  $140^\circ$  的近圆形范围。如果沿地球赤道均匀地设置五个静止卫星，就可以对全球的中、低纬度地区进行观测。因此，极轨卫星与静止卫星的配合使用，能组成比较理想的空天气象观察系统，从而获得全球范围的气象资料。

气象卫星上携带的大气遥感仪器有电视照相机、辐射扫描仪等。利用这些多通道、多波段的仪器，可以拍摄彩色图片、可见光云图和红外云图。在红外云图上，不同的亮度代表不同的温度，而对流层大气的温度是随着高度降低的，因此由云顶的温度可以判别云顶高度，这可以弥补可见光难于区分在阳光照射下的云顶和白雪的不足。气象卫星携带的红外探测器可通过滤光或分光设备测量地球和大气向卫星发射的红外辐射强度，从而计算各地晴空大气温度的垂直分布。微波辐射仪可以探测云上和云下的大气温度及其分布、云中含水总量、雨强的分布和推算海面风速的分布。太阳发射的质子、粒子和电子的通量密度也可以用空间环境监测器来测量，

这为高层大气物理和日地空间物理研究提供了资料。

气象卫星资料的发送方式现已由过去的模拟信号传送变为数字资料传送，这些资料输入供收集和绘图用的高速计算机，对那些拟在示波管上照相的图片还叠加经、纬度线和海岸线，使分析人员能及时获得气象图像资料，可以监视刚产生的强气旋以及其他天气扰动，这对于天气预报是极为重要的。地球静止卫星对云型的变化所进行的连续监视可以对早期的风暴进行检测，以便及时发出警报。

我国于 1988 年 9 月发射了第一颗试用型气象卫星风云一号 (FY - 1 - A)，1990 年 9 月又发射了风云一号的第二颗卫星 FY - 1 - B。这两颗卫星都采用太阳同步轨道，高度约 900 公里、倾角约  $99^\circ$ ，偏心率小于 0.005。卫星上装有可见光和红外波段的扫描辐射计，共有五个通道，详见下表。

通道	波段(微米)	主要用途
1	0.58 ~ 0.68	白天云图
2	0.725 ~ 1.1	白天云图，冰、雪覆盖，植被，水陆边界等图像
3	0.48 ~ 0.53	海洋水色图像
4	0.53 ~ 0.58	海洋水色图像
5	10.5 ~ 12.5	昼夜云图以及地表和海面温度

**气压计 (barometer)** 测量大气压强的一种仪器。主要有以托里拆利实验为基础的水银气压计和借助于金属弹性的无液气压计两类。水银气压计中，大气压强与水银柱的重量（高度）相平衡，由水银柱高度可算出大气压强，而水银柱高度可测量得非常精确。

水银气通道 \ 波段 (微米) \ 主要用途

压计的种类很多，其差异主要在于测量水银柱高度的方法不同。无液气压计又称为空盒气压计，它用易弯曲的金属盒组成，金属盒的外形随气压变化而变化，这种变形同个校正过的指针相连接。由于这类气压计体积小，携带方便，被广泛用作手提式测量大气压的仪器以及飞机上的测高度的仪器。

**汽化 (vaporization)** 参见蒸发和沸腾。

**汽化热 (heat of vaporization)** 参见蒸发和沸腾。

**汽轮机 (steam turbine)** 参见热机。

**汽油机 (gasoline engine)** 参见热机。

**潜热 (latent heat)** 单位质量的物质在等温等压情况下，从一个相变化到另一个相所吸收或放出的热量。有时称相变潜热。物质三态变化都是相变，固相、液相之间的相变潜热称为熔解热（或凝固热），液相、气相之间的相变潜热称为汽化热（或凝结热），固相、气相之间的相变潜热称为升华热（或凝华热）。

**潜望镜 (periscope)** 在隐蔽处所观察外界情况时常用的光学仪器。最早由我国发明。西汉时，刘安的《淮南万毕术》中载：“高悬大镜，坐见四邻。”注曰：“取大镜高悬，置水盆于其下，则见四邻矣。”就基本原理而言，已与开管潜望镜很相似。该镜在后世有相当的流传与影响。北周庾信《咏镜诗》有“试挂淮南竹，坐堪见四邻”之句。到宋代，在《感

应类从志》中则载：“以大镜长竿上悬之，向下便照耀四邻。当其下以盆水，坐见四邻出入也。”

**钱三强**（1913~1992）中国物理学家。浙江省吴兴县人。1936年清华大学物理系毕业。1937年赴法国留学，在约里奥—居里夫妇指导下从事原子核物理学的研究。1940年获法国国家博士学位。1944~1947年任法国国家科学研究中心研究员、研究导师。1948年回国后，任清华大学物理学教授和北平研究院原子学研究所所长。中国科学院成立后历任近代物理研究所（后改名为原子能研究所）副所长、所长，计划局副局长、局长，学术秘书处秘书长，副院长，并短期兼任浙江大学校长。1955年受聘为数学物理化学部学部委员。1951年当选为中国物理学会副理事长，1982年被选为理事长。1986年当选为中国科协副主席。

主要贡献在原子核物理学方面。1939年，重核裂变现象发现后，他与约里奥—居里合作，对铀和钍受中子打击后得到的放射性镅（半衰期约为3.5小时）的同位素的射线谱进行比较研究，结果发现在实验误差范围内它们是一样的，说明它们是同一种放射性同位素，这一实验表明铀与钍用不同方式裂变可得到同样的裂变产物，从而对解释当时发现不久的裂变现象是有力的支持。1946~1948年，与何泽慧合作，首先发现铀的三分裂和四分裂现象，并根据实验继续分析能量与角分布等关系，发表了关于铀核三分裂机制的解释，为各国物理学家所接受。1951年起，和王淦昌、彭桓武等，培养了一批从事研究原子核科学的人才，经过全面筹划，建立起中国研究原子核科学的基地。1960年起，接受委托适时地组织了一批理论物理学家，对热核反应机理进行探索性研究，探讨了不少关键性概念和机制，为中国氢弹研制工作做出了贡献。

**强子**（hadron）参与强相互作用的粒子。迄今发现的基本粒子中绝大多数都是强子。强子按照自旋可分为两大类，自旋为半整数的强子称为重子；自旋为0或正整数的强子称为介子。重子如核子（质子p和中子n）、“超子”（如 $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 、 $\Xi$ 超子）。介子如 $\pi$ 介子、K介子等。上述列举的强子中，质子是稳定粒子，其他粒子都是不稳定粒子，通过弱作用发生衰变，平均寿命约为 $10^{-10}$ 秒（ $>10^{-16}$ 秒）。其他绝大多数重子和介子主要是通过强作用发生衰变。由于强作用比电磁作用和弱作用强得多，所以主要通过强作用衰变的粒子的寿命极短，约为 $10^{-20} \sim 10^{-24}$ 秒。这类寿命极短的强子也称为“共振态”粒子。

迄今的理论和实验表明，强子在 $10^{-13}$ cm线度上具有内部结构。构成强子的更基本的组份粒子称为夸克，夸克之间通过交换胶子而产生强作用，这种强作用是一种吸引作用，从而使夸克束缚在一起而构成强子（参见强子结构）。

**强子结构**（hadronic structure）发展简史 强子（如质子P、中子n、 $\pi$ 介子等）曾被看作是“基本”粒子。但是随着物理学的进一步发展，人们认识到这些粒子是具有内部结构的，它们由更为基本的组份粒子所构成。

费米和杨振宁于1949年提出了一种强子结构模型，该模型将核子（p、n）和它们的反粒子（ $\bar{p}$ 、 $\bar{n}$ ）作为基础粒子，而将介子作为复合粒子，如 $\pi^+ = (p\bar{n})$ ， $\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(p\bar{p} - n\bar{n})$ ， $\pi^- = (n\bar{p})$ 。本世纪50年代初发现了大量新

的奇异粒子。1955年，日本物理学家坂田昌一将“费米—杨模型”推广为“坂田模型”。该模型将质子 p、中子 n 和  $\Lambda$  粒子以及相应的反粒子作为基础粒子，其他强子都是由这些基础粒子构成的。这些模型预言了过多的新粒子，而且对粒子的某些性质的描述也不正确。

强子具有内部结构最早的实验证据来自 1956 年关于核子电磁形状因子的测量（参见核子的电磁结构）。实验结果表明，质子和中子并非点状粒子，在其半径为  $0.84 \times 10^{-13} \text{cm}$  范围内存在电荷和磁矩的分布。

么正对称性 20 世纪 60 年代初，已发现的强子数目猛增至一、二百种，大大超过了元素周期律发现前夕已知的化学元素的数目。在这种情况下，透过这许多粒子之间的千差万别，发现其间的内在联系和内在规律性，然后再进一步探求它们的共性和内在联系的根源就显得非常重要。1961 年，美国物理学家盖尔曼和奈曼首先发现，强相互作用和强子系统具有一种特殊的对称性，称为“么正对称性”或“SU(3)对称性”。

正如忽略质子和中子的质量差别后，核力和核子系统将显示出“同位旋对称性”一样，他们发现如果忽略 8 种重子 ( $p$ 、 $n$ 、 $\Lambda$ 、 $\Sigma^+$ 、 $\Sigma^0$ 、 $\Sigma^-$ 、 $\Sigma^+$ 、 $\Sigma^+$ ) 之间的质量差别，或者忽略 8 种介子 ( $K^+$ 、 $K^0$ 、 $K^-$ 、 $K^0$ 、 $\pi^+$ 、 $\pi^+$ 、 $K^+$ 、 $K^0$ 、 $\pi^0$ ) 之间的质量差别，则它们在强相互作用过程中将显示出非常相似的性质。在这种对称性下，这 8 个重子和 8 个介子可分别用图 1 和图 2 表示。这 8 种重

图 1 自旋为 1/2 的重子八重态

图 2 自旋为 0 的介子八重态

图 3 自旋为 3/2 的重子十重态

子可以看作是某种强子的 8 种不同的状态；这 8 种介子是某种介子的 8 种不同的状态。只是由于除了纯粹满足 SU(3)对称性的强作用外，还存在某种次强作用和电磁作用，这 8 种重子态或 8 种介子态之间才显示出差别。在 SU(3)对称性中，除上述八重态外还允许存在重子十重态（图 3 所示）。在么正对称性建立初期，图 3 的重子十重态表示中最上端的  $\Delta^+$  粒子尚未发现。但根据对称性理论，对这种粒子的性质，如电荷、自旋、超荷，以及质量和寿命等作出了预言。1964 年，人们根据预言所提供的线索终于通过加速器实验发现了这个粒子，实验中所测得的该粒子的性质和理论预言很好相符。么正对称性获得了很大的成就，对长期积累起来的丰富实验资料给出了系统的分析，对数百种粒子进行了分类，对这些粒子的基本性质作出了解释。从这个意义上说，强相互作用的 SU(3)对称性在粒子层次上的地位与化学元素周期律在原子层次上的地位相当。

夸克模型 1964 年，美国物理学家盖尔曼和茨韦格发现，强子性质的么正对称性可通过如下观念得到解释：所有强子由更基本的组分粒子构成。这种组分粒子称为“夸克”，有 3 种，分别称它们为 u、d 和 s。夸克的自旋为 1/2，但却带有分数电荷（见下表）。在夸克模型中，所有强子都是由夸克和反夸克构成的。重子由三个夸克或反夸克构成，如质子  $P=(uud)$ ，中子  $n=(udd)$ 。介子由一个夸克和一个反夸克构成，如

$\pi^+ = (u\bar{d})$ ,  $\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$ ,  $\pi^- = (\bar{u}d)$ 。夸克模型对强子的基本性质以及高能强子碰撞过程中的许多实验结果给出了满意的解释。

### 三种夸克的性质

夸克	电荷 ( e )	同位旋	奇异数
u	2/3	1/2	0
d	-1/3	-1/2	0
s	-1/3	0	-1

夸克模型的发展 1974 年，丁肇中和里希特领导的实验小组分别独立地发现了一种新的粒子，称为“ $J/\psi$ ”粒子。这种粒子独特的性质显示出它不能由上述三种普通的夸克和反夸克构成，而需要引进第四种夸克，称为“粲夸克”(c)，它的电荷为  $\frac{2}{3}e$ 。 $J/\psi$  小粒子是这种粲夸克和反粲夸克所构成的介子，即  $J/\psi = (c\bar{c})$ 。1977 年另一族介子(称为  $\psi'$  粒子)的发现表明，还存在第五种夸克，称为“底夸克”(b)，其电荷为  $-\frac{1}{3}e$ 。1984 年，从高能加速器实验中又发现了可能存在第六种夸克的迹象，这种夸克称为“顶夸克”(t)，电荷为  $\frac{2}{3}e$ 。因此目前物理学家普遍认为，自然界中存在 6 种夸克 (u、d、s、c、b、t) 及其相应的反夸克，一切强子都是由这 12 种夸克或反夸克构成。其后又进一步发现，夸克带有色或色荷，这种色荷是强作用的源。色荷在其周围空间将激发一种场，这种场称为胶子场。带有色荷的夸克之间的强作用是通过胶子场传递的。正是这种强作用使夸克紧密地束缚在一起而构成强子。描写这种强相互作用的理论称为“量子色动力学”。

强子内部结构的实验验证 强子具有内部结构已为大量的加速器实验所证实。强子的夸克模型对强子的性质作出了很好的解释。对于大量的高能粒子碰撞实验也可用夸克模型作出解释。但是至今所有实验都没有观察到自由夸克的存在，这一结果目前常用夸克囚禁来解释。强子结构是由强相互作用决定的，而这种相互作用的性质比决定原子结构的电磁相互作用复杂得多，所以对强子结构的研究无论从实验上还是从理论上要比对原子结构的研究困难得多，至今还有许多问题需进一步探索。

轻子 (lepton) 不参与强相互作用的粒子。包括三种带负电荷的粒子 (电子、 $\mu$  子和  $\tau$  轻子)，和与此相应的三种呈电中性的中微子 (e 型中微子  $\nu_e$ 、 $\mu$  型中微子  $\nu_\mu$  和  $\tau$  型中微子  $\nu_\tau$ )，以及相应的反粒子，共 12 种，它们的自旋都是 1/2。电子是 1897 年汤姆孙最早发现的。 $\mu$  子是 1946 年从宇宙射线实验中发现的，其质量为  $207m_e$ ，即为电子质量  $m_e$  的 207 倍。

$\tau$  轻子是 1975 年从高能加速器实验中发现的，其质量为  $3540m_e$ 。中微子的存在是物理学家泡利于 1933 年首先从理论上预言，直到 1956 年才从高能加速器实验上观察到。由于中微子不带电，质量为零，与物质的相互作用非常微弱，所以需要高度技巧和精密探测才能从实验上观察到。后来又

进一步发现，实际中存在三类中微子以及相应的反中微子。通过大量实验发现，在轻子参与的一切过程中，正反轻子的代数和保持不变。为了描述这一特征，对所有轻子可赋予被称为“轻子数”的量子数，一切轻子的轻子数为+1。反轻子的轻子数为-1，非轻子（如质子、中子等）的轻子数为0。在任何基本粒子过程中，轻子数是守恒的。后来又发现，还需进一步区分电子轻子数、 $\mu$ 子轻子数和 $\tau$ 子轻子数，任何过程中这些轻子数是分别守恒的。

迄今的实验尚未发现轻子具有内部结构，或者更确切地说，迄今的实验在 $10^{-16}\text{cm}$ 线度上尚未观察到轻子具有内部结构。

**氢光谱 (hydrogen spectrum)** 氢原子的发射光谱。所谓光谱，是指光的频率成分和强度分布的关系，它是研究原子结构的一个重要途径。按照普朗克的量子理论，光的频率与构成光的光子的能量成正比。所以通过对原子发射光谱的考察，可以得到关于原子内部所存在的能量状态的信息。正如牛顿早在18世纪初就指出，要了解物质的内部情况，只要看看它的光谱。

氢原子是最简单的原子。它的光谱规律性最简单，也最能反映出原子内部能级结构的基本规律。1853年埃格斯特朗首先从氢放电管中发现了第一条氢谱线（ $\lambda=656.3$  纳米）。至1885年，人们已观察到14条氢谱线，其中4条在可见光区。这一年，瑞士科学家巴耳末首先对可见光区氢谱线的波数 $k$ （即波长的倒数）归纳出一个经验公式（称为巴耳末公式）：

$$k = \frac{1}{\lambda} = \frac{4}{B} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (n = 3, 4, 5, \dots)$$

式中 $B=364.56$  纳米，是一个经验常数。这组可见光区的氢谱线就称为巴耳末系。

1889年，里德伯将巴耳末公式推广为如下形式：

$$k = \frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

这称为广义巴耳末公式，或里德伯公式。氢光谱的所有简单谱线都可用这个公式表示。 $R_H$ 称为里德伯常数， $m$ 取一定值时， $n$ 可取比 $m$ 大的一系列整数。氢光谱的六个线系是

- $m=1, n=2, 3, 4, \dots$   
(赖曼系, 紫外区, 1914年发现)
- $m=2, n=3, 4, 5, \dots$   
(巴耳末系, 可见光区, 1853年发现)
- $m=3, n=4, 5, 6, \dots$   
(帕邢系, 红外区, 1908年发现)
- $m=4, n=5, 6, 7, \dots$   
(布喇开系, 近红外区, 1922年发现)
- $m=5, n=6, 7, 8, \dots$   
(芬德系, 远红外区, 1924年发现)
- $m=6, n=7, 8, 9, \dots$   
(汉弗莱系, 远红外区)

巴耳末公式和里德伯公式使看起来非常复杂的氢光谱显示出明显的规律性。从里德伯公式还可以看出，氢的任一谱线均可表示为两个“谱项”之

差。这个见解常称为里德伯—里兹组合原则。氢光谱的上述规律性以及里德伯—里兹组合原则在玻尔的氢原子模型和其后建立的量子力学中都能得到解释（参见玻尔模型）。

如果用分辨率更高的分光仪观察氢原子的光谱，将会发现它们又由若干非常靠近的谱线组成，这称为氢原子光谱的精细结构。由于电子运动的相对论性效应（它引起例如电子自旋磁矩与轨道磁矩的相互作用），电子自旋磁矩与原子核磁矩的相互作用，以及真空极化效应等都会引起氢原子能级的分裂，正是这种能级分裂导致氢光谱的复杂结构。

**球面波（spherical wave）** 见波。

**球面反射（spherical reflection）** 光线经两种媒质的分界面返回到原媒质中的现象称为光的反射，分界面为球面时称球面反射。球面的中心点  $O$  称为顶点，球面的球心  $C$  称为曲率中心，半径称为曲率半径，顶点和曲率中心的连线称为主轴，通过主轴的平面称为主截面。

在讨论球面反射问题时常采用一种与球面折射问题中相同的符号法则，只是反射线的方向为从右到左，与球面折射时折射线的方向相反，故对像距的规定现在应改变为：若像点  $P'$  在顶点  $O$  之左，为实像，则像距  $s' > 0$ ； $P'$  在  $O$  之右，为虚像，则  $s' < 0$ 。

球面反射成像的物像公式为：

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{-2}{r},$$

焦距公式为

$$f = f' = -\frac{r}{2}。$$

球面反射成像的横向放大率公式为

$$\beta = -\frac{s'}{s}。$$

**球面折射（spherical refraction）** 光线经两种媒质的分界面进入第二种媒质中的现象称为光的折射，分界面为球面时称球面折射。在近轴光线条件下，可以近似地认为每一个物点都是唯一的一个像点与之对应。

为了讨论球面折射的成像，可采用一种符号法则，规定出各个量的正负号。这种规定并不是唯一的，不同的作者可以有不同的规定。设入射光从左到右传播，通常规定：若物点  $P$  在球面顶点  $O$  之左，为实物，则  $P$  与  $O$  之间的距离称为物距  $s$ ，且  $s > 0$ ；若  $P$  在  $O$  之右，为虚物，则  $s < 0$ 。

若像点  $P'$  在  $O$  之左，为虚像，则  $P'$  与  $O$  之间的距离称为像距  $s'$ ，且  $s' < 0$ ；若  $P'$  在  $O$  之右，为实像，则  $s' > 0$ 。若球面的球心  $C$  在  $O$  之左，则曲率半径  $r < 0$ ；若  $C$  在  $O$  之右，则  $r > 0$ 。物方焦距  $f$  和像方焦距  $f'$  的正负号规定分别与  $s$  和  $s'$  相同。

在上述符号法则下，单个折射球面的物像公式为：

$$\frac{n'}{s'} + \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r},$$

其中  $n$  和  $n'$  分别为球面左、右两边媒质的折射率。球面的物方焦距  $f$  和像方焦距  $f'$  分别为：

$$f = \frac{nr}{n'-n}, f' = \frac{n'r}{n'-n}。$$

用焦距表示的物像公式为：

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1,$$

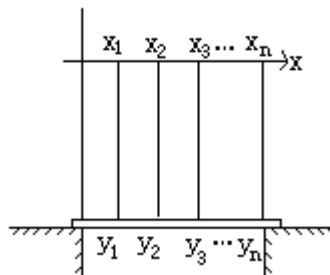
球面折射成像的横向放大率为：

$$\beta = -\frac{ns'}{n's},$$

> 0 表示像是正立的， < 0 表示像是倒立的。

**曲线拟合和关连系数** (curve fitting and correlation coefficient) 是用统计方法检验变量间是否存在线性关系，并计算出拟合直线的截距和斜率中的两个重要概念。在物理实验中，经常遇到两个物理量间存在线性关系，即使是非线性关系，也可经过变换变成线性关系。例如在函数表示式  $y=f(x)$  中， $y$  与  $x$  间不存在线性关系。将  $y$  变换成  $y'$ ， $x$  变换成  $x'$ ，变换后的两变量，却存在线性关系，即  $y'=A+Bx'$ 。现要检验  $y'$  与  $x'$  间是否存在线性关系，如果回答是肯定的，则还要提出 A 和 B 的计算公式。

例如一根金属棒两端分别搁置在两个不同温度的热源上，高温热源将会将热量通过金属棒传送到低温热源，如果已达到热平衡，那么金属棒上各点的温度都稳定下来，现要研究棒上各测量点的距离与该点的温度关系。



假定  $x_1, x_2, \dots, x_n$  表示金属棒上的  $n$  个温度测量点的位移坐标，相应的温度值为  $y_1, y_2, \dots, y_n$ 。将测量结果作  $x-y$  图，由作出的曲线可知， $x$  与  $y$  间存在着线性关系。因此可写出关系式：

$$y=A+Bx。$$

由于作图的精确度有限制，所以用计算法来确定方程中的 A 和 B 以及线性关系的检验。

令实验观察值  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  共有  $n$  个，用

$$\hat{y}_i = A + Bx_i, i = 1, 2, \dots, n$$

表示由 A 和 B 定的估计值，如果测量值没有误差，完全符合线性关系，则  $\hat{y}_i = y_i, i = 1, 2, \dots, n$ ，显然这是不可能的，为此取下面的表示式：

$$v = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

适当选取  $\hat{y}_i$  式中的 A 和 B，使  $v$  最小。因此属于多变量求极值的方法，所以对 A 和 B 分别求偏导，并令导数为零，即



$$\frac{\partial v}{\partial A} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)(-1) = 0$$

化简后，得到：

$$nA + \sum_{i=1}^n x_i \cdot B = \sum_{i=1}^n y_i.$$

$$\frac{\partial v}{\partial B} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)(-x_i) = 0,$$

化简后，得到：

$$\sum_{i=1}^n x_i \cdot A + \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot B = \sum_{i=1}^n x_i y_i.$$

解 和 方程组，可得到

$$\Delta = \begin{vmatrix} n & \sum x \\ \sum x & \sum x^2 \end{vmatrix} = n \sum x^2 - (\sum x)^2 = n l_{xx},$$

式中  $l_{xx} = \sum x^2 - (\sum x)^2 / n,$

$$A = \frac{\begin{vmatrix} \sum y & \sum x \\ \sum xy & \sum x^2 \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{\sum y \cdot \sum x^2 - \sum x \cdot \sum xy}{n \cdot l_{xx}},$$

$$B = -\frac{\begin{vmatrix} n & \sum y \\ \sum x & \sum xy \end{vmatrix}}{\Delta} = +\frac{l_{xy}}{l_{xx}},$$

式中  $l_{xy} = \sum xy - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}.$

将 A 化简，可得到：

$$A = \bar{y} - \bar{x}B.$$

因此计算步骤可综合成：

第一步计算累加值： $\sum x, \sum x^2, \sum y, \sum y^2, \sum xy, \Sigma$ ；

第二步计算 l 值： $l_{xx} = \sum x^2 - (\sum x)^2 / n,$

$$l_{xy} = \sum xy - \sum x \cdot \sum y / n,$$

$$l_{yy} = \sum y^2 - (\sum y)^2 / n;$$

第三步计算 B 值： $B = l_{xy} / l_{xx}$ ；

第四步计算 A 值： $A = \sum y / n - (\sum x / n) \times B$ ；

第五步计算辅助值： $s^2 = \frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$ ；

第六步计算 B 的标准差： $\sigma_B^2 = \frac{n \cdot s^2}{\Delta} = s^2 / l_{xx}$ ；

第七步计算 A 的标准差： $\sigma_A^2 = \frac{s^2 \sum x^2}{n l_{xx}}$ ；

第八步计算相关系数 r  $r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} \cdot l_{yy}}}.$

当  $r > r_0$  时, 说明  $x$  与  $y$  存在线性关系, 反之不能认为有线性关系。 $r_0$  称为相关系数的起码值, 可查阅下面的相关系数起码值表。

n	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_0$	1.000	0.990	0.959	0.917	0.874	0.834	0.798	0.765
n	11	12	13	14	15	16	17	18
$r_0$	0.735	0.708	0.684	0.661	0.641	0.623	0.606	0.590
n	19	20	21	22	23	24	25	26
$r_0$	0.575	0.561	0.549	0.537	0.526	0.515	0.505	0.496
n	27	28	29	30				
$r_0$	0.487	0.478	0.470	0.463				

实际计算时, 可将第八步放在第二步的后面, 因为  $r$  的计算只依赖于  $l_{xx}$ ,  $l_{yy}$  和  $l_{xy}$ ; 如果  $r < r_0$  就不必再计算  $B$ 、 $A$ 、 $B$  和  $A_0$ 。

为了便于读者练习, 举具体实验结果来分析。若金属棒搁置在 0 和 100 两个热源间, 棒长为 10.0 厘米, 位移间隔为 1.0 厘米处测量温度, 共测了 9 个点, 数据如下表所示。

$X_i$ (厘米)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
$y_i$ ( )	15.6	17.5	36.6	43.8	58.2	61.6	64.2	70.4	98.8

第一步计算累加值:

$$\sum_{i=1}^9 x_i = 45,$$

$$\epsilon x^2 = 285,$$

$$\epsilon y = 466.6,$$

$$\epsilon y^2 = 29828.65,$$

$$\epsilon xy = 2898,$$

$$\epsilon = 9.$$

第二步计算  $l$  值:

$$l_{xx} = \sum x^2 - (\sum x)^2 / n = 285 - 45^2 / 9 = 60,$$

$$l_{yy} = \sum y^2 / n = 29828.65 - 466.6^2 / 9 \\ = 5627.66,$$

$$l_{xy} = \sum xy - \sum x \cdot y / n = 2898 - 45 \times 466.6 / 9 \\ = 564.5,$$

$$r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} \cdot l_{yy}}} = \frac{564.5}{\sqrt{60 \times 5627.66}} = 0.971.$$

由于  $r_0(9) = 0.748$ , 因此  $r > r_0$ , 说明  $x$  与  $y$  存在线性关系。

第三步计算B值：

$$B = l_{xy} / l_{xx} = 564.5 / 60 = 9.4083.$$

第四步计算A值：

$$A = \sum y / n - \sum x / n \cdot B = 466.6 / 9 - 45 / 9 \cdot 9.4083 = 4.81406.$$

第五步计算辅助值：

$$s^2 = \frac{1}{9-2}(1.921 + 37.381 + \Lambda + 88097) = 4524$$

第六步计算B的标准差：

$$\sigma_B^2 = s^2 / l_{xx} = 45.24 / 60 = 0.754, \sigma_B = 0.87.$$

第七步计算A的标准差：

$$\sigma_A^2 = \frac{s^2 \sum x^2}{n l_{xx}} = \frac{45.24 \times 285}{9 \times 60} = 23.877, \sigma_A = 4.9.$$

结论：金属棒上温度的梯度为常数，即 x 与 y 存在线性关系。根据  $\sigma_A$  和  $\sigma_B$ ，确定 A 和 B 的有效数字位数：

$$A = 4.8 \pm 4.9, B = 9.41 \pm 0.87,$$

写成 x 与 y 的关系式应为：

$$y = 4.8 + 9.41x, (r = 0.971 > 0.748)$$

这就是变量间关系研究的整个计算过程。

**曲线运动 (curvilinear motion)** 轨迹是曲线的运动。例如，质点沿着圆周的运动就是曲线运动。在曲线运动中，质点速度的方向是时刻变化的，所以这种运动具有加速度，即曲线运动是变速运动。速率大小不变的曲线运动称为匀速率曲线运动，例如匀速率圆周运动。

**屈光度 (dioptry)** 光焦度的单位。若透镜的物方和像方的折射率分别为  $n$  和  $n'$ ，则光焦度定义为

$$P = \frac{n'}{f'} = \frac{n}{f},$$

其中  $f$  和  $f'$  分别为物方焦距和像方焦距。折射球面的光焦度定义为

$$P = \frac{n' - n}{r},$$

其中  $r$  为球面的曲率半径。光焦度表征透镜或球面的光学特性，对于一定的媒质和一定形状的表面来说是一个常量。置于空气中的薄透镜的光焦度等于焦距的倒数。复合透镜的光焦度是组成透镜光焦度之和。当透镜的焦距以米为单位时，光焦度的单位称为屈光度。凸透镜的光焦度为正值；凹透镜的光焦度为负值。通常眼镜的度数等于透镜屈光度的 100 倍。例如焦距为 50 厘米的凹透镜，度数为 -200 度。

**趋肤效应 (skin effect)** 亦称“集肤效应”。导体中的高频电磁波以及由它引起的高频电流趋向于分布在导体表面薄层内的现象。按照麦克斯韦电磁场理论，导线中的高频电流实质上是沿导线传播的电磁波所引起的。这种电磁波主要在导体以外的空间或介质中传播，但也要与导体表层内的自由电荷发生作用，引起高频电流。由于这种电流的存在，使一部分电磁波向空间反射，一部分则透入导体内部，形成随深度按指数衰减的电磁波，最后通过传导电流转化为焦耳热。因此电磁波很难透入导体深

处，其透入能力随电磁波的频率和导体的电导率不同而不同，常用趋肤深度表示。交流电频率越高，导体的电导率越大，趋肤效应越显著，趋肤深度也越小。与此同时，电流集中地分布在导体表面附近，等于减小了导体的有效面积，增大了电阻。故常用有效电阻（交流电阻）表示这时的电阻值，以区别于欧姆电阻（直流电阻）。在高频电路中，常用空心导线代替实心导线以节约铜材。为了提高高频交流电的传输能力，常采用多股绝缘细导线编织成束的辫线以减小趋肤效应的影响，或者在铜线表面镀银以减小导体的有效电阻。在工业上还利用趋肤效应进行金属表面的热处理。通以适当频率的交流电，就能在所要求的深度上淬火或熔炼，使处理的工件内芯较柔韧，而表面却坚硬耐磨。

**去磁**（demagnetization）亦称“退磁”。使已具磁性的磁介质失去磁性的过程。顺磁质和抗磁质的磁性在外磁场撤去后就会立即消失而自动退磁。铁磁质由于有剩磁效应，当外磁场撤去后仍保留一定的磁性。要使它去磁，必须加上适当的反向外磁场。但当这一反向外磁场撤去时，它又会有剩磁。为此，通常采用逐渐减弱的交变外磁场。此时由于涡电流和磁滞效应的作用，磁滞回线不同于缓慢磁化时的情形，是一种逐渐缩小的动态回线，最后退缩到原点而使铁磁质完全去磁。此外，还可使用加热或锤击方法，使磁畴受到破坏且取向混乱，以退去铁磁质的磁性。

**全反射**（total reflection）光从光密媒质（折射率为  $n_1$ ）射到光疏媒质（折射率为  $n_2$ ）时，折射角大于入射角。折射角为  $90^\circ$  时相应的入射角称为临界角，或称全反射角，其值由折射定律决定，为  $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$ 。当入射角等于或大于临界角时，不再有光射入第二媒质（即光疏媒质），折射光线消失，入射光被媒质界面全部反射回光密媒质。这个现象称为全反射，亦称为内反射或内全反射。全反射在光学技术中有广泛的应用，例如潜望镜和光导纤维就是利用全反射原理制成的。如果以空气为光疏媒质，光学玻璃为光密媒质，其折射率为 1.5，则临界角为  $42^\circ$ ；若以水为光密媒质，其折射率为 1.33，则临界角为  $48^\circ 36'$ 。

**全国中学生物理竞赛**（national physics competition for students of secondary school）由中国物理学会主办，各省、市、自治区自愿参加的群众性课外学科竞赛活动。目的是促进中学生提高学习物理的主动性和兴趣，改进学习方法，增强学习能力，促进学校开展多样化的物理课外活动，活跃学习空气，发现具有突出才能的青少年，以便更好地培养他们。竞赛命题从我国目前中学实际情况出发，但题目内容不拘泥于现行大纲和统编教材。竞赛分预赛、决赛二部分。预赛又分二试：第一试是笔试，由全国竞赛委员会统一命题。所有在校中学生均可报名参加。第二试主要考查实验方面能力，由各省、市、自治区竞赛委员会命题。预赛中成绩优秀者，由各省、市、自治区竞赛委员会推荐参加全国决赛。决赛分笔试、实验、口试三部分，由全国竞赛委员会命题和评奖。设一等奖（约 5 名）、二等奖（约 15 名）、三等奖（约 45 名）和四等奖（发给其它参赛者）。此外还设特别奖。自 1984 年首届竞赛在北京举行以来已连续举行八届，累计参赛人数已逾 30 万人。中国物理学会举办的全国中学生物理竞赛起了很大作用，它广泛地激发了中学生学习物理的热情和兴趣，促进了中学对培养特别优秀学生的重视，并为选拔参加国际奥林匹克竞赛的

代表队提供了非常广阔而坚实的基础。

**全息照相 (holography)** 记录物体上各点处发出的光波的振幅和相位等全部信息的一种照相技术。普通照相只记录景物反射光波的光强。光强正比于光波振幅的平方，故也可以说只能记录光波的振幅，而不能记录光波的相位信息。记录光波振幅和相位全部信息的全息照相原理早在1948年就已由伽柏提出，但直到激光问世后，才有可能实现这一技术。

全息照相分记录和再现两个步骤：图1中(a)示意记录步骤，(b)是摄得的全息图，(c)示意再现步骤。记录时将来自物体的物光波 $O$ 和参考光波 $R$ 同时照在感光底板上。如果物光波和参考光波都是相干性较好的激光，例如氦氖激光，则感光底板上记录到的是它们的一组明暗相间的干涉条纹，经冲洗后成为全息图。再现时，用同样的激光作照相光波 $R$ ，照射在全息图上，这时全息图起着光栅的作用。 $0$ 级衍射波是照明光波 $R$ 的几何光学透射波。 $+1$ 级衍射波相当于物光波 $O$ 的再现。 $-1$ 级衍射波是物光波的共轭波。实际上的物光波是从物体各点发出的球面波，即使参考光波仍是正入射的平行光，在记录底片上形成的干涉条纹也不是简单的光栅条纹。但是在照明激光的照射下，仍旧有 $+1$ 级和 $-1$ 级衍射像。前者是发散光波，形成虚像；后者是会聚光波，形成实像。由于激光干涉条纹中包含了物光波的振幅和相位，因此再现像将会与物体一模一样，是立体的像。观察者甚至只要改变观察方向，还可以从照片上看清物体背后的细节，如果全息图破碎了，其中任何一块碎片仍可以在照明激光照射下呈现出物体的实像和虚像，只是分辨率会降低。因为全息图上每一点都记录了被摄物体各部分的信息，全息图的缺损不会使再现像失真。

### 全息照相图

全息照相有广阔的应用前景，如科技上的应用，有全息显微，全息干涉，全息照相存储，红外及超声全息等等。近来已有白光全息问世，就是可以用白光来再现全息像。

**群速度 (group velocity)** 一组频率差别不大的简谐波，在相当长时间的传播过程中总的波形仍将维持一个整体，并以一定快慢运动的波包的速度。单一频率的波其传播速度就是它的相速度，但实际存在的波不是单色的，若介质对这个波又是色散的，那么各单色波以不同的相速度传播，波包形状随时间而变化，可选定波包上的某一特殊点(如振幅极大点)在空间的传播速度代表整个波包的传播速度。由于波包形状的改变，所选定的这一特殊点在波包中也将不断改变其位置，因而该点的速度与任何一个作为组成部分的单色平面波的相速度将有所不同。群速度是波包的能量传播的速率，也是波包所表达信号的传播速度。

RS—232C 传输的方式 (transmission form of RS—232C) RS 表示“推荐标准”(RECOMMEN-DED STANDARD)，是指美国电子工业协会(EIA)正式公布的标准，该标准规定了异步串行通讯接口的电气连接方式，这些方式的数据传输格式是一样的，下图表示了数据传输的格式，对所传输的数据规定，开始是一位起始位，以发送一个逻辑“0”表示，接着表示这个数据的数据位，数据位可以是5位、6位、7位或8位，再加一位奇偶校验位，然后是1个、 $1\frac{1}{2}$ 个或2个停止位，停止位以逻辑“1”表示，传输中，各位的持续时间是相同的。

#### 数据传送格式

串行通讯每秒传送的位数即波特率可以是19200、9600、4800、2400、1200、600、300、150、110、75、50等。PC机没有19200的传送波特率。传送时先发送数据的最低位 $D_0$ ，然后是次低位 $D_1$ ，…，最后才是最高位，图中传送的波形是10100010，如果传送数据是ASC码，那么 $D_7$ 就是奇偶校验位。很明显，当 $D_7=0$ 时， $D_0—D_6$ ，有3个“1”，所以属于奇校验。换言之， $D_0—D_7$ 中只允许奇数个“1”，如果 $D_0—D_6$ 有偶数个“1”，则 $D_7=1$ ，保证 $D_0—D_7$ 中始终有奇数个“1”。

逻辑“1”表示电平在-3V~-15V之间，逻辑“0”表示电平在+3V~+15V之间。高于+15V或低于-15V认为无意义，介于-3V和+3V间的电压也无意义。上述电平称为EIA电平，这样高的电压主要是为了防止干扰，一般在30米的距离内可以安全地进行信号传输。

RS—232C 传输线接口 (transmission interface of RS—232C) 在RS—232C的连接系统结构中，须有25端引脚的连接器连接数据终端设备和数据通讯设备。其中21个信号线，主要引脚如下：

序号	符号	功能	输入/输出
1	RGND	保护接地	
2	TD	发送数据(也用TXD)	输出
3	RD	接收数据(也用RXD)	输入
4	RTS	请求发送	输出
5	CTS	清除发送	输入
6	DSR	数据装置准备好	输出
7	SGND	信号接地	
8	CD	接收线信号检测	输入
20	DTR	数据终端准备好	输入
22	RI	振铃指示器	输入

说明：TD和RD是交叉连接的，即一个计算机或终端数据输出是另一个终端或计算机的输入，或者反过来；RTS和CTS，在近程通讯不要调制器的情况下两端相连，表示“请求发送”返回作为清除“发送信号”，使得发

送请求总允许的，CD 和 RI 与电话连接有关，在直接通讯的情况下并不需要。在实际应用场合，最简单的办法是采用三条线，即接收和发送数据线及一条信号地线，如图 1 和图 2 所示。

图 1 直接相接的 RS232C

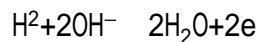
图 2 一般相接的 RS232C

**燃料电池 (fuel cell)** 将燃料的化学能直接转换为电能的一种装置。与蓄电池不同，它不是通过充电，而是通过从外部分别向两个电极区域连续地补充燃料和氧化剂，以达到重复使用的目的。其结构如下图所示。

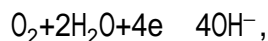
#### 燃料电池原理图

它由燃料（如氢、甲烷等）、氧化剂（如氧、空气等）、电极和电解液等四部分构成。其电极具有催化性能，且是多孔结构，以保证较大的活性面积。工作时将燃料通入负极，氧化剂通入正极，它们各自在电极的催化下进行电化学反应以获得电能。

在氢氧燃料电池中，电解液是氢氧化钾水溶液。在电池的负极进行氢的氧化反应：



在电池的正极进行氧的还原反应：



总的化学反应是  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ 。这就是氢氧的燃烧反应，所以叫做氢氧燃料电池。

燃料电池具有能量利用率高、单位重量输出电能高、设备轻巧、没有噪音、很少污染、能连续运行等优点。但由于燃料电池系统较复杂，成本高，目前仅限于一些特殊的用途，如载人飞船、无人气象站、军事通信设备等。

**染料激光器 (dye laser)** 用有机染料作为工作物质的激光器。已在若丹明等数千种染料中实现激光运转。一般采用调 Q 激光作激励源，使染料分子的有关能级间形成粒子数反转，实现激光振荡。优点是输出激光的波长可调。在谐振腔中如果安置棱镜、光栅或标准具等分光元件，还可使染料激光器输出的激光波长在某一范围内作连续改变。缺点是染料容易分解，输出激光的线宽大，相干性差。

**饶毓泰 (1891 ~ 1968)** 中国物理学家。江西省临川县人。1913 年赴美留学，1922 年获普林斯顿大学哲学博士学位。同年回国，应聘到南开大学创建物理系，担任系主任。1933 年起任北京大学物理系系主任，后又任理学院院长。抗日战争时期任西南联合大学物理系系主任。1944 ~ 1946 年去美作研究工作，回国后继续担任北京大学理学院院长和物理系系主任，1952 年起只任物理系教授。1955 年受聘为中国科学院数学物理学化学部学部委员。

饶毓泰的重要贡献是在中国开拓实验物理学方面的工作。1922 年，他的博士论文是研究低压电弧的电子发射率的实验成果，所设计的电弧光源的电压，比通常的低，这是当时气体导电研究的一项新成就。30 年代初期，他从事碱金属原子的斯塔克效应的研究，这一工作丰富了量子力学领域的

实验数据。40年代，他在美国和他的合作者进行分子光谱的研究，他的实验测定为研究同位素气体分子的振动-转动光谱开辟了道路。

**热岛效应 (thermal island effect)** 人类活动影响城市热环境的综合效应。使得城市与周围农村之间形成温度梯度，在区域上空形成“热岛”。在大城市，由于人口与工业的集中，大量烟尘和废气排放到大气，这不仅使大气混浊度增加，而且还促成烟雾和云的形成。烟雾和云长时间滞留在城市上空，城市发出的热能就不能逸散到上层大气，使地表及低层大气温度增高。再则，现代城市特别是工业城市的大部分地面已失去大自然的本色，建筑物密集，高层建筑迅速发展，人造设施不断增加，这些都影响了大气与地表之间的热交换。此外，大城市中所消耗的燃料，其中很大部分成为城市的环境热源。

**热的唯动说 (mechanical theory of heat)** 一种关于热的本质的理论。该理论认为热是物质的一种运动形式，是分子无规则运动的表现。俄国物理学家罗蒙诺索夫在《论热与冷的原因》一文中指出，热是分子运动的表现，肯定了运动守恒原理在分子运动中的正确性，建立了现代分子运动论的基本概念。1798年朗福德实验和1799年载维实验都证明：热是物质的一种运动，从而有力地支持了热的唯动说。随着能量守恒和转化定律的发现和热功当量的测定，进一步确立了热的唯动说。现代科学证明，热是物质运动的一种表现，具体地说是构成物质系统的大量微观粒子无规则混乱运动的宏观表现。热运动不仅表征分子的无规则运动，而且也表征原子、离子、电子等微观粒子的无规则运动。就物质系统的单个粒子而言，其运动是无规则的，具有极大的偶然性；但物质系统总体所表现的宏观性质是整个粒子系的集体行为，存在着确定的规律性。

**热电子发射 (thermoelectron emission)** 固体中电子受热而克服表面处势垒跑到固体外真空中去的现象。为使电子从固体表面逸出，必须使电子运动的动能数值上等于该固体的逸出功。当固体受热而温度升高（例如一般当固体的温度达到1000以上）时，固体中电子热运动能超过逸出功的电子数目将急剧增多，于是大量电子由固体表面逸出。在无外电场时，这些发射出来的热电子将在靠近固体表面的真空中积累，成为空间电荷，它将阻止固体中热电子继续向外发射。只有在固体表面近处加一个带正电的阳极来收集发射出的热电子时，才能使作为阴极的固体表面热电子发射不断继续而形成电流。

热电子电流的大小与温度有关，温度愈高，发射的热电子愈多，因而热电子电流愈大；也与固体材料的逸出功有关，逸出功愈小，热电子电流愈大。其定量关系为

$$j = AT^2 e^{-W/kT},$$

式中  $j$  为热电子电流密度， $W$  为固体的逸出功， $T$  为固体的绝对温度， $k$  为玻耳兹曼常数， $A$  为里查孙常数。

热电子发射是现今电子管、示波管、显像管等元器件获得电子流所采用的最普遍的一种方法。

**热功当量实验 (experiment on mechanical equivalent of heat)** 测量功和热量传递两种不同的方式在引起系统宏观状态发生变化时互相转化的等当数值关系的实验，它证明了包括内能在内的能量守恒定律。



在做功过程中，外界与系统之间产生能量的交换。在热学中，不仅有机械功，还有电场功，磁场功等。每一种单一的做功过程（例如机械功）既可以引起系统机械运动状态的改变，也可以引起系统热运动状态的改变。

在热量传递过程中，外界与系统之间发生能量的交换。热量并不是某种看不见的没有重量的所谓“热质”的量，而是由系统内大量粒子无规则热运动在宏观上表现出来的一种能量形式。热量传递的结果使外界和系统的热运动状态或其他运动状态发生改变。

历史上最早把热和功联系在一起的人是卡诺，但是他起初认为热量是某种物质的量。后来他放弃了原来的观点，并且定性地得到了大体精确的热功当量。不过他的这些光辉思想直到他逝世后的 1878 年才公布于世。

1798 年，英国人本杰明·汤姆孙（后来因重组德国军队而获伦福德伯爵爵位）仔细观察了用钻头加工炮筒时的摩擦生热现象。他发现，热可以在摩擦过程中产生出来，而且用钝钻头加工炮筒得到的热量比用锐利钻头加工时得到的热量更多，但切削出的金属碎屑却更少。他还发现，大块金属块的热容量与相等重量的金属碎屑的热容量完全一样，热物体重量与完全冷却时的重量也完全一样。这一切使他摒弃了“热质说”，并得出结论：热只能来自钻头克服摩擦力而做的机械功。他还通过实验数据证明，摩擦产生的热近似地与钻孔机所做的机械功成正比。

继汤姆孙以后，1842 年德国医生梅耶设计了一个搅拌纸浆的实验，搅拌机械的动力来自一匹绕着圈子走动的马。只要测出纸浆温度的升高，就可以把纸浆得到的热量和马所做机械功进行比较。然而梅耶因医务繁忙而没有进行精确测量。

焦耳认为应以大量确凿的科学实验来建立热现象的正确理论。从 1840 年到 1879 年，焦耳进行了各种实验，精确地测定了功和热量互相转化的等当数值关系。图 a 和图 b 是焦耳测定热功当量的两个主要实验示意图。在图 a 所示的实验中，重物下降带动叶片转动，叶片搅拌水使水温升高。盛水的容器与外界没有热量交换，因此水温的升高（即水的状态的改变）完全是重物下降做功的结果。1843 年焦耳发表了他的研究成果：在曼彻斯特（北纬 53.27 度）使 1 磅水（0.4536 千克）升高华氏 1 度需要做功 772 英尺磅。这相当于 1 卡=4.157 焦耳。目前热功当量的国际公认精确值是 1 卡=4.1868 焦耳。在图 b 所示的实验中，电流通过电阻器 R 使水温升高。盛水的容器与外界没有热量交换，因此水温的升高完全是电源做功的结果。实验发现，用以上两种不同的绝热过程使水升高相同的温度，所需的机械功和电功在实验误差范围内是相等的。焦耳还进行了其它实验，例如使叶片搅拌水银使之升温，外力做功使空气压缩并升高温度等等。所有实验结果在误差范围内是一致的。焦耳的热功当量实验完全否定了“热质说”，证实了热量是传递的能量，做功和热量传递是使系统宏观状态发生变化的两种不同方式，它们以热功当量关系互相转化，这种转化正是普遍的能量守恒定律在热运动中的一种表现。

#### 焦耳测定热功当量的实验示意图

现在，国际单位制规定热量的单位为“焦耳”，“卡”暂时仍作为与焦耳并用的单位，一旦卡不再作为热量单位被使用，热功当量这个词也将

被弃之不用。但是热功当量实验在热学发展过程中的重要历史地位将是永存的。

**热机 (heat engine)** 把从高温热源吸收的一部分热量转换为机械能并对外做功的机器。在热机运转过程中，从高温热源输入的另一部分热量必然会通过低

图 1 热机运转示意图

温热源 (冷却装置) 向外界放出 (图 1)。

**热机的基本原理** 在热机中实现的能量转换过程是由热机的工作物质 (工质) 经过周而复始的循环过程来完成的。图 2 所示的闭合实线 abcd 就是在  $p \sim V$  图上热机的工质完成的某一准静态循环过程。如果工作物质 (例如某种燃料) 从状态 a 出发, 经过状态 b、c 和 d 仍回到状态 a (如图所示), 就称工质完成了一个顺时针的正循环, 反之称为逆循环。在正循环过程中, 从 a b c, 工作物质对外界做正功, 数值等于 abcefa 包围的面积; 而从 c d a, 外界对工作物质做正功, 即系统对外界做负功, 数值等于 cefadc 包围的面积, 在完成一个循环中, 系统对外界所做的净功为正, 数值上等于 abcda 包围的面积。从热力学第一定律可知, 由于工作物质恢复原来状态, 内能不变, 因此系统从外界吸收的热量必然大于放出的热量, 其差值就是系统对外界做的功。

图 2 准静态循环过程

在逆循环过程中, 工作物质依靠外界输入的功从低温热源吸取热量, 并将外界输入的功和这部分热量通过高温热源向外界放出, 这就是致冷机的工作过程。

衡量热机效能的一个重要标志就是热机的效率。在热机工作过程中转变为有用功的那部分热量与工质从高温热源吸收的热量之比称为热机的效率, 也称热效率。通常用  $\eta$  表示, 定义为  $\eta = \frac{A}{Q_1}$ , A 为有用功,  $Q_1$  是工质从高温热源吸收的热量。在  $Q_1$  相同情况下, 热机输出的有用功越多, 热机的效率越高。若热机向低温热源放出的热量为  $Q_2$ , 于是有用功  $A=Q_1-Q_2$ , 因而热机效率又可表示为  $\eta = \frac{Q_1-Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ , 显然,  $\eta$  始终小于 1。

在致冷机工作过程中, 从低温热源抽取的热量与外界输入的功之比称为致冷系数, 用  $c$  表示,  $c = \frac{Q_2}{A}$ , A 为输入功,  $Q_2$  为工质从低温热源吸取的热量。在输入功相同情况下, 抽取的热量越多, 致冷的效果越好。

**热机的分类** 热机的种类很多, 大致可分为内燃机和外燃机两种。

**内燃机。** 燃料在气缸内燃烧, 产生的气体作为工质将能量转变为机械功。使用最广泛的内燃机是汽油机和柴油机。

(1) 汽油机: 在汽油机中, 工作物质经历的循环过程包括两个等容过程和两个绝热过程, 这种循环称为奥托循环。图 3 就是在  $p \sim V$  图上的奥托循环。图中从 0 点开始, 相当于气缸的活塞处于冲程的顶端。从 0 a 过程中, 空气和汽油蒸气的混合物被吸入到气缸中, 这就是进气冲程。进气冲程结

束后，进气阀关闭，活塞上升，对混合气体进行绝热压缩，这就是图中 a b 的过程，这称为压缩冲程。此冲程到达顶端时，火花塞产生电火花，点燃混合气体，使其迅速燃烧。在等容情况下，气体的压力和温度同时上升，这就是图中 b c 的吸热冲程， $Q_H$  就是在该加热过程中吸取的热量。以后点燃的气体在绝热情况下推动活塞向下运动，而活塞则通过曲柄机构带动飞轮对外做功，这就是图中 c d 做功冲程。做功冲程结束后，排气阀打开，气缸内压

图 3 奥托循环的  $p \sim V$  图

图 4 狄塞尔循环的  $p \sim V$  图

力迅速下降到大气压力，这就是图示的 d a 的排气冲程， $Q_C$  就是在排气冲程中放出的热量。汽油机经历这四个冲程而完成一个循环，因而又称为四冲程内燃机。A 就是在奥托循环中，工作物质对外输出的有用功， $A=Q_H-Q_C$ 。

$V_1$  和  $V_2$  分别表示在气缸内混合气体的最大体积和最小体积，而  $\frac{V_1}{V_2}$  称为压缩比。普通汽油机的压缩比约为 4~10，采用特殊燃料时，压缩比会更大些。利用压缩比，可将汽油机效率表示为  $\eta = 1 - \frac{1}{(\frac{V_1}{V_2})^{\gamma-1}}$ ，这里  $\gamma$  为定压比热容  $c_p$ ，与定容比热容  $c_v$  之比， $\gamma = c_p/c_v$ ，若取  $V_1/V_2=10$ ， $\gamma=1.4$ ，可得效率为 0.6。一般汽油机热效率约为 0.4 左右。

(2) 柴油机：在柴油机中，工作物质经历的循环过程由一个等压过程、一个等容过程和两个绝热过程组成。这种循环称为狄塞尔循环。图 4 就是  $p \sim V$  图上的狄塞尔循环。图中从 0 点开始，空气被吸入气缸。0 a 为进气冲程。a b 为绝热压缩冲程。在该过程中空气温度升高，一旦达到柴油燃点时，由喷油嘴喷出雾状柴油，在气缸内自行燃烧。b c 为在等压下燃烧冲程，在该过程中吸取的热量为  $Q_H$ 。c d 为做功冲程，最后是等容排气过程，放出热量  $Q_C$ ，完成一个循环。 $A=Q_H-Q_C$  为循环过程中输出的有用功。

$\frac{V_1}{V_2}$  称为压缩比， $\frac{V_3}{V_4}$  称为膨胀比。利用这两个比值可将柴油机效率表示为

$$\eta = 1 - \frac{\left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\gamma} - 1}{\gamma \left(\frac{V_3}{V_2}\right) \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}}$$

这里  $\gamma = c_p/c_v$ 。若取  $\frac{V_1}{V_2}=15$ ， $\frac{V_3}{V_4}=3$ ， $\gamma=1.4$ ，可得效率为 0.56。一般

柴油机热效率约为 0.4 左右。

外燃机。燃料在气缸外燃烧，将工作物质加热后再引入气缸，推动活塞或叶片对外输出机械功。使用广泛的外燃机是蒸汽机和汽轮机。

(1) 蒸汽机：在蒸汽机中，工作物质经历如下一系列过程：先在锅炉内使水加热至蒸汽，再使蒸汽过热后在定压下引入气缸，关闭进气阀在绝热

条件下蒸汽膨胀推动活塞对外做功。经绝热冷却后再使蒸汽进入冷凝器凝结为水，重新将水压入锅炉，进行又一次循环。图 5 就是  $p \sim V$  图上蒸汽经历的循环过程，称为兰金循环。其中  $b \rightarrow e$  过程是水加热并转变为水蒸汽的过程，吸收热量  $Q_H$ ， $f \rightarrow a$  是冷却凝结过程，放出热量  $Q_C$ 。蒸汽机的热效率约为 10~15%左右，但由于构造简单工作可靠，在目前的铁路、水路运输部门中，蒸汽机仍作为一种动力被使用着。

(2) 汽轮机：在汽轮机中，由锅炉产生的过热蒸汽经过固定喷嘴喷射到叶轮的叶片上，驱动叶轮转动，对外做功。汽轮机是一种广泛应用于冶金工业、化学工业的大型动力设备。几乎所有烧油、烧煤和使用核反应堆

图 5 兰金循环的  $p \sim V$  图

的大型发电厂都将汽轮机与发电机同轴连接，以提高发电效率。

热机效率 (efficiency of heat engine) 参见热机。

热寂说 (theory of heat death) 一种将热力学第二定律推广到整个宇宙时，认为宇宙最终将处于热平衡的死寂状态的学说，由开尔文和克劳修斯先后提出。1862 年，开尔文在《论太阳热的年纪》一文中写道：“热力学第二定律包括了自然界中某种不可逆作用原理。它指出机械能虽然是不可毁灭的，它却产生了热量的逐渐增加和扩散、运动停止和整个宇宙的势能耗尽。如果宇宙是有限的和服从现有的定律，不可避免的结果是宇宙的静止和死亡状态。但是，对宇宙中的物质广延设想一个界限是不可能的，所以科学宁愿指出一个含有势能转变成可感知的运动，并因之转变成热的遍及无限空间的无限进程，而不是转变成像一座运转衰减下来，并永远停止的时钟那样的唯一限定的机构。”从开尔文这段话的本意来看，他提出的热寂说是有条件的，即设想宇宙是一个有限的孤立系统，和假设热力学第二定律用于这个宇宙是正确的。1867 年，克劳修斯在《关于机械热理论的第二定律》一文中写道：“在一切自然现象中，熵的总值永远只能增加而不能减少。于是到处不断进行的变化过程，可用下面的定律简短地表述：宇宙的熵趋于极大。”“宇宙越是接近于这个熵是极大的极限状态，那就任何进一步的变化都不会发生了。这时宇宙就会进入一个死寂的永恒状态。”从克劳修斯这段话来看，显然忽视了所提出的热寂说的前提条件，因而引起了至今学术界的争论，并被宗教神学和各种唯心主义所利用。

热力学 (thermodynamics) 物理学的一个重要分支学科。它和统计物理学一起构成物质热运动的理论。热力学是以直接概括宏观现象所得出的某些最普遍规律为基础来研究热运动的，因而是热运动的宏观理论；统计物理则是从组成物质的分子和原子等微粒的运动中所存在的统计规律性来阐明热现象的，因而是热运动的微观理论。

发展简史 热力学诞生于 19 世纪上半叶。在此以前，蒸汽机的出现及其在工农业生产上的广泛应用不但标志着人类文明的进步，而且极大地推动了人们对于水和蒸汽以及其他各种物质热运动性质的研究。其中最出色的工作是法国物理学家卡诺关于热机效率的研究。他论证了可逆循环过程和不可逆循环过程的效率，提出了最大效率的概念，建立了著名的卡诺定理。他是热力学的创始人之一。

19 世纪中叶，德国医生迈尔和英国物理学家焦耳等人建立了热力学第

一定律，从热现象上丰富了人们对能量守恒和转化定律的认识，打破了企图制造出第一类永动机的各种设想，指导人们去研究自然界中能量转化的具体条件，更有效地利用自然界的能源。继热力学第一定律之后，德国物理学家克劳修斯和英国物理学家开尔文等人又建立了热力学第二定律，它揭示了一切与热运动有关的宏观过程自发进行的方向，是独立于热力学第一定律以外的又一普遍的实验定律。根据热力学第二定律，第二类永动机也是不可能制造出来的。

20世纪以来，热力学理论和统计物理学理论相结合，深化了人们对热运动的认识。1912年，德国物理化学家能斯特创立了热力学第三定律，即绝对零度不能达到原理。在统计物理学上，热力学第三定律反映了微观运动的量子化。20世纪40年代前后，为了研究与物质扩散和液体流动等有关的不可逆过程的热现象规律，人们创立了不可逆过程的热力学理论。60年代以后，不可逆热力学又从起初只涉及近平衡区（又称线性区）的非平衡现象扩展到远离平衡区（又称非线性区）的非平衡现象，与此同时，非平衡态统计物理学也有了很大的发展。目前，非平衡态热力学和统计物理学已经成为一个新兴的领域，它对于人们认识和掌握实际存在的物理、化学以及生命演化过程的规律有着重要的意义。

热力学的理论体系热力学从大量实验事实出发，概括总结成热力学的基本定律——热力学第一、第二、第三定律。有时还把几个物体互为热平衡时具有相同的温度这样的经验事实称为热力学第零定律。在这些基本定律中分别引入了三个基本的状态函数——温度、内能和熵。从这些基本定律和状态函数出发，经过科学的逻辑推理，就可以得到热力学的全部内容。热力学作为一个完整的理论体系，具有高度的普遍性和可靠性。但它不涉及物质分子原子结构的细节，因而不能反映出不同物质的具体特性。此外，它还忽略了实际宏观系统在测量中存在的物理量的涨落行为，而这些涨落行为在相变和临界现象中会显示重要的作用。热力学理论的这些不足之处由统计物理学加以补充，因此热力学和统计物理学是热学理论的两个相辅相成的组成部分。

**热力学第二定律** (second law of thermodynamics) 热力学的基本定律之一。它对自然界中各种自发发生的不可逆过程的方向给出了判据。热力学第二定律可以有多种表述方式，它们都是等价的。其中最常见的是以下两种表述。

克劳修斯表述：不可能把热量从低温物体传到高温物体而不产生任何影响。

开尔文表述：不可能从单一热源吸取热量，使之完全转变为有用功而不产生任何影响。

克劳修斯的表述指出了热量自发地从高温热源传到低温热源的过程是不可逆的；而开尔文表述则指出把功转变为热量的过程是不可逆的。可以证明，这两种表述是等价的，而且如果其中一个表述不成立，则必然导致另一种表述也不成立。

热力学第二定律是独立于热力学第一定律之外的又一基本定律，每一个与热现象有关的宏观过程必须同时满足热力学第一定律和热力学第二定律才能发生。

热力学第二定律的重要意义在于它揭示了自然界中不可逆过程进行的

方向和条件，反映了各种不可逆过程的共性。这种共性的存在使人们有可能找到一个态函数，并根据这个函数的数值变化来判断某种过程是否允许自发地发生。这个态函数就是该系统的熵。利用熵可以将热力学第二定律表述为更一般的形式：在任何自发发生的实际过程中，一个绝热系统的熵决不会减少，对可逆绝热过程，熵保持不变，对不可逆绝热过程，熵总是增加。这个表述又称熵增加原理。

热力学第二定律还表明，如果只有一个热源，利用它驱动热机往复不断地对外做功是不可能的。例如海水中蕴藏着巨大的热能，但如果只利用这个热源，人们就无法造出一台热机能从这个单一热源吸取热量而源源不断地输出有用功。历史上把这类从单一热源吸取热量并全部转变为功的机器称为第二类永动机，因而热力学第二定律有时可表述为，第二类永动机是不可能造成的。

热力学第二定律不但适用于由实物组成的各类系统（如气体、液体和固体），也适合于场（如电磁辐射场）。但是，它对少量原子和分子组成的系统不适用，也不能将它无限外推到整个宇宙。

热力学第零定律（zeroth law of thermodynamics）又称热平衡定律。它反映了互为热平衡的物体具有的共同特征。该经验定律为导出温度这个重要的物理量以及利用温度计测量温度提供了理论依据。

实验表明，两个处于不同热平衡状态的非孤立系统互相热接触后，会达到一个新的共同的热平衡状态。类似地，对于三个处于热平衡状态的系统 A、B 和 C，如果首先使 A 和 B 达到共同的热平衡，再使 B 和 C 达到热平衡，而且在后一种热平衡情况下，B 的状态不变，那么实验事实也证明，最后当 A 和 C 再接触后，A 和 C 的平衡状态并不发生改变，处于同一共同的热平衡态。这些实验事实可以简明地概括为：与第三个系统处于热平衡的两个系统，彼此也必定处于热平衡。这个表述称为热力学第零定律。这个定律表明，每个处于热平衡状态的系统一定存在一个物理量可以用于表征它的宏观状态，当两个系统同为热平衡时，这个物理量取相同的数值，这个物理量就是温度。

热力学第三定律（third law of thermodynamics）热力学的基本定律之一。它给出了温度趋于绝对零度时系统的热力学行为。

1906 年德国物理化学家能斯特在研究低温下的化学反应时发现，一个化学上均匀系统的熵在等温过程中的变化随绝对温度降低而减少，即温度越低，等温过程中的变化越小，温度趋于零度，熵的变化也趋于零，这个结论称为能斯特热定理。后来，能斯特又得出一个推论：不可能通过有限手续使一个物体冷却到绝对零度，这个结论又称为绝对零度不能达到原理。后来的研究证实，能斯特定理只适用于晶体，而绝对零度不能达到原理具有普遍意义。因此热力学第三定律就以绝对零度不能达到原理作为它的标准表述，而把能斯特定理作为这个原理的推论。

热力学第三定律的表述与热力学第一定律、第二定律的表述在形式上很相似，都指出了有些事情是不能实现的。但是热力学第一、第二定律明确表明，第一类和第二类永动机是无法制造出来的，第三定律虽然指出了绝对零度不能达到，但并不排斥人们不断努力，尽可能地去获得越来越接近绝对零度的低温。

热力学第三定律不可能通过实验进行证明，它的正确性是由它的一切

推论与实际观测相符合而得到证明的。

在热力学第三定律建立以前，对熵函数的计算只能确定到具有一个任意附加常量的准确度。1911年普朗克提出可选择绝对零度时的熵常量为零，于是在任何温度下熵的数值中不再包含任意常数，这称为绝对熵。有了绝对熵，由热力学第三定律可以得到在趋于绝对零度时，热力学系统的定容比热和定压比热也趋于零，热膨胀系数也趋于零，因此只要从实验测得热容量，不需要物态方程就可以完全确定熵函数。

**热力学第一定律 (first law of thermodynamics)** 热力学的基本定律之一，是能量守恒和转化的普遍规律在热力学上的表现。热力学第一定律指出了热量是两个物体之间交换的能量或传递能量的一种形式。该定律表明，外界传递给系统的热量等于系统内能的增量和系统对外做功的总和。如果外界传递的热量为  $Q$ ，以  $U$  表示系统从某一状态变到另一状态时内能的改变，以  $A$  表示在该过程中系统对外所做的功，则热力学第一定律可以表示为

$$Q = \Delta U + A。$$

在这个公式中，当系统从外界吸取热量时， $Q$  为正；系统放出热量时， $Q$  为负。若系统对外界做功， $A$  为正；反之，外界对系统做功， $A$  为负。严格说来，热力学第一定律仅涉及到内能和其他形式能量的相互转化关系。有时也将热力学第一定律理解为普遍的能量转化和守恒定律，作这样理解时，式中的  $U$  表示系统所包含的一切能量（热能、电磁能、化学能等）的改变，而  $A$  则表示广义的功（机械功、电磁功、化学功等）。

热力学第一定律表明，系统内能的改变既可以通过做功来实现，也可以通过热传递来达到。传热和做功一样，都是能量交换的一种形式。热量和功都是与过程有关的量，热量不是什么“热质”的量。焦耳的热功当量实验证实热量和功的当量关系是  $1 \text{ 卡} = 4.18 \text{ 焦}$ 。此外，热力学第一定律还表明，如果一个系统不与外界交换热量， $Q=0$ ，那么该系统不可能循环往复地对外做功。因为对于循环过程， $\Delta U=0$ ，因而必然导致  $A=0$ 。历史上人们把这种不消耗外界任何形式的能量而能不断输出功的机器称为第一类永动机，因而热力学第一定律有时也表述为，第一类永动机是不可能造成的。

**热力学平衡态 (thermodynamic equilibrium state)** 热力学系统在完全孤立即不受外界影响的条件下所达到的其宏观性质不再随时间改变的状态。

一个孤立系统处于热力学平衡态时，描述系统状态的宏观参量都不随时间改变，在该系统内部可以允许存在某种不均匀性（例如气—液两相平衡共存），但不允许出现某些“流”，如粒子流、热流等。

如果系统处于不变的外界条件下，经过一定的时间以后，系统也会达到一个宏观上不随时间改变的状态。例如，取一金属杆，两端分别与两个保持不同温度的热源相接触，相隔一段时间以后，杆的宏观状态不随时间改变，但是杆上各处的温度并不相同，杆从高温热源吸取热量，并沿金属杆传递到低温热源。与此同时，金属杆还通过侧面与周围环境交换热量。按照上述定义，金属杆此时并不处于平衡态，而属于一种稳恒态。

热力学平衡态也不同于单纯静止的力学平衡态，这是因为虽然平衡态的宏观性质不随时间改变，但从微观上看，组成热力学系统的大量分子原子仍在做不停的无规则运动，只是这种运动的平均效果不随时间变化。因

而热力学平衡态是一种动态平衡，又称热动平衡。

热力学平衡态是对实际状态的一种近似和理想化。与非平衡态相比，对它的描述要简单得多，通常只需要用一组最少的独立的状态参量就可以完全确定平衡态的性质。

热力学温标 (thermodynamic scale) 参见温标。

热力学系统 (thermodynamical system) 热力学的研究对象，由大量微观粒子 (分子或其它粒子) 组成的宏观客体，简称系统。

热力学系统在时间与空间上具有宏观的尺度，包含有极大数目的力学自由度，它总是宏观的、有限的。与热力学系统存在相互作用的周围环境，称为系统的外界或简称外界。在热力学中，系统的选取常常是从一个存在相互作用的大物体中根据具体研究对象而划分出来的某一部分，其余部分就称为外界。根据系统与外界相互作用的情况可以对系统进行分类：与外界没有相互作用的系统称为孤立系；与外界没有物质交换但允许能量交换的系统称为封闭系；与外界既有物质交换又有能量交换的系统称为开放系。热力学系统也可以按其性质是否均匀进行分类：各部分性质完全一样，处处均匀的系统称为单相系；如果整个系统不是均匀的，但可以划分为若干个均匀的部分，这类系统称为复相系。热力学系统还可以根据所构成的化学组分进行分类：只由一种化学组元构成的系统称为单元系，由两种或两种以上化学组元组成的系统称为多元系。一个热力学系统可以由不同的分类而归属于某一类系统，例如由绝热壁包围处于封闭容器中的一个气液平衡共存系统，是一个孤立系，也是一个单元两相系。而作为两个可分离的均匀部分——液相和气相，则都是开放系。

热质说 (caloric theory of heat) 又称“热素说”。一种关于热的本质的理论。该理论认为热是一种看不见的、没有重量的物质，叫做热质；物体的冷热是由于所含热质的多少决定的；热质既不能产生也不能消灭，只能从较热的物体向较冷的物体传递；在传热过程中热质总量保持不变。到了 18 世纪，经过英国物理学家布莱克的努力，使热质说形成比较系统的理论。这个理论在历史上曾经起过一定的作用：解释热学的简单实验；说明混合量热法规则；瓦特根据该理论与潜热的理论改进了蒸汽机；卡诺在该理论的基础上研究了热力学。然而到了 18 世纪末这个理论遇到不少难题：热质是否有重量？如何解释某些物体的热缩冷胀现象？为什么摩擦能源源不断产生热？为什么物体通过撞击也会产生热？1798 年朗福德的钻炮膛生热的实验，证明了所产生的热量与所做的功成正比，从而沉重打击了热质说，但未能彻底推翻它。直至蒸汽机的广泛使用，特别是在能量守恒和转化定律被公认是自然界的普遍规律之后，热质说才最终被彻底否定。

人造卫星运动 (motion of the artificial satellite) 人造天体围绕地球或太阳系中的行星或卫星的运动。主要指人造天体围绕地球的运动。人造卫星由于其质量远小于地球或行星质量，因此可忽略太阳、月球和其他星球的影响，其运动可近似地看成是质点在以地球的质心为力心、场力为万有引力的势场中的运动。根据势场理论，人造卫星在通过行星质心  $O$  所构成的平面中运动。在一般情况下，运动轨道是以地球的质心为焦点的椭圆，在特殊情况下是以地球质心为圆心的圆。在以地球质心为极点和轨道所在固定平面为极坐标平面时，以  $(r, \varphi)$  为极坐标的



轨道方程是

$$\gamma = \frac{p}{1 + e \cos(\varphi - \beta)}$$

对地球来说， $p$ 、 $e$  和  $\varphi$  由入轨时的运动初始条件决定。设  $g$  是重力加速度， $(r_0, \varphi_0)$  是卫星入轨时的位置，以  $v_0$  表示入轨时的速度矢量和此时卫星关于  $O$  点的位矢之间的夹角，以  $R$  表示地球半径，则  $p$ 、 $e$  和  $\beta$  的值分别是

$$p = \frac{r_0^2 v_0^2 \sin^2 \theta_0}{gR^2},$$

$$e = \left[ 1 + \frac{2\left(\frac{v_0^2}{2} - \frac{gR^2}{r_0}\right)r_0^2 v_0^2 \sin^2 \theta_0}{g^2 R^4} \right]^{1/2},$$

$$\beta = \varphi_0 - \arccos\left[\frac{1}{e}\left(\frac{p}{r_0} - 1\right)\right].$$

同时要求  $0 < e < 1$ ，以及这样的  $r_0$ 、 $v_0$  和  $\theta_0$ ，使轨道曲线不穿越大气层，以便人造卫星不受大气层阻力作用的假定成立。在上述运动初始条件下，人造卫星椭圆轨道的长半轴  $a$  和短半轴  $b$  是

$$\alpha = \frac{r_0^2 v_0^2 \sin^2 \theta_0}{gR^2(1 - e^2)}, b = \frac{r_0^2 v_0^2 \sin^2 \theta_0}{gR^2 \sqrt{1 - e^2}},$$

人造卫星的运行周期是

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\alpha^3}{gR^2}}.$$

此周期和地球自转周期相等、轨道在赤道平面上的圆轨道卫星称为同步卫星。同步卫星离地面高度约为 35800 千米，从地面上看，它是静止不动的。实际上，影响人造地球卫星运动的还有诸如大气阻力、地球的非球形对称、太阳和月球的引力和光压的长期作用等，所以精确计算人造卫星的运动是一件相当复杂的工作。

牛顿运用万有引力定律曾于 1687 年首先提出了人造地球卫星绕轨道飞行的设想。3 个世纪后，前苏联于 1957 年 10 月 4 日发射了第一颗人造地球卫星。三个月后，美国也发射了一颗卫星。1969 年，美国成功发射了“阿波罗”11 号宇宙飞船，首次把宇航员送上月球。1970 年 4 月 24 日，我国成功地发射了第一颗人造地球卫星。1975 年发射第一颗返回式卫星，卫星在空中运行三天后成功回收。1981 年又成功发射了一组空间物理探测卫星，这是我国首次用一枚运载火箭发射三颗卫星成功。中国发射的第四、第七、第八颗人造卫星都成功地返回了地面，迄今只有前苏联、美国和中国三国掌握了这种回收技术。此外，我国又掌握了卫星定点技术，我国的火箭已进入国际市场，为其它国家发射卫星。

**熔点 (melting point)** 参见熔解和凝固。

**熔解和凝固 (fusion and freezing)** 物态的转变过程。物体从固态变成液态的过程叫做熔解，反之从液态变成固态的过程叫做结晶或凝

固。

在熔解和凝固现象中，晶体和非晶体有很大区别。在晶体中，原子呈规则排列，形成空间点阵，点阵离子只能在它的平衡位置附近做微小振动。在熔解过程中物质需要吸收热量，加剧晶体点阵的热振动，最终使晶格离子由规则排列转变为不规则排列。晶体在熔解过程中的温度保持不变，这个温度称为熔点。单位质量的晶体物质在熔点时从固态全部转变为液态所需吸收的热量，称为熔解热，它的单位是焦/千克或焦/摩尔。对晶体来说，熔解热也就是破坏晶体点阵结构需要的能量，因而可用于衡量晶体点阵中结合能的大小。物质从液体变为固态也是在一定的温度下发生的，这个温度叫做凝固点。在凝固过程中放出的热量称为凝固热。同种物质在相同条件下，熔点和凝固点相同，熔解热在数值上等于凝固热。在熔点（或凝固点）时，液态与固态可以并存。非晶体物质（如玻璃、树脂，塑料等）是在一定的温度范围内连续地由固态逐渐变成液态的，即有一个从固态软化成液态的温度范围（称为软化温度），因此非晶体没有确定的熔点，也没有确定的凝固点。

元素的熔点是原子序数的周期性函数。无机物的熔点一般较高，并随化合价的增加而升高；有机物的熔点一般较低，同族化合物的熔点与其分子量有关。

熔点还与熔解时的压强有关。一般情况下，如果固体熔解时体积膨胀，则其熔点随压强增大而升高。如果熔解时体积收缩，则其熔点随压强增大而降低。例如冰熔解时体积缩小，则压强增加约 130 大气压，可使冰的熔点下降 1 度。一个大气压下的熔点称正常熔点。

熔点还和物质的纯度有密切关系，有时在某种物质中加入很少一点杂质，就可以显著地降低熔点。

大多数物质熔解时体积膨胀，凝固时体积缩小。但也存在反常情况，如水、灰铸铁、铋、铯等物质，在熔解时体积缩小，凝固时体积膨胀，这是由晶体结构的特殊形状决定的。

**熔解热 (heat of fusion)** 参见熔解和凝固。瑞

**利干涉仪 (Rayleigh interferometer)** 一种测量折射率的分波阵面干涉仪，又称瑞利折射计。两束相干光分别通过两个相互平行且长度相等的长玻璃管。首先使这两支玻璃管内充满折射率 ( $n_0$ ) 相同的气体，此时接收屏上显示出某种干涉条纹。然后将一根长玻璃管中的气体抽去，充以待测气体（折射率为  $n$ ）。由于折射率的变化，使通过这两根玻璃管的光的程差改变  $(n - n_0)l$ ，这里  $l$  为管长。如果使用波长为  $\lambda$  的光，这种光程差改变所引起的条纹移动数为  $m$ ，则待测气体的折射率可从如下关系式中求出： $(n - n_0)l = m\lambda$ 。若瑞利干涉仪的玻璃管长度为 1 米，使用可见光的波长为 0.5500 微米，则折射率的变化能测准到  $10^{-8}$  量级。

**瑞利盘 (Rayleigh disk)** 精确测定声场中质点速度的装置。由于它的测量原理是根据瑞利于 1882 年发现的一种现象得到的，故名。瑞利盘是一个用细丝悬挂的刚性薄圆盘，圆盘的半径  $r$  甚小于声波的波长，在声波的作用下，根据圆盘的偏转角，圆盘的半径、厚度和密度，媒质的密度及悬挂系统的周期等，可算出质点的速度和传声器表面处的声压，由此可绝对校准传声器的声压灵敏度。本方法由于装置复杂、操体繁琐，一般情况下已不采用。

**润湿 (wetting)** 液体和固体接触处的一种表面现象。当液体和固体接触时，如果在界面处液体一侧附着层沿固体表面扩展并附在固体表面上，这种现象便称为液体润湿固体。反之，如果液体附着层沿固体表面收缩甚至完全不能附在固体表面上，则称为液体不润湿固体。同一种液体，对某些固体是润湿的，而对另一些固体可能是不润湿的。润湿和不润湿是由固、液分子间的相互吸引力（附着力）与液、液分子相互吸引力（内聚力）的作用大小决定的。在附着力大于内聚力的情况下，液体附着层的分子受到这两种作用力的合力，方向垂直于附着层表面，从液体指向固体内部，这时附着层内分子趋于紧密排列，液体分子之间出现排斥力，从而使附着层扩展开来，并附在固体表面上，形成了润湿现象。反之，当内聚力大于附着力时，附着层内分子趋于稀疏排列，出现与表面张力相似的收缩力。使附着层与固体表面的接触面积缩小，形成了不润湿现象。润湿

#### 润湿和不润湿液体的接触角

和不润湿的程度可用接触角进行描述。在液体和固体接触的交界处分别作液体表面和固体表面的切线，两切线所形成的包含液体的那部分夹角称为接触角（见图）。对润湿液体，为锐角（图中（a）、（a'）），越小，湿润程度越大；对不润湿液体，为钝角，（图中（b）、（b'）），越大，不润湿程度越大。

**萨拉姆** (Abdus Salam 1926 ~ ) 巴基斯坦物理学家。生于占格。14 岁就入旁遮普大学, 18 岁以第一名成绩毕业。1946 年再以第一名成绩获硕士学位。同年剑桥的圣约翰学院授予奖学金。1949 年获该院数学、物理学双第一的荣誉学士学位。1951 年任拉合尔管理学院教授。1952 年任旁遮普大学数学系系主任。同年获剑桥大学数学和物理学博士学位。1957 年任伦敦帝国学院理论物理学教授。1959 年当选为英国皇家学会会员。1964 年在意大利里雅斯特, 创立了国际理论物理学中心, 一直任这个中心的负责人。1983 年任第三世界科学院第一任院长。

主要贡献是对电弱统一理论的研究, 获 1979 年诺贝尔物理学奖。1962 年, 和温伯格经过多年的研究, 在统一弱相互作用和电磁场的理论方面, 各自取得了重大进展。萨拉姆的研究成果表现在规范场理论和黑格斯机制, 并预测了中性流的存在。1964 年提出了关于中性流的理论。温伯格也曾提出过这一理论, 被称为温伯格—萨拉姆模型。这一模型是第一次建立了弱相互作用和电磁相互作用联系的电弱统一理论。在此之前, 1951 年发表的博士论文中, 已包含了对量子电动力学的基础性研究, 即重正化理论。1952 年提出两种中微子理论。1957 年提出在中微子的静止质量为零与弱相互作用中宇称不守恒这两者之间存在着直接的联系。1961 年与沃德合作共同提出基本粒子的强相互作用也应当符合整体对称。预言了同一自旋介子的八重态, 在强相互作用中所起的作用与光子在电动力学中的作用相类似。1962 年对戈德斯通定理给出了一般性证明, 揭示了相对性场论中连续对称性自发破缺如何导致零质量粒子的出现。1964 年提出了通过黑格斯机制使中间玻色子获得静止质量的电弱统一理论。此后在 1973 年合作提出了统一描述夸克和轻子的帕提—萨拉姆模型, 预言了质子的衰变。这项工作为大统一理论开了一个头。萨拉姆十分热心于理论物理学方面的国际交流, 并把所得诺贝尔奖金捐作培养发展中国家的物理学家的费用, 为加强和促进第三世界科学家之间的联系与合作作出了重大贡献。

**三角形联接** (delta connection) 亦称“**形联接**”, 简称“**接**”。一种典型的电路联接方式。因其示意图形状而得名。

**三相电源的三角形联接** 三相交流电源联接方式之一。将三相交流发电机中的三个单相绕组依次首尾相接, 形成一个闭合电源回路的接法。参见“三相三线制”。

**三相负载的三角形联接** 当每相负载的额定电压与电源的线电压相同时所采用的联接方式 (图 1)。这种负载可以是对称的, 也可以是不对称的。

图 1 三相负载的三角形联接

图 2 电阻的 接变换为接

**电阻的三角形联接** 亦称“**三角形网络**”。复杂电路中常见的一种电阻联接方式, 如图 2 中虚线部分所示。它可以等效地变换为星形联接, 如实线部分所示, 变换式为

$$R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}},$$

$$R_b = \frac{R_{bc} R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}},$$

$$R_c = \frac{R_{ca} + R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}.$$

三相点 (triple point) 参见相和相变。

三相交流电 (three-phase alternating current) 由三组频率和振幅相同而位相彼此相差  $2/3$  的正弦交流电组成的供电方式。三相交流电动势可表示为

$$e_A(t) = \sqrt{2} \sin \omega t,$$

$$e_B(t) = \sqrt{2} \sin(\omega t - 2\pi/3),$$

$$e_C(t) = \sqrt{2} \sin(\omega t - 4\pi/3).$$

式中  $E$  是交流电动势的有效值,  $e(t)$  等则是各电动势的瞬时值, 其波形如图 1 所示。由三相交流电源在电路中产生的三相交流电压和三相交流电流也都有完全相似的表达式和波形。

图 1 三相交流电动势波形

三相交流电通常是由三相交流发电机产生的。这类发电机的转子一般为转动的电磁铁, 定子则由三个完全相同的线圈构成, 放置方式有两种: 一种是三个线圈与转子共轴放置, 各线圈的输入端相互相隔  $120^\circ$  电气角。如图 2(a) 所示。另一种是三个线圈的轴与转子轴垂直, 且都通过转子的轴, 相互间隔  $120^\circ$ , 如图 2(b) 所示。电磁铁转子在其他动力机械带动下做匀速转动, 从而在三组定子线圈中产生按正弦规律变化的感生电动势。它们的频率和振幅都相同, 但由于放置位置互相间隔  $120^\circ$ , 因而达到同一瞬时值的时间依次相差三分之一周期, 其位相依次相差  $2/3$ 。把这三组对称的交流电动势作星形联接或三角形联接, 便成为三相交流电源。

图 2 三相交流发电机结构示意图

三相交流发电机充分利用了转子产生的交变磁场空间, 能形成较大的发电能力。通过不同的联接方式, 可适合不同的用电需要, 还能直接启动感应电动机。因此, 工业和民用交流电几乎都是由三相交流发电机提供的。民用的单相交流电通常也是由这种三相交流电中的一相提供的。

三相三线制 (three-phase three-wire system) 三相系统中使用三根导线实现三组交流电传输的联接方式。有三角形接法 (图 a) 和不引出中性线的星形接法 (图 b) 两种。适用于供电给对称负载, 如电动

### 三相三线制

机、三相电炉等。若负载不对称, 各相负载的相电压不相等, 则这种联接方法将影响负载的正常工作。例如, 灯泡照明负载, 若某相电压低于额定电压, 灯泡亮度就不足; 若某相电压高于额定电压, 灯泡寿命就缩短, 甚

至烧毁。特别是在不用中性线的星形接法中，一相负载断路，即相当于两相负载串联的单相电路。电源电压在两相负载上按阻抗分配，将出现异常或危险的情况。因此，采用不引中线的三线制星形联接必须确保负载对称。否则，应采用三相四线制。

**三相四线制三相四相线 (three-phase four-wire system)** 三相系统中使用四根导线实现三组交流电传输的联接方式(如图)。即引出中性线的星形联接。发电机各相线圈的始端(或末端)联接点N和各相负载的联接点N 都称为“中点”，联接N和N 的导线称“中性线”或“中线”联接各相线圈末端(或始端)与各相负载另一端间的导线都称为“相线”或“火线”。中线较相线为细。三相四线制既能给对称负载供电，也能给不对称负载供电。既能用相电压( $V_\phi$ )供电，又能同时用线电压( $V=\sqrt{3}V_\phi$ )供电。由于这些优点，故被广泛采用。我国供电系统采用的是相电压为220V、线电压为380V的三相四线制供电。其中220V供民用，380V供动力用。民用电实际上是三相四线制中的一相，故有两条输电导线，一条为相线，一条为中线。工业上的动力装置大多使用线电压，可以通过两条相线供电，也可以通过三条端线为三角形联接的对称负载供电。

**扫描隧道显微镜 (scanning tunneling microscope)** 利用电子隧道效应原理工作的用于表面研究的新一代显微镜，亦简称STM。当两个电极间隙很窄(几个原子直径)时，将有少量电子流过绝缘介质，这就是电子隧道效应。在扫描隧道显微镜中，一个电子做成尖锥形的探针，被观测的样品表面作为另一个电极。将原子线度的极细针尖在接近样品处(针尖与样品的距离小于1纳米)扫描，通过检测隧道电流随距离的变化，而得到样品表面的形貌。

STM首先由瑞士的罗赫尔和德国的宾尼于1981年发明。由于该项杰出贡献，宾尼等人荣获1986年度诺贝尔物理奖。我国于1988年4月由中国科学院化学研究所研制成功一台STM，据测得的数据表明，该仪器垂直于表面方向的分辨率高达0.01纳米，横向分辨率为0.1纳米。该仪器由计算机、高分辨图像显示终端、电子控制线路和扫描隧道显微镜主体等四部分组成。由于它具有原子分子水平上的高分辨率，并且实验可以在真空、大气、常温、低温甚至水溶液条件下进行，因此在表面科学、材料科学、生命科学和微电子技术等领域都有着重大的意义和广阔的应用前景。它的问世，为人类认识微观世界的奥秘又提供了一个有力的工具，被国际科学界公认为表面科学和表现现象研究技术的一次革命。

**色 (colour)** 亦称色荷。是夸克的一个基本属性。与通常“颜色”一词的含义完全无关。色或色荷是强相互作用的源，可与电荷是电磁相互作用的源类比。夸克之间所以存在强作用，就是因为夸克带有色或色荷。带有色荷的夸克周围空间存在“色场”，夸克之间的强相互作用是通过色场传递的。构成色场的量子称为胶子，所以也可以说夸克之间的强作用是通过胶子传递的。

尽管可以将色荷和电荷相比拟，色场与电磁场相比拟，胶子与光子相比拟，但是色荷之间的强相互作用与电荷之间的电磁相互作用具有根本区别。这种区别主要表现在三个方面。首先，迄今的实验已经证实，每种夸克可以带有三种不同的色，例如可称它们为“红、蓝、绿”，也可称为“红、蓝、黄”。因为它们并非通常含义下的颜色，所以其符号可以任意选用。

其次，传递电磁作用的光子本身不带电，但是传递强作用的胶子本身却带有色荷，且胶子的色荷有 8 种。由于胶子带有色荷，所以由它传递的强相互作用的性质比电磁作用复杂得多。最后，色荷的作用是一种短程力作用，完全被“禁闭”在强子线度（ $\sim 10^{-13}\text{cm}$ ）以内的微观世界中。一切强子都不带有色，或者说一切强子都是白色的。所以，构成强子的所有夸克的色必须互补，从而使整个体系无色。例如质子 P 是由两个 u 夸克和一个 d 夸克构成的，因此这三个夸克必须分别为红、蓝、绿，以致它们所构成的质子系统无色。 $\pi^+$  介子由一个 u 夸克和一个反夸克  $\bar{d}$  构成，因而若 u 夸克带红色，则反夸克  $\bar{d}$  必须带有反红色，以致  $\pi^+$  介子的色荷为零。夸克和胶子带有色这个结论已为许多实验所证实。

色心 (colour center) 是一种重要的点缺陷。把碱卤晶体如氯化钠放在碱金属气氛中加热，然后让其自然冷却到室温，这时原来透明的氯化钠晶体变成了淡黄色。这个过程又称为增色过程，而色心就是在这种增色过程中形成的。

碱金属卤化物、碱土金属氟化物等透明的离子晶体中，电子的导带和价带之间的带隙（禁带）较宽，从红外直至紫外波段的各种能量的光子都不足以使价带电子激发到导带，因此它们不能被这些晶体所吸收。但离子晶体中的点缺陷本身是个带电中心。例如碱卤晶体中的卤素负离子空位是个带正电荷的中心，由于库仑作用它会吸引一个电子在它的周围运动，这被俘电子能吸收某一波段的可见光，从而原来透明的晶体呈现出相应的颜色。这种光吸收中心就是色心。色心可分为电子中心和空穴中心两大类。最简单的电子中心是 F 心，它由负离子空位俘获一个电子组成，碱金属卤化物晶体中的 F 心的特征吸收带通常在可见光波段，例如它使氯化钠 (NaCl) 呈黄色，溴化钾 (KBr) 呈紫色，氟化锂 (LiF) 呈红色等。最简单的空穴中心是 V 心，它由金属离子空位俘获一个空穴组成，它的吸收带一般在紫外波段。色心的存在会对某些固体电子器件带来危害。但利用色心也可实现高密度信息存储，制造可调谐激光器等，因此在许多技术领域有着广泛的应用。

熵 (entropy) 描述热力学平衡态性质的一个重要态函数。在一定条件下利用熵函数的变化可以判定系统内部自发过程进行的方向。

克劳修斯在研究可逆卡诺热机时首先注意到，当一个热力学系统从平衡态 变化到另一平衡态 时，不管经历什么样的可逆过程，积分值  $\int_1^2 \frac{d\theta}{T}$  是一个确定的值（式中 d 表示温度为 T 时系统在一无穷小过程中所吸收的热量）。根据上述特性，可以引入态函数熵 S，它的定义是  $S_{11} - S_1 = \int_1^{11} \frac{d\theta}{T}$ ，这里  $S_1$  和  $S_{11}$  就是系统分别处于平衡态 和 时的熵。在实际的热力学问题中，可以选定任意一个初态 的熵值为某一常量，再由上式得到系统处于其他平衡态时的熵。因此，由上式所定出的熵 S 包含了一个任意常量。为方便起见，有时规定初态的熵为零，从而定出其他态的熵值。例如在热工学中制定水蒸气性质表时，通常取 0 时饱和水的熵值为零。在热力学第三定律建立以后，普朗克提出可以选绝对零度时热力学系统的熵值为零。以此为初态，由上式得到的熵不再包含任意常量，这就是绝对熵。熵的量纲是能量量纲与温度量纲之比，它的单位是焦/度 (J/K)。熵是一个

可加物理量。

当系统经历不可逆过程从平衡态  $I$  过渡到另一平衡态  $II$  时，熵的改变  $S_{II} - S_I > \int_I^{II} \frac{d\theta}{T}$ 。由于初态和末态确定以后，熵的差值也相应确定，因而上式表明沿不可逆过程从  $I$  到  $II$  的过程中  $\frac{d\theta}{T}$  的积分值小于沿可逆过程从  $I$  到  $II$  过程的积分值。

$S_{II} - S_I > \int_I^{II} \frac{d\theta}{T}$  是热力学第二定律数学表述的积分形式，其中等号对应于初态和末态均为平衡态的可逆过程情况；不等号对应于初态和末态均为平衡态的不可逆过程情况。

对于无限小变化的过程， $ds = \frac{d\theta}{T}$ ，这是热力学第二定律数学表述的微分形式，等号指可逆过程，不等号指不可逆过程。

上述关于平衡态熵函数的定义可以被推广到非平衡态。当热力学系统处于非平衡态时，可以把系统分为许多小系统，每一小系统可以近似地看作处于某个平衡态，这种平衡态称为局域平衡。对每个处于局域平衡的小系统给出熵的定义，再根据熵函数是可加量的性质，把整个系统处于非平衡态时的熵表示为所有局域平衡态的熵之和，这种非平衡态的熵称为广义熵。对于初态和末态都不是平衡态的过程，广义熵的变化也满足  $S = \frac{\Delta Q}{T}$ ，其中等号对应可逆过程，不等号对应不可逆过程。

对于一个孤立系统内部发生的各种过程，由于系统不与外界交换热量， $Q=0$ ，因此不论初态和末态是否平衡，都可以得出  $S = 0$ 。它表明，在可逆的绝热过程中系统的熵不变，而在不可逆的绝热过程中熵总是增加，这个结论称为熵增加原理。任何自发的不可逆过程（例如气体向真空的自由膨胀或热量从高温物体向低温物体的传递等）都可以在不受外界影响的条件下发生，而且总是伴随着从非平衡态向平衡态的逐步趋近。从熵增加原理可知，系统越接近平衡态，熵（或广义熵）越大，直至到达稳定的平衡态，系统在不外界影响下状态不再变化，这时熵函数出现极大值。由此可见，熵函数的变化给出了判断自发不可逆过程进行的方向和限度的依据。

以普里戈金为代表的比利时布鲁塞尔学派提出，在允许与外界交换热量和物质的非孤立的开放系统中，除了因内部的各种不可逆过程（如热传递、物质扩散等）引起的熵增加  $d_i S$  以外，还存在着由热量和物质的交换引起的熵流动  $d_e S$ ，因而总的熵改变是  $ds = d_i S + d_e S$ 。根据熵增加原理  $d_i S = 0$ ，但是  $d_e S$  却可正可负，一旦存在负熵流使  $d_i S = -d_e S$ ，就会导致  $ds = 0$ ，即这个开放系统处于总熵不变的非平衡定态。由热量和物质交换引起的负熵流绝对值越大，该系统将越偏离平衡态，且非平衡定态的熵比平衡态的熵越小，这就使远离平衡的非平衡开放系统可能出现一种稳定的新的宏观有序结构，这就是“耗散结构。”

从分子运动论的观点看，熵增加表示系统内部分子运动的混乱程度增大，每个分子在空间运动的可允许范围增加，分子速度取较大数值的可能性也增大，从而处于一种更“无序”的状态。统计物理学进一步建立了熵



函数和系统可出现的微观状态数（热力学概率）的关系。熵越大，对应的微观状态数越多，宏观状态就显得越“无序”。因此，熵函数是微观粒子热运动无序性的一种量度。从这个意义上说，孤立系统从非平衡态趋于平衡态的过程就是走向无序的过程，而开放系统在远离平衡的一定条件下出现耗散结构，则是从无序到有序的演化。

**熵增加原理** (principle of entropy increase) 参见熵。

**摄动** (perturbation) 一个天体绕另一个天体按二体问题规律沿一定轨道运行时，因受其他天体吸引或其他因素的微小影响，使天体运动偏离原来轨道的现象。例如月球绕地球运行时受到太阳和其他行星吸引以及地球的影响，偏离按二体问题规律运行的轨道，而发生摄动。影响天体运动的摄动因素很多，有万有引力引起的保守力，有介质阻尼引起的耗散力，有连续作用的力，也有如辐射压引起的间断力等等。影响大行星运动的主要摄动因素是行星间的相互吸引；地球大气的阻尼使卫星陨落于地面；太阳辐射压决定着彗尾的形状；潮汐摩擦则是卫星轨道演化的主要动力。只有准确掌握各种摄动因素，才能正确无误地计算天体的运动，解释各种壮观的天象。

为解决摄动问题，发展了一套近似方法，称为“摄动方法”或“摄动理论”，即把体系未受摄动作用的解作为近似解，再用近似方法考虑摄动作用对解的影响，对解作一定的修正，这种方法最早由英国物理学家瑞利提出，有时称为“参量改变法”。近年有些天文学家认为处于太阳系外边的几颗大行星都受到摄动作用，这是由于冥王星之外的某些天体的引力引起的，因此激发了人们寻找太阳系第十颗行星的兴趣。

在物理领域内，类似摄动的概念称为“微扰”，相应的方法称为“微扰方法”或“微扰理论”，微扰法在量子力学中有重要应用。

**摄氏温标** (Celsius thermometric scale) 参见温标。

**射流技术** (fluidics) 利用射流运动原理制成器件来实现自动控制的一门技术。射流技术一词由“流体” (fluid) 和“逻辑” (logic) 两词组合而成。所谓射流是气体或液体从孔口或管口高速喷射成束的流体。如药水从注射器针头喷出，空气从打气筒中压出等。射流在流动中具有以下特性：**空吸作用**：根据伯努利方程，高速流动的射流使压力减小，周围流体就会流向该处。利用空吸作用可制造各种设备与仪器，例如喷雾器、水流抽气机等；**附壁效应**：在射流两侧加两块平行挡板，若它们到射流束的距离不等，则射流两侧会出现压力差，射流将向着距离较近的挡板弯射过去，最后会贴着此板喷射出去；**偏转效应**：两股相互垂直的射流同时从喷嘴中射出，汇合之后的射流将偏转一个角度，而偏转角度的大小与原来两股射流的动量有关。

利用射流的上述物理特性，可制成各种不同性质的元件，如附壁式元件，动量交换式元件，以及湍流式、涡流式和混合式元件，再与一些相应的附件组成控制系统，应用于工业生产中进行自动控制，这就是射流技术。按工作物质分，有气动和液动两类；按工作方式分，有数字式和模拟式两类。数字式流控元件多由附壁式元件组成，可制成“非门”、“或门”、“与门”和“或非”等元件，以及计数触发器、振荡器等，这些元件的任一输出孔只有两种状态：有气流输出或无气流输出，相当于电子元件中的“开”与“关”。由此组成比较、检测、逻辑运算、程序控制等线路；模

拟式流控元件多由动量交换式或流控元件构成，可制成流量放大器、压力放大器和功率放大器等，可用来控制温度、流量、压力等物理量的连续变化。

射流技术具有结构简单、工作稳定可靠、耐用、操作安全、工效高、不受各种辐射、电磁波和温度的影响，并能抗腐蚀、抗震、抗爆等优点，因此在机械、化工、轻工、交通、导弹、原子反应堆、宇航技术等部门有着广泛应用。但它也有缺点：与电子元件相比，它的反应动作较迟缓，不适应高速动作的要求；它对流体的净化要求极高（否则会污染元件孔道而改变几何形状产生误动作），这影响射流技术的推广。

沈括（1031～1095）北宋科学家、政治家，字存中。杭州钱塘（今浙江杭州）人。至和元年（1054）出仕任沐县（今江苏省沐阳县）主簿。嘉祐六年（1061）任宣州宁国（今安徽省宁国县）县令。参加了万春圩水利工程的修筑。嘉祐八年（1063）中进士，不久入京编校昭文馆的书籍。熙宁五年（1072）兼提举司天监。沈括积极参与了当时的王安石变法，曾赴两浙考察水利，巡视新法的实施。熙宁八年（1075）出使辽国进行边界谈判，驳斥了辽国的无理要求。次年拜翰林学士，任权三司，掌管全国的经济和财政。元丰三年（1080）改任祐延（今陕西北部）路经略安抚使，抗击西夏侵扰。元丰五年因徐禧失陷永乐城，连累坐贬。晚年居润州，筑梦溪园（今江苏省镇江东），举平生见闻撰《梦溪笔谈》，绍圣二年（1095）病卒。

沈括知识渊博，治学严谨，注重观察、实验和实地考察，并在此基础上“原其理”或“以理推之”。在天文上，他力主在实测日、月、五星行度的基础上改进历法。为了测验极星与北天极的确切位置，他连续观测了三个月，作图两百余幅，最后得出了极星“离天极三度有余”的结论。他还重视观测仪器的改进，熙宁七年（1074）新制浑仪、浮漏等，多有创新。在历法上，他提出《十二气历》，以立春为岁首，大尽31日，小尽30日。大月和小月相间，每年两个小月相并。这历法比现行的公历——格里高利历还要合理。在数学上，他创立了“隙积术”（二阶等差级数的求和法）、“会圆术”（已知圆的直径和弓形的高，求弓形的弦和弧长的方法）。在地质上，他由雁荡山的地形，认识水的侵蚀作用，从太行山岩石中的生物遗迹，推论冲积平原形成的过程。他在物理学上，发现了地磁偏角的存在，阐述了凹面镜成像原理，对共振现象也进行了研究（详见《梦溪笔谈》中的物理知识）。

他很重视人民的实践经验和创造发明。他说：“至于技巧、器械，大小尺寸、黑黄苍赤，岂能尽出于圣人！百工、群有司、市井、田野之人，莫不预焉”。他亲自推荐布衣卫朴修成《奉元历》，水工高超、木工喻皓、发明活字印刷术的毕昇，在《梦溪笔谈》中都有记述。他十分留意当时的技术生产情况，炼铜、炼钢、采盐、造船、水利工程，凡有所见，无不详为记录。他还为石油命名。他精究药用植物和医学，留心收集有效的方药。著有《灵苑方》已佚。又有良方十卷（附入苏轼的医药杂说中，改称《苏沈良方》）。除《梦溪笔谈》外，著述传世的尚有《长兴集》41卷（残）。使辽所撰《乙卯入国奏请》、《入国别录》，在《续资治通鉴长编》中还保留一部分。

**渗透压**（osmotic pressure） 在加入溶质的稀溶液（例如少量糖

溶于水中的糖水溶液)中所出现的高于同温度下纯溶剂(例如纯水)的那部分附加压强。

#### 糖溶液的渗透压实验装置示意图

显示渗透压的实验装置如上图所示。取一杯水,将一根两端开口的细玻璃管插入水中,这时玻璃管中的水平面显然与杯中的水平面一样高。然后,用一片很薄的半透膜包住玻璃管的管底,它的作用是只允许溶剂(水)分子通过,而不允许其他溶质(例如糖)分子通过。再将管子插入水中,并在管中加入少量糖,于是从半透膜通过的水在管内形成了稀糖水溶液,而杯内没有糖溶入,依然是水。此时可以发现,管中糖溶液的水平面高于杯中水平面。这表明在达到平衡后半透膜一边糖溶液的压强高于另一边水的压强,这个附加压强的大小是  $\Delta p = \rho_s gh$  ( $\rho_s$  是糖溶液密度,  $g$  是重力加速度,  $h$  是高度差),这个附加压强就是渗透压。

在很稀溶液的情况下,渗透压与溶液体积  $V$ 、溶质摩尔质量  $n$  之间存在着类似理想气体状态方程那样的关系:  $\Delta p V = nRT$ ,这个关系式称为范霍夫定律。从这个定律可以得出,溶质分子量越小,渗透压越大。反之,一旦在实验中测得渗透压以及溶液的浓度,就可以由范霍夫定律确定溶质分子的分子量。

**声 (sound)** 在弹性介质中传播的压力、应力、质点位移和质点速度等的变化或几种变化的综合,简言之,是机械振动在弹性介质中的传播过程。指上述变化作用于人耳所引起的感觉。为清楚起见,前者最好称为声波,后者称为声音(或声觉)。严格说声与音是有区别的,不能混淆。现在把“声”作为总称,音是有音调的声。

一个物体振动时,会激励周围空气质点振动,由于空气的可压缩性,在质点的相互作用下,四周空气就产生交替的压缩和膨胀过程,并向外传播。一般来说,凡是有弹性的物质,如液体和固体等都能传播声波。潜在水里的人能听到声音,附耳在铁轨上可以听到远处的火车声就是一例。声波的频率范围相当宽,从  $10^{-4} \sim 10^{12}$  赫。但一般人耳听到的声波频率为  $20 \sim 20000$  赫,低于 20 赫的称为次声,高于 20000 赫的称为超声。而人耳听觉能量范围却要宽得多,人耳能忍受的最大声强约为  $1 \text{ 瓦/米}^2$ ,比刚可听到的同频率的声强(约为  $10^{-12} \text{ 瓦/米}^2$ )大  $10^{12}$  倍。

**声波 (sound wave)** 在弹性介质中传播的一种机械波。在弹性介质中,质点间有弹性作用,当质点偏离其平衡位置时即发生应变,在弹性力作用下来回振动,又引起周围质点的应变与振动,这样形成的振动在弹性介质中的传播过程称为弹性波。由于空气具有可压缩性(即具有弹性),在质点的相互作用下,周围空气就产生交替的压缩与膨胀,空气质点的振动方向与波传播方向一致,所以空气中的声波是纵波。在液体中的声波也是纵波。在固体中除了纵波以外,还可能有横波(即质点振动的方向与声波传播的方向垂直),有时还有纵横波。

振动的物体就是声源,一定频率范围和能量范围的声波传入人耳时,能引起鼓膜振动,刺激听觉神经而产生声的感觉。一般来说,频率低于 20 赫的声波(称为“次声波”)和高于 20000 赫的声波(称为“超声波”)都不能引起鼓膜的振动,因而不能引起人的声觉。只有频率介于这两者之间的声波人才能听到,因而这一频率范围内的声波称为“可听声”。从能

量范围来说，声音强度小于  $10^{-12}$  瓦/米<sup>2</sup> 的声波不能为人所感觉；而大于 1 瓦/米<sup>2</sup> 的声波只能引起人的痛觉而不能引起声觉。

声波中的扰动，一般都非常小，以致在运动方程的二次方项及以上各项，都可忽略，这类声波称为线性声波（或称小振幅声波）；否则称为非线性声波（或称有限振幅声波）。两者在性质上有很大差异。线性声波早就进行大量的研究，且人类日常生活中遇到的大多数情况，几乎都是线性波。

**声成像 (acoustic imaging)** 用声波或超声波照射物体，再将从物体反射和散射回来的声波收集并记录下来，以得到该物体的图像的技术。声成像技术可以用来了解物体内部的情况。由于很多物体具有不透光而能透声的特性，因此要了解这些物体内部的细节，必须用声（超声）的方法。有些物体虽然能透光，但光学反差远比声学反差小，利用声成像来了解这些物体的内部情形，效果更好。近一二十年来，随着尖端技术（核反应堆、潜艇、载人空间飞船等）的发展，对无损检验的方法要求更高。为了保证其可靠性，必须检测出各种部件和结构中的缺陷与杂质，而声成像技术能很快地推断金属内部的缺陷与杂质。在医学诊断中，应用声成像的方法，可使胎儿、被阻塞的静脉和动脉，以及早期肿瘤等成为可见。声成像虽然不能说完全能替代 X 射线，但在避免 X 射线的积累损伤效应方面，却是十分优越的。

声成像的研究已有几十年的历史。在第一次世界大战中，人们首先使用声呐系统的脉冲回波技术来探测水下敌人的潜艇，以后发展成横截面成像，现在已发展成纯粹全息式到纯粹透镜成像新系统。在声成像技术中，把不可见的声波记录下来并转换成可见像，最常用的是利用电声效应和声光效应。声成像的工作频率一般约为数兆赫至数十兆赫。声成像在医疗诊断、工业无损检测、海洋勘测、地震预报和超声显微等方面的应用日益广泛。声成像技术的最近发展尚有下列两个方面：近年来发展的超声显微镜和光声显微镜都采用了极短的波长，达到与光波可比拟的分辨率；光全息成像技术的成功，促进了声全息这一新成像方法的研究。有人预言，总有一天声成像技术能发展到“使人体变为透明”、“使海水变为透明”的地步。

**声发射 (acoustic emission)** 又称声放射、应力波发射或简称为 AE。由于应力的存在，材料或构件在受力过程中产生变形或裂纹时迅速释放能量而产生弹性波的一种声波发射现象。它的频谱可从声频直到超声频，它的波形或发射规律与材料的性能、受应力的情况等有关。利用材料受负载时产生声发射的能量、频谱和频度，可研究材料破坏过程和机理，判断材料或构件的抗断裂性能，由此形成了声发射技术。

声发射技术可应用于：固体材料的研究。材料在相变过程中产生声发射，声发射则表征着材料的特性，从而可以研究单晶、多晶和复合材料的形变，还可以用来研究材料中裂缝处破裂的机理。研究岩石中的形变和破裂过程，可用于矿山的崩塌和滑坡、塌方等的预报；根据接收到的地震波（应力波和声波）来推知地震发生的地点和强度。结构安全程度的检测。当结构材料中出现裂缝或结构被加载时，通过声发射现象的变化，可以监测结构物的安全程度、发现裂缝和估量裂缝的严重程度。现已形成一门无损检测方法，如检测核工业、石油工业中的压力罐、火箭发动机罩、

建筑结构、桥梁、管道等，也可用声发射技术来检验焊接的质量等。

**声辐射计 (acoustical radiometer)** 由测定声波行进时对障碍物施加的稳恒声辐射压力来量度声强的仪器。对测量较高频率（一般在 50kHz 以上）的超声声源的总声功率特别有效，可达到较高精度。其结构原理如图所示。内外容器内分别盛有密度为  $\rho_0$  和  $\rho_1$  ( $\rho_0 > \rho_1$ ) 的液体。声源发射头浸没在密度为  $\rho_1$  的外容器的液体中，用玻璃制成的浮沉子浮在密度为  $\rho_0$  的内容器的液体中。当声源向液体内部辐射声波时，沉浮子受到声辐射压而下沉。根据液体密度  $\rho_0$ 、 $\rho_1$ 、浮沉子的结构参数及沉浮子沉降的高度可算出声功率，再除以声源的辐射面积，就可测出声源的声强。用声辐射计测声源的声功率时，声源的功率越大，测量误差越小。

### 声辐射计原理图

### 声干涉仪原理图

**声干涉仪 (acoustic interferometer)** 利用驻波原理测量声波在媒质中的传播速度的仪器。它的工作原理是，靠辐射压电晶体在被测媒质中发射一个超声波束，以便在发射晶体和反射器之间得到一个驻波系，反射器与晶体之间的距离可用螺旋调节，如图所示。振荡器接在晶体上，而且调谐在晶体共振频率上。当晶体和反射器之间的距离改变时，引起振荡器输出电流变化。在半波长的位置上，输出电流出现急剧降落，这表明此时在晶体表面和反射器之间的驻波系对振动晶体的端面施加了一个很高的机械阻抗。根据测出的反射体与晶体之间的距离  $l$  上的半波长数  $n$  及晶体的振动频率，可求得被测媒质中声的传播速度  $v$ ：

$$v = \frac{2lf}{n},$$

衰减则可按输出电流的最大值和最小值随距离的变化率求出。用干涉仪测量速度的准确度在万分之一以内，测量衰减的准确度在百分之几以内。

**声级计 (sound level meter)** 参见声压。

**声量 (volume)** 即响度。

**声呐 (sonar)** 利用声波对水下物体进行探测和定

位识别的技术和设备的总称。它是英文 sonar 一词的音译，sonar 一词由 sound navigation and ranging 的缩拼字组成，原意是“声音导航和测距”。在陆地上可用雷达探测千里以外的物体，这是运用电磁波遇到物体将被反射回来的原理而实现的。但是电磁波在水中传播时，其能量将很快被水吸收，因而不能传播较远的距离。而声波在水中却很少被吸收，传播距离可达几千公里。声波在水中传播的速度约为 1500 米/秒。声波是目前已知的唯一能在水中远程传播的波，所以声呐便成为水中深测目标、传递信息的有效工具。

声呐可分为主动式与被动式两大类。主动声呐（回声定位声呐）：本身发射声波，然后当声波遇到被测物体时便反射回来，再由接收器接收，并经过声电转换及信号放大等步骤显示在荧光屏上。根据发射声波的方向以及来回所经历的时间间隔，就可计算出物体的方位和距离。主动声呐可

用于侦察潜艇和海底障碍物等。 被动声呐（噪声测向或测距声呐）：本身并不发射声波，但能接收其他物体在水中发出的声波，从而发现各种舰艇的马达声以及其它发声物体。

声呐通常是在超声波段工作的，因为超声波在水中传播时损耗小，且波长较短，易聚成细束。再则目前技术上已能制造功率很强的超声波源。声呐一般由振动器、收发控制器、发射器、接收器和距离指示器等部分组成。

声呐技术最早出现于第一次世界大战时期，以后随着科学技术的进步，声呐技术得到了很大的发展，目前已能制造分辨率和准确度都很高的声呐系统，利用这种系统甚至可以分辨出远距离的一小块铁块。声呐在军事上很有用，它不但是探测潜没在水中的潜艇的主要手段，也是潜没在水中的潜艇了解周围环境的主要工具，常常被喻为舰艇的水下“耳目”。一艘现代的潜艇上通常装置十余部各种类型的声呐装置。此外，声呐还被用于探雷、制导、导航以及航道测量等方面。在民用方面，声呐常应用于捕鱼、海底地质勘探、水下定位、石油开发和海洋研究等工作中。声呐还可用来制造供盲人使用的定向仪器。

**声能 (acoustic energy)** 介质中由于有声波存在而具有的附加能量。声波由声源向四周传播到介质中的某一位置时，该处原来不动的质点开始运动，因而具有动能；同时该处的介质也发生形变（疏密有变化），因而具有势能。这样，介质由于有声波存在而有了一定的附加能量，这就是声能。声能与声波振幅的平方、声波频率的平方以及介质的密度成正比。

**声强 (intensity of sound)** 声强度的简称

**声强度 (intensity of sound)** 简称声强。在空间某点指定方向上的声强，就是单位时间内通过与指定方向相垂直的单位面积的声能。单位为瓦特/米<sup>2</sup> (W/m<sup>2</sup>)。声源的振幅大、频率高，声波的振幅也大，频率也高，单位时间内传出去的声能也大，因此声强与声波所传播的能量密切相关。点声源发出的声波在向各方向传播时，声强与离开声源的距离平方成反比。

**声强级 (sound intensity level)** 声场中某点的声强度与基准声强度之比的常用对数乘以 10。单位是 dB。其公式为  $L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}$ 。式中  $I$  是某点的声强度， $I_0$  是基准声强度，其值为  $10^{-12}$  瓦/米<sup>2</sup>。由于声学中常见的声强范围与声压范围非常大，为方便起见一般都用对数表示。先选一个基准值，一个强度等于其基准值的 10,000 倍的声，声强级为 40dB，强度为基准值的 1,000,000 倍的声，其声强级为 60dB。

由于在声学测量中功率不易直接测量得到，所以常用易于测量的声压表示。在空气中，某点的声强度与该点声压级在数值上几乎相等，虽随着环境温度和大气压强的变化而有微小差异，但一般可予以忽略。

**声强计 (sound intensity meter)** 一种能直接测量空气中声和噪声的声强的仪器。它的基本原理是：采用两传声器测量，设 A、B 两处的声压为  $P_A$  和  $P_B$ ，两处间隔为  $r$  ( $r \ll \lambda$ )，则声强为

$$I_r = \frac{1}{2} (P_A + P_B) \cdot \left( -\frac{1}{\rho} \int \frac{P_A - P_B}{\Delta r} dt \right),$$

式中  $\rho_0$  为媒质的密度。

**声全息 (acoustical holography)** 利用干涉原理来获得被观察物体声场全部信息 (振幅分布和相位分布) 的声成像技术。即将全息原理引进声学领域而产生的一种新的声成像技术和信息处理手段。它一般包括获得声全息图和声全息图重建物体可见像。其原理与光全息成像相似, 不同之处是用超声波代替光波。它用一声频振荡器所激发的两束分开的声波 (一束为物波束与物体相互作用; 另一束为参考波束), 在空间相遇后产生相位干涉, 得到物体相位干涉图像, 并用一点状接收器在某一平面上扫描检测, 将其信息存储在磁带或计算机内。要使全息图重现, 可将检测到的与扫描平面中干涉图案相对应的信息去调制一点光源的强度, 此点光源作为一支“笔”, 在荧光屏面上或照相机的焦平面上扫描出全息图, 最后得到可见像。

### 声全息

声全息是 20 世纪 60 年代发展起来的一种成像技术。它可检测与显示可见光及 X 射线不透明的介质中的结构, 近年来在原理方法和实验技术上作了大量研究, 使声全息在医疗诊断、无损检测和水下显示等方面都有应用的可能, 但由于声波波长较长、分辨率低、待测目标的散射比较复杂、重建像畸变较严重等缺点, 使声全息在推广应用方面受到一定限制。

**声速 (speed of sound)** 声波在介质中的传播速度, 又称音速, 用  $c$  表示。从本质上讲, 声速是介质中微弱压强扰动的传播速度。在各向同性均匀介质中, 声速与介质的密度与弹性性质有关, 其公式为

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

其中  $k$  为介质体积弹性模量,  $\rho$  为其密度。对于液体和固体,  $k$  和  $\rho$  随温度和压强变化很小, 主要随介质不同而异, 故在同一介质中, 声速基本上是一常数。在液体中声速在 1000 ~ 2000 米/秒; 在固体中声速为数千米每秒。对于气体,  $k$  和  $\rho$  随压强和温度变化均很大, 由于声波传播很快, 来不及与外界交换热量, 可视为绝热过程, 其声速  $c$  可表示为  $c = \sqrt{\gamma RT}$ 。其中  $T$  为热力学温度,  $R$  为普适气体常数,  $\gamma$  为比热比。气体的声速每秒约数百米, 如 0 °C 时空气中声速为 331.4 米/秒, 且随温度升高而增大, 温度每升高 1 °C, 声速约增加 0.6 米/秒。对于各向异性介质, 声速随传播方向而异。在很多情况下, 声速还与声波的频率有关, 称为声频散。

**声透镜 (acoustic lens)** 利用声音在不同介质中传播速度不同而发生折射, 使声音发生会聚或发散的透镜状装置。它可以是固体 (如超声波中常用铝或塑料做成声透镜) 或流体 (如装在薄壁容器中的液体或气体做成声透镜)。其原理与光学透镜相似, 所不同的是光学中常用的是玻璃透镜。由于光的玻璃透镜中的速度往往小于在周围介质 (如空气) 中的速度, 而声音在声透镜材料中的速度通常大于在周围介质中的速度, 因此声透镜外形与其所起的作用关系恰恰与光学透镜相反。光凸透镜起会聚作用, 而声凸透镜却起发散作用, 例如超声中常用凹形固体声透镜把超声波会聚在一起。除图为一装在普通扬声器口上的声透镜, 它是利用狭片宽度的变化产生声波发散作用, 使声音以较大角度向四周扩散, 从而展宽扬声

器的高频指向性。

### 声透镜

**声学 (acoustics)** 研究声波的产生、传播、接收和效应的一门科学。属物理学的一门分支学科。声学控制各种声源振动方式的规律和声源辐射的声波经各类媒质 (固体、液体或气体等) 传到人耳或其他一些需要声音地方的传播机理。

发展简史声音是人类最早研究的物理现象之一, 从古代直到 19 世纪一直把声音理解为可听声的同义语。西方也是如此, “acoustics” 的词源是希腊文 “akoustikos”, 意思是 “听觉”。世界上最早的声学是在音乐方面, 公元前 11 世纪中国商代已能制造石磬和成套的铜铙, 这表明当时已具有十二音律中的九律, 并已有了五度谐和的观念。公元前 16 世纪古希腊哲学家毕达哥拉斯已认识到音调和物体振动频率有关。公元前 5 世纪, 古希腊哲学家恩培多克勒曾把声设想为是由非常细致的物质构成的, 它由声源发出, 传入人耳, 从而引起听觉。之后, 古希腊的亚里士多德则认为, 发声物体会使空气产生压缩和疏稀, 从而使声音传播开去, 并根据反射的原理来解释回声。他还区分了音调、音强度和音色等概念。我国的《吕氏春秋》记载的 “三分损益法” 就是把管 (笛、箫) 加长或缩短  $1/3$ , 听起来都很和谐, 这是最早的声学定律。

西方对声学的系统研究始于 17 世纪, 伽利略发现了弦振动的规律, 以后经过伽桑狄、牛顿、欧拉、伯努利、达朗伯和拉普拉斯等人的工作, 终于建立了声学理论。可以说从那时到 19 世纪, 几乎所有杰出的物理学家和数学家都对物体振动和声的产生原理作过研究。1738 年巴黎科学院用炮声测量声速, 其值为 332 米/秒, 与目前最准确的值 331.45 米/秒只差 1.5%。1687 年牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中阐明物体的振动要靠介质来传播, 并且推导出声速等于大气压与密度之比的平方根的结论。1759 年欧拉用更清晰的分析方法求得牛顿的结果。1747 年达朗伯首次导出了弦的波动方程, 并预言可用于声波。1816 年拉普拉斯指出, 只有在声波传播中空气温度不变时, 牛顿的结论才是正确的, 而实际在声波传播过程中。空气密度变化很快, 不可能是等温过程而是绝热过程。因此声速之平方应是大气压乘以比热比 (定压比热与定容比热之比) 与密度之比, 由此计算出的声速理论值与实验值完全吻合。

19 世纪以前大量声学研究成果的最后总结是由瑞利作出的。他于 1877 年出版两卷《声学原理》, 用统一的观点系统总结了声学的有关振动、传播、辐射等内容, 可说是集经典声学之大成, 开现代声学之先河。因此该书至今特别在理论分析方面常被人们引用。20 世纪以来, 由于电子学的发展, 使用电声换能器和电子仪器设备, 可以产生和接收、利用任何频率、任何强度的声波, 使声学研究得到了迅速的发展。

**学科内容** 声学的研究内容十分广泛, 除了经典声学外, 现代声学以建筑声学、电声学以及相应的电声测量开始, 后来随着频率范围的扩展, 又发展了超声学和次声学; 由于手段的不断完善, 人们进一步研究听觉, 发展了生理声学和心理声学; 随着对语言和通讯广播的研究, 发展了语言声学。20 世纪以来, 特别是近 40 年来, 由轻工业、交通事业的迅速发展, 噪声对环境的污染问题日益严重, 促进了噪声、噪声控制、机械振动和冲



击的研究。随着国民经济中大功率超声、高速喷气发动机等强声源的不断出现和日益广泛地应用，非线性声学便相应产生并得到很大发展。此外还有音乐声学、生物声学等分支学科，这些就构成了完整的现代声学体系。

现代声学的特点 到 19 世纪末，人们逐渐形成了一种看法，认为声学作为物理学的一个分支，已经很完善，故对它的研究兴趣逐渐下降。进入 20 世纪以来，由于电子器件的出现和放大器的应用，声学又有了新的的发展。现代声学研究主要涉及声子的运动、声子与物质相互作用，以及一些准粒子和电子等微观粒子的特性，所以现代声学既有经典性质，也有量子性质。另外，现代声学的基础理论方面均比较成熟，并已在经典声学中得到比较充分的发展。目前来看，它非常广泛地渗透到物理学其他分支或其他科学技术领域（包括工农业生产方面），甚至涉及到文化艺术领域，可以说人类的活动几乎都与声学有关，声学的边缘科学性质十分明显，而边缘科学是科学的生长点，因此有人认为声学将是物理学的一个最好的发展方向。

声学显微镜 (acoustical microscope) 利用声波来获得微观世界物质结构的可见图像的技术。它是集声学、压电学、光学、电子学、精密机械、薄膜材料、图像信息的采集、存储、处理、显示以及计算机控制等研究成果于一身的高科技仪器设备。它能把显微尺度的物体形态、结构放大到眼睛可清楚观察的尺度，达到显微成像的目的。目前最高分辨力已经超过了光学显微镜。

声学显微镜是上世纪 70 年代初研制成功的，根据其所采用的不同技术和原理，一般可分为激光扫描声学显微镜、机械扫描声学显微镜、光声显微镜和电子束声学显微镜等。这些不同类型、不同原理的声学显微镜各具特色，可应用于不同的领域。近 20 年来的发展中，机械扫描声学显微镜尤为突出，成为诸多类型声学显微镜中的佼佼者。声波是弹性振动在媒质中传播时所产生的波，声频范围是  $10^{-4} \sim 10^{14}$  赫兹。声波可以透过很多不透光的物体，利用声波可以获得这些物体内部结构的声学特性的信息，通过声成像技术，可将其变换为肉眼可见的图像，使用不同频率的声波就可以获得不同图像的分辨力。

要实现声学成像，必须将声信号转换为电信号或将电信号转换为声信号，这通常是由成像压电换能器来完成的。声学显微镜中通常是使用铌酸锂和氧化锌薄膜完成声-电转换，再利用扫描技术和声透镜技术，从而完成显微成像。附图是机械扫描声学显微镜原理图。发射单元的电信号激励发射换能器，产生一平面声波传入声透镜，该声波被声透镜聚焦到水中一个细小的焦点处，被观察样品放在通过焦点的焦平面上，再用另一共轴共焦放置的结构相同的声透镜接收透过样品的声波，并变成平面波，接收换能器把带有焦点处样品材料声学性质的平面声波变为电信号送至接收单元，这样在显示屏上得到仅一个点的像。如果使声束对焦平面上的样品作二维机械扫描，则可逐点逐行地将样品的声学性质取出，再通过电子技术，便可在显示屏上得到样品在声束扫描区的声学性质显微图像。这种显微图像反映了样品材料的声学参数变化，如材料的密度、声速、声衰减等，不同的声学性质，获得不同的图像灰度。

机械扫描声学显微镜原理图

声学显微镜的出现为人们提供了新的观察工具，目前在各方面得到广泛的应用。如在生物医学领域不需染色观察活组织，从而为该领域提供了全新的生物组织信息；在金相结构观察中，不必腐蚀就可提供对比度优于光学显微像的声学显微像；还可观察不透光材料内部的结构及缺陷等。目前以检测陶瓷发动机材料及其部件为目的的固体内部声显微成像及检测研究已获成功，内部分辨力达 20 微米。

**声压 (sound pressure)** 介质中有声波传播时的压强与无声波时的静压强之间的差值。用来描述声波在介质中各点的强弱。因为声波是疏密波，它通过介质时使该处的介质时而变疏，时而变密，从而使该处的压强随之变大变小。声压越大，声音越强；声压越小，声音越弱，一般以声压来衡量声音的强弱。由于介质中各点声振动有周期性变化，声压也随之有周期性变化，实际测量到的是它的有效值。声压单位为帕斯卡，即牛顿/米<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>)。

**声压级 (简称声级)** 声压的绝对值变化范围很大，从听阈到痛阈相差一百万倍以上，因此用声压的绝对值来表示声音的强弱很不方便，而用声压强度的相对大小，即用成倍比关系的对数值——“级”来表示声音的强弱，这就是声压级。它与风按级分成风级、地震按级分成震级相类似。

声压级的单位是“贝尔”。它是英文 bel 的音译，用电话发明人贝尔的姓氏命名。贝尔数表示两个声压之比的常用对数乘以 2 的数值，表示式为

$$L_p = 2 \lg \frac{P}{P_0}$$

式中 P 为声压，P<sub>0</sub> 为基准声压，一般取 2 × 10<sup>-5</sup> 牛顿/米<sup>2</sup>，是一千赫听阈的声压（人耳所能听到的声音的最低声压）；L<sub>p</sub> 为声压级的数值，单位为贝尔。贝尔的单位太大，常用其十分之一即“分贝”（dB）作单位。

**声级计** 测量以声级来表示声强弱的仪器。声级计用传声器接收所测声场的声波，传声器的电输出与被测声场的声压成正比。这声压的大小最后在声级计的电表或数字显示器上以声压级的形式表示。用声级计可测量各种可听声范围内的声级，主要用途是测量噪声的大小。由于人的听觉对不同频率的声音灵敏度不一样，对频率低和频率高声音的灵敏度都较低，如声级为 60dB 的 100 赫声音听起来与声级为 20dB 的 1000 赫声音的响度是一样的。为使声级计能反映出人听觉对响度的频率关系，声级计的频率特性应与这种关系相对应，因此在声级计中有 A、B、C 三种计权的频率特性（见图）。A 计权是为测量低声级声用的，中等声级声用 B 计权特性，非常响的声音用 C 计权来测量。后来又引入 D 计权的频率特性，专为测量飞机的噪声用。但现在已不完全按照原来的意义使用这些计权特性。在噪声测量中，不论声级的大小，常用 A 计权来测量，称为 A 声级。

#### A、B、C 计权的频率特性

**声压级 (sound pressure level)** 参见声压。

**声源 (acoustic source)** 能在弹性介质中激发起声波的振动体。通常是振动面或振动的空气柱。例如人喉的声带和各种乐器、扬声器都是常见的可听声声源。声源可以是固体（如音叉），也可以是气体或液体。

笛子是空气柱的振动发声的；汽笛是靠蒸汽通过汽笛时振动发声的；海水的波浪声是液体振动的结果。海豚、蝙蝠等动物能发生超声波；地震、核爆炸常产生较强的次声波。

各种类型的供发声用的换能器是人工制造的声源。把电能转化为声能的声源称为电声换能器，常用的有压电式、磁致伸缩式、电动式、电磁式和静电式等。把流体动能转化为声能的声源称为流体动力式换能器，常用的有旋笛、哨等。

**生产仿真技术** (simulant technology in production) 用电子计算机程序模拟生产过程或工程设计方案的特种技术。仿真技术能解决许多数学分析方法难以解决的问题。是一种软科学，有极大的潜在力。

在企业管理活动中，许多实际问题往往非常复杂，而且还夹杂一些不确定因素，因而难以建立准确的数学模型并进行求解。例如，要评价一项工程计划的投资效果，将会受到市场规模大小，产品价格，产品成长率，设备成本，研究开发费用，产品的可变成本，设备的经济寿命等多种因素的影响。而且其中许多因素是不确定因素，因此很难建立准确的数学模型。对于这样一类问题，采用电子计算机模拟的方法却能得到令人满意的结果。

仿真过程如下：首先提出问题；其次构造仿真模型，再次编写计算机仿真程序，并上机实现；最后分析仿真结果。常用的生产仿真方法有时间步长法仿真和事件步长法仿真。

**生理光学** (physiological optics) 研究光进入眼以后所发生的各种问题的光学分支。主要是光与色的问题，包括单眼与双眼的视觉，以及眼球范围内和从网膜传到脑以后的各种问题。

**生态平衡** (ecological balance) 又称自然平衡。生态系统在一定时间内结构和功能的相对稳定状态。在这种状态下，物质和能量的输入和输出接近相等，在外来干扰下，能通过自我调节恢复到原来的稳定状态。当外来干扰超过生态系统的自我调节能力而不能恢复到原来状态时，称为生态平衡被破坏。

在一个正常的生态系统中，能量流动和物质循环不断地进行着，生产者、消费者和分解者之间都保持着一种平衡状态。一方面是太阳辐射能和无机物通过植物的光合作用被转化为有机物存留于生态系统中，供给一切生命的需要；另一方面是生态系统中的有机物被各级消费者摄取，并在转化、呼吸和排泄等生理过程中不断地消耗掉。分解者又将动、植物残体分解和转化为无机物，回归周围环境。生态系统能保持动态平衡是由于它本身具有一种自我调节能力，这种能力取决于系统成分的多样性以及物质循环和能量流动途径的复杂性。一般说来，系统成分多样、营养结构复杂、协调能力强，就较易保持系统的稳定。这是因为能量流动和物质循环可通过多渠道进行，某一渠道若受阻，其它渠道可起作用。反之，系统成分组成单调、营养结构简单、协调能力小，就易使生态平衡破坏。例如北极地区的所有生物都直接或间接地依赖于地衣，若地衣的生长受到损害，整个生态系统的结构和功能就会遭到破坏。

生态平衡的破坏有人为原因和自然原因两种。自然原因主要是由于自然界发生的异常变化，例如火山爆发、地震、水旱灾害等。人为原因主要是指人类对自然资源不合理的利用、环境污染所导致的生态平衡的破坏

等。

**生态系统 (ecosystem)** 由生物群落及其生存的环境共同组成的、相互进行物质和能量交换的、相对稳定的系统。

生态系统的概念是在 1935 年开始提出的，它在生态学及有关领域中有着与日俱增的重要性。所有的生物群落或共同生活、相互作用的有机集合体都与它们的环境紧密相关，因此将群落和环境考虑为一个单独而又复杂的整体是合适的。例如，森林可被看作为一个具有统一功能的综合体。在森林中，有乔木、灌木、草本等植物，有昆虫、鸟、兽等动物，细菌、真菌等微生物，还有土壤、阳光、空气等非生物的环境条件。这些生物群落之间、生物与非生物的环境之间有一定的相互关系和相互作用，组成了一个实在的森林生态系统。生态系统是生态学研究的基本单位，也是环境生物学研究的核心内容。

**基本组分** 生态系统的范围大小不一，小至花丛、草地、有样品的培养皿、暖房，大至森林、海洋直至生物圈。每一生态系统都有一定的基本组分，即生产者、消费者、分解者和非生物的环境。“生产者”是指绿色植物，它具有叶绿素，能在阳光下进行光合作用，把环境中的无机物合成为自身的有机物，是生态系统的基础。人类和动物是“消费者”，它们以现成的有机物为食，如动、植物。其中直接以植物为食的属第一级消费者，以食草动物为食的为第二级消费者。“分解者”指肉眼看不见的细菌和真菌，它们能把动植物的遗体分解成植物所需的无机养料，它对生态系统中的物质循环有贡献，是生态系统必不可少的成员。非生物环境则为生产者、消费者和分解者提供立足之地和能源、原料。

**结构** 生态系统的结构，可分为营养结构、空间结构、时间结构等几种。

生态系统的营养结构就是上述四个基本组分的营养联系。这种营养联系可用食物链和食物网来表示（见图）。食物链中的每一环节称为营养级。如某一环节发

#### 生产者

食物链示意图生产者：草本植物；一级消费者：兔、鼠、麻雀、蚱蜢；二级消费者：狐狸、鼬鼠、蟾蜍；三级消费者：蛇；四级消费者：隼

生变化，就可能影响到整个生态系统的营养结构。例如为防止稻田中的害虫而大面积地喷洒农药，蝗虫等果然减少，但飞虱类却明显增加，这是由于农药也同时杀死了大量的蜘蛛，而它恰好是飞虱类的天敌。在自然生态系统中，食物链的营养级一般只有 4~5 级，这是由于当物质和能量通过食物链流动时只有部分能量被利用，构成生态金字塔。食物链越短，营养级之间的能量消耗越少。此外，污染物质也会通过食物链而被浓缩，即处在食物链上层的动物体内的污染物浓度较高，例如从海水到银鸥，DDT 的浓度提高了 150 万倍。

生态系统的空间结构是指大多数群落都有分层现象，如热带雨林生态系统中的几十米高的望天树等为最高，其次是椰子树等，再次是 1~5 米高的灌木，最后是草本植物。这种分层有利于植物充分利用阳光、水分、养料和空间，研究分层现象也有益于指导生产实践。

生态系统的结构是指系统的结构和外观随时间的变化，如温带落叶林的景象在冬夏两季截然相反。

**功能** 生态系统主要功能有能量流动、物质循环和信息流通三方面。

生态系统的能量流动是单向性的，并且层层递减，例如贮存在碳水化合物中的能量，它被呼吸作用所消耗，变成热能而散发掉，就再也不能被其他生物重新利用。地球上的一切能量都来自太阳，一般植物只能固定 1% 左右的太阳能。而能量通过食物链流动，并且在通过各营养级时被部分地消耗掉。所以，生态系统要维持正常的生命功能，就必定要依赖于太阳能量的转入。

生态系统的物质循环，包括由一种化合物转变为另一种化合物时，物质可被反复利用。例如进入人体内的碳原子，可能被结合为一个二氧化碳分子，以后又随着呼吸返回大气中，最后又可能重新固定到某株植物中去。生态系统的物质循环，需要多种元素，重要的有碳、氢、氧、氮、磷等。物质循环和能量流动有紧密联系，生态系统中的各种生物通过物质循环和能量流动而成为一有机的整体。

生态系统的信息流通包括营养信息、物理信息、化学信息和行为信息。物理信息和化学信息的传递较易观察和理解，如冬眠、迁徙和昆虫分泌某种化学物质借以传递信息等，属于较为简单的联系形式，而营养信息和行为信息的流通则属于高级联系形式。它们在沟通生物群落与其生活环境之间、生物群落内各种生物群之间的关系上有着重要意义，对生态系统的调节起着特殊作用。

生态系统处于不断变化、不断发展的运动之中，自身具有相互适应、恢复调节的功能。

**生物磁学 (biomagnetism)** 研究和应用物质磁性和磁场与生命活动和生物特性间相互联系和相互影响的一门学科。其研究内容主要包括：  
恒定磁场对于生物和人体的影响； 交变磁场对于生物和人体的影响；  
生物磁场和生物磁性的研究和应用； 生物磁技术和生物磁工程； 应用生物磁学。

自 1970 年 Cohen 等人第一次用 SQUID 系统测出了高质量的人体心磁图起，在 20 余年里，生物磁性的研究已涉及脑、心、肺、肝、四肢等各部分，揭示了大量有意义的生物磁现象及规律，并得到临床应用。在测量仪器和技术方面也取得快速进展。应用生物磁学原理，可以测定肝中铁的贮量。人体中铁的含量是健康状况的重要标志，而铁主要集中在肝区，铁是铁磁性物质，其质量磁化率  $x_p = 1.6 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$ 。设肝中含铁的浓度为  $c$ ，则整个肝组织表现出来的磁化率由下式决定：

$$x = (1 + \mu_0 c x_p)^{-1} (-9 + 1.6 \times 10^3) \times 10^{-6}$$

正常人肝中铁的浓度  $c = 3 \times 10^{-4}$ ，由此得到的磁化率  $x$  为负数，它表示正常人肝中铁的贮量使肝组织呈现抗磁性，一般比其他组织小约 5%，但当  $c = 5.6 \times 10^{-3}$  时，肝区就呈现顺磁性。在临床上，若是贫血症则反映铁的含量偏低，若有血色素沉积则反映铁的含量过高。大多数肝癌病人都有高铁的症状，所以准确地确定肝中铁的贮量有很大的临床价值。美国生物磁技术公司已生产了专门为测肝磁用的 SQUID 系统。磁测结果与肝穿刺分析结果二者基本符合。对电焊工、铸工及矿工等的职业病的早期防治。一般长期在富含磁性粉尘环境中工作的人员，肺部易受污染而得职业病，当采用 X 射线透视检查发现时往往已是晚期。而利用这些粒子的铁磁性和 SQUID 系统对磁信号的高灵敏度，即可检测出肺中很少的污染量，从而做到早期发现早期治疗。对生物体表面磁场分布的测定。科学家们将测到

的头皮表面的磁场分布，用于研究大脑中的神经活动；在脑磁测量中根据电与磁的对应关系，可精确定出电流源的位置，从而为人们认识自己的大脑提供了一条有效的途径。

近年来，生物磁学在国内外的研究十分活跃，且发展迅速，应用广泛。主要有以下几个方面：核磁共振成像，可以把生物体和人体内各部分的元素分布和不同状态显现出来；人体磁场和磁性；高梯度磁分离；磁疗，即应用磁场治疗，利用永磁片贴敷或旋转磁场、交流磁场或脉冲磁场加到病人患处或一定穴位以治疗疾病；农业上应用，较多的是磁水浸种育苗、磁水灌溉，可促进作物生长，达到增产的效果。

**生物力学 (biomechanics)** 运用物理力学方法和理论研究生物和人体在宏观与微观水平上的力学性质和行为的一门学科。它主要分析发生在生命活动过程中的各种力学现象和过程，了解生物和人体一部分相对另一部分以及整个机体在空间和时间上发生位移和运动的力学规律。早在解剖学和生理学启蒙时代，便开始了生物力学的研究，到本世纪 70 年代，生物力学发展成为一门独立的学科。它的研究领域大体上包括人体运动学、骨骼的力学性质、各种软组织及血液等的流变性质、血液在血管和微血管中的流动规律、脉搏的传输规律、心肺、肾和头颅的力学模型等。在生物学领域，生物力学的研究还包括：生物材料及结构特点、生物材料的结构与功能、动物的各种运动与能量消耗、关节滑液及各种生物粘液流变学、细胞力学、植物营养物质及水分的运输、种子的产生与落下等。通常用数学模型、本构方程表达其力学变化。生物力学与应用力学、理论力学、生理学、生物物理学、生物学、数学等学科有着紧密的联系。生物力学的发展正在改变传统生理学、病理学、病理生理学的某些观点和理论，并促进了这些学科的发展。

**生物物理学 (biophysics)** 运用物理学的理论、方法和技术研究生命物质的物理性质和生命现象的物理运动规律的一门学科。物理学同生物学的关系源远流长。17 世纪以来，就已经陆续开始了对生物的物理现象和物理性质的研究。如 1667 年英国的波意耳研究了鱼类的发光现象；1786 年意大利的伽伐尼研究了肌肉的静电性质，1845 年德国的亥姆霍兹将能量守恒定律应用于生物系统，认为物质世界包括生命在内都可以归结为运动。并研究了肌肉收缩时热量的产生、神经脉冲传导速度等等。“生物物理”这个名词最早出现于 1899 年英国物理学家皮尔生的著作《科学的方法》中。他列举了血液流体动力学、神经传导电现象、表面张力和膜电位、发光和生物功能等问题，并将其归结为“作为物理定律的特异事例来研究生命现象的生物物理和生物物理学”。1935 年，德尔布吕克、蒂莫维也夫—里索夫斯基及齐默发现了突变的物理本质。1945 年，薛定谔发表名著《生命是什么？活细胞的物理学观》，有力地推动了生物物理学的进展。与玻尔不同，薛定谔认为，对生命现象进行普遍的物理解释是可能的。他把生命现象归结为少数几个基本的物理问题，并且明确地解释了其中的一些问题，另外几个问题后来又由分子生物学作出了回答。当前生物物理学正在蓬勃发展，通常分为三个分支：分子生物物理学；细胞生物物理学；复杂系统的生物物理学。

从历史和未来看，以下六个方面是生物物理学的主要研究课题：揭示非平衡开放系统的主要规律，也就是找出生命的热力学基础；从理论

上解释进化和个体发育的现象；解释自身调节和自我复制的现象；从原子、分子的水平上揭露生物过程的本质，也就是找到活跃在细胞内的蛋白质、核酸及其他物质的结构和生物功能的联系；此外还要研究生命体在更高的超分子水平、细胞水平及在构成细胞的细胞器的水平的物理现象；

设计出研究生物功能物质及由这类物质构成的超分子结构的物理方法和物理化学方法，并对利用这种方法所得到的结果提供理论解释；对神经脉冲的发生和传播、肌肉收缩、感觉器官对外部信号的接收及光合作用等高度复杂的生理现象，提供物理的解释。可以预见，随着生物物理学这门学科的不断发展和壮大，在揭示生命现象的本质中必将发挥越来越大的作用。

**升华 (sublimation)** 物质由固态不经过液态而直接转变为气态的过程。升华仅在蒸发压强低于物质的三相点压强时才能发生。升华只发生在固体的表面。在升华的过程中，固体内的分子直接由点阵结构转变为气体分子，此时，一方面要克服分子间的结合力做功，另一方面还要克服外界压强做功，因此升华时要吸收热量。单位质量物质升华时所吸收的热量叫做升华热。在三相点，升华热等于熔解热和汽化热之和。

许多物质如碘、碘化钾、硫、磷、樟脑等在常温下即有显著的升华现象发生。

与升华相反的过程叫做凝华。

**升力 (lift force)** 亦称举力。飞机飞行时气流作用于机翼的方向向上的力。这种升力也叫动升力，以区别于静升力（即浮力）。升力与机翼形状有关，通常机翼被制成上侧面凸出、下侧面微凹、上下边不对称的形状，这样当机翼相对空气运动时，机翼上方的空气流速增大，下方流速减小（附图中表现为机翼上方流线较密，下方流线较疏），根据伯努利方程，机翼下面的压力大于上面的压力，从而产生升力。飞机在空中飞行时，竖直方向上的升力与重力相平衡。

升力

**失重与超重 (weightlessness and overweight)** 在非惯性系中所称得物体的重量（视重）与原有重量（在地面称得物体的重量）不一致的现象。如视重小于原有重量称为失重；视重大于原有重量称为超重。当我们乘升降机以加速度  $a$  下降时，会感到重量好像在减轻，这是“失重”。而当升降机以加速度  $a$  上升时，会感到重量好像在增加，这是“超重”。这些现象可解释为：由于升降机有向上或向下的加速度  $a$ ，在升降机中的物体就受到惯性力  $-ma$ ， $m$  是物体质量。视重为  $W = |mg - ma|$ ，这里  $g$  是重力加速度。若升降机以加速度  $a = g$  下降，则视重  $W = 0$ ，物体处在失重状态如升降机以加速度  $a$  上升，此时  $a$  与  $g$  方向相反， $W > mg$ ，物体处于超重状态。当人造卫星沿轨道自由飞行（不处于推进状态）时，以卫星舱为参考系，则舱内物体的离心力与重力平衡，物体的视重等于零，物体处于失重状态；当火箭竖直向上加速推进时，有很大的向上加速度，舱内宇航员要经受很大的向下惯性力，视重大大超过宇航员本身原有重量。为避免这种明显超重而带来的不良生理反应，例如局部压强太大和全身血液下沉而使脑部和胸部缺血，宇航员必须穿上特殊服装并采取仰卧姿态。

**施汝为 (1901 ~ 1983)** 中国物理学家，中国磁学研究的奠基人。1925年毕业于南京大学物理系，后在清华大学任教。1930年赴美国留学，

1932 年获伊利诺大学物理系硕士学位。1934 年获耶鲁大学物理系博士学位。同年回国后，先后被聘为中央研究院物理研究所研究员，同济大学物理系教授，中国科学院物理研究所研究员、所长，同时担任中国物理学会副理事长等职。1955 年当选为中国科学院数学物理学化学部学部委员。毕生致力于磁学研究。1931 年发表《氯化铬及其六水合物的顺磁磁化率》的论文。1934~1936 年完成关于铁—钴和镍—钴合金单晶体的磁晶各向异性的研究。1939~1940 年对坡莫合金和磁铁矿晶体的磁畴粉纹图的研究，开创了我国磁畴的实验研究工作。1951 年研究了铝镍钴永磁合金的热处理问题，并发表《永磁铁合金热处理的初步报告》等论文。此外，在我国科学事业发展规划的制订、中国科学院物理研究所的科研组织领导和科学人才的培养等方面，也作出了重要贡献。

**实践型试题 (Practical work)** 要求考生通过实际动手去解决一个较简单的实际问题的试题。不同于学生实验，实践型试题要求学生完成的一般都是比较简单但又是没有正式做过的“非正规小实验”。学生必须在动手实验的基础上，给出书面形式的解答。每个实践型试题给出一组简单的实验装置，要求学生按规定操作、观察、记录并分析实验结果。由若干道实践型试题组成一次实验测试。这种测试使考生置于较紧张的手脑并用状态，显然这是书面形式的“模拟实验题”无法代替的。以下是一道较简单的实践型试题的实例：用一把带刻度的直尺，一架天平，一块置于离桌面 1.5 米高处与桌面平行的硬纸板，求出一根橡皮筋的弹性系数。（提示：将橡皮筋在直立的尺上拉伸至一定读数处，使其恰好弹射至桌面上方的纸板。）

实践型试题主要测试以下几方面的评价目标和技能：能按规定的要求和步骤进行实际操作，仔细正确地观察现象。正确地使用仪器和装置进行测量（包括能用所给器材设计简易可行的测量方法），能按仪器的精度读数。能用贴切的科学语言（文字、草图等）正确描述所观察到的现象，记录测量结果。能估测某些未知物理量的数值，能根据实验数据进行简单运算并正确作出图线。能运用基本物理原理简洁地解释所观察到的现象和处理分析实验结果。能看出实验器材安装和使用中的错误并加以纠正。

**实物 (real object)** 物质存在的一种基本形式。指由具有静止质量的分子、原子组成的，有定域特征的物质。实物粒子的质量、能量等定域在一定体积内，且呈分立的状态。实物粒子所占据的空间不能同时为另一个粒子所占有。实物区别于物质的另一种形式——场，但实物与场又是不可分割的，任何实物粒子都不能脱离有关的场而独立存在，一切基本粒子都可以看作是相应场的最小单位，如电子联系电子场，光子联系电磁场，介子联系介子场等。

**实验及数据分析试题 (experiment and data analysis work)** 测试实验能力和实验数据分析、处理能力的试题。实验及数据分析试题所给出的问题情景一般是考生做过或没做过的实验。有关的实验或测量原理必须是考生运用已有的物理知识能进行分析或解释的。试题主要测试以下实验能力：要求学生能应用已有物理知识分析、推导问题中所涉及的某些公式，解释实验原理、步骤和现象，画出实验装置（或在电学实验考查中，会画电路图，并根据图用画出的线表示导线，将仪器连接起来），或指出



装置中的错误，知道注意事项。能分析题目中以数表和图线方式给出的数据，掌握以各种基本函数形式表述的公式与图线之间的互相转换的技巧。例如能将所给非线性关系数据转换成用线性图像来表征的关系。能正确选取坐标轴的标度，构设适当的坐标轴和作出图线。能认识和描述图线所表征的某种规律，能正确应用外延和内插的技巧，能对图线进行分析，诸如找到物理量的最大、最小值，理解物理量的变化率、截距和图线下面积的物理意义，并进行演绎计算（或估算）。能分析有关物理量的有效数字、量纲和单位，能对所给数据和实验信息中的误差作出分析。能根据给出的指定实验器材，自己设计某些较简单的物理实验来测定某些物理量，如测定某些电器的电功率。

**实验课题研究（Project work）** 又称实验课题测试。一种开放型的评价方式，即要求学生在某阶段中（若干周或若干月）用实验手段独立完成某一个课题的研究，所研究的课题涉及物理知识的广泛应用。这种测试手段着眼于过程评价而不强调成果评价，即并不局限在纯物理知识范围内去评价课题的价值，而是评价学生发现问题、解决问题的能力、探索和研究的能力、形成和检验假设的能力、克服和处理障碍的能力。实验课题研究要求学生完成以下几方面的工作，并最后以研究报告的形式给出：提出课题并对所要解决的课题进行初步分析。收集有关资料、信息。设计实验研究步骤。选取（包括设计、自制）有关装置、器材。实施实验研究计划，保持观察记录，必要时对原计划进行修改。对实验结果进行分析评价。

实验课题研究不仅仅是一种各项科学能力的综合评价手段，更具意义的是通过这种评价方式让学生初步体会一个简单但又完整的科学研究过程，使他们有机会能较集中地展示在学习中所获得的各种技能。这是一种对教育目标进行较全面评价的综合性过程评价技巧。但缺点是评分带有明显的主观判断因素，而且评分人员（或教师）必须具有相当的水准。

**实验能力（abilities of performing experiment）** 一种有目的的操作能力，是指对实验技能和方法的掌握。中学物理教学中，学生应初步具备的实验能力是指会正确使用仪器进行观察、测量和读数，会分析处理实验数据并得出正确的结论，了解误差概念，会设计一般的数据记录表格，会写简要的实验报告。教学中对学生实验能力的基本要求是：

(1)能规范地使用基本测量仪器，这包括：明确仪器的测量范围和精密程度；对某些仪器如电表、游标卡尺等，在使用前，必须调节零点，或记下有无零点误差；按使用规则和程度进行操作；正确读取、记录数据，了解读数的误差及减少的方法。

(2)正确、熟练的操作技能，即能按实验的目的要求，将有关设备、仪器、部件等实验用具组装起来，做到装置正确，布局合理，便于操作观察。实验前进行必要的检查和预备性调节，实验时能按一定步骤正确、协调地进行操作、调节和记录。

(3)具有处理实验数据的能力。处理实验数据的方法主要是公式法和图像法。公式法是将直接测量得到的一些数据，填入所设计的表格中，根据一定的原理公式进行计算，得出正确结论。图像法是根据所取得的实验数据，描绘出图线，由图线总结出一般规律并求出未知量。

实验能力的较高要求是独立地制订实验方案的实验设计能力，即根据

目的，提出实验原理，明确需要直接测量的物理量，提出需要的仪器和设备，制订出合理的实验步骤，设计出记录数据的表格，进行独立操作。在实验中，能找出和排除实验中的一般故障（实验中的某些故障排除不单是一种操作技能，而是一种综合运用理论知识和实验技巧的能力），选择合适的方法处理实验数据，以完成预期的目的。

**实验中的观察**（observation in experiment）贯穿于实验过程的始终，有目的、有计划地搜集材料、发现问题的感知过程。例如，法拉第在电磁学中的很多重大发现，是与他在实验中敏锐细致的观察分不开的。在物理学发展的初期，观察主要依赖于人自身的感官。例如开普勒就是依赖于眼睛对行星运动的直接观察总结出行星绕日运动的三定律的。随着对物理现象研究的深入和发展，人们自身的感官早已不能胜任。在实验中往往从两个方面解决观察问题。一方面是用间接的方法使某些物理现象和过程以更加具体的形式显示出来，例如用云雾室观察带电粒子的径迹。更重要的方面就是改进和研制先进的直接进行观察的仪器设备。例如电子显微镜和射电望远镜。从本质上来说，这些仪器设备都可以看作人的感官的延长和扩大。

宏观物理现象和微观物理现象有着不同的特性和规律，这就决定了对它们的观测有不同的特点和内容。第一，对于宏观物体来说，观测它在任一时刻的位置和速度是必要的，也是可行的。对于微观粒子来说，这样做既没有必要也没有可能。因为微观粒子既有波动的特性，也有粒子的特性，经典物理中一个具体客观实体在某一时刻的位置和速度的概念已不适用。微观粒子本身有它许多特有的量需要观察测量，如自旋、半衰期、衰变方式等。第二，就是仪器对所观察对象本身的影响。观察仪器对测量宏观物体各个物理量不会造成什么影响，但对微观粒子则有相当大的影响。第三，在微观物理领域，微观粒子的数目极大，不可能设想在一个系统内所有的粒子都具有相同的运动特征。但在一定的条件下，又存在着某种平均的、稳定的趋势。所以，对于微观物理现象的观察，还存在着统计的观念。

**实验中的机遇**（chances in experiments）由于偶然的因素，物理实验过程中有时会出现实验者并未意料到的、有重要科学价值的新现象。如果已知的物理理论不容易解释这类新现象，就常常预示着物理理论有新的发展，是新理论产生的先兆。

物理实验中的机遇，虽然向人们透露了物理运动的某些信息，但是人们能不能把握这些信息，进而探索到新的物理特性和规律，还有赖于人们的主观因素。“在观察的领域中，机遇只偏爱那种有准备的头脑”。实验者要有丰富的知识积累和思想准备，才能迅速整理实验中的新发现，探索有价值的新东西，奥斯特发现电流磁效应就是一个典型的例子。而查德威克发现中子的过程则生动地说明了不同知识积累和思想准备的人对机遇会有不同的解释，而问题的关键正在于对机遇的解释，即使能捕捉到的机遇也不是每个人都能从中得到有价值的科学发现的。物理学中很多有意义的研究课题和重大的研究领域，都是以某些机遇作为前导而发展起来的，例如整个电磁学领域是以奥斯特对电流磁效应的发现为前导而发展起来的。

**时间**（time）物质运动过程的持续性和顺序性，被用以描述事物之间的顺序。时间的物理性质主要通过它与物体运动的各种联系中表现出来。牛顿认为：“绝对的、纯粹的、数学的时间，就其本性来说，均匀地

流逝而与任何外在情况无关。”反映在伽利略变换中，时间与参照系无关，与空间位置无关。

在狭义相对论中，爱因斯坦否定了绝对时间的存在，指出不同惯性系的时间之间遵从洛伦兹变换，根据这种变换，同时性不再是绝对的，相对于某一参照系为同时发生的两个事件相对于另一参照系可能并不同时发生。时间间隔也成为相对量，运动的钟相对于静止的钟变慢。在量子力学中，对时间的概念提出了更根本的问题，即对时间的连续性提出了质疑，并提出了最短时间间隔的观点，认为时间间隔的最小单位（称为时量子）是至今测察到最大辐射频率的倒数，等于  $4.5 \times 10^{-24}$  秒。时间的测量一般以稳定的周期性运动为基础，以选为标准的周期运动的周期的某一倍数或分数为时间单位。

**时空观 (outlook of time and space)** 关于时间和空间的根本看法或根本观念。古代时空观以直观经验和思辨为基础，具有朴素的特点。如我国古代后期墨家已提出“宇，蒙东西南北”，“久，合古今旦莫”，认为宇（空间）指一切具体场所的总和，久（时间）指一切具体时刻的总和；还认识到空间、时间与具体实物运动的一定联系及空间与时间的一定联系。

近代时空观是在自然科学发展的基础上形成的。哥白尼日心说的创立，为揭示时空的客观本质和特性创造了条件。布鲁诺、伽利略在捍卫日心说的斗争中，坚持时空是物质运动存在的形式，并提出了时空是无限的思想。牛顿在创立经典力学体系中，承认空间、时间的客观实在性，但又提出“绝对空间”、“绝对时间”的观点，从而把时空与物质运动割裂开来，并认为空间、时间是绝对不变的。这种形而上学的时空观是当时机械力学的产物。

爱因斯坦在狭义相对论中否定了牛顿的绝对时空观，揭示了作为物质存在形式的空间和时间在本质上的统一性，以及空间、时间与物质运动的联系，从而引起了时空观的一场革命。在广义相对论中，揭示了现实的物理空间不是平坦的欧几里得空间，而是弯曲的黎曼空间：空间弯曲的程度（曲率）取决于物质分布状况，空间曲率体现了引力场的强度。于是进一步表明四维时空与物质的统一性，指出空间、时间不能离开物质运动而独立存在，这就在更深的意义上否定了牛顿的绝对时空观。

**示波器 (oscilloscope)** 是最常用的电子测量仪器。可用来观察各种电信号的波形；测量波形的有关参数。例如，测量正弦波的峰—峰值、周期、频率、位相等。示波器与有关部件组合成为多种专用的测量仪。例如晶体管特性图示仪、材料的伏安特性测定仪和电路网络的幅频、相频测量仪等。

示波器的基本组成部分是阴极射线管 (CRT) (图 1)，或者称为电子束管。“阴极射线管”名称来自早期气体放电管，因为气体放电管内的“射线”来自可观察到的阴极。阴极射线管内电子束由电子枪形成，首先由阴极灯丝加热并发射电子，通过几千伏电位差将电子加速并聚焦成一束射线，经偏转板使电子束偏转，最后电子束撞击荧光屏发出可见光斑。

为了使光斑组成各种波形，阴极射线管还需垂直和水平偏转板。如果偏转板不加任何电压，电子束不会偏斜，一直打到荧光屏的中心。当电压信号加到水平偏转板时，电子束受水平力而在水平方向偏转，不变的直流

电压加到水平偏转板上时，电子束射出的光斑将停留在屏的水平方向固定的位置。交变的电压加到水平

图 1

图 2

偏转板上，会使电子束来回偏转，许多光斑变成一条水平的虚实相间的直线。如果交变电压的频率足够高，水平的直线成为一条实直线。这是由于荧光屏的亮度衰减相对于人们眼睛的视觉暂留时间更慢的缘故。同样地，电压信号加到垂直偏转板会形成垂直的实直线。不论在水平还是垂直方向，对电子束偏转所加的电压值都与电子束的光斑离开屏中心的距离成正比。

为了观察交变的电压波形，通常总是希望显示电压随时间的变化（即电压—时间图线）。研究的信号加在垂直偏转板，示波器内部有垂直放大器可放大输入的弱信号，还有垂直衰减器可减小输入的强信号，因为偏转电压太大或者太小都使显示的波形不完整或者分辨不出；示波器内部还有水平放大器和衰减器，作用与垂直相同。但是水平线性的时间轴（ $x=vt$ ）需要随时间线性增加的偏转电压，称为扫描电压，扫描电压的波形应是锯齿状的，所以也称为锯齿波，如图 2 所示。当电压匀速增加时，光斑匀速地在荧光屏上由左向右扫描，即移动。当电压突然降到零时，电子束瞬间飞回到初始位置，并且开始另外一次水平扫描即锯齿波的下一个扫描开始。当慢扫描速率锯齿波电压加到水平偏转板时，光斑从左到右周期性地运动可以看得非常清楚，当快速扫描时，只能看到连续的轨迹即是一条水平的直线，因为眼睛跟不上光斑的移动，示波器内部还设有可变扫描速率的锯齿波发生器作为水平信号。

假设正弦信号的形式为  $V=V_0\sin 2\pi ft$ ，作为垂直偏转板的偏转信号，根据前面讨论，电子束上下运动，在屏上出现一条垂直线。如果扫描电压加到水平偏转板，扫描的速率取得适当，即扫描频率与  $f$  相同，那末作用在垂直板上的正弦信号随时间的变化轨迹图就出现在荧光屏上，图 3 画出了两种信号作用的合成波形。

正弦波轨迹的反复出现，如果波形是稳定在荧光屏上，我们就说信号已经“同步”。同步时输入正弦电压的频率等于扫描频率，对于每一个扫描，在屏上出现一次正弦波形；如果正弦信号的频率是扫描频率的两倍，那末两个正弦波出现在荧光屏上，若垂直输入信号的频率是扫描频率的倍数，在屏上会出现相同倍数的重复波形个数。一般而言，扫描频率和输入电压信号的频率是整数或者半整数倍时，在屏上就会出现稳定的波形。如果波形一个周期所占的水平长度为  $4.0\text{div}$ （分度），则周期就是  $4.0$  与扫描速率单位的乘积，若扫描速率为  $3.0\text{ms/div}$ ，则周期就是  $4.0 \times 3.0=12.0$  毫秒，待测波形的频率是周期的倒数，即频率为  $83.3$  赫兹。

图 3

图 4

正弦电压的频率也可以用另一个校正过的正弦信号与之比较来测定。

若两个正弦信号频率和位相都相同，例如  $x=A\sin 2\pi ft$ ,  $y=A\sin 2\pi ft$ ，那末屏上看到的是一条如图 4 所示的倾斜直线。若  $y$  信号频率是  $x$  信号的三倍，那末得到如图 5 所示的利萨如图形。

假定两个正弦信号有相同的频率而不同的位相，

图 5

即  $x=A\sin 2\pi ft$ ,  $y=A\sin(2\pi ft - \phi)$ ， $\phi$  为初位相或者位相差，则屏上将会出现椭圆，如果位相差为  $90^\circ$ ，则椭圆变为一个圆。

**世界时 (universal time)** 由格林威治子夜算起的太阳时，即通常所说的格林威治时间，也就是在格林威治子午线上测得的地方时间。这样的选择对于天文和航海部门是适宜的，但对于一般人来说并不方便。由于世界时以地球自转为标准，通过天文观测来确定，因此受到地极移动和地球自转季节性变化的影响，严格说它是不均匀的。

**室内声学 (room acoustics)** 一门研究室内声音的传播过程和特性以及听音效果的学科。室内听音效果是否良好，取决于是否满足使用者的听觉要求，它主要涉及：**合适的响度**，语言和音乐的声级均应高于环境噪声，合适的 A 声级为  $70 \sim 80\text{dB}$ ，对于音乐则要求更高些；**高的清晰度**，语言和音乐均要求声音清晰，而语言则要求更高；**足够的丰满度**，它的含义是余音悠扬（或称活跃），坚实饱满（或称亲切），音色浑厚（或称温暖）；**声音不失真**，无回声和噪声的干扰。为了达到上述要求，首先要有合适的混响时间。室内的声源停止发声后，声能继续在各个界面之间反射，每反射一次，能量被界面吸收一次，声能逐渐减弱，这个现象称为混响，声级衰变  $60\text{dB}$ （声强降低到百万分之一）所需的时间称为混响时间。短的混响时间可保证语言清晰，但会带来降低声音强度的后果，也会使听音乐感到干涩。适当长的混响时间可增加活跃气氛，使声音丰满，但最佳混响时间的选择还与人们的主观感觉有关。一般来说，供讲演用时要求短些，供歌唱和演奏音乐用时要求长些。对最佳混响时间频率特性则要求中频平直，低频上升，高频稍下降或平直，其次还要考虑声场分布和噪声场等因素。

室内声学设计中，除了要考虑上述混响时间的合理选择诸因素外，还应注意房间的体积、形状以及界面吸声材料等。**房间的体积**：由于人的自然声功率是十分弱的，房间过大时，将不能保证足够的响度。因此，当不用扩声系统时，报告厅容积不应大于  $3000\text{m}^3$ ；当用扩声系统时，作为音乐厅容积可达  $2000\text{m}^3$ 。**房间的形状**：设计时原则上要充分利用直达声，尽量争取和控制前次反射声，避免回声和声聚焦的产生。**界面吸声材料的处理**，是解决音质和噪声控制的重要措施之一。主要采用诸如玻璃棉、矿棉等多孔吸声材料，还可采用共振腔吸声结构和薄板吸声结构。设计时还应考虑建筑隔声，主要包括对空气声和撞击声的隔绝。

**势能 (potential energy)** 又称位能。物质系统内各物体之间或物体各部分之间由于存在保守力相互作用而具有的能量。物体相对位置发生变化时，保守力做功只与系统的初位置和末位置有关，所以势能只是系统内各部分相对位置的函数。对这个函数的要求是，系统内各部分相对位置发生变化而使这个函数值获得的增量，正好等于外界在这个变化过程中克服保守力对系统所做的正功，这个函数称为势能函数。一般情况下，只

能确定势能的差值，若欲定出势能的对绝对值，就必须首先规定一个作为标准的零点。例如，对于地球与地面附近的物体，往往以地面作势能零点。按系统内相互作用性质的不同，势能可分为重力势能、弹性势能和引力势能等。重力势能。重力是保守力，把物体沿任一路径升高  $h$  时，外力克服重力做了正功  $mgh$ ，这应该是势能函数值的增量，取  $z$  轴竖直向上，于是势能函数可取为  $mgz+c$ 。令  $c=0$ ，这相当于假设  $z=0$  的水平面上重力势能值为零，物体离水平面高度为  $z$  的重力势能就是  $mgz$ 。弹性势能。最简单的例子是在轻质弹簧作用下具有的势能。取物体在平衡位置的弹性势能等于零，弹簧伸长或缩短  $l$  时，弹性势能是  $\frac{1}{2}k(l)^2$ ， $k$  为弹簧的倔强系数。引力势能。两个以万有引力相互作用的质点系，规定它们相距无穷远时的引力势能值为零，则它们相距  $r$  时的引力势能是  $-Gm_1m_2/r$ ， $G$  是万有引力常数， $m_1$  和  $m_2$  分别是两个质点的引力质量。

**守恒定律 (conservation law)** 物理学中通过长期研究并从大量实验结果中总结出来的一类重要定律的总称。迄今发现的守恒定律可分为两类，一类是普适的守恒定律，它们对于任何相互作用现象都成立；另一类是非普适守恒定律，它们仅仅对于某些类型的相互作用现象才成立。普适的守恒定律有能量守恒定律、动量守恒定律、角动量守恒定律、电荷守恒定律，以及仅在微观粒子物理现象中存在的重子数守恒定律和轻子数守恒定律等。非普适的守恒定律主要出现在微观现象中，如同位旋守恒定律（仅在强作用现象中成立），宇称守恒定律（弱作用现象中不成立），奇异数守恒定律（弱作用现象中不成立）等。

每一个守恒定律与一个守恒物理量相对应，例如能量、动量、角动量、电荷、重子数、轻子数、同位旋、宇称、奇异数等都是守恒物理量。守恒定律表明，一个孤立系统由于相互作用而发生变化时，相应的守恒量可以从系统中的一处转移到另一处，从一个物体转移到另一个物体，从一种形式转移到另一种形式，但是其总量保持不变。

守恒定律与对称性密切有关，例如能量守恒定律、动量守恒定律和角动量守恒定律分别与时间均匀性、空间均匀性和空间各向同性有关，而宇称守恒定律则与空间反演对称性有关。

**受激辐射 (stimulated radiation)** 处在较高能量状态的原子、分子或离子等微观粒子，在外界光场激励下，向较低能量状态跃迁过程称为受激跃迁。在受激跃迁过程中，微观粒子所减少的能量将以光子的形式发射出来，称为受激辐射。

受激辐射光子与外界光场的频率和偏振方向相同。如果外界光场中存在着几种频率不相同的光子，则只有一种光子能够对处于特定的高能态的微观粒子发挥影响，使它产生向特定的低态作受激跃迁。这种光子的能量与微观粒子在受激跃迁过程中减少的能量相等。外界光场中其它光子的存在与这一受激跃迁过程毫无关系。光子的能量为  $h\nu$ ， $h$  是普朗克常数， $\nu$  是频率。外界光子的能量与受激跃迁过程中能量减少量相等，而受激跃迁过程必定会发射受激辐射光子。因此这两种光子的频率相同。此外，受激跃迁是在外界光场的感应下产生的，因而两种光子的传播方向和偏振特性也相同。

**受控热核聚变 (controlled thermonuclear fusion)** 在可

以控制的条件下发生大量原子核聚变反应。轻原子核通过核聚变结合成较重原子核时会释放出巨大能量。可控热核聚变目前尚处于研究阶段，是人们预言的未来能为人类提供取之不尽有用能量的新来源。受控热核聚变的燃料如重氢（即氘  $^2_1\text{H}$  或 D）普遍存在于自然界的水中，重水（ $\text{D}_2\text{O}$ ）约占水分子数的七千分之一。聚变燃料具有很高的热值，1 千克聚变燃料氘相当于约 4 千克裂变燃料铀—235，8 千余吨汽油，1 万余吨煤。此外核聚变与核裂变相比较，除燃料丰富价廉外，放射性污染比较少。聚变过程中的氦虽然是放射性元素，但其放射性强度低，生物效应较弱，半衰期较短（12 年），比裂变碎片的放射性处理要简单得多。

由于原子核都带正电，原子核要发生聚变必须具有足够的动能，才能克服库仑斥力而使彼此非常接近，以致发生聚变反应。太阳等恒星温度极高（达到  $10^7\text{K}$  以上），如此高温下原子核以很高速率做无规则运动，连续发生碰撞，形成大量持续的聚变反应，这是这些恒星天体的能量来源。人工聚变目前只能在氢弹爆炸或由高能加速器产生的高能粒子碰撞中实现。如何使燃料加热到极高温，同时又要将高温下这种完全电离体（即等离子体）约束在很小范围，以便获得持续的核聚变，这是目前科学研究中的一个重要课题。现在常采用两种方法尝试获得受控热核聚变反应，即惯性约束方法和磁约束方法。例如利用激光束实现惯性约束的一种方案是：在一个直径约 0.4 毫米的小球内充以 30 ~ 100 大气压的氘—氦混合气体，让强功率激光均匀地从四面八方照射小球，使小球内的氘—氦混合体的密度达到普通液体密度的数千倍，温度达到数千万度，从而引发核聚变反应。此外还有用电子束、重离子束等实现惯性约束的方法。

在受控热核反应中更广泛采用的是磁约束方法。磁约束装置的种类很多，目前最常用的是环流器，又称“托卡马克”。此外还有仿星器、磁镜等装置。环流器主要部分是几万甚至十几万高斯的环形强磁场。高温高压等离子体中的荷电粒子在磁场中受洛伦兹力作用而绕着环形磁力线做螺旋运动，从而被约束在一个区域内。与此同时沿环绕方向的等离子体电流通过焦耳热效应而被加热。

**受迫谐振动 (forced vibration)** 又称强迫振动。物体系统受外力作用而被强迫进行的振动。以  $H\cos pt$  表示强迫力，以  $x=0$  表示平衡位置，这时回复力和阻尼力分别是  $-kx$  和  $-r dx/dt$ ， $k$  和  $r$  分别是弹性常数（例如弹簧的倔强系数）和阻尼系数，受迫振动的运动方程是

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = H \cos pt$$

$$\text{或} \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = h \cos pt.$$

这里  $\beta = r/2m$  是阻尼因数， $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  是固有角频率， $h = H/m$ 。小阻尼（ $\beta < \omega_0$ ）时方程的一般解是

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) + A \cos(pt + a),$$

式中  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$  是撤去强迫力时阻尼谐振动的角频率。

这个解的第一部分  $x_1 = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi)$  是阻尼谐振动的响应，它随时间增加而衰减，所以也称为暂态响应。第二部分  $x_2 = A \cos(pt + a)$

是对强迫力作用的响应，它不随时间衰减，所以又称为稳态响应。式中

$$Aa = \frac{H}{\sqrt{(k - mp^2)^2 + (rp)^2}},$$
$$\alpha = \arctg\left(\frac{rp}{k - mp^2}\right)$$

$A/H$  是稳态响应的振幅与激励振幅（强迫力振幅）之比，称为增益函数，是稳态响应和激励的相位差。对于给定的振动系统（给定  $m$  和  $k$ ）和在一定的阻尼（给定  $r$ ）作用下， $A/H$  和  $\alpha$  只与激励的角频率  $p$  有关，它们分别描写了振动系统的幅频特性和相频特性。

### 幅频曲线

### 相频曲线

从幅频曲线可以看出，在小阻尼下，当激励频率  $P$  接近系统固有角频率  $p_0$  时，幅频曲线有一凸起的峰，这时表示稳态响应的振幅最大，阻尼愈小，峰愈陡，这时的激励频率愈接近固有频率。当激励频率与固有频率接近时，稳态响应振幅急剧增加，这种现象称为共振，或者称为振幅共振。在共振时，系统的增益取极大值，即受迫振动最为激烈。

**受抑全反射滤光镜**（frustrated total reflection filter）一种抑制全反射的干涉滤光镜。牛顿在研究全反射时认为，光可能进入光疏媒质并在一小段抛物线路径上传播，然后再回到光密媒质。这种在光疏媒质一方出现的波，称为瞬逝波。瞬逝波在光疏媒质内传播的距离很短，且与波长有关。光的电磁理论证明，应该有这种瞬逝波存在。1943 年古斯和亨兴从实验上作了证实。从图 1 可以看到，全反射光离开入射点一段距离  $x$ ，这称为古斯—亨兴移位。也可以认为，入射光行进到光疏媒质里深度  $x$  处后才被反射。或者干脆不管光进入光疏媒质有多深，只说全反射光对几何反射光有

垂直距离  $d$  的侧移。这些  $x$ 、 $z$  和  $d$  的值都很小，且与入射角和光的偏振有关。

如果在光作全反射前进入光疏媒质中一小段距离时遇到光密媒质，则光必然进入其中。中间的一层光疏媒质越薄，透过的光就越多，结果使全反射受到抑制。反复交替地排列光疏和光密媒质，由于透过的光与波

### 图 1 瞬逝波

长有关，所以可作为滤光镜。透过光的波长宽度由光疏媒质层的厚度控制。受抑全反射滤光镜的结构如图 2 所示。在两块相同的玻璃直角棱镜中间，按光入射方向交替地镀以  $MgF_2$  膜和  $ZnS$  膜，使折射率排列次序是：1.52—1.38—2.40—1.38—1.52。

### 图 2 受抑全反射滤光镜

瞬逝波理论在现代科技中有重要应用。例如在表面物理研究中，当光照射在金属的表面或界面上时，会出现一种其振幅随离开界面的距离增加而指数衰减的表面等离子激波。如果在一定条件下使瞬逝波与表面等离子



激波相耦合，就会在全反射区产生一个明显的衰减峰。通过对这种衰减峰的位置、深度和半宽度等参数的测量，可以获得金属表面物理特性的有用信息。这种方法称为衰减全反射。近年来，这种方法已在表面物理的研究中得到应用。

**疏密波 (wave of condensation and rarefaction)** 见波。

**输入输出缓冲 (Input/Output buffer)** 通道技术提供了 CPU、通道和 I/O 设备之间并行操作的可能性，但往往由于通道数量不足而产生“瓶颈”现象。引入输入输出缓冲可缓和“瓶颈”现象，显著地提高 CPU、通道和 I/O 设备之间的并行操作程度。引入缓冲的另一作用是可以使 CPU 和 I/O 设备间速度不匹配的情况得到改善。事实上，凡是数据“到达率”和“离开率”不同的地方都可利用缓冲。此外，缓冲的引入还可减少中断 CPU 的次数，放宽 CPU 对中断的响应时间。由于经济上的考虑，除了在最关键的地方采用少量必要的硬件缓冲器外，大都采用软件缓冲。软件缓冲是插在内存中划出一片具有 n 个单元的区域来充当缓冲器，并设置输入指针和输出指针。对输入而言，输入指针指示了存放下一个输入数据的地址，每当输入一个数据后，输入指针加 1。对输出而言，原理相同。

**输入输出控制器 (Input/Output controller)** 可以接受、解释和执行从通道送来的输入输出命令，并控制输入输出设备的微电脑部件。

在收到输入输出命令后，输入输出控制器立即命令输入输出设备的各部件操作，以满足各种要求，如使传动机构对媒体定位；使变换器检出存储在媒体上的数据，将它变成合适的电信号；控制缓冲器，使信号按特定的时间收集和分配；协调各部件间的操作；每当设备完成一次操作后，应立即停止活动，如果操作过程出错，它应向请求的子系统发出控制信号，去指出错误。

**输入输出设备 (Input/Output unit)** 将数据输入中央处理装置或把电脑处理过的数据记录下来的设备，简称 I/O。它是计算机系统的重要组成部分。程序、原始数据和各种现场采集到的资料和信息，要通过输入装置输入到计算机。计算结果或各种控制信号要输出给各种输出设备以便显示、打印或实现各种控制功能。外部设备的种类繁多，可以是机械式的、电动式的、电子式的或其它形式的。输入的信息也各不相同，可以是数字量、模拟量，也可以是开关量。而且输入信息的速度也有很大区别，可以是手动键盘输入，也可以是磁盘输入，所以计算机的中央处理单元( 称简为 CPU ) 与外设之间的连接和信息交换是非常复杂的。

目前常用的输入设备有键盘、软盘和硬盘驱动器以及经过 A/D( 模/数 ) 转换的现场信息等。常用的输出设备有显示屏幕 ( CRT )、打印机以及经过 D/A 转换的各种控制信号。控制台的打字机和光笔等显示设备等，既是输入设备，也是输出设备。输入输出设备使人和机器可以相互通信。

**数-模转换器的基本原理 ( fundamental principle of DAC )** 数—模转换器的功能，是把数字量转换成模拟量。所以实际上是一种解码器。当转换关系是线性时，输入—输出函数关系式可写成形式： $A=RD$ 。式中 A 是模拟量，R 是参考量，D 是数字量。因为 D 是离散的，所以输出模拟量 A 在时间上也是离散的。设 D 是定点二进制小数，则上式可写成

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = (d_1 \cdot 2^{-1} + d_2 \cdot 2^{-2} + \dots + d_n \cdot 2^{-n})R$$

$$= \sum_{i=1}^n d_i \cdot 2^{-i} \cdot R.$$

式中  $d_i$  为数字量  $D$  的第  $i$  位代码，取值 1 或 0，当  $d_i=1$  时， $A_i=2^{-i} \cdot R$ ；当  $d_i=0$  时  $A_i=0$ 。所以 D/A 转换器的模拟量输出由一系列二进制分量  $d_i \cdot 2^{-i}R$  组成。D/A 转换器的结构原理如图 1 所示。

为了观察 D/A 转换器的输出情况，可采用如图 2 所示的电路，用一个四位二进制计数器的输出，作为 D/A 转换器的数字输入， $R$  为直流参考电压。转换器输出端接示波器。当连续脉冲输入计数时，从示波器上可以看到转换器的输出  $A$  是一个阶梯波。输出最小阶跃幅度等于  $2^{-4}R$ ，这就是该转换器的分辨力，它表示输出模拟量的平滑程度。一般情况下，一个  $n$  位二进制 D/A 转换器的分辨率为  $2^{-n}R$ ，转换精度主要取决于二进制分量  $d_i \cdot 2^{-i}R$  之间的比例关系能精确到何种程度。

图 2D/A 转换器输出波形观察

**数学摆 (mathematical pendulum)** 即单摆。

**数学方法 (mathematics method)** 物理学研究中数学手段的运用。数学高度的抽象性、严密的逻辑性和丰富的辩证性，使它能够概括物理运动的所有空间形式和一切量的关系。数学已成为物理学、特别是微观世界物理学最确切的语言，物理学信息需要用数学语言来传递。

数学工具的使用体现在创立和发展物理学理论的整个过程，物理概念的形成往往借助于数学。特别是现代物理学，它的内容越来越抽象，如果不借助于数学工具，就很难概括。例如熵的概念，可以认为它是经典物理的最后一个概念。物理原理、定律往往直接从实验概括抽象出来，首先是量的测定，然后再建立起量的联系——数学关系式。在经典物理诞生时，数学已成为它的重要的研究工具，现代物理学的有关运算更加抽象和深奥，数学工具的应用就更加广泛和深入。有些理想化的物理过程和条件，由于实验条件的限制，很难实现。例如实验室内无法获得绝对满足理想条件的惯性坐标，也不可能造出一部满足可逆过程条件的热机。这类问题只能通过思维并借助于数学工具，才能揭示物理现象和过程的某些特性和规律。对不是直接从实验中概括和抽象出来的物理理论，数学工具在创立它们的过程中所起的作用更为明显。量子力学的创立正说明了这一点。数学常常走在物理学的前面，物理学可以在数学形式中得到启发，从而促进物理理论体系的发展。高斯的虚数理论体系，对后来的电工学、流体力学、振动理论的发展起了重要的作用。重大的物理理论的诞生，往往也同新的数学工具应用联系在一起。例如广义相对论的建立是同曲面几何以及张量分析联系在一起的，没有这些数学工具，就不能创立广义相对论整个理论体系。物理学对数学的依赖性在于数学的逻辑联系，反映了物理运动在某一层次上的特性和规律。在研究、探讨这些特性和规律时，就必须使用相应的数学工具才能认识和表述它。例如大量的无规则的气体分子运动，有一定的统计规律，反映到数学上就是概率论的逻辑规律。研究大量的气体

分子运动的情况，概率论成为主要的工具。

在物理学研究中，应用已知的理论，借助于数学工具，经过逻辑推理可预见某些物理现象或规律。例如质能关系式是爱因斯坦在相对论的基础上借助数学工具推导出来的。

因此，物理学理论上的预见，基本上要借助于数学工具才能实现。物理学理论在工程技术中，有着广泛的应用，在具体运用时，都要借助数学工具。数学实际上是将抽象的物理理论同具体的工程应用联系起来的桥梁。

数学对物理的发展起着重要的作用，物理也对数学的发展起着重要的作用。物理学的需要是数学发展的一个源泉，牛顿创立的微积分方法是一个突出的例子。而使用数学工具研究物理学也推动着数学的发展。不少数学理论是在物理学研究的过程中丰富和发展起来的。例如连续介质力学，后来还有场论，促进了偏微分方程理论的发展，分子理论的研究和统计物理学推动了概率论特别是随机过程理论的发展等。

**束缚电荷** (bound charge) 存在于物质内部，在外电场作用下只能在一个原子或分子范围内作微小位移的正负电荷。这种原子内的正负电荷之间的库仑力很强，在一般外电场作用下它们彼此不会完全脱离。束缚电荷的这种特性在电介质极化现象中起到决定性作用。在外电场作用下，电介质的表面或内部出现的等量异号面电荷或体电荷（称为极化电荷）就是束缚电荷。如果外界电场随时间变化，这种束缚电荷在原子尺度上的位移也将随时间变化，这时在介质表面或内部还会出现“极化电流”。

**双电桥** (double bridge) 亦称为开尔文电桥，用于低值电阻的测量。下图为原理性电路。其中  $r_x$  是被测电阻， $r_s$  是标准电阻， $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$  是由标准电阻元件构成的电桥桥臂， $G$  是检流计，电源  $E_B$  供给电流的  $I_B$ ， $I_B$  的大小可以通过滑线电阻  $R_h$  调节，其值可以通过电流表读出。流过  $r_x$ 、 $r_1$  和  $r_2$  中的电流分别为  $I$ 、 $I_1$  和  $I_2$ ，其中  $I$  远大于  $I_1$  和  $I_2$ 。

### 双电桥

$r_x$  和  $r_s$  都是四端钮电阻，电流端钮  $C$  串入电流回路，电位端钮  $P$  与桥臂电阻相连，而桥臂电阻都是大于  $10^4$  的电阻器。这样做是为了消除连接导线接触电阻的影响，因此双电桥可以测量小电阻。但从图可以看出，双电桥并不能完全消除连接导线和接触点接触电阻的影响，只是和单电桥相比，双电桥能大大地减小它们的影响。电流端接触电阻串入电流回路，不影响平衡条件，而电位端接触电阻与比它们大得多的桥臂电阻  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  和  $r_4$  相连，一般情况下可以忽略它们的影响。

在电桥平衡时，检流计里无电流流过，并且  $I_1$  流过  $r_1$  和  $r_2$ ， $I_2$  流过  $r_4$  和  $r_3$ ，于是有

$$\begin{aligned}r_1 I_1 &= r_x I + r_4 I_2, \\r_2 I_1 &= r_s I + r_3 I_2.\end{aligned}$$

现在分析  $r_4$ 、 $r_3$  和  $r$  这个回路，

$$I_2 = \frac{r}{r + r_3 + r_4} I,$$

化简以上几式并经整理可得：

$$r_x = \frac{r_1}{r_2} r_s + \frac{r}{r_2} \times \frac{r_1 r_3 - r_2 r_4}{r_4 + r_3 + r}.$$

如果满足  $r_1 r_3 = r_2 r_4$  的关系，则

$$r_x = \frac{r_1}{r_2} r_3,$$

即双电桥具有与单电桥相同形式的结果表示式。在实际的双电桥中，很难做到  $r_1 r_3$  与  $r_2 r_4$  完全相等，所以存在误差。但因跨线电阻  $r$  的值很小，所以在一般情况下，这个误差可以忽略不计。

**双光束干涉 (two-beam interference)** 两束相干光产生的干涉。

**实验装置** 除杨氏实验外，还有很多著名的实验装置可做双光束干涉。它们的一个共同特点是从同一单色光源中设法获得两束相干光，然后使这两束光在经过不同光路后再相遇，从而形成干涉图样。

#### 图 1 双棱镜干涉

1814 年法国物理学家菲涅耳用底边相接的双棱镜，使狭缝光源  $S$  在  $S_1$  和  $S_2$  处形成两个虚像，见图 1。自  $S$  发出的波阵面通过双棱镜后分为向不同方向传播的两部分，看起来好像是分别从虚光源  $S_1$  和  $S_2$  发出的，在交叠区  $P_1 P_2$  形成干涉图样。这个实验称为菲涅耳双棱镜实验。1818 年菲涅耳又做了双面镜实验，见图 2。自  $S$  发出的波阵面通过具有小夹角  $\phi$  组成的双平面反射镜，分为向不同方向传播的两部分。在这两列波的交叠区  $P_2 P_2$  产生干涉。这两部分光束好像是从虚光源  $S_1$  和  $S_2$  发出的。

#### 图 2 双面镜干涉

在洛埃镜实验中，利用一块平玻璃片，使光源  $S_1$  形成一虚像  $S_2$ ，见图 3。 $S_1$  和  $S_2$  便成了一对相干光源，在交叠区  $P_2 P_2$  产生干涉。

#### 图 3 洛埃镜

**干涉图样的计算** 设一对相干光源  $S_1$  和  $S_2$  的间隔为  $b$ ，屏幕到光源平面的距离为  $L$ ，见图 4。屏幕上  $O$  点是  $S_1 S_2$  垂直平分线与屏幕平面的交点。实验要求  $L \gg b$ 。在  $O$  点附近形成干涉图样。

#### 图 4 干涉图样计算

如果  $S_1$  和  $S_2$  是垂直纸面的狭缝，则干涉图样为平行于狭缝的一系列直线条纹。如考察屏幕上距离  $O$  点为  $y$  处的条纹，先利用近似关系  $b = y/L$  求出从两光源到  $P$  点的光程差。当  $\Delta = \pm k \lambda$  ( $k$  为 0 或正整数)，即相位差  $\Delta = \pm 2k \pi$  时， $P$  点为相长干涉，干涉图样在该处为亮条纹。 $k=0, 1, 2, 3, \dots$  为干涉条纹的级次。当

$$\Delta = \pm \frac{(2k+1)\lambda}{2},$$

即相位差  $\Delta = (2k+1)\pi$  时， $P$  点为相消干涉，在该处为暗条纹。亮条

纹与 0 点的距离为  $y = \pm \frac{k\lambda}{b}L$  ; 暗条纹与 0 点的距离为

$y = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2} \cdot \frac{L}{b}$ 。相邻亮条纹或相邻暗条纹的间隔均为  $y = \frac{\lambda}{b}L$  ; 这个

间隔与干涉级次  $k$  无关, 但正比于光的波长和屏幕到双缝的距离, 反比于双缝的间距。在同一实验中, 波长较长的红光产生的干涉条纹间隔比波长较短的绿光产生的干涉条纹间隔大。所以当用白光作光源时, 除  $k=0$  的零级亮条纹外, 其它各级亮条纹都显示为彩色条纹。零级亮条纹位于屏幕中心点  $O$  处, 对于该点来说, 两束光的光程差  $=0$ 。

对于其它各种实验装置, 干涉条纹位置的计算可以参照上述方法进行。

**条纹可见度** 假定两相干光束的振幅分别为  $A_1$  和  $A_2$ , 则它们的光强分别为  $I_1^2$  和  $I_2^2$ 。亮条纹的最大光强为  $I_{\max} = (A_1 + A_2)^2$ , 暗条纹的最小光强为  $(A_1 - A_2)^2$ 。为描述干涉条纹的清晰程度, 定义条纹可见度  $F$  为

$$F = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

把  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  的值代入上式, 如果  $A_1 = A_2$ , 则可见度为 1, 表示干涉条纹的亮暗对比最显著。如果  $A_1 \gg A_2$  或  $A_1 \ll A_2$ , 则可见度为 0, 表示条纹的亮暗对比最不清楚。

**双折射 (birefringence)** 同一束自然光通过各向异性媒质折射后分成两束的现象。一束折射光遵从折射定律, 另一条折射光不遵从。晶体内的前一条折射光称为寻常光, 简称  $o$  光; 后一条折射光称非常光, 简称  $e$  光。 $o$  光和  $e$  光都是线偏振光, 它们的振动方向相互垂直。在单轴晶体中,  $o$  光沿各个方向的传播速度  $v_o$  都相同, 故其波面是球面, 晶体对  $o$  光的折射率为  $n_o = \frac{c}{v_o}$  ( $c$  为真空中光速)。对于  $e$  光, 它在单轴晶体中沿各个方向的传播速度不同。沿晶体光轴方向的速度与  $o$  光一样: 沿垂直光轴方向的速度  $v_e$  对于负晶体,  $v_e > v_o$ , 对于正晶体,  $v_e < v_o$ 。故  $e$  光的波面在负晶体内是  $o$  光球面波面的外切椭球面; 在正晶体内是内切椭球面, 且都是在光轴方向上相切。 $e$  光不服从折射定律, 不能简单定义折射率。但通常把真空中光速  $c$  和  $e$  光沿垂直于光轴的传播速度  $v_e$  之比称为  $e$  光的折射率, 即  $n_e = c/v_e$ 。对于负晶体,  $n_o > n_e$ ; 对于正晶体,  $n_o < n_e$ 。 $n_o$  和  $n_e$  合称为晶体的主折射率。

**水的污染 (water Pollution)** 作为某种预想用途的水的可用性受到损害。水是一种宝贵的自然资源, 是人类赖以生存的物质条件之一。人们的生活、生产活动需要一定质和量的水, 但当污染物进入湖泊、河流、海洋和地下水时, 使水的化学、物理、生物或者放射性等方面特性发生变化, 从而影响了水的有效利用。

根据污染物质的不同, 水的污染类型可分为: 病原体污染: 主要污染物质为寄生虫、病原菌及病毒。这些物质往往随着生活污水、粪便、畜禽饲养场污水、屠宰、制革等工业废水及医院污水的排放进入水域。水成为传播疾病的媒质, 这些病原体会引起人的生理失调和肠道系统急性传染

病等。19 世纪英国流行的霍乱病就是由水污染所造成的。 有机物需氧污染：包括生物需氧物质和化学需氧物质，如生活污水及工业废水中的碳水化合物、蛋白质、油脂等。这些污染物在水中经微生物作用后可分解，而在分解的过程中需要氧气，从而使水中的溶解氧减少，影响鱼类等水生生物的正常生长，甚至死亡。有机物的进一步分解还会产生恶臭。 化学污染：主要是汞、镉、铅、铬、砷等重金属污染及有机农药、DDT 乳剂等有毒有机物污染。这些污染物随工业废水、工业废弃物的排放及农药的制造和使用而进入水域，通过饮用水或食物链途径再进入人体，引起人类的神经障碍、脑神经障碍及肾脏障碍等，危害极大。50~60 年代日本发生的水俣病就是人们长期食用富集汞的鱼、贝类食物而造成的，骨痛病是由于镉中毒所致。 放射性污染（见核污染）。 富营养物质污染：由生活污水、工业废水及农田用水中含有氮、磷、碳等植物营养物质所引起的污染。它会使鱼种发生变化，在近海海域中会引起浮游生物急剧繁殖的“赤潮”。“赤潮”会窒息大量的鱼、虾、蟹、贝，使海域生物资源遭到破坏。 热污染：工业中的冷却水排放将大量热量带入水中，使水温上升，加快水中的生化、化学反应，导致溶解氧减少，直接影响到鱼类的生存和繁殖。 石油污染：主要发生在海域，污染来自炼油厂等的含油废水以及船舶排放的废油。水面上形成的油膜会阻碍水的复氧作用，油膜粘附在水生生物上，会使生物窒息而死。 盐污染：各种酸、碱、盐等无机化合物进入水域，使淡水资源矿物化程度提高。土壤的酸化也使得地下水水域的矿化度增高。

**水声学**（under water acoustics） 声学的一个分支。主要研究水中声波的产生、接收、传播规律与计量等问题，以及它的各种应用。由于声波在水中传播时衰减远小于电磁波，因此在军事、航海、渔业等方面有广泛的应用。可以用它在海洋中测距、测深、导航、侦察潜艇和水雷、探测鱼群、勘察海底地层、寻找储油结构等。回声测深仪、流体测位仪、声扫雷机、水底超声测位仪等使用已很普遍。

**水听器**（hydrophone） 用于液体中（主要是水中）的电声接收换能器。在水中声音的接收，第一次世界大战时曾用直接收听，即把橡皮球放在水中，用橡皮管通到耳内收听。但以后逐步制成了电磁换能器。目前，水听器常用压电材料和磁致伸缩材料制成，这主要是因为它们的阻抗高，在水中匹配好。按声波作用原理的不同可分为压敏水听器和振速水听器（即压差水听器）两种。当输出电压正比于接收到的声压时为压敏水听器；当输出电压正比于接收到的质点振动速度时为振速水听器。水听器的主要性能指标有：工作频段、灵敏度和指向性。

**顺序控制**（program control） 按规定好的时间或逻辑顺序进行工作的一种控制方式。它既可以按预先确定好的每阶段应进行的控制动作，按顺序逐个进行；又可以根据前阶段的结果，选择下一步应执行的动作，并转入下阶段；也可以是上述两种方式的结合。

顺序控制必须执行预先制定好的一系列控制动作，在进入下一段，进行下一个动作时，必须对上面的动作进行监督和逻辑校验，判断是否可进行下一个动作。因此，采用单板机或者单片机，甚至是一位或四位机作为控制工具比较有效。

顺序控制一般可用于生产过程自动化中的开关量的顺序控制。如水电

站、火电站的自动起停控制系统，机械加工自动线，产品分类自动线，铸造造型生产线，工业机械手，以及单机自动化等。

**斯涅耳**（Willebrord Snell 1591~1626） 荷兰数学家、物理学家。生于莱顿。1608年在莱顿大学获硕士学位，并在该校工作，1613年起任教授。

斯涅耳是光的折射定律的最早发现者。1618年，他在研究光的折射现象时，发现不同的介质对光有不同的折射能力。1621年，他通过实验，发现光的折射定律（亦称为斯涅耳定律）。该定律指出：“折射光线位于入射光线和法线所决定的平面内，入射光线和折射光线分别位于法线两侧，入射角的余割和折射角的余割的比值对于一定的两种媒质来说是一个常数。”由于余割和正弦成反比，所以这个结果与我们现代形式的折射定律等价。当然，斯涅耳生前未公布这一发现。直至1626年他去世时，惠更斯和沃斯两人声称在他的遗稿中，看到了这方面的记载。折射定律是几何光学的最基本的定律之一。斯涅耳的发现为几何光学的发展奠定了理论基础。

**斯蒂文**（Simon Stevin 1548~1620） 荷兰力学家、数学家、工程师。生于布鲁日。1583年入莱顿大学。1592年任工程师。后参加荷兰人反对西班牙统治的起义军。1604年任纳索的毛里斯亲王部队的军需总监。主要贡献是对数学和力学的研究。1585年，对十进制小数及其日常应用作了浅显而透彻的说明，从而使十进制在欧洲使用起了重要作用。1586年，最先表述了力的三角形定理，这种力的三角形法与力的平行四边形法等价，给静力学研究以新的推动，而过去静力学是以杠杆原理为基础的。阐述了斜面平衡的条件，并根据永动机的不可能，得出斜面原理：放在斜面上的一个物体所受的沿斜面方向的重力与倾角的正弦成正比。另一个重大成就是发现了流体静压力定律，即液体对盛放液体的容器的底所施的力只取决于承受压力的面积的大小和它上面液柱的高度，而与容器的形状无关。在研究浮动物体的平衡条件时，引进了定倾中心的概念。再一个重大成就是他的试验报告：两个铅球，其中一个的重量为另一个的10倍，从30英尺的高度下坠，结果同时落地，从而第一个用实验否定了亚里士多德的关于重物比轻物下落得快的断言。在工程方面，设计了一套水闸系统，利用水淹以驱赶敌人，这是荷兰人的一种重要防卫手段。还发明了一种26座的挂帆马车，用于海滨。

**斯蒂文链**（Stevin chain） 斯蒂文用来阐述斜面原理，解决斜面上平衡问题的一种装置。它是用14个重量相同的光滑小球等距地连成一根链条，挂在光滑的直角三棱柱上，此链可沿柱面两边滑动。该装置图画在1586年斯蒂文著的《静力学原理》一书的封面上。根据这种装置，斯蒂文提出了这样的问题：在自由状态下球链将呈现什么状态？因为棱柱左边（较长的一边）的小球比右边（较短的一边）多，有人会认为由于重量不同链子会持续从右向左运动。如果真的如此，我们就可以给这个装置加上一些齿轮和传动部件来无限久地带动各种机器而无需任何消耗了。但是斯蒂文否定了这种可能性，他认为链子应处于平衡状态。这就意味着斜面上由链子连成的小球，其重力形成的拉力随着斜面与水平面之间的夹角的减小而减小。由于左右两个斜面上的小球的数目明显地与这些斜面的长度成正比，由此斯蒂文便得出斜面原理：放在斜面上的一个物体所受的沿斜面方

向的重力与倾角的正弦成正比。

**斯托克斯定律 (Stokes law)** 关于流体阻力的定律。在雷诺数  $R_e < 1$  的情形 (如比较小的球形物体在粘性较大的流体中缓慢流动), 此时球形物体在流体中所受粘滞阻力为  $F = 6\pi\eta Rv$ 。式中  $R$  为球体半径,  $v$  为球的运动速度,  $\eta$  为粘滞系数。该定律由英国数学家和物理学家斯托克斯发现, 故名。例如雾中小水滴降落所受阻力即适用此式。密立根证明离子所带电荷为电子电荷整数倍的密立根油滴实验, 也是应用该公式。

**思维能力 (ability of thinking)** 人脑对客观世界一种间接的和抽象概括的反映能力。思维的工具是语言, 思维能力也就是借助于语言对感知材料进行加工的能力。思维的形式包括逻辑思维和形象思维。物理教学中的思维能力主要指逻辑思维能力。逻辑思维是运用逻辑思维的方法, 通过抽象的科学概念来揭示事物本质, 表述认识事实的结果。逻辑思维的方法主要有比较、分析、综合、抽象、概括、推理等。在学习物理过程中的思维能力, 主要表现在能根据物理事实, 运用逻辑思维方法, 建立物理模型, 形成物理概念, 得出物理规律。

中学物理教学中对学生思维能力的培养, 主要是在对物理事实 (包括现象) 的分析和综合的基础上, 突出科学抽象、概括和科学推理能力的培养, 形成概念和科学的理想化是物理教学中训练抽象概括思维能力的两种主要方式。形成物理概念包括形成理论性定义的物理概念和形成操作性定义的物理概念。科学的理想化方法则包括建立理想化模型、理想化物理过程和进行理想实验。为了在物理教学中培养以上抽象和概括的思维能力, 应使学生明确物理概念和各种模型是根据哪些事实, 是怎样建立起来的。它的适用范围、适用条件又是怎样的。在练习和考试中, 要避免问题情景的抽象化和过分模型化, 应设置结合实际的问题情景, 培养学生从实际的事物或过程中抽象出合适的物理模型和过程的能力。在中学物理教学中, 科学推理能力的培养主要是训练演绎推理和类比推理能力。这两种推理方式是物理教学中得出规律的主要手段。总之, 清晰的逻辑思维能力是物理教学中形成概念、得出规律的保证。

在物理教学中, 思维训练的主要和基本形式是逻辑思维训练, 但也不能完全忽视形象思维的作用, 形象思维与逻辑思维不是互相排斥, 而是相辅相成的。大纲中除了要求培养逻辑思维能力外, 还明确要培养想象力, 想象是在原有感性形象基础上创造出新形象的心理过程。形象思维具有一般不脱离具体形象的特殊性, 把物理问题形象化, 有助于学生再造想象, 即根据物理科学语言的抽象描述在脑中再造和展现出一个与物理过程相应的具体可见的新形象、新图景。这种具体的新形象就是通过想象再造的物理图景。在物理教学中, 通过某些恰当而形象的比喻, 启发学生的想象, 能有效地帮助学生较深入地理解和牢固掌握某些抽象的物理知识。

**司南 (south-controlling)** 中国古代指南针的最初形式。《韩非子·有度》中载: “故先王立司南, 以端朝夕”, “端朝夕”是正四方的意思。《鬼谷子·谋篇》中载: “郑子取玉, 必载司南, 为其不惑也”, “为其不惑”意即为了不迷失方向。《论衡》对司南作了比较具体的描述: “司南之杓, 投之于地, 其柢指南。”文中“杓”是勺子, “地”是中央光滑的地盘, “柢”是勺的长柄。河南南阳东汉墓出土的石刻上有司南勺的图画。我国科技史家王振铎根据《论衡》中的描述, 参考了朝鲜东浪汉



墓的发掘结果，复原出古代司南的原型。它是藉天然磁石琢磨制成的勺形指南仪器，其大小形状就像现在通常家用的汤匙，只是司南的底呈球形，将此勺放在一块以青铜做成的地盘中央，它就会自由转动起来，直至与地磁场的南北极方向一致为止，从而用以确定南北方向。

**死光** (death ray) 一种辐射武器。利用 X 射线或  $\gamma$ 、 $\alpha$  射线作为具有杀伤力的武器使用时，称为死光。强雷达也可致人死命，但不伤及外表。激光发明以后，死光多指激光武器，例如激光炮。激光器用作普通的枪炮其代价非常昂贵。目前正在尝试利用激光击毁敌方导弹的制导系统，使其失去控制。

**四维空间** (four-dimensional space) 亦称“四维时空”。由一维时间和三维空间所构成的总体。这一概念最早由德国数学物理学家闵可夫斯基在狭义相对论的基础上提出，故又称“闵可夫斯基空间”。任何物质的运动总发生在时间和空间之中，根据狭义相对论，时间和空间密切联系，不可分割。在一个惯性参考系中的时间（空间）会在另一个惯性系中表现为空间（时间）。

在四维空间中可以建立“四维坐标系”，其坐标轴编号可记为 0, 1, 2, 3, 分别表示时间轴和三个空间轴。发生在特定时空中的一个物理事件可以用这种四维坐标系中的一个点来表示，这种点称为“世界点”。两个事件的世界点的间隔称为“四维间隔”，其平方定义为  $s^2=c^2 t^2-x^2-y^2-z^2$ 。在洛伦兹变换下  $s^2$  保持不变，即从一个惯性系到另一个惯性系的变换中，虽然有时间间隔变为空间间隔，或空间间隔变为时间间隔，但是总间隔，即四维间隔保持不变。洛伦兹变换可以看作是四维坐标系的转动变换。

犹如在三维空间中可将物理量分类为三维标量、三维矢量（有 3 个分量）和三维张量（有 9 个分量）一样，在四维空间中可以将物理量分类为四维标量、四维矢量（有 4 个分量）和四维张量（有 16 个分量）。例如四维间隔就是一个四维标量。而时间分量和三个空间分量则构成一个四维矢量（称为四维坐标）。其他如粒子的能量和动量的三个分量也构成一个四维矢量（称为四维动量）。这一结果揭示了能量和动量之间的密切联系。在电磁学中，一个物体的总电量是四维标量。电荷密度和电流密度的三个分量构成一个四维矢量（称为四维电流密度）。而电磁场的电场强度的三个分量和磁场强度的三个分量则是一个四维张量（称为电磁场强度张量）的不同分量。

**宋应星** (1587 ~ ?) 中国明代科学家。字长庚，江西省奉新县人。曾任江西分宜教谕、福建汀洲推官、南京亳州知州等职。生平深究实学，关心工艺技术和注意总结生产经验，对士大夫轻视生产的态度，深为不满。

宋应星的贡献主要在声学方面。他的研究成果汇集在《论气》这一部内容较丰富的科学著作中。《论气》包括《论气序》、《形气》、《气声》、《水非胜火说》、《水尘》等 24 篇，内容连贯，成为一体。在《气声》中，他从自然现象和生活经验出发，认为声音是由于物体振动或急速运动冲击空气而产生的；指出声音是靠气的振荡而传播的；并分析了人耳的生理机构和对声音接收的情况；从而阐述了有关声的发生、传播和接收的有关见解。他的主要著作是《天工开物》，该书系统而详尽地记载了我国古代至明代在农业、手工业和科学技术等各方面的重大成就。

**速度 (velocity)** 物体运动快慢和方向的物理量。在时间  $t$  内，设质点的位移为  $r$ ，比值  $\frac{\Delta r}{\Delta t}$  是位矢的平均变化率，称为质点在时间  $t$  内的平均速度，以  $v_{\text{平}}$  表示为

$$v_{\text{平}} = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta r}{\Delta t},$$

平均速度的方向与质点在时间  $t$  内的位移方向一致。 $t$  趋向零时平均速度的极限称为质点在时刻  $t$  的瞬时速度。瞬时速度又称即时速度或简称速度，常用记号  $v$  表示：

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \frac{dr}{dt},$$

质点的速度是它的位移矢量对时间  $t$  的一阶导数。速度是一矢量，其方向是  $t = 0$  时位移  $r$  的极限方向，即沿质点轨迹的切线，并指向质点的运动方向。

平均速度的意义是，如质点以不变的速度  $v_{\text{平}}$  从时刻  $t$  所在的位置出发，经过时间  $t$  后，它将到达质点在时刻  $t + t$  的位置。平均速度并不一定等于质点在时间  $t$  中任一时刻的实际速度，它只描写质点在时间  $t$  内位置变动快慢和方向的大致情况，而瞬时速度则能细致地反映质点在每一时刻位置变化的快慢和方向。

用质点的直角坐标表示时，质点相对于此坐标系的速度是

$$v = \frac{dx}{dt} i + \frac{dy}{dt} j + \frac{dz}{dt} k$$

式中  $(x, y, z)$  是质点的直角坐标， $i, j, k$  分别是沿  $x, y, z$  三轴正向的单位矢量。

以指定点为起点，依次画出间隔相等的各时刻的速度矢量，连接它们的端点而成的曲线称为速端图。速端图给出速度矢量随时间变化的清晰图像。

### 速端图

速度的量纲是  $MT^{-1}$ ，其 SI 制单位是米/秒。

**速度—时间图像 (velocity-time graph)** 简称为速度图像。直线运动中，以时间为横轴和以速度为纵轴，描写速度与时间关系的曲线图。匀速直线运动的速度—时间图像是一水平直线图(a)。若简谐振动的运动方程是  $s = A \sin(\omega t + \varphi)$ ，可求出它的速度是  $v = A \omega \cos(\omega t + \varphi)$ ，它的速度—时间图像大体如图(b)所示。

(a)(b)

在速度—时间图像中，曲线上一点  $(t, v)$  的斜率表示质点在时刻  $t$  的加速度。在时刻  $t_1$  和时刻  $t_2$  两竖直坐标线之间所夹曲边梯形面积的代数和，表示质点在时间  $[t_1, t_2]$  中所经过的位移。这里，曲边梯形面积的代数和是指  $x$  轴上方曲边梯形的面积减去  $x$  轴下方曲边梯形面积所得的值。

**速度选择器 (speed selector)** 亦称“滤速器”。应用电磁偏转原理按速度(率)选择带电粒子的装置。其

### 速度选择器示意图

结构如图所示。平行板电容器的匀强电场  $E$  与大面积电磁铁提供的匀强磁场  $B$  互相垂直。由粒子源发出的带电粒子以各种不同速率穿过狭缝  $S_1$  入场中后，将分别受到电场力  $F_e=qE$  和磁场力  $F_m=qvB$  的作用，两者的方向正好相反。若  $F_e = F_m$  粒子将发生偏转而被电容器的极板吸收。只有那些  $v=E/B$ （此时  $F_e=F_m$ ）的粒子才不发生偏转，沿直线路径通过狭缝  $S_2$ 。这样就实现了按速度挑选粒子的目的。改变  $E$  和  $B$  的值，即可挑选出不同速率的粒子。这一装置广泛应用在质谱仪、粒子加速器等仪器和设备中。

**速率 (speed)** 物体运动快慢的物理量。质点从时刻  $t$  到时刻  $t + \Delta t$  运动的路程  $s$  与相应的时间  $\Delta t$  之比，称为质点在时间  $\Delta t$  内的平均速率，以  $v_{\text{平}}$  表示：

$$v_{\text{平}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}。$$

当时间  $\Delta t \rightarrow 0$  时，平均速率的极限值称为质点在时刻  $t$  的瞬时速率，瞬时速率又称为即时速率或简称为速率，以  $v$  表示：

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}。$$

质点运动的速率是质点运动时的路程对时间的一阶导数。速率同时也是速度的绝对值，所以速度的大小也称为速率。由于路程  $s$  并不一定与同一时间  $t$  中的位移的绝对值相等，所以同一时间中的平均速率与平均速度的绝对值并不一定相等。

**酸雨 (acid rain)** pH 值小于 5.6 的雨雪或其他形式的大气降水。它是大气受污染的一种表现。酸雨的形成是一种复杂的大气化学和大气物理现象。酸雨含有多种无机酸和有机酸，绝大部分是硫酸和硝酸，多数情况下以硫酸为主。硫酸和硝酸是由人为排放的二氧化硫和氮氧化物转化而成的。因煤和石油的燃烧以及金属冶炼而释放到大气中的二氧化硫，通过气相或液相的氧化反应生成硫酸。高温燃烧生成的一氧化氮，进入大气后大部分转化成二氧化氮，遇水后生成硝酸和亚硝酸。由于人类活动和自然过程，还有许多气态或固体物质进入大气，成为成酸反应的催化剂。

降水的酸度过高 (pH 值降到 5 以下)，就可能使生态系统受害，在土壤盐基饱和度低的地区或土层薄的岩石地区，酸雨降落地面后得不到中和，使得土壤、湖泊、河流逐渐酸化。当湖水或河水中的 pH 值降到 5 以下时，鱼的繁殖与发育会受到严重影响，土壤和水底泥中的金属会渗入水中，毒害鱼类。水体的酸化还会导致水生生物的组成结构发生变化，耐酸的藻类、真菌增多，而有根植物、细菌和无脊椎动物减少，有机物的分解率降低，所以酸化的湖、河中的鱼类减少，对饮用者的健康也会产生有害影响。酸雨还伤害植物的新生芽叶，从而影响其发育生长。酸雨腐蚀建筑材料、金属结构、油漆，使古建筑、雕塑像受到损坏。

控制酸雨的根本措施在于减少二氧化硫和氮氧化物的人为排放量。

**随机误差的综合 (synthesis of stochastic error)** 计算函数误差的一种方法。设函数

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_t)$$

由  $x_1, x_2, \dots, x_t$  共  $t$  种自变量组成, 对  $x_1$  进行  $n_1$  次测量,  $x_2$  进行  $n_2$  次测量,  $\dots, x_t$  进行  $n_t$  次测量, 那么数  $y$  标准差的估计公式为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^t \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_j\right)^2},$$

式中

$$\sigma_j = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji} - \bar{x}_j)^2$$

即  $x_j$  测量到的标准差。则函数  $y$  的算术平均值的标准差为:

$$\sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\sum_{j=1}^t \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_{x_j}\right)^2}。$$

例如, 已知惠斯登电桥的二、三、四臂, 经过多次重复测量, 得到:

$$\bar{R}_2 = 84\Omega, \quad \sigma_{\bar{R}_2} = 1\Omega,$$

$$\bar{R}_3 = 300.0\Omega, \quad \sigma_{\bar{R}_3} = 0.5\Omega,$$

$$\bar{R}_4 = 250\Omega, \quad \sigma_{\bar{R}_4} = 1\Omega,$$

则待测电阻  $R_x$  的算术平均值:

$$\bar{R}_x = \frac{\bar{R}_2}{\bar{R}_3} \cdot \bar{R}_4 = \frac{840}{300.0} \cdot 250 = 700\Omega,$$

$$\sigma_{\bar{R}_x} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_x}{\partial R_2} \cdot \sigma_{\bar{R}_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial R_3} \cdot \sigma_{\bar{R}_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial R_4} \cdot \sigma_{\bar{R}_4}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\bar{R}_4}{\bar{R}_3} \cdot \sigma_{\bar{R}_2}\right)^2 + \left(\frac{\bar{R}_4 \cdot \bar{R}_4}{\bar{R}_3^2} \cdot \sigma_{\bar{R}_3}\right)^2 + \left(\frac{\bar{R}_2}{\bar{R}_3} \cdot \sigma_{\bar{R}_4}\right)^2}$$

$$\bar{R}_x \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\bar{R}_2}}{\bar{R}_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\bar{R}_3}}{\bar{R}_3}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\bar{R}_4}}{\bar{R}_4}\right)^2}$$

$$= 700 \sqrt{\left(\frac{1}{840}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{300}\right)^2 + \left(\frac{1}{250}\right)^2}$$

$$= 700.0045 = 3.1\Omega.$$

因此被测电阻值可写成:  $700 \pm 3$ 。

注意: 如果在  $t$  个变量中, 最大误差项大于其它误差项的一个数量级, 那么其它误差项可作为微小误差项忽略, 使计算更为简易方便。

**随堂学生实验 (little experiments in class-room)** 学生在学习新的物理知识过程中, 同步进行的小型、灵活的物理实验。随堂学生实验不一定要用实验器材, 例如要求学生发声时用手摸喉部, 用手拉、压一块橡皮都可称为随堂学生实验。随堂学生实验不同于规范的学生分组实验, 它与整个教学进展密切配合, 方式和时间都较灵活, 可以单人, 也可以分组, 可以在教室, 也可以在实验室进行, 时间可长可短。

随堂学生实验为学生创造一种与物理现象相互作用的良好物理环境, 使学生处在主动、积极的手脑并用状态, 能有效地增大物理课堂教学的感知量和感知效果。学生对所观察到的现象和有关的物理知识印象深刻, 掌

握得也比较牢固。同时，随堂实验教学对教师的教学组织能力提出了较高的要求。教师在教学过程中要进行及时的启发、引导，指导学生的观察和思维方向，及时获取学生的反应和反馈，并组织必要的讨论。教师的主导作用体现在随堂实验教学过程的组织和控制上，既要放得开，又要收得拢，使教师的启发讲解、学生的实验、学生之间以及师生之间的讨论有机地组合起来。在中学物理教学、尤其在初中物理教学中，充分发挥随堂实验的作用是使中学物理教学真正转到以实验为基础的轨道上来的基本和有效的途径。

随堂学生实验的课题选取，一般可从以下几方面考虑：运用“探索法”教学时，通过随堂实验引导学生建立概念和认识规律。例如研究弹簧秤的刻度，研究电磁感应规律。作为随堂演示实验的补充，这是随堂学生实验的主要形式。可通过简单、生动的随堂小实验引入要学习的物理课题，巩固已引入的概念或规律，训练学生用科学方法研究问题以及澄清学生中易于产生的糊涂观念。熟习常用的物理器材，例如刻度尺、天平、温度计、电表（电流表、电压表、万用电表等）、滑线变阻器等。作为演示可见度较低的实验，随堂学生实验使用的器材应较简单，也可用一些生活中的用品作为器材，操作要简便。

**隧道二极管 (tunnel diode)** 见隧道效应。

**隧道效应 (tunnel effect)** 一个具有能量为  $E < qV_0$  的粒子，在不具备跨越  $qV_0$  势垒的情况下，仍具有穿越该势垒的一定概率的现象。隧道效应起源于量子现象。按照量子力学观点，一个具有能量为  $E < qV_0$  的粒子，虽然不能跨越  $qV_0$  的势垒，却仍有一定概率穿过该势垒。如果半导体 PN 结两边的杂质浓度都很高（ $\sim 10^{20}/\text{cm}^3$ ），使结的耗尽区很薄，同时内建场又很强（ $> 10^6\text{V}/\text{cm}$ ）时，N 区的电子虽不能攀过势垒高坡从 N 区导带进入 P 区价带，但却能按一定概率穿透势垒从导带进入价带，从而参与导电。

日本人江崎首先根据这个效应制造了隧道二极管。隧道二极管与普通二极管不同，其电流与电压的变化关系（伏安关系）存在负阻区域，此时隧道电流随电压的增加反而减小。利用负阻特性，可使隧道二极管具有振荡、开关、放大等作用。

隧道二极管是由于一种载流子穿透隧道而形成电流，因此它是一种多子（即多数载流子）器件，不存在少子的漂移和扩散，因此也就不存在讯号传输的延迟，故适用于制造高速器件。

**索尔维物理学会议 (Solvay conference on Physics)** 一种国际物理学会议的总称，由比利时化学家索尔维首倡召开。该会议的主要特点是：致力于讨论物理学发展中有待解决的关键性问题，目的是激励那些能够扩展和深化自然现象知识的研究；每次会议都只有人数不多的、来自世界各国有关方面最杰出的专家就一个专题进行讨论。1911年，由于相对论和量子论的出现，引起了原有的经典物理学理论与现代物理学新概念的严重不协调。当时德国物理学家普朗克和物理化学家能斯特便酝酿要开一次国际性会议，与此同时以创造氯碱法而闻名世界的比利时化学家索尔维，在布鲁塞尔会见了能斯特也颇有同感。于是能斯特建议由索尔维倡导邀请一些著名的科学家赴布鲁塞尔开会，得到索尔维的赞同。于是

在 1911 年 10 月召开了第一次国际物理学会议，主题是辐射和量子论，由洛伦兹担任科学委员会的主席。该会议参加者有：普朗克、爱因斯坦、索末菲、维恩、昂内斯、卢瑟福、M. 居里、佩兰、朗之万、布里渊和庞加莱等人。由于第一次会议开得很成功，以后基本上是 3~5 年召开一次，到 1982 年已举行过 18 次，前 17 次都在布鲁塞尔举行，第 18 次会议在美国举行。

**索末菲 (Arnold Johann Wilhelm Sommerfeld 1868 ~ 1951)** 德国物理学家。生于柯尼斯堡。1891 年毕业于柯尼斯堡大学，获哲学博士学位。1897 年任克劳斯塔矿业学院数学教授。1900 年任亚琛工业大学应用数学教授。1906 年任慕尼黑大学理论物理学教授，不久主持建立了理论物理研究所。

主要贡献是对原子结构及原子光谱的研究。1915 年，在玻尔原子模型中，将玻尔的电子轨道又细分为许多辅助轨道，认为电子除圆形轨道外，还须引入椭圆形轨道。提出要描述一个在二度空间运动的电子，除角动量量子化外，还需要有径向动量的量子化。在三度空间中，轨道平面在某一特定的方向取向上也产生量子化，即空间量子化。在电子运动中，还须考虑到相对论效应，得出氢谱线的精细结构公式，并引入精细结构常数。这一理论被称为玻尔—索末菲理论，从而成功地解释了氢原子光谱。1916 年，与德拜合作，通过引入磁量子数，成功地解释了正常塞曼效应。1919 年，与科塞尔合作，确立了光谱位移定律，导出多重线强度的公式。1920 年，又引入内量子数的概念，给出双重线和多重线的选择定则，从而对碱金属光谱的双重线，作出初步的解释。著有《原子结构和光谱线》(1929)、《波动力学补篇》(1929)、《理论物理讲义》(共 6 卷，1942~1956)等。

**锁模技术 (mode locking)** 使激光谐振腔内各振荡模式同步而实现超短激光脉冲输出的技术。对于非均匀加宽介质的激光器，产生的总是多纵模激光。它们的振幅、频率和初相位各不相同，因而互不相干。总的激光输出是各纵模的非相干叠加。锁模技术就是在谐振腔中增加某种调制技术，强迫各纵模保持振荡同步，使输出激光是各纵模的相干叠加。

**调制** 光振动由振幅、频率、相位和振动方向特征，相应地可以对以上各量进行调制。例如某点处的光振动用下式表示： $E = E_0 \cos t$ ，对它进行振幅调制即意味着使它的振幅变为时间  $t$  的函数，如

$$E_0(t) = E_0 + E_m \cos m t.$$

这种调幅波  $E = E_0 \left( 1 + \frac{E_m}{E_0} \cos m t \right) \cos t$  可以化为

$$E = E_0 \cos \omega t + \frac{M_a}{2} E_0 \cos[(\omega + \omega_m)t] + \frac{M_a}{2} E_0 \cos[(\omega - \omega_m)t],$$

式中  $M_a = \frac{E_m}{E_0}$  称为调幅指数， $\omega_m$  和  $E_m$  为外加信号的角频率和振幅。若  $M_a = 1$ ，称为 100% 调制。上式中第一项是频率  $\omega$  的未调制的载波振荡。第二、第三项分别是以上、下边频 ( $\omega + \omega_m$ ) 和 ( $\omega - \omega_m$ ) 振荡的项，它们的振

幅相等。如果这两个边频正好与激光的邻近两个纵模的频率重合，它们便具有确定的振幅和相位关系。而后  $(\omega + \omega_m)$  和  $(\omega - \omega_m)$  经增益介质放大，并通过调制器调制，其边频又与各自相邻的纵模频率重合。这一过程继续进行，直到所有纵模都被耦合，结果使各纵模成为有规则的等间隔的短脉冲系列。

频率调制、相位调制和偏振调制的情况与振幅调制相类似，结果也是使所有纵模耦合。

锁模激光经过调制后的多模激光器将输出锁模激光。这种激光的特点是：激光是间隔为  $\frac{2L}{c}$  的规则脉冲序列，其中  $L$  为谐振腔长。每个脉冲的宽度

$$\Delta\tau = \frac{1}{N\Delta\nu},$$

其中  $N$  为纵模数， $\Delta\nu$  为激光工作物质的增益线宽。可见  $\Delta\nu$  越大，锁模脉宽就越窄。每个脉冲的峰值功率正比于  $(NE_0)^2$ ，而锁模以前激光的平均功率正比于  $NE_0^2$ 。因此锁模激光的峰值功率增加  $N$  倍。固体激光的纵模数可达  $10^3 \sim 10^4$ ，故锁模后的峰值功率提高很多。

**被动锁模** 利用染料的饱和吸收性质可以使多纵模激光成为锁模激光输出。开始时激光多纵模脉冲呈不规则起伏，由于染料对弱信号吸收强，对强信号吸收弱，致使极大值与极小值之差逐渐扩大，相对地删除了弱信号成份，使发射脉冲变窄。只要可饱和染料的激发态寿命小于光子在腔内往返一次的时间，就可能产生锁模激光。

**主动锁模** 在激光腔内插入一个调制器，调制频率精确等于纵模间隔，就可以得到锁模激光输出。调制器可以是电光晶体或声光元件，因为调制频率或幅度可以人为控制，故得名。

**太阳 (sun)** 太阳系的中心天体和距地球最近的恒星。地球上光与热的主要来源。其半径为  $6.96 \times 10^8$  米，为地球半径的 109 倍；其质量为  $1.99 \times 10^{30}$  千克，为地球质量的 130 万倍。

太阳大气分层太阳基本形状为球形，其大气主要分为三层：光球、色球和日冕。光球是太阳的表面层，可见光从这一层发出，温度为 6000K；光球外层为色球，厚度约为 1 万到 1.5 万千米，温度比光球高；最外层为日冕，约在光球外 2 万千米一直延伸到几个太阳半径，并延伸到与行星际气体连成一片，后者是以每秒数百公里的速度从太阳喷出的气体，主要由质子与电子组成，称为太阳风。日冕温度高达  $1.5 \times 10^6$ K。太阳辐射的总功率为  $3.9 \times 10^{26}$  焦耳/秒，其中半数辐射为可见光，但近紫外和近红外也辐射相当部分的能量，而 X 射线和射电辐射的贡献甚微。太阳向外辐射的巨大能量主要来自自由氢核聚变成氦核的热核反应。

太阳也在自转，其周期在日面赤道带约 25 天，越近两极越长，至两极区约为 35 天。除自转外，太阳还绕银河系中心公转，周期约 2 亿 3 千万年，公转速度约 250 千米/秒。太阳的化学元素成分几乎与地球相同，但比例有差异。太阳上最丰富的元素是氢，其次是氦，还有碳、氮、氧和各种金属。

太阳黑子和耀斑在太阳上不断地发生着剧烈的变化，这些现象的黑子、斑谱、日浪、日珥、光斑、日冕凝聚物的射电爆发、X 射线爆发和宇宙线爆发。太阳黑子由暗黑的本影和在其周围的半影组成，是太阳表面温度较低的区域，温度比光球低 1500，亮度则为正常光度的五分之一。黑子又是太阳活动最明显的特征，它随太阳自转而一起运动，由此可测得太阳自转周期为 27 天。最小的黑子直径有几百公里，没有半影；最大的黑子比地球还大。黑子最重要的特性是它们的磁场强度。黑子越大，磁场强度越大。小黑子磁场强度为 500 高斯，大黑子可达 4000 高斯。日面上的黑子数经常不断变化，在太阳活动极小年可几乎没有黑子；在极大年，日面上可看到上百个黑子。两次极大值之间的时间间隔为 11.2 年。大黑子群出现以后，地球上往往发生磁暴和电离层扰动现象。

从太阳单色光照片中发现，太阳中偶尔有非常密而热的气体发生短时间的明亮的耀斑现象。耀斑中等离子体的温度高达几万度，它持续时间可从几分钟（小耀斑）到几小时（大耀斑）。许多地球物理现象都与耀斑发出的辐射和粒子有关。例如当耀斑出现时，产生的 X 射线穿透地球大气使电离度增高、电波吸收增强，致使短波无线电通讯发生衰减。同时来自耀斑的等离子云以 2000 千米/秒的速度穿过日—地距离冲击地球的磁层与电离层，同时产生磁暴和极光，使电离层扭曲，无线电通讯遭到干扰甚至破坏。耀斑的出现，一般认为是与黑子区磁场的快速变化有关，但至今对耀斑的物理本质还不清楚。

太阳能量的来源对太阳巨大能量的产生，第一个提出科学假设的是德国物理学家亥姆霍兹，他认为太阳能量来自引力收缩，太阳物质因不断收缩，引力势能不断转化为光和热。但据他计算，其能源够维持 3000 万年之用，而从生物进化角度看，这个时间太短了。自中子发现后，1938 年，物理学家贝蒂提出了太阳以及一般恒星能量生成的现代理论。该理论认为，太阳的真正能源来自它的核心部分，太阳中心温度极高（估计为  $1.5 \times$



$10^7\text{K}$ )，物质的原子结构遭到破坏，电子被剥离了原子核，物质呈等离子态。一部分原子核可能获得极高的速度，能克服原子核之间的斥力而发生碰撞。碰撞结果使较轻的原子核聚合成较重的原子核，这就是热核聚变反应。太阳中辐射出的能量，正是聚变反应中释放的。

太阳的能量巨大，氢又是它最丰富的元素，用氢作“燃料”的热核反应预计可使太阳在 100 亿年时间内稳定地发光。当太阳的所有核能源全部耗尽后，将变成一颗白矮星，随着内部温度下降，最终变成一颗黑矮星，一种由简并物质组成的不发光的致密天体。

**太阳辐射 (solar radiation)** 太阳向宇宙空间发射的电磁波和粒子流。在大气科学中，太阳辐射通常是指太阳的电磁波辐射。被接收到的太阳辐射能主要来自于太阳大气层中的光球层。太阳大气中的色球层是一个充满磁场的等离子体层，由于磁场的不稳定性而时常产生剧烈的耀斑爆发，同时还发射大量的远紫外辐射、X 射线和高能粒子流，因此，太阳辐射和太阳辐射能的变化取决于太阳大气的状态。

观测到的太阳辐射谱呈连续光谱形式，但光谱上分布着许多吸收暗线，这些暗线被称为夫琅和费线。太阳辐射进入地球大气后要经历复杂的吸收和散射过程，因此在地球表面获得的太阳辐射不仅能量大大减弱，而且辐射谱也发生畸变，并随着实际大气状况和辐射通过的大气路程长短而变化。和进入地球大气层之前的太阳辐射相比，在地面的太阳辐射谱最大辐射波长明显移向长波方向，并且由于地球大气中臭氧的吸收，对波长小于 0.290 微米的太阳辐射，地面已无法探测到。

太阳辐射共分为三个主要部分：紫外部分（波长小于 0.4 微米）包括 X 射线、 $\gamma$  射线等，它占太阳辐射总量的 7%；可见光部分（波长 0.4 ~ 0.76 微米），约占太阳辐射总量的 50%，其中以波长在 0.475 微米附近的辐射能力最强；红外部分（波长大于 0.76 微米），约占太阳辐射总量的 43%。

表示太阳能辐射强弱的物理量是太阳辐射强度，它是单位时间内垂直投射在单位面积上的太阳辐射能。未经大气、日地平均距离时的太阳辐射强度称为太阳常数，其值为  $1.97 \text{ 卡/厘米}^2 \cdot \text{分}$ 。一年中太阳辐射约  $1.2 \times 10^{34}$  焦耳的能量，到达地球约有  $6 \times 10^{24}$  焦耳，是太阳总辐射能的二十亿分之一，其中绝大部分又被反射回去，约 35% 被吸收。

阳光是环境的一个基本要素，对大气中的一些化学反应有显著作用，对地面上植物的光合作用具有特殊的意义，对地球表面的温度、大气运动、水循环、生物的分布以及人类的活动都具有决定性的影响。太阳黑子 (sun spot) 太阳光球中由于表面温度较低而形成的暗黑区域。太阳黑子是太阳活动最明显的特征。是日面上磁场最强的区域，聚集着大量的磁通量，它使太阳对流层下边的能量向上正常传输受到抑制，从而减少了对该区域的热补充，使得该区温度降低，成为暗黑的黑子。黑子中心处的温度约为 4000K，亮度为正常光球的五分之一。

太阳黑子的形态是多种多样的，有单个的，也有成群的。黑子的典型尺寸是：小的只有千余公里，大的可达十万公里左右。在光球中，黑子的位形大致可分为两部分：中心较黑的区域叫黑子本影，本影周围有许多纤维状的结构，亮度在本影与光球背景亮度之间，叫做半影。太阳黑子随太阳自转而不断改变位置，在太阳自转方向上呈椭长的分布。黑子的数目随

时间周期性地变化，平均周期为 11 年。在太阳黑子数最多的年份，太阳上的爆发和各种活动增多，称为太阳活动峰年。黑子数少的时候，太阳相对平静，黑子数最少的年份叫做太阳活动宁静年或太阳活动谷年。大多数黑子的寿命只有几天，但是大黑子可以持续几个月，一个大黑子的典型磁通量为  $10^{27}$  麦克斯韦，磁场强度可超过 4000 高斯。观测到的黑子往往成双或成群地出现，成双出现的两黑子群的磁极性相反，同一半球内的双极黑子群极性分布相同，不同半球的双极黑子极性分布则相反，在下一个 11 年周期中，双极黑子的极性反转。

太阳黑子与太阳磁场有着密切的关系。根据磁流体力学的理论可以分析黑子磁场的产生、发展及消亡。目前普遍认为太阳的磁场是带电物质的运动使得微弱的种子磁场得到放大的结果。由于太阳的“较差自转”，即在日面的不同纬度上自转角速度不同，使得光球下面的磁力线管缠绕起来，到一定的时候，磁力线管上浮到日面，形成双极黑子。

中国在古代就对太阳黑子进行了观测。西周后期的《周易》中记载有“日中见沫”、“日中见斗”，《汉书·五行志》中也有“……日出黄，有黑气大如钱，居日中央”的记载。大量的观测则是在望远镜发明以后。对观察资料的研究、分析表明，太阳黑子与人类生活的许多方面休戚相关。如：人们利用大气的电离层进行无线电短波通讯，通讯的可用频率与电离层的条件有关，若适逢太阳黑子活动高峰时，则与之紧密相关的耀斑活动也增强，耀斑所发射的高能粒子使最接近地面的电离层电子浓度大大增加，因而造成电离层对无线电波的吸收，使无线电通讯突然中断。这种情况有时会持续数天，为使通讯顺利进行，应对电离层的物理状态作出预测。对太阳黑子相对数的预测、预报，可为通讯部门事先选取最佳通讯频率等提供依据。此外，太阳上的变动也牵动着地磁场、地球气象等的变化，地磁变动的程度，一些长期气象要素（如降雨量等）的变化都有着明显的 11 年周期。农业产量、虫害的发生与发展、人类的某些疾病（如霍乱、神经系统疾病和心血管系统疾病）都有着 11 年的周期效应。

#### 太阳剖面示意图

- 1.核反应区，2.辐射区，3.对流层，
- 4.光球，5.色球，6.暗丝，7.黑子，
- 8.具有米粒组织的太阳表面

太阳能电池（solar battery）将太阳能直接转换成电能的半导体器件。基于半导体 P—N 结的光生伏打效应制成。当日光照射到 P—N 结时，其可见光部分在半导体中激发出电子空穴对，在 P—N 结的自建电场作用下，电子向 N 区聚集，空穴向 P 区聚集，使 N 区带负电，P 区带正电。于是在 P—N 结之间就产生一电动势，它可以向外输出电流的功率。一般单片太阳电池，在地球表面的日光强度下可产生 0.5 伏特的电动势，效率在百分之十以上，典型的输出功率是 5~10 毫瓦每平方厘米（结面积）。扩大结面积，可增加输出电流和输出功率。实用的太阳能电池由大量这种 P—N 结的小基片通过串联的并联构成。并联接法可增加输出电流，串联接法可增加输出电压，并联和串联接法均可增加输出功率。

太阳能电池的最重要的参数是它的转换效率，通常定义为最大输出功率与入射太阳能功率之比。转换效率的高低取决于制造太阳能电池的半导

体材料及其质量、制造工艺、结构和表面抗反射层介质的特性等。制作太阳能电池的常用的半导体材料有硅、砷化镓和硫化镉等。砷化镓太阳能电池的转换效率最高，但成本极高。目前最常用的是硅太阳能电池。

太阳能电池的寿命长，转换效率较高，使用安全，有广泛的用途，现已于计算器和人造卫星上作电源之用。

**太阳日 (solar day)** 太阳相继两次通过地球子午线之间的时间间隔。因是直接观测得到的，故称视太阳日。由于地球自转速度存在着三种变化：季节性变化、不规则变化和长期变化，所以视太阳日整年都在变化着。如 12 月份，一视太阳日约为通常钟面时间的 24 小时 30 秒；而在 9 月份，则为 23 小时 59 分 39 秒。一年中最长和最短的视太阳日相差约 51 秒，用它来计时很不方便，为弥补这一点，在天文上引入“平太阳日”概念。平太阳日是假想天上一点在天赤道上按太阳在黄道上以均匀速度自西向东运行，相继两次通过子午线的时间间隔。在一平太阳日中，通常的钟稳定地运行 24 小时。

**太阳同步轨道 (sun-synchronous orbit)** 轨道平面绕地球自转轴旋转、方向与地球公转方向相同、旋转角速度等于地球公转的平均角速度 (0.9856 度/天或 360 度/年) 的人造地球卫星轨道。根据理论计算，太阳同步轨道的倾角必须大于  $90^\circ$ ，高度不超过 6000 公里。在太阳同步轨道上运行的卫星，以相同方向经过同一纬度的当地时间是相同的。例如卫星由南向北经过北纬  $40^\circ$  上空是当地时间上午 8 点，以后每次由南向北经过北纬  $40^\circ$  都是当地时间上午 8 点。由于太阳同步卫星的这个特点，可以选择适当的发射时间，使卫星经过一些地区时，这些地区始终有比较好的光照条件，并且卫星在这些地区上空始终处在太阳光的照射下而不进入地球阴影。这时太阳能电池可以充足供电而不中断。倾角稍大于  $90^\circ$  的太阳同步轨道还兼有极轨道的特点，可以鸟瞰整个地球表面。气象卫星、地球资源卫星和照相侦察卫星一般都取太阳同步轨道，以使拍摄的地面目标的图象清晰而完整。

### 太阳同步轨道

**太阳系 (solarsystem)** 由太阳和受太阳引力作用围绕其运转的天体、尘埃粒子和气体组成的复杂体系。除太阳外，太阳系的成员有大行星、行星的卫星、小行星 (绝大多数位于火星、木星轨道之间)、数千甚至上百万颗质量甚小的彗星、流星体和稀薄的气体尘埃。太阳质量占整个太阳系总质量的 90% 以上，但角动量却只占 1%，它是唯一可从地球上看清表面细节的恒星。已知的大行星有九颗，按离太阳由近及远的顺序是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。这些行星各自沿接近圆形的椭圆轨道绕太阳运行。彗星体积很大而质量极小，它们只在离太阳足够近时才产生出背离太阳的彗尾，这是由彗尾发出的极稀薄物质在太阳风和辐射压的作用下形成的。与行星轨道不同，彗星的轨道有很大的偏心率并以各种不同倾角同黄道面相交。流星既指夜空中偶然看到的一掠而逝的亮光，也指形成流星亮光的本体——流星体。一般流星体很小，它们在穿经大气时被烧尽，但也有少数会落到地面，称为陨星。比陨星更小的是尘埃微粒，也常常会进入大气层，因剧烈摩擦发热而燃烧，这也是一种流星。

太阳系的范围一般指到冥王星的距离，约为 40 天文单位（太阳到地球平均距离，约为  $1.5 \times 10^8$  千米），但实际上太阳系范围要大得多，可能达几百个天文单位。太阳系是银河系的一部分，距银河系中心约 3.26 光年。太阳系以约 250 千米/秒的速度绕银河系中心旋转，旋转周期约 2 亿 3 千万年。

关于太阳系起源的理论很多，主要有两类：一类是有序演化说；另一类为灾变说。前一类的典型是德国的康德于 1755 年和法国的拉普拉斯于 1796 年提出的星云说，后人常把他们的学说合称为康德—拉普拉斯星云说。按该学说，太阳系最初是一个灼热而旋转的星云，因冷却而凝缩，旋转速度加快，使星云呈扁平状。当离心力超过引力时，逐次分裂出许多环形物。最后，星云中心部分凝聚成太阳，各个环则碎裂并凝结成为围绕太阳运行的地球和其他行星。灾变说则认为太阳曾同一颗恒星发生掠撞，巨大的起潮力把太阳部分物质拉出，形成一缕细丝状物质条并在以后破裂而形成行星。但近代太阳系起源理论已抛弃了这种灾变说，因用最大的天文望远镜在最近的恒星周围也观察不到像土星那样大的行星。

近年，天文学家正致力于寻找冥王星外的第十颗行星。其根据是冥王星实际运行轨道与理论计算值不一致，犹如海王星发现前人们发现天王星的运行轨道有摄动那样，因而估计在冥王星外侧有一颗尚未发现的行星。但目前尚未定论。

调幅 (amplitude modulation, 简称为 AM) 参见调制。

调频 (frequency modulation, 简称为 FM) 参见调制。

调 Q 技术 (Q-modulation) 谐振腔的品质因数称为 Q 值。定义为

$$Q = 2\pi \nu_0 \frac{\text{贮存在腔内的能量}}{\text{每秒损耗的能量}}$$

其中  $\nu_0$  是激光的中心频率。谐振腔损耗过大时，激光阈值高，不容易实现激光振荡；腔损耗小时，激光阈值低，容易实现激光振荡。调 Q 技术又称 Q 开关，是通过一些措施使谐振腔的 Q 值能按一定的程序改变。当 Q 值小时，激光阈值高，使粒子数反转值很大，如果此时使 Q 值突然变大，激光阈值变小，使受激辐射迅速增加，便能在极短时间内产生极高强度的激光。

转镜调 Q 使谐振腔的一个反射镜高速旋转，当该反射镜面与另一反射镜不互相平行时，Q 值低，上能级粒子数迅速积累。当该反射镜转动到与另一反射镜相平行的位置时，Q 值升高，从而产生激光巨脉冲。

电光调 Q 在激光谐振腔内加置一块偏振片和一块 KD\*P 晶体。光经过偏振片后成为线偏振光，如果在 KD\*P 晶体上外加  $\frac{\lambda}{4}$  电压，由于泡克尔斯效应，使往返通过晶体的线偏振光的振动方向改变  $\frac{\lambda}{2}$ 。如果 KD\*P 晶体上未加电压，往返通过晶体的线偏振光的振动方向不变。所以当晶体上有  $\frac{\lambda}{4}$  电压时，光束不能在谐振腔中通过，谐振腔处于低 Q 状态。由于外界激励作用，上能级粒子数便迅速增加。当晶体上的电压突然除去时，光束可自由通过谐振腔，此时谐振腔处于高 Q 值状态，从而产生激光巨脉冲。电光调 Q 的速率快，可以在  $10^{-8}$  秒时间内完成一次开关作用，使激光的峰值功率达到千兆瓦量级。如果原来谐振腔内的激光已经是线偏振光，在装置电光调 Q 措施时不必放置偏振片。

染料调 Q 在谐振腔中插入染料盒，当激光器刚运转，发射光强很小时，

染料的强烈吸收作用使 Q 值很低，上能级粒子数便能迅速积累；当腔内光强增加到一定程度时，染料突然达到吸收饱和，对该波长的光成为透明媒质，从而谐振腔的 Q 值突然升高，产生激光巨脉冲。染料成为光透明的过程称为染料漂白。由于漂白是暂时的，故染料可以重复使用。

声光调 Q 在谐振腔中放入声光介质，当没有超声波存在时，光束可自由通过声光介质，腔的 Q 值很高，容易产生激光振荡。当有超声波时，声光介质密度发生周期变化，导致折射率周期变化，使光束发生偏转，这时谐振腔的 Q 值很低，使上能级粒子数迅速积累。

调相 (phase modulation, 简称为 PM) 参见调制。

调谐 (tuning) 在无线电、电视、雷达接收机或发射机的电路或系统中，作有关频率的调节 (调节电感、电容或同时调节两者)，以便在选定频率上得到最佳性能的过程。无线电收音机和电视机选电台的过程就是调谐。机内的 LC 调谐电路的谐振频率为

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

改变 L、C 的值就改变  $f_0$ ，当  $f_0$  的值与外界的电台的载波频率  $f_i$  相一致时，调谐电路就发生谐振，这时就选准了该电台。在制造或维修设备时所进行的调谐，通常是用螺丝刀调节设备内部或后面的调整旋钮或中频变压器的磁芯帽。一般用户只需调节面板上的调谐旋钮，就可使设备获得最佳性能。

调制 (modulation) 使消息载体 (载波) 的某些特性随信息 (调制信号) 变化的过程。调制是各种通信系统的重要基础，也广泛用于广播、电视、雷达、测量仪器等电子设备。调制中采用的载波可以是正弦波、脉冲波 (或光波)，调制信号可以是话音、图像或其他物理量，也可以是数据、电报和编码等信号。前者是模拟信号，后者是数字信号。

图 1 调幅波的波形

正弦波调制有幅度调制 (简称调幅)、频率调制 (简称调频) 和相位调制 (简称调相) 三种基本方式，后两者也称为角度调制。

(1) 调幅 (AM)。正弦载波幅度随调制信号而变化的调制。图 1(a)、(b)、(c) 分别是单频调制信号  $u_\Omega(t)$ 、载波信号  $U_\sigma(t)$  和调幅波  $U_A(t)$  的波形。其载波幅度  $U_\sigma$  与调制信号瞬时值  $u_\Omega(t)$  成线性关系，但载频  $f_\sigma = \sigma/2\pi$  和相位  $\varphi$  保持不变。调幅信号  $U_A(t)$  可表示为

$$U_A(t) = U_c (1 + m \cos \Omega t) \cos (\sigma t + \varphi),$$

式中  $\Omega = 2\pi F$ ，是调制信号的角频率，其中 F 为调制信号的频率；m 是一个和调制信号幅度  $u$  成比例的常数，称为调幅系数，数值在 0~1 之间。调幅波的瞬时幅度变化曲线称为包络线。调幅系数 m 不能大于 1，否则包络线和调制信号不能保持线性关系，会产生失真。这种情况称为过调幅。

调幅的技术和设备比较简单，频谱较窄，但抗干扰性能差，广泛应用于长波、中波和短波广播、小型无线电话、电报等电子设备中。

(2) 调频 (FM)。正弦载波的瞬时频率随调制信号的瞬时值而变化的调制。1933 年由美国无线电专家阿姆斯特朗发明。图 2 是调频波的波形。它的载波的瞬时角频率  $\omega$  与调制信号瞬时值  $u(t)$  成线性关系，而幅度  $U_0$  不

变。单频调制时，瞬时角频率 可表示为

$$= \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t,$$

式中  $\Delta\omega = k_f U$ ，是一个和调制信号幅度  $u$  成正比的常数，称为最大角频率偏率。调频波的表示式为

$$U_f(t) = U_c \cos \left( \omega_c t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t + \varphi_0 \right),$$

式中  $\varphi_0$  是载波的初始相位； $\Delta\omega / \Omega = m_f$  称为调频指数，它可以是任何正数， $m_f$  很大时，调频波的频谱很宽，这种情况叫做宽带调频。

## 图 2 调频波的波形

调频具有良好的抗干扰性能，广泛用于高质量的广播、电视伴音、多路通信和扫频仪等电子设备中。

(3) 调相 (PM)。正弦载波的瞬时相位随调制信号而变化的调制。单频调相时，理想调相波  $U_\varphi(t)$  的表示式是

$$U_\varphi(t) = U_c \cos \left( \omega_c t + \varphi_m \cos \Omega t + \varphi_0 \right),$$

式中  $\varphi_m$  为载波相位随调制信号而变化的最大相移，称调相指数。它与调制信号幅度  $u_\Omega$  成正比，但与调制角频率  $\Omega$  无关。

调相具有优越的抗干扰性能，而且可以实现较窄频带，因而在各种数据传输和数字通信系统中得到广泛应用。

态的叠加原理 (principle of superposition of states) 量子力学的基本原理之一。量子力学中用波函数描写微观粒子状态，波函数满足的基本方程 (称为“薛定谔方程”) 是线性方程，所以如果  $\psi_1$  和  $\psi_2$  是该方程的解，则它的线性叠加态  $\psi = C_1 \psi_1 + C_2 \psi_2$  也是该方程的解。量子力学中态的叠加原理来源于物质粒子的波动性，所以这种态的叠加原理与经典波的叠加原理在数学形式上相同，但在物理实质上有着根本的区别。与微观粒子相联系的波是“概率波”，所以微观状态的叠加性实际上是一种概率性的体现。

弹簧秤 (spring balance) 利用弹簧的形变制成的测力计。一种典型的弹簧秤如图所示。图中弹簧秤的外壳内有一弹簧，上端连结一圈形拉手，并固定在外壳上。在未称重时，弹簧未伸长，其下端所附的指针指示刻度上的零位置。弹簧下端连结一挂钩，伸出秤外。弹簧秤的允许称重限制在弹簧的比例极限范围内，挂钩上悬挂的重物重量与弹簧的伸长成正比，所以秤上指示重量的刻度是均匀的。弹簧秤有如图中所示的拉力弹簧秤，也有使弹簧压缩而秤重的压力弹簧秤。必须指出的是，与弹簧的伸长或缩短相联系的形变，实际上是弹簧金属丝的扭转形变。

弹性力 (elastic force) 在外力作用下弹性物体变形后所产生的一种恢复力。弹性力是自然界中广泛存在的一种力，例如压缩或伸长了的弹簧施于物体的力等。在形变很小时，弹性力的大小与物体形变量成正比，其方向总与引起物体形变的外力的方向相反，或其方向总使变形的弹性体恢复其原来形状。例如，将弹簧一端固定，并沿  $x$  轴放置，弹簧未形变时，另一端 (末端) 的坐标为  $x=0$ ，当弹簧末端受外力作用而均匀拉伸或均匀压缩，只要此端位移  $x$  很小，弹簧末端施于物体的弹性力就是

$$F = -kx i。$$

式中  $i$  是沿  $x$  轴方向的单位矢量  $k$  是一个正的和物体材料有关的比例系数，称为弹簧的倔强系数，负号表示力和位移方向相反。当弹性物体的变形较大时，弹性力的大小不再与形变成正比，但力的方向总企图使物体恢复原来形状。

弹性力产生的原因是由于弹性体内分子之间斥力和引力不平衡而引起的。物体不受外力时，分子之间的相对位置正好使斥力与引力平衡。当物体被拉长时，分子之间的距离增加，这时引力大于斥力，在内部分子的过剩引力作用下，物体力图恢复原状而对外界施力物体产生抗拉恢复力，即弹性力。当物体被压缩时，分子间的距离减小，这时斥力大于引力，在物体内部分子之间过剩斥力的作用下，物体力图恢复原状而对外界施力物体产生抗压恢复力，也是弹性力。弹性力的特点是它在弹性体上所做的功并不转化为热，而是增加了弹性体的势能。所以弹性力是保守力。

弹性力学 (elasticity) 又称弹性理论。研究弹性物体在外力和其他外界因素作用下所产生的应力、形变和位移的学科。弹性力学起始于 17 世纪，其后发展过程主要分为四个阶段。第一阶段：实验定律的建立。其中有英国的胡克和法国的马略特分别于 1678 年和 1680 年独立地提出了弹性体的变形和所受外力成正比的定律，后被称为胡克定律。这一阶段中，还通过实验测定了许多材料的弹性模量（或杨氏模量）。另一方面，人们用并不完备的理论来处理一些简单构件的力学问题。第二阶段：基础理论的建立。纳维和柯西于 1820 年提出弹性理论的基本方程，1838 年格林和稍后的汤姆孙确定弹性系数为 21 个。这一阶段中，弹性力学的各种基本方程，例如几何方程、运动（平衡）方程、各向同性以及各向异性材料的广义胡克定律相继建立，并且已经能够把弹性力学问题化成在指定边界条件下求解某些微分方程的数学问题，或在指定的边界条件和起始条件下求解运动方程的数学问题，打开了弹性力学向纵深发展的突破口。第三阶段：线性问题的发展。始于 19 世纪中叶，是用弹性力学处理各向同性材料线性问题的大发展时期。这一阶段中，诞生了许多具有理论和应用价值的论文，促进了弹性力学在许多工程问题中的应用。第四阶段：非线性弹性力学的发展。从 20 世纪初开始，弹性力学进入了对非线性问题的讨论，并且出现了许多边缘分支，例如考虑温度影响的热弹性力学，研究固体同气体和液体相互作用的气动弹性力学和粘滞弹性理论等。这个阶段中，弹性力学的数学方法也在相应发展，出现了很多近似计算方法，近代计算机的问世，更有力地促进了弹性力学和非线性弹性力学计算方法的发展。

弹性力学所依据的基本规律有三个：变形的连续规律。反映这种规律的方程称为协调方程（6 个）。应力—应变关系规律。若应力和应变呈线性关系，这个关系便称为广义胡克定律，它是由 6 个方程组合而成的一组方程。运动（或平衡）规律。处于运动（或平衡）状态的物体，其中任一部分都遵从力学运动（或平衡）规律，即牛顿运动定律，它包含三个（分量）方程。弹性力学中的许多定理、公式和结论都可以由这三组基本方程推导出来。根据这些方程对应变、应力等物理量的分布所进行的精确数学推演，常称为数学弹性力学。实际上，由于数学上的困难，常引用关于形变和应力分布的某些附加假定来简化计算，得出具有一定精确程度的结果，这部分内容常称为应用弹性力学。许多不便通过数学求解而得出结果的弹性力学问题，常常通过实验方法在实物上或模型上测量所需的

量。在有的问题中，则可用数学和实验相结合的方法得出弹性力学问题的结果。

**汤川秀树** (Yukawa Hideki 1907 ~ 1981) 日本物理学家。生于东京。1929年毕业于京都大学。1938年在大阪大学获博士学位。1939年起先后任京都大学教授、东京大学教授。1948年任普林斯顿高级研究院客座教授、哥伦比亚大学访问教授。1953~1970年任京都大学基础物理学研究所第一任所长。

主要贡献是预言了介子，获1949年诺贝尔物理学奖。1935年，在研究原子核内部质子和中子之间相互作用的问题时，提出了著名的介子场理论。预言存在作为核力及衰变的媒介存在的新粒子，并算出这种粒子的质量大约是电子质量的200倍，由于质量介于质子和电子之间，故称为介子。还提出了核力场的方程和核力的势，被称为汤川势表达式。1935年，与坂田昌一合作，预言了K俘获。1937年，安德逊等在宇宙射线中，发现了类似汤川秀树所预言的介子，但发现它不能传递力的作用。1947年，在宇宙线中发现了另一种粒子，从而认定是汤川秀树预言的介子，被命名为介子。同年，提出了非定域场理论，试图解释电场发散问题。1953年，提出中间玻色子的思想，发表了非定域场的统一理论。著有《量子力学导论》(1947)、《基本粒子理论导论》(1948)、《基本粒子》(1961)。

**汤姆孙** J. J. (Joseph John Thomson 1856 ~ 1940) 英国物理学家。生于曼彻斯特。1871年入欧文学院，1876年成为剑桥大学三一学院的数学研究生。1880年取得数学荣誉学位考试的第2名，次年便成为三一学院研究员。1884年，年仅28岁便被选为英国皇家学会会员，并接替瑞利，任卡文迪什实验室主任职务，长达35年之久。1905~1918年兼任皇家学院自然哲学教授。1918~1940年任剑桥大学三一学院院长。1916~1920年任英国皇家学会会长。

主要贡献是发现了电子，获1906年诺贝尔物理学奖。1897年，研究阴极射线在磁场和电场中的偏转时，证明它们是带负电的粒子流。设计了著名的测定荷质比 $e/m$ 的实验，测得粒子荷质比比氢离子荷质比大2000倍(现在的精确测量为1837倍)，根据这种粒子的电荷与氢离子的电荷值相同，推得粒子的质量为氢离子的 $1/2000$ ，由此发现电子的存在。电子是人们认识的第一种基本粒子。电子的发现，标志着人类对物质结构的认识进入了一个新的层次，打破了人们认为原子是物质结构最小单位的概念，揭示了原子还有内部结构和电的物质本质，为向原子内部进行探索和量子力学的产生奠定了物质基础。

随着电子的发现，汤姆孙又作出一系列贡献。1903年，提出最早的原子的结构模型：原子是一个带正电的球体，而电子渗入这个球中，电子的总负电荷等于球体的正电荷，被称为汤姆孙原子模型。虽然该模型不符合事实，但为研究原子结构起到了先导作用。1904年，提出原子中的电子分成组，形成不同的组态，导致化学元素的周期性。1907年，提出质谱仪的工作原理。1911年，提出确定不同气体的离子的相对质量的抛物线方法，这对同位素研究有重要意义。1912年，在对一些元素的极隧射线研究中，最早得到了同位素存在的实验数据。1913年，将原子量为20和22的两种不同的氖离子区别开来，第一次用物理方法分离了稳定元素的同位素。

汤姆孙对电学理论研究也有很大贡献。在研究电磁波自由带电粒子散



射时，发现带电粒子在外来电磁波的作用下，被迫做同频率的振动，带电粒子在此过程中可将其吸收的电磁波再辐射出去而形成散射，被称为汤姆孙散射。最早应用经典理论，计算出电磁波为电子所散射的截面大小与电子的“几何截面”相近，被称为汤姆孙截面。著有《气体导电》（1903）、《电和物质》（1904）、《物质的微粒理论》（1907）、《原子论》（1914）。

**汤姆孙** G.P. (George Paget Thomson 1892 ~ 1975) 英国物理学家。生于剑桥。J.J.汤姆孙之子。1914年毕业于剑桥大学。第一次世界大战期间服过役。1919年到卡文迪什实验室工作。1922年任亚伯丁大学自然哲学教授。1930年任伦敦大学教授。1952年任剑桥大学教授。1930年当选为英国皇家学会会员。

主要贡献是用实验证实了德布罗意的物质波理论，获1937年诺贝尔物理学奖。早期，研究了电子被原子散射的问题。1923年，德布罗意提出物质波理论，并提出证实这一理论的实验设想，为此汤姆孙将他的电子散射实验与场的干涉实验结合起来，这些实验表明，电子虽然是粒子，但其行为又很像波。1927年，继续这方面的研究工作，用快速电子（速度相当于通过1000伏到8000伏电压后获得的值）做了实验，让电子垂直地射到非常薄（厚度在1/10000到1/100000毫米之间）的赛璐珞的薄片上得到衍射图样，通过衍射圆环直径来计算的波长值与德布罗意物质波理论给出的值非常吻合，于是证实了电子的波粒二象性，也证实了德布罗意物质波理论。著有《应用气体动力学》（1919）、《自由电子的波动力学》（1930）、《电子衍射的理论与实践》（1939，与科克伦合著）。

**汤斯** (Charles H. Townes 1915 ~ ) 美国物理学家。1935年毕业于富尔曼大学，1939年获加利福尼亚理工学院博士学位。1939~1947年在贝尔实验室工作。1948年任哥伦比亚大学物理学副教授，1950年任教授，1952年任物理系系主任。1961年任麻省理工学院院长。

主要贡献是对激光器的发明奠定理论分析和设计基础，获1964年诺贝尔物理学奖。1951年，珀塞耳应用核磁共振方法造成了粒子数反转，获得50千赫（属于无线电长波范围）的受激辐射，汤斯受到启发，开始研究爱因斯坦于1916年所预见的受激辐射问题。经过反复思索，尝试许多方法产生波长更短的相干电磁波而受挫后，突然闪现出利用二能级分子制造激光器的思想。与此同时，普罗霍罗夫和巴索夫也着手了对这一问题的研究。他们分别独立发现，如果使气体获得高能量，在适当的外界条件下，就可以造成粒子数反转，使气体处于激发态，同时产生大量的微波辐射。1954年，汤斯在他的研究生戈登和助手蔡格合作下，首先制成了第一台利用受激辐射原理工作的新型微波振荡器——氨分子微波激光器，工作波长是1.25厘米，但输出功率只有 $10^{-9}$ 瓦。1958年，微波激光器在汤斯等人的研制下，已经达到了理想的实用阶段。同时，汤斯和肖洛发表了对光频段工作的谐振腔的设计方案和光频段内得到粒子数反转的理论分析，预言了激光器的可能。1960年，梅曼制成了世界上第一台红宝石激光器，从而开辟了现代科学技术的一个崭新领域。

**天平** (balance) 利用杠杆原理来衡量物体质量或重量的一种仪器。其主要部分为一轻而坚固的三角形横梁，横梁的中点及两端各有一刀刃，中点处的刀刃向下，支于天平架的中央立柱的槽口内，使梁可绕此刀刃自由摆动。梁的中央附有一根长的指针，指于立柱下方所附的小刻度板上，以读得摆动度数。横梁两端刀刃的刀口向

上，各悬等重的秤盘一个。盘下和横梁下方各有盘托与支架。横梁的杆臂上刻有刻度，以备放置跨码之用。横梁两侧或一侧附有螺旋锤，以调整横梁在称重前的平衡。称重时，在一秤盘中放置待称之物，另一秤盘中放置砝码，天平接近平衡时，可继续调节横梁上跨码位置以微调至平衡。通过记录读数，测出重物的质量或重量。为防尘埃及空气扰动，天平常置于一玻璃柜中。天平底座是否水平，可旋转底座三足螺旋予以调整。一般的粗天平或物理天平的称量范围在数克至数百克之间，常量分析天平的称量范围为 0.1 毫克至 100 克，微量分析天平的称量范围为 0.001 毫克至 20 克。天平的式样很多，除了等臂式天平外，还有悬臂式超微量天平，其灵敏度可达 0.01 微克。

## 天平

**天体 (celestial body)** 宇宙间各种星体的通称。太阳系中的天体包括太阳、行星、卫星、彗星、流星以及行星际微小天体等。银河系中的天体有恒星、星团、星云以及星际物质等。河外星系是与银河系同样庞大的天体。近年来还发现红外源、射电源、X 射线源和  $\gamma$  射线源等，以上均属自然天体。目前在天空中运行的人造卫星、宇宙火箭、行星际飞船和空间实验室等，均属人造天体。

**天体力学 (celestial mechanics)** 天文学中较早形成的一门分支学科。用力学定律 (包括万有引力定律、牛顿运动定律及分析力学原理) 研究在引力作用下天体的力学运动与形状。

发展简史早期天体运动的研究以描述为主，主要描述太阳系 (太阳、大行星和月球等) 的运动。17 世纪开普勒提出著名的行星运动三大定律，能完整地描述行星运动的规律，并为牛顿的发现奠定了基矗 1687 年牛顿发表了《自然哲学的数学原理》，阐明了天体运动的基本原因是天体间相互存在引力，提出了著名的万有引力定律，从而较完满地解释了太阳系各天体的运动规律。从此，天体力学正式诞生，天体运动的研究进入了动力学阶段。1736 年欧拉在研究天体运动时提出了分析力学，后由达朗贝尔、拉格朗日等人加以发展和完善，从而建立了研究天体运动的摄动理论。拉普拉斯的巨著《天体力学》集中了牛顿以来天体力学的成果，成为经典天体力学的代表作。

19 世纪由于小行星、彗星和卫星的大量发现，这些小天体的轨道偏心率和倾角都较大，经典天体力学无法完善解释，德洛纳等人对经典分析方法作了改进，对以后的发展影响较大。到了 19 世纪末 20 世纪初，天体力学的两个基本方法——定性方法和数值方法逐步形成，前者由彭加勒等人创立；后者主要由科威尔和亚当斯等人创立。本世纪 50 年代后，由于人造天体的出现和电子计算机的广泛应用，天体力学进入了一个新时期，各类人造天体运动理论研究已成为现代天体力学的重要内容。电子计算机的广泛应用促使数值方法迅速发展，不仅用于解决各类实际问题，而且还用于定性和分析方法，使这两种方法得到相应发展。近一、二十年来，由于统计轨道力学的创立，非线性动力系统和三体问题稳定性等定性理论的新进展，尤其是混沌现象的发现，斯泽贝赫里概括这些天体力学的最新成就，提出了“天体力学非确定性”的新概念，使天体力学获得新的发展。

**学科内容** 天体力学研究对象主要是太阳系内的天体，50 年代后包括

人造天体和为数不多的恒星系统。天体的力学运动指天体质量中心在空间的位移和绕质量中心的转动（自转）。天体形状主要研究流体或弹性体在内部引力和自转离心力作用下的平衡形状及其变化规律。天体内部和天体间的万有引力是决定天体运动和形状的主要因素，故天体力学仍以万有引力定律为基础。虽已发现万有引力定律与某些观测事实发生矛盾（如水星近日点进动问题），需用广义相对论对这些事实作出解释，但就天体力学的绝大多数课题而言，相对论效应并不明显。

天体力学研究的主要内容有多体问题（包括二体问题、限制性三体问题和天体定性理论），摄动理论，轨道计算，历书天文学，天体形状和自转理论，人造天体的运动理论（包括人造地球卫星运动理论、月球火箭运动理论、行星际火箭运动理论和宇航动力学）等。

**研究方法** 主要用数学分析方法解运动方程，把天体位置作为时间的“显函数”。此方法固然好，但只在一些最简单的问题才有解。后来彭加勒提出“定性方法”，不用具体数字描述天体的运动，而是探测天体运动轨道的特性，因而对理论研究，特别是对不能用定量方法求解的问题更有意义。发展现代定性方法和使用电子计算机是现代天体力学的两大特点。由于电子计算机既快又可靠，使得级数解法又获得新的生命力。自宇航时代开始以来，用电子计算机求解问题的特解比寻求问题的通解更为重要。数值方法的迅速发展，不仅用于解决实际问题，还同定性方法和分析方法结合起来，进行各种理论问题的研究。

**天体物理学 (astrophysics)** 天文学的一门分支学科。它是应用物理学的理论、方法和技术研究天体和宇宙空间的形态、结构、化学组成、物理状态和演化的规律。

**发展简史** 从公元前 129 年古希腊天文学家喜帕恰斯首次目测恒星光度起，到 18 世纪赫歇耳开创恒星天文学，属天体物理学的孕育时期。到了 19 世纪中期，由于三种物理方法——分光、光度学和照相术广泛应用于天体的观测研究，对天体的结构、化学组成、物理性质有了比较完整的了解，形成了科学体系，发展成一门独立的分支学科。如 1859 年，基尔霍夫对太阳光谱的吸收线（即夫琅和费谱线）作出了科学解释，他认为吸收线是光球所发出的连续光谱被太阳大气吸收而成的。1864 年哈根斯用高色散度的摄谱仪观测恒星，证认出某些元素的谱线，以后又根据多普勒效应测定了一些恒星的视向速度。1929 年哈勃在研究河外星系光谱时，提出了哈勃定律。1931 ~ 1932 年央斯基发现了来自银河系中心的宇宙无线电波。40 年代，英国军用雷达发现了太阳的无线电辐射。此后，射电天文学蓬勃发展起来。60 年代用射电天文手段发现了类星体、脉冲星、星际分子、微波背景辐射。1946 年，美国开始用火箭在离地面 30 ~ 100 公里高度拍摄紫外光谱。1957 年，苏联发射人造地球卫星，为大气外层空间观测创造了条件。之后，美国、西欧、日本相继发射用于观测的人造卫星，装备了各种类型的探测器，用以探测天体的紫外线、X 射线、 $\gamma$  射线等波段的辐射，观测天体物理学进入了全波段观测时代。这一切不仅促进了高能天体物理、宇宙化学、天体生物学和天体演化学的发展，也向物理学、化学和生物学提出了新的研究课题。今天随着量子论、相对论、原子核物理和高能物理的发展，射电和空间技术在天文观测上的广泛应用，天体物理学的内容越来越丰富，已成为天文学最重要最活跃的一个分支学科。

**学科内容** 天体物理学的研究内容极为广泛，主要有以下几方面：以太阳为主要研究对象的太阳物理，包括太阳表面和内部结构、能量来源、化学组成、黑子、耀斑、日珥等太阳活动现象和规律，以及与地球科学交叉的日地关系研究；研究行星、彗星、卫星、小行星以及行星际物质的太阳系物理。随着各类空间探测器的发射，太阳系的研究已成为天文学中最活跃的领域之一；恒星天文和恒星物理研究，包括研究各类恒星、恒星集团、星际物质的分布和运动特性，它们的形态、结构、物理状态和活性、化学组成以及银河系结构和运动学；河外星系和宇宙大尺度结构研究，包括探测星系和各星系集团空间结构、运动学、相互作用，以及更大尺度的物质分布状态；以上各类天体的起源和演化问题。天体物理领域中如恒星形成、星系形成和演化过程，都是至今尚未解决的问题，随着空间和多波段观测手段的广泛应用，天体物理学将会取得更多的突破性进展。

**研究方法** 主要从实验观测和理论研究两方面进行，因而形成实测天体物理学和理论天体物理学。实测天体物理学以观测为基础，通过望远镜和各种后端接收探测设备取得各类天体的高精度观测资料，利用天文学、数学和物理学方法对观测结果进行分析和处理，从而为理论研究提供基本数据和资料，并验证理论推断。

理论天体物理学是根据理论物理学的原理和方法来研究天体的结构、物理性质和过程以及演化规律。它是解释已知天象的有力工具，且可预言尚未观测到的天体和天象。理论物理学中的辐射、原子核、引力、等离子体、固体和基本粒子等理论，为研究类星体、宇宙线、黑洞、脉冲星、星际尘埃、超新星爆发奠定了基础，从而可进一步了解宇宙结构和演化规律。

天体物理学一方面不断吸取物理学的最新成果来研究天体物理现象，丰富人类对宇宙的认识。深入了解宇宙的结构与演变规律；另一方面又以它的观测事实与理论成果促进物理学的发展。例如氢元素就是首先在太阳上发现的，25年后才在地球上找到。热核聚变反应概念也是在研究恒星起源时提出的。因此近年来天体物理学已成为自然科学的前沿阵地之一。

《天体运行论》(De Revolutionibus Orbium Coelestium) 波兰天文学家哥白尼的代表作。成书于1543年。原著是用拉丁文出版的，后被译成多种文字。中译本第1卷出版于1973年。该书的宗旨是阐述太阳为宇宙中心和地球运动的新学说。全书共分6卷，第1卷名“宇宙概观”，论述了太阳是宇宙的中心，地球和其他行星都绕太阳运行，概括了宇宙的总结构，是全书的精华；第2卷论地球的自转，按日心体系解释天体的视运动；第3卷论岁差；第4卷论月球的运动和日月食；第5、6卷论五大行星。该著作是哥白尼经过三十多年的犹豫以后，终于决定将这部“藏了四个九年”的“大家长久期待的著作发表出来”。哥白尼深知该著作的发表会遭到教会的反对。但是他泰然表明：“我不会在任何人的责难面前退缩下来。”“如果有人竟对我的设想横加指责，我将不予理睬，我认为他们的判断是粗暴的，对此我完全蔑视。”然而当印刷好的著作送到哥白尼手边的时候，他已经睡在临终的病床上。该著作的出版在思想界和科学界产生了巨大的影响，它是向宗教公开的挑战，揭开了近代天文学利宇宙观的革命序幕；它也宣告了自然科学的独立，从此自然科学便开始从神学中解放出来。

天文单位 (astronomical unit) 天文常数之一。常用符号 A 表示, 缩写为 AU。有两种定义: 粗略地指地球到太阳间的几何平均距离, 或指地球椭圆轨道的长半轴; 精确地说指月地系质心到太阳的几何平均距离, 或指月地系质心绕太阳公转的无摄动椭圆轨道的长半径。

根据开普勒定律

$$k^2 = \frac{4\pi^2 A^3}{T^2 S (1 + \frac{m}{S})}$$

k 为引力常数, S 为太阳质量, m 为月地系质量, T 为地球绕太阳公转周期, A 为月地系到太阳的平均距离。若太阳质量取天文质量单位 (即 S=1), 月地系到太阳的平均距离为天文距离单位 (即 A=1), 高斯根据当时不很精确的 T 和 m/S 值, 由以上公式算得 k=0.0172。1938 年第六届国际天文学联合会决定把 k 值固定, 不再改变。由此 k 值, 取 S=1, A=1, m=0 时, 可算得 T=365.257 日, 由此把天文单位定义改为: 当公转周期为 365.257 日, 一个假想的、质量为零的无摄动行星的椭圆轨道长半径, 等于一个天文单位。后来根据精确的 T 值和 m/S 值, 算得月地系统绕太阳公转轨道的长半径为 1.00000003 天文单位, 考虑地球运动受其他天体摄动的影响, 日地平均距离实际为 1.0000000236 天文单位。

根据几何法或三角测量法也可求得日地距离。测量地球表面相距很远的两地同时观察 (或同一观测点在早晚两次观测) 到太阳的视差或视角位移, 可求得相应的天文单位的长度 A 等于  $1.496 \times 10^8$  千米。20 世纪 60 年代, 利用雷达技术, 精确测出雷达回波时间与光速, 即可求得日地距离, 1976 年国际天文学联合会定出天文单位 A 为  $1.49597870 \times 10^8$  千米, 并把它改为导出常数, 此值于 1984 年起统一采用。

以天文单位为单位, 太阳系中诸行星与太阳之间的平均距离依次为: 水星 0.387, 金星 0.723, 地球 1, 火星 1.524, 木星 5.203, 土星 9.539, 天王星 19.18, 海王星 30.06, 冥王星 39.44。

天线 (antenna) 无线电设备中辐射或 (和) 接收电磁波的部件。它是用金属导线、金属面或其他介质材料构成的具有特定形状并架设在一定空间高度的一类装置。其作用是将发射机馈给的射频电能转为向空间辐射的电磁波能, 或者反过来, 把在空间传播的电磁波能转化为射频电能并输送到接收机。前者称为发射天线, 后者称为接收天线。无线电通信、广播、电视、雷达、导航、电子对抗、遥测、遥感、射电天文等工程系统, 凡是利用电磁波来传递信息的, 常常要依靠天线来进行工作。

一般天线都具有可逆性, 即同一副天线既可用作发射天线, 也可用作接收天线。在某些场合, 同一天线还可兼作发射和接收天线, 如脉冲雷达天线。但在设计发射或接收天线时, 却各具有其侧重点, 例如, 发射天线要考虑功率容量问题, 而接收天线则要考虑噪声温度问题等。

天线的特性由方向图、方向性系数、增益、输入阻抗、辐射效率、极化和频带宽度等表征。一般用户常关心天线的输入阻抗, 它是天线在馈电点的电压与电流的比值。知道天线的输入阻抗, 就可以选择合适的馈线与之相匹配, 馈线的特性阻抗应该等于天线的阻抗, 这样可以获得最佳传输特性。

为了适应各种不同用途的需要, 人们设计和研制出各种类型的天线。

对于这些天线，可以从不同角度进行分类：按工作性质可分为发射天线和接收天线；按用途可分为通信天线、广播天线、电视天线、雷达天线等；按工作波长可分为超长波天线、长波天线、中波天线、短波天线、超短波天线、微波天线等；按结构型式和工作原理，可分为线天线和面天线等。

**填充题 (fill in the blanks)** 由不完全叙述句构成要求以填空方式给出唯一固定答案的客观性试题。填充题是一种低层次的提供式简答题，即要求考生给出以字句、符号、数字、代数式等表示的确定的简单答案。它只能测试较低层次的识记和初步理解的能力。填充题命题时应注意题意必须明确，使考生明确究竟要求填什么，而不应模棱两可，让考生去猜测要求填什么。其次填充题要求考生填写的答案必须是唯一的，不应有几个可能都对的答案。例如应明确要求填写符号还是填写文字。要求填写物理数值时，一般应明确该物理量的单位。

在物理试题中，简单的问答题和计算推导题都属于低层次的提供式简答题，因此在一般情况下，可以把它们改成填充题给出，但必须注意，这仅仅是对计算推导相当简单的简答题而言。一般的计算推导论证题不应改成填充题的形式给出，更不能用填充题形式让考生解较复杂的计算推导题。

**铁电晶体 (ferroelectric crystal)** 见铁电性。

**铁电性 (ferroelectricity)** 在没有外电场时，某些材料表现出电偶极矩不为零的自发极化特性。具有铁电性的材料称铁电体或铁电晶体。铁电晶体的极化强度随外电场的变化具有滞后效应，所以可以用电滞回线来描述铁电材料的特性。当高于某一温度时，材料的铁电性会消失而成为顺电晶体，这个转变温度也称为居里温度  $T_c$ 。当温度低于  $T_c$  时，铁电体发生结构转变，使离子有很小的位移，因而产生了可察觉的极化。铁电体的出现或消失总伴随着晶格结构的改变，这也是从铁电相到顺电相的相变过程。

铁电晶体有钛酸钡 ( $BaTiO_3$ )、铌酸锂 ( $LiNbO_2$ ) 等。可见铁电晶体中其实并不含有铁。

**听闻 (threshold of audibility)** 人耳能引起听觉的最小有效声压。一般公认为  $2 \times 10^{-5}$  牛顿/米<sup>2</sup> ( $N/m^2$ )。若用分贝数表示，则 1,000 赫附近的听闻接近零分贝，其它频率的听闻一般高于零分贝。普通谈话声压为  $2 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-2}$  牛顿/米<sup>2</sup>；大街上载重汽车、摩托车声压为  $0.2 \sim 1$  牛顿/米<sup>2</sup>；很强的噪声（如鼓风机、凿岩机等）的声压为 20 牛顿/米<sup>2</sup> 左右。听闻随许多因素变化，不同的人有不同的听闻；即使是同一个人，阈值也随时间、年龄而异。因此听闻应根据许多正常青年的耳朵测试结果求平均。听闻与频率的关系曲线称为听闻曲线。它与痛阈曲线组成听觉区域的下限和上限。停表 (stop watch) 测量时间的常用仪器，也叫秒表。其准确度为 0.1 秒和 0.2 秒两种。停表有两种指针：长针为秒针，短针为时间累计针。

停表通常具有如下几种功能：复零，即置秒针和累计针回复到“0”刻度线的位置。开始，即按动按钮或者接触器，使秒针和累计针开始计时。停止，即按动按钮或者接触器，使秒针和累计针停止计时，测量者可以读取记下的时间值。在最早的机械秒表里就设置了以上三种功能，并

且由一个按钮按以上程序进行测量。按钮旋转还可旋紧秒表的弹簧，贮存机械能作为计时秒表的动力。以后发展的机械秒表带有“继续”和“停止”的开关，以计算测量时间的累计值。机械秒表测量完毕，应使秒针继续跳动，释放贮存的机械能，使秒表的卷簧保持良好的弹性，不致长期紧张、疲劳而影响使用的寿命。

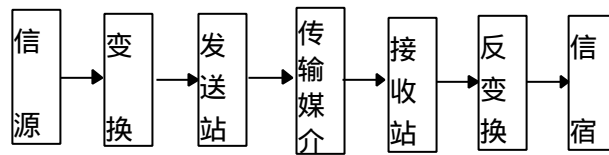
电子秒表是一种更新的时间测量仪。其准确度为 0.01 秒。时间由数字直接显示，累计时间通常不少于 100 秒。操作方法和程序与电子表的品种有关，但都是机械接触的形式，因此计时的准确度不能高于 0.01 秒。由于电子秒表的动力是薄层微型长寿命电池，所以不必像机械秒表那样要上紧卷簧和释放弹性势能。有的电子秒表表面上按置了太阳能电池，使秒表使用更趋方便和完善。

**通道控制 (channel control)** 通道指的是将外部设备连接到系统总线的硬设备，而不是传输信号的数据通路。在计算机系统中，对 I/O 的控制方式经历了循环检测 I/O 方式、程序中断 I/O 方式两种控制，它都要由 CPU 进行，当 I/O 设备很多时，处理机可能安全陷入 I/O 处理中，而无暇对作业进行处理。为把 CPU 从繁杂的事务中解放出来，I/O 设备的管理不能再依赖于 CPU，而应建立自己的一套管理机构，这就是通道的概念。所以通道设备有自己的命令，并希望自身的链接功能和转移功能构成通道程序，而 CPU 仅须发出一条 I/O 指令给通道，指出它所要执行的 I/O 操作和要访问的 I/O 设备。通道接到该指令后，便向主存索取相应的通道程序来完成对 I/O 设备的控制和管理。

**通信 (communication)** 信息的发送、传递和接收的总称。通信系统在把信息从甲地发送到乙地时，都要使用某种形式的编码和译码，因此通信技术主要研究载信息的电信号的产生、变换、处理、传输、交换和接收的技术和理论。自从 18 世纪末、19 世纪初人类发现电流现象以来，通信技术就得到了发展。19 世纪初，已有人开始试验远距离有线通信。1838 年第一条电报通信系统就已在英国建成。1844 年，美国科学家莫尔斯创立了莫尔斯电码系统，使通信水平有了较大的提高。但仍不能满足需要。例如 1865 年美国总统一林肯遭到暗杀，这一如此重大的事件，英国政府得知这个消息是在事后第十三天。其后从 1865 年到 1969 年的一百多年间，由于电磁振荡和电磁波地发现，使通信技术得到了新的发展。1866 年，横跨大西洋的海底电报电缆的铺设，缩短了洲际通信的时间。1876 年，美国人贝尔将电话推向实用。1895 年意大利人马可尼和俄国人波波夫各自独立地试验了无线电报。在 20 世纪初，马可尼已实现了横跨大西洋的洲际无线电报通信，从而开创了无线电通信的新时代。本世纪 50 年代后，以微波接力通信为主体的通信网、通信卫星以及光纤通信等技术的相继出现和飞速发展，使通信的速度和容量有了更大的提高。1969 年，美国阿波罗飞船将人类送上了月球，宇航员在月球上第一次登陆的消息，只用了 1.3 秒就已经传遍全世界。

通信过程如下图所示。首先信源发出带有信息的信息。信源通常有两类，一类信源基本上产生连续变化的信号，例如语言、音乐、电视摄像机输出信号等。另一类信源产生的信号是断续的，例如拍发电报时的键信号，若干种计算机操作信号。为了将信源产生的由各种物理量（如声的强度、光的亮度）表示的信息变换成电信号，需要使用各种变换装置。这种变换

装置可以是光—电变换器，如摄像机和传真机中使用的变换器。发送站的作用就是将各路传送来的信号进行编码、调制等处理，并将信号放大发送出去。



通信过程方块图

发送后的信号须通过传输过程才能送达接收站。通常传输过程可分为有线和无线两类。在有线通信中，电磁波沿线路传播；在无线电通信中，电磁波在自由空间（或地下、水下）传播。信号在媒介传输中将会受到衰减，出现衰减和失真，并且还可能引入噪声和干扰。

接收站收到信号后，经解调、译码等处理，获得送入发送站前的原始电信号，再经反变换过程处理，将信号提供给信宿。

通信是一种复杂的信息传输过程，除上述各种过程外，还有处理、显示和对抗等各种过程。但是并非所有通信都需要经过全部传输过程。

近年来，光纤数字通信和卫星通信使传统的通信技术发生了质的飞跃。光纤通信加上卫星通信，可形成以计算机为中心的三维通信网络。它将成为信息社会的“神经中枢”。计算机与通信相结合而形成的全球性计算机通信网络，其功效无可限量。人们只要经过简单的操作，就可以和世界上任何人对话，于是人们可借助于通信网络终端设备分享全球的信息资源。

**同位素 (isotope)** 电荷数相同但核子数不同的各种核素称为同位素。例如 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 及 ${}^3_1\text{H}$ 都是氢的同位素。由于同位素具有相同的电荷数(原子序数)，在周期表上处于同一地位，因而它们具有类似的物理和化学性质。

绝大多数元素至少有两种稳定的同位素，其中锡的同位素最多，共有十种。每种元素的各种稳定同位素是以某种百分比存在于自然界中的。某一稳定同位素在这种元素中的含量百分数称为该同位素的“丰度”，可作为该同位素稳定性的量度。例如，氢中就有 99.9851%的 ${}^1_1\text{H}$ 和 0.0149%的 ${}^2_1\text{H}$ ；铀中有 99.280%的 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 、0.714%的 ${}^{235}_{92}\text{U}$ 和 0.06%的 ${}^{234}_{92}\text{U}$ ；氧中有 99.7587%的 ${}^{16}_8\text{O}$ 、0.0374%的 ${}^{17}_8\text{O}$ 和 0.2039%的 ${}^{18}_8\text{O}$ 。某元素的各种同位素具有不同的原子量，该元素的原子量是按各种稳定同位素的丰度而计算出来的平均值。

除稳定的同位素之外，有些元素还存在放射性同位素。自然界中现在已知的稳定的同位素约有 300 种，放射性同位素则有 700 种以上。随着原子核物理学的发展，目前已经可以用人工方法来制造各种核素的同位素。迄今为止，已知元素有 109 种，而地球上天然存在和人造的同位素已达数千种。

同位素的研究一方面推动了原子核物理学的发展，另一方面它又被广泛地应用于生产和其它各领域之中。

**同位素的应用 (application of isotope)** 主要指放射性同位素的应用。早在 20 世纪初期天然放射性核素发现不久，法国科学家皮耶尔·居



里和两位医学工作者用动物作实验，发现放射性核素镭的射线有摧毁肿瘤细胞的作用，从而开创了放射性应用的新纪元。由于天然放射性核素提炼程序复杂，产量少，价格高，品种也只有铀、镭、氡、钍等几种，所以未能广泛应用。

20世纪30年代发现了人工放射性，而且随着粒子加速器技术的发展，用高能带电粒子或中子轰击原子核能够生产多种人造放射性同位素。采用放射性同位素对各种学科领域的研究已取得了不少成果，如植物的光合作用，化学离子交换现象，金属扩散等。同位素开始作为新的有效的手段出现在科学技术的各个部门中。

第二次世界大战结束以后，随着原子核反应堆数量的增加，放射性同位素的生产和应用又得到了进一步发展。人们可以用反应堆所产生的中子来制造放射性同位素，也可以从反应堆的裂变产物中提炼出放射性同位素。用反应堆提供放射性同位素不仅产量大，而且成本低，品种多。目前放射性同位素不仅应用于科学研究，而且大量地应用于工农业生产，取得了很大的效益。

放射性同位素的应用主要分两个方面，即利用它放出的射线和作为标记原子（示踪原子）。

(1)射线的应用。在应用放射性同位素的射线时，首先应根据射线的种类、强度、半衰期、能量等选择适当的射线源。当然还应当考虑供应射线方式是否方便，价格贵贱，是否容易发生放射性污染等问题。常用的射线源如下表中所列。

射线源	放射源	半衰期	能量	备注
射线	钋 210(天然放射性同位素)	138 天	5.3MeV	在空气中的射程约为 3.7 ~ 3.9 厘米
	钷 239(人造超铀元素)	$2.44 \times 10^4$ 年	5.15MeV	
射线	铊 204	2.7 年		
	铯 90	28.1 年		
射线	钴 60(原子反应堆中产生)	5.27 年	1.0MeV 以上	应用极广泛(有时也作 射线源)
	镭 226	1622 年		
	铯 137	37 年		
中子射线	钋—铍中子源			价格便宜
	镭—铍中子源(伴有 射线)			价格昂贵，强度稳定

放射性同位素射线可根据其特性分成以下几种应用。

射线有穿透各种物质的本领。利用这一特性，采用适当的射线和适当的探测方式，能够探知物体内部的缺陷，检查成品的质量，在无损伤、无接触的条件下测定产品的厚薄、密度等，并且能在连续测量的基础上实现对产品质量的自动控制。例如，射线探伤法有两个主要优点：第一，选用能量高的射线源钴 60 等可以检查厚达 15 厘米的钢铁制品；第二，射线源工作可靠，不怕振动，不易发生故障，而且体积很小，甚至可以放到机件内部去检查。与其它探伤法相比，磁力法探伤只能探明近表面的损伤，超声波法只能探明较深部的缺陷，且对零件表面还都有一定的要求。而射线探伤法能同时探明近表面和深部的缺陷，对表面也没有什么特殊

的要求，而且搬动、操作、维护都很方便。

射线对有机体能产生多种效应，在医学、化学和食品工业及农业中都有广泛的用途。例如癌细胞对射线特别敏感，利用射线可以治疗癌肿；射线可以杀虫、灭菌，大多数细菌（如沙门氏杆菌等）对射线都很敏感，用射线消毒是一种新的有效的方法。这种方法特别适用于不耐高温的药品和手术器械，如加热消毒会损害手术用可吸收缝线的质量，如果采用射线消毒，只要剂量选择适当，就可以既不降低质量又达到消毒的目的。在食品工业中，用射线照射杀虫对食物进行处理已经做过大量试验，例如用较低剂量的射线照射能抑制马铃薯等的发芽，从而延长保藏时间；肉食工厂对整条猪肉进行照射，以消灭猪肉中旋毛虫幼虫的危害等等。当然，对食品处理实验成果的推广应该是慎重的。经强射线的照射能影响许多化学反应过程，其中有不少具有实际应用价值。例如，利用射线的辐照聚合作用，提供了制取高分子化合物（塑料等）的新方法，这种方法与用高温、高压或催化剂等进行聚合的方法相比有更多的优点，例如可避免催化剂的渗杂作用，便于控制，有时还能提高聚合速度，提高产量。此外，射线对种子的照射能引起种子的遗传变异，可用于选种工作以获得增产。

用射线影响化学过程和改变材料的物理性质。例如，在射线照射下可以影响氮的氧化过程，这是用射线固定氮的一种方法。射线照射过的高分子化合物可以产生交链作用，如聚乙烯经照射后耐热性能从 70 提高到 200，人造橡胶丁二烯乙苯乙烯经照射后，强度由每平方厘米 3 千克增加到 12 千克。

射线穿过气体能使气体发生电离，生成离子，可以用来消除不良导体在迅速运转过程中积累的静电荷。由于射线的射程过短，射线电离能力差，所以工业上多用射线消除静电积累。将射线源铊 204 或铯 90 等与银一起轧成带状薄片，再在表面镀一层银作保护层。使用时把含有放射性同位素的银带嵌在有槽的铝条上，面对容易产生静电的地方，把铝条接地。射线使铝条和产品之间的空气电离，电离后的气体就成了导体，静电荷通过空气从铝条上“漏去”。如采用送风式静电消除器还可以保护操作人员不受射线影响，且电离较均匀，在静电电荷产生速度不太快、但散布范围要求广的场合，消除静电积累特别适用。

(2)用作示踪原子。用放射性同位素或稀有稳定同位素作为示踪剂，研究化学、生物或其他过程的方法称为同位素示踪。用放射性同位素作为示踪原子（标记原子）有两个明显优点：易于辨认，灵敏度高，探测较方便。比如用磷 32 作示踪原子，即使量少到  $10^{-17}$  克，还能较容易地测出它的存在。而且可以节省许多繁复的分离手续，甚至可以在活的有机体上进行测定。放射性同位素的化学性质和本核素的稳定核素的化学性质相同，因此它能跟踪待研究物质的运动和变化。

应用示踪原子的方式有三种：在要研究的对象中加入少许放射性物质，测定其变化就知道被研究对象的情况。例如在高炉炉衬易烧损的地方埋入少量放射性钴，探测放射性的存在与否就可以知道炉衬烧损与否，从而采取必要的措施。把示踪原子和要研究的对象密切混合以追踪它们的运动。例如利用可溶性放射性物质的溶液可寻找自来水管漏水的地方，利用放射性气体研究空气调节系统的效率等。在待研究物质中加入同种物质的放射性同位素，由于它们化学性质相同，因此它能追踪研究对象的化

学变化和它们在有机体内的变化和运动。更重要的是放射性同位素不仅能跟踪同种核素的原子，而且能区别于同种核素的原子，这就大大有助于人们揭露自然的奥秘。

同位素示踪方法的应用极广泛：在生命科学中，可以从分子水平动态地观察生物体内或细胞内生理、生化过程，认识生命活动的物质基础。例如通过采用碳 14、氘、磷 32 等同位素对核酸同蛋白质相互关系的研究，不但可以了解生物体内生成核酸和蛋白质的复杂过程，甚至可以了解生物遗传是如何实现的，乃至探讨人工改造遗传特征的可能性，因而产生了分子遗传学及遗传工程等新学科。在工业上，示踪原子为使用多种高效能的检验方法及生产过程自动控制的方法提供了可能性，解决了不少技术上和理论上的问题。例如，测定金属间扩散的速度，测定流体速度，研究金属在不同冶炼过程中（或合金在热处理前后）的结构变化等。在医学上主要用于诊断疾病。例如，用示踪剂被稀释的原理测定水容量、血容量；利用示踪剂移动及其速度来测定血流量、肾功能、心脏功能、血栓形成、消化道失血等等。在农业及畜牧业上广泛应用于农业科学研究，并取得了巨大的经济效益，如施肥途径和肥效的研究；杀虫剂、除莠剂对昆虫和杂草的生物作用；激素、维生素、微量元素、饲料、药物对家畜生长和发育的影响；用同位素标记昆虫、寄生虫、鱼及其它动物所发现的这些大小动物的生命周期、迁徙规律、交配和觅食习性等。在物理、化学等自然科学和环境科学中，也得到广泛的应用。如溶解度的测定、超薄厚度的测定、化学反应的历程、环境污染的检查等。

同位素除上述两大类主要方面的应用外，还有许多用途。例如把同位素射线的辐射转化为电能的原子电池；利用射线照射样品使产生核反应生成放射性物质，以分析其中微量物质的含量的放射分析法；利用岩石（或古物）中的钾 40（或碳 14）的含量鉴定它们的年龄等等。

同位旋 (isospin) 描述强子内部特性的一种量子数，常用  $I$  表示。例如在原子核结构中，质子 ( $p$ ) 和中子 ( $n$ ) 除电荷状态不同而存在差异外，在强相互作用方面具有完全相同的性质。或者说，当略去电磁相互作用时， $p$ - $p$ 、 $p$ - $n$  和  $n$ - $n$  的强作用完全相同，这就是所谓核力的电荷无关性。因此从强相互作用来说，质子和中子是同一种粒子（称为核子）。中子态变换为质子态，或者质子态变换为中子态，这些变换在强作用中是对称的。为了描写强作用的这种对称性质，物理学家引进了同位旋这个物理量。质子和中子的同位旋相同，为  $I = \frac{1}{2}$ ，但它们的同位旋第三分量  $I_3$  不同，分别为  $+\frac{1}{2}$  和  $-\frac{1}{2}$ 。再如  $+$ 、 $0$ 、 $-$  三种介子在强作用中也显示出这种对称性。因此可把它们看作是同一种粒子，即  $\pi$  介子的不同状态。它们的同位旋设计为  $I=1$ ，同位旋第三分量分别为  $+1$ 、 $0$  和  $-1$ 。 $I = \frac{1}{2}$  的粒子称为同位旋旋量粒子， $I=1$  的粒子称为同位旋矢量粒子。此外还有同位旋标量粒子，如  $0$ ， $-$  超子，它们的  $I=0$ 。在强相互作用过程中，体系的总同位旋是守恒的。电磁作用和弱作用则会破坏同位旋守恒性。同一同位旋粒子（如  $p$  和  $n$ ）的质量差是由于电磁作用和弱作用引起的。

同相面 (phase front) 见波阵面。

**统计物理学** (statistical physics) 物理学的一个重要分支, 它和热力学一起构成热学理论。统计物理学是热学的微观理论, 热力学是热学的宏观理论。

统计物理学从物质的微观结构出发, 力图揭示出热运动的本质。统计物理学根据普遍的力学定律和统计原理, 成功地导出了热力学的基本定律, 解释了热力学无法说明的涨落现象。因此, 统计物理学是比热力学更深一个层次的学科, 它在研究方法上和在对物质内在性质的处理上比热力学更深入, 因此它的应用也比热力学更广泛。

**发展简史** 统计物理学是在气体动理论的基础上发展起来的。从历史上看, 虽然物质结构的原子分子学说可以追溯到古希腊时代, 但是直到 17 世纪由于定量描述气体性质的需要才被重新提出来。玻意耳和胡克先后引入压强这个物理量, 并指出气体的压强来自气体分子与器壁的碰撞。他们还通过实验发现, 气体的压强在温度不变时反比于气体的体积, 而与盛放气体的容器形状无关 (玻意耳定律)。1738 年伯努利首次提出了气体运动论, 他假设气体分子是弹性小球, 它们在运动过程中不时地互相碰撞, 由此导出了气体的实验定律。

一个世纪以后, 分子运动论经过许多科学家的工作而得到了迅速的发展, 其中克劳修斯、麦克斯韦和玻耳兹曼是分子运动论的主要奠基者。克劳修斯在 1858 年最早提出了分子平均自由程的概念。其后麦克斯韦等人应用这个概念发展了气体分子的扩散、粘滞和热传导理论。1872 年玻耳兹曼对稀薄气体导出了一个输运方程, 并引进“H 函数”。他由这个方程证明, H 函数随时间变化总是减少, 或者保持不变 (H 定理)。这个结论比以往任何理论更加显示出统计物理学的基本方法特征。

1902 年, 吉布斯发表了他的专著《统计力学的基本原理》, 把麦克斯韦和玻耳兹曼等人创立的统计方法推广而发展为普遍适用的平衡态统计系综理论。原则上, 只要给定组成系统的力学上的微观特性, 就可计算出该系统的全部热力学量。

利用吉布斯创立的统计物理理论可以成功地解释许多宏观现象, 然而应用到黑体辐射和低温下固体比热这类问题的研究时却遇到了困难。这个问题直到 1900 年普朗克创立量子论后才得到解决。量子论指出, 描述微观粒子运动应采用量子理论, 而不是经典力学。正是基于这一点, 爱因斯坦和印度科学家玻色在 1924 年建立了玻色—爱因斯坦量子统计法, 并发现了著名的玻色—爱因斯坦凝聚现象。13 年以后, 伦敦利用这个原理从微观上解释了低温下液氦的奇异特性。1926 年费米根据泡利不相容原理发现, 某些物理系统遵循另一种量子统计法, 即费米—狄拉克量子统计法。利用这个方法, 索末菲在 1928 年重新解释了金属中由于存在传导电子而引起的几乎所有重要特性, 所得到的结果与实验相符。托马斯和费米还研究了较重原子中电子的分布, 建立了所谓原子的托马—费米模型, 这个模型在固体物理、分子物理和核物理中有着广泛的应用。

本世纪 70 年代以后, 统计物理在处理相变问题上取得了重大进展。卡丹诺夫和威尔逊等人借助于标度理论和重整化群方法, 成功地描述了系统接近临界点时微妙的奇异行为。由于威尔逊的杰出贡献, 他荣获了 1972 年诺贝尔物理学奖。

**统计物理的理论体系** 统计物理从物质的微观结构和相互作用出发,

并采用基本的统计假设。与其他物理学理论比较，统计物理包含的假设最少。例如，在只涉及平衡态的统计物理中，实际上只有一条基本假设：对于粒子数  $N$  足够大的宏观系统，它的能量处在  $E \sim E \pm \Delta E$  之间，如果没有更多的知识来确定该系统到底处于什么状态，就假设该系统以相等的概率处于各种可能的状态（等概率假设）。正是在这个基本假设下，再加上对分子、原子结构模型的知识，便可导出“配分函数”，并由此算出平衡态系统的全部热力学量。统计物理以它的基本假设的简单性、科学推演的严密性以及应用对象的广泛性而使它成为理论物理中最完美的学科之一。现代统计物理借助于高度发展的计算机，已经能够处理各种复杂的物理模型，得到许多已被实验证实的推论。在与应用技术十分密切的固体、超导以及超流等凝聚态现象的研究中都离不开统计物理。反之，在解决这些实际物理问题中，统计物理又获得了更大的发展。

**痛阈**（threshold of feeling）使人耳产生疼痛感觉的最低有效声压。一般认为其值为 20 牛顿/米<sup>2</sup>。当声压高达数百牛顿/米<sup>2</sup>时，会引起鼓膜损伤、耳朵出血等。也就是说，声压级在 120dB 左右，人耳即开始感到有压痛感。痛阈与频率的关系曲线称为痛阈曲线。它与听阈曲线组成听觉区域的上限和下限。

**透光镜**（photic lens）又称“透光鉴”，一种曲率不等的反射镜。最早由我国发明。其外形与铜镜无异，但当它的反射光束投到屏幕上时，镜背的花纹字迹却清晰可见，仿佛光线“透”过铜镜，把镜背的花纹字迹映在屏幕上似的，故而得名。它的这种奇妙性质，引起古今中外人士的浓厚兴趣，从而成为越出我国国界的一件世界性的光学器件。目前，传世最早的透光镜是上海博物馆珍藏的四面，据鉴定为西汉遗物。对于透光镜机理的研究，最早是北宋的沈括。他对实物反复仔细地观察后，提出了铸造时因厚薄不同，冷却有先后，铜的收缩有差别的看法。清代的郑复光对沈括的看法作了重要补充：即由于铸造时冷却速度不同，铜的收缩力不一，形成镜面隐然有凹凸不平，这种凹凸不平容易在刮磨时消除，虽“照人不觉”，但“发光必现”。他认为这种“透光”是与静止水平面在墙上映出“莹然动”的水光道理相同，因为水面也存在着人难以察觉的波纹，从而指出了长光程的放大现象。对透光镜这个总的说明，后世学者几乎没有有什么异议。一百年后，英国物理学家布拉格在解释透光镜时，恰巧也用了这个比喻。他说：“我们用波纹水柜做实验的时候，投在屏上的水光波影，看起来十分明显……，然而当我们注视水面，以观察这些波纹时，其本来面目并不容易看见。”可见郑复光的补充说明是多么的妥贴。至于透光镜的制造方法，尽管在我国历史上是多种多样，然而任何一种方法都要求十分精巧的工艺，充分显现了我们祖先的伟大创造。以后日本在江户时期（相当于我国明朝时），也制造出有透光效果的“魔镜”。欧洲人最早接触透光镜是在 19 世纪初期。另有记载，1844 年时法国科学院曾接受法国物理学家阿拉果赠送的一枚透光镜，从而引起欧洲科学家们的热烈讨论。

**透镜**（lens）由玻璃、塑料、石英或其它透明材料制成的含有两个或两个以上共轴折射表面的光学元件。有两个折射面的称为单透镜；有两个以上折射面的称为复合透镜。折射面通常为球面或平面。中央厚、边缘薄的透镜称凸透镜，能使光束会聚，故又称会聚透镜或正透镜。中央薄、边缘厚的透镜称凹透镜，能使光束发散，故又称发散透镜或负透镜。以上

是指在空气中使用这些透镜时的情况。在另一些情况下，例如当透镜材料的折射率小于透镜前后两侧媒质的折射率时，其会聚和发散作用需要另外讨论。将几块透镜粘合在一起，形成复合透镜，可用以改善成像质量。根据厚度大小，透镜又可分薄透镜和厚透镜两类。

薄透镜透镜两球面在光轴上的间隔称为厚度。厚度与它的焦距相比可以忽略不计时，称为薄透镜。因此，薄透镜两球面表面的顶点（即与光轴的交点）被认为是重合的，且称为薄透镜的光心。也因为厚度可忽略不计，出射光线的出射点被认为就是入射光线的入射点。如果前后两球面的曲率半径分别为  $r_1$  和  $r_2$ ，透镜材料的折射率为  $n_L$ ，并设透镜在空气中使用，则薄透镜的物方焦距  $f$  和像方焦距  $f'$  由下式确定：

$$f=f' = \frac{1}{(n_L - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}。$$

凸透镜有实焦点，故  $f, f' > 0$ 。因为  $n_L > 1$ ，故要求  $\frac{1}{r_1} > \frac{1}{r_2}$ 。凹透镜有虚焦点，故  $f, f' < 0$ ，因而要求  $\frac{1}{r_1} < \frac{1}{r_2}$ 。 $r_1$  和  $r_2$  为需要遵循符号法则的代数量，可正可负（参见球面折射）。因此可组合成双凸、平凸、凹凸等凸透镜和双凹、平凹、凸凹等凹透镜。当透镜的一个折射面为平面时，它的曲率半径为无穷大。作图时，凸透镜用  $\uparrow$  表示，凹透镜用  $\downarrow$  表示。

**薄透镜物像公式** 它的高斯形式为

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f}，$$

式中物距  $s$  和像距  $s'$  都从光心  $O$  点算起。如果用  $x$  代表从物方焦点  $F$  算起的物距，用  $x'$  代表从像方焦点  $F'$  算起的像距；并规定当物点在  $F$  之左则  $x > 0$ ，在  $F$  之右则  $x < 0$ ；像点在  $F'$  之左则  $x' < 0$ ，在  $F'$  之右则  $x' > 0$ ，可得薄透镜物像公式的牛顿形式为：

$$xx' = ff'。$$

物经光学系统后所成的像在垂直于光轴方向上的放大倍数，称为横向放大率。薄透镜的横向放大率 为：

$$\beta = -\frac{s'}{s} \text{ 或 } \beta = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f}，$$

为正值时成正立像；为负值时成倒立像。

**薄透镜成像作图法** 作图规则：实际光线用实线，延长线和辅助线用虚线；光线上用箭头表示传播方向；尽可能按比例作图。

**主轴上物点  $P$  的成像作图法**：利用物方焦面作图时可采用如下步骤（见图 1(a)）。由  $P$  点沿主轴的入射线经透镜后方向不变；过  $P$  点作任意光线  $PA$ ，与物方焦平面交于  $B$ ，与透镜交于  $A$ ；作辅助线  $BO$ ；过  $A$  作平行于  $BO$  的折射光线，与主轴交于  $P'$ ，即为像点。此法对凸透镜和凹透镜都相同，其间的区别仅在于焦平面位置不一样（见图 1(b)）。利用像方焦平面作图时，可采用如下步骤（见图 2(a)）。过  $P$  作任意光线

图 1 主轴上  $P$  点成像作图法：利用物方焦面

### 图 2 主轴上 P 点成像作图法：利用像方焦点

交透镜面于 A；过 O 点作 PA 的平行线，交像方焦平面于 B；连结 AB，其延长线交主轴于 P'，即为像点。此法对凹透镜情况完全类似，见图 2(b)。

主轴外物点 P 的成像作图法：在下列三条基本光线中，任作两条，即可求得像点（见图 3(a)）。过 P 点作平行于主轴的入射线，交透镜于 A，经过透镜后的折射线必通过像方焦点 F'；过 P 点作通过光心 O 的入射线，经过透镜后方向不变；过 P 点作通过物方焦点 F 的入射线，经过透镜后成为平行于主轴的折射线。此法对凹透镜也适用（见图 3(b)）。

### 图 3 主轴外 P 点成像作图法

**透射 (transmission)** 光辐射不改变频率而穿透媒质的现象。

光波从两种媒质界面单位面积上单位时间内透过的能量与相应的入射光波能量之比，称为透射率。能量之比等于光强之比，故透射率即为透射光强与入射光强之比。对于均匀媒质，单位厚度的透射率称为透射系数，有时将透射光波振幅与入射光波振幅之比称为透射系数，或称为透射比。我国全国自然科学名词审定委员会于 1988 年公布的物理学名词(基础物理学部分)中，分别将它们称为强度透射率和振幅透射率。

**湍流 (turbulent flow)** 又称紊流。流体的一种不规则运动状态。其时流体上各点描述流体运动的物理量如流速、压力等均随时间而发生紊乱的变化，然而从统计意义上说，可以得到它们的准确的平均值。湍流的微粒不仅有横向脉动，且有相对于流体总运动的反向运动，即有涡旋和各部分动量的迅速交换。与层流不同，此时流体质元有宏观上的相互混杂，迹线极不规则。此时流体的阻力与运动物体速度的平方成正比。当雷诺数大于临界值时，流体运动由层流而转变成湍流。

湍流是一种非常普遍的现象。气体的扰混现象就是湍流产生的。有风时，空气的运动总是湍流。物体在流体中运动时，在它的后面也会形成湍流。例如在水中运动的船，船后就形成湍流。当物体前部不是流线型时，湍流现象特别明显。湍流利弊兼有。一方面它强化传递和反应过程；另一方面极大地增加摩擦阻力和能量损耗。鉴于湍流是自然界和各种技术过程中普遍存在的运动状态，研究、控制和预测湍流是发展现代技术的重要课题之一。

**托里拆利 (Evangelista Torricelli 1608 ~ 1647)** 意大利物理学家、数学家。生于法恩扎。曾在伽利略的学生卡斯泰里的指导下学习。1641 年卡斯泰里将他正式介绍给伽利略，托里拆利便与维维安尼一同给伽利略作伴，经常讨论学术问题。1642 年，伽利略去世后，他继任托斯卡纳大公的宫廷数学家，并兼任佛罗伦萨大学教授，终年 39 岁。

托里拆利在物理学和数学等许多方面都有建树。他的科学活动主要是在 1641 年以后进行的，虽然仅有五、六年时间，但所取得的成果却具有重大意义。他主要研究流体力学，解决了许多实际水利工程问题，被马赫誉为“水力学的奠基人”。1641 年，表述了液体由容器小孔流出的定律，导出了确定流出速度的公式（托里拆利公式）。当时他的老师卡斯泰里认为水流的速度跟孔到水面的距离成正比。为了搞清楚老师的见解，托里拆利

认真地做了实验，反复仔细进行测量。结果发现，从容器小孔流出的水流的速度不是跟孔到水面的距离成正比，而是跟此距离的平方根成正比，从而纠正了老师的失误。1643年，发现了大气压力（托里拆利实验），这个现今中学生都熟悉的实验是用比重很大的水银灌入一端封闭的长玻璃管中，尔后将开口端埋入水银杯中竖直，封闭端便出现空间，从而打击了当时关于“自然惧怕真空”的成见。1644年，发明了使他著称于世的气压计。

**托里拆利实验 (Torricelli experiment)** 历史上测量大气压的最早实验。1643年由意大利物理学家托里拆利设计而成，故名。在长约1米一端封闭的玻璃管内装满水银，然后用食指堵住开口端，把管倒置在水银槽内，再放开食指，此时原来达到管顶的水银柱下降到高于槽内水银面约760毫米处。管内水银下降后，玻璃管上端可视为真空。管内水银柱能保持一定高度，说明与管外大气压作用在槽内水银面正好平衡，因此管中水银柱的高度等于大气压。气压变化时，水银柱的高度也随之变化，测量气压的水银压力计就是根据这一原理制成的。

**托盘天平 (tray balance)** 灵敏度较物理天平低，但使用方便的质量量度仪器。一般托盘天平的感量为0.1克、0.2克和0.5克三种，其称量最大值为200克、500克和1000克。

由于灵敏度较低，即精密度不如物理天平，因此构造简单，水平仪也没有设置，只要放在平整的水平台面上即可。托盘天平的振荡周期较短，很快就能读出重量数（或质量数）。因此在估测物体质量或者精确度要求不高的场合下，托盘天平是非常重要的质量测量仪器。

改进型的托盘天平有三根横梁，物体的总质量就是三横梁游码所指数的和，见图所示。

### 改进型托盘天平

**椭圆偏振光 (elliptically polarized light)** 光在传播过程中，其电矢量末端的轨迹在垂直于传播方向的平面上的投影为一椭圆，这种光称为椭圆偏振光。

**形成** 一个质点同时参与两个频率相同而有固定相位差的互相垂直的机械振动时，合振动是沿椭圆轨道的周期运动。晶体内的o光和e光是振动方向互相垂直、频率相同的线偏振光。在它们沿同一方向传播过程中，如果相位差不变，合振动矢量末端的轨迹为螺旋线，在垂直于传播方向的平面上的投影为椭圆。

**产生** 令自然光通过尼科耳棱镜，产生平面偏振光。再让平面偏振光垂直射入  $\lambda/4$  波片，且平面偏振光振动方向与波片光轴方向之间的夹角为  $\theta$ 。如果平面偏振光的振幅为  $A$ ，则进入波片后分解为o光和e光的振幅分别为  $A_o = A \sin \theta$  和  $A_e = A \cos \theta$ 。它们沿同一方向在波片内传播，从波片透射出来时，o光和e光间的相位差为  $\phi = \frac{\pi}{2}$ ，于是合振动为正椭圆偏振光。椭圆长短轴的大小取决于振幅  $A_o$  和  $A_e$ 。

### $\phi$ 不同值所对应的图像

在波片内传播过程中，o光和e光之间的相位差  $\phi$  从0逐渐增大。因此在此在波片内不同深度，合成的椭圆偏振光长短轴的取向和形状也各不相同。



同。附图是  $\varphi$  不同值所对应的图象。

**检测** 使欲检验的光通过尼科耳棱镜，将尼科耳棱镜转动一圈，若有两个位置透射光全暗，则待测光为线偏振光；如透射光强度无变化，则待测光为自然光或圆偏振光；若有两个位置透射光最强，另两个位置透射光最弱，则待测光为部分偏振或椭圆偏振光。转动尼科耳棱镜，当透射光最强时，若加放一块  $\lambda/4$  波片，且使此波片的透光方向与尼科耳棱镜的透光方向重合。此时再通过第二块尼科耳棱镜观察。如果转动第二块尼科耳棱镜时，有一个位置上视场全暗，则待测光为椭圆偏振光。如果没有一个位置使视场全暗，则待测光为部分偏振光。

**瓦特(1)** (James Watt 1736 ~ 1819) 英国发明家、工程师。生于格拉斯哥附近的格林诺克。童年时曾在文法学校读过书，但此后始终没有受到过正规系统的教育。18岁时到伦敦一家钟表店当学徒。由于勤奋刻苦，很快掌握了各种机器的制造技术，自学成才。1756年被聘为格拉斯哥大学的机器制造和仪器修理工。1762年开始潜心于蒸汽机的改进实验研究工作，终于取得重大成果。1785年成为皇家学会会员，1814年被选为法国科学院院士。

主要贡献在于对蒸汽机作出重大改进。1764年在修复纽可门蒸汽机的过程中，找出了这一蒸汽机耗煤量大、效率低的主要原因：由于蒸汽既在汽缸中膨胀做功，又在汽缸中冷凝，因此浪费了很多的热量。经过多次试验，于1765年发明了和汽缸分离的冷凝器。后在工人的帮助下，通过解决制造精密汽缸、活塞的工艺，用油来润滑活塞，在汽缸外设置绝热层等，于1768年，制造出一种单动作蒸汽机。该机的耗煤量只有纽可门蒸汽机的四分之一，做功却比纽可门蒸汽机迅速、可靠。经过继续试验，1782年，又发明了双动作蒸汽机。1784年，提出“平行连杆机构”，有了它，蒸汽机具有更广泛的实用性。4年后，发明了离心调速器和节气阀。1790年，又完成汽缸示功器的发明。至此，瓦特完成了对蒸汽机的整个重大改进过程。到19世纪30~40年代，蒸汽机已在全世界广泛应用，进入所谓的“蒸汽时代”。

(2) Watt，简称瓦。国际单位制中电功率的单位。常用符号W表示。每秒做出1焦耳功时的功率(1焦耳/秒)为1瓦特。或电压为1伏特通过1安培直流电流时的功率(1安培伏特)为1瓦特。1千瓦特记作“瓩”，常用符号kW表示。

**瓦特计 (wattmeter)** 用以测量电路中负载的电功率的仪表。又称功率表或瓦特表。按工作原理可分为电动式和感应式两种，各自又分单相和三相两种型式。如图所示是常用的单相电动式瓦特计，它有两组线圈，一组匝数较少的固定线圈称为电流线圈，测量时与被测负载串联；另一组匝数较多的可动线圈称为电压线圈，测量时串联一个附加高电阻 $R_f$ ，跨接于被测负载的两端。它的指针偏转(读数)与电压、电流以及电压与电流之间的相角差的余弦的乘积成正比。由于它的读数与电压、电流之间的相位差有关，因此电流线圈与电压线圈的接线必须按照规定的方式才正确。在仪表上标有\*或±号的端点应接在一起。选择瓦特计测量功率的量程，必须正确选择瓦特计中的电流量程和电压量程，使电流量程能容许通过负载电流，电压量程能承受负载电压，这样才能满足测量功率的量程。

#### 单相电动式瓦特计

外力 (external force) 见内力。

外燃机 (external-combustion engine) 参见热机。

**万用电表 (multimeter)** 测量交直流电流、电压和直流电阻等的多用途多量程电表。主要由表头、测量线路和范围选择开关组成。表头采用磁电式直流电表，用以指示被测量的数值；测量线路由分流电阻、倍率电阻、电位器、晶体二极管、干电池等构成，它把各种被测量转换到适合

表头测量的直流微小电流；范围选择开关实现对不同测量线路的选择，指明量程，以适应各种测量的要求。

万用电表的型号品种很多，它们的准确度的等级，一般在 1.0 ~ 5 级之间。万用表的量程一般为：

直流电流	50 $\mu$ A ~ 10A
交流电流	1mA ~ 10A
直流电压	0.1 ~ 5000V
交流电压	1 ~ 5000V
电 阻	1 ~ 20M

万用电表由于具有量程广、使用和携带方便等优点，应用广泛，是电路和元件的常用测试工具，也是电气、电讯设备检修工作中不可缺少的仪表。

使用万用电表时，首先要调整零位，即旋动有机玻璃盖的螺丝，使指针指零。再把范围选择开关调至恰当量程上。在使用相应的标度线读数时，应调整视线，使指针和在镜子中的针影重合，以减少视差，提高读数的准确性。万用电表的测试棒分红、黑两根，将红、黑棒分别插在正 (+)、负 (-) 插口上。

万用电表测电阻时，在电路中必须切断电源，并将电阻一端与电路断开。用电阻档测晶体管和电容时，万用电表内有电池供电，这时红表棒为正，黑表棒为负，量程一般取  $\times 100$  或  $\times 1k$ 。应避免取  $\times 10k$ ，因为此时红、黑表棒间电压较高，晶体管和电容的耐压不够时，会损坏器件。

万有引力 (universal gravitation) 物体间由于质量而引起的相互吸引力。万有引力的作用规律由万有引力定律描述：自然界中任何两个质点都以一定的力吸引着 这个力的大小  $F$  与两质量  $m_1$  和  $m_2$  的乘积成正比，与它们之间距离  $r$  的平方成反比：

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$G$  是一个普适常数，称为万有引力恒量， $G=6.6720 \times 10^{-11}$  牛·米<sup>2</sup>/千克<sup>2</sup>。对于一定大小的物体，可将它分割成许多可看为质点的微小部分，在各微小部分之间，万有引力定律成立。一物体所受的万有引力是此物体各微小部分所受万有引力的矢量和。

万有引力定律是自然界最普遍的定律之一，一切物体都遵循这个定律。牛顿根据开普勒行星运动三定律和伽利略自由落体定律，及月球绕地球运行的有关数据，在吸收同时代科学家成果的基础上，经过长期艰苦的研究，于 1687 年发表了万有引力定律。1798 年，英国物理学家卡文迪什首次作了万有引力存在的实验证明和万有引力恒量的测定。1859 年，法国天文学家勒威耶发现水星近日点进动速率的数值与用万有引力定律算得的数值间有微小偏离，其值为每百年 38"。1915 年，爱因斯坦创立的广义相对论指出，万有引力是由于物质的存在使四维时空发生弯曲而产生的，对牛顿的万有引力理论作了修正，圆满地解释了水星近日点进动的现象，并正确预言了光线在引力场中的偏折和光谱的红移。

在微观粒子之间的四种基本相互作用中，万有引力是最弱的一种，但是它存在于一切物体之间，因此无法屏蔽。由于万有引力恒量的微小数值，地面上两物体之间的万有引力极小，与两物体之间的其他作用相比，常被

忽略不计。只有当两物体中至少有一个具有天文学上的质量时，这种力才有实际意义。若不计地面上物体由于地球自转而具有的惯性离心力，物体的重量就是地球对物体作用的万有引力的大小。在宇宙中，由于天体质量巨大，万有引力十分强大，因此在天体力学和宇宙学中，万有引力特别重要。主宰天体运行和人造卫星运动的力，也是万有引力。

**万有引力定律 (law of universal gravitation)** 参见万有引力

**万有引力定律的发现 (discovery of law of universal gravitation)** 17 世纪物理学发展中的一项极其重大的科学发现。任何重大的科学发现，从认识论来说，一般都要经历复杂、曲折的过程。万有引力定律的发现也是如此，其间大致经历三个阶段，断断续续长达 20 年之久，所以决不是如人们传说的那样，牛顿一看到苹果落地就悟出一条万有引力定律来。

**从圆轨道计算引力问题** 这一阶段从 1665 年至 1669 年。年仅 20 余岁的牛顿曾两度在农村的家舍中考虑和研究了引力问题。他大量阅读了哥白尼、第谷、开普勒、伽利略、笛卡儿、布里阿德等人的著作。亲自观察日月星辰。对于天体有规则的运动，牛顿从动力学的角度反复思考：地球上的物体都会从高处落向地面这是由于它们的重量，但这重量又是如何产生的呢？既然在最深的矿井里和最高的山顶上，都会一样可以感觉到地球的吸引力，那么月亮是否也会受到地球的吸引力呢？既然地球吸引着月亮，那么月亮又为什么不像地球上的物体那样落向地面呢？这一连串的问题，促使他去从事探讨引力与行星运动的关系。

首先，牛顿认为行星的自然路径应该是一条直线，但实际上行星是沿曲线运动的，这说明它受到某一个力的作用；这个力迫使它偏离直线路径。行星的轨道以凹面对着太阳，就是说有一个使行星偏离直线方向、永远指向太阳的力。而这吸引行星运动的力，他已开始猜测到是随行星—太阳间的距离的平方的反比而变化的。其次，牛顿还成功地将似乎只在天体间起作用的引力与当时人们熟知的使物体坠落地面的重力联系起来。也就是说，创造性地把物体落地、月亮绕地、行星绕日这些表面毫不相干的现象联系起来，把它们都概括为由同一原因引起，且遵循同一宇宙规律，这是牛顿发现万有引力定律的关键之一。再次，牛顿研究了月球的运动，并证明它被地球吸引而且支配着它的运动的力不是别的，就是地球的重力；此重力延伸到月球，而按月—地间的距离的平方而减弱。这样，牛顿在发现引力平方反比关系方面迈出了重要的一步。

但是，牛顿在前进的道路上还有重重障碍：其一，他的计算是以天体轨道是圆形为前提的，如何使计算与开普勒发现的天体轨道是椭圆形的不相矛盾；其二，天体是实体，如何来计算地球各部分对它的表面附近一个物体的引力总和，显然也是一件麻烦事情。所有这些，大概就是牛顿把他的工作搁置起来，并迟迟不发表计算结果的重要原因。

**受同时代人工作的影响** 这第二阶段从 1670 年至 1680 年。1669 年牛顿被提升为教授，1672 年又被吸收为皇家学会会员。牛顿所取得的学术地位，立即使他摆脱了与当时科学家相对隔绝的境地。而在英国皇家学会和欧洲各国科学团体中，致力引力问题研究的人数也在迅速增加。牛顿便与这些学者进行频繁的学术交往，综合了他们关于引力问题的许多丰富思

想，而他们则成为牛顿发现万有引力定律的伴侣。

在此阶段，1673年惠更斯提出了著名的离心力定律，这项研究工作对牛顿颇有影响。牛顿感到他尚未公布的引力定律的一个重要推论已被人抢先提了出来，但他仍然仿佛无动于衷。1674年胡克对引力问题的研究也作了重要贡献，提出了三条假设：所有天体都具有向心的引力；匀速直线运动的物体，若不受任何力的作用就会继续保持下去；距离越近，引力越强。1677年胡克在实验中发现了引力，并对物体的相互吸引作了相当明确的解释。事隔一年，胡克、哈雷、雷恩等根据开普勒第三定律以及惠更斯离心力定律，得出如果把本来是椭圆形的行星轨道当作圆形的，则维持行星运动的向心力和距离平方成反比。总之，这些同时代科学家的认识和工作，对牛顿进行引力问题的研究有着深刻的影响，而牛顿则在这些认识和工作的基础上作出了他的特殊贡献。

**重大突破和实践检验** 这第三阶段是从1684年开始的。这一年，牛顿在引力问题的精确计算方面获得了新的进展，为此皇家学会同意批准给予他二个月没有工资的假期。当时牛顿的挚友哈雷还不能从数学上完善证明引力平方反比关系式，于1684年8月前往剑桥向牛顿登门求教。据记载，哈雷当时向牛顿提出的第一个问题是：“假设一个行星受到太阳以和距离平方成反比递减的力的吸引，那么它是以怎样的曲线运行的呢？”牛顿马上回答：“椭圆。”哈雷又惊又喜地问他是怎样知道的，牛顿回答：“计算出来的。”当哈雷要求得到这份计算时，牛顿一时找不到，但答应给他。过了三个月，牛顿把许诺的那份计算——题为《论运动》的论文录了副本，交帕盖特带给哈雷。哈雷感到牛顿给他的这份计算太重要了，于是在该年11月，再次前往剑桥，说服牛顿公布这份以数学形式写成的研究成果。这篇论文是发现引力平方反比定律的关键性文献。

牛顿在这一阶段的重大突破，还在于他首创了证明实心球体的引力恰等于球心处一个质点的引力的富有成效的方法。1685年的一天，牛顿原安排准备接待一个委员会，但是使他感到万分惊愕的是在一次马车撞车事故中，整个委员会成员都遇难了。这样，带着沉闷心情的牛顿觉得自己有了一些空闲时间，他在葡萄园里悠闲地散起步来。当他散步时，一个崭新的方法便闯进他的脑海。有了这个方法，牛顿便把太阳、行星、地球、月亮以及地球上的球体都简化为一个质点看待，就显得十分合理，从而把以前的数学计算提到相当精密的程度。

牛顿在发现万有引力定律的过程中，还十分重视实践的检验。当时法国科学家皮卡尔曾仔细地对地球进行新的测量研究，由此得出地球上一个纬度之间相距69.1英里。当牛顿获悉这个比原来的值大一些的新值时，他十分欣喜，因为这正是为了全面证实他的理论所渴求的。由此便把他长期以来的数学计算提高到与实际真正相符的程度。

直至此时，牛顿才确立了万有引力定律。这个定律告诉人们：所有的物体（质点）都相互吸引，吸引力的大小与两物体（质点）的质量乘积成正比，与它们之间的距离的平方成反比，即

$$F = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

式中  $G_0$  是万有引力恒量，万有引力的方向是在两个物体作用的连线方向上。

王竹溪（1911~1983） 中国物理学家、教育家。湖北省公安县人。1935年毕业于清华大学研究生院。同年8月赴英国留学。1938年获剑桥大学哲学博士学位。同年回国后，先后任西南联合大学物理系教授，清华大学物理系教授、系主任，北京大学物理系教授、理论物理教研室主任，北京大学副校长。同时担任中国物理学会副理事长、中国计量测试学会副理事长等职。

1955年当选为中国科学院数学物理学化学部学部委员。毕业致力于理论物理学特别是热力学、统计物理学、数学物理等领域的研究。在旅英期间，对统计物理合作现象理论进行过深入研究并取得重要成果。数十年来，在湍流尾流理论、吸附统计理论、超点阵统计理论、热力学平衡与稳定性、多元溶液、热力学绝对温标、热力学第三定律、物质内部有辐射的热传导问题以及基本物理常数等多个方面都进行过不少研究，为我国物理学研究事业的发展作出了突出的贡献。此外，积多年教学和科研之成果，撰写了六部专著：《热力学》（1955年），《统计物理学导论》（1956年），《热力学简程》（1964年），《统计物理学简明教程》（1966年），《简明十位对数法》（1963年），和《特殊函数论》（与郭敦仁合作，1965年）。他还经过长期努力编成一部《新部首字典》，采用他独创的新部首检字法，收字近5万。

**望远镜**（telescope） 用来观察远处物体的光学仪器。观察者对望远镜物空间的观察，代之以对像空间的观察。由于像对人眼的视角远大于物对人眼的视角，所以通过望远镜观察时，远处的物体似乎被拉近，原来看不清的物体也可清楚地看到细节。

**光学结构** 望远镜由两个共轴的光学系统组成，其中向着物体的为物镜，接近人眼的为目镜。天文望远镜物镜的像方焦点与目镜物方焦点重合，所以两系统的光学间隔为零，这称为无焦系统。远处物体经物镜在目镜物方焦点处成实像，再经目镜在无限远处成放大的虚像。物镜不管是透镜还是反射镜，总是起会聚作用；目镜则可以是会聚或发散系统。天文望远镜形成上下左右都反转的像。如果用地面目镜或转像棱镜系统，可使像正立。

**种类** 分折射式望远镜、反射式望远镜和折反射望远镜三种。物镜和目镜都是会聚透镜的开普勒望远镜，以及物镜为会聚透镜、目镜为发散透镜的伽利略望远镜，都属折射式一类。这类望远镜物镜直径不超过1米，因为大口径透镜在制造上有困难。反射式望远镜的代表是牛顿望远镜，它的物镜是凹面反射镜。由于反射镜无色差，容易做成大口径，且当反射镜形状合适时可校正球差，所以大口径天文望远镜多属反射式一类。牛顿望远镜由于视场较小，不能用于做精确的天文测量，而且镜面和镜筒易因温度变化而引起反射镜变形，降低成像质量，使用时要到望远镜顶上去观察，不太方便，故各种改进方案的反射式望远镜相继产生，如格雷果里反射物镜和卡塞格林反射物镜。为校正球面反射镜产生的球面像差，在球面反射镜的曲率中心放一个非球面透镜，第一次实现了色差小而球差又得到校正的物镜，称为施密特物镜。利用这种物镜可制造质量很高的折反射望远镜。日常生活中常见的是一种性能好、结构紧凑的双筒望远镜，其规格常用两个数字相乘表示，如6×30。这表示放大倍数为6，入射光瞳直径为30毫米。此外，用于接收和测量天体无线电波的仪器称为射电天文望远镜，它是天文望远镜的一种。

**放大本领** 设无穷远处物体对人眼的张角为  $u$ ，经望远镜后所成的像的张角  $u'$  却要大得多，故望远镜的放大率 为

$$\gamma = \frac{tgu'}{tgu} ,$$

这等于物镜焦距与目镜焦距之比。

**威耳孙** (Charles Thomson Rees Wilson 1869 ~ 1959) 英国物理学家。生于格伦科斯。先入欧文学院学习。1892 年毕业于剑桥大学后，入卡文迪什实验室工作。1896 年获博士学位。1925 年任剑桥大学自然史教授。1900 年被选为英国皇家学会会员。

主要贡献是发明了云室，获 1927 年诺贝尔物理学奖。1894 年，参加苏格兰尼维斯山气象站的观察工作时，对早晨空气中的云雾效应发生了兴趣。用实验重演这种现象，并制造出人造云。发现潮湿而无尘的空气膨胀时出现水滴，认为这可能是水蒸汽以大气中导电离子为核心而凝聚的结果。1896 ~ 1897 年，发现用当时新发现的 X 射线照射气体能产生大量离子；证实离子可以成为过饱和蒸气凝结成液滴的凝结核；而电子在穿越空气时也会在路径上产生一系列离子。由此出发，于 1911 年发明了一种观察和拍摄带电粒子径途用的仪器，被称为威耳孙云室。同年，首先观察到并照相记录了  $\alpha$  粒子的径迹。到 1928 年，已把该云室装备得十分完善。利用它人们可以直接观察到微观粒子的运动径迹，从而成为现代高能物理实验中一种重要的探测器。

**微波波谱学** (microwave spectroscopy) 应用微波电子技术研究物质结构的一门学科。微波的频率范围约为  $3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{12}$  Hz 比可见光的频率 ( $\sim 10^{15}$  Hz) 小 3 ~ 7 个数量级，相应光子的能量 ( $E=h\nu$ ) 比可见光光子的能量小 3 ~ 7 个数量级。因此通过对微波段光子的共振吸收和辐射，可测量物质内部间隔很小的能级结构。例如，可测量分子的转动能级，从而确定其转动惯量和分子中各原子之间的距离；可测量原子能级的超精细结构，从而确定原子核的自旋和磁矩。微波波谱技术是现代物理学研究物质内部结构及其性质的一种重要手段，这一技术已被广泛应用于原子和分子物理学、固体物理学、粒子物理学、天体物理学，以及化学和生物学等领域。

**微波技术** (microwave technique) 研究微波辐射的产生、传播、转化和测量及其应用的技术学科。微波是波长从约 1 米 ~ 1 毫米 (相应的频率从约 300 兆赫到 300 吉赫) 的电磁波。从现代微波技术的发展来看，一般认为短于 1 毫米的电磁波 (即亚毫米波) 也属于微波范围，而且是现代微波研究的一个重要领域。

从电子学和物理学的观点看，微波这段电磁波谱具有一些不同于其他波段的特点。微波在电子学方面的特点表现在它的波长小于通常物体的尺寸，因此它的传播遵循几何光学规律。利用这个特点，在微波波段可制成在发射和接收上方向性极好的系统 (如抛物面反射器)。当波长和通常物体的尺寸相接近时，微波的传播特性与声波相近，例如微波在波导管中的传输类似于声传输中的传声筒；喇叭天线和缝隙天线的发射类似于喇叭、箫和笛的发声；微波谐振腔类似于声共鸣箱等。

在物理方面，分子、原子与核系统所表现的许多共振现象都发生在微波的波段范围，因而利用微波谐振方法已成为探索物质的基本特性的有效

研究手段。

微波技术开始于 20 世纪 30 年代，微波电子管（速调管、磁控管、行波管等）的发明及波导管的实际应用促进了微波技术的形成和发展。在第二次世界大战中，微波技术得到飞跃发展。雷达的研制促进了微波元件和器件、高功率微波管、微波电路和微波测量等技术的研究和发展。至今，微波技术已成为一门相当成熟的学科，而且还在不断地向纵深发展。

微波的应用范围正在不断扩大。它的最重要的应用是雷达和通信，此外在工农业生产、科学研究、医学、生物学以及人民生活等方面也有不少应用。其应用主要在测量和加热两方面。利用微波可以测量温度、厚度、速度和长度等各种非电量。由于它可进行非接触式测量，特别适宜在生产流水线上连续监测并进行实时自动控制。例如在钢铁工业中测量炉温、料面深度、钢板厚度等。利用微波加热效应，可使包装好的食品进行消毒或使冷藏食物解冻；可对高分子化合物进行热定形；可干燥食品、木材、纸张及电影胶片等涂膜材料等。家用微波炉也已十分普及，其性能日趋完善。

微波遥感也是探测大地、普查地球资源、测绘地形地物、监视农作物的生长以及侦察军事目标等的主要手段。它具有全天候的特点，但所得图像的空间分辨率较低。

**微处理器 (MPU) (microprocessor)** 采用大规模集成技术在一块或多块的基片上收容中央处理装置的大部或全部功能的部件。微处理器通常包括算术逻辑部件、若干个专用和通用寄存器以及对程序流程进行控制的逻辑部件等。有的微处理器内部还带有时钟发生器。微处理器、程序存储器（只读存储器和随机存取存储器）、数据存储器（随机存取存储器）和输入输出接口电路通过系统总线连结起来组成微型计算机（如图所示）。它们均由少量的大规模集成电路组成。这些大规模集成电路可装在一块插件板上，甚至一块芯片就是一个微型计算机。

#### 微型计算机基本结构框图

**微处理器的结构 (architecture of microprocessor)** 微电脑核心部分的结构特征。其结构基本上由三部分组成：寄存器组。共分两种，一种是专用寄存器。例如有包含下一条要执行指令地址的程序计数器 (PC)，指向存储器中堆栈顶地址的堆栈指针 (SP)，用于变址寻址方式的包含基地址的变址寄存器（一至两个），用于存放中断服务程序入口地址的页地址中断页地址寄存器 (I)，提供每次刷新内存单元地址的动态存储器刷新寄存器 (R)，在进行算术和逻辑运算时提供一个操作数，且存放操作结果的累加器（一至两个），及寄存算术和逻辑运算结果的一些特征，如符号、全零、奇偶、溢出、加减、进位和半进位等状态的标志寄存器 (F)，这些标志位为执行条件转移指令提供信息。另有一种是通用寄存器组，可以作 8 位的寄存器使用，也可以两两连起来变为 16 位的寄存器对。主要用于寄存参与运算的数据或操作数的地址。有的微处理器有两组通用寄存器组，工作时仅一组参与操作，另一组可用作交换指令选用。算术逻辑部件 (ALU)。算术和逻辑指令在 ALU 中执行。ALU 通过内部数据总线与

寄存器组和外部数据总线交换信息。不同微处理器的 ALU 的功能有所差异，主要操作有加、减、逻辑“与”、“或”、“异或”、比较、左或



右的算术或逻辑移位以及循环移位、加减和位操作等。控制部件(CU)。它能产生一定的控制信号系列,以执行指令所规定的各种操作。从存储器中取出来的指令,送给指令寄存器,后由指令译码器译码,通过定时和控制电路,在规定的时刻发出各种操作所需要的全部控制信息以及发出所需要的外部控制信号。微处理器控制部件的设计,主要是以实现机器的指令系统为主要目标。目前的设计技术有三种方式,即组合逻辑、微程序控制和可编程序逻辑阵列,而以微程序控制最为普遍。

**微处理器的时序**(time schedule of microprocessor) 计算机是在时钟脉冲的控制下一拍一拍地工作的。每条指令的执行,均由取指令、译码和执行三个阶段构成。执行一条指令所需要的时间称为指令周期。由于指令长度不同,因而指令周期的时间也不相同。把指令周期划分为一个个机器周期,每当CPU要和存储器或输入输出端口存取一个字节,就是一个机器周期,所以机器周期也称为存取周期或工作周期。在取指令阶段,每取一个字节就需一个机器周期;在指令执行阶段,取决于指令的类型,如寄存器间传送指令,运算指令等执行时不需另外的机器周期,而有些指令却要另加机器周期,以便与存储单元或输入输出端口传送信息。

**微处理器的指令系统**(instruction set of microprocessor) 各种微处理器都有各自的指令系统,但有的功能较强、较齐全,有的专用性较强,有的非常简单。因此根据需要在设计微型计算机前要认真考虑,一般指令系统有以下几类。

**数的传送和交换:**8位数传送包括立即数送寄存器,寄存器之间传送,寄存器和存储器之间的传送。16位数传送包括16位立即数送寄存器对,在寄存器对和存储器之间传送,寄存器对送堆栈指针以及堆栈操作和寄存器对之间的传送。

**数据块传送和搜索:**分为单个传送、单个搜索和成组传送、成组搜索,它们是以某些寄存器对的内容作为地址指针,间接寻址内存中传送的源地址和目的地址。地址指针按每次传送或搜索后递增或递减1。

**算术逻辑运算:**8位数的算术运算包括加、减、比较;逻辑运算包括“与”、“或”、“异或”、“非”等操作。其特点是以累加器A的内容为一个操作数,除加减1操作外参加运算的另一个操作数或立即数或某一寄存器的内容,或来源于寄存器对间接寻址及变址寻址的存储单元。16位数的运算,只是在指定的寄存器对或16位寄存器之间进行加、减运算和加1减1的操作。

**循环和移位:**循环的格式是在寄存器或者存储器简称为RM与进位位C组成一个闭合回路,其中任意一位数都可以向左或者向右移位,最后重合,即称为循环。如果不是闭合回路,则仅仅是左移和右移的操作,常叫做移位。有的循环回路不包括进位位;有的移位不是一位一位移,而是一次移4位,有利于进行数据码制的转换。

**位操作:**利用位寻址方式,可对寄存器中任一位或内寄存器间接寻址、变址寻址的任一内存单元的任一位进行测试或置“0”和置“1”操作。

**转移:**包括无条件转移和条件转移两类。通常采用直接寻址、寄存器间接寻址相对寻址方式。条件转移是根据标志寄存器中进位位、零位、奇偶位次及符号位状态判断条件是否满足,决定程序转移还是继续按顺序进行。

**调用和返回:**包括无条件调用、无条件返回、中断返回和条件调用。条件返回调用是直接寻址,返回是利用堆栈指针SP的间接寻址。条件调用或返回也是根据标志寄存器中的进位位、零位、奇偶位、符号位的状态是否满足,来决定调用子程序或从子程序返回还是按顺序执行。

**输入**

和输出：通常对输入输出设备采用端口寻址方式。利用直接寻址方式数据可以在累加器 A 与外部设备端口之间传递；利用寄存器 C 间接寻址方式，数据可以在任一寄存器与外部设备端口之间传递。数据块的传送可以单个，也可以成组地输入和输出，它们是在寄存器间接寻址的端口和寄存器对间接寻址的内存单元之间进行的。内存单元的地址指针又分为每次传送后递增和递减两种方式。

**微电子技术 (microelectronic technology)** 在电子技术的基础上，通过电子电路和系统的超小型化和微型化过程，逐步形成和发展起来的渗透性很强、影响面很广的一门新的技术学科。它包括系统和电路设计、器件物理、工艺技术、材料制备、自动测试，以及封装、组装等一系列专门的技术。微电子技术是微电子学中的各项工艺技术的总和。

微电子学研究的对象十分广泛，除各种集成电路（单片集成电路、薄膜电路、厚膜电路和混合集成电路）制造技术和应用技术外，还包括集成磁路、集成超导器件和集成光电子器件等的制造和应用技术。

传统的电子技术的发展，首先是从利用电子器件开始的。1906 年美国物理学家德福列斯特制成了世界上第一只真空三极管。三极管的产生是电子技术的第一次重大突破。1948 年美国贝尔实验室的巴丁和布拉坦两人合作研制成第一个点接触型晶体管。这是电子技术的第二次重大突破。1958 年美国的开尔贝制成第一个半导体集成电路。它是电子技术的第三次重大突破。1966 年制成了包括 50 个门（数百个元件）的中规模集成电路。从 1977 年开始出现集成度超过 15 万个元件以上或 1 万个门电路以上的超大规模集成电路。这是电子技术的第四次重大突破，迎来了为人们称誉的微电子技术时代。

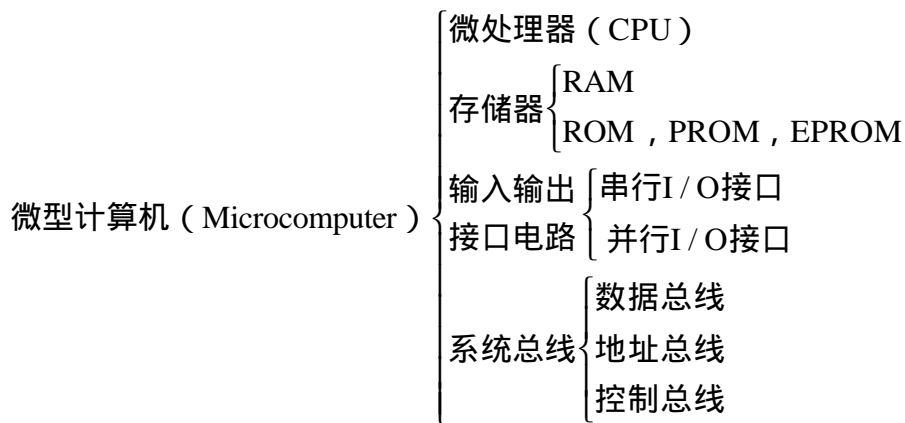
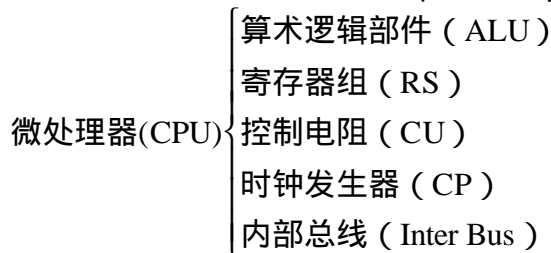
与传统的电子技术相比，微电子技术有如下一些基本特点：通过利用和控制固体内电子的微观运动来实现对信号的加工处理；信号的处理是在固体的微区（微米到几个晶格的数量级）内进行的；信号的传递只需在极微小的尺度内进行；可以把一个电子功能部件，甚至一个子系统集成在一个很小的芯片上，在同一流程中成批地制造出来。微电子技术本身从工艺、设计到生产等方面日益完善，由它装配成功的电子产品已广泛渗入人类社会活动的各个领域。由微电子技术所推动并反过来用以促进微电子技术进步的由一系列新学科（微电子器件物理、微电子材料学、微电子设计和工程学、微电子工艺学、微电子测试学、可靠性理论以及专门的微电子经济和生产管理工程等）共同组成一门崭新的学科——微电子学便应运而生。

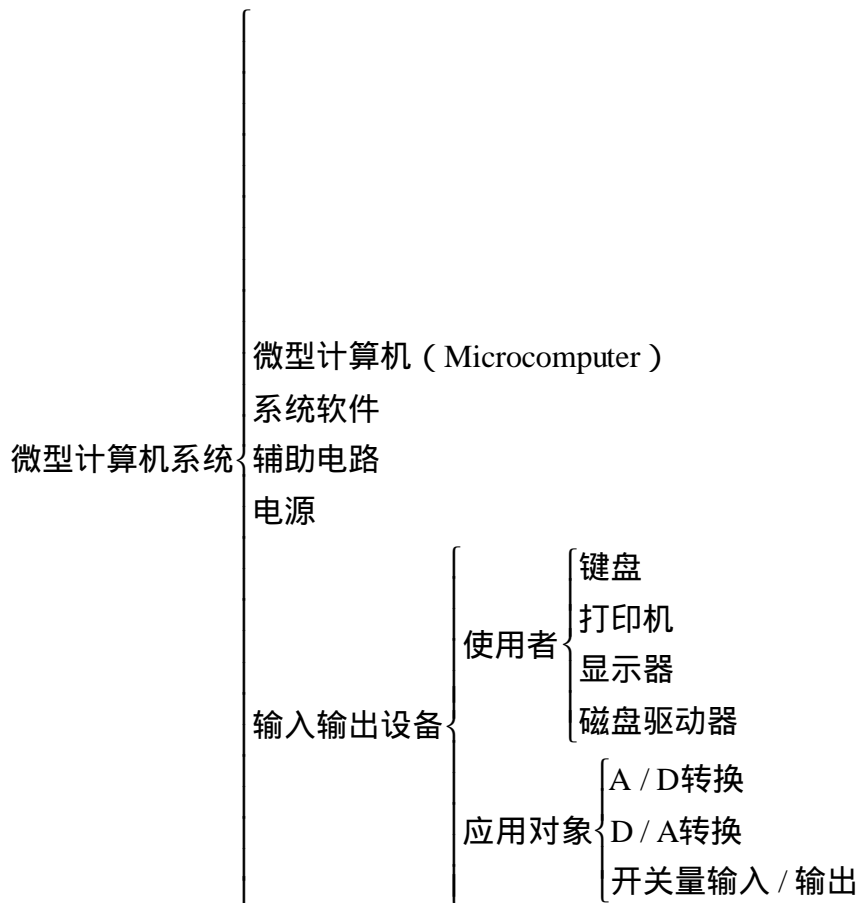
**微观 (microscope)** 指空间线度小于  $10^{-7} \sim 10^{-6}$  厘米的粒子，包括分子、原子、各种基本粒子。分子是物质中能够独立存在并保持该物质一切化学性质的最小微粒。原子是构成单质和化合物分子的最小微粒。基本粒子包括电子、中子、质子、光子以及在宇宙射线和高能原子核实验中发现的一系列粒子。已经发现的 300 多种基本粒子，多数是不稳定的共振态粒子。按照基本粒子的质量及其性质的差别，可分为光子、轻子、介子、重子四类。微观虽与宏观有区别，但又有联系。微观是宏观的基础，极多的原子、分子就构成宏观物体，微观和宏观的物体都统一于物质之中。微观现象一般指微观粒子和场在极微小的空间范围内的各种现象。微观粒子和微观现象统称微观世界。微观世界是量子物理学研究的对象，其运动规律可用量子力学、量子场论、量子电动力学、量子色动力学和统计物理学

等加以描述。在微观世界中，运动的粒子呈现显著的量子性和波粒二象性，因此经典物理学的理论在这里不再适用。

**微粒说 (corpuscular theory)** 一种关于光的本性的理论，由牛顿提出。牛顿在光学研究中作出许多重要的贡献，在关于光的本性看法上，他也提出自己的假设即微粒说：“光线是否是发光物质发射出来的很小物体？因为这样一些物体能够直线穿过均匀媒质而不弯曲到影子区域里去，这正是光线的本性。”虽然假说是以提问的方式提出的，也曾说明由于来不及进一步研究而留待其他人作进一步探讨，但是从牛顿随后所做的分析中可以看出他还是倾向于认为这是正确的。牛顿主张微粒说反对波动说的理由在于：认为光的波动说不能很好地说明光的直线传播这一最基本的事实；波动说当时无法解释光的偏振现象；对光的波动说赖以存在的“以太”表示怀疑。然而主张微粒说的牛顿并不是根本不承认光的波动性，他认为当光投射到一个物体上时，可能激起物体中以太粒子的振动，就好像投入水中的石块在水面激起波一样，并设想可能正是由于这种波依次地赶上光线而引起干涉现象。他还第一个提出光在本质上是一种周期过程。这都表明牛顿并不是根本不承认光的波动性，而是他更倾向于并坚持光的微粒性。

**微型计算机系统 (microcomputer system)**





微型计算机中的中断 (interrupt in the micro-computer) 有了中断功能, 可使 CPU 分时操作, 同时为多个外部设备服务, 可以实现实时处理, 可以自动进行故障处理以及利用中断调试程序等。一个中断系统应该具有这样一些功能: 它能实现中断和返回; 能实现中断优先权的排队, 高级中断源能中断低级的中断处理, 实现中断嵌套。一般微处理器都用一条或多条中断线来接受中断请求, 用单级中断、多级中断和矢量中断等技术来处理中断。单级中断中, 多个外部中断请求通过“或”逻辑连到中断线, CPU 收到中断请求, 进行程序询问, 确定中断源、询问程序的顺序也就指定了各外设的优先等级。在多级中断中, 微处理器有几条中断线, 每条中断线与独立的外设标志或特定的中断源相连, 中断发生时, 它对不同的中断线上的请求能在内部作出相应的处理, 响应快, 但扩展较难。同一级中断源之间的优先次序要由软件安排。为了提高中断处理的速度, 许多微处理器都采用矢量化中断方式。对于每一种中断都有存放在存储器单元中的中断服务程序的起始地址和中断后的处理器的状态字。所有的起始地址和状态字在一起称为中断矢量。

中断处理与微处理器的结构有关。在中断时, 一般都要经过中断请示、中断响应、保护断点、保护现场、中断服务、恢复现场、然后返回主程序等处理过程。

微型计算机总线 (bus of microcomputer) 传输数据和电信号的渠道, 即公共连线。它是一些信号线的集合, 这些信号线是组成计算机及计算机各器件、各功能部件和各系统之间传输与交换信息专用的通路。选择各种系统要求的标准芯片, 直接通过总线传输和交换信息, 能构成具有不

同功能的各种微型计算机系统。为此，就定义和建立了各种各样的标准总线，种类繁多。通常的总线总是包括几十根到一百多根信号线。一般可以把这些信号线分成四类。控制、时序和中断信号线：这一类线决定了总线功能的强弱以及适应性的好坏。好的总线应该控制功能强、时序简单、使用方便。数据线和地址线：决定数据传输的宽度和直接选址的范围。

电源线和地线：决定电源的种类及地线的分布和用法。备用线：是厂家和用户作为性能扩充或特殊要求使用的线。

根据信息是否可以朝两个方向传送，总线可分为单向传送总线和双向传送总线。双向传送总线既可用来发送数据，也可用来接收数据。单向总线只是朝一个方向传送。总线的逻辑电路有些是三态的，即输出电平有三种状态：逻辑“0”、逻辑“1”和“浮置”状态。当处于浮置态时，总线电路呈现极高的阻抗，如同与外界“隔绝”一样。利用三态控制的逻辑电路，容易实现微处理器内部总线与系统总线的“脱开”或“连接”。

总线一般带有缓冲电路，其基本电路就是三态电路。为了构成单向总线和双向总线，相应地就需要单向缓冲电路和双向缓冲电路。

**微音器 (microphone)** 即传声器。

**唯能论 (energetics)** 一种认为能量是唯一本原的理论，由德国物理学家奥斯特瓦尔德提出。该理论的出现有其认识根源，它同热力学的发展有关。卡诺曾证明热机的运行与构成机器的物质属性没有关系。后来又有不少物理学家强调热力学的研究只涉及能量的意义，而不涉及任何物质属性，这就使人们偏重于能量的研究。在此基础上，奥斯特瓦尔德于1889年把能量说成是同有重量的物质相类似的一种实体。1890年认为物质与能量是两个独立的本原。1895年，他在德国自然医学家医师大会上明确提出了唯能论，认为能量是唯一的本原，而物质不过是能量的集合，并针对原子论把物理现象归结为原子的机构论的观点，提出把所有自然定律都归结为有关能量的定律的主张。唯能论的提出，遭到许多人的反对。因为该理论是错误的，它的要害是否认物质的客观实在性，而认为能量是一切现象的本质，物质无非是“诸种能量在空间中的有秩序的集合”。

现代物理学的发展，使得奥斯特瓦尔德不得不承认“原子假说已成为科学上一种有根据的学说”，唯能论因此也一度消沉。可是随着爱因斯坦质能关系的提出，以及基本粒子的产生和湮灭现象的发现，在一些物理学家的心目中，唯能论又得以复活。如有人把电子称为物质，而把光子看成是纯粹的能量，其实粒子物理学的发展，再次证实了诸如光子等粒子的客观实在性。

**维德曼-弗兰兹定律 (Wiedeman-Franzlaw)** 表示金属导热性与导电性之间的关系的经验定律。德国物理学家维德曼和弗兰兹于1853年由大量实验事实发现，在一定温度下，许多纯金属的热导率  $n$  和其电导率  $\sigma$  之比都是个常数，这一规律被称为维德曼-弗兰兹定律。1881年洛伦兹进一步发现  $\frac{n}{\sigma T}$  的值是一个与金属种类无关的普适常数，称为洛伦兹数，用符号  $L$  表示。1928年索末菲从金属的自由电子模型出发，从理论上得出  $L = \frac{n}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k}{e} \right) = 2.443 \times 10^{-8}$  瓦特·欧姆/度<sup>2</sup>，式中  $k$  是玻耳兹曼常数， $e$  是电子电荷， $T$  是绝对温度。此定律对大多数金属，在温度不太低时，

都符合得比较好。由此可以说明金属的导热和导电主要都是靠自由电子来进行的，晶格导热对热导率的贡献可忽略不计。对于能带结构复杂，各向异性非常显著的铍、锰等金属，洛伦兹数  $L$  的实验值与理论值偏离较大，这说明对于这些金属中的电子不能采用自由电子模型。低温下，即温度远低于德拜温度时，金属的洛伦兹数趋于减小，例如钢在 15K 时的  $L$  值要比室温时的值小一个数量级，这时维德曼-弗兰兹定律不再成立。

**伪指令 (false instruction)** 属于汇编语言中的一类指令。由于伪指令通常不是直接执行的指令，而是用来提供汇编程序的必要信息，有点像高级语言中的说明语句，所以使程序的可读性更趋完善。常用的伪指令有：汇编起始地址说明的伪指令 `ORG`，例：`ORG2000` 表示目标程序的首地址为 2000 单元。名字说明伪指令 `EQU`，例：`CR: EQU $12` 表示标号 `CR` 的十六进制值为 12。数据说明伪指令 `DB`，例：`DAT: DB2, -4, 5` 从目标程序中留出三个单元，分别存放 2, -4, 5 三个数，其他指令对这三个数的访问，可以通过标号 `DAT` 进行。入口标号说明伪指令 `ENTRY`，常用于说明子程序入口地址。

此外还有用于定义宏指令的伪指令 `MACRO`, `MEND`，以及条件汇编说明用的宏指令 `IF`, `ENDIF` 等。

各种汇编语言中的伪指令的功能基本相同，但采用的符号不同或相近。

**位片机 (slice system)** 位片是一个由完整的运算器加上它的多路转换器和数据通道所组成的片子，没有控制部分。位片机是由 2 位或 4 位高速双极型大面积集成电路级联而成，根据需要可组成任何字长如 4 位、8 位或 16 位等等。而控制部分必须由外加电路来完成，一般是微程序控制的。这使得控制部件的设计简化，使系统所需器件数量大为减少，易于修改扩充，增加了灵活性、适应性。由于器件本身速度高，再采用如重叠、流水技术，使位片机的运算速度高；此外，指令系统由设计者选定，可大可小，可简可繁。Motolora 公司推出的 MC10800 系列 4 位微处理器片子，在片子上设有寄存器，可向用户提供不受限制的外部寄存器。一个 MC10801 微程序控制部件，一个 MC10802 定时部件，可执行全部控制功能，专用存储器接口芯片 MC10803 产生外部地址总线 and 数据总线，可以很容易组成一个小系统。

位片机的特点使它适用于中、小型计算机的仿真，高级语言和高速外部设备如磁盘、带键盘的显示器的控制器，数据通讯，构成分布式或阵列式处理机系统，以及用大量的微型机构成巨型机等。

**位矢 (position vector)** 又称位置矢量或矢径。描述质点相对位置的物理量。一质点  $P$  相对于固定点  $O$  的位矢是由  $O$  点引到  $P$  点的有向线段  $OP$  (图 1)，常记为  $r$ ：

$$r=OP。$$

图 1

位矢的大小  $r$  表示  $P$  点与  $O$  点之间的距离，位矢的方向表示  $P$  点相对于  $O$  点的方位。在直角坐标系中 (图 2)，位矢可以用分量  $x$ 、 $y$ 、 $z$  表示为

$$r=xi+yj+zk。$$

图 2

式中  $(x, y, z)$  是位矢端点  $P$  的直角坐标，此直角坐标系的原点为位矢的起点  $O$ 。  $i, j, k$  分别是沿  $x, y, z$  轴正方向的单位矢量。在位移所在的平面内，位矢可以用矢端的极坐标  $(r, \theta)$  表示（图 3）。以位矢的起点  $O$  为极点，位矢  $r$  的极坐标表示式是

$$r = r e_r。$$

图 3

$r$  是位矢的大小，  $e_r$  是  $r$  方向的单位矢量，它是  $r$  与极轴  $O_x$  之间夹角  $\theta$  的函数。

**位移 (displacement)** 又称位移矢量。描述质点位置变化的物理量。设质点在初位置  $A$  的位矢为  $r$ ，在末位置  $B$  的位矢为  $r'$ ，则质点从初位置到末位置的位移  $\Delta r$  是矢量  $AB$ ，或  $r' - r$ ：

$$\Delta r = r' - r$$

### 位移

位移只表示末位置相对于初位置的距离和方位，与质点沿着什么具体路径从初位置移动到末位置无关。质点可以从初位置  $A$  沿着任何路径移动到末位置  $B$ ，  $A, B$  之间路径的长度是一正数表示的量，称为从  $A$  运动到  $B$  所经过的路程。在一般情况下，路程和位移的大小并不相等，仅当质点做直线运动且始终向着同一方向运动时，两者才相等。

**位移电流 (displacement current)** 描述变化的电场激发磁场效应的物理量。其强度和密度常以符号  $I_D$  和  $j_D$  表示。1864 年由英国物理学家麦克斯韦作为电磁场理论的基本假设引入。因为它和传导电流一样能激发磁场，故名。通过空间某一面积的位移电流强度等于该面积上电位移通量的时间变化率，即

$$I_D = \frac{d\Phi_D}{dt} = \frac{d}{dt} \int_S D \cdot dS = \int_S \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS,$$

因为  $I_D = \int_S j_D \cdot dS$ ，于是位移电流密度为

$$j_D = \frac{\partial D}{\partial t}。$$

位移电流概念进一步揭示了电现象和磁现象之间的紧密联系，表明磁场不仅可由传导电流（或运流电流）激发，也可由变化的电场激发。安培环路定律由此被推广为如下形式：

$$\oint_D H \cdot dl = \int_D (j + j_D) \cdot dS，$$

这是麦克斯韦方程组中的一个方程。因此，位移电流假说是麦克斯韦电磁场理论的重要组成部分。位移电流仅表示电场的变化，而不表示真实电荷在空间的运动。因此它既可存在于介质中，也可存在于真空中，而且不像传导电流那样具有化学效应。位移电流通过介质，虽会使介质发热，但发热的机制也与传导电流引起的热效应不同。位移电流的存在正是通过

其磁效应得到证明的。

**卫星通信 (satellite communication)** 通过对地静止卫星转发信号,用无线电波多址联结分布在各地的卫星地面站,进行两个或多个地面站之间的通信。为了使卫星波束覆盖区的每个卫星地面站在任何时刻都能通过卫星进行通信,卫星对地球必须相对静止,这时卫星必须在离地球赤道的标称高度 35786.014 公里处,绕地球的公转周期和地球的自转周期 ( $23^{\text{h}}6^{\text{m}}04^{\text{s}}$ ) 一致,且运行方向与地球自转方向一致。卫星通信是通过由地面站和通信卫星所构成的卫星通信系统网络实现的。通信卫星载有多个转发器,为地面提供信道转发信号。每个信道的功率较小,通常为 8~20W/ch,地面站天线大小视卫星到地面的等效全向辐射功率大小和用途而异。抛物面天线直径可以从 3 米到 30 米。卫星通信的业务面很广,它包括电话、电视、电报、传真、电传、数据传输、广播、网络新闻、电子邮件、医疗应急、交通、金融、气象、市场信息、陆上监视、船舶与飞机导航数据等各种业务。

卫星通信的质量高,容量大,服务范围广,覆盖范围大(定点在静止卫星轨道上互成  $120^{\circ}$  的三个通信卫星,能实现全球通信)。

**发展概述** 卫星通信的原始设想始于 1945 年英国学者克拉克。1957 年 10 月 4 日原苏联发射了世界上第一颗人造卫星,标志着人类开始了宇宙航行时代,卫星通信因此被提到议事日程。三个月后(1958.1)美国发射了斯科尔卫星,进行了通信试验。但由于采用蓄电池供电,寿命只有 13 天。这一试验使人们意识到,要实现卫星通信,必须解决卫星上的能源问题。1962 年 7 月美国发射了电星(Telstar)1 号卫星,进行横跨大西洋的电视和电话传真通信试验。1962 年 12 月美国又发射了中继卫星。1963 年 11 月 23 日利用这颗卫星在美国和日本之间进行了电视转播。以上这些试验采用的都是椭圆低轨道卫星,相距很远的地球上两点能同时看到该卫星时间很短,不能用于卫星通信。随着火箭运载能力的提高,人们在实践中又掌握了卫星进入静止轨道的发射技术和姿态控制技术。有可能把卫星定点在静止卫星轨道上。1964 年 8 月美国向太平洋上空发射了辛康 3 号静止卫星,及时向世界大部分地区转播了东京奥林匹克运动会实况。

1964 年 8 月 20 日在美国由 11 个国家成立了临时国际商业通信卫星组织。1965 年正式命名为 Intelsat(1973 年最后定名为国际通信卫星组织),从此,就由该组织发射管理国际通信卫星。1965 年 4 月 6 日发射了国际通信卫星一号,使卫星通信正式进入实用阶段。自 1965 年到 1990 年,国际通信卫星从第一代发展到第六代。卫星通信的容量、功率、寿命以及功能不断提高。例如第六代卫星可同时传送 80000 个电话和 2 路彩色电视,使用寿命为 10 年。现在定点在大西洋、印度洋、太平洋上空的国际通信卫星,构成了全球卫星通信网,已有 100 多个国家参加了该组织。中国于 1976 年参加 Intelsat,并在北京和上海等地建立了卫星通信地面站,与世界各地进行卫星通信。

**通信卫星** 通信卫星虽因用途不同而有所区别,但就整个系统构成而言,它们均由星载天线、转发器、遥测、控制及电源五大部分组成。天线分系统有通信用的微波天线及遥测遥控用的高频或甚高频天线。根据覆盖范围要求,微波天线波束有全球、半球、区域和点波束之分。通信转发器用于沟通信道,转发信号。它将来自地面站的弱信号进行宽带低噪声放大、



频率变换、功率放大处理后，送到天线向指定的覆盖区发射。遥测分系统用于了解星载各种设备的工作状态，保证通信卫星的正常工作。控制分系统包含姿态和位置控制，前者使卫星天线始终对准地球，并使太阳能电池板对准太阳。后者用于消除月球和太阳的引力对卫星产生的摄动影响，使卫星相对位置固定，保持定点位置。电源分系统为卫星通信提供电能。

**卫星通信地面站** 由天线、发射、接收、终端、控制及电源等部分组成。地面站收发天线共用，用于向卫星发射和接收电波。大型地面站天线还有跟踪系统，保证天线始终指向慢漂移的通信卫星。发射机将已调信号经过上变频到指定上行频率，由功率放大到额定值，然后馈送到天线向卫星发射。接收机对来自卫星的弱信号进行低噪声放大并作变频处理后，经解调输出基带信号。终端设备包含电话、电视、数据、传真等终端机，是卫星地面站与地面通信网络的接口系统，它把来自地面的信号加以整理、变换、排列，以便在卫星线路上进行有效传输；同时把来自卫星的信号送到地面通信网络中。卫星通信地面站除大型站外，还有可移动的小型通信站和专用站。

卫星通信用的上/下行频段有 1.6/1.5, 6/4, 8/7, 14/11, 30/20GHz (吉赫)，其中常用的有 C 频段的 6/4 和 Ku 频段的 14/11，其频率范围为 5.925 ~ 6.425 (6GHz), 3.7 ~ 4.2 (4GHz), 14 ~ 14.5 (14GHz), 10.95 ~ 11.75 (11GHz)。用于移动通信频率范围为 225 ~ 400MHz。卫星通信天线、星载转发器、地面站天线、发射和接收机、收发多工器等都工作在某一指定频段上，如 C 或 Ku 频段。

**温标 (temperature scale)** 温度的数值表示法。它是为了表示温度高低而对温度的零点和分度方式所作出的某种规定。常用的一种温标是摄氏温标，它规定在  $1.013 \times 10^5$  帕 (即一个大气压) 下水的冰点为摄氏零度，水的沸点为摄氏 100 度，再将中间间隔划分为 100 等分，每一等分表示摄氏 1 度，摄氏温度用  $t_c$  表示。采用摄氏温标具体测量物体温度时，可以选定一种作为标准物体的测温物质 (例如水银)，只要测温物质的任一物理量 (例如水银的体积) 随温度发生单调的变化，就可以用它来标度待测物体的温度。用  $x_0$ 、 $x_{100}$  分别表示这一物理量在摄氏零度和摄氏 100 度下的值 (例如水银柱的高度值)。如果标准物体与被测物体互为热平衡时该物理量取值  $x_t$ ，则被测物体的摄氏温度就是

$$t_c = \frac{x_t - x_0}{x_{100} - x_0} \times 100$$
，而这种标准物体就是摄氏温度计。由于各种测温物

质或同一物质的不同物理属性随温度的变化关系各不相同，而且也不是严格的线性关系，因此摄氏温标只是一种经验温标。

在英、美等西方国家的工程界和日常生活中，通常还使用另一个经验温标——华氏温标。它规定在一个大气压下水的冰点为华氏 32 度，水的沸点为华氏 212 度，再将中间间隔划分为 180 等分，每一等分表示华氏 1 度，华氏温度用  $t_F$  表示。摄氏温度 (C) 和华氏温度 (F) 之间的换算关系为

$$t_F = \frac{9}{5} t_c + 32 \text{ 或 } t_c = \frac{5}{9} (t_F - 32)。$$

1848 年英国物理学家开尔文通过卡诺定理提出了一种不依赖于具体测温物质的温标——热力学温标，用这种温标定出的温度称为热力学温度，

用  $T$  表示。根据卡诺定理可以证明，如果用某种经验温标测出的高温热源温度和低温热源温度分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ，则工作于这两个热源之间的卡诺热机从高温热源吸收的热量  $Q_1$  与放给低温热源的热量  $Q_2$  之比值等于经验温标下相应热源温度的某个普适函数  $f(\theta_1)$  与  $f(\theta_2)$  的比值

$$\left| \frac{Q_2}{Q_1} \right| = \frac{f(\theta_2)}{f(\theta_1)},$$

这个比值与测温物质及其物理属性无关，由此可以得出存在一个新的温标  $T$ ，它与  $f(\theta)$  成正比，且与测温物质无关，因而有

$$\left| \frac{Q_2}{Q_1} \right| = \frac{T_2}{T_1}$$

1954 年国际权度会议规定水的三相（纯水、纯冰和水蒸气）平稳共存的温度在新的温标下为  $T_{tr}=273.16\text{K}$ ，于是任何物体的热力学温度就是

$T = \frac{Q}{Q_{tr}} \times 273.16\text{K}$ 。这里  $Q_{tr}$  是理想可逆热机在运行中向保持水的三相点温度  $T_{tr}$  的热源放出（或吸收）的热量， $Q$  是这个热机在保持温度  $T$  的热源中吸收（或放出）的热量。由热力学温标表示的温度是国际上公认的基本单位之一，也是唯一有科学意义的温度。热力学温度除了用  $T$  表示外，也可用  $t=T-273.15$  表示。用  $T$  表示的温度又称绝对温度， $T=0\text{K}$  就是绝对零度；而  $t$  表示的温度称为热力学摄氏温度，现在使用的摄氏温度就是热力学摄氏温度。

直接按上述定义测量热力学温度是很困难的，通常采用气体温度计来实现热力学温度的测量。实验表明，一定质量的气体，在体积保持不变时，它的压强随温度升高而增大，随温度下降而减低（查理定律）。由此可以定义一种气体温标，并制成定容气体温度计。但实验发现，在压强很高或温度很低时用定容温度计测出的结果与查理定律并不符合，而且采用不同气体制成的各种气体温度计对同一物体测量所得的读数也有差异。只有当压强逐渐减小且趋于零时，气体的性质才满足查理定律，这时各种气体温度计读数的差异也随之消失。这种严格遵循实验定律的气体就是理想气体，由此定义的理想气体温标与具体气体的性质无关。用热力学方法可以证明，理想气体温标和热力学温标是完全等同的，用理想气体温标测定的温度也就是热力学温度。真实气体特别是不易液化的氢气、氦气等在通常温度和压强下作为测温物质所指示的温度，几乎与理想气体温度计完全一样，因此可以把它们看成理想气体温度计进行测量。然而这些真实气体都有液化点，其中氦气的液化点最低为  $4\text{K}$ ，在更低温度下氦气也变成了液体。因而，对低于气体液化点的温度，用气体温度计实现的理想气体温标也就不再适用了。

温伯格（Stever Weinberg 1933~） 美国物理学家。生于纽约。1954 年毕业于康奈尔大学。1957 年获哈佛大学哲学博士学位。1959~1966 年在贝克莱大学工作。1969 年任麻省理工学院物理学教授。1973 年任哈佛大学希金斯讲座物理学教授，并任史密森天体物理实验室高级研究员。

主要贡献是对电弱统一理论的研究，获 1979 年诺贝尔物理学奖。早在 1957 年就设想过中性规范玻色子就是光子的方案，从而得到一个弱相互作用

用与电磁相互作用统一的理论，但由此给出的结果与实验有明显的矛盾。1962年在研究弱相互作用与电磁相互作用统一的理论方面又取得进展，主要表现是对戈德斯通定理给出了一般性证明，揭示了相对性场论中连续对称性自发破缺如何导致零质量粒子的出现。1967年引入对称性自发破缺机制（黑格斯机制），提出了一个可重正化的理论，解释了光子和中间玻色子的质量差异，在规范场理论的基础上建立了电弱统一理论。由于萨拉姆也提出了这方面的理论，通常被称为温伯格-萨拉姆理论。这个理论的可重正化于1971年被霍夫特等人所证明。这个理论所预言的中性弱流于1973年被欧洲核子中心的实验所证实。此外，60年代初期对天体物理学甚感兴趣，写过一些宇宙内中微子数方面的论文，并于此时开始撰写《引力和宇宙论——广义相对论的原理和应用》，于1971年才最后完成。60年代中期从事流代数方面的研究工作，并把自发对称性破缺的概念应用于强相互作用。70年代主要探讨电弱统一理论的涵义和发展强相互作用的有关理论——量子色动力学，并朝着统一所有的相互作用的方向迈进。

### 图 1 温差电效应

#### 图 2 有第三种金属时的温差电效应

温伯格-萨拉姆模型（Weinberg-Salam model） 参见电弱统一理论。

温差电效应（thermoelectric effect） 又称热电效应或塞贝克效应。将两种不同导体 A 和 B 两端相连，组成一回路，当两接头处温度不同时，回路中产生电动势的现象（见图 1）。这现象由德国物理学家塞贝克于 1821 年首先发现。所产生的电动势称为温差电动势；上述回路构成温差电偶或热电偶。

在一定的温度范围内，温差电动势在数值上正比于两结点处的温差：

$$=a(T_1-T_2),$$

为塞贝克系数，在数值上等于单位温度差所引起的电动势。它主要决定于两种接触材料的性质，也略与温度有关。

理论和实践都证明，在 A、B 两种金属之间插入任何一种金属 C，只要维持它在 A、B 的结点处于同一温度  $T_2$ ，如图 2 所示，则闭合回路内也会产生温差电动势，且其值总是与只由 A 和 B 两种金属组成的闭合回路内的温差电动势相等。

利用金属的温差电效应可制成温差电偶温度计，用于温度测量和温度控制。

温差电偶又称热电偶。它是由两种能产生显著温差电效应的金属丝（如铜或康铜）焊接而成的。其原理如图 3 所示，A、B 为两根不同的金属，它们的一端焊接在一起，称为工作端或热端，测温时将它插在测温部位，其温度为  $T_1$ ，A、B 的另一端，称为冷端或自由端，都放在温度为  $T_2$  的恒温物质（如冰水混合物或大气）中。如果温差电偶的两端温度不同（ $T_1 > T_2$ ），则在回路中将产生温差电动势，它可由指示仪表 M（电压表或电位差计等）显示出来。根据事先校准的曲线或数据，可知待测温度  $T_1$ 。

温差电偶温度计的优点是精确可靠，结构简单，使用方便。工作温度可从 4.2K ( -268.5 ) 的低温直至 2800 的高温。测量不同温度可选用不同金属组成的温差电偶。通常，测 300 以下的温度时可用铜-康铜温差电偶；测量 1100 以下的温度可用镍铬-镍镁合金组成的温差电偶；测量 1100 以上的温度可用铂-铂铑合金和钨-钽温差电偶。下表给出某些金属温差电偶的电动势与热端温度的关系（冷端温度保持在 0 ）。

某些金属温差电偶的温差电动势（冷端 0 ）

热端温度 ( )	铂/铂—10%铑 ( mV )	铁/康铜 ( mV )	铜/康铜 ( mV )
-20	—	8	5.5
100	0.64	5	4
200	1.44	11	9
300	2.32	16	15
400	3.25	22	21
500	4.22	27	—
600	5.22	33	—
700	6.26	39	—
800	7.33	46	—
1000	9.57	58	—
1500	15.50	—	—

半导体的温差电效应较大，塞贝克系数 约为 50 ~ 1000 微伏/开，可用来将热能直接转换为电能，制造半导体温差发电机。

**温度 ( temperature )** 热学中确定平衡状态系统性质的物理量。每个系统在热平衡时的温度仅仅取决于系统本身的内部热运动状态，它是对构成该系统的大量分子无规则热运动剧烈程度的一种量度。

定义温度的实验基础是热力学第零定律，又称热平衡定律。这个定律指出，两个系统互为热平衡时，具有相同的宏观性质。实验表明，在几个物体作为一个整体达到热平衡状态后如果再把它们分开，在不改变外界环境的条件下，每个物体的热平衡状态不会发生变化。由此得出，处于某一热平衡状态的系统，一定存在一个由状态单值确定的状态量，由它可以决定该系统是否与其它系统互为热平衡，这个状态量就是温度。一切互为热平衡的系统具有相同的温度。

热平衡定律不仅给出了温度的定义，而且也指明了比较温度的方法。选定一个标准物体，并将它与待测温度的物体发生热接触，如果这两个物体原来的状态不相同，它们一定具有不同的温度。经过热交换以后，这两个物体最后会达到一个共同的热平衡状态，从而具有相同的温度。只要热接触前后，待测物体的状态变化很小，以至可以忽略，那么热接触以后标准物体的温度就是待测物体原来的温度。这种标准物体就是通常所说的温度计。温度计上的温度是通过它的某一个状态参量来标志的，例如水银温度计放在空气中，与空气达到热平衡时，就以水银柱的高度显示空气的温度。

为了定量表示温度的大小，还需建立温度的数值表示法——温标。常用的温标有摄氏温标和华氏温标，而科学上最严格定义的温标是热力学温标（又称绝对温标）。

从微观上看，温度标志物体内部分子无规则运动的剧烈程度，温度越高表示物体内部分子热运动越剧烈，分子的平均平动动能也越大。温度是体现大量分子热运动集体效应的宏观量，对于单个分子，温度是没有意义的。

温度的微观意义为现代致冷技术提供了物理基础。激光冷却是当代获取超低温的一种新技术，其基本原理就是利用激光光子来抑制分子原子的热运动，而热运动的减缓就意味着温度的下降。通过激光的“冷光子”与物质分子原子的相互作用，现在已经可以产生出绝对温度达到  $10^{-3}\text{K}$  数量级的原子束和气体。在这样的超低温下，对单个原子行为的测量可以达到很高的精确度。

**温度计 (thermometer)** 定量测量温度的装置。根据热学理论，温度是一个表征平衡态性质的重要物理量。任何实际系统总有一些状态参量随温度的变化而改变，因此利用某热力学系统的状态参量与温度变化之间的定量关系，就可测量温度，该热力学系统就是一种温度计，这就是温度计的基本制作原理。原则上，一般热力学系统都可以作为温度计，但实际选用温度计时必须满足以下几个条件：**灵敏性**。很小的温度变化能引起状态参量显著的改变；**准确性**。在一定温标下状态参量的测量能准确表示温度的数值；**可重复性**。对相同温度物体的测量能给出同一个数值。此外，在生产实践和科学研究中，往往要求在短促的瞬间能测量出物体的温度，这就要求温度计与被测物质达到热平衡的弛豫时间必须很短。

按测量原理分，温度计大致有以下几种类型：**利用体积或压强作为温度的标志**。最常见的是玻璃液体温度计，这种温度计由盛有水银或酒精之类的液体的温泡、玻璃毛细管和刻度标尺组成。用这种温度计测量时，从毛细管内液面的位置可以直接读出被测物质的温度。体温表以及通常家庭用的室内温度计都属于这一类。这类温度计构造简单，使用方便，主要缺点是测温范围较小，玻璃膨胀后不容易恢复原状，测量的精确度不高。**利用压强作为温度标志而制成的温度计是压力表式温度计**，这种温度计由温泡，连接毛细管和压力计组成。温泡中盛有气体、蒸气或液体作为工作媒质。用这种温度计测量时，由于工作媒质容积不变，因此从压强的变化就可以测出被测物质的温度变化。这类温度计测量范围比玻璃液体温度计宽，例如用氮气作工作媒质，最高可测得  $500^\circ\text{C}$ ，用氢气作媒质，最低可测出  $-120^\circ\text{C}$ 。压力表式温度计主要用于工业上的温度测量。**利用电动势或电阻作为温度的标志**。工业上应用极其广泛的热电偶温度计（又称温差电偶）就是其中最常用的一种。由两种不同的金属导体一端焊接在一起称为测试结，置于被测物质处；另一端分别与铜导线相连形成参考结，保持某个恒定的参考温度。铜导线与电位差计相接从而构成闭合回路。当测试结与参考结的温度不同时，回路中就会出现温差电动势。在固定参考温度时，温差电动势的大小就反映出测试结的温度。已制成的热电偶温度计可测出  $3000^\circ\text{C}$  的高温，有的热电偶可测出接近绝对零度的低温。根据导体电阻随温度变化而制成的温度计称为电阻温度计。常用的电阻温度计由一根很细的铂金属丝绕制构成。在很低的温度范围还可以使用铈铁、碳和锗单

晶温度计，精密铂电阻温度计的测量准确度可达万分之一摄氏度。在-293.34 ~ 630.74 范围内，它是复现国际实用温标的基准温度计。利用高温物体的热辐射和光谱辐射作为温度的标志。前一种温度计称为辐射高温计，它是根据黑体辐射的总能量与其温度的四次方成正比( 斯忒藩-玻耳兹曼定律 ) 的原理制成的；后一种温度计称为光测高温计，它是通过调节电流大小使装在特制望远镜中的电灯泡发出的亮度与被测物体亮度一致，从而在加有温度标度的电流计读出被测物体的温度。辐射高温计和光学高温计一般可测量到 2000 ~ 3000 的高温。此外，还有利用声速作为温度标志的声学温度计，利用频率作为温度标志的频率温度计和利用磁化率与温度关系制成的磁温度计。近期发展起来的把对非电量的测量转换为电磁量测量的电磁测量技术，为制造出准确度更高、量程更宽、且可进行遥测的新型温度计，开辟了新的前景。

**温室效应 ( greenhouse effect )** 大气中的痕量气体允许太阳的辐射穿过大气到达地表，同时能防止从地表放出的热辐射逸散到太空而使低层大气变暖的现象。大气对于可见光有较大的透过率，到达大气顶的太阳辐射能大约有 50% 可以到达地表而被吸收，使地表增温。由于地表具有一定的温度，所以它也发射红外辐射。大气中的二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、臭氧和水汽等痕量气体都能吸收大部分的地表红外辐射，使得大气变暖。同时大气本身也发射红外辐射，其中一部分向上逐步传向外空，另一部分则向下传播为地表所吸收，这也是使地表增温的一个因素。这些微量气体称之为温室气体，它们使地表及低层大气温度升高的作用与玻璃温室有相似之处，称为温室效应。

二氧化碳是引起温室效应的主要气体。大气中二氧化碳的平均含量在 1958 年前为 315ppm ( 1ppm 单位表示体积的百万分之一 )，到 1984 年升为 344ppm，而且递增速度越来越快。氟利昂等氟氯碳化合物在大气中的含量只是在工业革命后才有的，但它在大气中的浓度急剧上升。196 年大气中甲烷的含量已是 200 年前的 2 倍。这些气体在大气中的含量若不断增加，将进一步导致全球性平均温度的增加。全球范围二氧化碳的增加主要是矿物燃料用量激增所造成的。矿物燃料产生的二氧化碳有 40 ~ 50% 左右滞留在大气中，其余一半被海洋和植物所吸收、利用。若大气中的二氧化碳含量翻一番，那么在全球范围地面附近的温度将上升 3 。全球平均气温在本世纪上升 5 左右，特别是 80 年代，全球气温的上升速度很快，1990 年地球出现了创纪录高温。联合国有关专门机构预测，到下个世纪末，如果不加控制，全球气温将上升 2 ~ 5 。在我国，变暖区主要是华北、东北、西北地区、及青藏高原和南岭以南的沿海地带。

气温升高、气候变暖将导致海平面上升，对世界沿海城市造成威胁。气候变暖的同时会发生气候干燥现象，严重影响农业、畜牧业，因为随着土地干旱，草原、农田的沙化将加快，病虫越冬的存活率将提高。气候干燥又会导致淡水资源消耗加快，造成水资源的供求矛盾。但温室效应也可使农业气候带北移，对北方来说，可以缓解低温冷害和霜冻灾害，有利于多年生经济植物及家畜、家禽的安全越冬，并节省冬季取暖开支。大气中二氧化碳浓度的增加还会促进绿色植物的光合作用，有利于植物的生长。总之，大气的温室效应对于人类和环境有利也有弊，然而弊大于利。

为了制止大气温室效应的发展，必须大力开发利用洁净能源、植树造

林，从而降低二氧化碳等气体的排放量，改善地表辐射特征，提高绿色植物吸收固定二氧化碳的能力。此外，还应控制温室气体的生产量和使用量。气候变暖是一个全球性问题，要控制它的变化，需要全球合作，开展各地区的温室气体监测，贯彻气候保护等措施。

**紊流 (turbulence)** 即湍流。

**稳定流动 (steady flow)** 见流线。

**稳压电路 (stabilized voltage-circuit)** 在输入电压、负载、环境温度、电路参数等发生变化时，仍能保持输出电压恒定的电路。这种电路能提供纹波系数小的稳定的直流电压。这种电路应用极广。

图 1 稳压电路原理图

稳压电路的原理如图 1 所示。交流输入电压  $e_1$  经变压器  $T_p$  变成电压  $e_2$ ，再经整流滤波电路获得一个不稳定的脉动的直流电压  $U_i$ ，输入调整电路（即稳压电路）。因  $U_i$  或稳压电路输出电流  $I_0$  的变动而引起输出电压  $U_0$  变化时，调整电路使  $U_0$  保持原值或者只有极小的变动。

稳压电源的稳压性能可用输出电阻  $R_0$  和稳压系数  $S$  来表征。输出电阻  $R_0$  是输出电压变化值  $\Delta U_0$  与输出电流变化值  $\Delta I_0$  比值的负数，即  $R_0 = -\Delta U_0 / \Delta I_0$ 。稳压系数  $S$  为输出电压的相对变化量  $\Delta U_0 / U_0$  与输入电压相对变化量  $\Delta U_i / U_i$  的比值，即  $S = \frac{\Delta U_0 / U_0}{\Delta U_i / U_i}$ 。 $R_0$  和  $S$  越小，稳压电路性能越好。

常用的稳压电路有稳压管稳压电路及串联晶体管稳压电路等。

**稳压管稳压电路** 由限流电阻  $R_s$  和稳压二极管  $D_z$  组成，如图 2 所示。调整电路的输出端电压为

$$\begin{aligned} U_0 &= U_z = U_i - I_i R_s \\ &= U_i - (I_z + I_0) R_s, \end{aligned}$$

图 2 稳压管稳压电路

当输入电压  $U_i$  或输出电流  $I_0$  在一定范围内升高或降低时，稳压管通过调整  $I_z$  而使  $U_z$  保持不变， $R_s$  和  $D_z$  起调整电路作用。这种稳压电路的工作范围受稳压管最大功耗的限制， $I_z$  不能超过一定数值。其关键是：在  $U_i$ 、 $R_s$  及  $U_0$  确定时， $R_s$  的选取应保证在输入脉动电压为最大值  $U_{i\max}$  时，稳定电流  $I_x$  和稳压管允许的功耗不超过规定的最大值；在输入脉动电压为最小值  $U_{i\min}$  时，又能保证  $I_z$  不低于最小的稳定电流。该稳压电路的输出电阻为  $R_0 \approx R_z$

（ $R_z$  为稳压二极管的动态内阻），稳压系数  $S = \frac{R_z}{R_s} \times \frac{U_i}{U_0}$ 。 $S$  值一般在 0.01

左右，性能较差，但线路简单，多用于稳压要求不高、负载电流不大且变动范围较小的场合。

**串联式晶体管稳压电路** 图 3 为串联式晶体管稳压电路。它由四部分构成： $T_1$  为调整管，起调整电压作用； $R_e$  和  $D_z$  构成基准电压电路； $R_1$  和  $R_2$  为采样电路； $R_c$  和  $T_2$  构成放大电路。其稳压原理为：调整管  $T_1$  与负载相串联， $U_z$  为放大器  $T_2$  的发射极的参考电压。

图 3 串联式晶体管稳压电路

输出电压  $U_0$  被  $R_1$ 、 $R_2$  分压取样后与  $U_z$  进行比较。当输出电压  $U_0$  因某种原因下降时， $T_2$  的基极电压  $U_{be2}$  也下降， $I_{b2}$  和  $I_{c2}$  随之下降，使调整管  $T_1$  的基极电位  $U_{b1}$  上升， $T_1$  管的  $U_{ce}$  下降，使输出电压  $U_0$  趋于稳定。

串联式晶体管稳压电路具有输出电流大、输出电阻小、稳压性能好等优点，获得广泛的应用。

**涡电流 (eddy current)** 块状金属处于变化磁场中或相对于磁场运动时，在金属体内部形成的感应电流。这种电流的流线呈涡旋状闭合回线，所以叫涡电流。1855 年由法国物理学家傅科首先发现，故又称傅科电流。由于块状金属一般电阻很小，涡电流强度往往很大，热效应和机械效应都很显著。工业上利用涡电流的热效应，制成高频感应电炉，在真空、高压、无污染等特殊要求下加热，用来冶炼某些特种金属和合金。家用电磁灶也是一种小型的高频感应电炉，由于它利用涡电流直接加热，其热效率就比通过空气传热和辐射传热的普通电炉高得多。产生涡电流的金属体在磁场中要受到安培力或磁力矩的作用，这种机械效应既可用作电磁驱动，也可用作电磁阻尼。感应式异步电动机、磁式转速计以及许多电磁仪表中都有这类应用。涡电流在许多场合下又是有害的。例如，变压器的线圈中通过交变电流时，铁芯中将产生涡电流，不仅损耗电磁能量，还会损伤甚至烧毁设备。为了减小这种涡电流，常用电阻率较大、各片之间又互相绝缘的硅钢薄片叠合制成铁芯，或用铁的氧化物烧结的电阻率较大的铁氧体磁芯或磁铁芯。

**涡流 (eddy current)** 做旋转运动的一种流体。流体做涡流运动时，本身不仅发生平动，而且其中的任一微小单元都绕着瞬时轴线，以某一角速度做旋转运动。流体在运动过程中，由于受到某种障碍物的阻碍会引起速度变化，或因流体内部粘滞阻力、压力不均匀等因素的影响形成相向对流的运动，很容易形成涡流。例如河流中流水在桥墩附近处常形成旋涡。旋涡就是一种涡流。旋涡的中心形成一股向下的液流，会给游泳的人带来很大的危险，因此切不可在旋涡多的地区游泳。旋风是空气中的涡流现象，龙卷风就是强大的旋风，它的中心区有一股强大的上升气流，将所经之处的树木、房屋等物卷上天空，破坏力极大。

**涡旋电场 (vortex electric field)** 亦称“感应电场”。由变化的磁场所激发的电场。使用电动势的定义式，可以把法拉第电磁感应定律写成如下的形式：

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}。$$

式中的  $\mathbf{E}$  不是由静电荷产生的电场，即是一种非静电性电场，后来在麦克斯韦电磁理论中作为基本假设之一，被称为涡旋电场而与静电场相并列。它与静电场一样，对处于场中的电荷施加作用力。但它与静电场产生的原因不同，特性也不完全一样。涡旋电场的电场线是无头无尾的闭合曲线，因此它和磁场一样，理论上称之为无源有旋场。

涡旋电场后来为包括电磁波在内的大量实验事实所证实。电子感应加速器等就是实际应用涡旋电场的装置。



“我不作假设” (hypothesis non fingo) 牛顿为了回答莱布尼兹的批判而在准备《原理》第2版时解释重力原因时用的话。在数学和物理学研究中，凡不是从直接的事实、公理、定理和定律出发进行推导和论证的前提，都称为假设，正如牛顿自己所说：“凡是不从现象推导出来的，都称假设。”他认为重力的各种性质的原因是无法从现象中发现的，因此不作假设。第二是他对亚里士多德形式因和质料因以及笛卡儿在研究自然科学中的任意创造假设的思辨倾向十分反感，因此不作假设。再则是他为了避免引起不必要的争论，因此也不作假设。这对于引导人们重视实验和客观现象，运用公认的逻辑推理和数学计算去研究自然科学，具有十分积极的意义。然而，科学的假说是理论思维的重要形式，因此不作假设，也成为牛顿科学方法论中的一个缺陷。

我国物理教学研究组织 (the organizations of Physics teaching in China) 我国从事物理教学研究的学术组织。我国的物理教学研究组织是中国物理学会物理教学委员会和中国教育学会物理教学研究会。

中国物理学会理事会下设六个工作委员会：学术交流委员会、科普工作委员会、出版工作委员会、咨询工作委员会、物理教学委员会、物理名词审定委员会。第五届物理教学委员会下设大学、中学等分委员会。有关中学物理教学的会刊是《物理教学》杂志。中国教育学会下设各学科教学研究会，会刊是《学科教学》。物理教学研究会的会刊是《物理教师》和《中学物理》。

中国物理学会物理教学委员会的工作范围涉及中学、大学和研究生阶段的物理教学。该委员会的工作特点是从物理学科的学科领域范围内深入探讨物理教学中的有关课题。组织有关的学术交流活动，并组织一年一度的全国中学生物理竞赛。中国教育学会物理教学研究会的工作范围是中学物理教学。该委员会的工作特点是从教育学、心理学、课程论等教育、教学基本原理与学科教学相结合的角度深入探讨中学物理学科的教学规律和有关课题，组织和鼓励有关的中学物理教师参加学术交流活动。

我国中学物理教材的沿革 (changes and innovations of school textbooks of physics in China) 新中国建立后中学物理教材编写的发展变化情况。

建国后，鉴于教材在学校教育中的重要作用，改变解放前由各私营书店请人编写教材的作法，于1950年底组建了以编写、出版中小学课本为主要任务的人民教育出版社。1950年12月，人民教育出版社着手编写物理课本，方针是以我国已有经验和规有条件为基础并吸收原苏联经验，初中上册从1951年秋开始供应，初中下册和高中第一册从1952年秋开始供应。自1952年下半年开始，人民教育出版社根据教学大纲和以原苏联最新课本为蓝本的编辑方针，又编写新的中学物理课本。这套课本自1953年秋开始供应初二，到1957年初中两册、高中三册全部出齐。初中两册到1963、1964年又相继为新编课本代替，高中三册一直用到1966年。由于学习苏联，中学物理由解放前的初、高中各学一年变为由初二到高三连续学5年，总课时数增加了一倍。教材的科学性明显提高，现代物理知识和联系生产实际的内容明显加强。此外，这套课本还特别注意了加强实验，讲清概念和规律，进行辩证唯物主义教育，贯彻可接受性原则，对学生掌握系统、巩固的基础知识起了积极作用，但对于培养能力、发展智力注意不够。

1958年人民教育出版社受命编写只缩短年限(中小学共10年)、不提高程度的物理课本,高、初中各两册,自1961年秋开始在少数学校试用。由于这套课本内容、习题比12年制的少,不利于参加全国统一的高等学校入学考试,所以只试用了很短时间。1961年,中共中央文教小组决定,要在总结过去编教材经验的基础上,重新编写一套加强基础知识和基本训练的、质量较好的中小学教材。新编的初中上册从1963年秋开始正式使用。但到1964年初,初中下册刚试用半年,高中三册刚刚脱稿,因传达了“春节讲话”中提出课程要砍一半。根据这一精神,删减了初中两册,停印了高中三册。

1966年开始了持续十年的“无产阶级文化大革命”,人民教育出版社停止工作。有些省市取消了物理课而代之以工业基础知识课,即使保留了物理课的省市所编的物理课本中,也大都是结合“三机一泵”(电动机、柴油机、拖拉机、水泵)讲物理知识,严重破坏了知识系统,大大削弱了基础知识。

1978年1月教育部发布了《全日制十年制学校中学物理教学大纲(试行草案)》,依据这个大纲编写的十年制初高中物理课本(试用本)初中两册、高中两册,陆续供应全国使用。

1981年,教育部颁发了新教学计划,初中减少了一些学科的教学时数以促使减少内容、减轻负担;高中,两年制、三年制并存,三年制高中物理课时数比1978年有所增加。为了适应不同学校不同情况,使学生都能学有所得,1983年教育部颁发《高中物理教学纲要(草案)》,决定高中物理施行两种教学要求:一种是基本要求,比试用本的内容减少、要求降低,使一般学校的多数学生经过努力能够学得了;一种是较高要求,仍基本保持试用本的水平,供重点中学选用。根据新教学计划和两种教学要求,人民教育出版社自1981年起着手改编初中课本,从1982年秋开始供应;自1983年起着手改编高中课本,根据基本要求编出的叫乙种本,根据较高要求编出的叫甲种本,从1984年秋开始供应。1986年,鉴于学制、课时、教学内容都已不同于1978年颁发的十年制学校教学计划和教学大纲,国家教委决定以当时的教学实际为依据,本着“适当降低难度,减轻学生过重的负担,教学要求明确、具体”的原则,修订1978年的大纲,成为《全日制中学物理教学大纲》(1986年12月第1版)。其中初中的教学内容和要求同1982年秋开始供给的初中课本基本相同,高中部分的教学内容和要求同1983年《高中物理教学纲要(草案)》的基本要求大致相同,而纲要(草案)中的较高要求则作为附录,附在大纲之后。据此,人民教育出版社根据大纲的高中部分修改了乙种本,修改后不再有乙种本字样,从1988年秋开始供应。

1986年《中华人民共和国义务教育法》通过后,国家教委即组织力量制订义务教育各科教学大纲。《九年制义务教育全日制初级中学物理教学大纲(初审稿)》于1988年4月由国家教委颁发,经过4年试用于1992年6月颁发《九年义务教育全日制初级中学物理教学大纲(试用)》。义务教育物理大纲(初审稿)颁发后,本着“中小学教材要在统一基本要求的前提下实行多样化”的精神,四川、广东、浙江、上海、北京师范大学、八个高师院校出版社(联合)、人民教育出版社等,纷纷组织力量编写义务教育初中物理课本并进行试教。义务教育的任务是提高全民族的素质。

义务教育物理教学大纲总的指导思想是为实现义务教育的总目标服务，着眼于全面提高学生的素质。大纲除了注意知识、能力等智力因素的培养外，还强调兴趣、科学态度、好的学习习惯及思想教育等非智力因素的培养。

为了纠正普通高中片面追求升学率出现的文理偏科，全面提高学生素质，国家教委在 1990 年 3 月印发了《现行普通高中教学计划的调整意见》，其中规定物理在高一、高二是必修课（都是每周 3 课时），高三是选修课（每周 4~6 课时）。在酝酿高中教学计划调整意见过程中，国家教委组织力量修订 1986 年 12 月第 1 版的教学大纲，成为 1990 年 4 月第 2 版的《全日制中学物理教学大纲（修订本）》。这个修订本主要是适应教学计划的改变，将原来的高中内容分为必修、选修两部分，这两部分的总要求比修订前略有降低，如删去了有固定转动轴物体的平衡。国家教委责成人民教育出版社根据大纲修订本修订高中物理课本。供高一、高二用的高中物理第一册（必修）和第二册（必修），都从 1991 年秋开始供应，供高三用的高中物理第三册（选修）从 1992 年秋开始供应。一些地方，如上海也已编好高中必、选修课改革新教材，并于 1990 年起作使用试点。

**无线电波（radio wave）** 参见电磁波。

**无线电导航（radio navigation）** 利用无线电精确地测定运载工具（飞机、舰船）的位置，并引导它们安全、准确、准时地沿着预先指定的航行路线，从一地航行到另一地的技术和方法。无线电导航起始于 20~30 年代的无线电测向，不过无线电测向当今已成为导航的一种辅助手段。第二次世界大战期间，无线电导航有了迅速的发展。出现了双曲线导航系统，雷达也开始成为导航手段。以后的研究向远程及近程的导航更进一步推进。70 年代已研制成微波着陆系统，并开始研究同步测距全球定位系统。

导航的任务就是保证在各种气象条件下，引导飞机和舰船等航行体沿着预先指定的航向航行；引导车辆和人员在丛林、沙漠等特殊环境中行驶，引导飞机的起飞和着陆；引导舰船通过狭窄的航道、进出港湾以及停靠码头；为提高飞机和舰船的航行安全和效率，对飞机和舰船的活动进行调度，实行交通管制，以防止发生碰撞。在军事上，导航还能配合完成诸如武器投射、侦察、巡逻、反潜、空中集合、空中编队、援救等任务。

无线电导航是建立在无线电波的下述三个基本传播特性的基础上的：

无线电波在任何两种媒体的边界面上必然产生反射；在理想均匀媒体中，无线电波是直线传播的；在理想均匀媒体中，无线电波传播的速度是常数。根据上述这些性质，在测得其电气参数后，便可获得航行体在平面或空间的位置。

与其他导航（惯性导航、天文导航、大气数据导航、红外线导航、激光导航及地磁导航等）手段相比，无线电导航的优点是：不受时间、气候条件的限制，随时可以使用；设备较简单；测量工作迅速；精度和可靠性较高。其主要缺点是易受自然或人为的干扰。

**吴健雄（1912~）** 美籍华裔物理学家。生于江苏省太仓县浏河镇。1925 年入苏州第二女子师范学校，1928 年毕业后，曾任两年小学教师。1930 年入南京国立中央大学（南京大学前身）理学院，1934 年毕业。1936 年自费留美深造，1940 年获物理学博士学位。此后在麻省罗森普顿史密斯学院和普林斯顿大学任教。1957 年任哥伦比亚大学物理学教授。她是美国科学

院院士，曾两次当选为美国物理学会会长，成为担任这一职务的第一位女科学家、第一位华人科学家。

吴健雄是当代极为杰出的实验物理学家。她的老师塞格雷曾这样描述过他的这位学生：“她的毅力和对工作的献身精神使人想起了玛丽·居里，但她更成熟、更漂亮、更机灵。”主要贡献是，1957年用 $\beta$ 衰变实验证实了在弱相互作用中的宇称不守恒。为了证实李政道、杨振宁于1956年提出的“在弱相互作用中宇称不守恒”的假说，她专程到华盛顿，与美国标准局的几位物理学家合作进行了一个实验。这个实验的一个困难在于如何使样品内钴-60原子核的自旋方向整齐地排列起来而产生极化。另一个困难是，样品内原子核的热运动会破坏原子核自旋的排列。所以只有将钴-60样品放置在比绝对零度只高1/100度那样的极低温度下，以及用强磁场才能使自旋几乎都在同一方向。结果观察到钴-60原子核 $\beta$ 衰变放出的绝大多数电子的出射方向都和钴-60原子核的自旋方向相反。就是说，钴-60原子核的自旋方向和它的 $\beta$ 衰变的电子出射方向形成左手螺旋，而不形成右手螺旋，由此推翻了物理学界一直视为金科玉律的宇称守恒定律，使李政道、杨振宁因此而获得诺贝尔奖金。1963年与中国教授莫玮等人合作，实验确定了由费曼和盖耳曼提出的核 $\beta$ 衰变矢量守恒定律，这在物理学史上是第一次由实验证实电磁相互作用与弱相互作用有密切的关系，对后来电弱统一理论的提出起了重要作用，并使费曼和盖耳曼因此而分别获得1965年和1969年诺贝尔奖金。

吴有训（1897~1977）中国物理学家、教育家。江西省高安县人。早年毕业于南京高等师范学校。1921年赴美留学，曾随康普顿从事物理学研究，1926年获博士学位，同年回国。1928年起任清华大学教授、物理系系主任、理学院院长。1945年任中央大学校长。1948年底任交通大学教授，1949年任校务委员会主任。1950年任中国科学院近代物理研究所所长，同年任中国科学院副院长。1955年受聘为数学物理学化学部学部委员并任主任。

吴有训的重要贡献在于验证了康普顿效应。1923年康普顿用光子与静止电子的弹性碰撞解释了散射光波长的改变，得出了波长移动的公式。在此期间，吴有训参与了康普顿X射线散射研究的开创工作，并以精湛的实验技术和卓越的理论分析，对康普顿效应加以验证。1924年他和康普顿合作发表《经过轻元素散射后的钨 $K_{\alpha}$ 射线的波长》。1926年他单独发表《在康普顿效应中变线与不变线的能量分布》和《在康普顿效应中变线与不变线的能量比》两篇论文。这些成果丰富了康普顿的工作，使康普顿效应进一步为国际物理界所公认。在1928年任教清华以后，仍坚持科研工作，发表有关X射线散射的论文达50多篇，是国内开展近代物理实验的先行者。

误差的分配（distribution of error）是设计和研究以及改进实验的基本方法。如果实验中测量的量没有用到多次重复求平均等的统计方法，可采用算术综合的误差分配算法，用到随机处理的统计方法可采用几何综合的误差分配算法。现分别加以说明如下。设 $y=f(x_1, \dots, x_t)$ ，根据微分原理，函数的微分为：

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_t} \cdot dx_t$$

实验时，误差是一种小量，因此用差分量  $y$ ， $x_1$ ， $x_2$ ，...  $x_t$  近似地表示上述公式，对于误差估计是完全可以的。假定各项误差都取绝对值，考虑到最不利情况，上式改写为：

$$\begin{aligned}\Delta y &= \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \cdot \Delta x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| \cdot \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_t} \right| \cdot \Delta x_t \\ &= \sum_{i=1}^t \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i = \sum_{i=1}^t |D_i|,\end{aligned}$$

$$\text{式中 } |D_i| = \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \cdot \Delta x_i.$$

为了使综合的结果  $y$  不超过预先给定的  $y_m$  值，并考虑最有利条件，即各误差项相等的分配原则作为第一步近似：

$$|D_1| = |D_2| = \dots = |D_t| = |D_m|,$$

$$\text{又 } \theta_{ym} = z \sum_{i=1}^t |D_i| = t \cdot |D_m|,$$

$$\text{即 } D_m = \theta_{ym} / t.$$

但是实验中，有些量的  $\left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|$  值可能很小， $x_i$  又很小，限  $|D_i|$  值很小，当成为微小误差时，可以忽略。因此各  $|D_i|$  先与  $y_m/t$  比较，是否小于一个数量级，在明确知道可以忽略时，再作上述的第二次误差相等分配的计算，最后得到各误差项的分配值。

例如直流电桥的准确度等级为 0.05，即  $\frac{\Delta R_x}{R_x} = 0.0005$ ，电桥平衡时的待测电阻计算公式为：

$$R_x = \frac{R_2}{R_3} \cdot R_4,$$

应怎样分配各量的误差限？

根据间接量误差的计算公式：

$$\begin{aligned}\Delta R_x &= \frac{\partial R_x}{\partial R_4} \cdot \Delta R_4 + \frac{\partial R_x}{\partial R_2} \cdot \Delta R_2 + \frac{\partial R_x}{\partial R_3} \cdot \Delta R_3 \\ &= R_x \left( \frac{\Delta R_4}{R_4} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right),\end{aligned}$$

$$\text{即 } \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_4}{R_4} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3}$$

第一步近似取  $\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{1}{3} \times 0.0005 = 0.00016$ ，即电桥每臂

的相对误差都不得大于 0.00016。但从电桥的结构可以知道， $R_2$  和  $R_3$  是比例臂，一般由四个电阻组成。而  $R_4$  是调节臂，由五个左右十进盘组成，每个步进盘均由九至十个电阻组成，保证上述误差要求，前两个步进盘的每个电阻元件都应精细调整以使其综合调整误差不超过 0.00016，这在制造上比较困难；而比例臂电阻数目较少，要调整准确相对较为容易。

在上述认识基础上，对误差分配的方案进行一项调整，将较大误差分配给调节臂，将较小误差分配给比例臂，例如：

$$\frac{\Delta R_4}{R_4} = 0.00020,$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = (0.0005 - 0.0002) / 2 = 0.00015,$$

为了留有一定余量，取  $\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = 0.00015 \times 0.8 = 0.00012$ ；因此调整后的误差分配如下：

整后的误差分配如下：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_x}{R_x} &= (0.00020 + 0.00012 + 0.00012) \\ &= 0.00044 < 0.00050 \end{aligned}$$

实际使用时， $R_2$  和  $R_3$  的误差有互相抵消的关系，所以实测准确度还可能高些。

以上是按算术综合时的误差分配方案确定各量的误差值要求。按几何综合时的误差分配法，适用于随机误差的场合。随机误差的传递公式，可写成：

$$\sigma_y^- = \sqrt{\sum_{i=1}^t \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2},$$

同样按各变量误差项的值相等分配原则，应该：

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 = \Lambda = \left(\frac{\partial f}{\partial x_t}\right)^2 \cdot \sigma_t^2 \\ &= \theta_{ym}^2 / t, \end{aligned}$$

$$\text{即 } D_1^2 = D_2^2 = \Lambda = D_t^2 = \theta_{ym}^2 / t$$

$$\text{或者 } D_1 = D_2 = \Lambda = D_t = \theta_{ym} / \sqrt{t}$$

按上述相等的方法进行计算和讨论，以求得各变量的误差分配值。

**误差分类 (kind of error)** 描述了测量值与精确值间的差异种类。误差按性质来分有三类：系统误差、随机误差和粗差。

系统误差描述了测量值与真正值之间的差异。由于测量方法存在一定的缺陷，或者理论作了近似处理，或者测量者使用的仪器没有校正等等原因，都能使测量值与真正值间存在一定规律的差异，这种差异称为系统误差。例如单摆摆动次数计算，不是从 0 开始计时到 30 次，而是从 1 开始计到 30 次，前者做 30 次全振动，而后者做 29 次全振动，而误以为 30 次，这样计算得到的重力加速度始终大于真正值。如果将计时数除以 29，得到周期再计算重力加速度，那么实验值与真正值一定非常接近。系统误差是一种测量值和真正值之差，具有符号和大小按一定规律变化的特点，真正找到原因后加以有效消除，系统误差随之消失。

随机误差描述了测量值与平均值之间的差异。随机误差的产生是由于多种不稳定因素造成的。所以在相同条件下的重复测量，实际上还有许多偶然因素的随机作用使重复测量到的值有大小不同的偏离，这些偶然因素太多，不能有效避免，我们只能用统计的方法寻找内在的规律。例如在相

同的时间间隔记录布朗粒子的位置，寻找时间间隔与位移大小的规律。实验告诉我们，在相同的实验条件下位移大小各不相同，但是服从一定的统计规律，与统计物理的推导结论符合得很好。

粗差描述了测量值与真正值或者平均值的差异大到超过规定的范围，以致变为错误。当然错误是不可避免的，但错误的出现率要符合一定的规律。若出现率太高，可认为原理本身或者测量方法有错误存在。错误率低到一定程度，偶而出现是允许的，可以剔除，做到实验结果不因偶然事件的出现影响其准确性。从统计角度出发，如果对实验结果重复测量 1000 次，那么有 2 次半的数据是错误的，允许剔除。少于 100 次的重复测量几乎没有错误产生，但是习惯上也允许剔除一个特别大的误差作为粗差处理。在中学物理实验中，由于没有掌握好实验的原理和要求，盲目测试数据甚至凑数据，使得到的数据没有真正的参考价值，这种情况不属正常实验操作，不是讨论的粗差范围。

**误差与偏差 (error and deviation)** 用来描述测量值和真正值与平均值之间差异大小的量。例如测量值为  $x$ ，真正值为  $x_0$ ，平均值为  $\bar{x}$ ，则测量值的误差和偏差，分别为

$$x = x - x_0 \text{ 和 } x = x - \bar{x}。$$

真正值不一定是准确无误的值，而是相对而言更为准确的值。例如重力加速度的测量值为 9.5 米/秒<sup>2</sup>，那么 9.8 米/秒<sup>2</sup>可作为真正值；如果测量值为 9.82 米/秒<sup>2</sup>，那么 9.79 米/秒<sup>2</sup>可作为真正值。换言之，准确度比测量值更高的值，可作为真正值。通常手册中查到的数据可作为真正值。平均值是多次测量后计算得到的值，该值不一定准确，但能作为一系列测量值的可靠代表。如果测量方法和原理都是足够的，或者说相对而言是准确的，那么平均值就是真正值。误差在考虑正、负符号和大小，偏差只考虑绝对值，并永远取正值。但由于历史原因，误差与偏差都被说成误差，至今还是如此，所以产生了误差的分类。

**物 (object)** 向光学系统发出发散或会聚入射光线束的中心。实际发光点是发散光线束的顶点；有单个顶点的光束称为单心光束，或同心光束。对一定的光学系统来说，如果入射光束是发散的单心光束，则该单心光束的发散中心为实际物点，或简称为实物。如果入射光束是会聚的单心光束，则该单心光束的会聚中心为非实际存在的物点，简称为虚物。因为该会聚光束还没有到达它的会聚中心点就已入射进光学系统，故称“虚”；但又确实是物，因为这种会聚光束确定能够通过光学系统产生像，虚物出现在几个光学系统联合成像的问题中。

**物镜 (objective)** 在显微镜、望远镜等光学仪器中，对物体作第一次成像的透镜，又称镜头。其作用是形成物体的实像以供后面的光学系统放大或记录。物镜可以是单会聚透镜或多透镜组合，也可以由透镜和反射面镜组成的折反射式镜头。物镜的称呼常冠以仪器名称，如显微镜物镜，照相机镜头；或冠以有特色的光学参数，如长焦距物镜，可变焦距镜头，六米天文望远镜物镜等等；有时也以消像差情况来称呼，如去像散物镜，消色差物镜等。

**物理摆 (physical pendulum)** 即复摆。

**物理测验 (test of physics)** 对学生学习物理成果和水平进行评价的主要手段。通常也称为物理考试。考试评分结果是评定学生学习成

绩的一个主要依据，通过测验，可以使学生了解自己的学习水平以及自己与教学要求之间的差距，从而促进学习；同时可以使教师了解自己的教学效果和学生学习中的弱点，从而作为改进教学的必要依据。物理测验不仅是衡量教学质量的手段，而且也是学科竞赛、选拔和使用人才的手段和依据。

科学、合理的测验，对教学评估、选拔人才可以起着积极的促进作用，测验运用不当（包括命题、评分等），容易产生消极作用。作为测量工具的试卷，是否科学、准确，测量结果是否真实、可靠，不能凭经验来决定，教育测量学提供了合理编制测验、定量分析和评价的方法。

物理测验类型（types of physics tests）按评定时所参照的标准不同对测验分类。

(1)标准参照测验（Criterion-referenced test，简称 CRT）。标准参照测验是以具体体现物理教学目标的标准作业作为标准，检查学生达到教学目标的程度，即检查学生是否达标和达标的程度，因此称为达标测验或资格测验。诊断性测验和形成性测验都应设计成标准参照测验。

(2)常模参照测验（Norm-referenced test，简称 NRT）。常模参照测验是以团体的平均分数为标准，就是在一次测验中所得的平均水平。常模与目标不同，目标是教学的目的、要求，是学生应该达到的程度；常模是学生们实际上达到的平均程度。分班、分组进行的测验、升学考试等都是常模参照测验。这种测验用于学生之间的相互比较，检查学生在所处团体中的相对位置。

物理电化教学（audio-visual education program in physics）运用电声、电光设备作为教学工具和手段的教学方式。常用的电化教学工具有：幻灯、投影、录音、电影、录像和计算机辅助教学等。

幻灯、投影是比较容易普及和广泛使用的电教工具，它们放映出的图片，能够表达板书板画不易表达的内容。幻灯片、投影片还可以展示例题、习题、单元系统复习纲要以及历史资料等文字内容，并可加工剪辑。幻灯片、投影片也可以显示一些复杂的图像，运用一些特技手段，可以使图形具有动感，或采用逐步复合、逐步分解的投影片，使学生既有部分又有整体的综合认识。运用投影还可以投影实物，把受尺寸限制和那些不明显的实验现象显示出来。录音、电影和录像具有声、形、色并茂的特点，它们可以再现自然界和实验室中各种各样的物理现象和变化过程，并可用各种特技手段把教学中所要研究的对象放在突出的位置上。运用它们可以弥补课堂演示实验所受的空间和时间的限制。录像片在放映过程中，可以“定格”，可以“重放”，极有益于教学。使用上述电教工具，呈现在学生面前的毕竟是画面而不是实物，因此不可用它来代替全部的演示实验。在教学中，一般不宜大段时间连续放映录像，教师要选择较为恰当的方式，如采用讲授与播放穿插进行的方式，或采用先播放后讨论总结的方式，或采用先讲原理，指明观察要求，提出一定的思考问题，然后进行播放的方式，等等。

物理复习教学（reviewing in physics teaching）在物理教学中，为帮助学生巩固已学的知识，使已学的物理知识系统化、结构化的一种教学方式。物理复习教学包括平时复习和阶段复习。平时复习是指引入新课时复习必要的预备知识。阶段复习包括单元复习、期末复习和总复



习。通过阶段复习使学生加深对物理知识的理解，明确各部分知识的内在联系，达到融会贯通；同时提高运用知识解决问题的能力。一般讲，物理复习教学主要是指阶段复习。物理复习教学常采用以下几种教学方式：帮助学生进行系统的总结和归纳。在复习时应注意掌握重点概念和主要规律，掌握物理知识的内在联系。例如可用物理知识结构图示帮助学生理清物理知识的体系和脉络。精选例题和练习题，用练习的方式进行复习。选例和选题要有针对性和思考性，有利于对概念、规律的正确理解和应用。在复习时典型的例题和练习题应少而精。切忌“题海战”、“疲劳战”。要引导学生边思考、边练习、边讨论、边复习。在练习讨论过程中，可以不断改变问题的条件，总结分析解决问题的方法，纠正容易出现的错误，提高分析综合能力、说理表达能力和解题技巧。用实验的方式进行复习。通过实验帮助学生巩固和熟习基本的实验技能和对基本仪器的使用。实验还有助于学生加深对物理现象和规律的理解。运用实验进行复习的方式有多种。例如将实验和练习结合起来，将例题或练习中的问题情境用实验的方式给出；或者把重要的演示和学生实验全部陈列出来，每个实验提出若干问题，让学生边做边思考。

物理概念教学 (teaching concepts of physics) 引导学生理解和掌握物理概念所进行的物理教学形式。应体现物理概念的教学规律，是物理教学论的重要研究内容之一。物理概念是某一类物理事物、现象的本质属性在人的头脑中的反映，它是在大量观察、实验，获得感觉、知觉，形成观念的基础上，通过分析、抽象，把一些事物的本质的、共同的特征集中起来加以概括而建立的。

物理概念具有两个主要特点：物理概念是观察、实验和科学思维相结合的产物；物理概念都具有定量的性质。许多物理概念所反映的客观事物的本质属性具有明显定量的性质，即可以用一个可测量的量来表示。如速度、加速度、电场强度、电阻、电压等，这类概念称为物理量。非物理量的物理概念，如机械运动、平衡、熔解等，实际上，它们也具有定量的含义。例如，机械运动表示物体在空间的位置随时间的变动，这就涉及位置坐标与时间的函数关系。又如，熔解是反映物质从固态向液态的转变过程，其特征是：晶体物质在一定压强下的熔解过程具有确定的温度（熔点）；转变前后物质的体积、能量有突变，从而在一定的压强下，测量其熔点、熔解热、体积的变化，可以辨认出不同的物质。可见，非物理量的物理概念也具有定量的含义。

在众多的物理概念中，有为数不多的是最基础、最核心的概念，它们在物理学发展过程中贡献最大，反复出现在许多定律中，并经常运用，而且最有生命力。

由于教学层次不同，在初中、高中、大学物理教学中，总是选取与教学目的相应的一些基本概念作为教学的重点，这就是重点物理概念，要求学生达到“掌握”和“牢固掌握”的程度。而对其它概念，有的要求“理解”，有的只需要“了解”。对于重点和重要的物理概念的具体教学要求是：明确建立概念的事实依据和研究方法；理解物理概念的内涵（所反映的物理现象、过程所特有的本质属性，并用语言文字给予表达，必要的尚需由定性分析进入定量分析，给出它的定义式，即从质和量的两个方面反映物理概念的内涵）；知道物理概念的外延（适用范围和条件）；清楚概

念与相关概念的区别和联系；会运用概念说明、解释有关的物理现象，以及解决一些有关的简单物理问题。

理解和掌握物理概念的过程，包括感知、理解、运用这三个相互联系的阶段，其作用可概括为如下表所示。

认识阶段	知识掌握	能力发展
感知	形成表象、观念	观察、实验能力
理解	建立科学概念	思维能力
运用	巩固、深化、活化概念	分析问题和解决问题能力

物理概念的教学，主要根据上述的特点和要求，以及学生学习中的问题和心理障碍，来确定教学方案。对于重点概念和重要概念的教学，一般的程序是：首先，创设学习物理概念的环境，使学生在有关物理事物、现象中“漫游”，启发、引导学生观察、思考，取得资料，发掘问题；其次，引导学生探索本质，进行思维加工，建立概念，并用准确的、简洁的物理语言或数学语言给概念以确切的表述，并说明概念的适用条件和范围；最后，通过与相关概念的对比，以及进行适当的练习运用，来巩固和深化对概念的理解。

**物理光学** (physical optics) 研究光的本性及其与物质相互作用的光学分支。内容通常包括光的干涉、衍射和偏振，以及光的吸收、散射和色散等。以人们对光的本性的认识为线索，说明光具有波动性，而且是横波。在电磁理论确立后，又认识到光是一种电磁波。其后从光电效应和康普顿效应等实验中人们又进一步认识到，光还显示出粒子性。因此光具有波粒二象性。物理光学通常又称波动光学，而把以光的波粒二象性为理论出发点的物理光学称为量子光学。

**物理规律教学** (teaching laws of physics) 物理规律反映有关物理相互作用和有关物理现象(或过程)中内在的必然关系，通常分别称为定律、定理、原理、方程等。

规律是客观存在的，是不以人的意志为转移的，规律只能发现，不能创造。

发现物理规律的方法，主要有两种：实验归纳法(归纳推理)和理论演绎法(演绎推理)。

实验归纳法，是从对事物、现象(或过程)多次观察、实验出发，在取得大量资料的基础上进行综合、归纳，发现在一定条件下有关物理量之间的必然联系，从而得出结论，或建立假说，再反复通过实验验证。采用这种方法发现的规律，一般叫做定律。如牛顿运动定律、动量守恒定律、机械能守恒定律、万有引力定律、热力学第一定律、库仑定律、欧姆定律、楞次定律、法拉第电磁感应定律、光的反射定律、光的折射定律，等等。

理论演绎法是从已知的规律或物理理论出发，对某特定事物、现象(或过程)进行演绎推理，从而得出在一定范围内有关物理量之间的函数关系或新的论断，最后通过多次实验验证后成为规律。采用这种方法发现的规律，一般叫做定理，或原理。如动量定理、动能定理、动量矩定理、功的原理、光路可逆原理，等等。

应当指出：有些物理规律，特别是带有普遍性的，可以作为其它规律基础的一些规律，并没有给予定律或定理、原理的名称，而以方程、方程组来命名，如运动方程、状态方程、麦克斯韦方程组，等等。

物理规律具有以下几个特点：

(1)物理规律是观察、实验与科学思维、数学推理相结合的产物。例如，牛顿第一定律虽然是以实验事实为基础，但它是实验、思维、推理和想象相结合的产物；牛顿第二定律则是在取得大量实验数据的基础上，经过分析与综合，并利用数学方法总结出来又被实验和生产实践证明无误的客观规律。

(2)物理规律是有关物理概念之间的必然联系。任何一个物理规律，都是由一些概念所组成，都可以用一些数字和测量联系起来，而且是用语言逻辑或数学逻辑来表达概念之间的一定关系。例如，动能定理是把功与动能的变化量联系起来；热力学第一定律是把热量、功与内能的变化量联系起来；克拉珀龙方程则反映了理想气体同一状态中的几个状态参量之间的必然关系。

(3)物理规律具有近似性和局限性。由于物理学所研究的对象和过程，都是采用科学抽象的方法，或多或少对实际的客体和过程作了一定程度简化之后建立的理想模型和理想过程，又由于在观察和实验过程中，限于仪器的精密程度、操作技术的准确程度，不可避免地出现测量误差，因此，反映各物理量之间关系的物理规律，只能在一定精度范围内足够真实但又是近似地反映客观物理世界。物理规律不仅具有近似性，而且由于规律总是在一定范围内发现的，或在一定条件下推理得到，仍在有限范围内检验的，所以规律还具有局限性，即物理规律总是有它的适用范围和适用条件。例如，动量守恒定律，这是自然界中普遍适用的定律，它适用于宏观物体、微观粒子、高速运动、低速运动的情况，然而，研究对象的动量是否守恒仍是有条件的，这个条件就是研究对象所受的合外力必须等于零，或者，合外力远远小于内力（这是一种近似处理，在这种情况下把合外力忽略不计，实际上相当于合外力等于零）。任何物理规律都有其适用范围和适用条件。超越这个范围，真理往往变成谬误。

物理规律教学，主要根据上述的特点，并针对学生学习中的问题和心理障碍，来确定教学方案。物理规律教学的具体要求是：使学生明确发现规律的具体依据，了解所采用的方法、途径；使学生理解规律的物理意义，明确适用范围和条件；通过运用的练习使学生掌握分析问题、解决问题的思路和方法，同时巩固、深化、活化对规律的理解和掌握。

对某一规律的教学，不一定完全按历史上最初的发现过程，究竟采用哪种途径、方法，可根据教学要求、学生原有的基础和存在的弱点、学校设备和条件等来确定。

**物理化学** (physical chemistry) 研究构成物质的原子、分子之间的重新排列和反应变化等化学运动普遍规律的一门学科。是化学的一个分支，也是物理学和化学相互渗透的一门边缘学科。在自然科学发展的过程中，化学和物理学的联系十分紧密。一方面，化学的变化往往伴随着物理变化，如在化学反应中常会发生体积、压力、温度的变化，从而引起热效应、电效应或光效应等；另一方面，物理量的变化又会引起化学变化，如电子的运动状态，分子的转动、振动，分子中原子之间的作用力等微观

运动状态都会直接影响化学元素和化合物的性质及反应能力。物理化学就是从物质的化学现象和物理现象之间的联系，采用化学和物理学的实验手段相结合的方法，去探索化学变化的基本规律。

物理化学的主要内容包括三个部分：化学热力学，研究物质的能量变化与周围其他物质能量变化的关系，变化的方向及变化趋于平衡态的原理；化学动力学，研究化学反应的速度和机理；物质结构，研究物质结构与性质间的内在联系。

化学热力学发展较早，它是从研究蒸汽机开始的。19世纪中叶，随着热力学第一定律和第二定律的确立，发现它可以概括化学现象的若干规律。如判断一个化学反应能否进行，进行到什么程度，外界条件对反应的方向和平衡的位置有什么影响等，可以依据实测的热力学数据，根据热力学予以计算。当前，化学热力学研究的一个重要方面，是把热力学方法推广到不可逆过程。不可逆过程热力学理论已成功地应用于输运现象、化学动力学以及其他物理化学过程。

化学动力学发展也较早，它研究反应进行的快慢、机理、外界条件（温度、压力、浓度、催化剂）对反应速度的影响以及控制反应与副产品的生成等。化学动力学最近开始从微观角度研究反应速度，它运用分子束和激光闪光光解等实验手段，用量子化学计算位能面，定量地研究具有确定初始能态的原子、分子、离子，在反应碰撞中发生能量传递和跃迁等基元过程速率的规律。

物质结构是晚近发展起来的学科分支，它用物理学的理论和实验方法研究物质的结构，从而阐明化学现象的本质和结构与性能之间的关系。

物理化学的任务是把化学领域中各个现象联系起来，对其中的一般规律性予以更深刻、更本质的探讨。例如，在无机化学中，元素周期律起着很大的作用，但只有在物质结构的讨论中才能给周期律的本质以更深刻的揭示。物理化学的研究除了必须遵循一般的科学方法外，还有其特殊的研究方法：即热力学方法、统计力学方法和量子力学方法等。

物理教材（teaching materials in physics）包含中学物理教学基本内容的材料信息系统，包括教科书、教学参考书（指导书）、学生练习册、实验册、视听教学软件（幻灯、投影、录像、电影）和计算机辅助教学软件等。传统意义上的教材仅仅指教学用书面材料系统。教材对学生认知结构的形成和教师教学过程的安排起着知识载体和教学指导的作用。教科书是学生获取物理知识的基本的知识载体，也是教师教学的主要依据。所以教科书是组成教材的主体，其余则是教学辅助材料。习惯上常把教科书称为教材，物理教材的基本要求应和物理教学大纲（课程标准）一致，但每种物理教材由于编者的编写指导思想和原则、教学对象等不同，又有各自的结构、风格和体例。教材结构是教材中物理知识的编排体系和各部分重点内容和方法之间的内在联系框架。例如有的教材以物质、运动和变化、能作为贯穿全书、构筑教材结构框架的主线。教材风格是全书展开物理知识时的表现出的某种特点，也就是教材在阐述物理知识时所特别注意体现的某方面的原则。例如传统的教材风格是物理知识体系的逻辑展开。教材编写体例是教材阐述物理知识的某种模式，也就是教材中每个章节中实验、例题、叙述内容、问题练习乃至阅读材料的编排体例。传统的教材体例基本上是平铺直叙式的。

随着物理课程改革的发展，物理教材结构和风格出现了向多样化方向发展的趋势；出现了体现实验探索、训练科学思维方法的教材，体现物理学和物理学思想方法发展的教材，体现物理学在技术上广泛应用的教材，体现物理学与社会、环境和日常生活各方面广泛联系、强调人文因素的教材。在教材体例上也同样在向多样化的方向发展。某些教材越来越多地把教学方式和方法体现在教材体例中，例如将演示、学生实验、问题、叙述、阅读、练习互相穿插结合，使教科书不仅作为知识载体，而且能更好地起到指导学生学习的作用。此外，在物理课程发展中还出现了各种与教科书配套的非书面文字性教材，例如单概念影片、投影片、录像以及计算机软件。教材形式的多样化是与现代教学手段多样化的发展相一致的。

**物理教学方法**（methods of instruction in teaching physics）为达到规定的物理教学目标，教师和学生在学习过程中所采用的方式、手段或遵循的途径。教学方法的确定是有客观基础的，不能只根据教师的意向来选择。在选择和运用中学物理教学方法时，应注意以下三方面的问题。教学方法不是一成不变的，它随教学手段的改进、教学思想和教学内容的改革而发展变化，也随着对学生的学习规律和特点的不断认识而发展变化。合理适当地选择和运用各种教学方法。教学方法有多种多样，每一类方法都有其特点和效果，但亦有各自的局限性。正确地认识各种教学方法的效能，在教学实践中合理适当选用并将各种方法结合起来运用，这对提高教学质量是十分重要的。而每堂课选用哪种方法，则要根据具体的教学内容和教学要求、学生的特点、学校的环境、条件等因素来确定。教学方法改革的重点在于调动学生学习的主动性和积极性。要研究学生的心理和思维特征，已有的知识、能力基础，学习的一般规律以及不同学生的特点，并以此作为改革的重要依据。

物理教学方法有各种分类。按指导学生获得知识的途径来划分，有口授法、直观法、实践法等；按指导学生掌握知识的程序和方式来划分，有认知法（包括讲述、谈话、观察等使学生感知和获取知识的方法）、复现法（包括练习、实验、复习等使学生再现旧知识的方法）、探讨研究法（使学生在新的情境中获取和运用知识，进行创造性活动的各种方法）等；按教学中某一特点而形象命名的，有悬念法、暗示法、范例法、程序式教学法等。

物理教学方法不仅包括教师的教法，还应包括学生的学法。近十几年来，在学习论和学习心理的研究指导下，学法的研究正日益受到重视。所以，最常用的物理教学方法可归纳为两大类：一是教法。最主要是讲授法。运用得好的讲授法称为有意义的接受学习（meaningful reception learning），它的特点是，依靠教师的语言，辅以演示实验和各种直观教具，启发思维，使学生掌握知识。教师利用实物、挂图、演示实验、电教手段以及生动、形象和具有说服力的语言，清晰、明确地阐述问题，以引导学生的思维活动。

运用得当的讲授法把调动学生感官和思维活动的积极性以及保持学生与教师、教学环境之间相互积极的交流贯穿始终，因此它与学生是教学过程的主体并不矛盾。运用讲授法能有效地提高知识的传授效率，但不利于学生学力的全面发展。所以不能把讲授法作为一种陈旧落后的教学方法加以简单排斥，但要防止只是“照本宣科”满堂灌的教学方式。

二是学法即学习法。学生在教师和教材指导下，独立或半独立地进行学习的方法。典型的学习法有以下几种：程序式学习（programmed instruction）：把学习活动按一定程序分成若干阶段，一般包括明确学习目标，进行学习（阅读教材、做实验、看录像、回答问题等），进行自测，反馈学习等几部分，学生按教材上设计好的顺序一步步地学习。这是一种基本上以自学为主的独立学习方式。单元学习（modular learning）：把学习内容分为若干单元，各单元的学习材料一般包括必需的预备知识，学习目标，学习计划和指导，学习内容，自测题等。各单元的知识内容自我体系，不存在先后学习的次序之分。学生可以根据需要和兴趣选取若干单元学习。单元学习是一种较灵活的半独立学习方式，能适应不同程度和特点的学生的需要，常常作为选修课或扩充教材的教学方式，也适于对学生程度参差不齐的混合班进行教学（mixed ability teaching）。探索式学习（inquiry learning）：这是一种半独立的学习方式，使学习过程成为学生在教师和教材指导下探索知识的过程。教学中首先提出带有探讨性的问题，学生在指导下进行实验、阅读、讨论等学习活动，最后得出结论，必要时对结论作进一步检验。探索式学习的关键是使学生明确探索目标和学习任务，创设问题情景，组织好学习活动，指导学生运用科学方法探索。探索式学习有利于发展学生的基础学力和探索能力，但获取知识的效率较低。探索式学习与发现式学习（discovering learning）不同，后者是一种完全通过学生自由的学习活动来获取知识的过程。发现式学习只向学生提供学习活动所需的材料，但不提出明确的学习任务，学生完全依靠自己的力量来学习和发现知识。实践证明，由于发现法忽视教师和教材在教学过程中的指导作用，因而是失败的。讨论式学习（seminar）：问题讨论法是指教师根据教学内容和目的提出问题，让学生先阅读教材和其他各种资料，进行各种观察和实验，收集资料，提出问题，作好准备，然后围绕若干中心问题进行讨论。准备是独立学习的过程，讨论则是信息交流的过程。在讨论中互相启发和交流，开阔思路，增长知识，增强兴趣。讨论式学习有利于培养学生的独立学习能力和科学态度，尤其适合年级较高、程度较好的学生。问题解决式学习（problemsolving learning）：这是一种半独立的学习方式。整个学习过程通过解决某个典型的实际问题来组织。教学中首先提出一个实际的问题情景并明确最终的目的，在教师和教材指导下，学生通过实验解决实际问题，学习有关的知识科学的方法。这种学习方式大致分为五个阶段：接受暗示；形成问题；提出假说；推论；验证。

以上六种教学方式的比较见下表。其中“ ”号表示那一项的指标强，“+”号表示较强，“ ”号表示一般，“-”号表示较弱，“×”号表示弱。

比较的项目	教学过程的特点				目标达到程度				
	教师指导作用	学习过程自由度	学习情况反馈	教学进度和效率	知识理解	实验能力	运用能力	自学能力	探求能力
计授式		×	-		+	×		×	×
程序式学习	×	×		+			-	×	
单元学习	-	+			-		-	+	×
探索式学习	+	-		×	+				+
讨论式学习	+			×			+		+
问题解决式学习	-		-	×	+				

中学物理教学过程中应根据教学的内容和要求、学生的特点等，将几种教学法合理、恰当地结合使用，以取得最优的教学效果。物理教学方法的多样化有以下优点：能使学生在在学习过程中调动各种感官的作用，从而使感知更加敏锐、有效，有利于提高学生的学习能力。能保证学生充分利用左、右半脑的不同功能，增强记忆并锻炼各种方式的思维活动，易于对知识的理解，有益于发展各种能力。能促进认识活动的积极性，有利于调动学生学习的主动性，为认识能力的全面发展创造条件。

**物理教学过程** (processes of physics teaching) 物理教学的实施过程。学生在物理教师的组织和指导下，积极主动地认识物理世界，掌握物理基本知识，训练基本技能，促进智力、能力和非智力因素的全面发展，形成辩证唯物主义世界观基础并培养良好的道德品质。

物理教学过程存在着三个基本因素，即物理教师、学生和物理世界。这三个因素的基本关系：学生是认识的主体；物理世界及其规律性是被认识的客体；物理教师在引导学生完成对客体的认识过程中起组织和指导作用，整个物理教学过程是通过这三个基本因素间的相互作用实现的。

中学物理教学过程反映了中学物理教学过程中三方面基本因素相互作用的基本规律，揭示了中学物理教学过程中的本质关系，有以下四个基本特点。

(1)认识性的特点：中学物理教学过程是特殊的认识过程，它反映了学生（主体）和物理世界及其规律性（客体）之间的本质关系。由此在整个教学过程中要体现物理环境的重要作用，让学生在物理环境中通过各种活动去学习物理基础知识，受到全面的物理基本训练，要启发学生在学习物理中的主观能动性和实践性。要强调按学生的认知水平和认识规律去组织教学。

(2)双边性的特点：中学物理教学过程是以教和学的统一为特点的。在整个教学过程中，中学生居主体地位，物理教师起主导作用，物理教师的主导作用必须与学生的主动性相结合。学生只有处于主动积极状态，才能真正理解所学物理知识并获得相应的能力。教师的主导作用主要应体现在精心设计教学过程，培养学生学习物理的兴趣和愿望，启发他们自觉地学习知识，为学生创造有利的条件和进行必要的讲解、指导、帮助，使他们在增长知识的同时，逐步养成良好的学习习惯，逐步具备独立获得知识的能力。讲解过多过细，作业过多过重，学生没有独立思考和独立活动的余地，束缚学生的主动性、积极性的发挥，不利于人才培养。

(3)教育性的特点：教学的教育性就是指中学物理教学过程中的思想教育，这种思想教育并不是教条式的说教，而是寓育人于教学之中。和任何教学活动一样，中学物理教学从来不是单纯传授知识的活动。从具体的教学内容、物理学知识体系的方法论基础，到教师的教学观、教学态度和作风，无不给中学生以某种教育影响。特别是可以结合物理教学对中学生进行辩证唯物主义、爱国主义、科学道德观和科学方法论等方面的教育。所以中学物理教学总是结合着育人的。

(4)发展性的特点：是指中学物理教学过程应促进学生的全面发展。现代教学论认为，教学不是单纯传授知识的活动，而是具有发展性的活动，传授知识总是结合着促进人的一般发展的。教育学里的发展，指的是学生



一般心理发展，这不仅包括智力和认知能力的发展，还包括兴趣、情感、意志、个性、技能以及体力等非智力因素的发展。在中学物理教学中，“发展”还应当包括物理学科所特有的一些能力的发展。

**物理教学目标 (objectives of physics teaching)** 物理教学活动所追求的具体预期结果。中学物理教学目标是根据国家教委颁布的中学物理教学大纲，结合不同地区的实际状况确定的。物理教学目标是物理教学过程完成时，要求学生所能完成的任务来表述的。它的基本特征是可操作性。物理教学目标具体反映了中学物理教学所应达到的基本水准，是物理教学过程的具体出发点和归宿，也是检查和评价教学效果的具体依据。

根据教育目标分类学，物理教学目标也可从认知领域、技能领域和情意领域三个方面来表达。国家教委颁布的九年义务教育物理教学大纲(1990年)明确规定了中学物理教学不同层次的目标。在认知方面，教学目标分为知道、理解、掌握三个层次。知道(了解)主要是指对物理现象、物理概念、规律有初步认识，要求能够说出它的要点、大意，在有关的问题中能够识别它们。理解是指对知识有进一步认识，了解知识的确切含义，并能用来分析、解决一些简单的问题，如解释简单的物理现象，进行简单的计算。掌握是指能比较熟练地运用概念和规律，比较灵活地分析、解决一些较简单的综合性问题，包括一些灵活的解释和应用。在技能方面，教学目标分为“初步学会”和“学会”两个层次。“初步学会”是指对观察、操作技能的初步掌握。对要“初步学会”的技能，是指能根据实验目的和规定的器材，按规定的步骤进行观察、操作，并能识别实验中的错误操作。在中学物理实验中，把基本仪器组合起来进行观察、操作、测量等技能，只要求“初步学会”。“学会”是指对观察、操作技能的进一步掌握。对要“学会”的技能，要求能根据实验目的选择实验器材，制定实验步骤，独立进行观察和操作，并能纠正实验中的错误操作。在中学物理实验中，使用单个基本仪器进行观察、操作、测量等的单项技能，要求“学会”。在情意方面，物理教学目标主要包括对学生进行辩证唯物主义和爱国主义的思想教育，进行科学文明意识的教育。情意方面教学目标的实现需要在教学实践中不断充实和提高。

依据国家教委颁布教学大纲中规定的教学目标层次，各不同地区还可制订各部分物理教学较具体和细致的教学目标。

**物理教学目的 (goal of physics teaching)** 对普通教育阶段物理教学基本任务最概括的总体表述。中学物理教学目的是根据普通教育的根本目的，物理学科的特点，结合中学生的心理发展特征而制定的，它对整个中学物理教学过程起着总的主导作用。不同的历史阶段，所确定的中学物理教学目的有所不同。1990年，国家教委颁布的《全日制中学物理教学大纲》修订稿明确规定了中学物理教学的目的是：“中学物理教学必须使学生比较系统地掌握学习现代科学技术和从事社会主义建设需要的物理基础知识，以及这些知识的实际应用，要培养学生的观察、实验能力、思维能力、分析和解决实际问题的能力。在教学中要注意培养学生学习物理的兴趣，要重视科学态度和科学方法的教育，要鼓励独立思考和创造精神，要结合物理教学进行辩证唯物主义教育和爱国主义教育。”

**物理教学心理因素分析 (psychological factors in physics)**

teaching) 从教育心理学角度分析影响物理教学过程的诸关键因素。物理教学活动的基本形式是以课堂教学为主的(实验室教学也是物理课堂教学的一种形式),所以物理教学心理因素分析的基本内容是课堂心理因素分析。它主要包括两个方面。

(1)心理结构。一堂物理课除从教学角度进行分析外,还要从心理角度看是否符合科学,即看课堂心理结构是否合理。这主要是指以下心理过程的要点是否突出,心理因素的运用是否合理。 激发兴趣:一堂物理课必须最大限度地激起学生的学习兴趣,使学生的学习自始至终都在兴趣盎然的情况下进行。中学生对学习物理的动机形成中,好奇心、求知欲和求成欲起着重要作用。因此,在教学中要注意保护和满足学生的好奇心;要把握住不同年级段学生学习物理的动机和兴趣特点。在初中阶段应注意直接兴趣,在高中阶段还应重视间接兴趣的作用。教师应通过各种教学方法和手段(外部诱因)调动学生的学习主动性(内部诱因)。 摄取知识:课堂教学中最重要的心理因素就是感知。感知过程包括感觉、知觉和观察三个阶段。当被动的感知发展到主动的感知时,正是发展兴趣的过程。因此扩大学生的感知量是发展学生兴趣的基础。物理课堂教学要尽可能通过各种方式来扩大学生的物理知识感知量。要充分重视实验的作用和物理知识与生活和社会实际的广泛、紧密联系。要注意运用电化教育等手段来有效地扩大学生的感知量。 理解知识:学生摄取到的知识必须经过理解才能达到对知识的内化。在理解过程中,主要的心理因素是思维。同时,学生兴趣的持久不能仅凭表象的刺激,而要在钻研深思中使学习兴趣不断萌生和延续。所以在物理教学中要培养学生的思维能力,鼓励和引导他们提出问题,使他们养成科学的思维习惯。 巩固知识:遗忘是学习过程中的必然现象,合理的物理课堂教学应该有利于知识的巩固,教师要按照记忆规律进行教学,并加强对科学记忆的指导。 运用知识:掌握知识的根本目的在于运用,在运用中知识得以深化并形成技能、技巧,知识运用的主要心理因素是操作。针对物理教学的特点,操作与练习对于培养学生的动作技能与心智技能具有重要价值,在教学中应予特别的重视。

(2)心理条件。物理课堂教学要注意开创一个好的心理情境。良好的心理情境提供了形成适度动机和情绪的心理条件。这对于充分发挥智力因素的作用最为有利。良好心理情境的形成需要紧张也需要松弛。在教学中应通过开创良好的心理条件来调整学生的学习动机和情绪。在引起和发展兴趣的基础上,要进一步培养学生的情感和意志力。情感比兴趣更加稳定和深刻,情感进一步深化,当它与目标相结合时就可以升华为意志。在教学中努力把兴趣和教师的威信相结合,形成一种包括人的因素在内的情感。学生学习物理过程中,常常会遇到各种困难,这正是培养学生意志力的时机。

物理教学要求(aims of physics teaching) 对普通教育不同阶段物理教学主要任务的表述。中学物理教学要求是根据物理教学总目的,结合不同年龄阶段学生的认知和心理发展特点提出的;反映了物理知识传授和能力培养逐步深化的特点。它也是确定教学内容、选择教学方法的重要依据。国家教委制订的物理教学大纲(1991年修订稿)分别对初中、高中必修课和高中选修课的物理教学提出了如下不同的教学要求:

初中物理教学要求是:以观察、实验为基础,使学生掌握力学、热学、

电学、光学的初步知识以及它们在实际中的应用，要培养学习物理的兴趣和良好的学习习惯。

高中物理必修课教学要求是：着眼于提高学生的文化素质，要使学生较为全面地学到力学、分子物理学和热学、电学、光学、原子物理学的基础知识，教学中要着重引导学生学好基本概念和基本规律及其广泛应用。

高中物理选修课教学要求是：有重点地提高力学和电学知识。

整个高中物理教学中都要注意对学生进行抽象思维的训练，培养分析解决问题的能力，进行科学态度和科学方法的教育。

**物理教学原则** (principles in teaching physics) 物理教学所遵循的基本准则，是物理教师处理教学行为的依据。中学物理教学原则是根据物理教学目的、目标，结合中学物理教学过程而制定的。我国中学物理教学工作者，通过揭示中学物理教学规律，提出的物理教学原则有：

**科学性原则。**基于物理学科的特点，科学性原则应成为指导中学物理教学工作的首位的基本要求。在中学物理教学中，首先要注意教学内容的科学性，无论是物理现象、物理概念和物理规律的描述与表达，还是实验或练习题的内容、数据等，都必须正确无误。但教学内容的科学性，并不意味着对中学物理中的某些概念定义采用一步到位的办法，立即给出在中学学习阶段难以理解的严密科学定义和解释。尤其在初中阶段，在不违背科学性和使学生形成错误观念的前提下，教学应通俗易懂、深入浅出，不宜过分追求严密性。其次要注意教学方法的科学性。在物理教学中，无论是观察、实验的进行，还是分析、推理、抽象、概括方法和数学的运用，都应当按照物理学研究中分析、处理、解决问题的正确方法来进行。

**激发学习兴趣的原则。**引导学生对所学的知识，对所要研究和解决的问题产生浓厚的兴趣和求知欲望，是学生最好的学习内在动机。爱因斯坦说：“爱好是最好的老师。”在中学物理教学中，教师应善于运用物理知识本身的魅力去激发学生求知的兴趣和情感，使学生体会到物理知识有趣、有用。在教学活动中，应不断向学生提出一些他们经过努力能够解决的问题，使他们在积极的探索活动中，开动脑筋，克服困难，在解决问题的过程中，体验到成功的乐趣，从而进一步激发起探索科学真理的热情。

**创设物理环境的原则。**观察和实验是物理学的基础，是物理学研究的主要方法之一。认识物理现象，是学习物理知识的基础和出发点，在中学阶段必须十分重视物理现象观察的教学，强调直观性的原则，使学生在物理环境中通过观察、实验，对物理过程形成清晰而明确的印象，并在生动、具体的感性认识基础上形成概念和规律。

**启发思考、教给方法的原则。**在中学物理教学中，必须注重启发学生思考，自觉地运用物理学的方法组织教学活动。从感性认识进行分析、比较、综合、抽象、概括，上升到理性认识建立概念和规律。这个思维加工过程，必须按物理学的研究方法来进行，例如，研究问题的理想化方法、类比法等。物理学的认识方法必须通过学生的学习方法去反映，使物理教学过程成为引导学生初步运用基本的物理学方法探索、研究问题的过程。运用所学的物理知识来说明现象、分析和解决问题，从“懂”到“会用”，这是学生认识上的第二个飞跃。完成这一飞跃需要教师的引导，这个引导过程主要通过讲解练习、启发学生思考，教给学生如何运用所学知识进行分析、处理问题的方法。

接触实际、联系生活的原则。使物理教学接触实际、联系生活，才能保证所学的知识与它的基础——自然界和社会生活不致脱节，学生掌握的知识才能够运用到实际和生活中去。在物理教学中，接触实际、联系生活的内容很广泛，既包括生产技术实际（这里应突出它所运用的物理原理，不涉及它的技术细节），也包括日常生活中常见的物理现象，还包括与物理有关的其他学科中的问题、社会经济问题（特别是能源、环境等实际问题）。在教学中从这些实际问题、自然现象中引出物理问题，把教学与学生的间接经验和直接经验结合起来，扩大学生的感知量。

因材施教、区别对待的原则。不同学生的智能水平存在着不同程度的差异，在物理教学中由于这种差异而造成的学习水平的差异往往更为明显。在提高学生整体水平的前提下，教学中不宜强求一律，为了使所有学生都能生动活泼地主动学习，应对不同的学生提出不同的要求，使他们都能达到自己应当达到的学习水平。

物理教学中的思想教育（ideological education in physics teaching）教师结合物理内容为培养学生形成正确的思想意识、道德观念而进行的有计划、有组织的教学活动。物理教学中的思想教育主要包括辩证唯物主义与历史唯物主义、爱国主义、科学道德观、科学方法论等方面的教育，还包括端正物理学习目的、树立正确学习态度等方面教育。在物理教学中对学生进行思想教育是社会主义教育方针和教育目标的要求，是物理教师的一项重要任务和进行教书育人的具体体现。物理教学中有目的、恰如其分地注意思想教育，必将有利于引导学生从肩负的责任重视物理课的学习，不断端正学习态度；有利于激励学生接受辩证唯物主义与历史唯物主义的教育，形成正确的思想方法；有利于促进学生了解我国物理学的成就，以启迪爱国主义精神；还有利于鞭策学生进行意志品格以及严谨治学的科学作风的培养。

在物理教学中进行思想教育应很好把握和运用案例分析教育。这种案例分析教育，有的可以拿某一个物理发现作为中心，有的也可以拿某一物理学家为中心对学生进行思想教育。而要很好把握和运用案例分析教育，作为教育者自己就要化力气认真做好案例分析的研究工作。物理发现作为认识过程的分析研究。在物理学发展史上，时至90年代，重大物理发现已多达近千项。当然这些重大物理发现的级别是不同的，有的是揭示整个物理科学的内在规律的；有的是揭示某一物理分支学科的内在规律的；有的是揭示分支学科中某一领域的内在规律的；还有的则是揭示某一新的重大物理事实、重要物理概念等。但是所有这些重大物理发现，作为认识过程，它体现了辩证唯物主义。这些认识过程不仅展现了世界的物质统一性，即唯物主义，而且展现了物质世界之间的联系和发展，即辩证法。重大物理发现认识过程分析研究，最有教育意义的因素便是唯物主义和辩证法的有机结合。用物理教材中的丰富内容来阐明这种结合，十分有利于学生确立正确的自然观和世界观。物理发现作为历史事件的分析研究。物理学是人类历史活动的重要组成部分，重大物理发现作为历史事件，它体现了历史唯物主义。这些历史事件从总的趋势来说是由于存在着一定的内在机制，但它的产生和发展却取决于整个社会、历史的条件，首先取决于社会的物质资料的生产方式，特别是生产力的发展状况。制约这些历史事件产生和发展的，社会生产力是主要因素，但又受物理科学体系本身发展的要

求所制约。广大人民群众的实践是构成这些历史事件产生和发展的总的背景，而物理学家个人的才能、素质则在这个总的背景上起推动、创新、革命的作用。物理发现作为科学活动的分析研究。重大物理发现作为科学活动的组成部分，又体现了科学方法论。从伽利略、库仑、欧姆、卡诺等的科学活动不难看出，物理发现的科学活动有赖于实验、类比、理想模型等方法。而方法论则是人们认识世界、改造世界的方法的理论，方法论在物理发现的科学活动中占有重要的地位，起着愈来愈大的作用。方法论不仅给物理科学研究指明方向，而且能说明物理科学知识的内在机制，引导人们认识物理科学进一步发展的道路。物理发现中失误、失败的分析研究。作为重大物理发现往往是成功的记录，而伴随着每一个成功的发现都有失误、错误、失败。迄今为止，人们对物理发现的案例分析绝大多数都只注意研究成功的事件，而对人们探索中的失误、错误、失败研究得甚少，显然这是不全面的。物理学的探索、发现总是与失误、错误、失败紧密相关的；谨小慎微、人云亦云的“研究者”，固然不会犯错误，但也不会有所发现、有所发明、有所创造；只有从失误、错误、失败中不断总结经验教训，才有希望达到成功的彼岸。而在物理教学中对学生进行辩证唯物主义与历史唯物主义以及科学方法论的教育，往往需要正、反两个方面的史料，这样就更有说服力，更能启迪学生的思想和重视意志的磨炼。物理学家的爱国主义思想的分析研究。尽管科学没有祖国，但是物理学家是有祖国的。国外历代不少物理学家都以他们对物理科学的贡献，而使自己的国家走在世界科学的前列。我国老一辈物理学家的爱国主义精神更为感人。著名物理学家严济慈教授在法国学成后毅然归来，为了支援抗日战争，在条件极端艰苦的大后方山沟里，亲自动手研制当时急需的显微镜，为国家培养光学人才，成为中国光学工业的奠基人。著名物理学家钱三强教授早年也在法国从事研究工作，曾被约里奥—居里夫妇称之为“最优秀的科研人员”。1948年他迫切要求回国的消息传出后，当时国民党政府驻法国大使馆四处制造舆论，威胁恫吓说：“看他能上大陆的岸才怪呢！”但是他回归祖国之志坚如磐石，冲破重重险阻，终于顺利回到了祖国怀抱，为我国原子核物理学和原子能工业的发展作出了卓越的贡献。类似这方面的事例很多，因为我国的物理学工作者有着光荣的爱国主义传统，特别是近代以来，我国物理学家当中，有许多动人的爱国主义事迹。结合物理教学，有机地渗入这些事迹，是对学生进行爱国主义教育的极好教材。物理学家的哲学思想的分析研究。物理学与哲学有着密切的关系，物理学强烈地影响着每一时代的哲学思想，而历史上哲学作用于物理学又是十分明显的。牛顿建立经典力学，奥斯特发现电流磁效应，迈尔确立能量守恒与转化定律，法拉第发现电磁感应，马赫对牛顿力学的成功批判，都是由于哲学思想的指导而起了促进作用。物理学家蔑视哲学是可悲的，但哲学只是为物理学提供最一般的世界观和方法论，用哲学来代替物理学也是错误的。物理学家的伦理思想的分析研究。把培根的科学目的论、布鲁诺的科学英雄观、富兰克林的《道德准则》、麦克斯韦的《就职演说》、卢瑟福的同行道德论述、爱因斯坦的科技伦理思想等作为案例进行分析研究，可以看出，与科学道德观密切相关的物理学家的伦理思想是随着科学技术的产生、发展而逐步发展和丰富起来的。从古代到现代的许多物理学家在从事物理科学研究的同时，也对科技伦理思想作了精辟的思考和阐发，为我

们留下了许多宝贵的思想资料。研究和介绍这些科技伦理思想，无论是对于理解科学道德观和掌握科学道德规范，还是对于加强科学道德的建设和学生的思想道德修养，都是很有必要的。物理学家的道德品质的分析研究。在经典物理学时期，伽利略、牛顿、法拉第、麦克斯韦这四位物理学家不仅他们的作用显得特别巨大，而且他们的道德品质也十分高尚。献身科学，探索真理，造福人类是他们研究物理学的共同道德理想，也是他们在研究途中战胜困难的重要力量。如伽利略曾说过：“追求科学需要特殊的勇敢。”他是一个具有坚强信念和超常勇气的人物，对教会神学、经院哲学深恶痛绝，竭力反对任何仅仅根据“权威”而产生的教条，只承认实验和周密的思考才是真理的标准。他挺身而出，甘冒鞭打、判刑、处决的危险，为发展物理科学而作出了卓越的贡献。不少物理学家深刻懂得一个人对于社会的价值，首先取决于他的思想和行为对增进人类利益的大小。他们厌恶金钱、名誉，也鄙视地位和权势。在这方面，法拉第尤其值得称颂。早在青年时，他为了科学研究拒绝了法院以每年两万五千金元的优厚待遇让他搞技术鉴定的请求，却宁愿每年只拿五百金元的微薄报酬继续当实验员。到了中年，他的社会地位大为提高，但为了使自己的全部精力都投入科学研究，他拒绝了所有的午宴和晚宴的请柬，甚至决定在一周内三天不接待任何客人。直至晚年，他先后谢绝封他为爵士的建议和请他出任皇家学会会长的推荐，感情十分真挚地说：“我决心一辈子当一个平凡的迈克尔·法拉第。”物理学的探索是一项相当复杂的脑力劳动，只有专心致志，长期勤奋，才会有所成效。牛顿为什么会有这样杰出的科学成就呢？有人认为这完全是他天资聪明，可是牛顿自己并不同意这种看法。他说：“我只是对一件事情很长时间、很热心地去考虑罢了！”这句话表明，牛顿是“勤奋”两字的最好实践者。他深明勤奋的意义和价值，更为后人留下了勤奋的记录和业迹。物理学的研究又是继承性、创造性很强的工作，要推动物理学的前进，就要虚心求师。比法拉第小40岁的麦克斯韦就善于吸取前辈的智慧。他深信法拉第的电磁学说中包含着真理，以致下这样的决心：“在没有首先读透法拉第的《电学实验研究》之前，不读电学方面的数学著作。”这对于一个专攻理论的大学毕业生来说，实在是异乎寻常的做法。然而为了要抓住前辈物理学家法拉第的思想和方法，这又是唯一正确的做法。在这基础上，麦克斯韦不迷信权威和传统观念，大胆提出了位移电流的假说，在电磁学研究领域进行新的探索，导致了电磁场方程组的问世。

**物理课程 (curriculum of physics)** 各类各级中学内所设置的各门物理课的一系列体系，它包括适应不同年龄阶段（初中、高中）和不同教学对象（不同智能发展水平以及不同发展方向的学生）的各门物理必修和选修课。中学教育的目的与任务，主要是通过学校设置的课程和教材的教学来实现的。各类各级学校设置哪些课程系列（“教学计划”或“学校课程标准”），物理课程的目的、内容、方法、基本要求如何（“教学大纲”或“学科课程标准”），不应由某些人的主观意志或经验随意决定，而应有一定的教育、教学理论基础，反映一定的社会要求和历史色彩。课程论就是一门专门研究学校课程设置的目的是、体系、沿革、内外联系的规律和课程分析、评价发展的学科。中学物理课程研究就是根据课程论的原则和方法来研究中学物理课程结构、沿革、分析、发展和评价中的有关问

题。物理课程和教材理论的中心问题，是研究如何使学生在教学过程中有效地掌握物理学知识的精华，同时获得探索新知识、创造新经验的基本能力和品质。

根据课程论的基本理论，中学物理课程内容的选取必须遵循以下基本原则：基础性的原则。即精选作为一个受过普通教育公民进一步学习和参加现代化建设所必须具有的最基础、最常用的物理知识。联系实际的原则。即选取与实际联系的物理知识。这包括物理在技术上的应用，也包括现代日常生活和社会生活中常见的物理现象和问题，例如交通、通讯、材料、能源和环境保护等。教育性的原则。选取的课程内容要体现物理教学过程教育性和发展性的特点，使学生在在学习物理知识的同时受到正确的思想教育和科学文明意识，科学自然观的教育。适应性原则。要从大多数学生的认知发展水平和接受能力的实际出发，确定必修物理课程教学内容的深广度。教学内容的选取要给教师以较大的适应性与灵活性，以利学生积极主动、生动活泼地学习。

**物理课外活动** (extra curriculum activities of physics) 课程以外由学生自愿参加的物理教学活动，是中学物理教学活动中一个重要的环节。物理课外活动可以增加学生对物理学科的兴趣，能够联系实际加深学生对物理知识的理解，从各个领域开阔学生的知识面。物理课外活动还可以培养学生在各方面的活动能力，例如：观察事物和分析事物的能力，动手制作的能力，独立解决问题的能力，创造能力等等。物理课外活动有以下一些类型：**观察活动**。根据物理课程的进度，布置一些观察作业。例如学习过“磁场”后，让学生用小磁针判别冰箱门磁封条极性。还可以通过观察培养学生估测能力，例如让学生估测两电线杆之间的距离，汽车和自行车一般行驶的速度等。**课外实验**。包括家庭实验和室外实验。家庭实验是利用家中常备的物品一个人就可以做的小实验。如测量细铁丝的直径等。室外实验一般需要几个人配合来做，如测量声音在空气中传播的速度。**小制作**。一般取材料易找、工具简单而又有实用价值的项目，如制作小杆秤、比重计、蜂鸣器、小电动机等。**物理游戏或物理游艺会**。陈列一系列引人入胜、使学生兴趣盎然的趣味物理实验和根据物理原理制作的游戏和小魔术。让学生动手试，动脑想。物理游艺会可由高年级同学在教师指导下组织、安排，让较低年级的同学参加活动。**科技小组活动**。可组织各种形式的科技小组活动，如航模或电子技术制作小组，在教师指导下改进、设计、制作演示教具和学生实验仪器的教具小组，以及维修服务小组等。**物理竞赛活动**。组织学生参加地区和全国范围的物理竞赛。在校内还可组织多种形式的竞赛活动，如实验操作竞赛、集体抢答竞赛、用物理知识解决实际问题的竞赛等。**小型课题研究**。结合物理课程中学习的某方面知识，选取某个专题和物理现象，设计实验方案进行研究。**参观**。如参观工厂、大学物理实验室、研究所、科学宫等。参观前应拟订参观提纲，要求学生重点观察。参观活动有助于学生接触社会、开阔视野。**讲座**。由本校物理教师或有关专家、大学教师举办一些小型系列专题讲座。

**物理量** (physical quantity) 描述物质的属性和确定其运动状态时所用的各种量值。由于物理学从本质上说是一门实验科学，因此进行实验观测就离不开各种物理量的测量。而各种物理量又通过描述自然规律

的各种定律及新物理量的定义而彼此相互联系，任一物理量则给出被定义量与有关量之间的关系。

物理量包括基本量和导出量。人们最早在力学的研究中，形成了长度(L)、质量(M)、时间(T) 3个基本量，随着电磁学、热力学、光辐射学和微观物理学的发展，基本量逐渐由3个扩展到7个，即增加了电流强度(I)、温度( )、物质的量(N)、发光强度(J)。

各种物理量都有它们的量度单位，由选定的基本单位和它们的导出单位组成的一系列量度单位，称为单位制。与物理量形成相对应，最早建立起来的是厘米·克·秒制(又称CGS制)，接着是米·千克·秒制(又称MKS制)，时至1960年又确认了国际单位制(简称SI制)。目前绝大部分工业发达国家都积极推广SI制。

在SI制中，又分成基本单位、导出单位和辅助单位三类。基本单位包括：长度单位——米(m)，质量单位——千克(kg)，时间单位——秒(s)，电流强度单位——安培(A)，热力学温度单位——开尔文(K)，物质的量单位——摩尔(mol)，发光强度单位——坎德拉(cd)。导出单位包括：频率的单位——赫兹(Hz)，力的单位——牛顿(N)，压力单位——帕斯卡(Pa)，能或功的单位——焦耳(J)，功率单位——瓦特(W)，电量单位——库仑(C)，电位差和电动势单位——伏特(V)，电容单位——法拉(F)，电阻单位( )，电导单位——西门子(S)，电感单位——亨利(H)，磁通量单位——韦伯(Wb)，磁感应强度或磁通密度单位——特斯拉(T)，光通量单位——流明(lm)，光照度单位——勒克斯(lx)，放射性活度单位——贝可勒尔(Bq)，吸收剂量单位——戈端(Gy)。辅助单位仅有两个：弧度(rad)，球面速(sr)。

当一个单位制的基本量确定后，导出量与基本量之间还存在一定的幂次关系，称为量纲。通过一个物理量Q的量纲式可表示为

$$[Q]=L^a M^b T^c I^d N^e J^f$$

其中 a、b、c、d、e 和 f 分别称为物理量Q对L、M、T、I、N、和J的量纲。于是速度可用 $LT^{-1}$ 表示，它对长度的量纲是1，对质量的量纲是0，对时间的量纲是-1，量纲式记为 $[v]=LT^{-1}$ 。力可用 $LMT^{-2}$ 表示，它对长度、质量、时间的量纲分别是1、1、-2，量纲式记为 $[F]=LMT^{-2}$ 。

量纲的引入，不仅揭示了导出量与基本量的关系，而且为单位的换算提供了方便。如力学中常用的CGS制和MKS制的基本量相同，但基本量的单位不同：CGS制的基本量单位为厘米(cm)、克(g)和秒(s)；MKS制的基本量单位为米(m)、千克(kg)和秒(s)。则由力的量纲式 $[F]=LMT^{-2}$ 可知，从CGS制变换到MKS制时，因基本量L和M的单位分别增为 $10^2$ 和 $10^3$ 倍，故MKS制中力的单位牛顿应为CGS制中的力的单位达因的 $10^5$ 倍。量纲的引入，还为探索和检验物理问题的解提供了依据。如地面上自由下落h米的物体的速度v与高度h、重力加速度g的关系可设为 $v=Kg^\alpha h^\beta$ ，式中K是没有量纲的常数。根据量纲法则，等式两边量纲必须相同，故有

$$[v]=[g] [h],$$
$$\text{即 } LT^{-1}=L^\alpha T^{-2} L^\beta,$$

$$\text{所以 } \alpha = \frac{1}{2},$$

即 $v = K\sqrt{gh}$ ，这与正确公式 $v = \sqrt{2gh}$ 是一致的。由此可见，从研究一



个过程中各个物理量的量纲及其间的关系，可以推导出必须加于这些物理量的某些限制，从而在解决一些较为复杂的动力学问题或在确定一些物理关系式中有着较广泛的应用。

**物理实验 (experiment in physics)** 物理学最基本的一种研究方法，是对客观的物理运动，包括天然的物理运动和模拟的物理运动进行实验研究。利用天然物理现象进行实验是最原始、历史最悠久的物理学实验方法。古代的光学理论基本上来源于天然光现象的实验；经典力学的产生和发展是与对行星运动深入细致的实验观察密切相关的；早期对电和磁的认识，也是来源于对天然电现象和天然磁现象的实验研究。在经典物理学初期的研究工作中，天然物理现象的实验研究占有很大的比重。在生产水平比较高的现代，天然物理现象的实验研究仍有不可忽视的作用。例如，有关引力波的实验必须着眼于宇宙空间这个庞大的“实验室”。高能物理的实验研究，除了借助于高能加速器进行外，还可利用乳胶室对宇宙射线直接进行研究。

模拟物理实验的对象是人为的或人工控制的，可以根据研究的需要，抓住关键，排除干扰，使研究的问题更加集中，更加典型。例如用真空的玻璃管演示自由落体实验，可使其物理本质充分地表现出来；又如电磁实验中的电屏蔽和磁屏蔽，目的都在于排除干扰。模拟物理现象的实验研究能主动掌握实验的时间、地点、周期，可以反复观测。例如菲索用旋转齿轮，实现了人为控制的光速测定实验。傅科用旋转镜测定光速，使光程缩短到几米。这些实验都比利用天文观测光速优越，如果在实验中发现新现象，总要再次重复实验并作进一步的研究，例如新基本粒子的发现，模拟物理实验能方便地重现这些现象。从物理学产生时起，它的研究对象就不局限于天然物理现象，随着物理学的发展，实验研究会越来越多地依赖于模拟物理现象。

**物理实验教学 (instruction of physical experiments)** 在物理教学中运用实验给学生学习物理创造一个基本环境，使学生主动获取物理知识、发展能力，以促进科学品质和辩证唯物主义世界观的形成的教学。

中学物理实验教学有如下功能：

(1) 实验能为学生提供认识物理规律的基础。在学习物理过程中，要形成物理概念和认识物理规律，首先要有一定的感性认识。这种感性认识可以来源于学生的生活环境，也可以来源于实验提供的物理事实。通常，从生活中得到的感性材料多来自复杂的运动形态，有时各种现象交织在一起，本质、非本质的因素交融在一起。因此，仅通过这种途径来使学生建立概念和认识规律，有时会遇到很大困难。运用实验则可以提供经过精心选择的、简化和纯化的素材，它能够使学生对物理事实获得明确、具体的认识，就易于理解和掌握有关概念。

(2) 实验能培养学生学习物理的兴趣，激发学生的求知愿望。实验具有真实、形象、生动的特点，实验现象常常出乎学生的意料之外，引起他们的兴趣和好奇，激发求知欲望。

由于实验是一种有目的的操作行为，学生在观察的基础上，会产生一种自己操作的欲望。让学生动手实验，不但可以满足他们的愿望，还可以发展学生对探究知识和规律的兴趣，进而发展学生的认识兴趣。

(3)实验是发展学生能力和使学生得到科学方法训练的重要途径。实验中通过阅读实验资料,培养了阅读、自学能力;通过观察现象、读取数据,这些信息传递到大脑,一方面进行思维加工,一方面输出反馈信息,控制观察和操作器,以获取更为广泛和深入的信息,在这过程中培养了观察能力和手脑并用的能力,同时加强了思维能力的培养。此外,把思维加工的结果以语言和文字的形式表达出来,又培养了表达能力。所以,实验是一种综合的能力培养过程。

由于实验本身是一种科学的方法,它能创造“最确切、最少受干扰”、“保证过程以其纯粹形态”进行的物理环境,它是理论联系实际的学习过程,也是能活化学生学到的物理知识的过程,因此,实验是对学生进行创造意识训练和科学方法训练的有效途径。

(4)实验有利于培养学生良好的道德素养和科学态度。实验本身应是一个严格的科学过程,要想获得实验的成功,必须一丝不苟。实验操作步骤必须清晰有条理;现象描述、数据记录必须符合客观事实;对产生误差的原因分析也必须实事求是、恰如其分。这些对培养学生的科学品质和严谨的科学作风十分有益,对学生科学世界观的形成起着促进的作用,对于提高学生的素质具有很大意义。

物理实验教学的这些功能不论在以教师为主的演示实验中,还是在学生并组实验或学生分组实验中,都应有不同程度的体现。

**物理实验室的进化 (evolution of physical laboratory)** 指物理实验室的发展变化的一般概况。在古代或中世纪没有从事物理学研究的实验室。自伽利略开创实验科学以来,出现了实验物理学家,也就意味着物理实验室开始应运而生。但那时的物理实验室通常是实验物理学家的住家或房间的一部分组成的私人实验室。换句话说,19世纪以前的物理实验室仅仅是为个别研究者的创造性研究而存在,它们很少在初等或高等物理教学中起作用。

19世纪30年代起,在欧洲的一些大学里出现了早期的教学用物理实验室。如马格努斯在柏林大学工作时,就在他的寓所分出几间房子作物理实验的教学用。在他指导下进行物理实验的最有成就的有维德曼、亥姆霍兹、丁铎尔等。但是随着学生数量的增加,这种教学用物理实验室就变得愈来愈不适用了。到了19世纪40年代,在一些大学里建立起学生用的物理实验室。如开尔文在格拉斯哥大学工作时,他用旧的大学楼里一间已废弃的酒窖,作为学生用物理实验室。在开尔文指导下的学生用实验室里的工作多半是创造性研究:“他们(指学生)的兴趣被激发起来了,他们因他们跟这个地方的指导人的经常交往来保持活跃的气氛,并且他们的热情是这样大,以致……人们早已知道实验军团(这是习惯的称呼)把自己分成两个班——一个班在白天工作,另一个班在晚上工作,一连工作几个星期,这样工作从不停顿。”在教学用、学生用物理实验室形成发展的同时,对于为物理实验研究而建立的国家实验室也在形成发展。英国伦敦皇家研究院的阶梯式讲堂、模型房屋和工场都是在1800年建立的。法国科学院是在一座老修道院中建成的,在物理实验研究方面是由于购置属于查理的“物理陈列室”的东西而开始的,并于1829年确立了物理学讲座。德国帝国研究院则由西门子于1884年的捐赠后,建造了一座新的包含物理实验用的大楼,并于1888年由亥姆霍兹任院长。在20世纪初美国标准局建立,它拥

有 10 多幢大楼，作为国家的物理实验室，在理论和应用的物理学和化学的广阔领域里进行度量和研究。

**物理试卷的编制 (editing test paper)** 科学地编制物理试卷的程序和方法。物理试卷的编制，一般分为以下几个步骤。

(1) 确定测试的目的和目标。编制测试卷，首先必须明确测试目的，是属于标准参照测验，还是属于常模参照测验；其次根据大纲确定知识内容、取样范围和相应的学习水平作为目标。在中学物理学习中，认知领域各层次的学习水平目标含义如下：  
 识记：能正确回忆和再现学过的知识，表征记忆力和简单模仿的能力。  
 理解：能初步领会所学知识（包括实验原理）的主要特征，并能对观察到的现象作出正确的解释，表征具有一定程度的观察能力和思维能力。  
 简单运用：能直接运用所学知识说明、解释简单现象，解决简单的实际问题。表征初步的分析问题、解决问题的能力。

综合和灵活运用：能运用所学知识和技能解决较为综合性的问题和情景较新（问题情景对学生讲是陌生的）的问题，能综合运用思维能力、实验观察能力等来分析和解决某些较灵活的问题。

(2) 确定试题的形式和考查方式。即确定客观型试题和主观型试题的比重，具体采用哪些类型试题。试题形式的确定一般取决于测试知识内容的覆盖面和所要测试的各种能力。如果要求测试的知识内容覆盖面宽，就要选用相当数量的客观性试题，以保证试卷的效度；如果要测试一些较高层次的行为目标，就必须选取不同类型的主观性试题。在终结性考试和会考、入学等考试中，应对所采用题型及各种题型的百分比作出较明确的规定。物理测试一般有笔试、实验和课题研究几种形式。笔试只能测试认知领域的教学目标；实验测试能测试实验操作技能，也能测试认知能力；课题研究能测试较高水平的综合能力，一般适合较高水准的选修课考试。书面形式的模拟实验题并不能真正考查实验操作技巧，而只能测试与实验内容有关的认知能力。

(3) 制订编题计划。制订编题计划，即测验的双向细目表，是编制试卷的重要环节。双向细目表的横行是知识取样范围，纵列是行为目标，在表中相应部位填入试题形式（可用不同字母符号表示）、难易程度（一般分为容易、中等、困难三等，分别用 E、M、D 表示）以及该题的满分值。表中横行的  $\Sigma\%$  表示不同知识内容的试题在整卷中所占百分比，表中纵行的  $\Sigma\%$  表示不同学习水平行为目标的试题在整卷中占的百分比。中等难度的题应占一半以上。

题型、难易程度、得分、取样范围	行为目标	记忆 (含识别)	理解	简单运用	综合和灵活运用	%
%						

(4)编选题目。根据所制订的编题计划编选题目。在编选题目时，要充分考虑测试是标准参照的还是常模参照的。题目可以编写，也可以从存题中选用。编选题目的数量，最好超越所需题量的2~3倍，以供筛选。编制题目后，要经过试用或试做，每题的难度要进行估计，可根据该题能够通过人数占总人数的百分比来表示。

(5)集合成测验试卷。编排测验试题的顺序要合理，一般应由易到难，以减少被测者的精神压力，提高测验的可靠性。

**物理试题类型** (types of questions) 按物理试题解答结果的限定程度对试题进行分类。物理试题的类型一般分为两类；客观性试题和主观性试题。

**客观性试题** (objective question) 也称固定应答型试题，它的解答只可能有正确和错误两种情况。各种选择题、填空题、是非题都属于客观性试题。客观性试题计分简单，可靠。每题测试的知识内容较单一，一定数量的客观性试题可以保证整卷的知识覆盖面。客观性试题一般以测试识记、理解为主，包括简单应用的行为目标，但不能测试较高层次的行为目标和有条理的分析、表述能力，尤其是是非题和选择题存在盲目得分的可能，而且选择题的命题难度较大。

**主观性试题** (subjective question) 也称自由应答型试题。由学生提供的解答形式不是严格地唯一限定的，在较大程度上受应试者思维能力、语言习惯和表达能力、方式的影响。各种论证题、计算题、论述题等均属于主观性试题，它主要测试应试者理解、应用知识的能力。主观性试题也可以是开放式的，即要求应试者完全自由地对信息进行分析、评价和研究，提出自己的观点和创见。开放式问题可测试更高层次的行为目标和独立思考、创造能力。主观性试题可测试客观性试题无法测试的较高层次的能力以及书面表述能力，但在考试容量一定的前提下，知识内容的取样面小，评分带有一定的主观性，从而影响结果的可靠性，而且阅卷效率低。

**物理天平** (physical balance) 量度物体质量的仪器。采用比较法实现称衡，即待测物质量与已知质量的砝码进行比较，并用指针和刻度板显示天平是否平衡。当指针指在刻度板的中间“0”刻度线上时，称为天平平衡，因为天平在未称衡物体前，已调节到平衡状态，因此平衡时，天平两盘的质量（包括游码）应该相等。天平指针的刻度板中最小分度表示天平的感量，即指针偏离平衡位置一分度时，两盘间的质量差，称为天平的感量，也是天平的准确度。

天平的原理就是杠杆平衡的原理。但当杠杆平衡时，杠杆的重心越低，于支点，杠杆越不易转动或振动频率变高，杠杆的重心越高，但不高于支点时，杠杆越易转动或者振动频率变低，但最后杠杆将处于平衡状态，即静止下来。当杠杆的重心高于支点时，杠杆将处于不稳平衡。当重心正好与支点重合时，杠杆处于随遇平衡状态。显然后两种平衡不适合天平的平衡。但天平重心位置改变时，会影响天平的感量，所以天平指针杆上有一颗小重物，根据需要可固定在指针的某一位置上，使天平的感量符合设计要求，调节到仪器的标称值。由于天平横梁的结构和强度的需要，其转动惯量远远大于“重物”在任何位置的转动惯量，因此调节标称值时，天平的振动周期几乎没有明显的变化。

天平空载时平衡，指针应指在“0”刻度线的位置上，但由于横臂两边的质量大小及分布不能做到完全相等，所以在两边的最外端设置调节平衡的螺丝杆和螺母，螺母可在丝杆中左右移动改变转动惯量，以达到空载时的平衡。

天平称衡时，两盘都受到重力，因此天平柱应该严格垂直于地球的水平面，才能保证两盘物体的质量相等，用砝码质量之和表示待测物的质量。天平柱上的横梁支点和平衡指示刻度线的0刻度线是天平柱的中心线。不垂直地面时，由于天平附加力矩的参与使待测物的质量不能真正等于砝码（包括游码）的质量和，所以在天平座上设水平仪，以保证天平柱处于垂直位置。

天平的砝码要定时计量和校准，计量要求是，砝码质量的最后位数不大于天平感量的十分之几。由于砝码的精确度要求很高，所以任何影响砝码精确度的因素都要有效地去掉，例如腐蚀性气体、液体不要与砝码接触，周围环境保持清洁干燥等。

天平的最大称量就是砝码的总重量。在物理实验中用来测量物体质量的天平，总重量一般是200克、500克和1000克三种，感量分别20mg、50mg和100mg。这些天平已满足大多数物理实验的质量称衡要求，因此用以上称衡的天平，习惯上被称为物理天平。

**物理学 (physics)** 物理学是自然科学中的一个非常重要，也是非常基础的学科。它所研究的是物质的基本性质及其最一般的运动规律，以及物质的基本结构和基本相互作用等。迄今人们已经能够在很宽的空间尺度范围（约 $10^{16}$ 米~ $10^{28}$ 米）和时间尺度范围（约 $10^{24}$ 秒~ $10^{18}$ 秒）内对自然界进行观察或实验研究，这也是物理学研究领域所涉及的时空尺度范围。

根据所研究的物质运动形态和具体对象的不同，通常又可将物理学分为力学、热学和分子物理学、电磁学、光学、原子物理学、原子核物理学、量子力学、量子场理论等。这种分类并不十分固定，常常随着科学的发展不断变化。人们常常通过研究发现，原来所认识的属于不同物理学分类领域的学科具有统一的规律性，从而产生学科的综合。例如英国物理学家牛顿将开普勒的天体运动定律及关于自由落体等地面上的力学定律进行了综合，并建立了牛顿力学（1687）；奥斯特的电流磁效应（1820）和法拉第的电磁感应现象（1832）的发现使英国物理学家麦克斯韦最终建立了统一的电磁理论（1864），这个理论还包括了光学。光是一种电磁波，光学的一切规律都可以从这个电磁理论中导出。另一方面，物理学中的许多分支又常常成为生长点，逐渐形成了许多新的学科和新的应用领域。例如从力学产生了流体力学、弹性力学、声学等；力学与固体物理学的结合产生了材料科学；从热力学产生了热工学和热机学；从电磁学产生了电工学和电子学等；从光学和原子物理学产生了光谱学、激光技术、非线性光学等。此外，半导体物理学、凝聚态物理学（如超导和超流等）、原子能技术等许多新的学科领域可以说都是从物理学中产生和发展起来的。

以普朗克建立量子论（1900）为标志，可将物理学的发展大致分为两个阶段。在此以前所建立的物理学称为经典物理学；在此以后便发展成为量子物理学，其中包括以牛顿力学为基础发展起来的量子力学以及后来由量子力学和经典电磁场理论发展而来的量子场理论。经典物理学和量子物

理学的主要区别在于，后者考虑了物质粒子的波动性以及波场的量子性，而粒子的波动性（德布罗意波）和电磁场的粒子性（光子）已为大量的精确实验所证实。但是由于德布罗意波的波长与粒子的动量成反比，且比例系数（即普朗克常数  $h$ ）又极小，所以对于通常的宏观物体（其动量的值与  $h$  的值相比是一个极大的数）来说，其德布罗意波长极短，可以看作为零而被忽略。所以经典物理学是量子物理学在实物粒子的波动性和场的粒子性可以忽略情况下的一种近似理论，在宏观（线度大于  $10^{-8}\text{cm}$ ）现象中仍然是一个好的理论，但是在微观现象中必须应用量子理论。

由于物理学研究的是物质运动的最基本的性质和最一般的运动规律，因此它对所有其他自然科学领域，如化学、生物学、地学、天文学，以及其他领域如心理学、经济学、数学等某些方面的发展已经产生并还将继续产生深远的影响。实际上，物理学原文出于希腊文 physics，意即自然哲学。而现代科学大多是从自然哲学中产生的。物理学在自然科学中的这个地位也决定了它在人类社会中所起的重要作用。16~17 世纪关于力学和热学的研究诱发了“工业革命”；19 世纪电磁学的建立和发展使人类社会进入了“电气化时代”；20 世纪以来，以相对论和量子理论为标志的物理学的进一步发展则以更大规模更快速度促进了人类社会的科学技术、工农业生产以及日常生活和工作方式的变革和进步。

**物理学革命 (physics revolution)** 指 19 世纪末 20 世纪初的物理学领域的新发现使物理学发展经历了一场深刻的变革。在 19 世纪末，尽管物理学仍带有经典和保守的色彩，不少人却认为至此物理学的大厦已经建成，今后不会再有什么惊人的新发现了，物理学家的工作就是把物理常数的测量弄得再精确一些，或者把几个明显的空隙再填充一些。可是恰在这时，物理学领域出现了一系列新发现，它们用以往的理论是无法解释的，使经典物理学陷入了危机，导致了物理学发展中的革命性变化，从而揭开了现代物理学发展的序幕。

**X 射线的发现** 1895 年 11 月 8 日，德国维尔茨堡大学物理学教授兼校长伦琴正在研究阴极射线。为了避免紫外线与可见光的影响，他将放电管的周围用黑纸板遮挡住。但意外地发现：放在管子附近的涂有亚铂氧化钡的纸上却闪耀着青绿色的光芒。这使伦琴非常惊奇，因为他知道阴极射线只能穿透几厘米空气，不可能使一米以外的荧光屏发光。伦琴通过反复观察，并用一些东西放在放电管与荧光屏之间来进行试验，结果是在二米距离以内都有荧光发生。这说明放电管能发出一种眼睛看不见的、有很大贯穿能力的特殊辐射，伦琴就称这种辐射为 X 射线。

伦琴关于 X 射线的发现，随着他第一篇报告的发表，立即轰动了全世界，引起各国科技界的强烈反应和广泛注意。X 射线的发现，打破了物理学的发展趋于停滞的局面，预示了物理学还有许多未知领域，激励人们进行新的探索，仅在 1896 年一年之内，关于 X 射线的小册子就出版了 48 种之多，研究论文达一千多篇。这是大量物理新发现的开始，许多具有根本意义的物理发现接踵而来，所以我们说 X 射线的发现揭开了物理学革命的序幕。

**电子的发现** X 射线的发现，推动了阴极射线本质的研究。1897 年 1 月间，维歇特利用电容器的振荡周期测得阴极射线的速度约为光速的  $1/10$ ；利用磁场中的偏转测得  $e/m$  约等于电解液中氢离子的比值的 2000 至 4000

倍。7 月间，考夫曼发表了实验报告，他从电极间的电位差与磁场中的偏转，求得了阴极射线粒子的能量。就在此期间，J.J. 汤姆孙先是大胆地提出了一个假说，认为阴极射线是比原子、分子轻得多的带负电荷的粒子的高速运动。不久在卡文迪什实验室根据这个假说安排了实验，发现在高度真空下，阴极射线不但能为磁场所偏转也能为电场所偏转，显示了它是一种带电的粒子流。接着他用云室法和磁偏转法证明了阴极射线粒子的电荷与氢离子的电荷大小相等、符号相反，质量约为氢离子的  $1/2000$ 。J.J. 汤姆孙把这些粒子借用斯通尼的称呼，称为电子。

**电子的发现** 是物理学革命中的又一内容。它表现人类认识物质结构的深化，那种认为原子是构成物质的不可分割的最小单元的传统概念已不复成立；它也标志着物理学的研究由宏观低速的领域进入到一个微观高速的崭新领域；电子及其独特的属性——具有电磁质量、自旋、磁矩和波动性等又以不可抗拒的力量迫使物理学思想发生革命。

**放射性的发现** 1896 年 2 月，贝克勒耳用荧光物质（其中有一种重金属铀的黄色盐）作实验，以观察 X 射线的性质，此时他无意间将一小块铀盐遗留在暗橱里的一张底片上。几天以后，他准备再做实验，就把底片从橱中拿出来。为了检查底片是否可用，便预先冲洗一张。结果发现：照相底片上出现有明显的铀盐包的像。底片的感光显然与日晒和荧光都无关。他推断，感光的真实原因必定是铀盐自身发出了一种射线，该射线可以穿透黑纸或其它不透光的物质而对照相底片发生影响。这一重大发现，立即引起了波兰女科学家 M. 居里和她的丈夫法国科学家 P. 居里的极大兴趣和注意。居里夫人认真地研究了贝克勒耳关于铀射线的报告，努力探索真相，不久就认识到这种不可解释的放射现象是铀原子的特性。于是她决定检查所有已知的化合物，接着便发现钍化合物也能自动发出射线。这种现象又启发她不光限于简单化合物的检查，对矿石特别是沥青铀矿和辉铜矿也要进行检查。正是在这种严密检查、逐一测量它们的放射性强度的过程中，居里夫人发现上述两种矿物的放射性强度比根据其中铀或钍的含量所估计的强度要大得多，从而深信这两种矿物中一定有新的人们还不知道的元素。这样，居里夫妇开始进行异常辛劳的工作，将沥青铀矿作化学分析持续达数月之久，除去了一份又一份的杂质，终于在 1898 年 7 月和 12 月，分别发现了钋和镭，并且系统地研究了它们的放射性。

放射性的发现并不亚于电子的发现，也是具有划时代意义的发现之一。因为它进一步打开了微观世界的“窗户”，原来在肉眼看得见的“宏观”世界之内，存在着一个十分丰富多采的肉眼不能直接看见的“微观”世界。它进一步表明了物质结构的复杂性，原子是可分的、可入的、可变的，物质元素又是可以互相转化的，这就再一次沉重打击了机械的形而上学的自然观，迫使人们在物理学思想领域里发生深刻的革命。

**量子论的建立** 1900 年 12 月 4 日，普朗克在德国物理学会会上宣读了他的论文《关于正常光谱的能量分布定律的理论》。就在这篇论文中提出了促使物理学革命诞生的量子假说。普朗克指出，为了得到和实验符合的黑体辐射公式，必须抛弃经典物理学中关于物体可以连续发射或吸收能量的概念，而代之以新的概念，即认为在辐射的发射或吸收过程中，能量不是无限可分的，而是有一个最小的单元即量子。也就是说，能量只可一份一份地改变，而不能连续的变化。这是一个大胆的假说，根据这个假说可以

成功地导出黑体辐射公式。

普朗克的量子假说突破了经典物理学的旧框框，首次提出了微观系统的量子特性，从而打开了认识微观世界的大门，导致了物理学革命。然而在1911年以前，老一辈物理学家几乎都拒绝接受它，就连普朗克自己也惴惴不安，曾于1911年和1914年两度提出以古典概念取代量子假说的新理论。第一个认真对待并努力发展量子概念的是年轻的爱因斯坦。他于1905年提出光量子假说，把普朗克的量子概念扩充到辐射在空间的传播上去，深刻揭示了光既具有波动性又具有粒子性，即波粒二象性，这是人类第一次认识到的微观客体的最基本的特征。然而光量子假说，也遭到几乎所有老一辈物理学家的反对，迟至1913年普朗克还认为这是爱因斯坦的一个失误。尽管如此，爱因斯坦还是孤军奋战，坚持贯彻量子论思想。1906年发表论文《普朗克的辐射理论和比热理论》，把量子概念推广到辐射领域以外，成功地说明了低温固体比热现象。1916年发表论文《关于辐射的量子理论》，运用量子概念成功地说明了光化学现象，提出受激辐射理论，成为量子论发展第一阶段的理论总结。

**相对论的建立** 1905年6月，爱因斯坦创立了狭义相对论。狭义相对论否定了牛顿的绝对空间、绝对时间的观念，揭示了空间、时间、物质运动之间的本质上的统一性，使人们对空间、时间、物质运动的本性具有全新的观念，引发了物理学思想史上一场重大革命。在狭义相对论中，揭示了“长度缩短”效应和“时钟延缓”效应，得出了任何物体的运动速度都不能超过光速的结论，等等。在狭义相对论中，牛顿力学的许多基本概念和定律都要加以改造，这种改造实际上是把牛顿力学理论作为一种特殊情况概括在内。

在多数物理学家还不理解狭义相对论的时候，爱因斯坦却继续努力把他的理论向前推进。终于在1915年11月，建立了广义相对论，广义相对论进一步揭示了作为空间和时间统一体的四维时空同物质的统一关系，揭示了空间和时间不可能离开物质而独立存在，空间的结构和性质取决于物质的分布，它并不是平坦的欧几里得空间，而是弯曲的黎曼空间；物质之间的引力，不过是空间曲率的一种表现。1917年，爱因斯坦根据广义相对论考察整个宇宙空间，开创了现代宇宙学。他提出的有限无界的宇宙模型，后来发展成为宇宙膨胀理论和大爆炸理论。这是继哥白尼之后天文学宇宙观的又一次革命。

19世纪末20世纪初的物理学革命给人们最深刻的启示是，任何科学理论都不可能一成不变，随着科学实验的发展，科学发现的出现，理论必须不断发展，甚至要彻底更新。因此，不墨守成规和勇于创新，便成为现代物理学发展中的一个突出特点。

**物理学奇迹年** (a marvellous year of physics) 在物理学发展史上，1932年被誉为“物理学奇迹年”。这一年发现了中子、正电子、重氢，发明了回旋加速器。这些发现、发明对现代物理学的发展有着举足轻重的影响，而它们却又都是同一年奇迹般地展现在人们的面前。

**中子的发现** 1932年，英国物理学家查德威克宣布发现了一个全新的粒子——中子，这个发现标志着探索原子核的实验工作和核结构的理论研究开始了新世纪。

在查德威克发现中子之前，虽然已有迹象表明，存在着一种电中性的



粒子，可是当时谁都没有能抛弃常规的旧观念而向前迈进一步。1920年，卢瑟福在用 $\alpha$ 粒子轰击氮的研究过程中，就认为存在着一种电中性粒子，这种粒子不能被束缚在任何容器之中，他想象这种粒子大概是由当时已知的质子和电子结合而成，因为质子带正电荷，电子带负电荷，二者结合就变为电中性。1930年，玻特和贝克发现用 $\alpha$ 粒子轰击铍原子时会产生一种穿透力极强的射线，接着约里奥·居里夫妇对这种射线进行研究，他们用石蜡把铍板和测量仪器隔开，结果发现当有石蜡插在中间时仪器记录到的效应比中间没有石蜡时要显著得多，也就是观察石蜡中放射出一种强质子流。由于他们当时错误地认为这种铍辐射是一种 $\gamma$ 辐射，因而对这种质子流的放射现象难以解释。这时查德威克也一直在进行铍辐射的研究，他敏锐地觉察到铍辐射决不是 $\gamma$ 辐射，很可能就是卢瑟福在1920年所预言的，也是他多年寻找的中子辐射。于是对这种射线进行更细致的研究，并使用了各种记录快速粒子的方法，结果在1932年取得令人信服的证据。证明这种中性粒子确实存在，而且其质量与质子的质量相等，这种粒子并不是卢瑟福所假设的那种质子和电子的复合粒子，而是一种全新的粒子。除了不带电荷外，其基本性质与卢瑟福提出的质子几乎一样，查德威克便把这种粒子定名为中子。

中子发现后不久，伊凡宁柯和海森伯都提出了原子核是由质子和中子构成的假说。这个假说成功地解释了核的角动量及其统计性质，说明了同位素的存在，并且使人们对原子核的结构有新的认识，发现有比电磁力更强的核力的存在，导致了对核力的研究，为粒子物理学的发展开辟了道路。

**正电子的发现** 同是1932年，美国物理学家安德森发表了一项极为重要的研究成果：他发现了质量与电子质量一样，但是带有正电荷的粒子，称之为正电子。这个发现由于证实了狄拉克提出的关于相对论性电子的理论而引起科学界的广泛重视。

1928年，狄拉克成功地建立起相对论性电子运动方程。该方程的解具有一个异常的性质，既包括负能态也包括正能态。当时曾尝试用已有的理论对这种负能态作解释，可是结果都不满意。1900年，狄拉克作了一个大胆设想，认为假如从一个负能态移去一个电子，结果就会产生一个可被观察的“空穴”。1901年，他进一步认为如果空穴是存在的话，它们将是描述一个质量与电子相等的正电荷粒子。一年以后安德森利用放在强磁场中的云室记录宇宙线粒子，方法是每15秒钟使云室膨胀一次，并照一次相。他仔细查看了几千张照片，结果观察到有一种径迹与当时已知带电粒子的径迹不相符合。根据在磁场中的偏转方向，知道这种粒子是带正电荷的，但水滴密度却与电子径迹相似。当时安德森并不知道狄拉克理论，故安排了进一步实验，看看这种粒子是否可能是质子，因为那时候只知道质子是带正电的。可是经过实验的反复分析，由于电离密度太小，这种粒子不可能是质子。后来安德森接触了狄拉克理论，才得出他观察到的正是这种带正电荷的电子的结论。

正电子的发现，不仅证实了狄拉克理论的正确性，而且它与狄拉克理论一起，引起了物理学概念的根本变化，特别是第一次预言了反粒子的存在。早在正电子发现之前，物理学家就曾对自然界中正负电荷配置的不同提出过疑问。为什么质子带正电，而没有相同质量的负粒子？为什么电子带负电，而没有相同质量的正粒子？这些问题当时都无法回答。正电子的

发现，部分地回答了电荷对称性的问题，它为以后实验上继续寻找其他粒子（如质子、中子、介子、超子）的反粒子创造了前例，使人们认识到电荷对称性实际上是一个普遍规律。正电子的发现，还预言了正、反粒子对的产生和湮灭以及真空的物质性。

**重氢的发现** 同是 1932 年，美国哥伦比亚大学教授尤雷用质谱仪作出了一个重大发现，即发现了周期表上第一位元素氢的具有两倍质量的同位素。

虽然早在 1920 年，卢瑟福似乎也预料到有一种比平常的氢重一倍的氢，但是像斯特恩这样擅长发现的专家未找到它。当时卢瑟福的同事阿斯顿发明了质谱仪，该仪器能把一种元素中的不同的同位素彼此分离开来，而分别投射到照相底板上。1930 年，尤雷使用质谱仪去分析各种物质，似乎感觉到氢的同位素的存在，但还拿不出足够的实验证据。此后，尤雷利用美国度量衡标准局所制备的经过蒸发的液态氢继续做实验，在布里克维德和墨菲的配合下，于 1932 年，使用质谱仪进行周密研究，终于在照相底板上发现了相当于两倍氢的质量的同位素——重氢。

尤雷所以能证明重氢的存在，主要在于他有卓越的数学和物理学方面的知识基础，于是在计算时能设计出浓缩法，即预言了液态氢在低温下气化，会使液体中不能气化部分的氢原子得到浓缩。因此，该发现是井然有序的研究结果，而不是碰运气的产物。这个发现也是 30 年代最重要的发现之一，它对同位素的研究、原子能的探索都具有深远的意义。

**回旋加速器的发明** 又是 1932 年，为了研究核物理学，美国加利福尼亚大学的劳伦斯博士提出了一种使粒子做曲线运动并同时加速的新方案，并由此发明了一种具有实用价值的回旋加速器。

1929 年，劳伦斯发现挪威工程师怀德路在《电工学文献》上发表的一篇阐述钾离子加速的论文。该论文提出可把两根管子（电极）排成一条线，用衰减高频振荡电压将钾离子注射到第一根管子中去，当钾离子行进到两根管子之间时，以同样的电压升压一次且与前同步，这样钾离子从第二根管子中出来时比第一根管子时能量要大一倍。由此劳伦斯获得启发，他想在合适时间重复施加低的易控制的电压，会使能量比单独次使用巨大的高压还要高，正如荡秋千一样，只要恰当有节奏地加力，就能使秋千愈荡愈高。劳伦斯准备采用一连串管子，但考虑到要减少必要的长度，于是成功地发明了把管子弯成圆圈，即粒子在强大的电磁场中沿螺旋形轨迹运动，并使它不断受到交变电场的加速作用。劳伦斯还使得电场方向的变化与粒子沿其轨迹的运动情况同步。这样便可以用  $2 \times 10^5$  伏的交变电压来得到相当于  $20 \times 10^6$  伏直流电压的加速效果。

回旋加速器的发明，对于核反应的研究来说，具有划时代的重要意义。它生产放射性同位素的效率远远超过以前的一些方法，而使用重氢的核作为加速粒子时能诱发一些非常重要的核反应。它具有多种作用，借助于这种强有力的工具，使得核物理学的研究达到了一个前所未有的新水平。

**物理学史** (history of physics) 研究和揭示物理学产生、形成和发展规律的一门学科。它所研究的具体内容是：从大量的、零散的历史资料中，揭示出物理学概念、定律、原理和理论产生、形成和发展的内在规律；从历史的角度，深入分析引起物理学观念、思想和方法发生变革的主要原因；运用历史和逻辑相结合的方法，搞清物理学知识体系形成演变

的来龙去脉；探讨物理学理论的形成和哲学以及其它自然科学之间的辩证关系；探讨物理学的发展和社会、经济、政治、文化、技术等之间的辩证关系；总结中外物理学家、物理学工作者以及物理学研究集体、学术组织在科学实践中成功与失败的经验教训；结合物理学发展史实，吸取有益的借鉴，探索适合当前实际情况的发展物理学的具体方式与途径，更好地培养富有创造性的物理学人才，有力地推动物理学科的教学和研究工作的开展。

物理学是随着人类社会实践的发展而产生、形成和发展起来的，它经历了漫长的发展过程。纵观物理学的发展史，根据它不同阶段的特点，可以分为古代物理学时期、近代物理学时期和现代物理学时期三个发展阶段。

**古代物理学** 系指 16 世纪以前的物理学萌芽时期。在欧洲古代，物理学一词是自然科学的总称。古代自然科学，包括古代希腊、中国、印度以至阿拉伯的物理学知识。其中虽然也出现过一些值得称道的物理思想，如古希腊的原子论、古代中国的元气说，找出了一些带有规律性的东西，如《墨经》对力学、光学现象所作的讨论，但是就其总体而言，基本上还处于现象的描述、经验的总结和猜测性的思辩阶段。古代物理学知识主要是以直觉的和零散的形式出现的，也有的是从实际器具及其制作中体现出来的。

**近代物理学** 直至 16 世纪以后，物理学才开始发展成为一门范围较为明确的学科。以伽利略为代表的近代物理学的奠基者，主张实验和观察是物理知识的源泉，也是检验物理理论正确性的标准。他进行了一系列关于物体运动的实验研究，从而发现了落体定律和惯性原理，推翻了亚里士多德的力学体系。在伽利略工作和开普勒行星运动三定律等基础上，牛顿总结出宏观低速机械运动的基本规律：包括三条牛顿运动定律和万有引力定律，由此建立起一个完整的力学理论体系，牛顿的工作使近代物理学的发展在 17 世纪末达到了一个高峰。18 世纪主要是以英国工业革命和法国资产阶级民主革命载入史册的。这两次伟大革命显示了科学对社会的巨大影响，也为物理学特别是热力学的发展提供了强大的物质基础和有力的社会保证。19 世纪是近代物理学全面发展的时期。在光学方面，由于杨和菲涅耳的工作，使光的波动说被广泛接受。在热力学方面，随着热力学第一定律（能量守恒和转化定律）的建立，克劳修斯、汤姆孙总结了卡诺的研究结果，分别地提出了热力学第二定律。在电磁学方面，随着奥斯特发现电流磁效应，不久之后，由于法拉第的工作，发现了电磁感应和提出了力线概念，在此基础上麦克斯韦发展了场的观念，建立起完整的电磁场理论，预言了电磁波的存在，并由赫兹的实验得到证实。

**现代物理学** 19 世纪末伦琴射线、放射性、电子和镭的发现，黑体辐射、迈克耳孙—莫雷实验等问题的提出，推动了 20 世纪初的物理学革命。1905 年和 1915 年爱因斯坦创立的狭义相对论和广义相对论，揭示了空间、时间、物质、运动之间的统一性。狭义相对论是在运用经典理论来解决高速运动的电磁现象的失败中产生的。这一理论的建立，是由近代物理学向现代物理学发展的一个重要标志，它使人的认识从低速运动进入高速运动的领域。1900 年普朗克提出了量子的概念，导致 1913 年玻尔把量子概念用于卢瑟福 1911 年所提出的有核模型。1924 年德波罗意受到爱因斯坦

光量子论的启发，提出了物质波的假说。在此基础上，1925年海森伯、玻恩等创立了矩阵力学。1926年薛定谔创立了波动力学，并证明它同矩阵力学是等价的，以后统称为量子力学。量子力学是从经典理论运用于解决黑体辐射现象的失败过程中产生的。这一理论的建立，使人们的认识实现了由宏观到微观领域的飞跃，是由近代物理学向现代物理学发展的另一个重要标志。20世纪30年代以来，现代物理学在生产实践和科学实验飞速发展的基础上，在理论的深度和应用的广度方面又取得了重大的进展。在向微观世界的探索过程中，到了60年代头几年，实验上观察到的基本粒子的数目已经增加到比当年元素周期表出现时发现的化学元素的数目还要多。基本粒子大量发现，使人们怀疑这些基本粒子的基本性。人们已认识到基本粒子仍是一个具有内部结构的粒子，并已提出坂田模型、夸克模型、层子模型、口袋模型、孤子模型、重夸克偶素和势模型、弦模型等假说。随着作为现代物理学前沿分支的粒子物理学的重大进展，原子核物理学、固体物理学、凝聚态物理学、等离子体物理学、现代宇宙学、非线性物理学等分支也正酝酿着新的重大突破。现代物理学的理论成果应用于实践，出现了像原子能、半导体、计算机、激光、宇航、超导等许多新的技术科学。这些新兴技术正有力地推动着新的科学技术革命，促进着生产的发展，而生产和高新技术的发展，又促使现代物理学在更深刻、更广阔的领域中发展。

物理学史又是自然科学与社会科学相结合的产物。它有其固有的特点和相应的研究方法：既要求具有深入的物理科学知识，也要求有较多的人文科学素养，以便运用社会科学（主要是历史科学）的方法来学习它、研究它。为此，在学习、研究物理学史过程中，应努力占有资料、了解各种背景（生产背景、社会背景、文化背景）；弄清楚物理学发展的具体历程及其来龙去脉；抓住发展的主要线索和本质特性；运用辩证唯物主义与历史唯物主义的观点、方法进行探索、分析。在学习、研究物理学史过程中，既要防止陷入过多的繁琐考证，又要避免只有空洞的论点而缺乏历史过程的具体考察，力求做到史论的统一。在掌握物理学发展整体、通论的基础上，对于要求进一步深入研究的人们而言，根据需要与志趣，可以按国别，或按历史时期，或按学科分支，或按物理思想，也可对某位物理学家，某本物理学著作，某一物理基本概念的演变，某个物理研究单位的历史发展，某一物理重大成果的产生历程等进行研究，这些都是可取的。当然，也可以从某一分支学科如何通过技术的发展而逐步转化为科技产业的问题开展研究，如此等等。应当指出，研究物理学史不是为研究而研究，而是要着眼于当前，面向未来，努力让研究物理学史为现实服务，为发展物理学服务，为社会主义现代化建设和精神文明建设服务，进而为全人类的科学和进步事业作出贡献。

**物理学危机 (crisis of physics)** 指因经典物理学无法解释新的实验事实而造成的整个物理学领域的危机，这一术语由法国物理学家庞加莱首先提出。19世纪末20世纪初出现的一系列新发现，推翻了经典物理学中关于物质结构及其特性的传统的形而上学的观念，特别是动摇了经典物理学关于原子的不可分割性和不变性、空间和时间的绝对性的基本框架，形成了物理学的革命。在这种情况下，庞加莱于1905年出版的《科学的价值》一书中以“数学物理学的当前危机”为题，第一次对此作了分

析和总结。认为物理学原理的“普遍毁灭”造成了物理学的“危机”，使人们进入一个“普遍的怀疑时期”；提出“凡不是思想的东西，都是纯粹的无”，由此陷入物理学唯心主义。列宁在《唯物主义和经验批判主义》一书中指出，“物理学危机”并不是说物理学本身不成为科学了，而是某些物理学家在物理学的新发现面前，在理论思维即认识论方面产生了危机，其实质在于“否定不依赖于我们的意识并为我们的意识所反映的客观实在的存在”。

**物理学学科结构** (subject structure of physics) 物理学的基本概念、基本原理 (包括基本定律和基本理论) 和基本方法的整体组合以及它们之间的相互联系。物理学的学科结构 (知识结构) 有以下五个基本特点。物理学是一门实验科学，它的根基在实验，一切理论都要以实验作为唯一的检验者。物理学是一门严密的理论科学，它以物理概念为基石，以物理学定律为主干，建立了经典物理学与现代物理学及其各分支的严密的逻辑体系。物理学是一门定量的精密科学，它从把物理概念转变为物理量开始，就利用种种数学手段使理论与实践不断发展。物理学是一门应用广泛的基础科学。物理学是一门带有方法论性质的科学。从它的早期萌芽到近现代发展，都以它丰富的方法论和充满哲理的物理思想影响着人们的思想、观点和方法，因此物理学曾被称为“自然哲学”。物理学与其他自然科学的不同之处在于同时完备地具备以上五个特点，这五个特点不是孤立地而是有机地存在于物理学之中，这正是物理学作为一门成熟的、精确的基础自然科学的标志。

物理学知识结构的本质特征是，物理学的任何知识，不论是现象、事实、概念、物理量、定律、理论等，都必然涉及以下三个基本因素：实验 (事实)、物理思想 (逻辑、方法论) 和数学 (表述形式或计量公式)。因此，实验基础、物理学的逻辑思维和数学表述是支撑物理学科结构体系的三根支柱。事实上，始源于伽利略、奠基于牛顿的物理学正是由于找到了实验、逻辑思维和数学的正确结合，才发展成今天推动人类社会前进的伟大生产力。

物理学知识结构 (学科结构) 的本质特征决定了研究和学习物理学的基本方法和基本能力。它们是实验方法和能力、逻辑思维方法和能力、数学方法和能力，这反映了物理学的研究与教学活动脱离不了这三个领域的结合。在中学物理教学过程中，应自觉地把知识、方法和能力这三者有机地结合在一起加以训练。

**物理学哲学** (philosophy of physics) 一门研究物理学中哲学问题的学科。该学科的研究对象主要有：物理运动过程的本质；物理学基本概念与理论产生的认识论基础以及物理科学发展的方法论等。20 世纪以来，物理学从经典物理学进入现代物理学阶段。作为现代物理学的两大支柱——相对论和量子力学已取得了巨大成就，在这个基础上，物理学又有了很大的发展，特别是理论物理学的前沿，它们都向物理学哲学提出了一系列问题，像：相对论效应 (尺缩、钟慢、质增) 是否反映物质属性的实在变化？光速真是不可超限吗？对观测到的类星体的超光速运动应作如何理解？质能关系式的哲学意义是什么？是表示质量与能量相互转化呢？还是表示质量与能量的当量关系？对物理学中质量耗损应作如何理解？物质无限可分的哲学含义是什么？物质无限可分与夸克囚禁之间的

关系是什么？基本相互作用的统一的哲学含义又是什么？四种基本相互作用能统一吗？大爆炸宇宙学的哲学含义是什么？这个学说与时空的无限性如何统一？物理对象与认识主体之间的关系，不少人认为量子力学表明了我们观察到的客体是受主体影响的客体，那么主客观的关系究竟是怎样的关系？不确定关系的哲学含义是什么？是揭示了主客体不可分，还是反映了微观粒子客观存在的一种本性？量子力学中的统计规律性与世界可知性的问题如何认识？等等。

由于物理学是研究空间、时间、物质运动的最普遍形态与物质的基本结构的科学，其独特地位使得它在事实上与哲学比较接近，特别是涉及物理学前沿的时空问题、物质结构问题，往往也是哲学自然观所探讨的问题。其次，物理学发展到今天，在其前沿理论领域的那些基本假设、基本概念等和直接的经验领域之间距离越来越远。例如：微观粒子的概率描述、夸克、夸克的味荷与色荷、规范场、相因子、超弦、重整化群、高维宇宙、宇宙大爆炸、波粒二象性等等概念，在我们直接的经验领域中往往是难以表现的。这些概念大多得通过借助诸如微分几何、群论、拓扑学等这些数学工具和高度抽象的思维才能在理性上把握它。而这种思维本质上正是一种哲学思维。所以对物理学哲学问题的探讨其意义是十分明显的。同时以辩证唯物主义的世界观与方法论来指导其研究的必要性也就更清楚了。

**物理医学 (physical medicine)** 物理学与医学之间的边缘学科。主要研究利用各种物理因子如电、磁、光、声、热、机械等来进行诊断、治疗和预防疾病。物理医学的基础是理疗学，并随着医用物理学、医用电子学、生物医学工程学的发展而发展。人们很早就利用自然存在的物理因子（如温度、日光）来治疗疾病，这是理疗学诞生的萌芽。20 世纪初期以来脊髓灰质炎的流行以及相继爆发了两次世界大战，都使大批年轻人严重伤残，从而推动了理疗学的发展。理疗的目的在于改善或保持人体的功能，用最有效的方法来训练基本的动作，检查许多部位的疾患并加以积极治疗。

物理医学中的理疗经常使用的方法有：**按摩**：通过熟练地有规则地在身体组织上施行某些手法，以期对神经系统、肌肉系统、全身血液循环起到一定的治疗作用。除了用手法操作外，亦可用漩涡浴或通过机械装置进行。**热疗**：通过传递热量以促进患部血液循环及止痛。最早采用的是通过高频电流给深部组织加热。以后发展为短波透热疗法，常用于治疗深部肌肉及关节的疾患；**超声透热疗法**，常用于治疗表面加热反应不大的深部肌肉的疾患；以及**微波透热疗法**，即使用频率极高、波长很短的辐射，所引起的生理反应与其致热性能有关。**电疗**：通过传递低强度电流既用于训练软弱乏力的肌肉，又可用于测定支配该肌肉的神经的电兴奋性，还可将某些药物透过皮肤导入体内予以治疗。**磁疗**：通过一定强度的磁场作用于人体某些部位以治疗疾病，有一定的镇痛、消肿、止痒、止泻、降低血压的效能。其最简单的方法是将磁体用胶布敷贴在人体确定部位的表面，操作十分简便。**医疗体育**：通过体育运动对关节僵硬及瘫痪有治疗的作用，对肺部疾患的患者也有改善呼吸的功能。**功能训练**：可指导患者如何更安全更有效地自理生活，包括学习使用拐杖、假臂等。

随着医用物理学和医用电子学的发展，大大拓展了物理医学的内涵，例如用物理方法粉碎肾、膀胱结石等新疗法的产生。该疗法有：**超声波**

碎石：用一根金属头将 27kHz 的超声波作用于结石产生机械性振动能，使结石破碎； 冲击波碎石：在水中通过高压电极瞬间放电，产生压力脉冲，再经过反射器聚焦，使之形成足以粉碎结石的声能； 激光碎石：用连续输出的 CO<sub>2</sub> 激光器，以纵向放电激励方式，将 50 瓦的强激光经光导纤维输送到尿路中的结石部位以碎石等。

**物理主义 (physicalism)** 一种关于各种科学语言都可用物理学语言构成、各种科学定律都可用物理学定律推导出来的理论，由卡尔纳普、纽拉特等人提出。20 世纪 30 年代，随着现代物理学的迅猛发展，取得一系列成就。在这种情况下，卡尔纳普提出可用在特定的时间-空间坐标系中对事件进行定量描述的物理语言，作为统一科学的语言。因为在他看来，物理语言较之其他人工语言，更具有主体之间交流性和普遍性的优点，它是一切科学语言的基础，也包含了其他科学语言的内容。卡尔纳普还提出自然科学和社会科学中的种种事实和规律，至少在原则上可以从物理学的理论假设中推演出来。于是他主张一切科学乃至社会科学都可以统一起来，其中科学知识由事实命题组成，表达事实命题的语言是物理语言，从而这种统一可以归结为物理语言和物理规律问题。因为这是超主观的，所以又被称为方法论的唯物主义。但是，将所有科学语言都还原为物理语言，不仅技术上有许多难以克服的困难，而且本质上抹煞了各门科学的特征，因而这种理论是形而上学的。

**物体的平衡 (equilibrium of a body)** 在两个或两个以上的力作用下，物体相对于惯性系保持静止不动或沿直线匀速平动的状态。物体处于诸如重力场或其他保守立场中，只考虑约束力在物体任何允许位移中不作功的情形时，该物体在某位置上可保持平衡，此位置称为平衡位置。物体处于平衡时，总可以找到这样一个惯性系，使物体相对于该惯性系保持静止不动。将物体稍微偏离其平衡位置，在保守力和可能的约束力共同作用下，按物体是否有返回其平衡位置的倾向，物体在原位置上的平衡可分为稳定平衡、不稳定平衡和随遇平衡三种。

**稳定平衡：**在约束条件允许下，将物体稍微偏离其平衡位置时，如约束力和保守力的共同作用企图使物体返回原平衡位置，称物体在原位置上的平衡为稳定平衡。物体处于稳定平衡时，在平衡位置处的势能小于它在约束条件允许下的邻近位置上的势能。例如，重力场中一个在碗底附近只能纯滚动的小球，它在碗底位置上的平衡是稳定平衡。

**不稳定平衡：**在约束条件允许下，将物体稍微偏离其平衡位置时，如约束力和保守力的共同作用企图使物体进一步偏离其平衡位置，则称物体在原位置上的平衡为不稳定平衡。物体处于不稳定平衡时，它在平衡位置处的势能大于它在约束条件允许下的邻近位置上的势能。例如，重力场中一个在球面顶端附近只能纯滚动的小球，它在球面顶端位置上的平衡是不稳定平衡。

**随遇平衡：**在约束条件允许下，将物体稍微偏离其平衡位置时，如约束力和保守力的共同作用能使物体在新位置上也保持平衡，则称物体在原位置上的平衡为随遇平衡。物体在某位置处于随遇平衡时，它的势能与邻近一切允许位置上的势能相等。例如，重力场中一个在平面上只能作纯滚动的小球，它在平面上的任意位置是随遇平衡位置。

**物质 (matter)** 存在于人的意识之外而又能为人的意识所反映的客

观实在。世界的本质是物质的。物质不仅包括自然界中一切可以直接观察到的客体 and 物体，而且包括一切在将来凭借改善观察和实验手段而原则上能够认识的东西。物质有其特殊的属性，如运动、质量、能量等等，而自然界的一切现象都是运动着的物质的各种不同表现形态，物理学、化学和其他各门学科则揭示了一定物质的特殊的属性。物质又是有结构的，迄今所知的物质层次，大至总星系，小至夸克，从宇观到宏观以至微观，每个层次结构都有其特点，物质的不同层次之间又有错综复杂的联系。物质存在的基本形态是实物与场。物质不能被创造也不能被消灭；世界上各种事物的产生和消失，只能是物质形态在一定条件下的转化，如电子和正电子相遇而湮没的过程，只是物质的实物形态转化为场的形态。人们对物质的特殊属性、结构和形态的具体认识，随着科学的发展而不断改变和深化。相对论揭示了物质运动同空间、时间在本质上是联系和统一的。空间、时间是物质存在的普遍形式，空间、时间不存在于物质之外，这就如同决不会有不具有空间、时间属性的物质一样。量子力学揭示了物质的粒子性和波动性的统一。粒子物理学揭示了基本粒子也有内部结构。现代物理学还揭示了许多新的物质形态如等离子态、超固态，揭示了反物质的存在，即完全由反粒子构成的物质的存在，如利用高能加速器已在核反应中制造出反氦核和反氦核。有人设想在宇宙的某些部分可能存在反物质，但至今尚未证实至于马克思主义哲学的物质观念，则是世界的一切现象（包括自然现象和社会现象）的根本特性的最高概括。

物质波 (matter wave) 参见波粒二象性。



**XENIX 操作系统** (XENIX operational system) 目前 16 位微机几乎都配有 UNIX 及其变种的操作系统, UNIX 变种主要有 XENIX、UNIFLEX 等。有些是贝尔实验室的原版, 有些是重新构造的, 但它们在本质上与 UNIX 没有什么区别。

XENIX 是美国 Microsoft 公司为 M68000、Z8000 和 Intel 8086 等微机配置的多用户操作系统。它保持了 UNIX 原有的性能和优点, 并加以修改、规格化、改进、增强, 还提供一些额外的软件使它更适合市场需要。它的修改在于把较大的小型机上的 UNIX 改得适于微型机; 规格化是让 XENIX 更好地适合围绕上述那些微处理器构成的各种微型机系统; 改进在于去除已知缺陷, 保留可产生更小更快的操作系统的子程序, 且包含硬件故障检测手段, 以及在系统瘫痪、电源故障和奇偶错测试后文件自动修复等特点; 增强工作是加进记录检索、共享数据段、同步写以及改进的交互进程通讯手段。总之是通过各种措施, 使 XENIX 不仅成为高生产率的软件开发系统, 而且成为一个通用的应用系统。

**X 射线** (X-ray) 波长的数量级约为  $10^{-15} \sim 10^{-7}$  米之间的短波电磁辐射, 该波段的长波端与紫外线波段的短波端重叠, 短波端与  $\gamma$  射线波段重叠。

1895 年, 伦琴在阴极射线实验中, 发现放置在附近的一块氰亚铂酸钡会发出微光。伦琴通过研究指出, 这种微弱的荧光是由于阴极射线 (即电子束) 撞击玻璃管壁时形成的某种未知辐射所致。他还进一步发现, 在各种物质中, 纸、木材和铝等对这种新形式的辐射是“透明”的, 可使放置在这些材料背面的照相底片感光。当时把这种射线就称为 X 射线, 又称为伦琴射线。由于这一发现, 伦琴于 1901 年获得了首届诺贝尔物理学奖。

伦琴和其他一些研究者曾做了许多实验, 试图找到 X 射线的干涉和衍射现象, 但都没有成功。这对当时人们认识 X 射线的波动性构成了障碍。这个问题直到 1912 年才得到解决。德国物理学家劳厄和他的合作者通过 X 射线对晶体的衍射实验, 证实了 X 射线实际上就是波长很短的电磁波。晶体中的原子排列成规则的空间点阵, 原子间距离为  $10^{-8}$  cm, 所以波长约为几个  $10^{-9}$  cm 的 X 射线通过晶体时, 就会产生明显的干涉图样。

X 射线对物质的穿透本领较强, 它能穿透纸张乃至金属薄片, 还能使荧光物质发光, 照相乳胶感光, 气体电离。波长很短的 X 射线的能量和穿透本领更大, 称为“硬 X 射线”; 波长较长的 X 射线则称为“软 X 射线”。

X 射线的应用很广。在科学研究中可用于研究晶体结构。X 射线通过晶体时发生衍射, 通过对这种衍射图样的分布和相对强度的分析, 人们可了解晶体原子的间距和排列情况。在工业上 X 射线可用于金属探伤。在医学上用于治疗 and 透视等。但用 X 射线直接照射人体超过一定剂量时, 对人体有伤害作用, 所以在工作时操作人员必须用能吸收 X 射线的铅板或铅玻璃作防护。

**X 射线结构分析** (X-ray structural analysis) 利用 X 射线衍射技术研究晶体结构的一种方法。光波经过狭缝时, 若狭缝的大小与光波的波长同数量级或更小, 则光波将产生衍射现象。晶体内原子呈有规则的周期性分布, 其排列周期与 X 射线波长有同数量级 ( $10^{-10}$  米)。1912 年德

国物理学家劳厄首先提出，晶体中原子有规则的排列可以使 X 射线发生衍射。同年，弗里德里克和尼平进行了 X 射线的单晶衍射实验。接着，W.L. 布拉格推导出了 X 射线衍射的基本公式。他把晶体对 X 射线的衍射作用看成是晶体中各晶面族反射 X 射线的结果。若波长为  $\lambda$  的入射 X 射线与某一族面间距为  $d$  的晶面交角为  $\theta$ ，则当两相邻晶面反射线的光程差为波长的整数倍  $2d \sin \theta = n\lambda$ ， $n=1, 2, 3, \dots$  时，在  $\theta$  方向出射的 X 射线得到加强。这关系式称为布拉格方程。根据这方程，W.L. 布拉格利用他的父亲 W.H. 布拉格制成的第一台 X 射线谱仪测定了一些简单的晶体结构。这些工作奠定了 X 射线晶体结构分析的基础。随着这一分析技术的成熟和广泛应用，已有数万种物质的晶体结构被确定。

X 射线衍射图样与晶体中的原子在空间的排列有关。由衍射线的位置分布，可测定晶体的单胞大小、形状和取向；对衍射线强度的测量和分析，可确定单胞内各原子的位置。此外，X 射线衍射方法还可以用于研究和测定晶体的缺陷、多晶物质的物相组成、晶粒大小和择优取向等等。根据研究对象（单晶或多晶）、目的、衍射 X 射线的探测方法和实验布置的不同，X 射线衍射技术可分为多种不同的实验方法。早期常用的方法有劳厄法、旋转晶体法和德拜粉末法，它们用照相底片记录单晶或多晶的衍射图样。衍射仪法采用 X 射线探测器和电子系统记录衍射 X 射线讯号，具有快速、精确等优点。现代的衍射仪与电子计算机结合，可测定分子量达数万的复杂的生物大分子晶体。

系综 (ensemble) 处于相同宏观条件下的大量性质和结构完全相同的系统的集合。又称统计系综。它是统计物理学中的一个最基本的概念。

在统计物理学中，由大量粒子组成的宏观系统在一定的外界条件下遵从一定的统计规律，系统所包含的各种可能的微观状态以一定的概率分布出现，宏观的物理量应当是相应的微观量在给定外界条件下一切可能微观状态上的平均值。

在经典理论中，可能的微观状态在所谓的相空间，或  $\Gamma$  空间中构成一个连续区域，相体积元表示为  $d\Gamma = dp_1 \dots dp_f dq_1 \dots dq_f$ 。在  $t$  时刻系统状态的代表点出现在相体积元  $d\Gamma$  中的概率为  $\rho(p, q, t) dpdq$ ，其中

$\rho(p, q, t)$  就是概率分布函数，满足归一化条件  $\int \rho(p, q, t) dpdq = 1$ 。系

统的某微观量  $A$  的平均值，即物理量  $A$  的宏观值为  $\bar{A}(t) = \int A(p, q) \rho$

$(p, q, t) dpdq$ 。为了找到概率分布函数，吉布斯提出用研究大量完全相同且互相独立的系统的集合在某一时刻的行为去代替研究一个系统在不同时刻的行为。这些系统由同种物质构成，有相同的自由度数目和相同的哈密顿量，并处于相同的外界条件下，但在同一时刻具有不同的微观状态，这样一个假想的集合就称为系综。在系综中任意选取一个系统，这个系统处于  $d\Gamma$  范围内的概率是  $\rho(p, q, t) dpdq$ ，于是  $\bar{A}(t) = \int A(p, q)$

$\rho(p, q, t) dpdq$  就是微观量  $A(p, q)$  在系综上的平均值，称为系综平均值。

在量子理论中，系统的可能微观状态是不连续的量子态。在  $t$  时刻系统处于量子态  $s$  的概率是  $\rho_s(t)$ ，它的归一化条件是  $\sum_s \rho_s(t) = 1$ 。系统的

微观量  $A_s$  在一切可能微观状态上的平均值为  $\bar{A}(t) = \sum_s p_s(t) A_s$ 。与经典系综相似，可以设想用大量的量子系统集合在某一时刻的行为去代替一个量子系统在不同时刻的行为，由此构成的系综称为混合系综。在混合系综中每个系统处于不同的量子态上，在系综中任取一个系统处于量子态  $s$  的概率是  $p_s(t)$ ，于是  $\bar{A}(t) = \sum_s p_s(t) A_s$  就是微观量  $A_s$  在量子系综上的平均值，也就是与微观量  $A_s$  对应的宏观物理量。

在平衡态统计物理中主要考虑处于平衡状态的系统，它的宏观量不随时间而改变，因此概率分布函数  $(p, q, t)$  或概率  $p_s(t)$  应该不显含时间。吉布斯按平衡态系统分别处于孤立系、闭系和开系的约束条件，得到了相应的微正则系综、正则系综和巨正则系综的概率分布函数。

夏元璠 (1884 ~ 1944) 中国较早的物理学工作者之一。字浮筠，浙江省杭州市人。早年在南洋公学 (即后来的交通大学) 学习，1905 年赴美留学。1909 年赴德入柏林大学，曾就学于物理学家、量子论创始人普朗克。1913 年因无经费，中断学习而回国。

夏元璠的重要贡献是在中国开拓物理学的教学和传播相对论。他回国后，任北京大学理科学长 (1913 ~ 1918)，物理学教授 (1918 ~ 1919)，主讲理论物理学。1919 ~ 1921 年第二次到柏林，经普朗克介绍认识了爱因斯坦，而与爱因斯坦常有交往。1921 年回国后，翻译出版了爱因斯坦的《相对论浅释》(1922 年商务印书馆版)，这是中国第一本相对论译著，夏元璠也就成了相对论在中国最早的传播者之一。

纤维光学 (fiber optics) 研究光纤传输光信息的机理和应用的科学，是近 30 年蓬勃发展起来的一门新学科。它的早期发展可以追溯到很早的希腊，人们利用透明的细长纤维导管传输光，制作了装饰用的玻璃器皿。1870 年，英国人观察到光线可沿弯曲水柱传播的现象。1929 年至 1930 年，美国和德国先后制成了石英纤维，实现了短距离光和图像的传输。1953 年，在荷兰和美国首先制成了玻璃芯塑料包层的光学纤维。1955 年，美国的希斯肖威兹制成了玻璃芯玻璃包层的光纤，解决了光学绝缘问题，为以后纤维光学的发展奠定了基础。1960 年以后，随着激光技术的发展，光纤激光通讯技术在美国和日本得到了迅速的发展。1973 年，美国贝尔实验室首次实现了光纤通讯实验系统，并在其后进入了实用阶段。在我国，已有许多单位研制成功低损耗、低色散的光学纤维，建立了光通讯实验线路，并开始用于实际。

纤维光学的内容通常包括：光学纤维元件传光和传像的基本原理；传递图像的分辨本领；传光性能，包括透过性能和各种光能量损耗；以及光信号的衰减、色散和畸变等。纤维光学通常也研究各种光纤的制作工艺及应用。

显微镜 (microscope) 将微小物体造成高放大倍率的像，以便观察其精细结构的光学仪器。主要由短焦距物镜、长焦距目镜和照明装置三部分组成。微小物体置于靠近物镜物方焦面外侧，经物镜后在目镜物方焦面内侧成放大实像，再经目镜于明视距离处形成放大的倒立虚像。

显微镜物镜分干物镜和浸液物镜 (或湿镜头) 两类。前者在空气中使用；后者浸在油液中使用，被观察物体须放在所用的油液中，以便在大孔

径光线下不产生彗差和球差。油液的折射率与物镜组第一片透镜的折射率相同。物体在物镜物空间的孔径角  $u$  的正弦，与物体所在处媒质的折射率  $n$  的乘积  $n \sin u$ ，称为显微镜物镜的数值孔径，常用符号  $N.A.$  表示。显微镜物镜上除标有放大率外，还刻有数值孔径的大小。如  $10\times$  表示放大率为 10 倍， $N.A.0.3$  表示数值孔径为 0.3。它又常常简写成  $10\times 0.3$ 。显微镜物镜按放大率不同可分为：低倍物镜， $1\times 0.04 \sim 5\times 0.15$ ；中倍物镜， $5\times 0.15 \sim 25\times 0.40$ ；高倍物镜， $25\times 0.35 \sim 65\times 0.85$ ；浸液物镜， $90\times 1.2 \sim 100\times 1.35$ 。

**放大率** 设物镜焦距为  $f_0$ ，目镜焦距为  $f_r$ ，物镜像方焦点到目镜物方焦点的距离为  $s_0$ （称为光学间隔或光学筒长），则显微镜视角放大率  $M$  为：

$$M = -\frac{s_0 \Delta}{f_0 f_e}$$

式中  $s_0$  为明视距离，如用 25 厘米代入，则  $f_0$ 、 $f_e$ 、 $\Delta$  都应用厘米为单位。式中负号表示像是倒立的。

**分辨本领** 是指显微镜能够辨别的两个靠得很近的物点之间的最小距离。显微镜除了有高放大率外，还应有较高的分辨本领，以便分辨小物体的细节。显微镜的分辨本领正比于物镜的数值孔径，反比于光波波长。大型电子显微镜的最小分辨距离可达  $2 \times 10^{-10} \text{m}$  以下，而用可见光的光学显微镜的最小分辨距离只有  $2 \times 10^{-7} \text{m}$ 。

**显微镜照明** 显微镜的目的物与望远镜的不同。后者的目的物自身能发出光来，而显微镜的整个视场要用特设的照明系统给以强度足够而均匀的照明。对透明的薄片，如生物组织的切片，采用透射照明。如果显微镜物镜的数值孔径小于 0.25，则显微镜底座中设置有一凹面镜，只要转动凹面镜，将室内的漫射阳光会聚于载物台的观察薄片上即可。如果物镜的数值孔径较大，须用显微镜底座中附设的照明系统。对不透明观察物，则采用反射式照明。照明不仅是用显微镜进行观察所必须的，而且在一定程度上影响分辨本领的实现。

**偏光显微镜** 附有偏振镜用来观察双折射性物质的显微镜。在显微镜的照明系统中设置一块尼科尔棱镜或人造偏振片，使照明光成为偏振光。此光束透过后载物台上的观察物后，入射进物镜。在物镜和目镜之间再放置一块偏振镜，作检偏振镜用。两块偏振镜可以分别旋转以改变两者主截面间的夹角。调节此夹角为  $90^\circ$ ，此时无光线透过目镜。放入欲观察的具有双折射性质的物体后，从目镜中可看到该物体的放大的像。这种显微镜用于研究晶体或活细胞的结构细节。

**荧光显微镜** 如果显微镜的观察物自身能发光，就不需要照明系统。荧光显微镜是用一定波长的光使标本受激发而产生荧光，通过目镜可以看到标本的荧光彩色图像。这种显微镜的优点是发现目标快，容易鉴别，适用于进行活体观察，其缺点是荧光亮度不足。光源常用溴钨灯、超高压汞灯或白炽灯，并配备相应的滤色系统以选取特定的波长。

**显微照相** 目镜把物镜形成的标本的实像放大后投影到感光胶片上，拍摄成照片。因为显微镜的分辨本领与光波波长成反比，故用紫外光作显微照相可以提高分辨本领。根据用途不同，有金相显微摄影和生物显微摄影

等。

**显像管 (picture tube)** 能够将电信号转换为光图像的电子束管。可分为黑白显像管和彩色显像管两大类。显像管由电子枪、荧光屏和玻璃外壳三部分组成，如图所示。电子枪位于细圆柱形管颈内，它发射出高速电子束撞击到荧光屏上。在荧光屏内表面涂敷有荧光粉，当电子枪发射出的高速电子撞击荧光屏时，屏上的荧光粉便会受激发光。彩色显像管的荧光屏内表面涂有三种基色（红、绿、蓝色）荧光粉，同时安装有控制三色的三角形排列的三支电子枪以及控制线路，以便使分别代表三基色的电子束能正确打到三基色的荧光粉点上。其间放置有荫罩板。在 64 厘米（25 英寸）彩色管荫罩板上大约有 50 万个圆孔，这样荧光屏上就有  $3 \times 50$  万个荧光粉点。

#### 显像管结构原理图

显像管屏幕从正面看近似长方形，宽高之比约为 4 : 3。显像管的尺寸是指屏幕对角线的长度。常用的显像管有 31 厘米（12 英寸）、35 厘米（14 英寸）、46 厘米（18 英寸）、51 厘米（20 英寸）、64 厘米（25 英寸）等。电视机的质量指标如图像的清晰度、灰度、对比度、亮度、色度等最终都要表现在显像管上，因此，要获得高质量的电视图像，就必须要有有一个高质量的显像管。

**线电流 (line current)** 三相系统中通过各端线的电流。常用  $I_l$  表示。在星形联接电路中，线电流与相电流相等， $I_l = I_\phi$ 。在对称三角形联接电路中，线电流有效值是相电流有效值的  $\sqrt{3}$  倍，即  $I_l = \sqrt{3}I_\phi$ 。

**线电压 (line voltage)** 发电机各联接绕组或各相负载的相应端点间的电压，即两根端线间的电压。常用  $V_l$  表示。在星形联接电路中，线电压有效值是相电压有效值  $V_\phi$  的  $\sqrt{3}$  倍，即  $V_l = \sqrt{3}V_\phi$ 。在三角形联接电路中，线电压与相电压相等， $V_l = V_\phi$ 。

**线形 (line shape)** 光谱线的轮廓。又称谱线形状或谱线轮廓。理想单色光的频率是一个确定的常量。在光强按频率分布的函数图上，理想单色光可用它的频率值上的一条垂直几何线表示，几何线的长度表示光强大小。但是任何实际光束的光强按频率分布图都不是这样。由于发光原子的能级存在着一定的固有宽度和寿命，也由于原子热运动或原子之间的碰撞，所以，原子发射的光谱线总有一定的频率宽度。光谱线强度随频率变化的函数图总呈现出钟形的分布，如图所示。在中心频率  $\nu_0$  处，光强最大；在中心频率两侧，光强对称地减小为零。光强减小至一半时两个半最大强度点之间的频率宽度为谱线宽度，简称线宽或半宽度。有时也用光强下降至  $1/e$  来定义线宽。典型的谱线形状有洛伦兹线形和高斯线形，与之相应的线宽称洛伦兹线宽和高斯线宽。

#### 光谱线强度分布

习惯上常用光强分布函数  $g(\nu) = I(\nu) / I_0$  作为纵坐标，其中  $I_0$  为光谱线的总强度，于是有

$$I_0 = \int_{-\infty}^{\infty} I(\nu) d\nu = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} g(\nu) d\nu,$$

所以  $\int_{-\infty}^{\infty} g(\nu) d\nu = 1$ 。它表示光强分布函数  $g(\nu) \sim \nu$  图中曲线下面的面积应为 1。这称为线型函数的归一化条件。

洛伦兹线形由于原子系统能级的寿命所引起的光谱线的展宽，称为谱线的自然宽度。由于发光原子与周围原子的碰撞使光波相位无规变化而引起的谱线展宽，称为碰撞宽度。两种情况的谱线形状都属洛伦兹线形。当两种情况同时存在时，谱线的宽度等于两种线宽之和。

高斯线形发光原子由于无规则热运动，使接受器所探测到的光的频率发生变化，造成谱线在一定频率区域内连续加宽。这称为多普勒加宽，相应的谱线形状为高斯线形，谱线宽度称为多普勒线宽。

非均匀加宽如果谱线加宽机制对所有发光原子的影响都相同，称为均匀加宽。如果对不同发光原子所产生的影响不同，称为非均匀加宽。前者的特点是，所有原子对谱线的各种频率成分都有贡献。后者的特点是，谱线的各种频率成分由不同原子所贡献。自然加宽、碰撞加宽为均匀加宽，热运动引起的多普勒加宽为非均匀加宽。

相差 (phase difference) 又称位相差或相位差。两个同频率的简谐振动的物理量在同一时刻的位相的差值。两个简谐振动的相差实际上就是它们初相的差值。设两同频率的简谐振动是

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \phi_1), \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \phi_2),$$

则第二简谐振动对于第一简谐振动的相差是  $\phi_2 - \phi_1$ 。若两简谐振动的相差是零或  $2\pi$  的偶数倍，这时两振动物理量将同步地随时间增加或减小，称此两简谐振动同相；若两简谐振动的相差是  $\pi$  或  $2\pi$  的奇数倍，这时两振动物理量随时间的增减变化正好相反，当一个物理量取极大值时，另一物理量取极小值，称此两简谐振动反相。若两简谐振动既不同相，也不反相，由于三角函数的周期性，总可以在初相中加上或减去周期  $2\pi$  的整数倍，使  $|\phi_2 - \phi_1|$  不大于  $\pi$ 。在此情况下，若  $\phi_2 > \phi_1$ ，称为第二简谐振动的位相比第一简谐振动的位相超前；若  $\phi_2 < \phi_1$ ，称前者比后者位相滞后。在图中，第二简谐振动的位相比第一简谐振动的位相超前了  $\pi/2$ 。两个以不同频率作振动的物理量的位相差，不等于它们初相的差值，而是随时间变化的。

#### 振动 2 的位相比振动 1 超前

相电流 (phase current) 通过三相交流电源或负载各相中的电流。常用  $I_\phi$  表示。在星形联接电路中，相电流与线电流相等， $I_\phi = I_l$ 。在对称三角形联接电路中，相电流有效值是线电流有效值的  $1/\sqrt{3}$  倍，即  $I_\phi = I_l / \sqrt{3}$ 。

相电压 (phase voltage) 发电机各相线圈两端或各相负载两端的电压。常用  $V_\phi$  表示。在星形联接电路中，相电压即端线与中性点间的电压，其有效值为线电压有效值  $V_l$  的  $1/\sqrt{3}$  倍，即  $V_\phi = V_l / \sqrt{3}$ 。在三角形联接电路中，相电压与线电压相等，即  $V_\phi = V_l$ 。

相对论 (relativity) 通常指狭义相对论。关于物质运动与时间和空间关系的理论。它与量子力学一起，构成了现代物理学的两大支柱。

相对论的产生相对论是在牛顿力学的观念与精确的电磁学实验发生尖锐矛盾的情况下产生的。按照牛顿力学中的速度合成公式，光在真空中的速度对于不同惯性参考系来说有不同的值。如果将光速的值为  $c$  的惯性系称为绝对参考系或“以太系”，则对于其他任何相对于该参考系做匀速运动的惯性系来说，真空中的光速将不是  $c$ 。因此可以通过测量光速的实验来确定惯性系本身的运动状况。然而，上述由牛顿力学的观念所推理出来的结论被精确的电磁学实验所否定。1881年，美国物理学家迈克耳孙利用他所发明的干涉仪（迈克耳孙干涉仪），试图精确测量地球上光的速度，并由此推算出地球相对于以太的速度。1887年，他又和莫雷合作，以更高的精度重复了这一实验。然而，他们精心设计的实验并没有发现所谓地球相对于以太的速度，地球上的光在真空中的速率仍然等于  $c$ 。面对迈克耳孙—莫雷实验的“负结果”，当时的物理学家没有任何后退余地，任何企图保留以太观念（即坚持用牛顿力学的观念解释电磁现象）而对迈克耳孙—莫雷实验作出的解释不可避免地与其他实验，如光行差实验（测量太空中恒星参考系中光速的实验）、“斐索实验”（测量地面上匀速流动的水流参考系中光速的实验）相矛盾。爱因斯坦的狭义相对论正是在这种经典物理学观念所造成的进退两难的困境中诞生的。

狭义相对论的两个基本假设爱因斯坦首先提出了两个基本假设，即相对性原理和光速不变原理，并把它们作为基本出发点，来构造他的狭义相对论。相对性原理可表述为：物理定律在不同惯性参考系中有相同的形式。该原理排除了任何绝对参考系的存在。光速不变原理可表述为：真空中光的速率恒为  $c$ 。这个原理也是麦克斯韦电磁理论和相对性原理相结合的产物。真空中麦克斯韦方程组中包含了光速  $c$  作为参数，如果相对性原理对于电磁现象成立，这个方程组在不同惯性参考系中应有相同的形式，因此在任何惯性参考系中光的速度恒为  $c$ 。然而光速不变原理与牛顿力学是不相容的。爱因斯坦对此则认为，电磁学理论已为迈克耳孙—莫雷实验及其他许多精确度很高的实验所证实，是完全可靠的，而证明牛顿力学的所有实验是在远比光速  $c$  小得多的低速领域内做的，力学实验的精度要比电磁学实验低得多。所以他认为，牛顿力学只是低速现象的一个近似理论，在高速现象中将会显示出偏差。因此还需要重新建立相对论力学，以代替牛顿力学。

洛伦兹变换从上述两个基本原理出发，首先可以导出时间和空间坐标从一个惯性系到另一个惯性系的变换关系。若惯性系  $s$  ( $t, x, y, z$ ) 相对于另一惯性系  $s'$  ( $t', x', y', z'$ ) 沿  $x$  轴方向以速度  $v$  运动，则有

$$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

这个变换称为洛伦兹变换，它反映了时间和空间之间的密切联系，一个惯性参考系中的时间在另一惯性系中可能变换为空间；一个惯性参考系中的空间在另一惯性系中可能变换为时间。因此在狭义相对论中常常引进“四

维空间”来统一表述时间和空间。在四维空间中可以引进四维坐标系，其中一根轴为时间坐标，另外三根轴为空间坐标。

在低速近似下 ( $v^2/c^2 \ll 1$ )，洛伦兹变换化为伽利略变换 ( $t' = t, x' = x - vt, y' = y, z' = z$ )。光速  $c$  出现在时空变换中，因此  $c$  成了自然界中的一个普适常数。当  $v > c$  时，因子  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$  为虚数，这是没有意

义的。因此自然界中任何物体的（相对）速度都不能大于  $c$ ，光速  $c$  也是一个“极限速度”。这个情况与牛顿力学中不同，在牛顿力学及其相应的伽利略变换中允许存在无限大速度。但是迄今为止的实验支持了相对论的观点，人们从未发现存在超光速客体。

**相对论运动学效应** 从洛伦兹变换可导出下列运动学的特点。同时性的相对性如果某一惯性系中不同空间点上的两个事件（这种事件可能是雷击或闪光，也可能是两粒子碰撞，基本粒子的产生或消失，或者简单地就是一个质点恰巧运动到该点等等）是同时发生的，则从相对于该参考系运动的其他惯性系的观察者来说，这两个事件并不同时发生。在狭义相对论中，同时性的观念没有绝对意义，只有相对意义。不过在同一空间点上发生的两个同时事件，其同时性仍然是绝对的。

**长度缩短** 一根棒的长度由它的两个端点的空间坐标确定。为了测量运动的棒的长度，必须“同时”测量该棒两端的空间坐标。这两个空间坐标点之间的距离就是该运动的棒的长度。狭义相对论预言，棒相对于观察者静止时的长度  $l_0$  与运动时的长度  $l$  之间存在如下关系：

$l = l_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}$ 。因为任何有质量物体的速度  $v$  总小于  $c$ ，所以  $l < l_0$ ，即运动棒的长度缩短了。

**时间膨胀** 设想在一惯性参考系中的某一空间点上先后发生了两个事件，该参考系中的观察者可用一只静止在该点处的钟记录这两个事件的时间间隔，这种时间间隔称为“固有时”（ $\tau$ ）。另一方面，对于相对于该参考系以速度  $v$  运动的另一惯性系中的观察者来说，这两个事件并非发生在同一地点，因此他要用固定在本参考系中两个不同空间点处的钟记录上述两个事件的时间间隔，这种时间间隔称为“坐标时”（ $t$ ）。由洛伦兹变换可知， $\tau = t \sqrt{1 - (v/c)^2}$ ，可见  $\tau < t$ ，即运动的钟变慢了，或者说时间膨胀了。

**相对论速度变换关系** 相对论速度变换公式可从洛伦兹变换导出。为简单起见，设质点相对于惯性系  $s$  的速度沿  $x$  轴方向，其值为  $u_x$ ，相对于  $s'$  系的速度为  $u'_x$ ，这里  $s'$  系相对于  $s$  系的速度为  $v$ ，且沿  $x$  轴方向。由洛伦兹变换可知，

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{vu_x}{c^2}},$$

此式与牛顿力学中的速度相加公式  $u'_x = u_x - v$  不同。只有当  $v$  和  $u_x$  都远小于  $c$  时，爱因斯坦速度变换关系才近似化为牛顿力学中的形式。上述相对论速度变换关系保证了光速相对于任何惯性系都是  $c$ 。例如，当  $u_x = c$  时，由上式可得  $u'_x = c$ 。

**质速关系与质能关系** 相对论中以速度  $u$  运动的质点的动量为



$$p = \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

其中  $m_0$  为该质点的“静质量”，即与该质点相对静止的观察者所测得的质量。在牛顿力学中质点动量的值与其速度的值成正比，但是在相对论中这个关系不再成立。上式形式上可记为  $p=mu$ ，其中

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

称为动质量。上式也称为质速关系。它表明，物体的质量随其速度的增大而增大；当物体的速度趋于光速  $c$  时，它的质量将趋于无限大。对于恒以光速  $c$  运动的客体（如电磁场或光），其静质量必然为零，即  $m_0=0$ 。上述动量和速度的关系最早由玻歇勒（1909年）、考夫曼（1910年）、盖伊和拉范采（1915年）通过实验直接证实。

狭义相对论的另一个或许是更重要的结果是关于物体的质量和能量的关系，简称质能关系：

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = mc^2。$$

上式表明，任何质量为  $m$  的物体具有量值为  $mc^2$  的能量。尤其是该物体静止时（ $m=m_0$ ），仍然具有能量  $E=m_0c^2$ ，称为该物体的静能。运动物体的动能于是可表示为  $T=mc^2-m_0c^2$ 。当物体的速度远小于光速  $c$  时，

$$\frac{1}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{c}\right)^2， \text{ 于是 } T = \frac{1}{2} m_0 u^2， \text{ 这是牛顿力学中关于物体动能}$$

的公式。物体的静能是相对论理论首先预言的一种新的能量形式，在一定条件下它可转化为动能，并进一步转化为热能、电磁能、化学能等。20世纪30年代后，原子核的裂变和聚变反应中释放出巨大能量的现象证实了这一预言。

相对论力学（relativistic mechanics）与狭义相对论一致的力学理论。相对论中动量与速度的关系是

$$p = mu = \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}，$$

其中  $m_0$  为物体的静质量。牛顿第二定律在相对论中的形式为

$$F = \frac{dp}{dt} = m \frac{du}{dt} + u \frac{dm}{dt}，$$

其中  $\frac{du}{dt}=a$  是物体的加速度。由于  $m$  与速度  $u$  有关，而速度又与时间  $t$

有关，所以  $\frac{dm}{dt} \neq 0$ 。可见，在相对论中力学的基本定律不再具有简单的  $F=ma$  的形式。此外，相对论中物体的能量为  $E=mc^2$ ，静能为  $E_0=m_0c^2$ ，动能为  $T=E-E_0=(m-m_0)c^2$ 。有了上述动量、动能和静能等物理量的定义后，动量守恒定律和能量守恒定律依然成立。当所讨论的物体的速度远小于光速  $c$

时，相对论力学便化为非相对论牛顿力学。

**相对性原理 (relativity principle)** 任何物理学理论必须遵循的一个原理。该原理可表述为，任何物理现象的基本运动规律在所有惯性系中相同。这个原理是物理学家通过长期实践而总结出来的一个基本结论，也是人们探索新的物理现象及其运动规律的基本出发点之一。

**伽利略相对性原理**该原理是在物体的速度比光在真空中的速度  $c$  小得多的力学现象的研究中发现的，这类力学现象的基本运动规律是牛顿第二定律。人们发现，无论在地面上还是在匀速运行的列车中做同样的力学实验（如自由落体实验），将得到完全相同的结论。这表明，不可能在一个惯性系中通过力学实验来确定该系统本身的运动状况。另一方面，如果不同惯性系的时间和空间坐标满足伽利略变换，则牛顿第二定律的形式在不同惯性系中的形式不变。因此力学现象中的相对性原理又可表述为：牛顿第二定律在伽利略变换下保持不变，故称为伽利略相对性原理。

**爱因斯坦相对性原理**通过对电磁现象的研究，人们发现伽利略相对性原理不能推广到电磁现象。19世纪最后20年间，一些非常精确的电磁学实验（如迈克耳孙-莫雷实验）的结果表明，电磁现象似乎也应满足相对性原理，即不能在一个惯性系内通过电磁学实验（例如测量光的速率）来确定该系统本身的运动状况。爱因斯坦于1905年假定，任何物理现象都满足相对性原理，即不可能在一个惯性系内通过力学的，电磁学的，或者其他类型的物理实验来确定该系统的运动状况。这个原理称为爱因斯坦相对性原理，或简称相对性原理。这个原理表明，在物理学中所有惯性系是等价的；自然界中不存在绝对参考系；一切物理运动都是相对的。爱因斯坦在这个假设的基础上建立了狭义相对论。电磁现象是人们最早研究的高速运动物理现象，其基本规律由麦克斯韦方程表示。为了使电磁现象的基本规律在不同惯性系中保持相同的形式，则不同惯性系的时间和空间坐标之间应满足“洛伦兹变换”。因此爱因斯坦相对性原理也可表述为，在洛伦兹变换下任何物理现象的基本运动规律保持不变。于是人们发现，伽利略相对性原理并不正确。不过在低速情况下，洛伦兹变换将近似化为伽利略变换。所以对于速度远比光速  $c$  小的物理现象来说，伽利略相对性原理近似成立。

在微观领域，特别是在基本粒子领域中常常涉及到高速运动情况。近代在这些领域的大量实验完全证实了爱因斯坦相对性原理。

**相干性 (coherence)** 两个过程之间的相关性。在波动光学中说某种光源的光具有相干性，是指该光的光束经过两条不同路径再次相遇时会形成可观察的稳定的干涉图样。所以，相干光必须满足一定的条件。其实，任何两束光即使不满足相干光条件，在空间相遇后总会在某一时刻某一地点因干涉而使光强增强，另一些地方则因干涉而减弱。但是这种相干是暂时的，在另一时刻这种增强或减弱可能恰恰相反。在相干性的讨论中通常把这种暂态相干排除在外。

**时间相干性** 在同一光源形成的光场中，同一地点不同时刻的光之间的相干性。在这类问题的讨论中，常常引进所谓相干时间这个概念，它实质上是指相位的相关性能够维持的时间。在数量级上，相干时间是光波频率宽度  $\nu$  的倒数。对理想的单色光， $\nu=0$ ，因为它具有精确的频率值。于是它的相干时间为无穷大，具有最好的时间相干性。频率宽度愈大，光

的单色性愈差，相干时间愈小，时间相干性也就愈差。一般单色性较好的激光器，相干时间为  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  秒；热光源约为  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  秒。光在相干时间内传播的距离称为相干长度。相干长度可以理解为光源所发光的波列的几何长度。理想的单色光为简谐周期函数，它在空间上是无限长的，故其相干长度也为无限长。热光源的相干长度或波列几何长度在真空中约为几米。

空间相干性在同一光源形成的光场中，不同地点同一时刻的光之间的相干性。这个概念适用于扩展光源，可用相干面积来量度。若扩展光源的面积为  $(\Delta l)^2$ ，此面积内各点所发出的波长为  $\lambda$  的光通过与光源相距为  $R$  并与光传播方向垂直的平面上的两点，如果这两点位于由下式定义的相干面积

$$A = \left(\frac{\lambda R}{\Delta l}\right)^2$$

内，则称通过该两点的光是相干的。R 确定时，光源的横向尺寸越小，相干面积就越大，因而空间相干性也就越好。严格地说，空间相干性是指垂直于光传播方向的截面上的任意两点间的相干性。相干面积与相干长度的乘积称为相干体积。

**相干函数** 常常用相干函数这个量对光束相干性作定量描述。设  $S_1(x_1)$  与  $S_2(x_2)$  是空间中的任意两点（见图 1），这两点发出的光信号用时间复函数  $v_1$  和  $v_2$  表示。当光信号传播到 P 点会合后，P 点处时刻  $t$  的光信号可记为

$$v(t) = v_1(t - t_1) + v_2(t - t_2),$$

$$\text{式中 } t_1 = \frac{S_1 P}{c}, t_2 = \frac{S_2 P}{c}。$$

图 1 双光束相干

P 点的光强为

$$I(t) = v(t) v^*(t),$$

式中  $v^*(t)$  是  $v(t)$  的共轭复数。由于光电探测器的响应较慢，实际探测到的是一段时间内光信号的平均强度，即

$$I(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T v(t) v^*(t) dt = \langle v(t) v^*(t) \rangle$$

上式最后表式是一种简略写法。由于光强是平稳的，其平均值与时间起点的选择无关，故有

$$v_1(t - t_1) v_2(t - t_2) = v_1(t) v_2(t - \tau),$$

式中  $\tau = t_2 - t_1$ 。于是 P 点的平均光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2\text{Re}\{ \langle v_1(t) v_2(t - \tau) \rangle \},$$

式中  $I_1 = \langle v_1(t) v_1(t) \rangle$ ， $I_2 = \langle v_2(t) v_2(t) \rangle$ ，分别为  $S_1$  和  $S_2$  处的次波源在 P 点各自单独产生的光强。第三项是干涉项，Re 表示取实部。定义自相关函数  $\gamma_{11}(\tau)$  和  $\gamma_{22}(\tau)$  为

$$\gamma_{11}(\tau) = \langle v_1(t) v_1(t - \tau) \rangle,$$

$$\gamma_{22}(\tau) = \langle v_2(t) v_2(t - \tau) \rangle。$$

自相关函数描写了时间相干性，而  $\Gamma_{11}(0)$  和  $\Gamma_{22}(0)$  则表示  $S_1$  和  $S_2$  处的光强。再引入互相干函数  $\Gamma_{12}(\tau)$

$$\Gamma_{12}(\tau) = \langle v_1(t) v_2(t-\tau) \rangle,$$

可以看出，当  $\tau=0$  时， $\Gamma_{12}(0)$  描写了  $S_1$  和  $S_2$  光信号之间的空间相干性。归一化的相干函数称为复相干度  $\gamma_{12}(\tau)$ ，即

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{[\Gamma_{11}(0)\Gamma_{22}(0)]^{1/2}},$$

于是 P 点的平均光强可用  $\gamma_{12}(\tau)$  表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} \operatorname{Re}\{\gamma_{12}(\tau)\}.$$

当  $\gamma_{12}=0$  时， $I=I_1+I_2$ ，表示 P 点是两个完全不相干光的叠加，该点的光强为  $S_1$  光强  $I_1$  和  $S_2$  光强  $I_2$  之和。当  $|\gamma_{12}(\tau)|=1$  时，两个光信号完全相干。 $0 < |\gamma_{12}(\tau)| < 1$  时，两个光信号部分相干。P 点干涉条纹的可见度可表示为

$$F = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma_{12}(\tau)|,$$

就是说，复相干度的模确定了干涉条纹的可见度。

**布朗-特威斯实验** 相干函数描写了光场相位之间的相关性，其量纲为强度量纲，是一种所谓一阶相干性。1956 年汉伯里布朗和特威斯两人在用迈克耳孙星体干涉仪测量星体直径时，采用了一种所谓强度干涉法。这种方法中，以测定光子到达时涨落的相关性代替传统的相位相关性。实验示意图如图 2 所示。汞弧灯 S 发出的光被半镀银反射镜 M 分成两束后，投射到两个光电倍增管  $P_1$  和  $P_2$  上，输出的电信号强度分别正比于入射光强  $I_1(t)$  和  $I_2(t)$ 。分别经过滤波和放大器装置  $A_1$  和  $A_2$  后，消除了信号中的直流分量，仅让涨落  $\Delta I_1(t) = I_1(t) - \langle I_1 \rangle$  和  $\Delta I_2(t) = I_2(t) - \langle I_2 \rangle$  送进相关器 C。用一台积分马达 N 将相关器 C 得到的强度起伏乘积的时间平均值记录下来，从而测得两个强度涨落之间的相关性。与用振幅定义一阶相干函数相类似，现在用强度定义二阶相干函数和二阶复相干度，并用上角标 (1) 和 (2) 分别代表一阶和二阶相干量。如果光场中只有  $\gamma_{12}^{(1)}(\tau) = 1$  成立，就说该光场具有一阶相干性。如果  $\gamma_{12}^{(1)}(\tau) = 1$  和  $\gamma_{12}^{(2)}(\tau) = 1$  同时成立，就说该光场具有二阶相干性。可以证明，严格的经典单色波具有二阶相干性。而热光源发出的光场不具有二阶相干性。利用同样的方法还可以定义高阶相干函数和相干度。现在，二阶相干技术和高阶相干技术已在超短脉冲测量和快速弛豫过程研究中得到应用。

**相和相变 (phase and phase transition)** 相一个处于热平衡状态的物质系统，可能处于

图 2 光强涨落相关性

一个从宏观上看其物理性质和化学性质处处相同的均匀状态，这时该状态通常称为物质的一个相。在一定的外界条件下，物质系统也可能呈现出若干个宏观上可分离的不同的均匀状态，这些状态之间能彼此处于热平衡，而且互相共存，这些不同的均匀状态就称为该物质的不同的相。

任何物质的气态只有一个相。多种不同的气体相互混合，在达到热平衡时不会出现宏观上可分离的不同的均匀部分，因此，混合气体也只有一个相。由一种化学组分（一个组元）构成的物质的液态只有一个相。两种不同物质的液态如果能相互混合，则形成一个相（例如纯水和乙醇的混合）；如果不能混合，就会出现宏观可分离的界面，形成两个相（例如水和油）。物质的固态情况比较复杂，结晶态可以有多种结构，它们分别属于不同的相，而非晶态只有一个相。

由一个组元构成的物质在一定条件下可以分别处于不同的相，也可能出现多相共存形成单元复相系。例如水、冰和汽就是一种单元系的三个相，在温度  $t=0.01$  ，压强  $p=610.881$  帕时，这三个相可以共存，这就是相图上的三相点。由  $k$  个组元构成的物质可以形成多元复相系，整个系统允许共存的  $\varphi$  个相与相平衡点可以独立改变的强度量变数的数目  $f$  之间存在如下关系

$$f=k+2-\varphi,$$

这就是吉布斯相律。当  $f=0$ ，即不存在可独立改变的强度量变数时， $k$  个组元的多元复相系最多可以有  $\varphi=k+2$  个相共存。

相变及其分类在平衡状态下，不同相之间发生的互相转变称为平衡相变（以下所指的相变均指平衡相变）。为了更好地认识各种相变的物质特征，1933年厄任费斯脱首先按照相变点处的热力学势及其导数的连续性对相变进行了系统的分类。如果在相变点两相的化学势连续，但化学势的一阶偏导数代表的性质发生跃变，而且跃变量是有限的，则该相变称为一级相变。一级相变发生时存在体积的突变和相变潜热。如果在相变点两相的化学势以及化学势的一阶偏导数连续，但化学势的二阶偏导数代表的性质发生有限的跃变，则该相变称为二级相变。二级相变发生时既无体积变化也不存在潜热，但作为化学势二阶偏导数的定压热容量、定压膨胀系数和等温压缩系数存在突变。一般说来，如果两相的化学势和化学势的一级、二级直至  $(n-1)$  级的偏导数连续，但  $n$  级偏导数存在突变，则该相变称为  $n$  级相变。自然界中已发现的只有一级相变（例如普通的气液相变和在外磁场中的正常导体-超导转变）和二级相变（例如在气液临界点上的相变和没有外磁场的正常导体—超导转变）。理想玻色气体的玻色-爱因斯坦凝聚在理论上是三级相变。但现实的玻色系统仍表现为二级相变。

范德瓦耳斯方程和气液相变为了描述气液相变，范德瓦耳斯在 1873 年在计入气体分子两种相互作用后，讨论了实际气体的相变问题。首先，他假设每个气体分子是具有一定体积  $b$  的刚球，从而气体分子活动的有效体积比容器体积  $V$  减少  $Nb$  ( $N$  为气体分子数)，这相当于气体分子在分子直径的作用力程上存在很强的排斥力。其次，他假设气体分子在较远的距离上存在微弱的相互吸引作用，从而使气体内部产生附加的内压强  $(\frac{N}{V})^2 a$  ( $a$  是与气体性质有关的常量)，于是理想气体状态方程应修改为

$$(p + (\frac{N}{V})^2 a) (V - Nb) = NkT,$$

这就是著名的范德瓦耳斯方程。它较好地反映出高压强下实际气体的状态变化关系。

图 1

在  $p$ - $V$  图上可以画出范德瓦耳斯等温线 (见图 1)。当温度很高时, 范德瓦耳斯等温线非常接近于理想气体的等温线, 而在温度较低时, 范德瓦耳斯等温线存在着一个极大值和一个极小值。随着温度的升高, 这两个极值逐渐靠拢, 最后在临界温度  $T=T_c$  的等温线上互相重合为一个点  $C$ 。  $C$  称为临界点, 相应的压强  $p_c$  称为临界压强。临界点  $C$  就是  $p$ - $T$  相平衡图上汽化曲线的端点。由于临界点的存在, 可以使物质从液态连续地转变为气态, 一旦超过临界点, 液态和气态的区别也就不复存在。早在 1869 年, 英国物理学家安德鲁斯就在实验中发现, 当温度达到  $31^\circ\text{C}$  附近时, 二氧化碳的液态和气态的密度差别就消失了。范德瓦耳斯利用分子动理论观念提出的状态方程正是从理论上预言了气液相变临界点的存在。容易看出, 在临界点  $C$ , 有

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right) = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 p}{\partial V^2}\right)_{T_c} = 0,$$

把范德瓦耳斯方程代入后, 可以得到临界参量

$$V_c = 3Nb; \quad T_c = \frac{8a}{27bk}; \quad p_c = \frac{a}{27b^2}.$$

如果以  $V_c$ 、 $T_c$  和  $p_c$  作为测量体积、温度和压强的单位, 引入三个无量纲的量

$$\bar{V} = \frac{V}{V_c}; \quad \bar{T} = \frac{T}{T_c}; \quad \bar{p} = \frac{p}{p_c}$$

代回范德瓦耳斯方程, 可以得到

$$\left(\bar{p} + \frac{3}{\bar{V}^2}\right)(3\bar{V} - 1) = 8\bar{T}.$$

这个方程中不再出现与气体性质有关的常量  $a$  和  $b$ 。而且  $\bar{p}$ ,  $\bar{V}$ ,  $\bar{T}$  是以偏离临界点的程度来度量的, 不同气体的  $p_c$ 、 $V_c$ 、 $T_c$  可能不相同, 但当它们偏离临界点程度相同时, 都服从以上的方程。事实上, 许多气体在一定压力和一定的体积范围内相当好地遵循这个方程。这个方程不但比范德瓦耳斯方程有更广泛的应用, 而且它在理论上第一次揭示出在相交点附近各种气体的气液相变所具有的普适规律。

在  $T < T_c$  的范德瓦耳斯等温线上有一段曲线的  $\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T > 0$ , 根据热力学基本原理, 这段曲线不能与实际的稳定的物质状态相对应。利用热力学稳定平衡判据, 可以发现在沿等温线压缩气体时, 气体将沿着一个平衡压强经气液两相共存的状态逐渐转变为液态, 这个平衡压强所处的位置将保证两相共存的状态为稳定平衡状态, 并且符合麦克斯韦等面积法则 (见图 2)。面积 (LMN) = 面积 (NOG)。图中曲线 MNO 上的状态是不能实现的。但曲线 LM 和 OG 上的状态不违反热力学稳定条件, 在实验上也是可以观察到的。LM 段对应过热液体状态, 沿等温线使液体减低压强时, 它可以越过共存区边界点 L 进入对应更低温的等温线区域而不气化。类似地, OG 段对应过冷气体状态, 沿等温线压缩气体时, 它可以越过共存区边界点 G 进入对应更高温的等温线区域而不液化。过热液体和过冷气体都属于亚稳定平衡态。

**二级相变和朗道的相变理论** 在二级相变过程中，系统的状态可以连续地从一个相转变到另一个相，因而又称连续相变。这类相变的主要特征是，在相变点上系统的对称性将发生突变。例如在铁磁相，原子磁矩形成有序排列，表现为自发磁化，这是在方向上对称性

图 2

较低的状态。随着温度升高，自发磁化逐渐变小，在达到居里温度时自发磁化变为零，系统进入对称性较高的状态——顺磁态。在二级相变中，通常是温度较低的相对称性较低，对应于比较有规则的状态（有序态），高温相对称性较高，对应于比较混乱的状态（无序态）。朗道采用一个序参量作为对系统有序程度的度量。例如在铁磁-顺磁相变中，取自发磁化强度为序参量  $\eta$ ，则  $\eta=0$  代表对称性高的顺磁态，即无序态， $\eta \neq 0$  代表对称性低的铁磁态，即有序态。在一定的温度  $T$  和压强  $p$  之下， $\eta$  的平衡值  $\eta_e$ ，由热力学势  $G=G(T, p, \eta)$  的极值条件  $(\frac{\partial G}{\partial \eta})_T = 0$  决定，相变点就是  $\eta_e=0$  的临界态。

根据序参量可以连续变化的性质，朗道提出可以把热力学势  $G(T, p, \eta)$  在相变点邻域内展开为  $\eta$  的幂级数

$$G(T, p, \eta) = G_0 + A\eta^2 + B\eta^4 + \dots$$

由低温相和高温相的不同对称性可以证明  $\eta_e=0$  利用稳定平衡条件又可得到在低温相  $A < 0$ ，在高温相  $A > 0$ ，因而可假设  $A = a(T - T_c)$  ( $a$  是常数)。由相变点本身必须是稳定的条件又可导致  $B > 0, C > 0$ 。  $G$  在相变点为极小值， $(\frac{\partial G}{\partial \eta}) = 0$ ，从而得到

$$\eta_e(T, P) = \begin{cases} 0 & T > T_c \\ \pm [-\frac{A}{2C}]^{1/2} & \\ = \pm [\frac{a}{2C}(T_c - T)]^{1/2}, & T < T_c \end{cases}$$

因此，在高温相  $T > T_c$ ， $\eta_e=0$ ，无自发磁化，在低温相  $T < T_c$ ， $\eta_e \neq 0$ ，出现自发磁化（见图 3）。忽略展开式中的高次项，可以得到，在相变点  $T=T_c$ ，熵  $S$  和体积  $V$  作为  $G$  的一阶偏导数都是连续的，但比热作为  $G$  的二阶偏导数存在突变，突变量是  $C_p = \frac{a^2 T_c}{2C}$ ，由  $C_p$ ，还可以求得热膨胀系数、等温压缩系数的突变量。

图 3

朗道的相变理论利用了热力学系数在相变点上的奇点行为，解决了不同对称性两相之间在二级相变过程中热力学量的突变问题。这个理论目前仅适用于通常三维物体中的相变，而不适用于二维物体（平面晶格）的相变。现代实验技术还表明，对各向同性的铁磁体，在临界点附近小于

$\frac{T - T_c}{T_c} \sim 10^{-2}$  的范围内，朗道相变理论已不再适用，而对超导体，至今尚未观察到偏离朗道理论的结果。

**相互作用 (interaction)** 在物理学中，指一切作用都是相互的。相互作用的表现是力，它使发生相互作用的物体运动状态发生变化。物质之间存在着多种多样的相互作用，正是由于这些相互作用导致物质粒子的产生、湮灭和转化，构成了物质运动的丰富生动的图像。迄今为止，人们发现自然界有如下四种基本相互作用。

**强相互作用** 结合核子成为原子核的核力以及介子和重子相互碰撞时产生粒子过程的相互作用，其强度的数量级约为  $1 \sim 10$ 。其有效力程约为  $\sim 10^{-13}$  厘米，当两个强子相互接近到相距  $\sim 10^{-13}$  厘米左右时，它们几乎肯定会发生强相互作用。假定粒子的速度接近光速，那末通过这段  $\sim 10^{-13}$  厘米的有效力程时，所需要的时间将是  $\sim 10^{-23}$  秒。也就是说强相互作用在  $\sim 10^{-23}$  秒内进行完毕，这个时间就成了强相互作用的特征时间。在强相互作用的过程中所有守恒定律都成立，具有最高的对称性。光子和轻子没有直接的强相互作用，而重子和介子具有直接的强相互作用，所以我们把重子和介子统称为强子。

**电磁相互作用** 所有荷电粒子和光子之间的相互作用，其强度的数量级约为  $10^{-2}$ 。其有效力程可达无穷远（当然作用力的大小还是随距离增加而减小的）。光子是电磁作用的媒介粒子。荷电粒子之间的电磁作用是由于它们之间交换了光子而形成的。守恒定律中例如同位旋守恒，在电磁作用中遭到破坏。电磁相互作用的特征时间约为  $10^{-21}$  秒。电磁相互作用理论是目前各种相互作用理论中发展得最完整的理论，也是各种相互作用的典范。

**弱相互作用** 除光子外，粒子都具有弱相互作用，主要表现在粒子衰变过程。其强度的数量级在低能时约为  $10^{-6}$ ，在高能时可达  $10^{-5}$ 。守恒定律中例如同位旋、奇异数、宇称、电荷共轭等不变性均遭到破坏。弱相互作用的有效力程  $< 10^{-15}$  厘米，即使在这样短的距离内弱作用粒子相互作用的概率也只有  $10^{-10}$ ，弱相互作用产生所需要的时间可由  $10^{-8}$  秒直到 15 分钟。

**引力相互作用** 所有粒子都具有引力相互作用，其强度数量级约为  $10^{-38}$ ，其力程可达无限远处。由于其强度极小，而微观粒子的质量又都很小，因此在微观粒子领域里，引力作用相对于其他作用常常是可被忽略不计的。可是在天体物理领域里，因天体质量巨大，引力相互作用又起着主导作用。

四种基本相互作用统一的研究这是物理学家一直关注的重大课题。爱因斯坦在建立广义相对论后，花很长时间致力于统一场论的研究，他希望能建立一个电磁作用和引力作用的统一理论。爱因斯坦的这个研究并没有取得成功，现在看来，主要在于物理学的发展在当时条件还不成熟。粒子物理学近 30 余年的研究探索表明，首先成功地统一起来的是弱相互作用和电磁相互作用。

1961 年，美国物理学家格拉肖首先提出了弱相互作用和电磁相互作用统一的猜想，预言中性弱流的存在，这就为弱相互作用和电磁相互作用统一的研究拉开了序幕。1967 年和 1968 年，美国物理学家温伯格和巴基斯坦物理学家萨拉姆各自独立地提出把弱相互作用和电磁相互作用统一起来



的具体方案，这方案把电磁相互作用的规范粒子（光子）和弱相互作用的规范粒子（中间矢量玻色子  $W$ ，中性矢量介子  $Z$ ）联在一起，把它们看成是同一矢量粒子家族中的成员，并采用黑格斯（Higgs）机制，使弱相互作用的规范粒子获得质量，同时猜想这个理论能够重正化。这就是温伯格-萨拉姆的电弱统一理论。

电弱统一理论除了可以解释已知的弱相互作用和电磁相互作用的基本规律外，还要求存在中性流，即不转移电荷的弱相互作用过程。在研究弱相互作用的几十年间，这种过程始终没有被发现。但由于格拉肖等人对它们的存在作出了预言，于是便在短短几年后，即 1973 年，在西欧核研究中心首先发现了中性流的径迹记录，随后又在费米实验室等处，从中微子诱发的反应中观察到这类过程。这就表明格拉肖等人所作的理论预言是正确的。

至于电弱统一理论最直接的实验验证，应是传递弱作用的  $W$  粒子和  $Z$  粒子的发现。理论预言  $W$  粒子的质量为  $(82.0 \pm 2.4)$  GeV， $Z$  粒子的质量为  $(93.0 \pm 2.0)$  GeV，由于它们的质量约为质子质量的 87 ~ 99 倍，一直到 1982 年才有可能在用加速器所进行的实验中产生。1982 年，西欧核研究中心发现了  $W$  粒子，其质量约为  $(80.9 \pm 1.5)$  GeV；1983 年，西欧核研究中心又发现了  $Z$  粒子，其质量约为  $(95.6 \pm 1.4)$  GeV。 $W$  粒子和  $Z$  粒子的发现，进一步支持了电弱统一理论。

电弱统一理论是  $SU(2) \times U(1)$  的规范理论，正是在电弱统一理论取得初步成功的启发下，人们又在研究揭示弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用统一的规范理论——大统一理论。而研究大统一理论的直接起因是对电弱统一理论的局限性分析，这里包括：由弱统一理论的标准模型中有两个耦合常数  $g_2$ 、 $g_1$ （或等价地， $e$ 、 $\sin w$ ），还不是真正的统一；

在这个理论中得不到电荷量子化的解释；夸克和轻子之间的联系不清楚；没有充分理由说明为什么三代粒子重复填充  $SU(2) \times U(1)$  的同样的表示；不能说明到底存在几代夸克和轻子。解决这些问题的一个自然的出路是走向大统一理论。

目前国际上提出了许多种大统一模型，各有不同的特点，但是迄今为止，并没有任何一个大统一模型得到实验的判定性检验。比较说来，最简单最有代表性的大统一模型是  $SU(5)$  模型，它可以概括的已知规律很多，同时又不引入过多的未发现的粒子，比起其他模型处于更重要的地位。事实上，其他许多模型都是以  $SU(5)$  模型为基础而建立的。

$SU(5)$  模型的基础是强作用的量子色动力学理论和电弱统一理论，它可以解释这两个理论可解释的实验。 $SU(5)$  模型在把强作用和弱作用进一步统一起来时所得到的新结果是，它可以算出电弱统一理论中未知参数的值，并且和实验测得的相符合。 $SU(5)$  模型中最重要的和过去理论不同的结果是，预言质子可以衰变，其平均寿命大约为  $10^{29} \sim 10^{33}$  年的范围，其取值取决于模型的具体细节和采用的假定。对于最小  $SU(5)$  模型，预言值  $< 10^{31}$  年，但现在关于质子衰变寿命的实验却  $> 10^{32}$  年，因此现有实验并不有利于  $SU(5)$  大统一模型。

近 10 余年来，许多理论物理学家又在探索建立起对称大统一模型，在这种模型中把四种基本相互作用都统一起来。这样的模型也提出多种，但总起来说还处于摸索的阶段，还没有一种模型得到判定性的支持。由于在

大统一理论范围内，各种可能的模型已被试探研究过，各种可作的探索研究也较充分进行过，因此，从 1980 年起，人们对基本相互作用统一的研究，已从大统一理论转移到超对称大统一理论方面来，成为认识基本相互作用统一的一个重要动向。

**相速度 (phase velocity)** 见波速

**响度 (loudness)** 又称音量或声量。人听觉所能判断的声音强弱的程度。响度取决于声强、频率和波形，与声强有密切关系，但并不就是声强。声强是声波本身的强弱，是客观存在的物理现象，而响度是人耳对声波感觉的强弱，是客观存在在主观上的反映。是物理现象与生理现象的综合。

响度的单位是“宋”（拉丁文“sonus”的音译，旧译作“ ”）。规定比正常人听阈高 40 分贝的 1000 赫纯音的响度为 1 宋。1 宋等于 1000 毫宋，1 毫宋相当于人耳刚能听到的声音。

**响度级 (loudness level)** 仿照声压级引入的一个概念。选取 1000 赫的纯音作基准声音，在无反射的环境中，如某种噪音听起来与该纯音一样响，这种噪音的响度级就等于这个纯音的声压级数值（分贝数值）。

响度级的单位是“方”（phon）。人耳对声音的灵敏度，不仅与声压级有关，而且是频率的函数，对低频声音的灵敏度较差。例如声压级为 50dB 的 100 赫声音，听起来却与声压级为 40dB 的 1000 赫纯音一样响，那么这一声音的响度级只有 40 方。利用与基准音比较的方法，可得整个可听区域的纯音的响度级，这就是等响曲线，它是通过大量实验测得的。

**像 (image)** 物点发出的单心光束，经光学系统后仍保持单心性不变，该心称为像。如果光束实际上的确是在该点会聚的，会聚点便称为实像。如果要把各条光线反向延伸后才会聚某点，则该会聚点称为虚像。把白纸放在实像的位置上，白纸将受会聚光束照射，发生漫反射，故可以看到白纸上有点。虚像则不能显示出亮点。

对于人眼来说，物和像都是进入瞳孔的发散光束的顶点。人眼判断光束顶点或寻找物的位置，都是沿刚进入瞳孔前光线的方向推算的。实物向各个方向都发出光线，人眼可以在不同位置上捕捉到这个发散光束的顶点。实像所在点确有光线会聚，各条光线在会聚点相交后将成为发散光束。继续它们的直线传播，人眼通过这种发散光束感知到该实像；但却不能看到形成这个实像的物。虚像所在点没有实际光线通过，人眼通过进入瞳孔前的光线的反向延长线，感知虚像的位置。像差 (aberration) 实际光学系统成像与理想光学系统成像的偏差。理想成像要求物点和光线都限制在近轴区域，但实际光学系统中，为了获得足够的光能量，光线不可能局限于近轴区域。其次，实际物体总有一定的线度，并非几何点。第三，实际成像光束多为复色光，系统对不同波长有不同折射率，因而同一物点所发出的不同波长的光，即使是近轴光，也不相交于一点。非近轴光形成几何像差，非单色光形成色差。

如果物是一平面，且垂直于光学系统的光轴，则理想的像要求：物面上每一点应有一个共轭像点与此对应；所有像点应位于同一垂直于光轴的像面上；各像点的放大率都相同；像的各部分应有与物同样的色彩。否则，像将是变形的或模糊不清的。如果光的单色性已有保证，形成的像差称为单色像差，主要包括：近轴物宽光束引起的球面像差和彗形像

差；远轴物窄光束引起的像散、像面弯曲和像形畸变。

球面像差简称球差。位于光轴上的物点所发出的宽光束，经光学系统后并不会聚于同一个像点而成为弥漫的圆斑。就单独一个凸透镜来说，近轴光形成的像点离透镜较远，远轴光形成的像点离透镜较近。对凹透镜则相反。通常的最远（或最近）交点与理想像点之间的距离称为纵向球差。远轴光射到理想像面（过理想像点且垂直于光轴的平面）上的点与理想像点之间的距离称为横向球差。球差大小与透镜曲率半径、透镜形状及媒质的折射率有关。利用会聚和发散两种透镜所产生的球差不同，把它们组合起来可以消除球差。

彗形像差靠近光轴的物点发出的宽光束经光学系统后在理想像面上形成彗星形状的像。原因是经过透镜不同环带的光线在理想像面上形成大小不同相互重叠的圆，其圆心与光轴有不同的距离，从而使形成的像形如彗星。如果垂直于光轴的物长为  $y$ ，对应的像长为  $y'$ ，光轴上物点发出的光线与光轴的夹角为  $u$ ，对应的共轭光线与光轴的夹角为  $u'$ ，入射线和出射线空间的折射率为  $n$  和  $n'$ ，则所谓阿贝正弦条件为  $n y \sin u = n' y' \sin u'$ 。满足该正弦条件的光学系统可消除彗形像差。

像散与像场弯曲远轴物狭窄同心光束经光学系统后其单心性被破坏，此时的像点变成了相交成相隔一段距离的两条相互垂直的焦线，称为像散。如果远轴物是一个较大的平面，即使光学系统的像散已经消除，像面仍将是一个曲面，称为像场弯曲。它和像散有关，决定于光学系统中各透镜的焦距与折射率之间的关系，而与透镜的形状及光束截面的粗细无关。

畸变离光轴远近不同的物点成像时，由于横向放大率不同而形成的一种像差。横向放大率随物点离开光轴的距离而增大时，为正畸变，又称枕形畸变；反之为负畸变，又称桶形畸变。

**消声器 (muffler)** 阻止声音传播而允许气流通过的装置。是降低空气动力性噪声的主要设备。一般装在空气动力设备（如空调设备）的气流通道上，使该设备的噪声降低。好的消声器应当是消音量大、空气动力性能好（阻损小）、结构性能好（体积小、坚固耐用）。消声器的型式很多，一般可分为：阻性消声器（利用吸声材料消声）；抗性消声器（根据声波滤波原理制成）；阻抗复合消声器（既有吸声材料，又有共振器、扩张室、穿孔屏一类滤波元件的消声器）。

**消声室 (anechoic room)** 所有边界上都覆盖能有效地吸收声能的吸声材料，使室内形成自由场的声学实验室。室内所有壁面都布满着在所要求的整个频率范围内能吸收 99% 以上入射声能的吸声尖劈。吸声尖劈是由吸声材料制成的，附图所示为其中一种结构。其吸声原理是：声波射入尖劈，经多次反射后，基本上能绝大部分吸收。为了防止外界噪声干扰，该室还具有很好的隔声和隔振措施。消声室好坏的标准是室内声压、反比距离规律的偏离程度，即在点声源发射的球面波自由声场中，无论何处声压都应与离声源的距离成反比。与此规律偏离越大，则消声室性能越差。消声室的用途主要是进行传声器的自由场校准，以建立空气中的声压基准；测试电声仪器、设备及器件等的声学性能；测定各种机器和设备等声源的噪声功率及声谱分析；有关语言、听觉、声波等的基本特性的研究。

吸声尖劈

**协同学 (synergetics)** 研究由大量子系统构成的非平衡系统,从无序到有序转变规律和特征的一门学科。由德国物理学家哈根在 70 年代创立。

自然界中除了存在着微观水平上原子和分子的各种结构外,在宏观尺度上也存在着各种不同的空间结构、时间结构和功能结构。这些结构表现出来的行为,不是子系统行为的简单叠加,而是子系统按照某种规则互相作用、互相协调、自己组织的结果。虽然子系统例如电子、原子、分子、细胞、神经元、器官、动物及人类的性质纷繁复杂,然而自组织的规则却十分相似。哈根正是为了强调子系统的协同性质在形成自组织过程中的作用而把它所创立的学说称为协同学。

自组织结构几个例子: 流体力学中的对流不稳定性。处于重力场中的液体层在上下两个表面之间保持一定的温度梯度时,一开始会在垂直方向上出现微观的热对流。当温度梯度逐渐增大到某一阈值时,微观层次的热对流发展为宏观上液体的流动,形成一种有规则的空间结构花样,花样的线度与液体层厚度的数量级相同。 泰勒不稳定性。在透明的外圆筒和同轴的内圆筒之间充满液体,当内圆筒以一定角速度转动时,被带动的液体呈现同轴流线的流动。当转速逐渐增大到某一阈值时,液体的流动出现新的运动模式,开始呈现周期性向内和向外的滚动。当转速达到第二个阈值时,滚动就以某一基频进行振荡,以后出现两个基频振荡,在一定条件下可观察到一系列新出现的基频振荡,它们分别是第一个基频的  $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \dots$  形成复杂的空间时间结构。 激光系统的受激辐射。当组成激光材料的原子受到外界激发或“泵浦”时,它们就会辐射光波。在泵浦功率比较低的情况下,激光器中发出完全不相干的光波。当泵浦功率增大到某一阈值时,激光器将发出方向性和相干性极好的正弦光波,呈现出一种空间结构。在泵浦功率再增大到第二个阈值时,激光器就发出强而短的的周期脉冲,形成时间结构。

以上提到的时间结构、空间结构以及更复杂的结构模式都发生在远离平衡的非平衡系统中,它们的出现不是来自外界输入的某种“指令”,而是依靠大量子系统互相协同的自组织行为。在电子线路的非线性振荡、化学反应、生物的形态发生等现象中,也都发现类似的自组织结构。

**协同学的基本原理** 找出表征协同系统性质的状态参量及其运动方程。在流体力学问题中状态参量可以是流体的密度或流速;在激光系统中电场强度、磁感应强度可以被选作为状态参量;在涉及化学反应时,分子的浓度就是一个状态参量。状态参量的运动变化一般既与时间有关,也依赖于状态参量的空间不均匀性,此外还会受外界控制参量(在激光系统中,泵浦速率就是一个控制参量)和内部或外部噪声的影响。综合以上种种因素,可以得出状态参量的非线性运动方程。 对非线性的状态参量方程在不稳定点附近作线性稳定性分析,找出不稳定模式和稳定模式。利用绝热消去技术和伺服原理(又称支配原理),消去与稳定模式对应的快变量,也就是将快变量用慢变量表示,从而使高维多自由度的问题约化为少量自由度的问题。 对留下的起支配作用的少数不稳定模式,讨论它们的状态参量随时间的变化,这种状态参量称为序参量。 随着控制参量的改变,一个受序参量支配的系统可能从均匀的各向同性的某种状态转变为非均匀

的一种有序状态，或者出现分岔现象，进入几种可能状态中的一种。在有序状态中也有可能伴随出现一种或多种不同频率的周期振荡，这就表现为宏观上的时间和空间自组织结构。

**协同学的广泛应用** 协同学的研究对象是由大量子系统组成的复杂系统，它吸取了平衡态相变理论中的序参量和绝热消去原理，采用随机理论建立序参量的演化方程，并以信息论、控制论的基础建立起自组织的理论框架，对诸如激光、非线性光学、流体力学、化学、气象学等自然科学领域，它一般都可以给出定量结果，对涉及社会科学问题它也能给予定性说明，因此，协同学刚一诞生，便受到各方的重视。由哈根领导的德国斯图加特学派，目前是世界上非平衡统计物理的主要学派之一。1981年哈根本人因他对激光理论的研究工作和在协同学的创立和发展方面的突破性成就而荣获美国富兰克林研究院的米切尔森奖章。1984年被授予联邦德国功勋科学家称号。

**谐音 (harmonic)** 频率为基频整数倍的分音。一般来说，发声体的振动都不是单一频率的振动，而是复合振动，它可以分解成几个不同频率的分振动。如除频率为  $f$  的振动外，同时还包含频率为  $f$  的整数倍如  $2f$ 、 $3f$ ……等振动，每一个振动频率产生一个音，它们都称为谐音。其中频率为  $f$  的称为第一谐音，频率为  $2f$  的称第二谐音，等等。第一谐音即为基音，其余称为泛音。

**心理声学 (psycho acoustics)** 声学的一个分支。它研究声音与引起听觉反应之间的关系，既属声学范畴，亦属心理物理学范畴，所以是一门边缘学科。人们对声音有判断悦耳与否的能力，有不同程度的喜怒哀乐的反应；此外，噪音对人们的情绪和工作效率有一定的影响。研究心理声学的目的主要是探索这些听觉心理反应的规律和物理量，并开发它们在各方面的应用，如建立各种噪声的评价标准、掌握声音掩蔽作用的定量规律、发展立体声技术、评价听音的音质等。**信号发生器 (signal generator)** 产生所需参数的电测试信号的仪器。它是工厂、科研部门、维修单位和实验室作为调试无线电设备、电子仪器、电子线路以及传输网络等用的信号源。它的用途广、品种多。按工作频率范围分为低频（音频）、视频、高频和超高频信号发生器等。按信号波形可分为正弦信号、函数（波形）信号、脉冲信号和随机信号发生器等四大类。

(1) 正弦信号发生器。产生正弦电压信号的仪器。主要用于测量电路和系统的频率特性、非线性失真、增益及灵敏度等。按频率覆盖范围有音频信号发生器（20~20000 赫）、视频信号发生器（1 赫~10 兆赫）、高频信号发生器（100 千赫~30 兆赫）、甚高频信号发生器（30~300 兆赫）及微波信号发生器（ $10^9$ ~ $10^{11}$  赫）等。

(2) 函数发生器。产生某些特定的周期性时间函数波形（主要是正弦波、方波、三角波、锯齿波和脉冲波等）信号的仪器。又称波形发生器。频率范围可从几毫赫甚至几微赫的超低频直到几十兆赫。可供通信、仪表和自动控制系统及非电测量领域使用。

(3) 脉冲信号发生器。产生宽度、幅度和重复频率可调的矩形脉冲的仪器。主要用于线性系统的瞬态响应的测试。也用于雷达、多路通信和其他脉冲数字系统的调试及性能的测试。

(4) 随机信号发生器。产生噪声信号和伪随机信号的仪器。主要应用于

测定系统的性能、噪声系数及系统的动态特性等。

星际航行 (interplanetary and interstellar navigation) 包括行星际航行和恒星际航行。前者是指太阳系内的航行, 后者是指太阳系以外的恒星际空间的飞行。不载人的行星际航行已经实现, 而恒星际航行尚处于探索阶段。1977 年发射的“旅行者”号探测器进行的是一次行星际航行。它在发射和入轨以后, 在接近木星时利用木星的引力加速并使它的航向偏转, 飞向土星。然后利用土星的引力加速, 飞向天王星。最后将离开太阳系, 飞出宇宙。通过木星、土星和天王星的飞行轨道, 大约每隔 45 年才有一次机会, 因此“旅行者”号探测器必须在 1977 年发射。“旅行者”号探测器从地面发射后, 在地球附近进行第一次制导, 目的是消除入轨时由运载火箭造成的误差。第二次制导大约在飞向木星的途中进行, 目的是消除第一次制导所造成的误差。以后还将进行 6 次制导。在太阳系内的飞行时间延续了数年。

利用现代火箭技术能使发射速度达到 20 千米/秒, 飞出太阳系, 但还不能实现恒星际飞行。因为用该发射速度航行达到最近恒星“比邻星”, 约需 65000 年。航天器只有达到接近光速, 恒星际航行才有实际意义。现阶段已有设想中的可用于未来恒星际航行的推进系统, 但无法在短时期中实现。根据爱因斯坦狭义相对论, 在以接近光速飞行的航天器上, 时间进程比地球上慢。设  $T$  是航天器上的时间,  $T_0$  是地球上的时间,  $v$  是航天器的速度,  $c$  是光速, 则有关系式:

$$T = T_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}。$$

例如, 当  $v=0.9c$  时, 有  $T=0.436T_0$ ; 当  $v=0.9999995c$  时, 航天器上的时间仅为地球上时间的千分之一。这样就有可能在人的寿命期限内, 完成一次往返极为遥远的恒星际航行。

#### “旅行者”号飞行路线简图

星形联接 (starconnection) 亦称“Y 形联接”, 简称“Y 接”。一种典型的电路联接方式。因其示意图形状而得名。三相电源的星形联结三相电源联接方式之一。

将三相交流发电机中的三个单相绕组的始端联接在一起成为公共端, 使三个尾端送电至负载的接法。参见“三相四线制”。

三相负载的星形联结当每相负载的额定电压与电源的相电压相同时所采用的联接方式 (图 1)。三相对称负载 (如三相交流电动机) 的星形联接既可使用三相三线制电源, 也可使用三相四线制电源。此时各相电路上的电流 (线电流) 也是对称的, 仅位相两两相差  $2\pi/3$ ; 而中性线电流为零, 故可以省去。但若为不对称负载的星形联结, 中性线将有电流流过, 只能采用三相四线制交流电源。

图 1 三相负载的星形联接

电阻的星形联接亦称“星形网络”。复杂电路中常见的一种电阻联接方式, 如图 2 中虚线部分所示。它可以等效地变换为三角形联接, 如实线部分所示, 变换式为

图 2 电阻 Y 接变换为 接

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c},$$

$$R_{te} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a},$$

$$R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}。$$

**形变 (deformation)** 物体在外力作用下所发生的形状和大小的改变。弹簧被拉而伸长，梁受负荷而弯曲，都是形变的例子。如形变不超过一定限度，撤去外力后，物体能完全恢复原状，这种形变称为弹性形变。其极限应力值称为弹性极限。材料的弹性极限值常随温度的升高而减小。如形变超出了这个限度，即使撤去外力，物体仍不能完全恢复原状，这时的形变称为范性形变或塑性形变。

**行波 (travelling wave)** 又称前进波。从波源发出后在空间不断向前传播的波。即在外部边界的介质中形成的波。例如在空气中传播的声波和各种电磁波。由于介质具有开放性，不会发生反射现象，因此行波具有传输能量和动量的特性。除驻波外，一般的波都是行波。

**行星 (planet)** 绕太阳或其他恒星公转的天体 (彗星、流星或卫星除外)。行星一词原意为天空中游荡的天体，希腊语中该词的含义是“流浪者”。行星本身一般不发射可见光，以反射太阳光或其他恒星的光而发亮。太阳系有九大行星，按距太阳由近到远的次序是：水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。人类对行星的认识和研究可追溯到遥远的古代，在我国的甲骨文中就有木星的记载。九大行星中最先被知晓的是水星、金星、火星、木星、土星。我国早在战国时期就有“五星”之说。太阳系中的另外三颗行星是在发明望远镜和建立开普勒定律、牛顿万有引力定律后发现的。1781 年赫歇耳用自制望远镜发现了天王星。

九大行星的物理参数

行星	符号	质量		体积 (⊕=1)	平均密度 10 <sup>3</sup> 千克/米 <sup>3</sup>	表面重力加 速度 (⊕=1)	逃逸速度千 米/秒
		克 (⊕=1)					
水星		3.3 × 10 <sup>26</sup>	0.0554	0.056	5.46	0.37	4.3
金星		4.87 × 10 <sup>27</sup>	0.815	0.856	5.26	0.88	10.3
地球	⊕	5.98 × 10 <sup>27</sup>	1.000	1.000	5.52	1	11.2
火星	♂	6.42 × 10 <sup>26</sup>	0.108	0.150	3.96	0.38	5.0
木星	J	1.90 × 10 <sup>30</sup>	317.94	1316	1.33	2.64	59.5
土星	S	5.69 × 10 <sup>29</sup>	95.18	745	0.70	1.15	35.6
天王星	U	8.74 × 10 <sup>28</sup>	14.63	65.2	1.24	1.17	21.4
海王星	N	1.03 × 10 <sup>29</sup>	17.22	57.1	1.66	1.18	23.6
冥王星	P	1.40 × 10 <sup>25</sup>	0.0024	0.009	1.50	0.05	1.2

法国的勒威耶和英国的亚当斯各自推算出海王星的位置，德国的伽勒于 1946 年用望远镜找到了它。最微弱的冥王星直至 1930 年才为美国的汤博发现。至于是否存在第十颗甚至更多的行星，仍在探索之中。此外，太

太阳系还存在 2000 颗以上质量较小的行星，称为小行星。

**旋光性 (optical activity)** 平面偏振光通过某种物质后振动面发生旋转的性质。能使平面偏振光的振动面旋转的物质称为旋光性物质。可用旋光本领定量表示物质的旋光性，它与物质中分子数目有关。对于晶体，旋光本领常常以 1 毫米厚度的材料作为标准。如水晶的旋光本领为  $21.7^\circ$ ，即偏振光通过 1 毫米厚的水晶后，其振动面将旋转  $21.7^\circ$ 。对于液体，取 10 厘米为单位厚度，并以每立方厘米含旋光物质 1 克为单位浓度。例如溶液全长为  $d$  厘米，每立方厘米含  $m$  克旋光物质，所产生的旋转角为  $\varphi$ ，则旋光本领为  $= \frac{10\varphi}{md}$ 。旋光本领与材料的温度和光的波长有关，例如  $a_{20}^D$ ，表示该旋光本领是用 D 谱线在 20℃ 时测得。

旋光性有重要的应用，利用它可测定某些旋光物质如樟脑和糖等的含量。目前已发现一些生命物质的旋光性质，如葡萄糖是右旋旋光物质，不同的氨基酸和脱氧核糖核酸 (DNA) 也有左右旋区别。对着光的传播方向看，电矢量按逆时针方向转动时，称为左旋；按顺时针方向转动时，称为右旋。相应地有右、左旋椭圆偏振光和圆偏振光。

**旋转泵 (rotary pump)** 用来排除容器里气体的机械装置，也称为机械泵。机械泵的种类较多，其中旋转式或者旋片式真空泵在物理实验中最常见。

旋片式真空泵的构造如图所示。圆筒形气缸由青铜或者铜材料制成。缸内钢质偏心圆柱柱体作为转子，能绕固定轴转动，转轴在气缸中心线的正上方，转子直径比气缸直径小，与气壁密接成一条直线，在剖面图上为一个点。沿着转子的直径嵌入两金属翼片，像光滑的刮板，由于弹簧（压簧）的向外作用，使翼片向外伸张，与气缸的内壁紧密接触。被抽气体由注入孔进入气缸，只有当缸内气体压力大于大气压和压簧压力之和才可能由排气孔排出。排气孔中的弹簧和钢珠的作用是单向通气的活阀装置，即只排而不入。

通常旋片式真空泵是由两个单级泵串联组成的。被抽的气体经过进气管先进入第二级泵，由第二级泵排出来的气体经过通道再进入第一级泵，最后由第一级泵排出。在进气管里装有过滤网，用来防止固体颗粒落到泵里，第一级泵的排气口上装有活阀，有气体排出时，把它顶开，没有气体排出时，就借助大气压使它压紧排气口。

### 旋转泵

- 1—排气孔 2—弹簧 3—金属翼片 4—气缸  
5—弹簧 6—金属翼片 7—偏心圆柱体 8—气体注入孔  
9—转子和气缸密接点 10—钢珠

整个泵放在一个盛有泵油的外壳里，油面要略高于排气阀，使整个泵都浸在油里。泵油的作用是使泵的各个部件得到润滑和冷却，又使泵得到可靠的密封。为了防止泵油的渗漏，经常换用耐油橡胶制成的密封垫圈。压板固定时，各处压力要均匀，周围要有专用垫盘，以免污染环境。

**旋转磁场 (rotating magnetic field)** 空间分布按一定方向做周期性旋转变化的磁场。在这种磁场中，每一点处的磁感应强度的大小和方向都按一定规律做周期性变化。例如，旋转磁极式发电机中通过转动电



磁铁而产生旋转磁场，该旋转磁场再与固定的电枢绕组相对运动而产生感应电动势。感应电动机则是利用旋转磁场对载流导体产生安培力作用将电能转化为机械能。旋转磁场可由旋转磁体产生，也可以在定子绕组中以适当的方式通以交流电而产生。

**选择题 (coded answer question)** 解答问题时只要从给出的一组答案中选取正确答案的试题。物理测验中的选择题按题目结构和应答方式可以分成以下几类：两分式识别选择题、多项选择题、配置型选择题、组合判断型选择题等。

(1)两分式识别选择题。题目要求从所给的一组备选项目中识别出符合要求的正确答案。例如：下列物理量中哪些是矢量？ 温度， 力， 速度， 力矩， 动量， 动能， 质量， 加速度， 电流强度， 热量。这种选择题最适宜于测试应试者的两项分类能力，它只能了解考生的记忆水平。

(2)多项选择题。多项选择题要求应试者在一组备选答案中挑选出符合要求的正确答案，它使用得最广泛。按正确答案的个数，多项选择题在物理测验中分为单一和复式答案两种。 单一答案多项选择题：它由题干和备选项目组成。其中只有一个正确的备选项目，即答案。其他错误的项目叫做似真选项，这些选项有似是而非的似真性，对概念不清、思路混乱的被试者起到一定的诱答作用。单一答案多项选择题可以是三选一、四选一或五选一。备选项目数越大，命题和答题的难度也越大。备选项目数少，考生猜中的概率就高。 复式答案多项选择题：它由题干、备选项目和最终复式选项三部分组成。复式答案多项选择题的一组备选项目中，正确答案的个数没有限制。最后按各种方式组合备选项目，给出一组（一般是 4 至 5 个）最终复式选项。例如有三个备选项目 A、B、C，最终复式选项可设计为（ ）只有 A 对，（ ）只有 A、B 对，（ ）B、C、D 对，（ ）全部都对，（ ）C 和 D 对。让应试者从中选出全部由正确答案的编号组成的一项，这种复式答案选择题保持了单一答案选择题几选一的特点，从而保持了对这两种多项选择题的评分和统计分析的一致性。复式答案多项选择题也叫做多重选择题，如果题目不给出最终复式选项，就要求考生直接选出所有正确答案，会明显增加部分猜对的可能性，并造成统计分析上的困难。严格地说，对不设最终选项的多重选择题，只有选出所有正确答案，才算答对，选错和少选都不能得分。单一答案选择题和给出最终复式选项的多重选择题的优点是便于统计分析，这使它们能在大规模的考试中广泛使用。

(3)配置型选择题。要求考生在一组题干跟一组备选项目之间作出对应的选择。例如：题中图(a)~(e)表示一物理量 y 是另一物理量 x 的函数。对下列三种情况，分别选择一个最适当地阐明两个已确定的物理量之间关系的图线。把结果填在题后的表格中。

y	x
在恒温下，一定质量理想气体的压强跟体积的乘积。	气体的压强
在恒压下，一定质量	气体的摄氏温度。理想气体的体积。
在恒温下，一定质量气体的压强。	气体的体积。

答： \ \

配置型选择题能测试同一学科多方面的知识和能力，知识覆盖面较广，但选择题命题较费时。

(4)组合判断型选择题。它由备选项目完全相同、但题干不同的若干个多项选择题复合而成。例如：以下是五种运动和三种情况：A．单摆的振动，B．水平放置的弹簧振子的振动，C．竖直上抛运动，D．斜上抛运动，E．带电粒子垂直磁场方向射入匀强磁场的运动。

物体运动到某一时刻所受合外力为零，但是速度最大。

物体运动过程中所受外力恒定，但运动过程中某时刻速度可以为零。

物体运动过程中所受合外力是个变力，但速度大小却不变化。

判断以上五种运动中，存在 所述情况的是（ ），存在 所述情况的是（ ），存在 所述情况的是（ ）。

这种组合判断型选择题的最大优点是知识容量和覆盖面远较一般选择题大。考生要使所学的知识融会贯通，才能正确答题，所以它能测试较高层次的理解能力。它的命题和解题难度比一般多项选择题大。

薛定谔（Erwin Schrodinger 1887~1961）奥地利物理学家。生于维也纳。中学时代兴趣就很广泛，喜爱自然科学、语言和诗歌。1906年入维也纳大学，受玻耳兹曼继承人哈森诺尔的深刻影响。就在这期间，掌握了连续介质物理学中的本征值问题，为他后来的研究工作奠定了基础。1916年毕业于维也纳大学，获博士学位。在第一次世界大战中服过役，利用闲暇研究物理学。1921年任苏黎世大学教授。1927年任柏林大学教授。1933年任牛津大学教授。1936年任格拉茨大学教授。1956年任维也纳大学教授。

薛定谔是波动力学的创始人，获1933年诺贝尔物理学奖。1926年1~6月，一连发表了四篇论文，题目都是《量子化是本征值问题》，系统地阐明了波动力学理论。在爱因斯坦关于单原子理想气体的量子理论和德布罗意的物质波理论的启发下，感到玻尔原子模型所描述的电子在量子化的固定轨道上绕行和跃迁的理论不能令人满意，设想用波动力学来代替通常的力学描述。认为对于电子的运动来说应当能够找到一个波动方程，就像波动方程决定着光的传播那样，这个方程决定着这些波。通过通常力学：波动力学=几何光学：波动光学这样的类比，成功地确定了一系列做不同运动的电子的波动方程，只有当系统的能量取普朗克常数所决定的分立值时，这些方程才有确定的解，从而奠定了波动力学的基础。这些方程被称为薛定谔方程。在玻尔理论中，电子轨道的分立能量值是假设的，但在薛定谔理论中，它们完全是由薛定谔方程确定的。薛定谔方程在量子力学中占有极其重要的地位，它是描述微观粒子运动状态的基本方程。在粒子运动速率远小于光速的条件下，它与经典力学中的牛顿运动定律的价值相似，它还处理与光谱有关的问题提供了方便而简单的方法，成为当今物理学工作者不可缺少的工具。同年3月，发现并证明了波动力学和矩阵力学在数学上是等价的，是量子力学中的两种形式。与此同时，引入波函数（即 $\psi$ 函数）来描述微观客体的态，还建立了微扰的量子理论——量子力

学的近似法。

然而，由于薛定谔所受的教育是以完全的决定论为基础的经典物理学，他把波函数 $\psi$ 解释为三维空间中的振动振幅，把 $\psi\psi^*$ 解释为电荷密度，把粒子解释为波包，这样就无法解决“波包扩散”的困难，于是玻恩提出的波函数的统计解释，几乎为物理学界普遍接受。但是，薛定谔不喜欢用波和粒子所作的双重描述（对于波的统计解释），他想只用波来建立理论，这就导致他同一些重要物理学家特别是玻尔之间的争论。

薛定谔对分子生物学的发展也作出了贡献。1944年，发表了《生命是什么？》一书，该书宣传了基因是分子的观点，指出热力学、量子力学和化学理论都可以应用到生命本性的研究中去，引进非周期性晶体、负熵、遗传密码、量子跃迁式的突变等概念，还试图从物理学的角度解释DNA是怎样带有大量遗传基因的，从而使薛定谔成为分子生物学的先驱。

**学期教学计划 (syllabus for semester)** 每学期物理教学的总体安排计划。制定学期教学工作计划主要包括以下内容：学期教学的目的要求：从掌握基础知识、培养能力、思想教育等方面提出总体要求。各个课题教学时数的分配。各种实验（演示实验、分组实验、随堂实验等）的安排。复习和学生成绩考核的安排。其他有关教学工作，如课外物理活动、教学参观等事项的安排。

为此，学期教学进度表一般应包括以下几项栏目：周次、课时、课题（教学内容）、实验（包括演示、分组、随堂）、复习、考核和课外活动。

**学生分组实验 (students' laboratory work)** 在教师指导下，让学生以若干人为一组，用准备好的实验器材，利用整节课的时间，在实验室中进行的物理实验教学。学生分组实验首先要求学生明确实验目的、原理和步骤。实验时按程序规范操作，仔细观察，正确读数并记录，最后按规格写好实验报告。

学生分组实验一般可以分成以下几种类型。

**学会并熟练运用基本测量仪器的实验：**物理量的测量在物理实验中是十分重要和基本的。学生在中学阶段要接触许多量具和测量仪器，如刻度尺、弹簧秤、天平、温度计、安培计、伏特计、万用电表等。要知道这些仪器和器材的用途，准确熟练掌握仪器的使用方法、读数、精密度，了解部分仪器的原理、构造、性能，能根据装置图（或电路图）对基本的仪器进行正确的配套组装。

**运用已知规律，测定某些物理量的实验：**这类实验让学生运用已学过的物理知识和规律，去测定某些物理量，是中学物理实验中的一个重要内容。例如运用欧姆定律和电阻定律来测定金属的电阻率，运用外电路电阻的变化对电路影响的规律来测定电源的电动势和内电阻，运用单摆的周期公式测定当地的重力加速度等都是这类实验。这类实验有助于学生综合复习和运用旧知识，加深对物理规律的认识，培养动手能力。

**验证物理规律的实验：**这类实验是在学生已经学完某一知识内容后，为了巩固对该物理规律的认识而设计的。例如验证牛顿第二定律的实验，验证玻意耳—马略特定律的实验。实验要求学生通过验证，明确实验的指导思想，加深对规律的认识，培养实验的基本技能。

**探索型实验：**这类实验要求在教师的指导下，让学生运用已学过的知识，通过实验来探索物理规律。它的教学过程可以分为以下几个环节：提

出问题，明确实验目的（要研究哪些物理量或物理现象之间的关系），了解实验方案（通过什么实验手段对有关物理量或现象进行研究），进行实验、获得结果，分析结果、找出规律。例如“研究电磁感应现象”（楞次定律）。这类实验对学生和教师都有一定的要求，着重培养学生运用实验手段的探索能力，有助于他们掌握物理的思想和方法。

**简单设计型实验：**这类实验要求学生能自己设计一些简单的物理实验。学生能根据实验目的正确选择器材，设计装置，确定实验步骤，记录所测物理量，从而得出结论。例如要求测定小灯泡的电功率。这类实验的要求较高，给学生很大的活动余地，有助于培养学生的思维能力和动手能力。

学生分组实验是实验教学中的一个十分重要的环节。同一个课题也可以设计成不同类型的实验。在实验中，培养学生严谨的科学态度和动手动脑的良好习惯。

为了达到预期的实验效果，要加强教师的指导作用，一般应注意抓好以下几点：要求学生实验前先预习，明确实验的设计思想、原理、装置、步骤；并逐步要求学生自己设计记录表格，以备填写。实验仪器布局要合理、科学。对该调零的仪器使用前要先调零。培养学生严格按照规范使用仪器，进行操作。例如电学实验中应切断电源再联接线路，串联在电路中的可变电阻器的滑动头应先置于阻值最大处等。应记录原始数据，尊重实验事实，培养学生实事求是的科学态度。运算时注意有效数字的位数不可超过仪器和器材的精密度。要注意让每一个学生都有充分的动手机会，并注意相互的配合和协调。

**学习物理的思维过程**（process of conceptual work in learning physics）在学习物理中的心智活动过程。即把观察到的物理事实和现象在头脑中反复加工，使感性认识上升为理性认识的过程。该过程从问题开始，在寻求问题解答中深入，在检验答案中发展，以得到相应结论而告一段落。发现问题。思维是从问题开始的，所以物理学习中要学会善于发现问题。在初中物理学习中发现问题的一般方法主要有：因果法。见到一个物理现象，要习惯于寻求产生的原因是什么，这就提出了一系列的物理问题。比较与联想法。比较同一物体的不同部分或不同物体、不同现象之间的异同；比较新事实与原有知识之间的矛盾，联系到类似现象之间的异同等，常常可挖掘出不少物理问题。表达问题。发现问题后要进一步明确问题的特点与条件，理解问题的症结所在，正确地归纳和表达问题。

提出假设，分析解决问题。为了解决问题，要提出假设，建立物理模型，分析物理过程，考虑解答问题的方法。这样，思维就在寻求问题解答中深入。检验结论。根据假设，一旦找到解答，还要回到原来的问题中，弄清解答是否符合原来问题的条件，思维就在检验的过程中进一步发展。学生通过具体事例了解并掌握这些基本的思维和过程，对于提高自己的思维能力是十分重要的。

**学习物理的思维特点**（features of conceptual work in learning physics）获取物理知识过程中，心智活动的某些特殊表现。心理研究和物理教学实践表明，中学生学习物理具有如下思维特点。建立和掌握物理概念时应该重视思维定势具有重要作用。如在初中力的概念的教学中，力的定义是：力是物体和物体间的相互作用。因此在教学中无

论是做实验还是提问题，或是运用概念分析问题，如果反复扣住了相互作用，造成一种一提到力，学生就会出现相互作用的心理倾向，这种思维的定势在刚建立概念的时候对于把握概念、规律的实质是很有作用的。在思考和分析物理问题时易于用生活观念代替物理概念。生活中存在的大量物理现象，使学生形成了许多生活中的物理观念，这些观念与反映事物本质特征的严格的物理概念是不相符的，致使学生在较长时间内不能纳入以概念、规律为依据的物理学思维轨道上来。这说明物理概念和规律要真正被学生接受，必须重视在运用过程中的思维训练。表现出强烈的思维独立性与批判性，特别是当现象与本质不一致的时候，这种批判性将持续很长时间，如对力不是维持运动的原因，轻物和重物自由落体情况完全相等，持有明显的批判态度。学习物理的思维障碍（thought disturbances in learning physics）使物理学习出现困难的最主要心理原因。中学生学习物理产生思维障碍来自两个方面。一是学生原有的思维品质的缺陷，表现为思维的凝固性和片面性；二是来自物理环境、物理知识中的非本质因素和表面形式的影响，表现为思维的干扰性。

(1)凝固性思维障碍。这是指学生不能用发展的、开放的方式进行思维，是不能正确接受新知识或不能正确解决新问题的一种心理障碍。这种障碍突出地表现为先入为主和消极的思维定势两个方面。先入为主是指学生以自我为中心，从个人的日常经验和日常概念出发，想当然地对物理事件进行判断。当科学的结论和日常经验的直觉一致时，学生能用科学的概念进行思维，而当科学的结论与日常经验的直觉相反时，往往更相信自己的日常经验，用日常经验对问题做出解释。因此从某种意义上说，物理学习就是用科学的物理概念去置换头脑中先入概念的过程。如果这种置换的过程未能完成，在新的学习或解释问题中就必然出现先入为主的思维障碍。消极的思维定势是指学生把自己头脑中已有的、习惯了的思维方式不适当地生搬硬套到新的物理情境中去，是一种在满足已有成功的基础上所形成的主观的、僵化的心理准备。这种消极的心理准备限制了思维的灵活性，对相近或相关问题容易引起定向反射，把思维限制在狭窄的通道上。克服凝固性思维障碍的有效途径是多方位地进行思维，其中包括批判地对待自己原有的日常概念和日常经验，也要尽可能多地认识事物的各种形态。

(2)片面性思维障碍。这是指学生不能全面分析问题，只满足于对事物的一知半解，只凭对事物的局部了解就草率得出结论的一种心理障碍。这种障碍突出地表现在思维方法的片面性和不注意隐蔽因素两个方面。前者是只从事物局部表现分析问题，不能自觉地去把握整体、深入本质的思维缺陷。后者是不能自觉地分析、挖掘、利用给定问题中的隐蔽条件，只利用一些明显但不充分的条件去解决问题的思维缺陷。克服片面性思维障碍，就要学会全面地分析物理问题，要做到这一点，仅凭普通逻辑思维的训练是不够的，更重要的是要用辩证的观点分析问题，使辩证逻辑思维和普通逻辑思维在物理学习中并用，逐步做到全面地而不是片面地，发展地而不是静止地，相对地而不是绝对地看问题。这些都是良好思维品质的基本特征，也是避免相应的思维障碍产生的可靠保证。

(3)干扰性思维障碍。学习物理知识和解决物理问题都是信息传递的过程，而信息在传递过程中都要不同程度地受到干扰。对于学生来说，信息

传递中的干扰可分为客观干扰和主观干扰两大类。学习物理中的干扰性思维障碍就是由于主观干扰而形成的，它突出地表现在一是不能排除多余信息的干扰，即不能从给定的物理情境中挑选出与问题有关的条件或因素，同时滤去与问题无关的条件或因素。这些无关的条件或因素对正确回答问题形成一种干扰，使思维出现障碍。二是以数学形式代替物理思维，即以绝对化的、偏离物理模型的数学形式进行思维时，本来是物理语言和工具的数学，却成了一种干扰，影响学生对问题的物理实质的思考。克服干扰性思维障碍的有效途径是多接触真实、具体的物理情境，认识它们的复杂性，提高从真实、具体的物理情境中正确建立物理模型，分析物理过程的能力。与此同时，学习时要注意从物理实质上而不是单从数学形式上去理解知识，使用数学公式则要注意其物理意义。

**学习物理的兴趣特点 (interests in studying physics)** 中学生要求获取物理新知识的一种积极的心理表现。中学生对物理学习的兴趣状况大体有四种。 直觉兴趣：他们只满足于被新奇的物理现象所吸引，希望看到鲜明、生动的物理现象和物理实验，初中低年级学生的兴趣状况常常在这种阶段。 操作兴趣：学生要求通过自己的活动对自然现象和实验结果施加影响，表现为对动手操作具有浓厚的兴趣，这种兴趣的特点是只对操作对象本身感兴趣，忽视了对事物本质的认识，初中的多数学生和部分高中学生处于这种兴趣阶段。 有因果认识的兴趣：学生的兴趣中心已发展到进一步探求现象变化的原因，理解它的物理实质。多数高中学生对事物的因果关系特别感兴趣。 概括认识的兴趣：学生要求通过个别事物的因果联系来找到和掌握更多事物的一般规律，物理规律的普遍性对他们极具吸引力，达到这种兴趣的学生是极少数。

中学生学习物理的兴趣水平可分为两个层次，一是直接兴趣，即对事物本身感兴趣，二是间接兴趣，即对事物的原因、后果更感兴趣。中学物理教学首先要重视直接兴趣，从认识物理现象本身的兴趣开始，通过建立物理图景来展现物理现象和过程，从而不失时机地转向间接兴趣，即引起认识事物内部规律的兴趣，使兴趣不断得以深化。

**荀勖 ( ? ~ 289 )** 中国晋代律学家。字公晋，颍阴 (今河南省许昌市)人。在晋朝任中书监。他的重要贡献是制造了 12 支发音精确的笛管 (直吹，相当于今日的洞箫)，并于秦始皇十年 (274) 首次提出了管口校正数的计算方法。

在荀勖以前，我国古笛的制作没有一定成规，笛的 7 个孔位平均排列，不能符合乐律的准确要求，且用正规的乐律来考校，又不能相应。这主要是因为五度相生律的计算方法是从弦上产生的，应用在管上时，由于管内空气柱振动的波腹不能恰在管口，因而发生误差。再加上这种笛的管口与孔口都有空气柱逸出，对管口与孔口进行校正就相当复杂。然而荀勖根据制笛的实践经验，经过长期反复试验，终于得到了某律笛的管口校正数相当于该律律长与比它高四律的律长之差。按现代公式约可表示如下：

$$K = A_0 - \frac{64}{81} A_0$$

如黄钟笛的管口校正数  $K$  等于黄钟律长 ( $A_0$ ) 减去姑洗 (高于黄钟四律) 即  $\frac{64}{81} A_0$  的律长；所得的校正数  $K$  就是黄钟笛上宫音 (黄钟宫) 孔位与

吹口的相距长度短于其空气柱长的差数；由三分损益法计算得到的黄钟笛全长减去该校正数值  $K$ ，即得到黄钟笛的实际长度。其他 11 笛的笛口校正数与笛的实际长度，依此类推。荀勖的管口校正数是世界早期声学的重大成就之一。

**压差阻力 (Pressure drag)** 物体在流体中运动时, 由于流体的作用造成物体前半部压力的总作用力, 大于物体后半部压力的总作用力, 这两者的差就是压差阻力。当物体运动速度较大, 即雷诺数较大, 以致物体后面出现旋涡时, 压差阻力便成为主要阻力。但物体运动速度较小, 即雷诺数较小时, 阻力主要来源于粘滞阻力。压差阻力与物体形状有很大关系, 若将物体制成流线型, 则仅在尾部才形成涡流, 涡旋范围小, 能量损失小, 故压差阻力也大为减小。

**压电晶体 (piezoelectric crystal)** 见压电性。

**压电性 (piezoelectricity)** 晶体受压而处于应变状态时, 在晶体内会产生电场的性质。也可以观察到它的逆效应, 即外加电场后会引起晶体应变。石英晶体具有压电性, 是一种最常见的压电晶体。利用压电效应可以把机械能转换为电能, 或者把电能转换为机械能, 因此压电材料常用作换能器。此外压电性还可用于制造延迟线, 当电讯号转变为机械波时, 将以声速在石英棒中传播, 由于声速远小于光速, 从而实现了讯号的延迟。

压电性的微观机理在于晶体中离子电荷的位移。没有应变时, 电荷在晶格位置上的分布是对称的, 所以内部电场为零; 但当晶体处于应变状态时, 电荷发生位移, 电荷分布不再对称, 从而将出现净极化电荷, 并伴生电场, 这就表现为压电效应。由此可见, 只有无中心对称的晶体, 才会发生应变极化, 从而产生压电效应。

**压力 (pressure)** 又称压强。垂直作用在物体单位面积上的一种力。它存在于固体、液体、气体的内部, 或流体与固体、固体与固体相接触的界面上。习惯上, 在力学和工程学科中用“压力”一词, 而在物理学中用“压强”一词。由于流体不能产生切变, 不存在切应力, 因此对于静止流体, 不管力是如何作用的, 只存在垂直于接触面的力; 又因为流体的各向同性, 所以不管这些面如何取向, 在同一点上, 作用于单位面积上的力是相同的。此时压力可作标量, 但一般限于有关流体的问题中。在国际单位制中, 压力的单位是帕斯卡, 简称帕, 即牛顿/米<sup>2</sup>。另外常用的单位有巴、标准大气压、托、千克力/厘米<sup>2</sup>、毫米水银柱等。

**压强 (pressure)** 见压力。

**亚里士多德 (Aristotle 公元前 384 ~ 前 322)** 古希腊哲学家、科学家。生于希腊的斯塔古拉。17 岁起随柏拉图学习和工作了 20 年, 曾被聘为亚历山大大帝少年时的导师。公元前 335 年, 他曾在雅典兴办一所叫做“吕克昂”的学校, 并创建了自己的学派, 被称为“逍遥派”。

亚里士多德批判了其师柏拉图的唯心主义理念论, 把自然作为科学研究的客观对象, 并首先进行分类, 促使自然科学与社会科学逐渐演变为若干门独立科学。他所命名的“物理学”是泛指研究无生命物质的构成形式、运动现象及其原因与目的的科学。他在《物理学》(8 卷, 张竹明译, 商务印书馆 1982 年版)、《天论》(4 卷)、《起源与衰灭》(2 卷)、《气象学》(4 卷) 等著作中首先提出了物理学中一系列基本理论问题, 如物质、空间、时间、运动等, 并认为它们是彼此密切相关的, 主张物质、空间与时间的连续性, 反对存在“真空”的观点。其次他认为物理学基本上是思辨的, 物质的原初性质是两对对立物: “热与冷”、“干与湿”; 而



月层以下的一切物质是由土、水、气、火四种元素组成的；月层以上的天体则是由更纯洁的第五种元素“以太”构成。再次他也研究力学、声学 and 光学。他的两条力学运动定则（见亚里士多德的运动定则）都是错误的。他把声音看作为一种运动，把回声解释为声的反射（见古希腊罗马的物理知识）。他还反对欧几里得的视觉论。

亚里士多德的物理学，今天看来，根本性的缺陷在于：自然观带有浓厚的目的论的拟人色彩；方法论只注意简单的观察和严格的推理；在总结前人的具体成就时，抛弃了前人的进步思想，其中包括日心说和原子论。由于这些缺陷，造成了他的学说被教会加以神圣化的条件，成为后继物理学发展的严重障碍。

亚里士多德的运动定则（rule of motion of Aristotle）由亚里士多德提出的、研究物体位移运动的直觉经验定则。主要有两条：第一条，他认为“下落运动的快慢有两个原因：运动所通过的媒质不同（如通过水或土或空气），运动物体自身轻或重的程度不同，如果运动的其他条件相同的话”。因此他关于落体运动的定则是：“物体下落的时间与重量成反比，如一物重量是另一物的两倍，则在同一下落中只用一半的时间。”第二条，除上升下落外，地上物体的其他一切运动，他认为都是在作强迫运动：“任何运动的事物都必然有推动者。”因此他关于强迫运动的定则是：“设动力为  $F$ ，运动物体为  $m$ ，经过距离为  $s$ ，发生位置移动的时间为  $t$ ，则同一动力  $F$  在同一时间内将  $s/2$  移动  $2t$ ，或在  $t/2$  内使  $s/2$  移动距离  $s$ 。”由于教会的吹捧，这个错误的运动定则在 16 世纪以前一直被看作是神圣不可侵犯的教条。

颜色（colour）通过视觉系统所感知的可见光的色彩。

分类 颜色可分为非彩色和彩色两类。非彩色指白色、黑色和各种深浅不同的灰色。纯白是理想的完全反射体所显示的颜色，对任何波长可见光的反射率为 1；纯黑是理想的完全吸收体所显示的颜色，其反射率为 0。黑灰白等非彩色系列实质上决定于物体对光的不同的反射率，在视觉上表现为不同的明亮程度。明度是人眼对物体的明亮感觉，明度变化相应于亮度变化。愈接近白色，明度愈高；愈接近黑色，明度愈低。非彩色是中性色，它们对不同波长光的反射没有选择性。

彩色指黑白系列以外的各种颜色。彩色有三种特性：明度、色调和饱和度。黄褐色物体与红色物体相比，前者对可见光波段中各种波长的光有较大的反射率，故黄褐色物体比红色物体有更高的明度。色调是彩色赖以区分的特性。光源的色调实质上是指它的光谱成分对人眼产生的综合感觉。物体的色调取决于光源的色调和物体表面对各种波长的光的反射（或透射）情况。饱和度指彩色的纯洁性。可见光谱中各种单色光的饱和度最大。物体色的饱和度取决于物体表面对反射光谱的选择。非彩色没有色调和饱和度这两种特性。

颜色空间 表示颜色三种特性的锥形立体空间，见图 1。垂直轴代表黑白系列明度的变化，底端是黑色，顶端是白色，中间是各种过渡灰色。水平面的圆周表示色调，不同的点代表不同的光谱色调，圆和垂直轴的交点为中灰色，它的明度与圆周上各种色调的明度相同。圆周上饱和度最大，越接近圆心饱和度越小。颜色空间是理想模型空间，用以理解颜色三种特性的相互关系。

三原色 各种颜色可用红、绿、蓝三种光谱色按不同亮度比例相加混合而成，所以这三种光谱色称为三

图 1 颜色空间

原色，又称加法三原色。相应地还有所谓减法三原色，它们分别是红、绿、蓝的补色，即青、品红和黄。在减法混合中，每一减法原色控制了它所吸收的光谱色，三者的变化分别控制红、绿、蓝出射光的比例，从而得出各种混合后的颜色。减法混合和相加混合具有相同效果。在没有特别注明时，通常是指加法三原色。色度图当用三原色相加混合成某一种特定颜色时，必须取某种特定的亮度比例。用三系数来表示这种比例的值，并用 R、G、B 分别表示红、绿、蓝的三系数。规定白色的三个三系数均为 1.00，即对于白色来说， $R=G=B=1.00$ 。这是一种归一化表示法，使三系数都是无量纲的数。下表是彩色电视彩条测

彩条	R	G	B
白	1.00	1.00	1.00
黄	1.00	1.00	0
青	0	1.00	1.00
绿	0	1.00	0
紫	1.00	0	1.00
红	1.00	0	0
蓝	0	0	1.00
黑	0	0	0

试图中八个彩条的三系数。表示只有一个三系数不为零的彩色量，称为基色，即原色。一般用三原色各自在总量中的相对比例表示颜色，并称它为色度坐标，用  $r$ 、 $g$ 、 $b$  表示。例如白光的色度坐标为：

$$r = g = b = \frac{1}{1+1+1} = 0.33$$

麦克斯韦首先使用一个直角三角形来表示颜色，称为色度图。三角形顶角分别代表 (R) (G) (B) 三原色。横向底边和纵向侧边分别为色度坐标  $r$  和  $g$ 。因为  $r+g+b=1$ ，故不必画出  $b$ 。图 2 所示即为国际上正式采用的麦克斯韦直角三角形标准色度图。图中 W 点为白光在该色度图上的点。

图 2 色度图

在直角三角形外围，有一条舌形曲线。线上各点为可见光波段内不同光谱色的位置。曲线内任一点都代表三原色按比例相加混合而成的某种颜色。在舌形曲线附近的点，饱和度高，颜色深浓。接近色度图中间部分的点，接近白色，饱和度低，颜色浅。

色度坐标可能出现负值。例如对非常饱和的光谱色，不能用三原色作相加混合而得到。这时要把少量的三原色之一加到光谱色一侧，用另两个原色去实现匹配，这样就出现色度坐标的负值情况。

应用把用三种不同发光材料制成的红、绿、蓝色荧光点排列在一起，

使人们在较远的距离上观察时看不出各个彩色小点，而只感觉到是某种相加混合后的颜色斑。彩色电视机荧光屏就是由无数个这种颜色斑组成。天线收到的是景物彩色分解成的三种三原色信号 $\varphi(R)$ 、 $\varphi(G)$ 和 $\varphi(B)$ ，经三个光电接收器后给出三股光电流 $I_R$ 、 $I_G$ 和 $I_B$ ，再经放大去分别控制彩色显像管荧光屏上的三种发光材料，从而复现原来的景色。

染料或油漆的混合所产生的颜色是减法混合过程。如蓝色和黄色油漆混合后产生绿色。因为蓝色油漆吸收黄色和其它颜色而反射光谱蓝和邻近的绿色波长。而黄色油漆反射黄色和邻近的绿色波长，吸收蓝色和其它颜色。所以两种油漆混合后都反射绿色波长的光，成为绿色。彩色照相也是减法混合过程。在感光胶片的片基上，分上中下三层涂不同感色性能的乳剂膜，分别记录被摄物中的红、绿、蓝三原色。人们观察重叠在一起的三原色时，便感觉到某种颜色。胶片上层感蓝色光，含有黄色成色剂。中层感绿色光，含有品红色成色剂。下层感红色光，含有青色成色剂。彩色胶片曝光显影后，上、中、下三层分别为黄色、品红和青色影像层。白光通过时，三层分别起减蓝、减绿和减红原色作用，使被摄物在彩色负片上的颜色成为与原颜色相反的补色。相纸或正片的制作原理与负片相同。负片的补色影像经晒印后，使正片显出原来物体的颜色。

**演示电表** (demonstrative electric meter) 供课堂教学演示用的大型电表。是一种磁电系测量机构。电表外型如图 1 所示，表头由蹄形永磁钢、极靴、宝石轴承、轴尖、游丝和带阻尼绕组的无框架动圈等部件组成。

图 1 电表外型图

图 2 仪表内部接线图

成。通过玻璃面板可透视其内部结构。在面板上装有机调零旋钮、转换开关、测量输入接线柱和通路极接线柱。仪表内部接线如图 2 所示。电表底部抽屉里备有十块通路板。

**演示实验** (demonstration in teaching physics) 是指课堂上进行的、密切配合讲授内容的、以教师为主要操作者的表演示范实验。它是激发兴趣，引入新课，探究规律，深化、巩固、应用概念和规律等教学环节的重要组成部分。它能够充分发挥教师的引导和示范作用，并为学生独立地进行观察思考创造条件。

#### 演示实验的要求

(1)要有明确的目的。在课堂教学中确定、选择和设计演示实验，都必须从每堂课的具体目标出发。在一堂课内的几个演示必须有明确的目的。

如果在引入课题时运用演示实验，其目的往往侧重于引起学生对所研究问题的兴趣，激发求知欲望。这类演示实验应尽可能生动、有趣，几乎学生意料之外，起到揭示矛盾产生悬念的作用。例如在初中讲物体浮沉条件时，老师将一段石蜡先后分别浸没在盛有无色透明液体的两个烧杯中，结果石蜡在第一个烧杯的液体（水）中上浮，而在第二个烧杯的液体（酒精）中下沉。学生立即产生了探究物体浮沉条件的自觉愿望，并联想到看上去两杯相同的液体其实是不同的液体，这就为引入课题作了准备。如果在形成概念和规律的教学过程中运用演示实验，其目的往往在于提供必要的

感性素材，引导学生思维活动的发展。因此，要求这类演示实验能突出事物本质的联系，使学生建立正确、清晰的物理图景。如果运用演示实验来深化、巩固、应用物理概念和规律，就应注意选择能突出思考性和理论联系实际要求的实验。

(2)效果要明显、直观。演示实验必须同时使每个学生从各个方向都能清楚地看到所演示的现象。为此，器材装置的尺寸要足够大，测量仪表的刻度线要适当粗些，还应充分考虑仪器背景的色泽对比、器材放置位置的高低、器材可动部件的活动余地和物体的运动余地及方向等因素，必要时借助机械放大、光放大、电放大等手段。演示现象明显、直观还包括这样的含义：即强化有用信息的刺激作用。调动学生各部分感官的协同作用，比用单一感官要好。只要有可能，采用声、光并茂的演示，学生获得的印象更为深刻。

仪器结构要力求简单，演示操作要简便可靠，重复性好。提倡用简单的方法自制教具进行演示，有利于激发学生的兴趣和从心理上消除对实验研究的神秘感，形成对物理实验的亲切感。为此，教师在课前应做好充分准备，亲自操作，熟悉仪器性能，了解实验的准确程度，估计实验的时间，视察演示环境等。

#### 演示实验中的观察指导

演示实验方案确定后，为要达到演示的目的，关键在于对学生的观察进行指导。它有两层含义：一是演示本身应能吸引学生的观察注意；二是教师在演示过程中及时指导，教给观察方法。

(1)明确观察目的，做好观察的思想准备。在演示之前，要让全体学生明确为什么要做这个实验，打算怎样进行，出示的仪器应有所交待。切忌草率从事，甚至学生还没有思想准备时，演示已经结束，这是不可能达到演示目的的。

(2)突出观察对象，追逐观察目的。在演示中，应创造条件，突出观察对象，排除次要因素的干扰，要引导学生把注意力集中在观察对象上，追逐这一对象随其他条件的改变而发生变化的规律。

(3)从整体到局部，再从局部到整体，培养观察思路。观察的全面性是客观反映事物属性的前提，应当利用演示实验培养学生正确的观察思路。要引导学生从观察对象本身的变化跟与之有关的其他因素来认识局部跟整体的关系。

(4)纵向、横向对比，把握事物特征。观察的深刻性在于透过表面现象抓住事物的本质，利用对比观察是使思维向纵深发展的方法。在演示实验中，经引导学生善于察觉条件的差异及产生结果差异间的联系。通常可以采用纵向对比、横向对比、正反向对比的方法

(5)教师在演示教学中，一定要注意使学生的观察和思维活动紧密结合起来，用观察促进思维活动的展开，又用思维指导观察活动的进行，使学生逐步认识物理概念、规律，逐步发展观察和思维能力。

**演绎 (deduction)** 以一些基本规律或性质 (大前提) 作基础，对个别的事物或现象 (小前提) 进行推理，从而确定这些事物或现象具有的特性或规律 (结论)。从一般性的结论推出个别性的结论，这就是演绎方法。演绎推理是一种必然性推理。演绎的主要形式是三段论，即大前提、小前提、结论。演绎推理的思维过程是：根据已知的一般性规律，通过分析，

并限制条件，运用数学的推导，得出个别性的规律。例如得出电阻串并联的等效电阻关系式，是根据欧姆定律和电荷守恒定律这两个一般性规律运用演绎推理的结果。

由演绎得出的结论仍要用实践来检验，因为任何逻辑推理都必须由实践作最后的验证。在物理学发展史上，没有一个物理学家认为自己的演绎推理不需要实验验证，也没有一项由演绎推理而得到的物理成果未经实验验证就得到确认。对于正确和真实的演绎推理，实践检验不仅验证了结论，而且进一步证实和丰富了前提。例如海王星的发现，就是运用演绎法的例子，它不仅证明亚当斯、勒维烈的演绎推理是正确的，而且进一步证实了万有引力定律。以后勒维烈又进行同样的演绎推理，认为有一颗未知行星作用于水星，许多天文学家花了几十年时间寻找这个行星，都没有成功，直到爱因斯坦广义相对论建立后，才弄清万有引力定律只是近似正确，越靠近太阳，准确性越低。以上两例都表明，演绎推理的结论必须由实践检验。

物理学家在研究问题时，并不一定意识到自己是在使用演绎法推理，而演绎法往往在这个推论过程中起了关键作用。例如在研究 衰变中能量亏损现象时，泡利坚持能量守恒定律的大前提，并预言：在 衰变中失去的能量，可能被一种尚未发现的微小的中性粒子带走，1956 年中微子的存在被实验证实。所以说，演绎推理是提出中微子假说的关键。

物理学研究中的演绎方法，以假说作为大前提，进行逻辑推理，用实验验证结论，进而验证大前提是否正确。物理学史表明了这种方法的成功，伽利略对自由落体运动的研究就是一个典型例子。又如麦克斯韦方程组被提出之前，仅仅是一种假说，以它为大前提，可演绎推理出振荡电路能发出以光速前进的“波”，即电磁波的结论。此后赫兹用莱顿瓶放电做实验，得到了电磁波，并验证了它的一系列物理性质，麦克斯韦的理论才被全面证实。

在物理演绎方法中，大前提或来源于已为实践证实的物理真理，或在已有真理和实验基础上得出假说，直接或间接建立在实践基础上，结论需经过实践的检验。因此，物理学研究中的演绎方法同亚里士多德纯理性思辨的演绎方法有着根本的区别。

**眼睛 (eye)** 眼是人们获得光信息的感觉器官。就其作为视觉系统接收器来说，它如同一架变焦距照相机。就其能传递信号、使大脑视觉中枢作出反应来说，它如同一架彩色电视机。

**眼球的结构** 人眼的结构如图 1 所示。它是由角膜、网膜和巩膜围成的球体，直径约 24 毫米。球体的对称轴称为光轴。视网膜中部有一小凹区，称为中心凹或中央凹。晶状体节点与中心凹的连线称为视轴。光轴与视轴的夹角约为  $5^\circ$ 。眼球外层有一层硬膜作为保护层，它由角膜和巩膜组成。前面透明部分为角膜，后面为巩膜。把角膜当作单一的折射球面时，它的等价光焦度约为 43.05 屈。前房充满房水，比重为 1.0036 ~ 1.012，深约 2 ~ 4 毫米，折射率与晶状体大致相同。房水对成像不起作用，但为角膜和晶状体提供营养。虹膜相当于照相机中的可变光阑。它中间的圆孔叫瞳孔，当入射光强或个人感情变化时，瞳孔的直径可以改变，由缩瞳肌和扩瞳肌控制。晶状体形状像一块凸透镜，厚约 3.6 毫米，光焦度为 +19.11 屈，直径约 9 ~ 9.5 毫米。它的前表面的调节能力比后表面强，故眼的调节主要是

前表面的曲率变化。晶状体的折射率为非均匀分布，越靠近中心，折射率越高，对减少像差和提高折光能力极为有利。晶状体之后为后房，充满玻璃状液体，折射率为 1.336。晶状体后面是网膜，其中布满视觉神经，相当于照相机中的感光底片。眼球外部有肌肉控制眼球的转动，使网膜中心凹对准要观察的物点。网膜上有一小区域，不能看见物体，是神经纤维进入脑部的地方，称为盲点。

**眼的光学数据** 人们通过大量实际测量，已取得了人眼的解剖学数据。为了计算人眼的光学性能，可采用较简单的光学系统来代替构造复杂的真实眼。这种眼称做模型眼或示意眼。有代表性的是古尔斯特兰德模型眼，其数据如下，距离皆以毫米为单位。

		最松弛	充分调视
折射面位置	角膜	0	0
	晶状体光心	5.85	5.2
曲率半径	角膜前面	7.8	7.8
	晶状体前面	10.0	5.33
折射率	房水	1.336	
	晶状体	1.413	
	玻璃体	1.336	1.336
光焦度	角膜前面	+3.08 屈	+43.08 屈
	晶状体前面	+7.70 屈	+15.4 屈
	晶状体后面	+12.83 屈	+15.4 屈
各基点位置 参数	角膜物方主点	0	0
	角膜像方主点	0	0
	角膜物方焦点	-23.214	-23.214
	角膜像方焦点	31.014	31.014
	晶状体物方主点	5.85	5.2
	晶状体像方主点	5.852	5.2
	晶状体焦距	65.265	40.485

(续表)

		最松弛	充分调视
各基点位置 参数	眼睛整体物方主点	1.505	1.821
	像方主点	1.631	2.025
	物方焦点	-15.235	-12.335
	像方焦点	23.996	20.963
	物方节点	7.130	6.583
	像方节点	7.256	6.783
	物方焦距	-16.740	-14.176
	像方焦距	22.365	18.938
	中心凹位置	24.0	24.0

**眼的调节** 眼是一架变焦距照相机，它的变焦距镜是晶状体。通过改变晶状体的曲率半径、厚度和折射率，就能改变眼的像方焦距，使不同距离的物点在视网膜上形成最佳的像。眼球完全放松时，无穷远的物体成像在网膜上。为了观察较近的物体，晶状体的曲率要增大，焦距要缩短。这种调节能力有一定限度。眼睛处于最松弛和最紧张调视时所能清楚地看到的物点距离，

分别称为远点和近点。正常眼的远点在无穷远。近视眼的眼球过长，无穷远点成像在网膜之前，要用凹透镜作矫正。远视眼的眼球过短，无穷远点成像在网膜之后，要用凸透镜作矫正。年龄的增长使眼的调焦能力衰退，儿童的近点在 10 厘米以下，老年人的近点逐渐加大，

形成日常所说的老花眼。若眼球在不同方向平面内的

曲率不同，要用非球面透镜来矫正，称为散光眼。物体太近，会使眼睛疲乏，只有在适当的距离上，才能使眼睛舒适而长时间地工作，这个距离称为明视距离，习惯上规定为 25 厘米。

能够分辨细节的最近两点对眼睛所张的视角，称为最小分辨角。在网膜中部的中心凹（又称黄斑），分辨本领最高，在白昼时它的最小分辨角为 1'。网膜边缘部分，分辨本领急剧下降，故人眼只有在中央视角约  $6^\circ \sim 7^\circ$  小范围内才能分辨物体细节。在夜间，最小分辨角约为  $1^\circ$  左右。瞳孔能自动调节，白昼时直径约 2 毫米，黑夜时可达 8 毫米。

**眼的视力** 人眼分辨最小目标物的能力称为中心视力，简称视力，它反映了网膜中心凹视功能的大小。网膜上承担接收光信息的感光细胞约有一亿七千万个，分为视锥细胞和视杆细胞两种。前者集中在中心凹，它的分布决定了网膜上的视力分布。后者则分布在中心凹以外。国际上把能分辨的两点或两线间的最小间隔，称为视力。把人眼看做理想光学系统时，若瞳孔直径为 2 毫米，则对于波长为 0.5550 微米黄绿光的瞳孔分辨极限角为

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 3.4 \times 10^{-4} \text{ 弧度 } 1'$$

这相当于在网膜上的像为 4.9 微米，正好是一个视锥细胞的线度。也相当于能看清距离眼球 5 米远线度为 1.46 毫米的物体的能力。

为了检测视力，用一定的目标物让被检测人在一定距离外观看。这种目标物称为视标。常用的有“E”形和“C”形视标。国际上规定 1.46 毫米为视标的细节单位，叫做 1 分视角，即正常眼的最小视角。E 形视标的面积为 5' 视角，线条宽度为 1' 视角。受验人和视力表的距离与正常眼能辨认的距离的比值，为受验人的视力。如果受验人在 6 米处只能分辨正常眼在 10 米处分辨的字，则受验人视力为 0.6。我国 E 形视标分成 12 组，规定观察距离为 5 米。第 1 组为 10' 视角，对应视力为 0.1；第 2 组为 5' 视角（图 2），对应视力为 0.2，...，第 12 组为 0.67' 视角，对应视力为 1.5。

图 2 E 形视标

### 眼的损伤

紫外光的损伤电火花、水银灯和焊接光产生的波长在 0.280 微米左右的紫外光容易引起角膜炎和结膜炎，出现刺眼、眼痛和流泪等症状，甚至引起视力障碍。阳光经白雪反射后容易诱发雪眼炎。

可见光的损伤 室外工人在强烈阳光下工作，如不加保护，会引起室外耀眼。直接观察太阳时，晶状体将阳光聚焦在网膜上，会使网膜烧伤，称为蓝光危害。氩离子激光能量很大，会引起网膜下出血或破坏。调 Q 激光能量更大，它对网膜的烧伤作用远大于太阳光，故切忌用眼窥测激光束。

红外光的损伤 红外光损害将引起人眼的调节障碍，使视力过早减退，提前成为老花眼。玻璃制品工人长期接触红外光，容易引起晶状体混沌，俗称火热白内障。人眼应避免直接透视红外激光，如波长为 10.6 微米的二氧化碳光，它会被眼组织内水分吸收，造成角膜溃疡。

视觉暂留 当物光撤去后，人眼网膜上所成的像能暂留一个短时间的现象。据测定，视觉暂留时间为  $\frac{1}{16} \sim \frac{1}{10}$  秒。根据这种现象，制作了电影。

每隔  $\frac{1}{24}$  秒对赛马场面拍摄一张照片，然后用同样的速度连续放映，由于视觉暂留时间大于连续画面的时间间隔，致使网膜上形成动态奔马情景。

### 验电器图

M. 金属杆 I. 绝缘塞 C. 圆筒

验电器 (electroscope) 用静电方法检验物体是否带电和粗略测定电势的仪器。根据静电相互作用的原理制成，构造简单、使用方便。其中应用广泛的是金箔验电器，构造如图所示。在一个接地圆筒 C 内通过绝缘塞 I 插入一根带有金属球的金属杆 M，在金属杆下端粘有一对金属箔。若带电体与金属球接触，金属箔因带同种电荷而推斥，张开一定角度，并由此可检验物体是否带电。带电体的电荷愈多，电势愈高，张角愈大，反之则愈小。验电器是中学物理教学中常用的演示仪器之一。

杨 (Thomas Young 1773 ~ 1829) 英国物理学家。生于米尔弗顿。早在童年时代，就显露出非凡的才能和惊人的记忆力。9 岁时能自制一些物理仪器。14 岁时已掌握牛顿的微分法和拉丁、希腊、法、意、希伯莱、波斯、阿拉伯等多种语言。后进伦敦圣巴塞罗医学院学医。21 岁时以其第一篇医学论文成为英国皇家学会会员。此后曾跟随外科医生约翰·亨特在伦敦从事生理光学的研究工作。曾先后在爱丁堡、剑桥、格丁根进行深造。杨氏的后半生主要从事物理学的工作。

1801 ~ 1804 年任英国皇家学会教授。1802 ~ 1828 年任英国皇家学会秘书。他还是巴黎科学院院士。杨是波动光学的奠基人之一。在德国深造期间便对牛顿的光的微粒说发生怀疑。在格丁根的博士论文中提出关于声和语言的论题，根据对光学的研究成果，论证了声和光都是波动，不同颜色的光和不同频率的声都是不同的波。1800 年发表的《关于声和光的实验与研究提纲》论文中，系统论述光的波动观点，向牛顿光的微粒说提出挑战，认为解释强光跟弱光传播的速度一样，用波动说比微粒说更有效；指出用波动说还可以证明微粒说无法解释的冰洲石的双折射现象。1801 年，进行著名的光的干涉实验，用强光照小孔，以它作为点光源，送出球面波。在离开小孔一定距离处，放置另外两个小孔，它们把前一小孔送来的球面波分离成两个很小的部分作为相干光源。于是在这两个小孔发出的光波相遇的区域产生了干涉现象。在双孔后面的屏幕上可得到明暗相间的干涉图样。后来发现用双缝代替双孔会得到更明亮的干涉图样。1803 年，引入“干



涉”这个术语，并试图说明光线所引起的衍射，把干涉与衍射联系起来。证明光线在密度较大的介质上反射时，会发生半波损失。测量了不同颜色的波长，对于红光得到的值为 0.7 微米，对于紫光得到的值为 0.42 微米。1807 年，提出如下思想：光与辐射热之间的差别仅仅是波长不同。1817 年，当他得知菲涅耳和阿拉哥关于偏振光的干涉的实验后，提出光是横波。在此之前，把光学理论应用于医学之中，奠定了生理光学的基础。1793 年，提出眼睛观察不同距离的物体是靠改变眼球水晶体的曲度来调节的观点，这是最早的眼睛光学原理解释。1803 年，提出人们对于颜色的辨别是由于视网膜上有几种不同的结构，分别感受红、绿、紫光的假想，以此可以说明色盲的成因。建立了三原色原理，认为一切色彩都是由红、绿、蓝三种原色按不同比例混合而成的，这一原理已成为现代绘画、印刷、电视、照相等技术的基础。在材料力学方面，研究了剪形变，认为剪应力是一种弹性形变。1807 年，提出弹性模量的定义，为此后人称弹性模量为杨氏模量。

**杨氏实验 (Young experiment)** 英国科学家托马斯·杨于 1801 年用两个点光源所作的光的干涉实验。他用光的波动性解释了这个干涉现象。杨氏实验在历史上确立光的波动性方面具有重大意义。普通光源都不是单色点光源，不满足光的相干条件。在杨氏实验中，先将强单色光照射到开有小孔  $S$  的不透明遮光屏上，从而把小孔  $S$  作为单色点光源。然后在遮光屏后方再放置另一块开有两个小孔  $S_1$  和  $S_2$  的屏板。从  $S_1$  和  $S_2$  中出射的光的频率、光的偏振方向和位相均相同，因而是相干光源，故在远处放置的接收光屏上可观测到这两束光的干涉条纹。 $S$ 、 $S_1$  和  $S_2$  如果是相互平行的狭缝，干涉条纹便是明暗相间的直线条纹图样。在干涉图样中，两条相邻的强度极大的亮纹或两条相邻的强度极小的暗纹之间的距离称为干涉条纹的间距，它与  $S_1$  和  $S_2$  相对于接收屏中心点所张的角距离成反比。杨氏实验装置中的典型数据为：双孔间隔为 0.1~1 毫米，接收屏与双孔屏的距离为 1~10 米，屏上可观测范围为 1~10 厘米。利用一些简单手段，也可以观察杨氏干涉现象。例如在一块小玻璃片上涂一层薄墨，用针尖在墨层上划出极靠近的两条线；或者用已曝光的黑色废胶片，取刀片在上面划两条极靠近的线，然后利用这种双缝去观察单丝灯，并使狭缝与光源灯丝平行，就可看到明暗相间的干涉条纹。在观察时，眼睛必须贴近双缝，与光源相距约几十厘米。由于一般所用的光源不是单色的光源，不同波长的光波形成不同间距的干涉条纹，因而将观察到彩色的干涉图样。如用激光作为光源，由于激光的高度单色性和相干性，就可省去小孔  $S$  而直接把激光投射在  $S_1$  和  $S_2$  上，在接收屏上便能观测到稳定清晰的干涉条纹。但是不可用自制的双缝直接对着激光观察，以免损伤眼睛。

**杨振宁 (1922~)** 美籍华裔物理学家。生于安徽省合肥县(今合肥市)。1942 年毕业于西南联合大学。1945 年赴美留学，师从费米和特勒。1948 年获芝加哥大学理学博士学位。1955 年任普林斯顿大学高级研究院教授。1966 年任纽约州立大学石溪分校爱因斯坦物理学讲座教授和该校理论物理研究所所长。同时担任美国国家科学院院士，北京大学、复旦大学、中国科学技术大学、中山大学、华东师范大学名誉教授。

主要贡献是提出弱相互作用中宇称不守恒，获 1957 年诺贝尔物理学

奖。早在西南联大时，与李政道合作共同提出了对宇称守恒定律的疑问。在美国普林斯顿大学高级研究院，两人相遇，又继续合作从事这一课题的研究。1956年，提出了在弱相互作用中宇称不守恒的假说，并进一步提出了几种检验弱相互作用中宇称是否守恒的实验途径。这一假说于1957年被吴健雄的实验所证实。同年获诺贝尔物理学奖。一项科学假说在发表的第二年就获得诺贝尔奖，这是第一次。

杨振宁对理论物理学作出了一系列贡献，取得突出的研究成果，主要包括基本粒子、量子场论、统计力学和凝聚态物理学等领域。1949年合作提出了基本粒子的第一个复合模型“费米-杨模型”。1952年提出统计力学中二维伊辛模型的自发磁化强度，同年合作提出了关于相变的理论。1954年与密耳斯共同提出规范原理和矢量介子场理论（杨-密耳斯场理论），为现代规范场理论的形成奠定了基础。1957年与李政道合作提出二分量中微子理论。60年代初期合作进行了高能中微子实验分析和关于粒子的研究，提出弱相互作用是由中间矢量玻色子传递的假设。1961年与拜尔斯合作对凝聚态物理学中的磁通量的量子化进行了解释。1962年提出非对角长程序的观念。1964年合作进行了CP不守恒分析。1974年提出规范场的积分理论。1975年与吴大峻合作提出规范场与纤维丛的关系。1967年至1985年合作提出了高能碰撞理论。杨振宁要促进中美科学技术交流方面做了大量出色的工作。发表研究论文与报告200多篇，并有《基本粒子》（1962）等专著多部。

**扬声器**（loudspeaker） 俗称喇叭。将电信号转换为声信号并将声音有效地在空气中辐射出去的一种电声器件。其状态一般是截面积按一定规律逐渐增大的筒形，与声源连接的一端截面积小，另一端截面积大，以提高发声效率。声频信号输入扬声器后通过电磁压电或静电等效应，使膜片或纸盆振动，引起周围空气振动以发出比较宏亮的声音。表示其性能的主要指标有：灵敏度、频率响应、额定功率、效率、额定阻抗、指向性以及失真等参数。高保真扬声器还需由音质听感来评价。

按工作原理的不同，扬声器分为电动式（永磁或电磁）、晶体式（压电式）、电容式（静电式）、空气压缩式等类型。其中以永磁电动式使用较为普遍。按辐射声音方式的不同，扬声器又分为直接辐射式、喇叭式等。高质量的扬声器采用组合成，各扬声器单元按放音的频率范围分别设计制造，通常分低音单元、高音单元，有的还加中音单元。

**遥测**（telemetry） 在远离被测对象的地点获取有关被测对象的参量的测量技术。遥测起始于20世纪初，人们当时就用无线电波将高空气球所获得的气象信息传送给地面观测站。到30年代，无线电遥测用于有人驾驶飞机和无人驾驶飞机的试飞，检查飞机飞行中的性能。1954年，脉冲编码调制遥测系统研制成功，遥测技术步入数字化时代。由于航中、航天技术和武器系统飞速发展的需要，在半导体集成电路工艺和计算机技术发展的推动下，建立在现代通信理论基础之上的航空、航天遥测系统，成为遥测技术领域中最先进的部分。它很快被推广到工业和民用部门。

遥测包括三个基本过程：

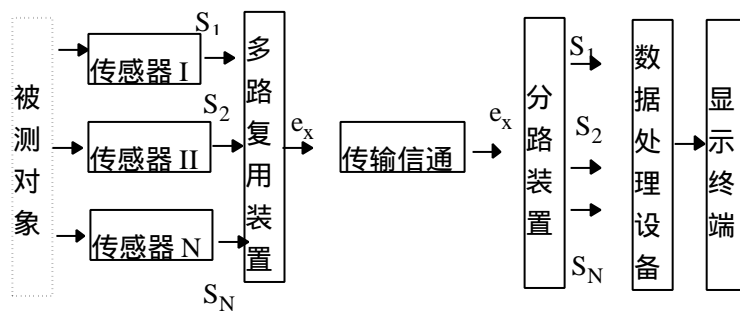
(1) 将需要测量的变量或参数通过各种传感器转变成适于远距离传输的信号。

(2) 将遥测信号（通常同时有许多路信号）通过预先准备好的信道传送

到远处的接收观察地点。传送媒质可以是光、声、电（包括利用导线和无线电波）、磁等。

(3)在接收地点对遥测数据进行记录、处理、显示，按观测者的要求形成最终的数据或图形。

下图为典型的遥测系统的简化框图。被测对象的若干待测参量，经过相应的传感器变换成适合于传输和测量的电信号，通常是电压或电流。多路复用装置将各路遥测电信号按一定的信道传送。多路复用装置输出的一组电信号沿传输信道传送到远离被测对象的观察点。在无线电遥测系统中，传输信道通常由发送端的调制器、发射机、发射天线以及接收端的接收天线、接收机和解调器等组成。在最简单的有线电遥测系统中，一根导线即可作为信道。信道输出的一组电信号由分路装置分离出各路遥测信号，经数据处理设备处理后送显示终端显示出图像或数据等结果。



遥测系统框图

实际上，遥测中包含着它的极限情况，这就是遥信，所谓遥信就是对远距离被测对象的工作极限状态（例如机器的启停状态，阀门的开关状态）进行远距离的测定。

遥测技术在国民经济、科学研究和国防等领域应用非常广泛，例如应用在石油、电力、交通、气象、医疗、城市公用事业、原子能利用、无人驾驶飞机、导弹、卫星和飞船等方面。采用遥测技术，可以提高自动化水平，提高劳动生产率，缩短研究试验周期，改善劳动条件和提高管理调度质量等。

**遥感 (remote sensing)** 从空间远距离检测地球表面物体所辐射或反射的电磁波在空间和时间上的分布，以获取大气、陆地或海洋环境信息的技术。它借助于专门的光学、电子学和电子光学探测仪器，把遥远的物体所辐射（或反射）的电磁波信号接收记录下来，再经过加工处理，变成人眼或计算机能识别的图像，从而揭示出所探测物体的性质和变化规律。早在 19 世纪中叶，就有人试验从气球上拍摄地面照片。20 世纪 30 年代，人们开始研究彩色、彩红外和多光谱摄影技术，并在 50 年代后获得实际应用。60 年代初，美国密执安大学研制成实用的红外和多光谱扫描仪，提供了新的遥感手段。在可见光和红外波段遥感技术发展的同时，微波遥感技术自 60 年代以来也有很大进展，使遥感技术发展为一门综合性技术。实验证明，任何物质，只要它的温度在绝对零度以上，都会辐射和反射包括各种波长的电磁波，例如紫外线、可见光、红外线和微波等。辐射和反射的电磁波频谱随物质和温度的不同而有所差异。遥感技术正是从这一点出发，通过各种遥感仪器，得以实现对各种物体进行探测和识别的。

现代遥感技术系统主要包括运载工具（又称遥感平台）、遥感仪器和图像处理等部分。

**遥感平台** 装载遥感器的工具。常用的遥感平台有飞机、气球、人造卫星和航天飞机等。用飞机作为平台的遥感技术称为航空遥感。由于飞机的飞行高度可从几百米到 2 万米，因而能获得多种不同比例的遥感图像，具有很大的灵活性。人造卫星和航天飞机可用作外层空间的遥感平台。遥感卫星可以在外层空间运行数年，它为地球环境的动态观测和数据更新提供丰富的资料。

**传感器** 远距离检测地物和环境所辐射或反射的电磁波的仪器。通常它装在各种不同类型和不同高度的遥感平台上。利用各种波段的不同的传感器，可以接收物体辐射的或反射的电磁波，经过处理和分析，有可能反映出物体的某些特性，借以识别物体。按设计时选用的频率或波段来划分，常用的传感器有紫外传感器、可见光传感器、红外传感器和微波传感器等。

**遥感图像处理** 对传感器获取的原始图像进行处理的方法。常用的遥感图像处理方法有光学的和数学的两种。遥感图像的光学处理包括一般的照相处理、光学的几何纠正、分层叠加曝光、相关掩模处理、假彩色合成、电子灰度分割和物理光学处理等。光学处理有时称为模拟处理。数字处理是指用计算机图像分析处理系统进行的遥感图像处理。数字处理方式灵活，重复性好，处理速度快，可以得到几何精度高的优质图像，容易满足特殊的应用要求，因而得到广泛的应用。

遥感技术是 60 年代蓬勃发展起来的一门综合技术。随着空间技术、电子计算机技术和环境科学的发展，遥感技术产生了质的飞跃。它为自然资源勘探、环境动态变化的监视、对军事工程部署的侦察等提供了新的技术手段。它的主要特点可概括为四个字：“遥”、“感”、“快”、“广”。所谓“遥”就是人们能从更遥远的地方来观察目标。例如人造卫星的轨道高度一般约 1000 公里左右，地球资源卫星上拍的一张照片，它所覆盖的地面面积可达 34000 平方公里（大小相当于一个海南岛），甚至可以把半个地球全拍下来。所谓“感”就是利用现代化的仪器，大大延伸了人的感官。所谓“快”，就是得出结果的时间快。例如，用航空摄影测量，对一个大城市，一般每一、二年才可重复测量一次。若用地球资源卫星，每 18 天就可覆盖全球一遍，每星期就能拍摄和积累地面景象一万张。所谓“广”就是利用材料、能源、激光、计算机等技术的成就的范围广，涉及的学科范围广。例如它涉及到空间物理、大气物理、地理环境、生态系统等方面的基础研究领域。此外，遥感技术的应用范围广。不管是层云密布的白昼，还是伸手不见五指的黑夜；无论是人迹难以达到的热带森林，还是渺无人烟的浩瀚戈壁；不论是地面上的自然资源，还是海洋里的宝藏，在遥感技术面前都将一览无遗。

遥感技术的应用是多方面的。下面仅举几例说明之。

(1)资源遥感：通过航空或航天遥感进行地面大范围的勘测；加速荒地、森林、水利和地热资源的调查；监视农作物的长势、病虫害、水流污染、森林草场火灾蔓延；监视河床演变、海岸变化，洪水泛滥等动态变化等等。例如应用合成孔径侧视雷达，在印尼、南非等热带雨林覆盖下，揭露出油气田和铀、铜矿床；应用红外扫描，查明了地中海沿岸和太平洋海岛附近浅海中的淡水，解决了沿岸城镇的供水问题；还发现了南极冰天雪

地中的地热和温泉。

(2)环境监测：例如，利用气象卫星云图及地球卫星图像进行综合分析，可以提出中、长期旱涝预报，取得控制蝗虫迁移、土壤盐渍化的动态情报。

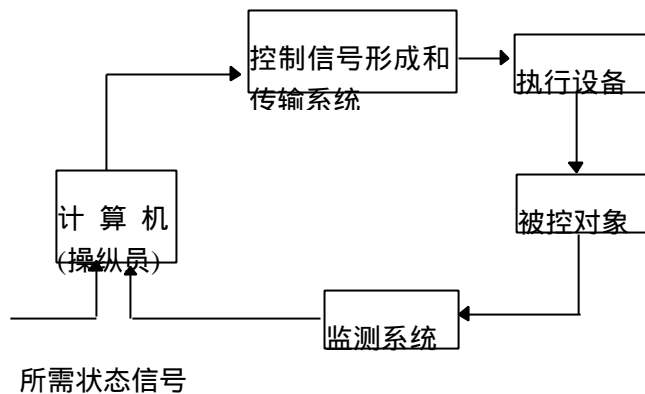
(3)区域分析：例如在英国本土上，过去进行一次土地普查需动员 6 千人，工作 6 年，现在利用遥感资料重编五万分之一的土地利用图，仅需 4 个人工作不到 9 个月。

(4)全球研究：例如利用卫星遥感技术，可使延绵几千公里的地壳深部断裂历历在目，为动力地质学研究板块运动、地球演变、大陆漂移及地震分析等提供直观依据。

总之，遥感技术除用于军事侦察外，还广泛应用于农业、林业、地质、地理、海洋、水文和环境保护等各个领域，使人类改造自然有了更大的自由。

**遥控 (remote control)** 综合应用自动控制、通信、计算技术等对某个对象或系统进行远距离控制和监测的技术。早在 19 世纪，人们就用摇控的方法点燃地雷。在 20 世纪初，在电气工程、输油管道和化工系统等方面采用简单的有线控制进行生产过程的自动化已得到广泛的应用。1917 年美国开始研制无人驾驶飞机，无线电遥控的距离已达几百公里。从 50 年代起，美国和原苏联积极发展导弹武器，更推进了遥控技术的迅速发展。1957 年，原苏联发射了第一颗人造卫星，至 1969 年美国“阿波罗”飞船载人登月及 1983 年美国“哥伦比亚”号航天飞机升天，航天事业的进展把遥控技术推向了一个新的高度。

遥控技术综合应用了自动控制技术和通信技术来实现对被控对象的远距离控制和监测。遥控系统主要由控制站、控制信号的形成和传输系统、执行设备、被控对象以及被控对象状态的监测系统组成。其工作原理如图所示。为了使控制站能了解关于被控对象所处的状态，一般由监测系统产生监测信号并传送给控制站的计算机（或操纵员）。在遥控过程中，计算机（或操纵员）对预定程序和监测信号进行比较，如果被控对象当前的状态与所要求的状态有差异，就由计算机（或操纵员）发出控制指令。根据控制指令形成控制信号，并由控制信号传输系统传给执行设备，执行设备根据控制信号使被控对象产生相应的动作，使之达到所要求的状态。



控制系统方框图

被控对象可以是固定的，如油田、工厂、电站、铁道等；也可以是活

动的，如飞机、导弹、卫星和宇宙飞船等。固定的被控对象又可分为集中型（如工厂、电站）和分散型（如油田、铁道）。控制信号由控制站通过电缆传到被控端，称为有线遥控；控制信号通过无线电传到被控端，称为无线遥控。有线遥控抗干扰性强，主要用于固定的被控对象；无线遥控主要用于活动的被控对象。遥控系统按传输控制信号形式的不同又分为模拟遥控系统和数字遥控系统。模拟遥控系统是用模拟变换的方法将控制信号变换为适于信道传输的信号，它具有简单、成本低等优点；数字遥控系统是用数字信号传输控制信号，它具有可靠、精确等优点，因而用途广泛。

遥控技术不论在民用或军用方面都有广泛应用。例如：输油管道的无人管理；对导弹的控制和导引（即制导）。

**液晶**（liquid crystal）既有液体的机械性能如可流动性和低粘滞性，又有晶体的各向异性光学性质的一类物质。如胆甾醇苯酸脂加热到 145℃ 时，该固体熔解为白色混浊液体，呈浓雾状，但是该液体实际上又很像晶体，显示出光的双折射性质。这时如果对这种混浊液再加热达到 179℃，就转变为清澈透明的液体。所以，液晶相是某种物质从固相转变到液相过程中的一种中间相。凡是有液晶相的物质称为液晶。

液晶相可以通过加热固体得到，这称为热致液晶；也可通过将某种晶体溶解在适当的溶液中而形成，这称为溶致液晶，例如显示出液晶结构的生物膜就是一种溶致液晶。

液晶并非稀有物质，目前已发现很多液晶材料，它们基本上都是有机化合物，其结构中多数含有芳族分子。液晶分子呈长棒状，长度在 1.5~4 纳米之间。

液晶材料已被广泛应用于光电显示。此外，利用液晶材料对光的选择性反射，还可应用于温度指示。

**叶企孙**（1898~1977）中国物理学家、教育家。生于江苏省上海县（今上海市）。1918 年赴美留学，1923 年获哈佛大学博士学位。1924 年回国，历任东南大学理学院教授（1924~1925），清华大学（1928 年以前为清华学校）物理系教授、系主任、理学院院长（1925~1953），西南联合大学物理系教授（1938~1946），中央研究院总干事（1941~1943）。建国后，历任清华大学校务委员会主任委员、物理系教授、系主任、理学院院长（1949~1953），北京大学物理系教授（1953~1977）。1955 年受聘为中国科学院数学物理学化学部学部委员。

叶企孙的重要贡献是在中国开拓实际物理学和培养物理人才。1921 年他和杜安、帕耳默合作测定了普朗克常数，他们的测定值在当时是最精确的，16 年后才有更精确的测定。1923 年他从事高压下铁、镍、钴的磁导率的研究，改进了实验方法，并把压强从 200 多个大气压提高到 12000 大气压，取得了不同于前人的新成果。1924 年他回国后，主要从事铁磁性等方面的实验研究，从而成为中国现代研究磁学的开创者之一。1925 年他在清华学校创办物理系，强调理论与实验并重，大力提倡在大学开展科学研究，在此办学方针的指导下，清华大学在 30 年代培养了大批人才，对中国物理学的发展有重大贡献。当时培养出的著名物理学家有王淦昌、施士元、周同庆、龚祖同、王竹溪、彭桓武、钱伟长、钱三强、王大珩、林家翘等人。在西南联合大学任教期间，培养出的著名物理学家有杨振宁、李政道等人。他还担任了清华大学特种研究所委员会主任委员，组建了金属、无线电、

航空、农业、社会学等研究所，开创了中国大学办研究所的先河。建国后，他除从事铁磁学研究外，还开展了自然科学史的研究工作。

一级相变 (first-order phase transition) 参见相和相变。

移测显微镜 (travelling microscope) 测量物体小长度的仪器，又称为读数显微镜。也是一种不能直接接触测量的仪器设备。例如毛细管的内径，小频闪相片的小球位移等。读数显微镜是由显微镜和带二维或者一维刻度标尺及其机械联动装置组合起来的专用长度测量仪。显微镜中的目镜焦点处，设置十字叉丝，用以与被测物的测量位置处重合，读出重合时的坐标值。读数显微镜从机械结构分一维与二维测量两种。一维的读数显微镜，刻度尺的最小分度为 1 毫米，借助于鼓轮上的 100 等分刻度线，使毫米间的读数精确度提高到  $1/100=0.01$  毫米。二维型的读数显微镜，在两个互为垂直的方向上各有两条刻度尺，最小分度通常都是 1 毫米，但分别采用螺旋测微器和游标卡尺的读数原理，使仪器的准确度分别为 0.01 毫米的和 0.05 毫米。二维型的读数显微镜还可测量显微镜观察台面的角度位置，读数也用游标法。量程通常为水平方向 5~10 厘米，垂直方向 3~4 厘米。读数显微镜的操作与显微镜相同，防潮、防高温等有关条件都必需按照产品说明书要求实施，以延长其使用寿命。

以太论 (ether theory) 一种关于以太的学说。以太最初是由古希腊学者假设的一种弥漫物质 (指天或上层大气)。由笛卡儿把以太首先引入科学，并赋予它某种力学性质，即表示一种充满整个宇宙、做旋涡运动的球形的无重的物质，它不能被人的感官直接知觉到，但能传递力，并能对物体产生作用。此后以太被惠更斯用于光学研究，提出光以太说，认为光的介质以太是由紧紧挤在一起的、极硬的、而又有弹性的微粒子所组成，这样不论对它用力敲击或轻轻相碰，它都会以同样速度复原。如果考虑到光以太的这种构造，就可直接推导出两束光线互不妨碍的原理；光的传播并不是微粒子的平移运动而是振动；发光体可解释为构成发光体的微粒子做激烈振动，它将这种振动传给周围的以太粒子；从发光体各点发出的这样一个个波面是微弱的，但这些波相互叠加，得到加强后可传到很远的地方。惠更斯的光以太说是比较粗糙的，因而无法与牛顿的光的微粒说相比拟，再加上牛顿的巨大威望，使以太论在 18 世纪倍受压抑，几乎毫无进展。

19 世纪初，托马斯·杨用关于以太的四个基本假说来说明他的波动光学原理：稀薄的、具有很大弹性的以太充满整个宇宙；发光体在以太中激起波动；不同颜色的感觉取决于传递给视网膜的以太振动的频率；

一切物体都吸引以太，因此在物体之中及其附近，以太密度大，而以太的弹性则保持不变。这样就克服了惠更斯光以太说的一些缺陷，解释了一些惠更斯无法解释的光学现象。托马斯·杨和菲涅耳在光学领域的研究工作，使光的波动说取得成功，以太论也得以获得复兴和发展。此后，法拉第在电磁学领域主张近距作用说，它假设空间中有一种能传递电荷的媒质，即电磁以太的存在，带电体 (或磁体) 之间的力，不是超越距离作用的，而是通过电磁以太的传递起作用。麦克斯韦看出了法拉第学说中所包含的深刻而新颖的物理思想，提出电磁以太说，即空间存在着电磁现象借以产生、处于运动之中的以太物质；场的各种实在的属性被赋予以太，场不过是运动以太的激发态；以太绕力线旋转形成一个个涡元，在涡元之间

有带电粒子，当粒子偏离平衡位置时，粒子和涡元之间产生相互作用。麦克斯韦以此来说明电磁运动的规律，并运用数学方法提出著名的电磁场方程组。根据这个方程组他还预言，电磁场的扰动以波的形式传播，其速度等于光速，也就是预言了光也是一种电磁波。这样以太不仅在电磁学中取得了地位，而且电磁以太同光以太也统一起来。

时至 19 世纪末，以太论被物理学家普遍接受，对物理学的发展起了一定的作用。但是它缺乏可靠的实验根据，也给物理学的进展带来困难。主要反映在：为了满足光在传播中的各种性质，以太必须具有形形色色的特点，如绝对静止、密度极小、弹性极强、刚性极大等，这使人们难以理解。为了测出地球相对以太参照系的运动，以太应有漂移现象，然而由迈克耳孙和莫雷所作的实验虽然精度很高，可是得到的结果却是否定的，地球相对于以太不运动，这样以太论便开始走下坡路。随着爱因斯坦狭义相对论的确立，以及实验证实了光的传播、电磁波和一切相互作用的传播都是通过各种场来实现的，以太论作为一种过时的学说终于被物理学家所淘汰。

然而人们的认识仍在继续发展，一是宇宙微波背景辐射发现后，有人重提以太，认为宇宙背景就是以太；二是对真空研究的深入，人们认识到真空并非是绝对的空，那里存在着不断的涨落过程（虚粒子的产生以及随后的湮没），于是有人提出机械以太论应被淘汰，但以太论的某些精神：不存在超距作用，不存在绝对虚空意义上的真空等仍然活着。

**逸出功 (work function)** 又称功函数或脱出功。一个电子从金属或半导体表面逸出时克服表面势垒所必须做的功。不同金属具有不同的逸出功。如钨的逸出功为 4.5 电子伏特 (eV) ( $1\text{eV}=1.602 \times 10^{-19}$  焦耳)，镍为 4.3 电子伏特。对同种金属，其逸出功往往又与它的晶轴取向和表面状况密切相关。在金属表面涂以钡、锶、钡等氧化物后，逸出功显著减小。如表面涂钡的钨的逸出功为 2.63 电子伏特，而表面涂铯的钨的逸出功仅为 0.71 电子伏特。因此在电子管、光电管中常用涂有氧化物的金属作为阴极。

固体表面吸附气体后，逸出功也会发生变化，因而测量逸出功变化已成为研究固体表面性质的一种方法。

**异质结 (heterojunction)** 由两种不同的半导体材料做成的 PN 结，是超晶格的基本单元。它比同质 PN 结有较高的发射效率。例如，异质发射结晶体管的电流放大系数是同质结晶体管的几倍到几百倍。

目前已能制造的异质结按材料可分为：硅异质结，如硅与无定型硅异质结、硅与掺氧多晶硅（或多晶硅）异质结、硅与微晶硅异质结等；化合物异质结如砷化镓与镓砷铝异质结、铋化铟与铋化镓异质结等。此外还可按能带结构对异质结进行分类。

**音叉 (tuning fork)** 一种定音调的声学器件。用金属制成，形状像拉丁字母 U，下端附有柄，可安装在一端开口的作为共振腔的空木箱上，以增加发音强度。用锤击其上端，即发出一定频率的声音。它是由小号演奏家肖尔在 1752 年发明的。由于它发出的音质非常纯，所包含的泛音极弱，常作为测定乐器音调的标准。它本身也可以制成乐器，如音叉琴，即是由一套按级定音的音叉构成，如用键盘机械装置的毡锤敲击，就会发出悦耳的音乐。音叉发出声音的频率与其两臂的长短和厚薄有关，如果两臂



长而薄，发出的声音的频率较低；如果短而厚，则发出的声音的频率较高。

**音调 (pitch)** 声振动频率的高低。也是听觉分辨声音高低的一种属性。据此可把声音按其高低加以排列成为音阶。音调主要决定于声音的频率，它随频率的升降而升降。声振动频率越高，振动周期越短，听到的音调就越高。但音调不是单纯由频率决定，它还与声压及波形有关。低频纯音的音调随声压增加而下降；反之，高频纯音的音调却随声压增加而上升。

音调的单位为“美”(mel)，规定频率为1,000赫而声压级为40分贝的纯音所产生的音调为1,000美。任何一个声音的音调，若被听者判断为1美纯音音调的n倍，则这个声音的音调就是n美。类似响度的音量表，也可制定音调量表。音调定量判断的方法是让听者调节发生器产生一系列纯音，使它们在音调上听来间隔相等。这样取得的平均判断构成了音调量表。

不同频率声音的音调值见下表。

不同频率声音的音调值

频率(赫)	音调(美)	频率(赫)	音调(美)
100	161	1500	1296
200	301	2000	1545
500	602	3000	1962
700	775	5000	2478
1000	1000		

**音乐声学 (musical acoustics)** 声学的一个分支。主要研究乐音的产生、乐律的物理属性与主观属性，以及乐器的发声机理和主观评价等。早在战国之前，我国劳动人民就总结出计算乐律的方法——五度相生法，定出了五音，相当于现在简谱中的1、2、3、5、6，这是世界上最早的自然律。约百余年之后，希腊的毕达哥拉斯才在弦琴上用同样方法求得了各音律的比数。乐音的物理特性主要有声压与频谱，而音乐家以音强、音高、音色(音品)作为乐音的三大要素，其实声压决定它的强度，频谱决定它的音色，音高在声学上称为音调，由频谱中的基音频率决定。乐器与人的歌唱发音器官的发音原理包括激励器、共鸣器和辐射器三部分。近年来发展起来的电声乐器是用电路来模仿激励器与共鸣器，辐射器则是扬声器，由于充分利用电声设备的合成、变音和扩音作用，形成了独特的创作方法和风格。

**音量 (volume)** 即响度。

**音品 (tone quality)** 又称音色。声音的基本属性之一。不同的物体(如各种不同的乐器)和人发出的声音所具有的不同的声音品质。也是人们在听觉上借以区别具有同样响度和音调的两个声音所以不同的特性。音品主要由声音所包含的泛音的多少和各泛音的相对强度决定的。因此对于纯音不存在音品问题，它是伴随复合音出现的。两个发音体即使所发的声音音调相同(即基音频率相同)，响度也相同，但人耳仍能分辨出来，就是因为它们的音品不同。例如，钢琴和黑管都发出基音频率为100

赫的音，但由于它们的泛音不同，人们仍能清楚地分辨出哪个是钢琴音，哪个是黑管音。这是因为钢琴音由 16 个泛音组成，黑管由 10 个泛音组成；而且各泛音的频率和振幅也不相同。因此，声音的音品是一种复杂的感觉，主要由刺激人耳的声音频谱决定，但也与其波形、声压和频谱的频率位置有关。因此一个录下的声音用不同响度级重放时具有不同的音品。

**音色 (tone quality)** 即音品。

**音障 (sonic barrier)** 又称声障。当飞机的飞行速度接近或超过声速时，在机翼或飞机的其他部位出现激波，形成强烈的空气压缩薄层，并与机面相互作用使物体表面气流分离，造成升力下降，阻力骤增的现象。此时，由于飞机周围的空气压力和温度等急剧变化，飞机的安定性变坏，甚至操纵失灵。音障阻碍飞机飞行速度的提高。为了克服音障，进一步提高飞行速度，除采用大推力动力装置外，人们还设法改进飞机外形，采用尖前缘的薄翼型、后掠翼等结构，使飞机的速度提高到超音速。

**阴极射线管 (cathode ray tube)** 将电信号转变为可见图像的电子束管。通常指用于显示图形、字符的电子束管，如示波管、字符图形显示管。阴极射线管的基本部件有电子枪、荧光屏和管壳。

电子枪在电子管里产生并能控制、聚焦、偏转电子束的电极结构。下图所示为阴极射线示波管结构图。电子枪的一端是阴极，它是一块金属托片，其上敷以钡和锶的氧化物。当金属托片背面的钨灯丝加热阴极时，涂敷在表面的氧化物就发射电子，这些电子被比阴极电位高的套筒式的第一阳极加速，后经控制电极聚焦成束状电子流。电子枪是电真空器件中的主要部件。

### 阴极射线示波管

**荧光屏** 由内测涂有荧光材料的玻璃屏构成。在受电场或磁场控制的电子束轰击下能显示图形和字符。屏上涂的荧光材料不同显示的颜色和余辉也不同。观察用示波管常用发绿光的荧光粉；供摄录的示波管则采用发光光谱与胶卷相匹配的蓝色荧光粉。字符图形显示管的荧光屏，有两层发光颜色不同的荧光粉，加速电压较低时，电子束穿入外层荧光粉使之激励发光；加速电压较高时，电子深入内层荧光粉，此时以内层粉发光为主。调节电压可以得到 2~4 种不同颜色（如红、橙、黄、绿）。

阴极射线管偏转电子束的系统有两种：一种采用静电偏转，显示电信号波形的示波管常采用静电偏转系统。如上图所示，垂直偏转板加信号电压（即 y 偏转板），水平偏转板加锯齿波电压作为时基（即 x 偏转板）。另一种采用磁偏转系统。它由两组偏转线圈构成 x 偏转线圈（或行偏转线圈）和 y 偏转线圈（帧偏转线圈）。线圈组套在射线管的颈部，它们通以电流产生磁场实现对电子束的偏转。磁偏转系统可以电子束实现大角度偏转，因而屏幕较大的射线管一般都采用磁偏转系统实现电子束的偏转。

**银河系 (the Galaxy)** 地球和太阳所在的恒星系统。在整个宇宙中它只是一个普通的星系。因其投影在天球上为一乳白亮带，故以银河得名。我们肉眼所能见到的天体，除了三个朦胧似光斑样的近邻河外星系外，其余都属银河系成员。银河系是一个扁平状透镜形的系统，它的主体是直径约为 25 千秒差距（1 秒差距= $3 \times 10^{13}$  千米=3.26 光年）、厚约为 1~2 千秒差距的银盘，其中央平面称为银盘面（简称银面），银盘中心隆起的球

状区域称为核球。恒星在核球区高度密集，中心致密区称为银核。银盘外面是一个范围广大、近乎球状分布的系统，称为银晕。银晕外面是银冕，也呈球状。银河系的质量为  $1.4 \times 10^{11}$  太阳质量，但总体密度仅为  $7 \times 10^{-27}$  千克/米<sup>3</sup>，其中恒星约占 90%，气体和尘埃组成的星际物质约占 10%。银河系含有 1000 亿颗以上各种类型的恒星，常以成双、成群、成团的形式出现。气体和尘埃有相当一部分以银河星云的形式出现，其余的弥漫散布于星际空间。化学成分是氢占 73%，氦占 27%。

银河系在绕其中心旋转，旋转速度随中心距离不同而各异。太阳系位于银河系的边缘部分，其旋转速度约为 250 千米/秒。它有一个微弱的磁场，磁力线平行于旋臂，磁场使星际粒子沿磁力线排列，光线穿过这些物质会发生偏振，估计磁场的平均强度约为  $10^{-3}$  高斯。

银河系的起源同宇宙理论紧密相关。按照大爆炸宇宙论，原星系（包括银河系）是由于宇宙中物质密度的起伏和引力不稳定形成的。我们观测到的全部星系都是在  $10^{10}$  年前高密度原始物质因密度发生起伏，出现引力不稳定和不断膨胀，逐步形成原星系，并演化为包括银河系在内的星系团。目前对银河系的起源了解得还很不够，尚在研究之中。

**引力波 (gravitational wave)** 物体做加速运动时所发出的引力辐射。爱因斯坦等人证明了广义相对论的引力场方程包含有波动解，从而首先从理论上预言了引力波的存在。引力波在真空中以光速传播，其强度很弱。由于引力波与物质的相互作用极其微弱，对它的探测极为困难。20 世纪 70 年代初有人宣称利用很大的防震的金属圆柱形谐振腔，测到了来自太空的引力波信号。但其后这一结果没有复现。70 年代末美国的射电天文学家报导了对射电脉冲双星 (PSR 1913+6) 公转周期变短的长期观察结果，该结果与因引力波辐射而损失能量的理论预言相符。这被认为是引力波存在的间接证据。

**引力质量 (gravitational mass)** 参见质量。

**引力子 (graviton)** 理论上设想的传递引力相互作用的媒介粒子。与电磁相互作用情况类比，人们相信质量周围存在引力场，当物体加速运动时将发出引力辐射或引力波。按照量子论的观点，引力场也具有粒子性。构成引力场的基本粒子就是引力子，其质量为 0，自旋为 2，在真空中恒以光速运动。早在 1916 年，爱因斯坦根据他的广义相对论就预言了引力波的存在。但是由于引力相互作用的强度非常微弱，所以对它的探测和测量极为困难。至今尽管不断有人宣称已探测到某些天体（如脉冲双星）的引力辐射，但由于这类实验背景噪声很大，无法重复，所以很难得到公认。此外，引力场量子化问题在理论上还存在某些根本性困难。这些理论上和实验上的困难促使不少物理学家正在通过各种努力进行深入研究。

**应变 (strain)** 连续体在体内应力作用下其形状尺寸所发生的相对改变。三种最简单的应变是：线应变或相对伸长率，即物体内任一点处单位长度的长度增加量。由于单位长度可以在不同方向上选取，所以，在连续体内同一点处的不同方向上，线应变一般并不相同。角应变或切应变，即在连续体内一点处，两互相垂直的有向线元所夹直角在形变后角度的减小量。在连续体的同一点处，可以沿不同方向引出这两根互相垂直的线元，所以，在连续体内同一点处，由于互相垂直的一对线元有不同取向，一般就有不同的角应变。体应变或体积膨胀率，即连续体内一点处单位

体积连续体的体积增加量。

线应变的简单例子是，长为  $l$  的均质杆，在两横断的端面上受到均匀分布的拉力，使杆的长度伸长了  $\Delta l$ ，则杆中每一点处沿杆长方向的线应变是  $\Delta l/l$ 。角应变的简单例子是，均质长方体的两相对侧面上，受到与侧面相切和均匀分布的一对剪切力作用（见图），变成了一个平行六面体，则在物体中的每一点处，沿水平向右和竖直向上两方向所夹直角的角应变是  $\varphi$ 。

理论分析表明，知道了连续体中一点处三个互相垂直方向上的线应变，以及这三个互相垂直的方向中每两个方向所夹直角的角应变，就可以知道这一点处沿任意方向的线应变和任意两垂直方向所夹直角的角应变。

### 角应变

应力 (stress) 由外力、非均匀温度场或因物体内在缺陷而形变等原因引起的物体内部单位截面两边所出现的作用力。应力是矢量，其大小和方向与物体内部各点位置以及所取截面的方向有关。在物体中一点  $P$  处，以单位矢量  $n$  为法向的截面上的应力  $p_n$  可按如下方法确定：过  $P$  点作一法向为  $n$  的截面微元  $\Delta S$ ，如截面正侧物质通过此截面对负侧物质作用的力为  $\Delta F$ ，则  $P$  点处以  $n$  为法向的截面上的应力  $p_n$  是

$$p_n = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S},$$

应力方向与截面法向  $n$  一般不相同。应力在  $n$  方向的分量称为正应力或法应力，应力沿截面切向的分量称为剪应力或切应力。在物体中的同一点处，由于所取截面方向的不同，应力的大小和方向一般也不相同。物体中一点处方向各不相同的截面上的应力全体，构成了此点的应力状态，它可由此点处三个互相垂直的截面上的应力来描述。设这三个截面的法向分别沿直角坐标轴  $Ox_1$ 、 $Ox_2$  和  $Ox_3$  方向，以  $p_{ij}$  表示法向沿  $Ox_i$  的截面上的应力的  $x_j$  分量，又以  $n_j$  表示单位矢量  $n$  的  $x_j$  分量，则法向为  $n$  的截面上的应力  $p_n$  的  $x_i$  分量  $p_{ni}$  是

$$p_{ni} = \sum_{j=1}^3 p_{ij} n_j.$$

物体中一点处的九个应力分量  $p_{ij}$  构成此点的应力张量，物体中一点处的应力张量能完全描写此点的应力状态。

游标尺 (vernier calipers) 又称游标卡尺，也是最常用的长度计量仪器。其构造如图所示。左测脚固定在主尺上，跟主尺垂直，右测脚和左测脚平行，和容片一起固定在游标尺上，可以随同游标尺一起沿主尺滑动。上面一对测脚可量槽的宽度、管的内径等；下面一对可量零件的外尺寸，例如厚度和管的外径；右端伸出的容片可量槽或筒的深度。主尺上有毫米刻度线，并注明刻度值，游标尺上也有刻度线，可用来准确读出主尺最小分度的几分之几的数值。

如果游标尺共有 10 个等分刻度，则游标尺能准确读出到主尺最小分度的  $1/10$ ，即 0.1 毫米。如果游标尺共有 20 个等分刻度，则可读到主尺最小分度的  $1/20$ ，即 0.05 毫米。如果游标尺共有 50 等分刻度，可读到 0.02 毫米。

## 游标尺

**有效数字 (significant figure)** 实验中能够测量到 (包括最后位估计在内) 的数字。对于同一个待测量, 测量方法不同, 测量仪器准确度不同, 可能得到的有效数字位数也不同, 即有效数字不同。例如物体的长度  $l=1.0453$  (米), 是用米尺量度到的, 米尺的最小刻度为 1 毫米, 即借助于米尺, 其中的 1.045 可读出, 而  $0.0003$  (米)  $=0.3$  (毫米) 却是最小刻度间估读出来的。所以以上五个数字都是从测量得到的, 都是有效的; 如果将  $l$  写成:  $1.04532$  (米), 显然是不合适的, 因为最后两位是估计数或估读数, 在一般的测量中, 最小分度能估读到百分之一是不可能的, 因此为了达到参考的目的, 规定有效数字的最后一位可以是估读的。真正用到准确的数, 最后位估读数都不能带。

最后位估读的方法通常有如下三种:

(1) 最小分度  $1/10$  估读法。例如:  $l=2.04 \times 10^{-2}$  (米) 的值, 测量者认为, 待测物的长度  $2.03 \times 10^{-2}$  和  $2.05 \times 10^{-2}$  (米) 都是不对的, 说明实际长度在  $(2.04-0.005, 2.04+0.005) \times 10^{-2}$  (米) 范围内, 因此范围的宽度为  $+0.005 - (-0.005) = 0.01$  是最小分度的  $1/10$ , 这种估读法为  $1/10$  估读法, 是最常用, 也是物理实验所要求的估读法。

(2) 最小分度  $1/5$  估读法。例如物体的长度测量结果是  $2.02 \times 10^{-2}$  (米)、 $2.03 \times 10^{-2}$  (米) 和  $2.04 \times 10^{-2}$  (米)。三种结果都可以, 几乎分辨不出, 但是  $2.01 \times 10^{-2}$  (米) 和  $2.05 \times 10^{-2}$  (米) 是完全不可能的。因此范围宽度为  $0.02$  (米) 是最小分度的  $1/5$ 。

(3) 最小分度  $1/2$  估读法。不难推出, 如果测量值在  $(2.0375, 2.0425)$  范围内, 则称为  $1/2$  估读法。

估读所采用的方法应根据需要来选择, 在精确度尽可能高的要求时, 可采用  $1/10$  估读法, 如果测量对象本身长度在各方向上参差不齐或者不稳定, 就可采用  $1/5$  或者  $1/2$  估读法, 或者  $1/10$  估读法在多方位、长时间多测些数据, 然后求平均, 表示测量值。注意: 有效数字的位数从本质上来看, 是描述了测量结果的精确程度, 反映了测量仪器的准确度和测量值的量度水平。有效数字位数越多, 测量仪器的准确度越高, 量度水平也越高, 反之则低。

有效数字位数不是测量结果的质量好坏。有些场合要求精确度很高, 因此选用仪器、测量方法都要相应提高; 有些场合并不要求精确度很高, 而要求测量速度快, 有效数字位数只要少数几位就能满足要求, 那么选用的仪器和测量方法可相当简单以提高速度。所以在实验覆盖面的整个范围, 先预测有效数字位数少的量, 对总体有所了解, 然后根据需要有目的地高精度测量所需要的数据, 以达到实验目的。测量的精确度不是越高越好, 而是根据需要来合理确定。该高的不高, 就会将“精细”结构遗漏掉; 该低的不低, 就会得到不稳定的结果, 而且本质被随机现象所替代。因此物理实验的重要目的之一, 就是根据特定的要求正确选用仪器和测量方法, 使实验结果的准确度和可靠性都有规定的保证。

在有效数字表示中, 小数后的“0”不能随意取舍。虽然数值上似乎相等, 但有效数字的位数反映了测量的有关信息, 不能随意更改。

整数、无理数 (如  $\ln 2$ ) 等因为不是实验测量到的数, 所以没有“有

效”程度的含义，可根据需要取它们的位数，例如  $\pi = 3.14159265\dots$ ，如果取 3.14 则形式上为三位数，3.14 比  $\pi$  小 0.00159...，所以不确定度可写成 0.002 即  $3.140 \pm 0.002$ ，实际为四位数，即在 (3.138, 3.142) 范围内。在单摆振动的周期表示式里，有

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

式中的 2 是整数，不考虑有效数字的位数，因此在数据分析里，整数和无理数以及循环小数，都不考虑它们的有效数字位数，因为它们都可以比测量到的数，取得更精确的值，不会影响实验结果的不确定度。

有效数字的获得 (gain of the significant figures) 是物理实验中最基本的测量概念。在中学阶段，有效数字的获得有如下两种方法：直接比较法和指零法。两种方法的典型仪器是米尺和天平。

米尺是与待测物体直接比“高低”，从刻度尺上读出数据的，因此是直接比较法，读出的数据，其有效数字的位数由尺的读数和最后位的估读数决定，这种方法获得有效数字，是最简单、易接受并能准确把握。

天平虽也是与待测物直接比轻重，但不能直接读出数据。特别是天平还未平衡即将平衡时，可以根据天平摆动的灵敏度及规律算出物体的质量。实际上天平的平衡是相对的，指针与空载时的零点完全重合是几乎做不到的，所以往往利用灵敏度与偏离零点的偏格数，算出待测物的质量并定出质量的有效数字。

例如用天平称衡待测物体的质量时，有如下规律。砝码的质量为 32.560 克时，天平指针右偏 3.0 分度；砝码质量为 32.590 克时，指针左偏 0.3 分度。利用杠杆原理，可以得到待测物的质量：

$$32.590 - \frac{32.590 - 32.560}{3.0 - (-0.3)} \times 0.3 = 32.587(\text{克})$$

或者

$$32.560 + \frac{32.590 - 32.560}{3.0 - (-0.3)} \times 3.0 = 32.687(\text{克})$$

因此不难得到，最小的修正量为：

$$\frac{32.590 - 32.560}{3.0 - (-0.3)} \times 0.1 = 0.0009 = 0.001$$

上述计算方法，常常使天平“加”和“减”砝码的次数减少，因而提高测量速度，并且能准确定出有效数字的位数。在电学实验中的电桥、电势计也采用了指零法，虽然指零仪器仪表不同，但原理都是相同的。

有效数字的运算规则 (operational rule of significant figures) 是实验数据的一种最基本又最重要的处理方法。在中学阶段可归结为有效数字的加减、乘除和其它运算三种方法。掌握运算方法，不仅可提高数值运算速度，而且对参与运算的数的分析和研究可提出更合理的实验方法，得到更准确、更可靠的实验结果。

**加减运算** 假定实验直接测量值

$$A = 3.2846 (\text{单位}),$$

$$B = 3.145 \times 10^2 (\text{单位}),$$

$$C = 1.323 \times 10 (\text{单位}),$$

待测量  $y$  与  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的关系为：

$$y = A + B - C \\ = 3.2864 + 3.145 \times 10^2 - 1.323 \times 10.$$

假设它们的单位都是相同的。不难看出， $A$ 、 $B$ 、 $C$  的估计位的大小，分别为  $0.0004$ 、 $0.005 \times 10^2 = 0.5$  和  $0.003 \times 10 = 0.03$ 。可见， $y$  的有效数字最后位只能是小数后的第一位。所以，对  $A$  和  $C$  应该调整成  $3.3$  和  $13.2$ ，则

$$y = 3.3 + 314.5 - 13.2 = 304.6,$$

最后结果为： $y = 3.046 \times 10^2$  (单位)。

注意：有效数字相加、减，其最后结果的有效数字位数没有一定的规律，但最后位取决于参与运算数的最大不确定度。上述  $A$ 、 $B$ 、 $C$  中最大不确定度来自  $B$ ，所以  $y$  的不确定度也与  $B$  相同。因此不难推出这样的道理， $A$  和  $C$  的测量精确度太高，根本没有必要，所以最佳方案是， $A$  和  $C$  都测到小数后第二位，并且先运算，得到： $A - C = 3.29 - 13.23 = -9.94$ ，

然后第二步取： $A - C = -9.9$ ，

第三步相加  $B$ ： $A - C + B = -9.9 + 314.5 = 304.6$ ，

最后得到结果： $3.046 \times 10^2$  (单位)。

在  $A - C$  的运算里，如果  $A$  和  $C$  的值很接近，那么其差的有效数字位数会变得很少，说明测量的精确度和其差的精确度并不一致，在实验中应尽量避免。例如测量水的质量，通常都是两次称衡法最后求得的。当选用的烧杯不合适，即  $m_{\text{杯}} \gg m_{\text{水}}$  时，因

$$m_{\text{杯}+\text{水}} - m_{\text{杯}} = 0, \text{ 即 } m_{\text{水}} = 0.$$

所以有效数字的运算过程，包含了许多物理实验中的方法和仪器选择是否准确、合理等重要信息，为进一步分析和研究提供了依据。

**乘除运算 假定实验测量值**

$$A = 2.3425 \text{ (单位)},$$

$$B = 1.35 \times 10^{-3} \text{ (单位)},$$

$$C = 3.843 \text{ (单位)},$$

待测量  $y$  与  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的关系为： $y = A \cdot B / C$ ，那么  $y$  的有效数字位数又怎样来确定呢？在说明确定的方法之前，先在不定位的数上，加短横表示其数值是估读的，即  $A = 2.342\bar{5}$ ， $B = 1.35 \times 10^{-3}$ ， $C = 3.843$ 。然后运算  $A \cdot B$  的积，为了清楚，列出横、竖式：

$$A \cdot B = 2.342\bar{5} \times 1.35 \times 10^{-3}$$

$\begin{array}{r} 2.342\bar{5} \\ \times 1.35 \\ \hline 11712\bar{5} \\ 7027\bar{5} \\ 2342\bar{5} \\ \hline 3.16237\bar{5} \end{array}$	} —— 确定数相乘，结果仍为确定数
$\begin{array}{r} 2.34\bar{2} \\ \times 1.35 \\ \hline 1170 \\ 702 \\ 234 \\ \hline 3.1590 \end{array}$	} —— 不确定数乘确定数，结果仍为不确定数

所以最后应写成： $A \cdot B = 3.2 \times 10^{-3}$  或者  $3.16 \times 10^{-3}$ 。有趣的是

$\begin{array}{r} 2.34 \\ \times 1.35 \\ \hline 1170 \\ 702 \\ 234 \\ \hline 3.1590 \end{array}$	$\begin{array}{r} 2.3 \\ \times 1.35 \\ \hline 115 \\ 69 \\ 23 \\ \hline 3.105 \end{array}$
--	---

2.34 × 1.35 = 3.2 或者 3.16 结果仍没有变，而 2.3 × 1.35 = 3.10 已开始变化。所以不难得出这样结论：有效数字相乘时，首先确定最少的位数，然后运算各数都调整成相同位数，再按乘法规则运算，最后结果的位数，基本保持不变。由上例可知，A 的有效位数为 5 位，B 为 3 位，因此根据四舍五入法则，将 A 化成 3 位，然后相乘，得到结果取 3 位，更严格应取 2 位。在运算的中间结果，可多取一位，在运算的最后结果最好位数相等。不难理解，有效数字相除的规律与相乘的相同。所以 y 的运算，写成如下的运算步骤：

$$y = A \cdot B / C = 2.3425 \times \frac{1.35 \times 10^{-3}}{3.843}$$

第一步调整位数，即

$$y = 2.34 \times \frac{1.35 \times 10^{-3}}{3.843}$$

第二步计算结果，可得到： $y = 0.822656... \times 10^{-3}$ ，第三步定位，即取结果的位数与最少位相同，即

$$y = 8.2 \times 10^{-4} \text{ (单位)}。$$

注意：定位时，不考虑小数点，也不考虑幂指数，单纯比较数的大小，比较时，结果的数不能大于直接参与运算的数。例如参与运算的数 3.84 写成 384，结果的数  $82 < 384$ ，取 822 或者 823 显然大于 384，是不合适的，因此结果取为 82，然后写成科学记数形式。在 A 和 B 的乘积里，取 31 ( $< 135$ ) 而不取 316 ( $> 135$ ) 也是这个道理。在上述运算比较时，取 3.84 而不取 1.35 或者 2.34，是因为 3.84 的有效数字位数最少。由上述讨论，不难写出下面例题的结果：

$$y = \frac{1.24568 \times 10^3 \times 2.35 \times 10^{-6}}{5.348 \times 10^2} = 5.5 \times 10^{-4}$$

同样可以看到， $1.24568 \times 10^3$  和  $5.348 \times 10^2$  两个量的测量精确度高于  $2.35 \times 10^{-6}$ ，由运算法则可知是没有必要的，即测量前应该先估算一下最少位数是多少？能否设法提高？然后确定其他量的测量方案，最后写出实验步骤，计算测量结果。

其它运算在中学物理实验中，其它的运算包括： $n$  次幂、开  $n$  次方、指数、对数和三角函数等运算。通常这些运算结果的有效数字位数与变量的有效数字位数相同。例如

$$3.42^2 = 1.18 \times 10,$$

$$3.42^3 = 4.0 \times 10,$$

$$\sqrt{3.420} = 1.849,$$

$$\sqrt[3]{3.420} = 1.507,$$

$$\ln 3.4354 = 1.2341,$$

$$\sin 25.3^\circ = 0.428。$$

实验中有时运算公式较复杂，可以综合运用上述三种运算方法，以求得合理的实验结果。

**有效质量 (effective mass)** 晶体内电子的等效质量。晶体内电子由于受到晶格周期势的作用而不同于自由电子。但人们发现，可以把这



种周期势场的作用归结为使电子的质量由自由电子质量  $m_0$  变为  $m^*$ ，并称  $m^*$  为“有效质量”。此时晶体中的自由电子的能量和动量关系 ( $E=p^2/2m^*$ ) 与自由空间中电子的能量和动量关系 ( $E=p^2/2m^*$ ) 形式完全相同。有效质量概念的引进给讨论晶体中电子的运动带来了方便。这种近似方法又称为有效质量近似。

有效质量与能带的形状有关。由于晶体各向异性，它通常是一个二阶张量。

**右手定则 (right-hand rule)** 一种确定物理量方向或指向的法则。用于如下两方面。

**右手定则 (1)** 确定矢积方向的法则。矢量 A 和 B 的矢积是矢量 C，即

$$C=A \times B,$$

C 的大小为

$$C=AB\sin \theta,$$

式中  $\theta$  是 A 和 B 的夹角。C 的方向按右手定则垂直于 A、B (将它们的起点放在一起) 所构成的平面。右手定则指的是，伸出右手，选取适当方位，能使四指按自然的生理结构，从 A 出发，经由 A、B 间小于  $180^\circ$  的夹角转向 B，则伸直的大拇指所指方向即为 C 的方向 (如图 1)。也可以设想有一个右手螺旋，当用右手从 A 出发，经由 A、B 间小于  $180^\circ$  的夹角转向 B 而旋转这螺旋时，它的前进方向即为 C 的方向。因此，在矢积运算中，右手定则也称右手螺旋定则。

#### 图 2 右手定则 (2)

**右手定则 (2)** 又称“发电机定则”。确定感应电流方向 (即指向) 的法则。伸出右手，四指平摊，大拇指与其余四指垂直。设想使磁场线垂直地从掌心进入，而大拇指指向导体的运动方向，则其余四指所指即为感应电流的方向，也即把这装置看作“发电机”时导体内感应电动势的指向 (由负极指向正极) (如图 2)。在开始学习电磁感应课程时，右手定则对于确定感应电流方向是必须掌握的。但到后来，这种方向往往可通过楞次定律或矢积运算确定。

**宇称 (Parity)** 常指“空间宇称”。描述粒子或粒子系统在空间反演变换下变换性质的物理量。它只取两种值，即 +1 和 -1。空间反演变换就是将空间坐标轴的方向改变为相反方向的变换。量子力学中微观粒子的状态是用波函数描写的。如果波函数在空间反演下保持不变，即  $\varphi(x, t) = \varphi(-x, t)$ ，就说该粒子的状态具有“偶宇称” ( $P=+1$ )；如果波函数在空间反演下变号，即  $\varphi(x, t) = -\varphi(-x, t)$ ，就说该粒子的状态具有“奇宇称” ( $P=-1$ )。实验已经证明，强作用和电磁作用中宇称是守恒的，但在弱作用过程中，宇称不守恒。弱作用中宇称不守恒是李政道和杨振宁于 1956 年首先从理论上预言，第二年吴健雄首先利用极化钴的  $\beta$  衰变实验证实了这个预言。

**宇宙 (universe)** 广漠太空和其中存在的各种天体以及弥漫物质的总称。宇宙一词语出战国尸佼《尸子》：“四方上下曰宇，古往今来曰宙。”辩证唯物主义认为，宇宙是无限的，它处于不断的运动和演化之中。宇宙是多样而又统一的，它的多样性表现在物质及其相互作用的各种形态，它

的统一性体现在其物质性，即客观存在性上。人类对宇宙的认识由太阳系到银河系，再扩展到河外星系、星系团乃至总星系。迄今，人们借助于天文仪器已可观测到一百多亿光年远处的宇宙。宇宙天体呈现多种多样的形态，有质量密集的星体，也有密度极小的松散星云，此外，整个宇宙空间还充满辐射场，它相当于 3K 的电磁黑体辐射。各种星体也千差万别，它们的大小、质量、密度、温度、颜色，以及年龄和寿命等有很大差别。

物理学和天体物理学中具体研究的宇宙可理解为“观测到的宇宙”或“我们的宇宙”，这是指现在所能观测到的现象的总和，又称“总星系”。在这个前提下，所谓“宇宙的年龄”、“宇宙的大小”、“宇宙的质量”以及“宇宙的创生”等才是有意义的。宇宙速度 (cosmic velocity) 物体以一定程度摆脱地球和太阳引力的束缚飞向宇宙空间所需的最低速度，也就是不计空气阻力和光压等的影响时，从地球表面向宇宙空间发射人造地球卫星、行星际飞行器和恒星际飞行器所需的最低速度。这三种速度分别称为第一宇宙速度、第二宇宙速度和第三宇宙速度。

第一宇宙速度又称环绕速度。人造卫星围绕地球表面做圆周运动时的速度，也是发射人造地球卫星所需的最低速度。在人造卫星环绕地球表面做圆周运动时，提供向心力的是地球对人造卫星的万有引力，即

$$G \frac{mM}{R^2} = m \frac{v_1^2}{R}$$

式中  $v_1$  为第一宇宙速度， $m$  和  $M$  分别是人造卫星和地球的质量， $R$  是地球半径， $G$  是万有引力常数。因为地面附近的引力等于重力，即

$$mg = G \frac{mM}{R^2}$$

从上两式得出第一宇宙速度是

$$v_1 = \sqrt{gR} = 7.9 \text{ 千米/秒}。$$

人造卫星的速度由于某种原因而减小到小于第一宇宙速度时，将会坠落地面；如果在轨道上某处的速度大于这个速度，只要轨道不与地球表面相交，它的轨道就是一个椭圆。

第二宇宙速度 又称逃逸速度。航天飞行器脱离地球引力场所需的最低发射速度。根据机械能守恒定律，飞行器以第二宇宙速度  $v_2$  离开地球表面时的机械能应与它脱离引力场并耗尽其全部动能时的机械能相等。飞行器离开地球质心的距离为  $r$  时，引力势能是  $-GmM/r$ ，所以

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - G \frac{mM}{R} = 0,$$

由此可得第二宇宙速度是

$$v_2 = \sqrt{2G \frac{M}{R}} = \sqrt{2gR} = 11.2 \text{ 千米/秒}$$

它是第一宇宙速度的  $\sqrt{2}$  倍。

第三宇宙速度航天飞行器脱离太阳引力场所需的最低发射速度。已知脱离地球的最小速度与环绕地球的速度之比为  $\sqrt{2} - 1$ ，所以可推知从地球轨道上的固定位置发射航天器脱离太阳引力场的最小速度是地球环绕太阳速度的  $\sqrt{2}$  倍。地球环绕太阳的速度是  $v_1^* = 29.77 \text{ 千米/秒} \sim 30 \text{ 千米/秒}$ ，所以这个最小速度是

$$v_2^* = \sqrt{2}v_1^* = 42.10 \text{千米 / 秒}$$

但是，航天飞行器如要脱离太阳引力场，首先就要脱离地球引力场的有效范围，在这个范围以外，地球的引力场与太阳引力场相比可以略去不计。这个范围本身的线度与地球公转半径相比也可略去不计，即相对于太阳来说，当飞行器基本脱离地球引力范围时，其位置仍离地球不远。如以  $v_3$  表示第三宇宙速度，则飞行器初动能  $mv_3^2/2$  应该正好等于克服地球引力所做的功  $W_1$ （ $=\frac{1}{2}mv_2^2$ ）与克服太阳引力所做的功  $W_2=m(v_2^*)^2/2$  之和，

$v_2^*$  是航天飞行器基本脱离地球引力范围时相对于地球的公转速度，

$v_2^{**} = v_2^* - v_1^*$ 。当  $v_2^*$  与  $v_1^*$  取相同方向时， $v_2^{**} = |v_2^*|$  有最小值：

$$V_2^{**} = v_2^* - v_1^* = 42.10 - 29.77 = 12.33 \text{千米 / 秒}$$

$$V_2^{**} = v_2^* - v_1^* = 42.10 - 29.77 = 12.33 \text{千米 / 秒}$$

将此数值代入

$$\frac{1}{2}mv_3^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}m(v_2^{**})^2$$

得出第三宇宙速度为

$$v_3 = \sqrt{v_2^2 + (v_2^{**})^2}$$

**宇宙线 (cosmic ray)** 来自宇宙空间的高能粒子流。进入大气层之前的宇宙线称为“初级宇宙线”。初级宇宙线进入地球大气层并与大气中的原子发生碰撞后产生的粒子流称为“次级宇宙线”。初级宇宙线包括高能电子、高能质子、以及少数  $\mu$  子和重原子核，是各种天体演化过程的产物，它的起源和传播是高能天体物理学研究的一个课题。次级宇宙线的成分主要包括  $\mu$  子和电子，以及  $\gamma$  光子等。本世纪 50 年代高能加速器问世以前，主要通过宇宙线实验发现基本粒子，并对这些粒子的性质以及它们之间的相互作用和相互转化进行研究。例如， $\mu^\pm$  子、正电子、 $\pi^\pm$  介子、 $K^\pm$ 、 $\Lambda^\pm$ 、 $\Sigma^\pm$  等基本粒子都是首先从宇宙线实验中发现的。目前宇宙线物理的研究重点已逐步转向对高空初级宇宙线的研究和利用。

**宇宙学 (cosmology)** 是天文学的一个分支。它从整体的角度来研究自然界的整体——宇宙的创生、结构和演化。它的内容主要包括宇宙论和观测宇宙学两大部分。宇宙论是以物理学理论及观测事实为基础，对宇宙的创生、宇宙物质结构和宇宙演化进行研究和探讨；观测宇宙学侧重于探测、发现宇宙在大尺度时空上的特征。两者的有机结合，使宇宙学逐渐成为一门较严密而自洽的学科。

远在几千年前，人类就开始思考自然界在整体上的性质，特别是它的大小、结构和起源，并形成了一些朴素的认识，如中国古代的“盖天说”、“浑天说”、“宣夜说”，以及源于古希腊并风行于中世纪欧洲的托勒密等的“地心说”等。这些观点可看作是早期的宇宙学说。至 16 世纪，哥白尼创立了“日心说”；17 世纪，牛顿又开辟了用力学方法去研究宇宙的新途径，建立了经典宇宙学。但是在那些年代，人类对自然界的认识非常有限，缺乏有力的观测手段和严密的理论分析，因此对宇宙的研究有很大的臆测成分。

到了 20 世纪初，情况有了很大改变。1915 年，爱因斯坦创立了广义相对论。1929 年哈勃发现了河外星系的谱线红移。按照多普勒效应的理论，

这表明河外星系都在离开我们而运动，并由此得出了宇宙处在不断膨胀之中的结论。在大量的观测数据基础上，哈勃给出了后来以他的名字命名的定律： $\dot{R}/R = \text{常数}$ （式中  $R$  表示宇宙的空间尺度，上标“ $\cdot$ ”表示对时间的导数）。以上这两大成就为宇宙学奠定了理论和观测基础。至此，现代意义上的宇宙学宣告诞生。

按宇宙的产生和演化过程，即以宇宙时来划分，现代宇宙论大体上可分为三大部分：量子宇宙学、极（甚）早期宇宙论和标准热宇宙模型（又称“大爆炸学说”）。在宇宙时  $10^{-43}$  秒前，这是宇宙创生期，由量子宇宙学来描述。根据量子力学中的海森堡不确定关系  $\Delta t \cdot \Delta E \sim h \cdot \Delta x \cdot \Delta p \sim h$ ，考虑到此时宇宙的能量密度很高（ $\sim 10^{19} \text{GeV}$ ），因此经典的时空概念并不适用，难以按照常规的概念来区分时间以及空间概念。为此，以当代英国科学家霍金为首的一些学者提出了量子宇宙学理论。他们认为此时整个宇宙的状态应用宇宙波函数来描述，由路径积分方法可导出宇宙波函数需满足的 Wheeler-Dewitt 方程，随后求解此方程。Hartle-Hawking 波函数作为该方程的一个解，能较合理地显示宇宙的创生，并能与宇宙的演化相吻合。近年来由于虫洞理论的提出，人们发现可存在多宇宙结构，各个宇宙间可通过虫洞机制产生相互作用。目前的量子宇宙学尚处于发展阶段。

在宇宙时由  $10^{-43}$  秒至  $10^{-10}$  秒之间，能量密度小于  $10^{19} \text{GeV}$  到  $10 \text{GeV}$  之间的宇宙演化阶段称之为极（甚）早期宇宙时期。若将标准热宇宙模型外推到宇宙极（甚）早时期，会在理论上遇到一些疑难问题，如视界、平直性、过多磁单极等。80 年代初，美国的古思和原苏联的林德等人提出了暴胀宇宙论。按照粒子物理理论，宇宙在这时期会经历一系列相变。首先是自然界中的三种基本相互作用（电磁作用，强作用和弱作用）是统一的；但是随着宇宙的膨胀，能量标度下降，真空对称性破缺，从而使强作用与其它两种作用的差异显露出来；其后，随着能量标度进一步减小，宇宙又经历了第二次相变，使电磁作用和弱作用的统一性也破坏了。前者称之为 GUT 相变，后者称之为 W-S 相变。在 GUT 相变中，原来对称的真空变为非对称真空。非对称真空包括了具有能量较高的假真空和能量最低的真真空。在相变前处于能量最低的真真空态的宇宙，在相变后由于真空态的变异，将处于能量较高的假真空态。按照量子理论，能量较高的状态是不稳定的，因此宇宙就会从能量较高的假真空态进入到能量最低的真真空态，从而使宇宙发生指数形式的膨胀——暴胀。这种暴胀理论可以解决上述诸多的疑难。然而，尽管暴胀宇宙论能较好解决这些疑难，但在宇宙演化过程中，却提不出任何新的可观测预言，因此也引起了部分科学家的质疑。宇宙究竟是否真的经历过暴胀阶段？另一方面，按拓扑学观点，在上述的相变过程中，在宇宙空间会形成一系列拓扑荷：畸壁、宇宙弦、单极子、脉系等。目前研究得最多的是宇宙弦，这是一种线性的一维拓扑荷。无限长直的宇宙弦称之为直弦，而线性封闭成圈的宇宙弦称之为环状闭弦。由于相变时能量很高，宇宙弦有很高的质量线密度和强大的张力，在它们自身演化中会不停地振动、扭曲、割接，并吸聚大量的宇宙物质，因此可能逐渐形成如今我们所观测到的星系和星团。宇宙弦具有这种形成大尺度物质结构的“晶种”作用，为我们解释宇宙中大尺度物质的形成和分布提供了一种理论依据。

从宇宙时  $10^{-10}$  秒至今的宇宙演化过程，可用标准热宇宙模型描述。按照大爆炸学说，根据现代物理理论，可导出宇宙的空间尺度与温度、宇宙时以及能量密度之间的明确的关系式，从而可清晰地描绘出宇宙在该时期各个阶段演化的物理图像。该学说还给出了一些重大的预言，其中一些已被后来的观测所证实。目前该理论已为大多数科学家所接受。

哈勃定律的发现可认为是观测宇宙学形成的起点，在以后 20 年中，由于受到科学技术上的限制，一直没有太大的进展。直到第二次世界大战后，射电天文学得到了飞速发展。美国 5 米直径的 Hale 大型光学望远镜建成和投入使用，导致了 60 年代天文学上一系列重大发现，其中最有代表性的 3K 宇宙微波背景辐射、类星体、脉冲星和星际分子等的发现使观测宇宙学进入一个崭新的阶段。随后 20 年中，又陆续有多架大口径和大视场光学望远镜以及大型高灵敏度射电望远镜投入使用。此外，紫外、X 射线和红外波段天文望远镜一个接一个地被送入太空，天文观测摆脱了地球大气的限制，进入了空间时代。现在，人类几乎能在从  $\gamma$  射线到射电波段整个电磁波谱范围内观测太空天体的辐射。此外，对宇宙线、中微子以及引力波的探测都得到了长足的发展。目前人们已能观测到空间尺度达上百亿光年，时间尺度达上百亿年的宇宙时空区域。

除了已提到的哈勃定律和 3K 宇宙微波背景辐射等重大发现外，其他已有的一些主要观测结果还有：“大尺度结构”：据估测，宇宙中的星系可能有数百亿个之多。根据对几万个星系的统计分析，宇宙中存在着星系的团、超团和空洞，在千万光年至亿光年的尺度上是不均匀的，呈现出所谓“海绵或泡沫结构”。在更大尺度上则较为均匀。对现有类星体样本的统计分析，没有充分证据说明类星体也有类似分布。天体时标：根据对地球和月球上最古老的岩石及太阳系中陨石的各种物理和化学性质分析，以及对银河系球状星团的观测和推算，估计目前已知天体的年龄均小于  $2 \times 10^{10}$  年。元素丰度：宇宙中最有代表性的天体是恒星。观测发现，恒星的表面主要由氢组成，其次是氦，仅在其内部有少量的重元素。对太阳系及邻近恒星、银河系及其它河外星系观测分析表明，在这些天体系统中，氦与氢的质量比值均为 0.3 左右，氦丰度（氦元素质量与总质量的比值）约为 0.27 ~ 0.34。下表列出了宇宙物质结构层次的基本特征作为参考。

层次(代表)	行星(地球)	恒星(太阳)	星际云(平均)	星团(球状星团)	星系(旋涡星系)	宇宙(指现代认识的空间范围)
半径(pc)	$10^{-10}$	$10^{-8}$	10	10	$10^4$	$10^{10}(?)$
平均距离(pc)	$10^{-5}$	1	10	$10^3$	$10^6$	
质量(M)	$10^{-6}$	1	10	$10^6$	$10^{11}$	$10^{21}(?)$
平均密度( $g \cdot cm^{-3}$ )	1	1	$10^{-23}$	$10^{-21}$	$10^{-23}$	$10^{-30}(?)$
中心温度(K)	$10^4$	$10^7$	$10^2$			

**阈值条件 (threshold condition)** 激光器实现激光输出的临界条件。在激光器的工作物质已实现粒子数反转后，对频率在工作物质荧光谱线宽度范围内的光能产生光增益。但由于存在着众多的损耗因素，如反射

镜的吸收、衍射，工作物质不均匀造成的折射和散射，以及激光输出等因素，所以为了使谐振腔内的光振荡继续维持、加强，并继续实现激光输出，必须要求增益大于损耗。设谐振腔长为  $L$ ，两块反射镜的光强反射率为  $R_1$  和  $R_2$ ，增益系数为  $G(\nu)$ ，第一块反射镜面处的光强为  $I_0$ ，则通过增益介质到达第二块反射镜面时的光强为  $I_0 e^{G(\nu)L}$ ；反射光强为  $R_2 I_0 e^{G(\nu)L}$ 。再经过长度为  $L$  的工作物质并在第一反射镜面处反射后，光强变为  $R_1 R_2 I_0 e^{2G(\nu)L}$ ，以此规律不断重复。光束在腔中每经过 1 次往返，其光强便改变  $R_1 R_2 e^{2G(\nu)L}$  倍。如果这倍数小于 1，光强将减小，因此不可能建立激光振荡。所以，实现激光振荡的阈值条件为

$$R_1 R_2 e^{2G(\nu)L} = 1,$$

即增益系数必须满足上述条件。由于增益系数与粒子数反转成正比，因此相应地存在一个粒子数反转阈值，简称阈值反转。阈值条件还有多种表达方式，如阈值电流密度，阈值功率密度，其含义都是一样的。

**元激发 (elementary excitation)** 又称准粒子。描写固体中微观粒子的集体运动状态所引进的具有各种不同性质的基本激发单元。

固体材料是由大量粒子（电子、离子等）构成的一个复杂的多体系统，粒子之间存在着较强的相互作用。在绝对零度时，系统的能量状态最低，称为基态。当温度升高或在别的外扰动作用下，固体中的微观粒子将做种种复杂的集体运动，体系跃迁到各种能量较高的激发态。固体的许多物理性质都与系统的各种激发态有关。理论研究表明，对于能量靠近基态的低激发态，往往可以看成是一些独立的基本激发单元的集合，这些基本激发单元称为元激发，有时也称为准粒子，它们具有确定的能量和相应的准动量。元激发概念的引入，可使固体这样一种有复杂相互作用的多体系统简化成接近于理想气体的准粒子系统。这时固体中的许多与低激发态有关的物理现象和性质，都可用各种元激发以及它们之间的相互作用来描述。

固体中典型的元激发，即准粒子，有声子——晶格振动的元激发；准自由电子——晶体周期场中电子的元激发；电磁耦合场量子——电磁场与声子耦合的元激发；激子——束缚的电子-空穴对，以及极化子——电子与晶格畸变场耦合的元激发等。

**声子** 晶格振动能量的量子。在温度  $T = 0\text{K}$  时，晶体内的原子绕格点的振动可用简谐振子近似。各点振动之间有一定的位相联系，因此这种晶格的集体振动便形成了平面波，称为“格波”。声子就是这种格波能量的量子。由于每个声子有确定的能量和准动量，可相当于一个粒子，但它又不是一种真实的粒子，故称为准粒子。声子的引入，使人们不仅对晶体的热学性质有了较深刻的认识，而且采用声子概念后可以用声子-电子、声子-光子等互作用模型来揭示晶体的光、电特性，使人们对物质的认识更为深入。

**准自由电子** 晶体中的电子。它具有有效质量  $m^*$ 。晶体中的电子受到晶格周期势场的作用，因而它不是自由的电子。但是理论上发现，这种晶格势场中的非自由电子可用一个不受到相互作用、质量为  $m^*$  的自由粒子来等价。 $m^*$  称为等效质量，它不等于自由电子质量  $m_0$ 。这种具有有效质量  $m^*$  的自由粒子就称为准自由电子。显然，准自由电子有效质量  $m^*$  的数值中包含了晶格势场与自由电子相互作用的信息。引进准自由电子概念后，对晶

体中电子运动的描述可大大简化。

**电磁耦合场量子** 电磁波和格波耦合的量子。当光入射到固体时激发了固体的晶格振动，将产生相应的格波。这时，光波电磁场就会和格波电磁场相互作用，从而形成既非光子又非声子的一类复合准粒子，称为电磁耦合场量子。这种复合准粒子具有晶格振动和电磁振动的双重特性。当耦合较弱时，在低频区或长波区，这种复合粒子具有声子的主要特征；在高频区或短波区，即光波区，则主要具有光子性质。

**激子** 在同一原子内形成的束缚的电子—空穴对。是固体的元激发之一。当入射光的能量小于禁带宽度时，从价带激发的电子不能到达导带而成为自由电子，只能落在禁带内靠近导带底部的激发能级上，这时这种电子就能与价带顶部留下的空穴通过库仑力的作用相互吸引，形成束缚的电子-空穴对。与成对产生的导带的自由电子和价带的自由空穴不同，激子的运动不产生光电导。激子从一个原子转移到另一个原子运动时，会在晶体内形成一种激发波，这种激发波的量子就是激子。

**原胞 (primitive cell)** 晶体内原子周期性排列的最小重复单元。同一种晶格内原胞的选择是可以任意的，但必须是最小的重复单元，而且在原胞内只包含一个原子。如图 1 为一个二维晶格，在这晶格内原胞是一个四边形，如四边形 1，四边形 2，四边形 3 均可选作原胞，而四边形 4 就不是原胞。

图 1 二维晶格的原胞

三维晶格中的原胞是一个平行六面体，它的边矢量  $a_1, a_2, a_3$  称为基矢。如简立方晶格中的立方体就是一个原胞。由于顶角原子被 8 个立方体所共有，因此在一个立方体内，每个顶角占有  $1/8$  个原子，所以每一个立方体内总共只含有一个原子，这种立方体称为简立方晶格的原胞。

在体心立方晶格中，一个立方体内包含有两个原子，所以这种立方体不是体心立方晶格的原胞。人们习惯选取如图 2 所示的由边矢量  $a_1, a_2, a_3$  所组成的平行六面体为体心立方晶格的原胞。在这个原胞内只包含一个原子。

同样在面心立方晶格中，一个立方体内包含有四个原子（因为每个面心原子为两个立方体所共有，故立方体内六个面心原子共占有三个原子，此外还有一个顶角原子），所以这立方体也不能选为面心立方晶格的原胞。一般习惯选取如图 3 所示的由边矢量  $a_1, a_2, a_3$  所组成的平行六面体作为面心立方晶格的原胞。

图 2 体心立方晶格的原胞图

### 3 面心立方晶格的原胞

**原子 (atom)** 见原子结构。

**原子半径 (atomic radius)** 表征原子线度的量。反映了物质在这个线度上存在具有共同特征的某一层面的内部结构。可通过如下方法估算出原子的大致半径。一摩尔某种原子的数目等于阿伏伽德罗常数  $N_A$ ，如果这种原子的原子量为  $A$ ，所构成的固态或液态物质的密度为  $\rho$ ，则  $A$  千克

这种原子的总体积为  $A/\rho$ 。如果再假定每一原子占有的体积为  $\frac{4}{3} r^3$  ( $r$  为原子半径)，则有  $\frac{4}{3} r^3 N_A = A/\rho$ ，由此可得到原子半径估算公式：

$r = \sqrt[3]{\frac{3A}{4\rho N_A}}$ 。由于  $r \sim \sqrt[3]{A/\rho}$ ，所以由此式算出的各种原子半径几乎都差不多，其数量级大约是  $10^{-10}$  米。例如锂 ( $A=7$ )，铝 ( $A=27$ )，铜 ( $A=63$ ) 及铅 ( $A=207$ ) 原子的半径分别约为  $1.6 \times 10^{-10}$  米， $1.6 \times 10^{-10}$  米， $1.4 \times 10^{-10}$  米和  $1.9 \times 10^{-10}$  米。按照玻尔模型的观点，随着原子序数  $Z$  的增加，核外电子受到原子核正电荷的吸引力增大，因此电子离核的距离减小；另一方面，每个核外电子都有占据能量最低的轨道的倾向，但由于泡利不相容原理，虽然第一层能量最低电子的轨道半径小，但电子不能都在同一轨道，因此  $Z$  增加时电子在核外排列的轨道层次将要增加。以上两种效应有抵消趋势，所以最终使各种原子半径变化不大。

**玻尔半径** 氢原子玻尔模型中电子的稳定轨道半径，其值为  $r = \frac{4\pi\epsilon_0 h^2}{m_e e^2} n^2$  ( $n=1, 2, \dots$ )，其中  $\epsilon_0$  为真空电容率， $h$  为普朗克常数， $m$  和  $e$  分别为电子的质量和电荷， $n$  为量子数。若令  $n=1$ ，便得到第一玻尔半径，常用  $a_0$  表示： $a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 h^2}{m_e e^2} = 0.529 \times 10^{-10}$  米。第一玻尔半径常简称为玻尔半径。玻尔半径是由一些基本物理量所构成的具有长度量纲的量，在原子物理学中常常取它作为长度单位。

**最可几半径** 与玻尔模型不同，在量子力学中对于氢原子中的电子运动，不能给出严格的轨道，只能给出它的位置分布概率。对于氢原子最低的，也是最稳定的能量状态来说，电子的位置概率分布是球对称的。出现概率最大的位置离原子核中心的距离即为最可几半径。由量子力学公式算出其值恰好等于玻尔半径  $a_0$ 。

玻尔半径或最可几半径给出了氢原子的线度。一般原子的半径可通过 X 射线衍射或场离子显微镜等实验直接测量，所得到的数量级都大致相同。

**原子磁矩 (atomic magnetic moment)** 原子所具有的磁偶极矩。原子磁矩来源于电子轨道运动所产生的轨道磁矩，电子的自旋磁矩，以及原子核磁矩。原子核的磁矩很小，通常只有电子自旋磁矩的千分之一，在原子物理中一般可不考虑。

**电子轨道磁矩** 与原子中电子的轨道运动相联系的有“轨道角动量” $L$  和“轨道磁矩” $\mu_L$  它们之间存在如下关系

$$\mu_L = -\frac{e}{2m_e} L,$$

式中  $m_e$  和  $e$  分别是电子的质量和电荷绝对值。上式中的负号来源于电子的电荷为负，所以电子轨道磁矩与轨道角动量的方向相反。轨道角动量和轨道磁矩在空间某一  $z$  方向的分量为

$$L_z = m\hbar,$$



$$\mu L_z = -m \frac{eh}{2m_e} = -m\mu_B ,$$

其中  $m$  为电子轨道磁量子数,  $h=h/2\pi$ ,  $h$  为普朗克常数。  $\mu_B = \frac{eh}{2m_e}$  称为“玻尔磁子”, 常作为电子磁矩的单位。

电子自旋磁矩电子具有自旋角动量  $s$ , 相应地具有自旋磁矩  $\mu_s$ , 其间存在如下关系

$$\mu_s = -g_s \frac{e}{2m_e} s ,$$

$g_s$  称为电子自旋的“ $g$  因子”。自旋效应实质上是一种相对论性量子现象。按照相对论量子力学(狄拉克理论),  $g_s=2$ 。如果进一步考虑到电子与自己所产生的电磁场之间的相互作用, 按照“量子电动力学”,  $g_s=2(1.001159652389 \pm 282 \times 10^{-12})$ , 此结果与精确的实验很好相符。自旋角动量沿空间某  $z$  方向的投影只能取两种值:

$$s_z = m_s h = \pm \frac{1}{2} h ,$$

所以电子自旋磁矩的  $z$  分量也只能取两种值:

$$\mu_{sz} = -g_s m_s \mu_B = \mu \frac{1}{2} g_s \mu_B .$$

**单电子原子磁矩** 电子的轨道角动量和自旋角动量合成为总角动量  $J=L+S$ , 电子的轨道磁矩和自旋磁矩合成为总磁矩  $\mu = \mu_w + \mu_s$ 。由于  $\mu_s$  和  $L$  的比值与  $\mu_s$  和  $S$  的比值不同,  $\mu$  与  $J$  并不同向。通常取  $\mu$  沿  $J$  方向的分量  $\mu_J$  称为总磁矩, 且它与总角动量之间存在如下关系:

$$\mu_J = g \frac{e}{2m_e} J ,$$

其中  $g$  因子或“朗德因子”可通过量子力学中的角动量理论算出。

**多电子原子磁矩** 为了得到多(价)电子原子的总磁矩  $\mu_J$  和总角动量  $J$  之间的关系, 应区分两种情况: “LS 耦合”和“JJ 耦合”。先求出所有电子的总轨道角动量  $L = \sum_i L_i$ , 以及总自旋角动量  $S = \sum_i S_i$ , 然后再求出总角动量  $J=L+S$ , 这种耦合方式称为 LS 耦合。如果先求出每个电子的总角动量  $J_i=L_i+S_i$ , 然后计算多电子原子的总角动量  $J = \sum_i J_i$ , 这称为 JJ 耦合。

由于角动量矢量按特定方式在空间取向(所谓“空间量子化”), 而轨道角动量和自旋角动量的空间取向方式有不同特点, 所以上述两种耦合方式并不等价。究竟采取何种耦合方式, 要视具体物理问题而定。在大多数情况下, 电子间的库仑相互作用比每个电子的自旋轨道间的相互作用重要, 此时应采用 LS 耦合。对于某些情况(如重原子或高激发态原子), 每个电子的自旋轨道相互作用比电子间的相互作用重要, 此时应采用 JJ 耦合方式。无论何种耦合方式, 原子的总磁矩与总角动量之间总具有正比关系, 但比例系数不同。

**原子光谱 (atomic spectrum)** 原子内电子运动状态发生跃变时产生的发射光谱或吸收光谱。原子光谱的波长通常落在红外、可见光和紫

外区。

研究简史 1814年夫琅和费首次发现太阳光谱中有许多暗线。1859年，德国物理学家基尔霍夫发明了分光计，并与德国化学家本生一起创立了光谱分析方法。他们发现各种化学元素具有特征光谱线，并据此发现了元素铯和铷。至19世纪60年代，已观察到1200多条太阳光谱暗线，并确认出其中800多条为地球上已知元素的谱线。其后又发现了氢和碱金属原子光谱的线系结构，并得到了经验公式（如氢光谱的巴耳末公式）。这些结果对于深入到原子领域的研究，以及后来玻尔模型和量子力学的建立和发展起到非常重要的作用。

**基本规律性** 原子光谱的结构决定于原子的能级结构。按照量子力学理论，原子中的电子可能处于一系列能量确定的状态，即定态。原子定态的能量可表示为  $E(n)$ ，其中  $n$  表示一个或几个量子数。例如在最简单情况下，氢原子的能级仅仅与“主量子数” $n$ 有关， $n$ 可取1, 2, 3, ...等任何正整数的值，这时  $E_n$  就表示  $n$ ，且有  $E_n = -I \frac{1}{n^2}$ ，其中  $I = 13.6\text{eV}$ ，是氢原子的电离电势。当  $n=1$  时， $E_1 = -I$ ，相应于最低能级。能量最低的状态称为“基态”；能量高于基态的状态称为“激发态”。处于较高能态的电子可通过发射光子而跃迁到较低能态；反之，处于较低能态的电子可通过吸收光子而跃迁到较高能态。再根据能量守恒定律，原子在这种跃迁过程中所放出的或所吸收的光子的能量( $h\nu$ )应等于两能级之差值，即  $h\nu = |E(n_1) - E(n_2)|$ ，其中  $h$  为普朗克常数， $\nu$  为光的频率，它与光的波数之间的关系是  $k = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$ ，其中  $\lambda$  为光的波长， $c$  为光在真空中的速率。于是有

$$k = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{hc} |E(n_1) - E(n_2)|$$

氢光谱线系的规律性可用上述公式得到说明。上式右侧是两项之差，其中每一项称为光谱项。对于氢原子来说，光谱项为  $T(n) = T(n) = \frac{R_H}{n^2}$ ，

其中  $R_H = \frac{I}{hc}$  即为氢原子的“里德伯常数”。上述每一条光谱线的波数可表示为两谱项之差这一事实，也称为“里德伯-里兹组合原则”。

**原子光谱的精细结构** 当考虑到原子中电子的自旋磁矩和轨道磁矩的相互作用后，原子的能级  $E(n)$  不仅与主量子数  $n$  有关，而且还与角量子数  $l$  或与总角动量量子数  $j$  有关，即  $E(n, j)$ 。于是  $n$  取确定值的能级将按  $j$  值的不同而分裂为几条能级。不过由于电子的自旋与轨道相互作用相对来说很小，所以能级随  $j$  值的改变很小。谱线的这种多重结构称为“精细结构”。如果考虑电子的磁矩和原子核磁矩的相互作用，原子的能级还会进一步发生更为精细的分裂，使原子光谱呈现出“超精细结构”。此外还有光谱线的“兰姆位移”，这是原子核的电荷对其附近真空产生影响等原因而引起原子某些能级（如  $2S_{1/2}$ ）产生非常微小改变所致。

**在外界电场和磁场中的原子光谱** 外界电场和磁场对原子中电子的状态会产生影响，从而引起原子能级改变或分裂。这种效果将会在原子光谱中反映出来。外电场引起谱线的分裂称为“斯塔克效应”；外磁场引起谱线的分裂称为“塞曼效应”。

**应用和发展** 原子光谱技术是研究原子结构、分子结构、固体性质以及外界电磁场与物质相互作用特征的重要手段，这一技术已广泛应用于化学、天体物理学和等离子体物理学等领域。原子光谱的发展在本世纪 60 年代又促进了激光技术的产生和发展，从而使光谱技术从精度和广度上达到了更高的水平。

**原子核 (atomic nucleus)** 原子的中心，几乎集

中了全部原子的质量，其线度约为  $10^{-15}$  米的微观客体。卢瑟福 粒子散射实验最早证实了原子的这一核心部分的存在。

**原子核的组成** 目前通常认为原子核由质子和中子组成，质子和中子统称为核子。原子核的核子数常用  $A$  表示，质子数用  $Z$  表示，中子数用  $N$  表示，且有  $A=Z+N$ 。原子核的质子数  $Z$  就是它的电荷数，也是元素周期表中的原子序数。原子的化学性质和一般物理性质几乎完全决定于其原子核的质子数。原子核可用符号  ${}^A_Z X_N$  或  ${}^A X$  表示，其中  $X$  是元素名称。例如氢核记为  ${}^1_1 H_0$ ，氘核记为  ${}^2_1 D_1$ ，氦核记为  ${}^4_2 He_2$  等，或简单地记为  ${}^1_1 H$ ， ${}^2_1 D$  和  ${}^4_2 He$  等。 $Z$  与  $N$  都相同的原子核称为核素； $Z$  相同  $N$  不同的原子核称为同位素； $N$  相同  $Z$  不同的原子核称为同中子素； $A$  相同而  $N$  和  $Z$  不同的原子核称为同量异位系。

**原子核的质量和结合能** 原子核的质量并不等于组成核子质量之和，还与它们之间的结合能有关。对于核素  ${}^A_Z X$ ，它的核由  $Z$  个质子和  $N$  个中子组成，核的质量应为  $m_x = Zm_p + (A-Z)m_n - m$ ，其中  $m_p$  和  $m_n$  分别表示质子和中子质量， $m$  称为质量亏损， $B = mc^2$  ( $c$  为真空中的光速) 就是结合能，它也就是这些质子和中子结合为原子核时所释放出来的能量。结合能在数值上也等于将该原子核拆成  $Z$  个质子和  $A-Z$  个中子时所必须花费的最小能量。原子核的结合能  $B$  与总核子数  $A$  之比称为该核每个核子的平均结合能，记为  $\epsilon = B/A$ 。例如氘 ( ${}^2_1 H$ ) 的结合能为  $B=2.224\text{MeV}$ ，平均结合能为  $\epsilon=1.112\text{MeV}$ ；氦核 ( ${}^4_2 He$ ) 的  $B=28.296\text{MeV}$ ， $\epsilon=7.074\text{MeV}$ 。核子平均结合能与总核子数  $A$  的函数关系如上图所示。从图中可以看出，平均结合能曲线总趋势是两头低，中间高。该曲线在开始时有些起伏，逐渐光滑地达到极大值 ( $\sim 8\text{MeV}$ )，然后又缓慢地变小。当结合能小的核变为结合能大的核时，会释放出能量。从图中可以看出，有两条途径可以获得这种能量，一是重核分裂，如一个重核分裂成两个中等质量的核；二是轻核聚变为较重的核。

### 核子的平均结合能

**原子核的大小和形状** 原子核除轻核外，平均结合能近似为一常数。若将原子核近似地看成是平均核子数密度  $\rho_0$ 、半径为  $R_0$  的均匀小球，则有

$$\frac{4}{3} \rho_0 R_0^3 = A, \text{ 即}$$

$$R_0 = r_0 A^{1/3}$$

$$r_0 = (3/4 \rho_0)^{1/3} = 1.2 \times 10^{-15} \text{ 米},$$

其中  $r_0$  的值为一经验常数。实际的核常常偏离球状，不同的核具有不同形状。同一核处在不同状态时，其形状也有差异。通常可分为球形、长椭球、

扁椭球等。例如 $^{16}_8\text{O}$ 的基态呈球形，但其激发态则偏离球状；稀土元素原子核的基态呈椭球形状。实验上可通过中子或电子散射来测定核的形状。

**稳定核与不稳定核** 现在已知的原子核共约 2000 余种，自然界中天然存在的元素原子核约为 300 余种，利用高能粒子轰击稳定核而产生的人造原子核约 1600 余种。天然核中大多数是稳定的（约 280 余种），但原子序数很高的重元素原子核是不稳定的（约 30 种）。人造原子核都是不稳定的。不稳定核将通过放射性衰变而最终蜕变为稳定的核。

**原子核物理学 (nuclear physics)** 物理学的一个分支。研究原子核的性质、结构、相互作用及运动规律的学科。原子核是原子的核心，其线度只有原子线度（ $\sim 10^{-10}$  米）的万分之一（即  $\sim 10^{-15}$  米）。在原子内部，核外的电子运动是主要的。原子核的存在对原子性质的贡献仅仅在于其质量和电荷。原子核的其他性质（如磁矩、电四极矩等）对原子的影响则相当微小。另一方面，核外电子的行为对原子核的性质也几乎没有影响。因此，原子和原子核是物质结构中截然区分的两个层次，它不同于分子和原子的关系，也不同于原子核和基本粒子的关系。决定原子结构特征及其基本性质的是电磁相互作用，而决定原子核结构特征及其基本性质的是强相互作用（核力）。原子核物理学的内容通常包括，原子核和核力的性质，核结构和核模型，放射性衰变及其规律，核反应，核裂变和核聚变等，广义地说还包括宇宙线，基本粒子，中子物理，射线与物质相互作用等。原子核物理学也是原子能技术、同位素和放射性在工农业、医学等领域应用的基础。现代原子核物理学的实验需要大型设备，如加速器和反应堆等。目前在核结构、核力以及核反应机制等许多方面还存在不少基本问题有待解决。物理学家普遍认为，核力是构成核子内部更基本的组分粒子（夸克）之间的强相互作用的一种剩余效应，犹如分子力是原子内部电磁相互作用的一种剩余效应一样。所以，对于原子核的认识或许有待于对基本粒子和基本相互作用的研究和认识的深化。

**原子结构 (atomic structure)** 原子是物质结构的一个层次，是构成元素的最小单元，其线度约为  $10^{-10}$  米。在这一线度上，各种原子具有类似的内部壳层结构。原子结构可用量子理论进行描述。

**发展简史** 古代原子说“原子”一词来自希腊文，涵义是不可再被分割的东西。公元前 4 世纪，古希腊哲学家德谟克利特就提出了这个概念，把它作为构成物质的最小单元。但差不多同时代的亚里士多德等人则认为，物质是连续的，可被无限分割。后一种观点在中世纪占优势。但是随着科学，特别是化学的发展，物质的原子说在 16 世纪以后逐渐地占了优势，并为人们普遍接受。1808 年，英国化学家道耳顿在实验基础上提出了原子是构成化学元素的最小单元这个观点。

**汤姆孙模型和有核模型** 随着科学实践的不断发展，人们发现原子并不是不可分割的。1879 年汤姆孙发现电子，这是原子存在内部结构的有力证据。其后许多物理学家对原子结构提出了各种模型，其中比较引人注目的是汤姆孙本人于 1898~1907 年建立的“汤姆孙模型”。在这个模型中，原子内的正电荷均匀分布在整个体积内，带负电的电子则镶嵌在其中。为了解释元素周期表，他假设电子分布在一个个同心圆环上，每一环上最多只能安置有限个电子。另一类代表性的模型是原子的“有核模型”或“行星式模型”。1903 年林纳从阴极射线被物质吸收的实验中发现，原子内部似

乎是非常空虚的。于是长冈半太郎提出了如下设想：原子内的正电荷集中于中心，电子则绕着该中心运动。1909年卢瑟福散射实验为原子有核模型提供了有力的实验依据。1911年，卢瑟福在此基础上经过严格的理论推导，最终建立了原子结构的有核模型。

**玻尔模型** 按照经典物理学，卢瑟福的原子有核模型是不稳定的，并且也无法解释原子的光谱线结构。为了反映原子结构的稳定性以及原子光谱分立性等实验事实，丹麦物理学家玻尔在两个基本假设和一个条件（角动量量子化）的基础上建立了氢原子结构的模型（参见玻尔模型）。在玻尔模型中，绕核运动的电子的轨道半径只能取某些分立的值（ $r=na_0$ ）；电子的能量也只能取某些分立的值（ $E_n = -I\frac{1}{n^2}$ ）。当电子从一个能级跃迁到另一个能级时，将发射或吸收一个光子，其光子的能量等于两能级之差。于是玻尔模型很好解释了氢光谱的实验结果。

但是玻尔模型存在着根本性困难。它无法解释比氢更复杂的原子的光谱；即使对氢光谱，这个模型也无法解释其中的精细结构部分。此外，玻尔理论中引进的角动量量子化条件也显得极不自然，似乎需要寻找进一步的，且可以通过直接实验验证的基本出发点。

**原子结构的量子理论** 1923年，法国物理学家德布罗意提出了电子具有波动性的观念，从而开创了原子结构量子理论的研究。束缚在原子线度内的电子具有显著的波动性，这种电子的运动状态可用波函数 $\varphi(x, t)$ 描写。电子波是一种“概率波”， $|\varphi(x, t)|^2$ 代表t时刻电子出现在x点处的概率密度。经典物理学中的轨道概念于是在这里不再适用。电子波函数所满足的基本运动方程称为“薛定谔方程”，原子中电子的状态可以通过求解该方程而得到。

**原子内电子的状态** 被束缚在原子中的电子由于其波动性而产生干涉，并且只有当电子波的波长或频率满足某些条件时，相干后才能形成稳定的驻波分布状态，称为定态。由于电子波的频率与其能量成正比（ $E=h\nu$ ），上述定态条件也可表述为，只有当原子中电子的能量满足一定条件时才能形成稳定状态。这正是原子内电子能量量子化的依据。类似地，定态的轨道角动量平方 $L^2$ 以及轨道角动量沿任一z方向的分量 $L_z$ 也都只能取某些分立的值： $L^2=l(l+1)h^2$ ， $L_z=m_l h$ ，这里 $h=h/2\pi$ ，h是普朗克常数，l和 $m_l$ 分别称为角动量量子数和磁量子数。原子中电子的状态可用它的能量、角动量、角动量沿任一z方向的分量和它的自旋沿z方向的分量这四个物理量来表征。这些物理量都取分立的值，与它们相应的四个量子数是：主量子数n，角动量量子数l，磁量子数 $m_l$ 和自旋磁量子数 $m_s$ 。这四个量子数的可能值分别是： $n=1, 2, 3, \dots$ ， $l=0, 1, \dots, n-1$ ，即n确定时，l可取n种可能值： $m_l=-l, -l+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, l-1, l$ ，即l确定时， $m_s$ 可取 $2l+1$ 种可能值； $m_s = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$ ，即只有两种可能值。原子中电子的状态可用波函数表示为 $\psi_{nlm_l m_s}(x, t)$ 或用符号表示为 $|nlm_l m_s\rangle$ 。

**泡利不相容原理** 多电子原子中的电子不能都挤在最低能量状态，需要满足泡利不相容原理的要求。根据这个原理，原子中不能有两个或两个以上的电子具有完全相同的以上四个量子数。

**原子壳层结构** 原子中电子的能量主要决定于主量子数  $n$ , 所以可以认为  $n$  相同的电子处在同一(能量)壳层上。随着  $n$  的增加, 存在许多壳层。与  $n=1, 2, 3, 4, \dots$  相应的壳层分别称为 K、L、M、N...壳层。在同一壳层内, 角量子数  $l$  相同的电子又构成“支壳层”。 $l=0, 1, 2, \dots, (n-1)$  等支壳层分别用 s、p、d、f、g...表示。于是主量子数为  $n$ , 角量子数为  $l$  的支壳层中有  $x$  个电子的组态可用  $nL^x$  表示。例如, 在第三壳层的第二支壳层中有两个电子, 现在可表示为  $3p^2$ 。因为当  $l$  的值一定时, 磁量子数  $m_l$  可取  $2l+1$  种可能值; 且  $m_s$  又可取两种可能值, 所以每一支壳层可容纳的最多电子数为  $2(2l+1)$ 。每一主壳层可容纳的最多电子数便是  $\sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2$ 。根据这些规律, 表 1 中列出了各主壳层中 ( $n$  一定) 和各支壳层中 ( $n, l$  一定) 可容纳的最多电子数。

表 1 原子中的电子壳层

$n$	1	2		3			4				...
$l$	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3	...
电子态	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	...
最多电子数	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	...
	2	8		18			32				...

原子中的电子按能量由低到高的顺序填充壳层, 从而得到基态原子中的电子组态(见表 2)。原子的壳层结构来自严格的量子力学理论, 它可以解释元素的周期表。惰性气体原子的电子都有完全的壳层结构, 例如氦 ( $Z=2$ ) 原子的两个电子恰好填满第一壳层; 氖 ( $Z=10$ ) 原子的 10 个电子恰好填满第一和第二壳层; 氩 ( $Z=18$ ) 原子的 18 个电子恰好填满第一和第二壳层, 以及第三壳层中的 s 和 p 支壳层。其他如氪 ( $Z=36$ )、氙 ( $Z=54$ )、氡 ( $Z=86$ ) 等原子也都具有这种完全壳层结构。这类原子因此具有最稳定的化学性质, 常温下都是单原子分子气体。排列在惰性气体之后的是碱金属元素锂 ( $Z=3$ )、钠 ( $Z=11$ )、钾 ( $Z=19$ ) 以及铷 ( $Z=37$ )、铯 ( $Z=55$ )、钫 ( $Z=87$ ) 等, 这些原子最外层都只有一个(价)电子, 这个电子与原子的其余部分结合较弱, 容易离去。所以碱金属的电离能具有极小值, 电离后形成一价正离子。另一类称为卤族元素原子, 如氟 ( $Z=9$ )、氯 ( $Z=17$ ) 以及溴 ( $Z=35$ )、碘 ( $Z=53$ )、砹 ( $Z=85$ ) 等, 它们的最外壳层都只有 7 个电子, 其中 2 个填满 s 支壳层, 5 个填充 p 支壳层。所以这类原子很容易从外界吸收一个电子而形成完全的壳层结构。这类元素的化学亲和势较高。可见, 元素周期表中同族元素的性质所以相似, 是由于它们具有相似的最外壳层(即价电子壳层)电子组态。元素的化学性质和物理性质的周期性来自原子的电子壳层结构。

原子的壳层结构有时会显示出某些“反常情况”。例如在表 2 中, 钾 ( $Z=19$ ) 的最外层一个电子并不按次填充到 3d 支壳层, 而是落在 4s 支壳层。这是由于 4s 态电子的能量反而比 3d 态低些。类似的情况还很多。量子力学对这些反常情况也都能作出解释。

**原子物理学(atomic physics)** 物理学的一个分支。在线度为  $10^{-10}$

米的称为原子的层次上，物质结构具有普遍的结构特征。原子物理学就是在这一层次上研究原子的内部结构和运动规律，从而揭示出决定这种结构和运动规律的相互作用。主要内容通常包括：原子结构模型，核外电子的运动（包括轨道运动和自旋运动）及分布规律，原子和分子光谱的基本特征及精细结构，原子和外界电磁场的相互作用，原子的电离和碰撞过程等。原子物理学在本世纪初开始迅速发展，它的理论基础是量子力学。原子物理学的发展也推动了原子核物理学、固体物理学、激光和波谱学以及加速器技术的形成和发展。

**原子质量单位 (atomic mass unit)** 物理学中计量原子质量的单位。在国际单位制中规定取一个碳同位素原子 $^{12}_6\text{C}$ 的静止质量的十二分之一为原子质量单位，用“u”表示， $1\text{u}=1.6605402 \times 10^{-27}$  千克。各种核素的原子质量就是它的原子量和原子质量单位的乘积（换算时 1u 取  $1.66054 \times 10^{-27}$  千克）。例如，氢原子( $^1_1\text{H}$ )的质量  $m=1.007825\text{u}$ ，即  $1.67343 \times 10^{-27}$  千克。历史上曾采用过以氢原子质量作为原子质量标准（定为 1），后来又曾改用氧 $^{16}_8\text{O}$ 原子质量的十六分之一作为原子质量单位。

**圆偏振光 (circularly polarized light)** 光在传播过程中，电矢量末端的轨迹在垂直于传播方向的平面上的投影为一圆，则称为圆偏振光。

表 2 原子的电子组态 (Z 36)

主量子数	1	2	3	4				
角量子数	0	0 1	0 1 2	0 1				
电子态	1s	2s 2p	3s 3p	3d 4s	4p			
Z	符号	名称	电离能	电子壳层		电子组态		
1	H	氢	13.60	1				1s
2	He	氦	24.58	2				1s <sup>2</sup>
3	Li	锂	5.39		1			[He]2s
4	Be	铍	9.32		2			2s <sup>2</sup>
5	B	硼	8.30		2	1		2s <sup>2</sup> 2p
6	C	碳	11.26	氦壳层	2	2		2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>
7	N	氮	14.54		2	3		2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>
8	O	氧	13.61		2	4		2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>
9	F	氟	17.42		2	5		2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>
10	Ne	氖	21.56		2	6		2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>
11	Na	钠	5.141					[Ne]3s
12	Mg	镁	7.64			2		3s <sup>2</sup>
13	Al	铝	5.98		2	1		3s <sup>2</sup> 3p
14	Si	硅	8.15	氖壳层	2	2		3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>
15	P	磷	10.55		2	3		3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>
16	S	硫	10.36		2	4		3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>
17	Cl	氯	13.01		2	5		3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>
18	Ar	氩	15.76		2	6		3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>
19	K	钾	4.34			1		[Ar]4s

20	Ca	钙	6.11		2		4s <sup>2</sup>
21	Sc	钪	6.56		1	2	3d4s <sup>2</sup>
22	Ti	钛	6.83		2	2	3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>
23	V	钒	6.74		3	2	3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>
24	Cr	铬	6.76		5	1	3d <sup>5</sup> 4s
25	Mn	锰	7.43		5	2	3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>
26	Fe	铁	7.90		6	2	3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>
27	Co	钴	7.86	氦壳层	7	2	3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>
28	Ni	镍	7.63		8	2	3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>
29	Cu	铜	7.72		10	1	3d <sup>10</sup> 4s
30	Zn	锌	9.39		10	2	3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>
31	Ga	镓	6.00		10	2	1 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p
32	Ge	锗	7.88		10	2	2 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>
33	As	砷	9.81		10	2	3 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>
34	Se	硒	9.75		10	2	4 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>
35	Br	溴	11.84		10	2	5 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup>
36	Kr	氪	14.00		10	2	6 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>

使自然光通过尼科耳棱镜，产生平面偏振光。再让平面偏振光垂直射入  $\lambda/4$  波片，且使前者振动方向与后者光轴方向的夹角为  $=45^\circ$ ，以便使进入波片后分解成的 o 光和 e 光的振幅相同，即  $A_o=A_e=A\cos 45^\circ$ ，其中 A 为平面偏振光的振幅。当它们沿同一方向在波片内传播且从波片射出时，o 光和 e 光之间的相位差为  $\varphi=\frac{\pi}{2}$ ，于是合振动为圆偏振光。

为了检验圆偏振光，可让待测光通过尼科耳棱镜。转动尼科耳棱镜一周，如果观察到的透射光强度无变化，则待测光可能是自然光或圆偏振光。如果此时再在尼科耳棱镜后加一块  $\lambda/4$  波片和第二块尼科耳棱镜，并转动第二块尼科耳棱镜以改变它的透光方向，观察透射光的强度变化。若转动一周中视场始终不变，则待测光为自然光。若第二块尼科耳棱镜有一个位置可使视场全暗，则待测光为圆偏振光。

**圆周运动 (circular motion)** 轨迹为圆周的运动。在圆周运动中，若在任何相等的时间间隔内通过圆周上弧长相等的圆弧，称为匀速圆周运动。匀速圆周运动其实是匀速率圆周运动，其速度方向是时刻变化的。匀速率圆周运动的加速度大小始终不变，等于  $v^2/R$ ，v 是沿着圆周运动的速率，R 是圆周半径，这加速度的方向指向圆心，所以称为向心加速度。若圆周运动不是匀速率的，其加速度有两个分量，一个指向圆心，大小为  $v^2/R$ ，v 是瞬时速率，称为向心加速度，另一个沿着圆周的切线方向，大小为  $dv/dt$ ，称为切向加速度， $dv/dt > 0$  的运动是速率沿着运动方向增加的圆周运动， $dv/dt < 0$  的运动是速率沿着运动方向减小的运动。

**阅读理解题 (comprehension question)** 一种测试阅读能力的试题。阅读理解题要求考生阅读一篇与物理知识有关的文章（例如物理学史的文章，物理知识在生活、技术上应用的科普文章），然后回答若干道（一般是 5~6 道）问题，以检测考生对物理知识有关的广泛科学信息的理解程度。文后的问题主要测试考生能否基本上看懂文章，能否将所学的



物理基础知识应用于对新知识的理解，以及在理解文章意义的基础上，能否提出与文章所述不同的观点。

阅读理解题提供了一种测试物理知识迁移能力的重要手段，即在已有物理知识的基础上，学习理解新知识的能力。阅读并有条理、科学地组织和表述自己对所阅读内容的理解，是一种进行科学技术信息交流的最基本技能。这种技能是考生今后在任何学习和工作中都会以不同方式遇到的，具有较好的预测效度。

例如一篇题为“声学显微镜”的短文，介绍了利用声波成像和声学显微镜的设计原理，并和光学显微镜作了比较。文后的第一个问题要求考生“将声学显微镜和光学显微镜比较，它所具有的两个优点和两个缺点”，更深入的问题是“文中提到在某些媒质中高频波将会发生衰减，给出另一个有关波衰减的例子，并说明发生衰减的理由”。

**乐音 (musical sound)** 和谐悦耳的声音。一般指乐器和歌唱所发出的声音。它是物体做有规律振动时发生的声音，其波形图是周期性的曲线。它是复音的一种，在听觉上能产生明确的音调、音色。语言中的元音也是乐音。

**云室 (cloud chamber)** 一种早期显示带电粒子径迹的探测器。由英国物理学家威耳孙于 1911 年发明，故又称威耳孙云室。云室主要为一柱形空腔，腔内充满空气、水和酒精的饱和蒸气。当荷电粒子进入云室时，利用信号触发膨胀机构，使云室内的蒸气急速膨胀，温度下降，形成过饱和状态。此时带电粒子路径上的气体分子如果发生电离，过饱和蒸气便立即以离子为中心凝结成雾滴，在适当照明下便能看到或拍摄到带电粒子的径迹。根据径迹长短、浓淡和在磁场中弯曲的情况，可测量出粒子寿命、质量、电荷、能量等性质。

云室在早期的原子核和粒子物理研究中曾起到重要的作用，例如正电子就是首先利用云室装置从宇宙线实验中发现的。由于云室的灵敏时间短，工作效率不高，目前在科研中已很少应用。当前在原子核和核子物理学的研究中常用的探测器是核乳胶、气泡室、流光室、多丝正比室和漂移室等。

**匀强电场 (uniform electric field)** 电场强度恒定的空间区域。在匀强电场中，各点处电场强度  $E$  的大小和方向相等；电力线相互平行且间距相等；电场中的等势面为垂直于电力线的平面。例如面电荷密度为  $\sigma$  的无限大带电平面的两侧空间中的电场分别为匀强电场，电场强度的值为  $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ ，其中  $\epsilon_0$  为真空介电常数。其等势面平行于带电平面。充电平行板

电容器的内部区域也存在匀强电场，电场强度的值为  $E = \frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0 S}$ ，式中  $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数， $Q$  为电容器一极板上的电量， $S$  为电容器极板的面积。电场强度的方向为从带正电极板指向负电极板。该区域内的等势面平行于电容器的极板。

**运动 (motion)** 物质的固有性质和存在方式。从一般意义上说，运动是宇宙中发生的一切变化和过程，既包括保持物体属性、结构和形态的量变，也包括改变物体属性、结构和形态的质变。运动和物质不可分离，运动是一切物质的存在方式，物质是一切形式运动的主体。运动可分为物

理运动、生命运动和社会运动三种基本形式。物理运动主要有：基本粒子运动，原子—分子运动，宏观物体运动，地球物理运动，天体运动。运动是在空间、时间中发生的，正如相对论所揭示的，空间、时间与物质运动具有统一性。尽管运动形式是多种多样的，它们之间却是可以互相转化的，但是任何运动形式转化为别种运动形式时，运动的总量不变。

**运动方程 (equation of motion)** 物体在运动时其位置与时间之间关系的数学表述。例如，一个做简谐振动的质点，其运动方程是

$$x = A \sin(\omega t + \varphi),$$

$x$  是质点的坐标， $t$  是时间，振幅  $A$ 、圆频率  $\omega$  和初相  $\varphi$  都是常数。此外，物体在运动时所遵循动力学规律的数学表示式也称为此物体的运动方程，例如，一个弹簧振子的平衡位置是  $x=0$  时，它的运动方程是

$$ma = -kx.$$

这里  $m$  是振子的质量， $a$  是加速度， $k$  是弹簧的倔强系数。

**运动观 (outlook of motion)** 关于运动的根本看法或根本观点。古代运动观以直观经验和思辨为基础，具有朴素的特点。近代英国培根提出运动是物质最主要的特征。笛卡儿提出运动量不生不灭的思想。至 19 世纪 40 年代迈尔、焦耳和亥姆霍兹一批科学家进一步证明运动既不能创造，也不能消灭，只能被转移。20 世纪初爱因斯坦狭义相对论揭示出质量、惯性是随着物体运动状态的不同而变化的，物体的质量与能量相互联系、相互制约。广义相对论则揭示出物质的分布和运动状态决定着时空结构的规律和引力场状况，而时空结构和引力场状况又决定着物质的运动，进一步证明和深化了物质、运动、时间、空间内在统一的观点。量子力学揭示出连续性的波有分立间断的粒子性，而分立间断的粒子有连续的波动性，从微观领域深化了物质运动连续性与间断性内在统一的观点，辩证唯物主义运动观认为运动与物质是不可分离的，不可能有不运动的物质，也不可能离开物质的运动；认为运动既不能创造，也不能消灭，运动形式可以互相转化，但运动的总量不变；还认为运动是物质的固有性质和存在方式，是绝对的、无条件的，但是并不否认静止，它指出静止是从一定的关系上考察运动时，运动表现出来的特殊情况，是相对的、有条件的。

**运动量度的争论 (argument on motion quantification)** 17 至 18 世纪围绕物体运动的力的正确表示法的一场争论。所谓“物体运动的力”是指一个正在运动的物体所具有的使另一物体运动的能力，或者一个运动物体克服障碍和阻力的能力。这个力如何来量度呢？笛卡儿提出应把物体的大小和速度的乘积称为“运动量”，即  $mv$ ，并用它作为物体运动的力的量度，还推测了  $mv$  守恒。而莱布尼兹认为应把物体的质量和速度平方的乘积，即  $mv^2$  来作为物体运动的力的量度，并指出在所有自然过程中是  $mv^2$  守恒而不是  $mv$  守恒；只有接受他的这种力的量度，才能避免永动机的可能性。

从 17 世纪末起，欧洲许多物理学家甚至哲学家都卷进了这场争论。笛卡儿学派和莱布尼兹学派各执一词，互不相让。争论集中在碰撞问题上，笛卡儿派坚持  $mv$  守恒，可是长期把  $mv$  当作标量处理；莱布尼兹派则坚持  $mv^2$  守恒，却又未能把讨论局限于完全弹性碰撞（因为只有完全弹性碰撞过程中，才没有机械运动向其他运动形式的转化，机械运动本身才是守恒的）。应当说，在这场争论中双方都掌握了部分真理，但都未达到全

面和准确的认识。

**运动论** (theory of motion) 物理学史上用运动解释自然现象的一种观点。古希腊以亚里士多德为代表,他把运动看作是事物的可能状态向现实状态的转化。这种运动可分为四类: 位置的变化, 质的变化, 量的变化, 实体的转化, 即生成或消灭。中世纪以牛津派的布雷德沃丁和巴黎派的布里丹为代表, 后者认为物体不同位置的属性是物体在运动中一瞬间地获得的。到了 17 世纪以笛卡儿和莱布尼兹为代表, 他们认为运动是普遍存在的, 每种运动形式则受其规律所制约。笛卡儿在《哲学原理》中指出“物质中多样性全部是依靠物质各个部分的运动的”。莱布尼兹提出世界由单子构成, 单子不是物质实体, 但充满活力; 单子没有广延性, 它不可分割, 因此物质的本质不是广延性而是运动。在 17 世纪与运动论相对立的观点是以牛顿和他的学生克拉克为代表的动力论, 他们认为力是运动状态变化的原因, 一切自然现象都要用力来说明, 因此对不同领域的运动现象都要追溯到同一起源自自然力。然而运动论认为, 在自然界中更加基本的不是力, 而是运动, 并把物质的运动都归结为力学的运动形式, 因此运动论服从于机械因果律。而动力论则把物质的性质归结于力学的性质, 因而动力论也服从于机械因果律。所以运动论与动力论既有区别又相联系, 但这两种观点随着现代物理学的诞生和整个机械论的衰落而都被物理学家们所扬弃。

**运动学** (kinematics) 经典力学的一部分。研究物体间的相对位置随时间变化的规律或在运动中所经过的轨迹, 即用几何方法描述物体的运动, 而不讨论运动发生的原因。在初级的力学中, 只讨论质点和刚体运动的描述方法。质点运动学讨论质点位置、速度和加速度概念和它们在不同坐标系中的表示。要描述一个刚体的运动, 就应描述刚体上每一点的运动, 但刚体上各点的位置是相互关连的, 所以, 刚体运动的描述方法不同于质点运动的描述方法。刚体的位置可以由刚体上一点的位置和描写刚体在空间中取向的三个角度确定。刚体上各点的速度可由刚体上一点的速度和刚体的角速度共同决定。刚体上各点的加速度可由刚体上一点的加速度、刚体的角速度和刚体的角加速度共同决定。所以, 角度、角速度和角加速度是刚体运动学中的基本量。流体和可变形体由于其中每一部分的运动情况有更大的自由程度, 在一般情况下, 其运动的描述是比较复杂的, 已经不是初级力学中所讨论的运动学问题。运动学虽说是经典力学中的一部分, 但有它独立存在的价值。例如, 要求一种机械按一定的方式运动, 在设计中, 就是一个纯粹的运动学问题。另一方面, 运动学又是动力学的基础, 因为只有知道如何描述一个运动, 才能进一步研究这种运动和力的关系。

**运算放大器** (operational amplifier) 能对信号进行数学运算的放大电路。它曾经是模拟计算机的基础部件。采用集成电路工艺制成的运算放大器, 除了保持原有的高增益和高输入阻抗等特点外, 还具有低的零点漂移和低噪声, 具有一定的带宽, 价廉物美及可灵活使用等优点, 因而在有源滤波器、开关电容电路、数—模和模—数转换器、直流信号放大、波形的产生和变换以及信号处理等方面得到十分广泛的应用。

运算放大器的电路结构有三种主要形式。单端输入—单端输出形式。斩波稳定式直流放大器等采用这种形式。差分输入—单端输出形式。

大多数集成运算放大器采取这种形式。 差分输入—差分输出形式。直流放大器和部分集成放大器采取这种形式。

运算放大器常被用来实现电信号的反相放大、同相放大和差分输入/输出放大。由于其开环增益极大（达数十万倍），引入反馈很容易控制其放大倍数。当电压增益  $k=1$  时，就成为一个性能极好的跟随器。它还可以实现模拟相加和模拟积分等运算，在模拟计算机中获得广泛应用。

**杂质半导体 (impurity semiconductor)** 在纯净半导体中掺入杂质,使它产生载流子以提高半导体的导电能力,这种掺有杂质的半导体称为杂质半导体。杂质半导体有 N 型和 P 型两种。

**N 型半导体** 半导体材料硅 (Si)、锗 (Ge) 都是四族元素,它们的每个原子有 4 个价电子。在半导体硅中掺入五族杂质如磷 (P)、砷 (As) 或锑 (Sb) 等,因为这些杂质原子都有 5 个价电子,当它们进入硅晶体而替代硅原子时,其中 4 个价电子与近邻 4 个硅原子的 1 个价电子组成 4 个共价键,余留 1 个便成为可以导电的电子。由此可见,1 个五族杂质原子为半导体硅提供了 1 个自由电子,而本身成为带正电的杂质离子。我们把这类杂质称为“施主杂质”,而掺有施主杂质的半导体称为 N 型半导体。

**P 型半导体** 如果掺入硅晶体的是三族元素如硼 (B)、镓 (Ga)、铝 (Al) 等,因为这些原子都有 3 个价电子,当它们进入硅晶体替代硅原子时,需要接受 1 个电子 (即产生 1 个空穴) 才能与近邻 4 个硅原子形成共价键。所以 1 个三族杂质原子从硅晶体中接受一个电子,本身成为一个带负电的杂质离子,我们把这类杂质称为“受主杂质”,而掺有受主杂质的半导体称为 P 型半导体。

**噪声 (noise)** 见噪音。

**噪声污染 (noise pollution)** 人为造成的、对人们的生活、工作、学习和休息带来干扰的声音。经频谱分析可知,声波谱具有连续谱、线状谱以及二者的叠加等三种。在环境声学中,声压级可用分贝 (dB) 来表示,低于 75 分贝的声音对人的听觉无损伤,普通办公室的声压级为 50 分贝,织布车间的声压级为 100 分贝,人耳的听阈变化范围为 0~120 分贝。

噪声污染主要来自: 工厂中各种机械设备。如织布机、电锯、鼓风机、冲床等; 城市交通运输。城市中的现代化交通工具是流动噪声源,对环境影响范围较大,汽车噪声一般为 80~90 分贝,铁路两旁的火车运行噪声更大,由飞机频繁起降产生的噪声污染特别严重; 建筑施工中的打桩机、空气压缩机等; 社会活动,包括娱乐场所、高音喇叭、商业活动中心等也会发出噪声。

噪声对人体最大的危害是使听力衰退,严重的会造成耳聋、鼓膜破裂。此外,对人的神经系统、心血管系统等方面也带来影响。噪声还影响人的睡眠,干扰人们交谈。在嘈杂的环境里,人们心情烦躁,极易产生疲劳,使劳动生产率大为降低。但噪声污染属感觉污染,没有污染物,也不会累积,一旦污染源停止活动,噪声污染也随之消失。

**噪音 (noise)** 又称噪声。从物理本性上可分为声噪声和电噪声两大类。前者是由于机械扰动引起的,是相对于有调和谐音或人需要的声音的干扰;后者是相对于电信号的干扰。声噪声有两种意义: 通常是指无规则的、间歇的或随机的振动。指任何难听的、不谐和的声音,有时也指在有用频带内的任何不需要的干扰声音;它不单由声音的物理性质所决定,还与人们的生理和心理状态有关。噪音对人的影响包括产生生理损伤和引起各种心理反应等。人长期处在噪音过强的环境中工作,会引起听力损伤或噪声性耳聋,甚至导致某些疾病 (如心血管方面) 发生。对于脉冲

性噪音（如射击、爆炸等）甚至立即会使鼓膜破裂、中耳链失效。噪音还会对人引起心理影响，如引起烦恼、降低工效、分散注意力和妨碍睡眠。此外，特别强大的噪音能损坏建筑物和影响仪器设备的正常运转。

随着工农业、国防建设的发展以及文化生活水平的提高，噪音也随之增加。据美、俄等工业发达国家统计，噪音级每年约以 1dB 的趋势增加。噪音已成为环境三大公害（污水、废气、噪音）之一。噪音对环境是一种污染，必须加以控制。噪音控制可从以下三个环节着手：控制噪音源；控制噪音的传输路径；控制噪音的污染区。其中噪音源的控制是最直接也是最重要的。公认的噪音源包括飞机、卡车、汽车、风镐和其他建筑机械以及工厂内各种类型的机器设备。各国均依法规定在市区禁止使用汽车喇叭、限制飞机起降频率。采取的技术措施包括安装减噪音装置、减震装置和供从事高噪音职业的人员使用防护设备。目前工业噪音的允许评价标准为 90dB（如美、俄、日等国）。我国也规定各类工厂的噪音不得超过 90dB，工厂噪音级在 85 ~ 90dB 的每年要给有关人员作听力检查，对听力已有下降者要采取保护措施。

在电路中出现的噪音，又称为电噪声，简称噪声。

噪声干扰损害所需信号的质量并降低实际测量的可靠性。放大系统（包括元器件、网络）的噪声一般指的是热噪声。热噪声又称白噪声，它来源于电路中电子的持续杂乱运动或冲击性的杂乱运动所形成的频率范围相当宽的杂波。例如，电子的热运动（热骚动）以及电子的不够均匀的流动都会产生持续存在的噪声；雷电或电火花等将会在电路中感应产生冲击性的噪声。热噪声普遍存在于电子元器件、网络和系统中。

热噪声通常有两种表示方法：噪声系数 F 表示法。常用在低频（几赫兹）至高频（几十兆赫兹）的范围内。噪声系数是放大系统输入端信噪比与输出端信噪比之比。如果放大系统没有噪声，则  $F=1$ 。噪声温度表示法。常用在微波频段内。一个放大器的噪声温度定义为：如果在放大器输入端串接一个电阻，其大小等于信号源电阻，当在某个温度  $T_e$  时，其上产生的热噪声等于放大器本身的噪声，则称  $T_e$  为放大器的噪声温度。

噪声系数与噪声温度的关系是：当输入和输出信号为单一频率时，  
$$T_e (K) = 290 (F - 1)。$$

噪声是客观存在的，它对有用信号造成干扰，破坏信息的正常传输。当噪声的大小与信号大小相接近时，系统便无法正常工作，噪声是限制接收机获得最大灵敏度的主要障碍，因而如何抑制各种噪声在电子技术中十分重要。为减少外部噪声（如人为噪声），工矿企业必须严格执行有关噪声的环境保护和频率管理法规，采用高稳定度的频率源和优质电子器件，对高频设备应加强屏蔽和电源滤波等措施，否则会严重干扰周围系统的正常工作。例如，居住在有大功率高频设备的工厂附近的居民，会发现电视机工作不正常。为消除内部噪声，抑制系统第一级放大部分的噪声是关键。首先要采用低噪声的元器件，如选用高质量的电阻、电容等，有时甚至将放大器安放在极低温度下工作，这对减少热噪声是十分有效的。其他减小噪声的措施还有采用镀银馈线、缩短馈线等，以便减小有用信号在馈线中的损耗，提高信噪比。

增益系数（gain coefficient） 光束传播方向上光强的单位长度

增长率。又称放大系数，是激光器的重要参数。

**定义** 设激光器中光行进的方向为  $z$  轴。增益介质（即激光工作物质）位于  $z=0$  到  $z=L$ 。设在  $z$  处光强为  $I(z)$ ，在  $z+dz$  处光强为  $I(z+dz) = I(z) + dI(z)$ 。介质对光的增益系数  $G$  定义为

$$G = \frac{1}{I(z)} \cdot \frac{dI(z)}{dz}$$

若已知  $z=0$  处光强为  $I_0$ ，在  $z=L$  处光强为  $I$ ，则可求得增益系数为

$$G = \frac{1}{L} \ln \frac{I}{I_0}。$$

不同介质的增益系数不相同；同一种介质的增益系数亦因工作条件的不同而不同。

**激光器增益系数** 设激光上、下能级为  $E_2$  和  $E_1$ ，粒子数为  $N_2$  和  $N_1$ ，其间跃迁辐射的谱线线型函数为  $g(\nu)$ 。设增益介质在光强为  $I(\nu)$  的辐射场作用下产生受激发射。在光行进方向上自发发射远小于受激发射，故可忽略前者。因为  $\rho(\nu) = \frac{I(\nu)n}{c}$ ， $\rho(\nu)$  为辐射能量密度， $n$  为介质折射率， $c$

为光速，故  $dt$  时间内受激发射光子数为  $I(\nu) \frac{n}{v} N_1 B_{12} g(\nu) dt$ ，受激吸

收光子数为  $I(\nu) \frac{n}{v} N_2 B_{21} g(\nu) dt$ 。在  $dt$  时间内，光子数的增加决定了

辐射能量密度的增量  $d\rho$ ，也就决定了光强  $I$  的增量  $dI$ 。根据增益系数定义，可求得

$$G(\nu) = (N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1}) \frac{n}{v} B_{21} h \nu g(\nu)，$$

式中  $g_1, g_2$  为能级  $E_1$  和  $E_2$  的统计权重， $h$  为普朗克常数。

从上式可看到，增益系数是频率  $\nu$  的函数，激光器中不同纵模有不同的增益系数。增益系数与  $E_2$  和  $E_1$  能级间跃迁谱线具有同样的线型函数。在谱线中心频率  $\nu_0$  处， $g(\nu_0)$  与线宽  $\Delta\nu$  成反比，故  $G(\nu_0)$  也与线宽  $\Delta\nu$  成反比。如果光强  $I$  很小，并把  $N_1$  看作近似为零，则  $G(\nu)$  决定于  $N_2$ ，即与激励速率成正比。

**增益饱和** 粒子数反转  $N$  与入射光强度和频率有关。当光强达到一定程度时， $N$  不会再增加，称为饱和现象。粒子数反转  $N$  的饱和将导致增益饱和。设光强  $I$  达到  $I_s$  时， $N$  开始饱和，称  $I_s$  为饱和参量。对于均匀加宽介质，当  $I \ll I_s$  时，中心频率  $\nu_0$  处增益系数为  $G_0(\nu_0)$ ，称为小讯号增益系数。当  $I$  增大，可与  $I_s$  比拟时，中心频率  $\nu_0$  处增益系数为

$$G(\nu_0) = G_0(\nu_0) / (1 + \frac{I}{I_s})$$

即当  $I = I_s$  时， $G(\nu_0)$  下降到小讯号增益系数的一半。

对非均匀加宽介质，在频率为  $\nu_1$ 、光强为  $I$  的光波作用下，介质的增益系数  $G(\nu_1)$  为

$$G(v_1) = G_0(v_1) / (1 + \frac{I}{I_s})^{\frac{1}{2}},$$

其中  $G_0(v_1)$  为小讯号增益系数。当  $I=I_s$  时,  $G(v_1)$  下降到小讯号增益系数的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 。

**烧孔** 光强  $I$  的光波使均匀加宽介质对各种频率的光波的增益系数下降同样倍数。而对非均匀加宽介质则不同, 光波  $I$  只能引起以  $v_1$  为中心频率、频宽在  $(1 + \frac{I}{I_s})^{1/2} \nu$  范围内的增益系数下降。而且不同频率处增益系数下降值不同。下图(a)为均匀加宽情况, 曲线 a 代表  $I \sim 0$  时的小讯号增益系数。曲线 b 代表  $I=I_s$  时的增益曲线。图(b)为非均匀加宽情况。增益曲线上出现的局部凹陷, 称为烧孔效应。

### 增益系数图

在气体激光器中, 一个频率的光包含沿腔轴正反两个方向传播的波列。根据多普勒效应, 将引起增益曲线上与中心对称的两个烧孔。烧孔面积代表对振荡模式有贡献的反转粒子数。面积之和越大, 振荡模式的输出功率也越大。靠近中心频率处, 两边对称位置的烧孔逐渐重叠, 使面积减小。在中心频率处, 两烧孔面积重合, 总面积最小, 相应的输出激光的功率也降到最低。在激光输出功率随频率的分布图中出现的这种下陷, 称为拉姆凹陷。

**综合 (generalization)** 把研究对象的各部分、各层次集合起来进行考察研究的方法。其目的是寻找事物间的联系和相互作用, 通过比较加以概括和提炼, 从而更本质地认识它们的同一性。综合有各种形式, 以综合的范围以及它们在物理学中的地位为依据, 可以分为大综合和小综合两种。

大综合往往牵涉到物理学多个分支领域, 概括数代人的工作, 它是对已知的理论和实践的大总结, 并在新的基础上以更简明的形式, 更深刻、更本质、更全面地认识物理运动的特性和规律。这种综合在物理学发展史上往往有特别重要的地位, 对科学技术的进步和对社会生产的发展, 都有巨大的推动作用。例如 19 世纪中叶, 由于人们对热运动、机械运动、电磁现象以及化学等领域的研究日益深入, 越来越多的事实确切地证实运动不灭, 于是出现了能量守恒定律这样一次大综合。它揭示了各种物质运动形式不仅可以相互转化, 而且在量上有一种确定的关系。这次综合, 使自然科学领域特别是物理学达到了空前的统一。分子运动论就是这次综合的产物, 也是人类第一次进入微观领域, 进行定量的理论探索。不久, 物理学又一次意义重大的综合是麦克斯韦电磁理论的建立。麦克斯韦在前人理论和实践研究的基础上, 把电学、磁学、光学融成一体, 以非常简明的形式揭示了它们的关系。物理学的重大综合开始时往往只是一种猜测性、探讨性的尝试。目前把引力、电磁力、弱相互作用和强相互作用统一起来的研究, 正是这样一种综合的尝试。

物理学研究中的小综合, 主要是指对某一具体课题、具体研究对象的综合。这种综合是以具体研究对象的分析作基础的。通过这样的综合, 可



以全面地概括出研究对象的特性和规律。例如气体状态方程是三个气体实验定律的综合。

综合在物理学研究工作的进程中往往起着承前启后的关键作用。有些物理因素的作用和联系，孤立地进行研究是不能发现的，只有通过综合，把它们放在统一的物理运动和过程中，把它们看作互相联系的一个环节，它们的特性和规律才易暴露出来。例如为了解释黑体辐射现象，普朗克就将维恩定律和瑞利—金斯定律综合起来，在经验事实的基础上，提出一个辐射公式，结果与事实完全相符，说明普朗克的综合是成功的。意义更为重大的是普朗克为了对这一综合成果作出合理的理论解释，提出了辐射能量不连续变化的大胆假设，并把能量的最小单位称之为“能量子”或“量子”。正是普朗克在综合基础上提出的这一假设，直接引导物理学进入了新的发展时代——量子论时代。

**张力 (tension, tensile force)** 绳或杆等细长物体被拉伸后其横截面两侧部分间的作用力。例如，绳的上端固定，下端悬一重物  $W$ ，绳被重物拉伸。这时，绳中任一横截面的下部将对此横截面的上部作用一方向向下的张力，而横截面的上部将对横截面的下部作用一方向向上的张力，不计绳的重量，这一对作用和反作用的张力大小  $T$  等于重物的重量： $T=W$ 。如果绳和杆被拉伸而略有伸长，产生的形变是弹性形变，则张力是横截面的一方对另一方作用的弹性力。若绳和杆之类的物体形变（伸长）十分微小，以致可以忽略不计，则此张力就被看成刚性杆或不可伸长的绳中横截面两侧相互作用的非弹性拉力。

**张宗燧 (1915 ~ 1969)** 中国物理学家。浙江省杭县（今杭州市）人。1934年毕业于清华大学物理系。1936年赴英国留学。1938年获剑桥大学博士学位。后赴丹麦，在著名物理学家玻尔领导下进行量子场论研究。1939年赴瑞士，在泡利指导下继续研究量子场论。1940年回国后，在重庆中央大学任物理系教授。1945年以英国文化协会高级研究员身份再次到剑桥大学工作。1947年赴美国普林斯顿高级研究院、费城卡内基工业大学工作。1948年冬回国后，先后被聘为中央大学教授，北京大学教授，北京师范大学教授、理论物理教研室主任，中国科学院数学研究所研究员、理论物理室主任。1957年当选为中国科学院数学物理学化学部学部委员。毕生致力于理论物理学、统计物理学、量子场论等方面的研究。早在1936~1938年，从事合作现象、特别是固溶体的统计物理理论等方面的研究，并作出了有价值的贡献，受到国际学术界的重视。1938年起进行量子场论方面的研究，在量子场论的形式体系的建立，特别是在高阶微商、高自旋粒子的量子场论等方面，取得多项国际先进水平的、创建性的成果。1947年发表《含有高次微商的场论》。1949年发表《相对论性的场论》和《论外斯场论》，扩充了外斯理论中的波动方程，使之成为决定空间性曲面上的波函数如何随曲面的变化而变化的方程。这一工作使相互作用表象的理论得到更普遍的基础。1952年后，在非定域方面作了深入研究，发表《含有高次微商的量子理论》，取得了我国在此领域具有代表性的成就。1957年还用狄拉克提出的电子的古典理论研究所创造的方法，讨论粒子在标量介子场作用下包含有辐射阻尼效应的经典运动方程，指出在这样的情况下，粒子的静止质量必须随着运动而变化。此外，在统计物理学与他人合作研究中提供了一个简便、可靠的求固溶体位形自由能的方法；在相对论的量子力

学与不齊次洛伦兹变换群的表示之间的关系研究中，作出了不齊次洛伦兹变换群的任一么正表示对于它的齊次洛伦兹变换子群是完全可分解的证明。他在发展我国理论物理，特别是量子场论研究的事业、培养科学人才方面，也作出了重要贡献。

赵友钦（13世纪中叶~14世纪初）自号 督，人称 督先生或 督子。元代民间科学家。江西鄱阳（今江西省波阳县）人。他是宋室汉王第十二代孙。宋朝灭亡后，为避祸隐入“道家”，浪迹江湖。后来在浙江衢县龙游东鸡鸣山定居，并在山上筑起观星台，观察天象。他时常外出游学，到过衢州、金华等地。

赵友钦观察到日、月光通过壁间的小孔，小孔虽然不圆，得到的像都呈圆形；日食时，像和日食圆缺的分数相同。为了进一步研究小孔成像规律，他创造性地做了这样一个光学实验：在两个相邻房间的地面上挖两口直径四尺多的旱井，右井深四尺，左井深八尺。左井里可以放一张四尺高的桌子。另做两块直径四尺的圆板，每块板上密插一千多支点燃的蜡烛，放入右井底和左井的桌面上作为光源。两个井口分别用中央开了孔的板来遮盖。烛光通过遮板中央的孔把光线投射在楼板上形成像。楼板是固定的像屏。

实验分五步：

用不同的带孔盖板（中央的小孔，大小和形状均不相同）来遮盖左、右井口；吹熄部分蜡烛（改变光源）；在楼板水平悬挂大木板作为新的像屏（改变像距）；移去左井里的桌子，把蜡烛放在井底（改变物距）；用中央开有不同形状的大孔盖板遮盖左、右井口。经过一系列对照实验，他得出了：“是故小景随光之形（小孔成的像与光源形状相同）；大景随空之像（大孔成的像与孔的形状相同），断乎无可疑者”的结论。他还从理论上对小孔成像规律作了研究和探索。上述实验内容被记录在他所著《革象新书》的“小罅光景”一部分中。这个大型实验，在世界物理学史上是首创的。

赵友钦还提出中天观测法以求恒星的赤经差，并对“视角”、“月相”、光的直线传播和照度等问题作过研究。除《革象新书》外，他注《周易》数万言，还著有《金丹正理》、《盟天录》、《推步立成》等书多种，可惜都佚失了。

**照相机**（camera）使物体成像在记录底片上的光学仪器，主要由镜头、光圈、快门、取景器、测距器、卷片机构及机身等构成。

镜头最简单的镜头由单片凸透镜制成。由一片凸透镜和一片凹透镜组合为消色差镜头，可以提高照片的清晰度。现代通常使用多片多组透镜组合而成的正光镜头，并在每一块与空气接触的镜面上加上一层呈紫色、米黄色或深蓝色的增透膜，以便减少光的反射干扰，使透入的通光量增加。镜头圈上通常有三组数字，表示相对孔径、焦距和出厂编号。例如 F1 3.5=75mm 表示该镜头的焦距为光束直径的 3.5 倍，镜头主焦距为 75 毫米。照相机的镜头大致可分为标准镜头、广角镜头、长焦距和变焦距镜头等。

**光圈** 用来调节通光量的可收缩光阑称为光圈。光圈缩小，景深延长。景深是被摄物前后的清晰范围，故光圈调节对画面选取有重要作用。光圈的刻度数字代表焦距与光圈直径之比，数字愈小，光圈愈大。光圈刻度常记为 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22, 32 等，其中每级光圈相

差 1.4 倍。光圈的调节收缩，有手动、半自动和自动三种。

**快门** 控制曝光时间的装置。快门速度的选择序列以 50% 递减，记为 1,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{16}$ ,  $\frac{1}{32}$ ,  $\frac{1}{64}$ ,  $\frac{1}{128}$ ,  $\frac{1}{256}$ ,  $\frac{1}{512}$ ,  $\frac{1}{1024}$  等，单位为秒。但照相机快门调速盘上只标出分母，且将尾数简化。上述递减序列于是记为 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 125, 250, 500, 1000 等。还有一个手控曝光时间装置，标记是 B。快门有机械快门和电子快门两类。后者用光电元件和电子线路控制曝光时间。现代高级照相机还使用电脑控制，有多种自动曝光方式。

**取景器** 在拍摄照片前，先从取景器观看被摄景物的范围。取景器中看到的景物和实际拍摄的景物总有一定差别，称为视差。一般从取景器中看到的景物都比底片上拍摄的略小，以保证被摄物完全拍出。取景器分框式取景器、光学平视取景器和反射式取景器三种。现代流行的单镜头反光照相机采用平视五棱镜取景器。这种取景器的优点是，更换镜头后从取景器中看到的景物仍和拍摄的景物范围一致。

**测距器** 根据被摄物的远近来调节照相机镜头到底片间的距离，俗称调焦。用来调焦的装置称为测距器。过去老式照相机采用目测法测距，通过估计被摄物距离，然后转动距离标尺调焦。利用光学原理进行测距的装置称为光测式测距器。测距时，转动镜头前镜片或整个镜头，使测距器中心的虚实双影重叠，从而达到调焦目的。在单镜头和双镜头反光照相机中，从毛玻璃上可看到被摄物影像，转动镜头调焦环使毛玻璃上形成清晰的像，测距即完成。目前的照相机普遍使用自动测距系统。当快门上弦时，镜头被推出。按下快门钮时，自动测距系统通过两块反光镜自动进行距离测定。同时对正在开始后缩的镜头加以控制，使它在准确距离位置上停下来并迅速曝光。这些都在瞬间完成。

**卷片** 可分为机械卷片和电动卷片两类。后者利用电子线路和微型电动机进行自动卷片。它又可分为内藏式和外配式两种。内藏式卷片机构装于照相机内，用 1.5 伏电池作电源。在按下快门钮完成拍摄程序后，微型电动机即自动推进一张底片。高级的单镜头反光照相机大都采用单独出售的电动卷片器。这种卷片器有较快的卷片速度，可以在一秒钟内拍摄两张照片。

**机身** 即暗箱，是照相机的主体。它的功用是容纳其它机件，并起暗箱作用。机身材料可采用金属、胶木或塑料等。

**折射率** (refractive index) 表示物质折光性能的物理量。它只是在两种媒质相比较时才有意义。根据光的折射定律，光从第一媒质入射到第二媒质时，入射角正弦与折射角正弦之比，即为第二媒质相对于第一媒质的折射率。任意两种媒质之间的折射率称为相对折射率。任何媒质相对于真空的折射率称为绝对折射率。

折射率也等于两种媒质中光速的比值。如果  $v_1$  和  $v_2$  分别表示光在媒质 1 和媒质 2 中的速度，则媒质 2 对媒质 1 的相对折射率为  $n_{21}=v_1/v_2$ 。真空中的光速为  $c$  故任一媒质的绝对折射率  $n$  等于  $c$  与光在此媒质中的速度  $v$  之比。为方便起见，绝对折射率常常简称为折射率。故两种媒质的折射率之比就等于它们两者的相对折射率。由于真空的折射率为 1，故其它媒质的折射率都大于 1。空气的折射率为 1.00029，非常接近真空的折射率。

折射率与材料的温度和光的波长有关。气体的折射率一般都在常温常压下给出。因折射率随波长而变，通常所说的某媒质的折射率是指对钠所发出的波长为 0.5893 微米的黄色 D 线而言的，记为  $n_D$ 。如果采用波长为 0.5876 微米的氦 d 线，则材料的折射率记为  $n_d$ 。这两种光的波长都接近于视觉最灵敏的波长。

混合媒质的折射率当有两种以上的媒质混合在一起时，它们的折射率可用如下两种混合法求出。一种是简单加法。用  $m_1$  和  $m_2$  分别表示两种媒质的质量，单位为克；以  $r_1$  和  $r_2$  分别表示两种媒质的经验恒量  $(n-1)/\rho$ （ $\rho$  为媒质密度），或另一个恒量折射度  $(n^2-1)/(n^2+2)$ ；则混合物的折射率由下式决定：

$$nr = m_1 r_1 + m_2 r_2。$$

另一种混合法称为对数混合法。用  $V$  表示媒质的体积（质量/密度），两种不同媒质混合后的折射率由下式决定

$$\lg n = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \lg n_1 + \frac{V_2}{V_1 + V_2} \lg n_2。$$

对于气体，两种方法都适用。对于液体，后一方法较适用。

**折射率测定** 固体材料的折射率常常可用如下方法测定：用含磷的二硫化碳溶液配制成折射率在 1.33 到 1.95 之间的一系列液体，把不规则的小块固体浸没在这样的溶液中，当固体和溶液的折射率相等时，在显微镜观察中小块固体将消失。此外，还有很多测量折射率的方法。如最小偏向角法，干涉条纹移动法，或者利用阿贝折射计、布儒斯定律、薄透镜焦距与其曲率半径的关系式等等。

**真空 (vacuum)** 真空一词的原意是虚空，即一无所有的空间。随着物理学的发展，人们认识到真空的概念实际上非常复杂。

**低气压空间** 在真空技术中常常把远小于  $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ （即一个大气压）的稀薄气体空间称为真空。

在托里拆利实验中玻璃管上部获得的真空，是人类第一次得到的最好的真空。1654 年，德国马德堡市市长盖利克把直径 40 厘米的两个中空铜制半球对接在一起，用经过松节油蜡浸过的皮环密封后抽气使成真空，从两边各用 8 匹马向相反方向拉，竟没有拉开这个铜球。此外，他还进行了一系列有关空气、真空、大气压的各种性能的实验，如真空不能传声、放在真空中的蜡烛会熄灭、鸟和鱼都死亡等，从此以后，真空的存在已不再被人怀疑了。

目前在科学技术中常常将低气压空间划分为五个范围：粗真空 ( $10^5 \sim 10^2 \text{Pa}$ )；低真空 ( $10^2 \sim 10^{-1} \text{Pa}$ )；高真空 ( $10^{-1} \sim 10^{-5} \text{Pa}$ )；超高真空 ( $10^{-5} \sim 10^{-9} \text{Pa}$ )；极高真空 ( $< 10^{-9} \text{Pa}$ )。不同真空度意味着有不同的气体分子数密度。如在标准状况 ( $0^\circ\text{C}$ ,  $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ) 下，任何气体的分子数密度约为  $2.7 \times 10^{25} \text{米}^{-3}$ ；在  $10^{-5} \text{Pa}$  时，约为  $10^{15} \text{米}^{-3}$ ；在  $10^{-9} \text{Pa}$  时，约为  $10^{11} \text{米}^{-3}$ 。实验中可通过真空泵（即抽气机）获得真空。人类目前已能利用宇宙飞船进入太空，太空是一个很好的真空环境。真空技术广泛应用于电真空器件的制造、金属冶炼和提纯，以及医药工业，食品和生物制品的真空干燥和包装等。在表面物理、加速器技术和受控热核反应等领域中，也都离不开真空技术。

**量子理论中的真空** 从量子理论的观点来看，真空并非是一无所有的虚空。爱因斯坦将场的观点引进引力问题的研究后，曾提出真空是引力场的一种特殊状态的观点。按照量子场论的观点，物质（包括有静质量的物质和静质量为零的电磁场物质）存在的基本形式是量子场。量子场的激发或退激代表粒子（包括实物粒子），如电子，或场粒子，如光子 的产生和消失；量子场能量最低的状态代表不存在任何粒子的状态，称为基态，也就是现代物理学中的“真空态”。真空态虽然不存在粒子，如电子、光子等，但仍然存在量子场。这些量子场在不停地振荡（称为真空零点振荡），各种量子场之间还存在相互作用，因此真空中还存在着“虚粒子”的产生、消灭和相互转化等现象。真空的这些物理性质会产生许多可观察效应，而且其中的一些效应确实已通过非常精密的实验得到了证实（如原子能级的“兰姆位移”等）。可见，真空实际上包含了非常丰富的物理内容，对它从理论上和实验上作进一步的研究已成为现代物理学的一个重要课题。

**真空极化 (vacuum polarization)** 荷电粒子与真空相互作用的一种效应。根据现代物理学（量子场论）的观念，真空并不是没有任何物质的虚空。真空中虽然不存在真实粒子，但由于量子场的不停的运动（零点振荡）以及各种量子场之间的相互作用，在真空中仍然存在各种“虚粒子”的产生、消灭和相互转化。虚粒子的性质（如电荷、自旋等）与相应的真实粒子完全一样，但其质量可取任意值。

如果真空中有一带正电荷的粒子，如质子，则该正电荷在其附近将形成极强的电场，该电场将吸引真空中的虚电子，排斥虚正电子，从而改变虚电子云的电荷分布。这种现象类似于电介质的极化效应，故称为真空极化。真空由于质子正电荷的存在而发生极化后，在以质子为中心的任何球面内将出现净负极化电荷。这时粒子本身的电荷（称为裸电荷）将被周围的真空极化电荷部分屏蔽，从而使远处探测到的电荷（称为物理电荷）不同于裸电荷。这一结果称为“电荷重正化”。通过实验（例如散射实验）测得的电荷显然是物理电荷，而不是裸电荷。所以，真空极化效应在物理上是可观察的。由于真空极化效应，库仑定律在  $10^{-15}$  米线度上将要被修正；原子的某些能级将发生位移（能级的兰姆位移），从而使光谱线发生更细微的分裂；电子或  $\mu$  子的自旋磁矩将引起修正（电子的反常磁矩）。真空极化效应仅仅发生在荷电粒子附近的真空中，而且它所引起的各种修正都非常微弱。尽管如此，不少实验仍然以极高的精度证实了这个量子效应。

**真空计 (vacuum gauge)** 用于真空或低压系统内测量压力的装置。可分为绝对真空计和相对真空计两类。前者可通过其本身所测得的物理量直接求出气压的大小，例如 U 型管、麦克劳真空计等；后者必须经过绝对真空计的校正才能测定气压，例如电离真空计、热传导真空计等。

**麦克劳真空计** 利用玻意耳定律测定一个系统的压强的水银式真空计。玻意耳定律指出：气体压强的增大与其体积的减少成比例。测量时，将被测系统中的一部分取样气体隔绝于真空计中并使其减少一定量体积，则压力的增加会产生一个可直接读取压强大小的水银柱高度差。麦克劳真空计可测压强范围为  $10^3 \sim 10^{-4}$ Pa。

**薄膜真空计** 利用弹性薄膜变形引起电容值相应改变的原理制成的真空计。一弹性薄膜将真空计分为两个小室，即参考压强室和测量室。测量

低压强 ( $p < 100$  帕) 时, 参考室抽成高真空, 其压强近似为零。当测量室压强不同时, 薄膜变形, 薄膜与固定电极间的电容值变化。通过电桥可测量电容的变化, 从而确定相应的压强值。若采用零位法测量, 可在固定电极与薄膜间加一直流电压, 使薄膜恢复原状, 由所加直流电压可知压强值。薄膜真空计可用于高纯气体监测、低真空精密测量和压强控制, 也可用作低真空测量的副标准。

**电离真空计** 利用气体电离的原理来测量压强的真空计。分为热阴极和冷阴极两大类。热阴极电离真空计的规头的外形和结构类似真空电子管, 通常有三个电极, 即阴极、阳极和收集极。阴极发射电子, 电子从阴极向阳极运动的过程中使气体电离, 产生的正离子数与空间的气体密度成正比, 也即与压强成正比。阴极一般采用钨丝, 阳极成栅网状, 使电子能在其两侧来回穿行以增加电子的行程, 故又称为栅极。收集极为圆筒形, 在栅极外侧。其压强测量范围为  $10^{-1} \sim 10^{-5}$  帕。当工作压强高于  $10^{-1}$  帕时, 钨丝寿命缩短。

冷阴极电离计靠阴极光电发射 (或场致发射) 和正离子轰击阴极所引起的二次发射提供电子, 利用磁场加长电子行程。一般其轴向磁场约  $300 \sim 400$  高斯, 阳极电压为  $1000 \sim 2000$  伏, 灵敏度系数为  $10^{-2}$  安/帕, 压强测量范围为  $1 \sim 10^{-4}$  帕, 冷阴极电离计结构简单、牢固, 在工业真空系统中作真空粗略指示或控制用。

**热传导真空计** 利用气体在不同压强下热传导能力不同的原理测量气体压强。在规头的灯丝中通以一定的加热电流, 在不同气体压强下, 散热能力不同, 灯丝的温度就有差异, 灯丝的电阻值亦有不同。若用一附加的热电偶测量热丝的温度, 则此种规头称为热偶规; 若利用热丝本身的电阻值来反映温度, 则此种规头称电阻规或皮喇尼规。热传导真空计主要用于  $100 \sim 10^{-1}$  帕压强范围的测量。热传导真空计的测量值受气体种类影响, 且表面易污染, 也受环境温度影响, 故准确度不高, 只能作粗略的真空指示用。

**振荡器 (oscillator)** 无须外加激励而能自行产生稳恒而持续振荡的装置。它所产生的交流信号的频率范围很广, 可以从一赫以下到几百兆赫以上; 输出的功率可以从几毫瓦到几十千瓦。最早用来传递信息的电信号是由火花放电器产生的一种衰减振荡波。以后又用电弧电路产生等幅振荡波。1913 年人们第一次用真空三极管产生高频等幅振荡波。随着真空电子器件和固态电子器件的发展, 已不难获得各种波形的振荡信号, 其功率和频率范围也大为扩展, 并已广泛应用于通信、广播、雷达、电子计算机和测量仪器等方面。

振荡器依振荡波形的不同, 可分为正弦振荡器和非正弦振荡器两类; 依工作原理可分为负阻振荡器和反馈型振荡器。较常用的正弦波振荡器有 LC 振荡器和 RC 振荡器两种。它们都是反馈型振荡器。

图 1 反馈型振荡器原理图

图 1 是反馈型振荡器原理图。由两部分组成, A 代表主要由有源器件构成的放大器, 代表由选频网络或移相网络构成的反馈电路。当开关与 2 接通, 在 A 的输入端加入频率为  $f$  的正弦电压  $u_i$ , 放大后的输出电压为  $u_0$ , 由 反馈的电压为  $u_f$ 。如果  $u_f$  和  $u_i$  大小相等, 相位相同, 则用  $u_f$  替代  $u_i$ ,

输出  $u_0$  将保持不变。满足上述条件时，当开关与 1 接通，即使电路没有输入激励，仍能得到输出电压  $u_0$ 。因此使反馈型振荡器维持自激振荡的条件是  $A = 1$ 。它包含  $A$  的模值为 1，称为振幅平衡条件，它保证  $u_f$  和  $u_i$  幅度相同；相位为零，称为相位平衡条件，它保证  $u_f$  和  $u_i$  的相位相同。振幅平衡条件和振荡  $u_0$  的大小，取决于放大电路的非线性特性。相位平衡条件和振荡频率  $f$  的数值，取决于选频网络的频率特性。

LC 振荡器由 LC 谐振回路作反馈电路的反馈型正弦振荡器。其放大电路主要由晶体管或电子管构成。自振频率基本上决定于谐振回路的电感  $L$  和电容  $C$ ，即自振频率  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。因谐振元件  $LC$  的取值受体积限制不宜过大，使振荡频率不会太低，一般为几百千赫到几百兆赫。频率稳定度  $f/f$  一般为  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  量级。谐振元件  $L$  或  $C$  的数值调节十分方便，振荡器的频率改变可用可变电容器或可变电感器简易实现，因而在广播、通信、电子仪器中有广泛的应用。

LC 振荡器依  $L$ 、 $C$  在电路中的接法不同而有调集振荡器、哈特莱振荡器、科皮兹振荡器等主要类型。图 2 是调集振荡器电路。它由放大电路、变压器反馈电路和 LC 选频电路组成。其振荡频率为  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。

图 2 调集振荡器

图 3 用运算放大器构成的文氏桥振荡电路

RC 振荡器用 RC 移相网络作反馈电路的反馈型正弦波发生器。典型的 RC 振荡器有文氏桥振荡器和移相振荡器。它们适用于 1 赫到 1 兆赫的低频振荡，频率稳定度约在  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  量级之间。图 3 是用运算放大器构成的文氏桥振荡电路。反馈电路由  $R_1C_1$ 、 $R_2C_2$  串并联而成，在某一频率上，其输出亦与输入同相，两者构成正反馈。 $R_1C_1$  串联支路、 $R_2C_2$  并联支路和反馈电阻  $R_f$  和  $R_0$  恰好构成一个电桥的四个臂，因而称为文氏桥振荡器。文氏桥振荡器的自振频率  $f_0$  在  $R_1=R_2=R$  和  $C_1=C_2=C$  时为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} = \frac{1}{2\pi RC}$$

为保证文氏桥振荡器起振，其放大电路的放大倍数  $K$  必须大于 3。为减小输出波形的失真，放大器应工作在线性区。用同轴电位器或双联电容器同时改变  $R_1$ 、 $R_2$  的电阻值或  $C_1$ 、 $C_2$  的电容值，可以连续改变振荡频率。测量用的可变低频信号发生器，大多采用此类振荡电路。

振动 (oscillation) 又称振荡。物体在其平衡位置附近所作的往复运动。例如钟摆、弦线、音叉、鼓膜等的运动。物理量在其平均值或平衡值附近的来回变动，例如交变电磁场中的电场强度或磁场强度，又称为电磁振荡。处于稳定平衡的机械装置或处于稳定平衡的物理状态在受到扰动后，都会发生振动，所以振动是自然界的普遍现象，大至宇宙，小至分子和原子，无不存在振动；各种形式的运动，包括力、热、电和光以至生物学运动中，都有振动这种运动形式存在。在许多情况下，振动对于人类活动是一种消极因素，例如振动会影响精密仪器的工作性能和精密制造的

加工精度，会加剧构件的疲劳；噪声作为一种声学振动，乃是人类社会中的一大环境污染，等等。另一方面，在许多情况下，振动又是人类活动中的积极因素，例如无线电通讯、振动筛选、振动沉桩等都是利用振动原理而发展的服务于人类的工程技术。利用机械的或微观粒子的振动而发展起来的计时技术，则在人类生活和科学研究中发挥了极大作用。振动与人类的生存和发展之间的休戚相关的联系，促使它成为科学研究和工程技术中的一个重要课题。

虽然振动可以出现在各种不同的现象中，但是各种不同性质的振动服从统一的规律，可以用统一的方法进行研究。最直观和形象的振动是物体位置的变化，因位置发生变化而形成的振动称为机械振动。力学系统能发生机械振动的必要前提是具有惯性和弹性，弹性使偏离平衡位置的系统倾向于恢复到其平衡位置；惯性则使系统返回平衡位置的过程中逐渐积累动能，在系统到达平衡位置后，继续向另一侧运动。正是由于弹性和惯性，才引起力学系统反复越过其平衡位置而来回振动。除弹性和惯性两个必不可少的条件外，阻尼和激励是影响振动的其他两个因素。阻尼使振动能量不断损耗而转化为内能，激励则是由外界或振动系统本身提供的信号或能量输入，它能激发、维持或抑制系统的振动。弹性、惯性和阻尼是描述振动系统性质的参数。

振动可以分为单自由度振动和多自由度振动两类，前者只须一个坐标即能描述振动系统的位置，例如钟摆的振动就是单自由度振动。需要多个坐标才能描写振动系统位置的，称为多自由度振动。在多自由度振动中，又可分为有限多自由度振动和无限多自由度振动，前者例如两个串连的单摆的振动，后者例如弹性杆的振动。单自由度振动和有限多自由度振动用常微分方程描写其运动所服从的力学规律，无限多自由度振动需用偏微分方程描写这种规律。

振动系统的参量和激励可用时间的确定函数描述时，其振动也可以用时间的确定函数来描述，这种振动称为定则振动。作定则振动的系统的参量若不随时间变化，称为常参量系统，否则称为变参量系统。与定则振动相对的是随机振动。在随机振动中，系统的参量或激励是随机变化的，无法用时间的确定函数来描述。但是随机变化具有一定的统计规律性，这种振动需用统计方法研究。

振动还可以分成线性振动和非线性振动两类。惯性（质量）不随时间变化，而弹性力和阻尼力分别是坐标和速度的线性函数时，称为线性振动。线性振动的微分方程是线性微分方程，这种振动满足振动的叠加原理，即多个激励所产生的响应是每个激励所产生响应的线性叠加。由于线性微分方程有一套成熟的解法程序，而根据线性叠加原理可以把复杂的激励化成简单形式激励的叠加，所以线性振动是振动理论中最成熟的部分。不是线性振动的振动称为非线性振动，它的振动规律须用非线性微分方程描述。在实际问题中，如果振动的运动范围超出一定限度，以至线性模型不再适用时，就必须考虑非线性因素的影响。

按激励控制方式的不同，还可把振动分为自由振动、受迫振动以及自激和参激振动。自由振动是振动开始以后，不再受到其他激励的振动，受迫振动是在独立于振动系统运动状态的外界激励下产生的振动，自激振动的激励来自振动系统本身，且随振动的消失而消失，参激振动则是通过周



期地或随机地改变振动系统的特性参量来实现的振动。

一般的振动是一种复杂的运动现象，主要通过理论分析和实验研究两条路径来探求其运动规律和控制其运动过程，两种方法是相辅相成的。目前日益发展的计算技术和测试手段给研究振动开拓了广阔的前景。

**振动曲线** (curve of oscillation) 以时间为横轴、以振动量为纵轴时，振动量随时间变化的曲线图。例如简谐振动  $x=A\cos(\omega t+\phi)$  的振动曲线 (见图) 是以  $\phi$  为初相的余弦曲线。振动曲线能从几何方面给出振动量随时间的变化情况。

### 振动曲线

**振动中心** (center of oscillation) 复摆上与转轴垂直、并通过复摆质心的平面上的一个特殊点。在此平面上，该点  $S$  与复摆质心  $C$  以及平面与转轴的交点  $O$  在同一直线上，且  $O$  点与  $C$  点之间的距离等于此复摆的等值单摆长，也就是等于这样一个单摆的长度，这个单摆与复摆有相同的振动周期 (见下图)。点  $S$  称为与悬置中心  $O$  共轭的振动中心。同一个物体因转轴位置的不同可以构成周期不同的复摆，这时悬置中心在复摆上有不同的位置，不同的悬置中心有不同的振动中心与之对应。振动中心的特点是：当以振动中心作为悬置中心把物体悬挂起来，构成一个新复摆时，与这个新悬置中心共轭的振动中心，就是原来的悬置中心，新复摆的小摆动周期，与原来的复摆的小摆动周期相等。利用这种性质，可以通过测量复摆的周期找出复摆上一对共轭的悬置中心和振动中心，精确测量出两点之间的距离  $l$ ，再利用单摆周期公式  $T=2\pi\sqrt{l/g}$ ，可以求出当地的重力加速度  $g$ 。过振动中心施一与复摆转轴以及与图中  $OS$  垂直的打击力时，在转轴上感受不到任何冲击作用。所以振动中心又称为打击中心。

$O$  点为复摆的悬置中心， $C$  为复摆的质心， $S$  为复摆的振动中心

**蒸发和沸腾** (evaporation and boiling) 物质从液态变为气态的两种方式。

发生在液体表面的汽化现象叫做蒸发。蒸发在任何温度下都能进行。蒸发的快慢与液体的性质、液体温度、表面面积、表面清洁度和表面附近的通风程度等因素有关。

在一定压强下，当液体达到一定温度时，液面和液体内部同时发生迅速汽化的现象叫做沸腾。开始沸腾时，液体内部和容器壁上涌现出大量小气泡，小气泡起着汽化核的作用，液体分子进入这些小气泡而使液体汽化。当小气泡内的饱和蒸气压增大到和外界压强相等时，小气泡急剧增大，并从液体中冒出，液体就剧烈沸腾。这时液体吸收的热量都用于使物质从液态变为气态，液体温度保持不变。液体沸腾时的温度，称为沸点。液体沸腾时，液体内部形成的气泡中的饱和蒸气压至少必须等于外界压强，气泡才能不断膨胀并上升，因此沸点与压强有关。当外界压强增大时，沸点就相应升高。如在两个大气压下，水的沸点就从一个大气压下的  $100^\circ\text{C}$  升高至  $120^\circ\text{C}$ 。沸点还与液体性质有关，如在一个大气压下，水的沸点是  $100^\circ\text{C}$ ，水银的沸点是  $357^\circ\text{C}$ 。

蒸发和沸腾是汽化的两种方式。但从相变角度看，它们没有根本的区别。无论蒸发还是沸腾，液体变为同温度的气体都要吸收热量，这是因为，

物质从液态变为气态时需消耗一定的能量用于克服分子之间引力做功和反抗外界压强做功，在液体温度保持不变时，这部分能量必须从外界输入。单位质量的液体由液态转变为气态所需吸收的热量称为汽化热，又称汽化焓。不同物质有不同的汽化热，同一物质的汽化热随温度上升而减少，在临界温度时，物质处于临界状态，气态和液态的差别消失了，因此汽化热为零。

物质从气态转变为液态的过程称为凝结。气体凝结时向周围环境放热，每单位质量的气体所放出的热量叫做凝结热，其数值等于汽化热。

汽化热的单位是焦耳/千克、焦耳/克或焦耳/摩尔。由于历史原因，有些书上仍用卡/克作为单位。

蒸汽机 (steam engine) 参见热机。

整流电路 (rectifier circuit) 利用器件单向导电特性将交流电变成直流电的电路。通常发电厂供给的电源是交流电，而电子设备则常需要各种不同电压的直流电，因此须用整流电路提供所需的直流电。常用的整流器件有金属整流器件、电子管整流器件和半导体整流器。由于半导体器件具有效率高、可靠性好、易维护等优点，目前常采用半导体器件。

根据整流器件在电路中的接法，整流电路可分为

单相各种整流电路表

整流电压平均值 $V_0$	0.45V	0.9V	0.9V
流过每管的电流平均值 $I_D$	$I_0$	$\frac{1}{2}I_0$	$\frac{1}{2}I_0$
每管承受的最高反向电压 $V_{DRM}$	$\sqrt{2}V = 1.41V$	$2\sqrt{2}V = 2.83V$	$\sqrt{2}V = 1.41V$
变压器副边电流有效值 $I$	$1.57I_0$	$0.79I_0$	$1.11I_0$
变压器次级功率 $P_2$	$3.48P_0$	$1.74P_0$	$1.23P_0$
次级利用系数 $F$	0.287	0.574	0.813
纹波因数 $r$	1.21	0.48	0.48

注：表中  $P_0$  为直流输出功率， $P_0 = I_0 V_0$ 。

半波、全波、桥式和倍压等电路形式。根据交流供电方式，又分为单相整流和三相整流电路。对于小功率整流器常采用单相供电。

整流电路的主要技术指标有纹波因数  $r$ ，变压器次级功率利用系数  $F$  和反峰电压  $U_r$  等。

(1) 纹波因数负载上交流分量的有效值与直流分量之比。 $r$  值越大，说明电路的性能差。

(2) 变压器次级功率利用系数直流输出功率  $P_0$  与变压器次级功率容量  $P_2$  之比，即  $F = \frac{P_0}{P_2}$ 。 $F$  值小，说明利用系数差。

(3) 反峰电压整流管的最高反向工作电压，它应小于管的反向击穿电压。

上表列出了单向半波、全波和桥式整流电路的电路、整流波形及各项

技术指标。

从表中可发现：桥式整流电路的输出波形与全波整流电路相同，其变压器不需要中间抽头，整流管的反向耐压比全波整流电路的低一半，因此被广泛采用。

郑复光（1780～1853年后）清代物理学家，字元甫、浣香。安徽歙县人。少年时即成为贡生，但他淡于仕途功名，以教读为生。他从青少年时起就偏爱科学，性好潜思，涉猎颇广，于数学、物理学都有一定的成就。他曾游历名山大川，足迹遍至广东、云南、山西、陕西等，还数次北游北京，曾到北京观象台实地了解窥箒远镜的使用情形。并与名流学者包世臣、何子贞等交往甚多，于是见闻益广，学识日精。

大约在1820年前后，郑复光在游学时见到扬州“取影灯戏”和广东“量天尺”等光学仪器，受到了很大的启发和激励。回家后开始研究光学。在1835年前，他曾研制成功望远镜，用来观察月球，能见到“黑点四散，作浮萍状”。他还在多年的观察、实验和研究的基础上，归纳出一套具有独特形式的几何光学理论，著成《镜镜詒痴》初稿，书名时以解释为“就镜照物问题之愚见”，颇具自谦之意。后经多年的反复琢磨和修改，至1846年才刻印出版。全书共5卷，约7万余言，分

“明原”、“类镜”、“释圆”和“述作”四部分。“明原”中不仅对几何光学中的重要基本概念（如光色、光的性质、影和像、光线光束、眼镜、反射镜和透明体等）作了说明，还介绍了光的直进、独立传播、反射和折射四条基本定理。“类镜”中介绍了镜的质料和性能，是关于镜子的综述。“释圆”部分是郑复光建立起来的独特的光学理论体系的核心。他提出了根据两组参数（“顺三限”、“侧三限”）来决定透镜的主要特性。并在此基础上讨论各种透镜成像的变化规律，指导光学仪器的研制。“述作”部分著录了17种光学仪器。《镜镜詒痴》是我国物理学史上第一部重要的光学专著。

郑复光的另一部科学著作《费隐与知录》是以问答形式写作的。内容涉及物理、天文、气象、生物、医学和烹调等，共225条（其中光学20余条）。此书刊行于1842年。此外他还著有《笔算说略》、《筹算说略》、《郑元甫札记》、《郑浣香遗稿》等。

正电子（positive electron） 参见电子。

正态分布律（normal distribution） 是一种常见的随机分布规律，可描述实验的可靠性及其误差大小。假设在相同条件下，对物理量  $x$  进行多次重复测量，测量次数为  $n$ ，各次间的测量互为独立，无相互影响，则物理量  $x$  的平均值为：

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n ,$$

$x$  测量列的均方差 为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} ,$$

$x$  平均值的均方差  $\bar{\sigma}_x$  为：

$$\bar{\sigma}_x = \sigma / \sqrt{n} .$$

测量值  $x_i$  出现的概率为：

$$y(x_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}。$$

$y(x_i) - x$  曲线如上图所示，由图可知， $\sigma$  越大，曲线越平坦，最大值也将降低，但是曲线下的面积始终为 1。

利用概率分布密度函数可估计测量值  $x_i$  在给定区间  $[x_a, x_b]$  内出现的概率，表示如下：

$$P(x_a \leq x \leq x_b) = \int_{x_a}^{x_b} y(x) dx,$$

即是曲线下阴影部分的面积。

利用概率分布密度函数可计算数学期望：

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xP(x) dx$$

利用概率分布密度函数可计算标准差：

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 P(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 P(x) dx - \bar{x}^2$$

**正弦交流电 (sinusoid alternating current)** 大小和方向随时间按正弦 (或余弦) 规律变化的电流，简称交流电。其电流强度  $i$  或电压  $u$  随时间变化的波形如图 1 所示。

图 1 正弦交流电波形

**正弦交流电的产生** 正弦交流电的产生方式在致有两种：一种是由交流发电机产生；另一种是由电子振荡器提供。电力网中的交流电是由交流发电机产生的。交流发电机的基本原理是：矩形线圈在匀强磁场中绕着与磁场垂直的轴线作匀速转动，这时穿过线圈的磁通量将随时间发生周期性变化，于是线圈两端就会感应产生随时间作正弦变化的电动势。这种电动势的最大值与磁感应强度、线圈的匝数、线圈的面积以及线圈的转速等有关。交变电动势的频率由线圈的转速决定。在大容量发电机中，常常采用线圈不动而磁场转动的结构方式，电枢线圈镶嵌在固定不动的发电机机壳内侧，交流电就从电枢线圈两个端点引出。这时，若接通外电路，则在电路中将产生交流电。为了获得频率恒定的交流电，发电机的转速必须固定不变。发电机的转动部分由于受到机械结构强度的限制，其转速不能太高，因此所产生的交流电的频率也就不可能很高，一般被限制在 10000 赫以下。我国电力网交流供电的标准频率为 50 赫。

在法拉第于 1831 年发现电磁感应现象后的第二年，第一台最简单的交流发电机随即问世。交流电开始得到广泛应用则是在 19 世纪 80 年代以后的事，那时相继发明了变压器、三相交流发电机和异步感应电动机等，交流电路的理论于是也随着这些应用的需要而逐步建立并不断发展起来。例如用相量表示正弦量的方法，就是 1893 年施泰因梅茨提出的。1907 年发明了真空三极管，从而，为利用电子线路获得更高频率的交流电提供了可能。例如在实验室中，以及在广播电视、载波通讯、无线电遥控、高频感应加热、电视振动台和声呐等装置中，都需要高频交流电。

**正弦交流电的表示法**

正弦函数表示法正弦交流电和其他一般随时间  $t$  按正弦函数规律变化

的量一样，可以表示为  $a=A_m \sin(\omega t + \varphi)$ ，它可以表示正弦交变电动势、正弦交变电压或正弦交变电流。式中  $\omega$  为正弦变量的“角频率”， $A_m$  为正弦变量的“振幅”或“最大值”， $(\omega t + \varphi)$  称为正弦变量在时刻  $t$  的“相位”， $\varphi$  是  $t=0$ （初始）时的相位，称为“初相”。当振幅、角频率及初相确定后，正弦变量的瞬时值及其变化的规律就完全被确定，所以它们常被称为正弦变量的三要素。

旋转矢量表示法用一个矢量，令其长度表示正弦量的最大值，矢量的始端位于直角坐标平面的原点，用矢量的旋转角速度表示正弦量的角频率，用  $t=0$  时刻矢量与横轴的夹角表示正弦量的初相。这样该矢量任一时刻在纵轴上的投影就等于正弦量的瞬时值  $y=A \sin(\omega t + \varphi)$ ，如图 2 所示。如果矢量  $A$  表示电流强度，则有  $i=I_m \sin(\omega t + \varphi)$ 。用旋转矢量表示正弦交流电，对于交流电的相互比较和运算，具有直观、简便等优点。

图 2 旋转矢量表示

复数表示法 正弦变量可以用复数表示，复数的模等于正弦交流电的振幅，复数的幅角等于正弦交流电的相位。例如一正弦电流  $i=I_m \sin(\omega t + \varphi)$ ，则它的复数记作  $I_m = I_m e^{j(\omega t + \varphi)}$ ，式中  $j$  为虚数单位  $\sqrt{-1}$ 。该复数电流的虚部，就是该正弦交流电的瞬时值，即  $\text{Im} I_m = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ 。用复数表示正弦交流电后，涉及到正弦交流电及交流电路的运算就可通过复数运算进行。

#### 交流电的有效值和平均值

交流电的有效值交流电和直流电各通过一相同阻值的电阻，在交流电的一个周期内，它们两者所产生的热量相等时，用直流电的量值表示交流电的量值。它是一种计算交流电量值大小的物理量。周期为  $T$ ，电流强度

为  $i$  的交流电的有效值  $I$  可表示为  $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$ 。所以有效值又称为“方均根值”。对于最大值为  $I_m$ 、角频率为  $\omega$ 、初相为  $\varphi$  的正弦交流电， $i=I_m \sin(\omega t + \varphi)$ ，其有效值为  $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi) dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 I_m$ 。同理，

正弦交流电电压的有效值和最大值之间的关系完全类似，为  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 U_m$ 。在交流电路的实际测量中，常常使用有效值。例如，我们常说照明电路的电压是 220 伏，电器的铭牌上所标明的交流电压和交流电流都是有效值；交流电表上的刻度也都是有效值。

交流电的平均值 在某段时间内通过电路某一横截面的总电量与该段时间的比值。用符号  $\bar{I}$  表示。对于电流强度最大值为  $I_m$ 、角频率为  $\omega$  的正弦交流电  $i=I_m \sin \omega t$ ，在  $t_1$  到  $t_2$  的时间间隔内，电流的平均值为

$$\bar{I} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I_m \sin \omega t dt}{t_2 - t_1}$$

。在一个周期内，正弦交流电的平均值恒等于零。通常所

说的正弦交流电的平均值是指半个周期内的平均值，即  $t_1=0$ ， $t_2=\frac{T}{2}$ 。

因此正弦交流电的平均值为

$$\bar{I} = \frac{\int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t dt}{\frac{T}{2} - 0} = \frac{2}{\pi} I_m \approx 0.637 I_m。$$

知识 (knowledge) 人们在实践活动中对客观世界的认识和总结, 是反映现象和事物本质属性的概念和规律。知识的广义含义是理论知识、实践技能和方法的总称。例如物理学知识除概念、规律、原理、推论等外, 理所当然地应该包括实验基础、数学表述和物理学方法。知识是能力的基础, 只有在掌握和运用知识的过程中才能发展能力。

直接数字控制 (direct digital control-DDC) 用数字量 (而不是模拟量) 进行测量或者转换成数字量, 用数字量进行数据处理, 又用数字量进行控制的系统称为直接数字控制。

计算机在自动控制中, 可以代替模拟调节仪表, 而直接对生产过程进行控制。由于计算机的输入与输出都是数字量, 所以又叫计算机直接数字控制系统。它是计算机控制的主要形式之一。

计算机可以代替模拟调节仪表的调节作用, 但是不能代替检测元件和执行机构的作用。计算机只代替模拟调节仪表, 作用不大, 然而一台计算机配上数模通道, 模数通道, 开关量的输入、输出和打印机后, 它的功能远远超过一个模拟调节仪表的作用。由于计算机的运算速度快, 如利用分时系统, 把程序安排恰当, 一台计算机不但可以同时控制许多回路, 代替许多模拟调节仪表, 而且还可以打开和关闭生产过程中需要打开和关闭的一些阀门, 收集生产过程中的数据, 处理数据, 记录数据, 对某些不正常的现象进行报警, 像上下限报警等, 这样一机多能是模拟调节仪表所不能与它相比的。

单从调节作用方面来看, 计算机调节控制比模拟仪表调节控制灵活方便。一个模拟仪表调节器一旦投入运行后, 其参数就完全确定了, 要改变参数就要改动硬件, 这是一件麻烦事。然而计算机可以根据现场的情况, 自动地改变其参数, 只要程序设计了这一功能, 不需要改换任何硬件, 程序就可以自动地根据现场的情况来改变参数。模拟调节仪表若是按 PID (比例、微分、积分) 调节, 就很难作到有时是 PID 调节, 而有时又是 PI 调节。然而带有程序设计功能的计算机控制系统, 不仅能按一般的 PID 调节, 还可以中途改变调节方式, 按 PI 调节或 PD 调节, 而且十分容易完成。事实上计算机可在快速、大量采集的数据基础上进行分析和检验, 得到可靠和准确的结论, 再与最佳控制的目标函数比较, 作出反馈控制的数字信息, 控制执行器正确执行, 这在非计算机的系统里简直是不能实现的。因此计算机的数字控制已使测量控制系统成为有思维的智能化工具仪表, 即人们常说的电脑控制系统。

直流电 (direct current) 电荷流动方向不随时间而改变的电流。常用缩写符号 DC 表示。由化学电池、燃料电池、温差电池、太阳能电池、整流器和装有整流子的发电机产生。稳恒电流是一种直流电, 它是指电路中任一段导体内电流的方向和量值都不随时间改变的电流。

直流电主要应用于各种电子仪器、电解、电镀、直流电力拖动等方面。在商业电源的发展过程中, 直流电源是最早被采用的一种电源。19 世

纪 80 年代末，直流电才被交流电取代，因为当时要把它变换为远距离输送所需的高压电很困难。但自 20 世纪 60 年代以来，由于采用高电压大功率变流器能将直流电变为交流电，直流输电系统又重新受到重视并获得新的发展。

**直流电动机 (direct current motor)** 将直流电能转变成机械能的动力装置。基本结构与直流发电机基本相同，只是作为发电机时的直流电输出变成直流电输入，机械动力矩输入变成机械阻力矩输出，动生电动势也成为反电动势。力矩平衡方程和电压平衡方程相应变为

$$T_{em} = T + T_0, V = \epsilon + IR.$$

式中  $V$  和  $T$  分别为输入直流电压和输出机械力矩。与交流电动机相比，直流电动机转速易于调节，且调速范围广，易于快速启动、快速制动和平滑调节，故控制方便、可靠。轨钢机、大型挖土机、矿井提升机械、电气机车、大中型龙门刨床等要求调速范围大的机械，大多使用直流电动机拖动。

**直流发电机 (direct current generator)** 将机械能转变成直流电能的电源装置。结构示意图如图 1。固定部分包括主磁极（及其励磁线圈）、换向磁极（及其励磁线圈）、电刷和机座等，转动部分包括电枢绕组、电枢铁芯和换向器等。磁极与铁芯构成一定形状的磁路。电枢线圈绕在铁芯的凹槽内。换向器由若干彼此绝缘的铜片构成，每一铜片均与一电枢绕组相连。电刷通过弹簧装置压靠在换向器上。换向磁极置于主磁极之间，用以减少电枢绕组换向时产生的火花。

图 1 直流电机的结构示意图

- 1—机座；2—励磁绕组；3—主磁极；4—电刷；  
5—换向极；6—换向绕组；7—换向器

按励磁方式不同，直流发电机可分为他励和自励两类。他励发电机的励磁电流由其他直流电源提供，使用永久磁铁产生磁场的也属此类。自励发电机的励磁电流由电机本身提供，其中励磁绕组与电枢绕组并联的称并励发电机，串联的称串励发电机，既有并联又有串联的称复励发电机。励磁方式不同，发电能力和基本特性也不同，但工作原理基本相同。图 2 表示与换向器中一对铜片相连的一个电枢线圈。在外力矩  $T_1$  用下，电枢线圈作切割磁场线的转动，产生动生电动势  $\epsilon$  和相应的感应电流  $I$ 。在图示位置时，电刷 A 的电势高于 B 的电势。转过  $180^\circ$  后，线圈内的电动势和电流均反向，但通过换向器的作用，A、B 间的电势关系不变。电枢线圈中各绕组连续不断地通过图示位置，电刷 A、B 即源源不断地输出直流电能。感应电流  $I$  的出现使线圈受到与外力矩反向的安培力矩  $T_{em}$  的作用。当稳

图 2 直流发电机工作原理

定运行时，机械外力矩  $T_1$  与安培力矩  $T_{em}$ 、空载力矩  $T_0$  达到平衡，即

$$T_1 = T_{em} + T_0,$$

电枢即按一定转速旋转。输出电压为

$$V = \epsilon - IR,$$

式中  $R$  为电枢线圈的电阻。动生电动势  $\epsilon$  与电枢转速  $n$ 、工作磁通  $\Phi$  (量)

$\Phi$ 以及电枢线圈的匝数、有效边长等决定的结构参数  $C$  成正比，即

$$\varepsilon = C \Phi。$$

由于整流技术的发展，现在一般都通过整流将交流电转变为直流电。但在一些要求较高或没有交流电源的地方仍使用直流发电机。在自动控制系统中，直流发电机作为校正和测量元件起着重要作用。

**直线运动 (rectilinear motion)** 轨迹为直线的运动。质点作直线运动时，其轨迹总能与一直线重合；刚体作平动时，如其中有一点的运动是直线运动，则刚体上各点的运动都是直线运动。在直线运动中速度的方向不变。沿着直线的匀速度运动称为匀速直线运动，沿着直线的匀加速运动称为匀加速直线运动。若匀速直线运动的速度为  $v$  (常数)，沿着  $x$  轴方向运动，初时刻  $t=0$  时的位置在  $x_0$ ，则在时刻  $t$  的位置是

$$x = x_0 + vt。$$

若匀加速直线运动的加速度为  $a$ ，初时刻  $t=0$  的位置和速度分别为  $x_0$  和  $v_0$ ，则在时刻  $t$  的位置  $x$  和速度  $v$  分别为

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2，$$

$$v = v_0 + at。$$

**指南针 (compass)** 中国古代的伟大发明之一。它作为一种指向仪器，被广泛应用于军事、测量和日常生活之中，其最伟大的历史功绩，是用于海上导航。最初的指南针叫做“司南”。作为从司南到指南针的过渡形式是“指南鱼”。北宋初年，曾公亮主编的《武经总要》中载：“鱼法用薄铁叶剪裁，长二寸阔五分，首尾锐如鱼形，置炭火中烧之，候通赤，以铁钤钤鱼首出火，以尾正对子位，蘸水盆中，没尾数分则止，以密器收之。”这里讲的虽是经验总结，但现在看来，指南鱼的制作是符合科学原理的：把铁片加热到通红，其温度高于七百多度（相当于居里点的温度之上），其磁畴瓦解而成为顺磁体，当蘸水时，急速冷却，磁畴又复成。以尾正对着北方，故在地磁场作用下磁畴排列具有一定的方向性，即鱼被磁化。由于北宋都城在开封，地磁场方向应是北端向下，因此要让鱼尾正对子位（即北方）并略向下倾斜，才能得到最大的磁化强度。这是利用地磁倾角现象的一种方法。“以密器收之”，可能是把铁叶鱼收藏在放置有天然磁石的密器内，减少退磁作用，以保持它的剩磁性。这种指南鱼使用时，只要在没有风处将鱼放入盛水的碗中，让它浮在水面，等到静止的时候，鱼首便会指南。

现已发现的关于指南针的最早的明确记载，见于北宋科学家沈括著的《梦溪笔谈》之中，他写道“方家以磁石摩针锋，则能指南。”这是一种更为简易的磁化法，也是磁性指向仪器发展史上的一项重要发明。在近代电磁铁出现以前，指南针都是用这种方法制造的。沈括还具体试验了指南针的四种装置方法：把磁针搁在指甲上；把磁针搁在碗沿上；以针横贯灯心草浮在水面上；以独股茧丝用腊少许粘于针腰，于无风处悬挂起来。

元代陈元靓著的《事林广记》中还记载有木刻指南鱼和木刻指南龟。木鱼、木龟都只有拇指般大，股开一窍，嵌入天然磁石，然后用腊封住。木鱼没入水中即可指南；木龟则是采用有固定支点的装置，于其腹部下方



挖一小穴，安放在竹钉子上，可以自由旋转，旋定以后也会指南。

我国典籍记载指南针用于航海始于北宋朱彧著的《萍洲可谈》：“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦观指南针。”该书记述 1099~1102 年间广州海运情况，这表明我国用指南针进行海上导航当始于 11 世纪末以前。我国在发明指南针以后，大概于 12 世纪中叶到 13 世纪初通过海上航行传进阿拉伯，然后再从阿拉伯传入欧洲。

**置信限与置信概率** (confidence limit and confidence probability) 用来描述测量精度的一种数学方法。假定  $x_i$  在  $[x_a, x_b]$  内出现的概率为  $P(x_a \leq x_i \leq x_b)$ ，则可写成：

$$P(x_a \leq x \leq x_b) = \int_{x_a}^{x_b} y(x) dx,$$

如果令  $\delta = x - \bar{x}$ ,  $a = x_a - \bar{x}$ ,  $b = x_b - \bar{x}$ , 则上式可写成：

$$P(a \leq \delta \leq b) = \int_a^b y(\delta) d\delta.$$

由于正态分布是对称的，所以常取对称区间  $[-a, a]$  来估计出现的概率，即

$$\begin{aligned} P(-a \leq \delta \leq a) &= P(|\delta| \leq a) \\ &= \int_{-a}^a y(\delta) d\delta \\ &= \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^a e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta. \end{aligned}$$

因为落在某一区间的概率与标准误差  $\sigma$  的大小密切相关，故常把区间极限  $a$  (亦称置信限) 取为  $\sigma$  的若干倍，来研究测量值可能出现的概率。即

$$a = k\sigma,$$

式中  $k$  称为置信系数， $k = a/\sigma$ 。

令  $z = \delta/\sigma$ ，并以  $z$  为变量，计算  $z$  落在置信区间  $[-w, w]$  内的概率：

$$P(|z| < w) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^w e^{-\frac{z^2}{2}} dz,$$

这样处理，使  $z$  变为无单位的比值，适用性更普遍和方便，并用函数  $\phi$  表示  $P(|z| < w)$ ，即

$$\phi(w) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^w e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

上式称为概率积分函数，其值可在任何一本高等数学手册中查到。下表为概率积分函数的数值表。

$z$	$\phi(z)$	$z$	$\phi(z)$	$z$	$\phi(z)$
0.0	0.00000	1.1	0.72867	2.3	0.97855
0.1	0.07966	1.2	0.76968	2.4	0.98361
0.2	0.15852	1.3	0.80640	2.5	0.98758
0.3	0.23582	1.4	0.83549	2.58	0.99012
0.4	0.31084	1.5	0.86639	2.6	0.99068
0.5	0.38292	1.6	0.89040	2.7	0.99307
0.6	0.45149	1.7	0.91087	2.8	0.99489
0.6745	0.50000	1.8	0.92874	2.9	0.99267
0.7	0.51607	1.9	0.94257	3.0	0.99730
0.7979	0.57507	1.96	0.95000	3.5	0.99953
0.8	0.57629	2.0	0.95450	4.0	0.99993
0.9	0.63188	2.1	0.96427	4.5	0.999993
1.0	0.68269	2.2	0.97219	5.0	0.9999994

上表第一种用法是给定  $z (= \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma})$  值，查出  $\phi(z)$  值，即表示误差落在  $\pm z$  范围内的概率。如取  $z=3$ ，则  $\phi(3)=0.99730$ ，表示  $P(|\bar{x} - \mu| < 3\sigma) = 0.99730$ ，即测量值与平均值的差，落在  $\pm 3\sigma$  区间内出现的可能性为 99.73%。取  $z=2$ ，误差落在  $\pm 2\sigma$  区间内出现的概率为 95.45%。精密度越高， $z$  越小，出现相同概率的区间越小。将一些常用的概率与区间列表如下：

- $P(|\bar{x} - \mu| < 3\sigma) = 0.99730$ ，即 99.730%
- $P(|\bar{x} - \mu| < 2\sigma) = 0.95450$ ，95.450%
- $P(|\bar{x} - \mu| < \sigma) = 0.68269$ ，68.269%
- $P(|\bar{x} - \mu| < 1.96\sigma) = 0.95000$ ，95.000%
- $P(|\bar{x} - \mu| < 0.6745\sigma) = 0.50000$ ，50.000%。

上表第二种用法是根据实验数据出现的频率数，在表中找出相应的概率积分函数  $\phi(z)$ ，从而确定置信限  $z$ ，最后找到误差  $\bar{x} - \mu$  的值。例如实验数据中 77% 的数据符合预测值，其余 23% 的数据，不是太大，就是太小，并且均匀分布在期望值两边。查上表可得到当  $\phi(z)=0.76968$  时， $z=1.2$ ，即  $\bar{x} - \mu = 1.2\sigma$ ，由于  $\sigma$  可根据测量值计算得到，因此 77% 的数据落在  $\bar{x} \pm 1.2\sigma$  的范围内。

**智力 (intelligence)** 人的大脑功能的表现，是人的先天生理素质、社会历史条件、教育和本人努力相互作用的产物。智力的强弱或发展得充分与否，主要反映在人脑的功能（如感知、记忆、思维、想象）和人脑活动的效果（如认识事物的正确性、敏捷性、条理性等）。智力的主要的基础是先天的脑的生理功能。

**智能仪表 (intelligence instrument and meter)** 微电脑嵌入式仪表。是大规模和超大规模集成电路出现后的产物，也是计算机技术发展的必然结果。从 60 年代到 70 年代，借助集成技术，出现了各种功能强、体积小、价格低、可靠性高的优质电子仪器仪表。60 年代后期就出现了成套自动测试系统，但由于当时计算机太昂贵而使发展受到限制。70 年代微型计算机的大发展，为自动化测试系统提供了坚实的物质基础。但是

通过通用接口总线将若干测量仪器和计算机系统联接的自动测试系统，往往不能充分发挥计算机系统的作用。然而若将集成到一块芯片上的廉价微处理器或单片微型计算机（带有 RAM、ROM、接口等器件功能的微处理器）嵌入到仪器内部时，虽然因为内存有限，容不下大的软件包，不能完成计算机系统的所有功能，但却可以承担对测量数据的采样、整理、分布、判断、转换、计算、打印、显示、转储等功能。智能仪表不仅解除了操作人员的体力劳动，还能部分地代替人的脑力劳动。

智能仪表不能看作是仪器仪表与微电脑的简单结合，它是计算机技术与仪器仪表融合的结果，因此与一般仪器仪表相比，智能仪表的功能成倍增加，测量范围大大扩展，精度提高很多，还能解决很多旧式测量仪器根本无法解决的问题。目前，先进国家的仪表 80%以上在不同程度上实现了智能化。但是，由于终端控制元件（例如开关、按钮等）和传感器等方面发展缓慢，在一定程度上影响智能仪器仪表和自动化测量技术的发展。

**质点 (mass point)** 具有一定质量但可忽略其大小、形状和内部结构的物体。质点是抽象化的力学模型。实际物体都有一定大小，但当其尺寸在所讨论的问题中为很小，以至可以不计物体内部各处运动状况的差别时，就可以把物体看成质点，使问题的处理大为简化，所得结果仍可与实际情况相当符合。此外，物体在平动时，内部各处运动情况相同，也可以把它看成质点。可看成质点的物体实际上往往不是很小，如地球，在研究其公转时就可把它看成质点（在研究其自转时则不能），因此不可以把质点和微观粒子等同看待。

**质点力学 (mechanics of a particle)** 以质点为研究对象的力学理论。质点是指具有一定质量而几何尺寸可以忽略不计的物体。这是为了研究问题的方便而建立的一种实体模型，在客观世界中质点是不存在的。质点力学可分为质点运动学和质点动力学。质点运动学研究质点的位置随时间变化的规律，而不考虑导致质点位置和运动状态变化的原因。质点动力学研究质点受力和运动状态变化的规律，它以牛顿运动定律为基本原理，所以牛顿定律直接应用于某个研究对象所得出的一切结论，都是质点力学的内容。由于任何物体可分割成许多质点，物体的运动就是物体中各质点运动的组合，所以质点力学又是研究各种复杂力学系统的理论基础。

**质量 (mass)** 物质的一种属性。是量度物体包含物质多少的物理量，也是惯性质量和引力质量的统称。

质量是物理学的一个基本概念，最初，牛顿把质量定义为，物质的数量（质量）是一个同物质密度和体积成比例的量度。这个定义包含了循环论证，因为密度等于质量对体积的比，因而只是在比较同类物质时具有一定意义。

惯性质量是量度物体惯性的物理量。不同物体在同一外力作用下，相对惯性系有不同的加速度，加速度数值较大的物体称为有较大的惯性，或称为有较大的惯性质量；加速度数值较小的物体称为有较小的惯性，或称为有较小的惯性质量。惯性质量大小的量度方法是，选取一标准物体，定义其惯性质量  $m_0=1$  质量单位，则任一物体的质量数值  $m$  规定为

$$m = \frac{a_0}{a} m_0 = \frac{a_0}{a}。$$

其中  $a_0$  和  $a$  分别是受同一外力作用的标准物体和待测物体在惯性系中产生的加速度的大小。实验表明，比值  $a_0/a$  由物体本身的属性决定，与测量物体质量时所施的外力无关。在国际单位制中，质量单位称为千克，作为标准质量单位的物体样品现存于巴黎国际计量局中，是一个铂铱合金圆柱体。

引力质量是量度物体引力作用大小的物理量。实验表明，在同一距离上，不同物体与同一参考物体之间万有引力的大小一般是不相同的，说明不同物体施受万有引力的能力并不相同，因而也就有不同的引力质量。引力质量大小的量度方法是，任取物体  $i$  和  $j$ ，它们在相同距离  $r$  上与指定参考物体之间的万有引力大小分别为  $f_i$  和  $f_j$ ，则物体  $i$  的引力质量  $m_i$  对物体  $j$  的引力质量  $m_j$  之比是

$$\frac{m_i}{m_j} = \frac{f_i}{f_j}$$

如选定某一标准物体，规定它的引力质量为一个质量单位，于是其他物体的引力质量大小被唯一确定。在这样规定了每个物体的引力质量后，两物体之间的万有引力必与此两物体引力质量的乘积成正比：

$$f_{ij} \sim m_i m_j。$$

引力质量和惯性质量是物质两种不同属性的量度结果，但高精度实验结果得出，惯性质量与引力质量成正比，只要选取适当的单位，可使它们的数值相等。爱因斯坦在他的广义相对论中进一步把物体的引力质量等于其惯性质量作为实验事实，提出了引力场同加速度场局域性等效的概念。

在狭义相对论中，如保留质量  $m$  和动量  $p$  之间的经典关系式  $p=mv$ ，则一物体的质量  $m$  不再是一个不变的数值，它随物体运动的速率  $v$  按下式相关：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

$m$  称为相对论质量， $m_0$  是物体静止不动时的质量，称为静质量，式中  $c$  是真空中光速。狭义相对论还预言，相对论质量  $m$  与总能量  $E$  之间有如下关系

$$E=mc^2，$$

或总能量  $E$ 、动量  $p$  和静质量  $m_0$  之间有如下关系

$$E^2 - P^2c^2 = m_0^2c^4$$

由此给质量注入了新的含义，即物质（或质量）和运动是紧密相关的，质量的多寡反映了物质所具有能量的多寡。

**质能关系（mass-energy relation）** 参见相对论。

**质谱仪（mass-spectrometer or mass spectro-graph）** 用于分析各种元素的同位素并测定其质量及含量百分比的仪器。有多种类型，一般由离子源、分析器和收集器三部分组成。常见的倍恩勃立治式质谱仪的基本结构如图所示。所要研究的物质在离子源  $N$  中形成（一般为一价的）离子发生，经狭缝  $S_1$  进入速度选择器。调节速度选择器中的匀强电场强度  $E_1$  和匀强磁场强度  $B_1$ ，挑选出速度  $v=E_1/B_1$  的离子经狭缝  $S_2$  后垂直进入强度为  $B_2$  的较弱匀强磁场中。离子在这里将作匀速圆周运动，最后落在收集器

(例如照相底片)上。离子的偏转半径  $R$  与其质量  $m$ 、电量  $q$  间的关系为

$$\frac{m}{q} = \frac{B_2 R}{v} = \frac{B_2 R}{E_1 / B_1}$$

不同质量的同位素离子偏转半径不同，将落在收集器上不同位置。已知电量  $q$ ，测出  $R$  即可由上式计算出离子质量  $m$ 。通过不同位置处离子沉积厚度的测定，又可求得不同质量的同位素在物质中的百分比含量。

### 质谱仪结构示意图

在原子物理、原子核物理、半导体物理等学科研究中，质谱仪是有力的工具。在核技术和半导体技术中，质谱仪不仅可以测定燃料或材料中各种同位素（例如  $^{235}\text{U}$  和  $^{238}\text{U}$ ）的含量，而且还用于检测微量的杂质。在矿物的成分分析中，质谱仪是常用的基本仪器。研究人员还用质谱仪分析样品中某些放射性物质同位素的含量，来确定化石或岩矿的生成年代。现代空间技术中，也使用质谱仪测定高空气体或星际空间物质的成分。在生物、化工、冶金、医学以及农业、环境保护等方面，质谱仪都有广泛的应用。

质速关系 (mass-velocity relation) 参见相对论。

质心 (center of mass) 也称质量中心。是描写物体质量分布平均位置的一个几何点。如一个物体各微元的质量分别为  $m_1, m_2, \dots$ ，它们相对于某一原点  $O$  的位矢分别是  $r_1, r_2, \dots$ ，则此物体的质心  $C$  对  $O$  点的位矢  $r_c$  定义为

$$r_c = \frac{\sum m_i r_i}{\sum m_i}$$

所以，质心是物体中各点位置的加权平均值，权重就是各点的质量。质心相对于物体的位置并不因  $O$  点位置的不同而有不同，它能大概地描写物体的质量分布主要靠近哪一点。在认为物体的各部分所受重力是一组严格的平行力时，物体的质心与它的重心重合。但物体的重心只有在重力场中才有意义，物体质心概念与物体是否在重力场中无关。

物体的质心具有许多独特的力学性质。例如，物体在受力时，其质心的运动好比是这样一个质点的运动，这个质点的质量是物体的总质量，这个质点所受的力是物体上各点所受外力的矢量和。又例如，在一般情况下，随着质心平动的参考系可能是非惯性系，但是，相对于这个非惯性系来说，若用质心的运动描述其平动部分，则物体的运动规律有比较简单的表示。

质子 (proton) 氢原子的核，常用符号  $p$  表示。也是任何原子核的组成部分，原子核内所含的质子数就是该原子的原子序数  $Z$ 。质子是一种非常稳定的粒子（寿命  $> 10^{32}$  年）。质子的质量约为电子质量的 1840 倍，为  $1.67264 \times 10^{-27}$  千克，带正电荷，其电量与电子电量相同。质子还带有自旋角动量和自旋磁矩。它的自旋为  $1/2$ ；固有磁矩为 2.79 个核磁子（核磁子  $\mu_N = 5.0508 \times 10^{-27}$  焦耳/特斯拉）。

质子不是点状粒子，它具有内部结构。1956 年美国物理学家霍夫斯塔特等人通过高能电子对核子的散射实验证实，质子的电荷和磁矩有一个分布半径（称为“电磁半径”），为  $0.84 \times 10^{-15}$  米。质子的电荷和磁矩随半径大致按指数规律递减。60 年代末的理论和实验又进一步证实，质子内部具有点状结构。构成质子等粒子的更为基本的粒子称为“夸克”，质子是

由两个  $\mu$  夸克和一个  $d$  夸克组成，记为  $p = (\mu, \mu, d)$ 。夸克带有分数电荷， $\mu$  夸克的电荷为  $+\frac{2}{3}e$ ， $d$  夸克的电荷为  $-\frac{1}{3}e$ ，所以质子的电荷为  $+e$ 。

这些夸克之间通过交换“胶子”而产生一种强作用吸引力，从而形成质子。

**中国古代律学 (Luxue of ancient China)** 用数理方法研究发声体乐音的由来及其音高 (频率) 之间规律的一门学问，是音乐学，也是声学的一个组成部分。律既指构成音阶的两个音，又指选择音阶各音的构成规律。定律之法是指在实践和经验的基础上，根据弦或管的长度与发音之间的关系，用数理方法找出音阶中的各个音。

中国古代对律学一向比较重视。《尚书·尧典》中就有“同律度量衡”的记载。二十四史的大部分都有律历志，其中亦有不少关于律的记载。再从出土文物如石磬等的研究看，夏、商时期的人已有绝对音高的概念，且中国古代的五声要早于七声。随着对成组乐音的认识，也就产生了十二律，其名称为：黄钟、大吕、太簇、夹钟、姑洗、仲吕、蕤宾、林钟、夷则、南吕、无射、应钟。据考古发现，西周中晚期的编钟已刻有以上一些律名的铭文。在此期间，乐器有了大发展，见于《诗经》记载的就有 29 种。此后，晋朝荀勖在制成十二支发音准确的笛管基础上，第一次提出相当准确的管口校正法，并以管作正律器成为标准，这是我国古代声学的先进成就。

中国古代最早的定律之法是“三分损益”法 (大约产生于公元前 7 ~ 前 3 世纪)。这是将主音律的弦 (或管) 三等分，取其两份 (全管长的  $\frac{2}{3}$ ，为损一)，或增加一份 (全管长的  $\frac{4}{3}$ ，为益一)，依次确定十二律中其它各律的方法。这是律学中的一项伟大创造。

由于几千年来，中国古代一直采用三分损益法，但依此法计算而得的清黄钟和黄钟的弦长比不是 0.5，而是 0.4933，清黄钟的音分值比 1200 多 24 音分，这个高出的音分值称为古代音差。为消除这个音差，中国古代乐律家京房、钱乐之、沈重、何承天、刘焯等都作了努力。直至 16 世纪末，明朝的朱载堉敢于打破常规，善于摈弃旧习，首倡十二平均律，即在八度音之间分成十二个音程相等 (相邻两频率的比值即音程都是  $\sqrt[12]{2}$ ) 的半音，顺次组成十二等程律，从而使律学发生重大变革，消除了古代音差，彻底解决了旋宫问题。朱载堉的理论为键盘乐器的创制打下了声学基础，对世界声学的发展作出了贡献。

**中国古代元气说 (Yuanqi theory of ancient China)** 以元气为天地万物的元素和本原的一种学说。中国古代关于气的概念起源较早，元气的概念出现较晚，但至迟于汉代初年。气的概念是从云气、水气、烟气以及人的呼吸之气中概括出来的，它泛指一切独立于人的意识之外的客观现象。从先秦文献《孟子》、《庄子》、《荀子》中关于气的言论来看，所谓气有这样几个主要特点：气是与“心”或“志”对立的；气是构成物体的材料；气是占空间、有广袤的。而元气的概念有两层意义：一是原始的气，即天地未分以前的

浑然的气；二是总体的气，即天地之间气的总体。

元气说正式形成于两汉时期。王充运用当时的自然科学成就，创立了以气为基础的元气自然论。他认为天地万物都是由元气构成，而且自然界万物生成死灭的发展变化，都是天地所含元气上蒸、下降、相互作用的结果，天地和元气都是不生不灭的。在王充之后，嵇康、杨泉、范缜、柳宗

元、刘禹锡等人都继承了元气自然论。元气说在北宋时期得到发展。张载是元气说的集大成者，他以太和之气变化流行的过程为道，以气散而未聚无形可见的本然状态为太虚，据此提出了虚空、气、万物统一于元气的元气本体论，并把这一观点贯彻到气与性、气与神、气与理的关系方面，形成了宏大而丰富的唯物主义自然观体系。明清是元气说发展的又一时期，王廷相、吕坤、王夫之、戴震等人继承了元气本体论，并有所发展。王夫之明确地提出宇宙是元气构成的物质实体，所谓虚空也是充满了人眼不能看到的稀微的气的实体，有形物是气构成的，无形的虚空也是由气构成的，有形和无形只不过是气的聚、散和显、隐而已。他还以一定的实验观察为基础，指出了无形的元气也是不生不灭的。

经过中国古代元气说者的努力，元气说勾划出这样一幅世界图景：虚空中充满着无形、连续的气，这些气因为内部的阴阳对立不停地运动着，有形的天地万物即在其中聚而复散，散而复聚，并以气为中介相互作用。在这里，充满着气的虚空、无形的连续的气、气与形的相互转化，是整个世界图景的基本要素。这幅图景虽然是以朴素的形态出现，却包含着不少合乎唯物论、辩证法的思想，其中有些也正是物理学发展史上应该去把握的环节。诸如：始终坚持物质世界无限发展和普遍联系的观点，力图从统一的天地万物的元素和本原来认识和说明世界；坚持“气”和“形”可以相互转化的思想，实际上在一定程度揭示了物质结构连续性和间断性的辩证统一；明确表述“气”和“形”的总和不生不灭，蕴含着物质和运动不可创生和不可消灭的观念；表述“一物两体”等思想，以说明事物的内在矛盾性和物质的不可穷尽性。

清代后期以来，随着西方近代自然科学和哲学传入中国，我国古代元气说中的一些严重缺陷：对物质属性缺乏深入探讨、对自然现象缺乏严格论证等也随之暴露出来，于是这种学说被机械唯物主义所取代。

**中间玻色子 (intermediate boson)** 传递弱相互作用的媒介粒子，自旋为 1。共有三种，两种为荷电中间玻色子，记为  $W^+$  和  $W^-$ ，所带电荷为  $\pm e$ ，质量为  $81.2\text{GeV}$ ；一种为中性中间玻色子，记为  $Z^0$ ，不带电，质量为  $92.5\text{GeV}$ 。弱相互作用是通过中间玻色子传递的这个观念早在本世纪 40 年代末就已经提出。其后，60 年代末建立的电弱统一理论要求存在三种中间玻色子，并且对它们的质量、自旋、寿命和其他特性作了预言。1983 年人们通过加速器实验首先发现了荷电中间玻色子，然后又发现了中性中间玻色子，这些粒子的性质与理论预言很好相符。

**中微子 (neutrino)** 参见轻子。

**中微子通讯 (neutrino communication)** 一种用中微子进行发射和接收的通讯方法。其工作原理是根据需要，人为地控制每一脉冲中的质子数量，就可以将必要的信息加进去，再通过中微子束发射出去。产生中微子束的高能加速器好比发送器，而中微子探测器好比接收器。中微子具有下列特点：它是稳定的中性粒子，自旋为  $1/2$ ，静止质量等于零，始终以光速运动；它又是与物质作用最弱的粒子，通过地球直径那么厚的物质，只有  $10^{-10}$  的中微子与物质中的质子或中子发生反应。因此，中微子被用于通讯，较之无线电通讯有下列两个突出的优点：它能沿直线传播，是当代最快的通讯方式，仅需 0.04 秒就可贯穿地球，其通讯速度比用卫星传播的无线电通讯要快 5 倍左右；保密性强，且不受任何干扰。但

实现中微子通讯，目前国际上还正在探索之中。

中性线(neutral line) 简称“中线”。在三相交流电源的星形联接中，自中性点引出的一根导线。其电势为零，故又俗称为“零线”。当与对称负载的星形联接或三角形联接相联时，中性线电流为零，故可省去。当与不对称负载网络相联时，中性线中将有电流，因而不可省去。但中性线电流强度不会太大，故一般可采用比端线细的导线作中性线。在中性线接地的供电系统中，接地中性线不允许安装保险丝。因为万一发生异常使保险丝熔断时，断点以后的负载线路中，载荷小的一相将出现较高电压，从而引起其他用电设备发生事故。

中学物理教师的教学能力(teaching resou- rcefulness of physics teacher) 是教师顺利完成教学活动和任务所需的个性心理特征和业务本领。中学物理教师的教学能力，主要包含以下三个方面。

(1)掌握教学内容的能力。中学物理教师掌握教学内容的能力应包括以下三个方面。 深入掌握所传授的物理知识。这是指掌握所传授的知识结构、层次、重点、难点和学科的研究方法、分析研究物理知识的实际应用以及与其他学科知识的联系。 分析研究与所传授的物理知识相关的科学方法和能力。这是指分析所传授物理知识中的各项能力培养因素，并提出实施的手段和方法。 理解物理知识的教育功能。这是指充分并恰当地发掘物理教学中内在的教育因素，把教育性恰如其分地渗透在教学内容和各种教学活动之中。

(2)了解学生的能力。中学物理教师了解学生的能力，主要包括以下三个方面。 分析学生原有的知识和经验。这是指正确分析学生在学习新的物理知识以前所具备的相关知识、日常生活经验和前科学概念。分析它们对新知识的学习可能带来的积极的或消极的影响。 研究学生的智能因素及其发展特点。这是指根据教育心理学的知识和方法，分析、了解学生在学习物理时各项智能发展的水平和特点，使教学既适应学生的智能水平和特点，又促进学生智能的不断发展。 了解学生的非智力因素。这是指了解学生的学习兴趣、动机、态度等非智力因素，从而在教学中激发学生的学习兴趣，培养学生的意志。

(3)组织和实施教学活动的能力。中学物理教学任务是通过各种物理教学活动实现的。组织和实施物理教学活动的的能力，是物理教师教学能力的具体体现。它主要包括以下三个方面。 创设物理环境。这是指让学生在物理环境中通过足够量的各种活动来掌握物理知识、促进发展能力。 运用各种教学手段。教学手段是教学中传递信息的工具和媒体。教学语言是最基本的教学手段，因此中学物理教师应具备较强的语言表达能力，语言表达在物理教学中具有极为重要的作用。实验是物理教学过程的一项基本要求和特征。中学物理教师必须具有较强的演示实验和指导学生实验的能力。此外，清晰的板书和生动的板画，对中学物理教学也十分重要。教师还应能指导学生阅读教材并运用各种电化教学辅助手段进行教学。总之，能否恰当而又自如地运用多种教学手段组织教学，使教学过程的实施尽可能达到最优化，是衡量一个中学物理教师教学水平的重要方面。 及时获取学生的反馈信息。物理教师应在课堂教学中通过各种形式与学生及时交流，并通过形成性测试及时了解学生的学习成效、困难及错误，在此基础上及时加以解决并调整教学。



以上三个方面的能力，主要是就物理教师的课堂教学能力而言的。除此之外，如组织学生课外活动的的能力、教学测量与评估的能力等，也是中学物理教师需要具备的。

中学物理教学大纲（课程标准）（syllabus of school physics）中学物理课程结构的法定依据，它是国家行政当局或学校当局对于课程的目的、教学总要求、教学原则、教学基本内容与要求（目标）、学时等规定的正式标准，也是编写教材、检查与评估教学质量、指导教师教学工作以及考试命题的基本依据。在同一教学大纲下，可以有不同的教材体系与特色，但从基本要求方面来说应该是一致的。

各国、各地区的教学大纲（课程标准）繁简不同，一般应包括以下三个基本方面： 中学物理教学的目的。 课时安排：规定在什么年级开设物理课，学年总课时数和周课时数。 教学内容与教学目标：规定总的教学目标、应学的知识内容及相应的教学要求。

在有些教学大纲（课程标准）中，还对以下几方面提出有关的标准并进行阐述。 中学物理教科书选编要求。 训练的形式和要求。明确教学过程中对学生各项训练的形式和具体要求，例如规定实验的活动量应占教学活动总量的比例。 教学原则。对教学过程的组织 and 教学方法提出若干条基本原则。例如理论结合实际的原则，重视培养的原则，调动学生主动性的原则，因材施教的原则，及时反馈的原则等。 对学生学业成绩的评价和成绩核定。规定主要的评价方式，形成性和终结性考查中教学目标各层次要求所占的比重等。

中子（neutron） 一种中性粒子，是原子核的组成部分。常用  $n$  表示。中子的质量比质子稍大些，其值为  $1.67495 \times 10^{-31}$  千克。中子虽然不带电荷，但具有自旋角动量和自旋磁矩，其自旋为  $1/2$ ，固有磁矩为  $-1.91 \mu_N$ ，其中  $\mu_N$  为核磁子，负号表示其固有磁矩方向与自旋角动量方向相反。中子是查德威克于 1932 年在  $\alpha$  粒子轰击铍和硼原子过程中发现的。中子是不稳定粒子，它可衰变为质子、电子和反中微子，平均寿命约为 15 分钟（ $918 \pm 14$  秒）。然而，与其他粒子的寿命相比，中子的寿命又非常长，所以又可以说中子是一种相当稳定的粒子。在中子发现后，一些物理学家立即提出了原子核是由中子和质子构成的理论，这一理论已为大量实验所证实。

与质子一样，中子也不是点状粒子，它的磁矩也有一个分布半径。迄今的理论和实验表明，中子是由一个  $u$  夸克和两个  $d$  夸克所构成的复合粒子，记为  $n = (u, d, d)$ 。这些组成夸克之间通过交换“胶子”而发生强作用，从而形成了中子。

由于中子不带电，容易进入物质和原子核内部，因此形成了多方面的应用。例如通过中子与原子核作用引起的链式核反应来研究原子核的结构和核反应机制（中子核反应）；利用热中子通过晶体物质时发生的衍射来研究物质结构（中子衍射）；利用中子穿透物体时的衰减情况来显示物质内部结构（中子照相）等。中子星（neutron star）处于演化末期的中等质量的恒星。一个原先质量为  $4 \sim 8$  个太阳质量的恒星，在演化过程中当其内部核燃料耗尽，核反应停止后，引力要比白矮星强得多，靠电子简并压力（参见白矮星）抵挡不住引力收缩作用，于是核外电子被挤压进原子核内，与核内质子结合成中子，形成简并中子气状态，这种简并中子气体的压强有可能与引力收缩作用达到平衡，这时就形成中子星。

中子星的密度极高，典型的中子星直径仅为 20 公里，但它的质量却比太阳的质量还大。中子星核心部分密度为  $10^{17} \sim 10^{18}$  千克/米<sup>3</sup>，大体相当于原子核的密度，一立方厘米的中子星物质的质量可达到几亿吨。中子星的另一特征是具有极强的磁场，其强度可达  $10^{12} \sim 10^{14}$  高斯。

恒星收缩成中子星的过程要发生“爆发”，这是形成白矮星过程所没有的。当它猛烈收缩时，巨大的引力势能被释放出来，把恒星的外壳掀掉，向星际空间抛射出大量物质，这就是所谓“超新星爆发”的过程。爆发后剩余下来的核心部分质量约为 1.4~2 个太阳质量。若塌缩中心核的质量超过太阳质量的 2 倍，则可能变成黑洞而不是中子星。

1967 年发现了脉冲星（参见脉冲星），首次证明了中子星的存在。现已发现 300 多颗脉冲星，普遍认为它们是旋转着的中子星。

**中子照相 (neutron photography)** 一种利用中子束流得到所要显示的物体内部结构相片的新型照相技术。其方法是用一束经过特殊准直处理的中子束流，穿过被检测物体，到达射线转换屏上；转换屏受到中子照射后，产生不同强度的放射线，形成放射性潜像；使胶片感光，从而达到摄影目的。该照相法较之 X 光照相法的优点在于能侦知包在重物质内的物体，而 X 光则不能穿过它们，于是被主要用于：物品检验，探知骨髓癌，研究喷气发动机中汽油燃烧的过程，以及炮弹中的火药装填是否均匀和有无裂缝等。

**重力 (gravity)** 物体在行星或其他天体表面附近所受的万有引力。物体所受重力的大小称为此物体的重量。由于万有引力的大小与相互作用两物体的质量成正比，所以对指定行星和离行星表面的指定高度来说，物体的重量  $W$  和其质量  $m$  成正比：

$$W=mg。$$

$g$  是比例常数，它是物体在行星表面附近自由下落的加速度，称为重力加速度。设行星为半径  $R$  的正球体，质量按球对称分布，根据万有引力定律，重力加速度是

$$g = \frac{GM}{(R+H)^2}。$$

式中  $G$  是万有引力常数， $H$  是物体离行星表面的高度。地球质量  $M = 5.93 \times 10^{24}$  千克，平均半径  $R = 6.37 \times 10^6$  米，取  $G = 6.67 \times 10^{-11}$  米<sup>3</sup>/秒<sup>2</sup>·千克和  $H=0$ ，得地球表面上的重力加速度约为 9.83 米/秒<sup>2</sup>。

然而地球并非严格的正球体，其质量分布亦非严格球形对称。一般说来，它是一个从两极向赤道平面略有压扁的旋转椭球体，所以在地球表面不同纬度处，同一物体的重量略有不同，两极处的重量较重，赤道处的重量较轻。

地球又是一个有自转的天体，即使忽略空气阻力，在地面上观察到物体下落的加速度并不严格等于假定地球不自转时所观察到的下落加速度。在自转的地球表面上用衡器测得物体的重量（视重）也不严格等于地球对物体所施万有引力的大小。如计及地球自转的影响，重力应该等于物体所受万有引力  $F$  和地球自转所引起的离心力  $Q$  的矢量和  $W$ 。 $Q$  的大小是  $m \omega^2 (R+H) \cos \varphi$ ， $\omega$  是地球自转角速度， $\varphi$  是物体所在地的地球纬度。考虑了地球自转影响以后，重量的修正值不超过千分之三到千分之四，重力方向的偏差不得超过十分之一度。故可近似认为重力就是地球对物体的引

力。重力加速度的实测数值是，在赤道处约为 9.78 米/秒<sup>2</sup>，在两极处约为 9.83 米/秒<sup>2</sup>。

**重力学 (gravimetry)** 研究重力场与地球上各个地区重力加速度变化规律的一门学科。人们对地球形状概念的认识是逐步发展的。现代大地测量学上所谓

### 地球表面物体受力图

的地球形状是指一个理论曲面的形状。这个曲面叫做大地水准面。大地水准面是由平均海平面所定义的一个封闭曲面，海面在重力作用下是一个等位面。这个等位面的形状和大小可以用天文测量、几何测量和重力测量来测定。重力的大小等于重力等位面的梯度，其方向与等位面垂直，这样就把地球形状的研究与地面重力的研究紧密地联系起来。从全球看，大地水准面是一个不规则的曲面，因此在确定地球形状时，先确定一个和大地水准面最逼近的旋转椭球面——扁球面，然后再确定大地水准面和这个扁球面的偏离。国际间 1924 年曾选定一个扁球面作为参考面，1967 年作了修订，选定的参考椭球面的参数是：长轴  $a=6,378,160$  米，扁率  $e=(a-c)/a=1/298.247$ ， $c$  为短轴。实测表明，大地水准面与参考椭球面的最大偏离不超过地球半径的十万分之一。目前，根据卫星轨道运动资料，通过大量计算，得到了比较精确的地球形状。对于轴对称的地球，由重力位的函数的前三项得到的地球形状呈梨形，与参考面相比，在北极略有盈余，南极则有亏损，中纬度为北亏南盈，幅度在 10 米到 30 米之间。

地球的形状是地球内部情况的一种反映，研究地下物质的分布，常借助于地面重力异常场的测量，重力异常等于实测的重力值减去正常重力值。重力异常区在地面上的大小范围和它所反映的地下情况的深度有关，一般异常的范围越大，所反映的地下情况越深。大范围重力异常时，要考虑地下物质的迁移对地面重力场的补偿作用（地壳均衡）。精确的研究表明，重力除了与地球的引力和自转离心力有关外，还与地外天体的引力有关，主要是日、月的引力，但与前二项相比为一小量。由于日、月与地球的相对位置随时间变化，因而对地球上的某一固定点而言，日、月的引力也随时间变化，这就使地面上的重力有一微小时间变化，且使地球发生形变。这种形变在海洋上表现为潮汐，在陆上及海底表现为地球固体潮，固体潮与地球内部的性质有关。

**重心 (center of gravity)** 在地球表面附近物体各部分所受重力的合力作用点。在地面附近，物体的线度相对于地球的半径来说是很小的，物体各部分所受重力可以认为是一组平行力，这组平行力对物体的作用，可以等价于作用在物体重心上的一合力，这合力就是整个物体的重力，而合力作用点即为重心。设想把物体分割成许多微元，第  $i$  微元的质量为  $m_i$ ，它对空间某一点  $O$  的位矢为  $r_i$  则物体重心的位矢  $r_c$  是

$$r_c = \frac{\sum (\Delta m_i \cdot g) r_i}{\sum \Delta m_i g} = \frac{\sum \Delta m_i \cdot r_i}{m}$$

这里， $g$  是重力加速度， $m_i g$  是物体中第  $i$  微元所受重力的大小， $m$  是物体的质量，此物体的线度自然认为是远小于地球半径的。重心是一个定点，与物体的方位和所在位置无关，且与此物体的质心重合。如物体的质量均

匀分布，则物体的重心、质心和它的形心也重合。例如，具有中心对称的均质物体，其重心必在对称中心；有对称面的均质物体的重心必在此对称面上。所以，对于规则形状的均质物体，常可由视察其对称性来直接决定重心的位置。也可用实验方法测定物体重心的位置。例如，可把物体用一柔软细线悬挂起来，悬线延长线必通过物体重心，然后，把物体换一个方向悬挂，则两种不同情况下悬线延长线的交点就是物体的重心。当物体的线度很大，物体各部分所受重力不是一组平行力时，物体的重心不仅与质心不重合，而且它相对于物体的位置将与物体的方位和所在位置有关。物体重心的研究，在实际工程中有广泛应用。例如，为了减少高速旋转物体的振动，需使其重心偏离转轴的距离（偏心距）不超过规定的数值。

朱载堉（1536～约1610）中国明代律学家、历算家。字伯勤，号句曲山人，明宗室郑恭王厚烷之子。早年从舅父何塘习天文、算术。后因皇族内讧，父获罪系狱，遂筑土屋于宫门外，独居19年，钻研乐律、数学、历算。父死后，不承袭爵位，而以著述终身。

朱载堉是“新法密律”也就是后来称为“十二平均律”的理论首创者。这个理论及其计算方法在他的《律历融通》、《律学新说》和《律吕精义》等著作中均有阐述。可见他完成“新法密律”的理论及计算当在1580年以前。“新法密律”的主要科学贡献：一是创造了以弦律为主的十二平均律，即在八度音之间分成12个音程相等（相邻两频率的比值都是 $\sqrt[12]{2}$ ）的半音，顺次组成12个等程律。由于相邻各律间的等程性，使新的乐律对任何曲调都能应用，转调自如，极有利于曲调的创作和乐器的制作。二是采用“异径管律”的方法，提出了解决管口校正的新途径，即在计算管口校正数时，利用不同管径的特点来解决缩小空气柱与管长不一致的问题。他的研究结果得出，在一个八度音程中按音高次序排列的12个律管的管径构成了以 $\sqrt[24]{2}$ 为比率的等比数列。这两个贡献都是16世纪声学的重大成就。

**主截面**（principal section）晶体任一界面的法线与晶体光轴组成的平面。晶体有很多界面，因此有很多主截面。一般取一定的主截面作为参考面。如光入射到某一界面时，就取与该界面有关的主截面作为参考面。

晶体中光的传播方向与晶体光轴构成的平面，称为主平面。o光电矢量的振动方向与o光主平面垂直；e光电矢量的振动方向在e光主平面内。当光的入射面与晶体主截面重合时，o光主平面与e光主平面重合，即e光和o光两折射线都在入射面内。一般情况下，o光主平面与e光主平面并不重合，但两主平面之间的夹角很小。

对于棱镜，与折射棱垂直的平面也称为主截面。在讨论光学系统成像规律时，主平面和主点是三对基点基面之一。

**柱形波**（cylindrical wave）见波。

**驻波**（standing wave）又称立波或定波。局限于某一区域而不向外传播的波动现象。即在由确定的边界包围着的介质中形成的波。是两个振幅相同的相干波在同一直线上沿相反方向进行叠加的结果。例如沿一端固定的弦前进的波在固定端反射时就能形成驻波。设一根绳索横跨在音叉和刀口B之间，如图所示，当音叉振动时，在绳索上就激起波动，此波向右行进；当此波到达固定点B时被反射，产生向左行进的反射波。这两个波在绳索上相互叠加，就形成驻波。这时，绳索上的波从B点开始被分成

几段，每段两端的点驻定不动，称为波节，而每段中的各质点则同步地上、下振动，中间点振幅最大，称为波腹。波腹、波节的位置不随时间改变，振动能量也不随时间逐点传播，因而称为驻波。

驻波的应用很广，如管弦乐器便是利用驻波的一例。此外，它还导出一个重要概念，即频率的分立。要求两个界面之间的距离(d)是半波长的整数倍(n)，可以理解为：只有那些频率为  $n = \frac{v}{2d}$  的波长能建立驻波 (v 为波速)。这个频率分立的概念曾对量子力学的创立起了启发作用。

**转动定律 (law of rotation)** 定轴转动刚体的运动定律。定轴转动刚体绕转轴的角加速度 等于此刚体所受外力关于转轴的总力矩 M 对刚体绕转轴的转动惯量 I 之比：

$$\beta = \frac{M}{I}。$$

1—波腹；2—波节；3—音叉

在此，转轴被理解为有方向的，M 也是刚体所受各外力对轴上任一点的力矩的矢量和在此轴上的投影；面对此轴看，如果转动是逆时针方向加速的，取  $\beta > 0$ ，如转动沿顺时针方向加速，取  $\beta < 0$ 。

**转动惯量 (moment of inertia)** 亦称惯量矩。物体绕轴转动时惯性的量度。物体平动时，其动量和平动动能与物体的质量和速度有关，而物体绕轴转动时，其角动量和转动动能除了与物体的角速度和质量有关外，还与此物体的质量对转动轴的分布有关。转动惯量就是描写物体的质量对转轴分布的量。

物体对某轴转动惯量 I 的定义是

$$I = \sum_i m_i r_i^2。$$

其中  $m_i$  是物体中第 i 质点的质量， $r_i$  是该质量与轴的距离，求和遍及整个物体。如物体的质量连续分布，上面的求和式应改为积分式：

$$I = \int_V \rho r^2 dV。$$

其中  $\rho$  表示体积元 dV 处的密度，r 为该体积元与轴的距离，积分遍及整个物体。一定质量的物体对轴有不同的质量分布时，转动惯量有不同的值。例如质量相同的两圆柱体，粗而扁的圆柱体比起细而长的圆柱体来说，对圆柱轴线的转动惯量更大。机器的飞轮做得边缘厚实而中间细薄，以使其质量的大部分分布在边缘上，就是要使飞轮在一定质量下有较大的转动惯量。同一物体对不同的轴有不同的转动惯量。一个刚体绕某固定转轴以角速度  $\omega$  转动时，如刚体对此轴转动惯量为 I，则刚体对此轴的角动量  $L_z$  和刚体的转动动能 T 分别为

$$L_z = I\omega, \quad T = \frac{1}{2} I \omega^2。$$

在以一定的角速度转动时，转动惯量越大的刚体，其角动量和转动动能越大。

常把物体对某轴的转动惯量 I 写成此物体的质量 m 与一个长度量 k 的平方的乘积：

$$I = mk^2,$$

$k$  称为物体对该轴的回转半径。例如，一个均质球体对其直径的转动惯量为  $I = \frac{2}{5}mr^2$ ， $r$  为球体半径， $m$  为球的质量。相应的回转半径就是  $k = \sqrt{\frac{2}{5}}r$ 。

这意味一个质量为  $m$  的质点与轴的距离为  $k = \sqrt{\frac{2}{5}}r$  时，它对该轴的转动惯量与一个半径为  $r$ 、质量相同的均质球对其直径的转动惯量相等。

**状态参量** (state parameters) 描述热力学系统宏观物理性质(状态)的参量。

热力学系统的宏观状态既取决于组成该系统的大量微观粒子的运动状态，又取决于系统所处的外界环境。描述组成系统的微观粒子本身特征和运动状态性质的状态参量称为内参量。例如气体的压强来源于系统内部粒子热运动的状况以及粒子间的相互作用，因此压强是内参量。另一方面，系统的某些宏观状态与外界环境有关，描述这种状态的参量则称为外参量。例如作用于热力学系统上的外电场和外磁场就是外参量，被封闭在装有活塞的气缸中的气体的体积也是外参量，因为它直接取决于活塞的位置。一个状态参量，可能在某种情况下是外参量，但在另一种情况下成为内参量，这取决于人们对系统和外界环境的不同划分方式。例如，如果把活塞和气缸中气体看作为一个完整的系统，那么由活塞位置确定的气体体积就成了内参量，而作用在活塞上的压强就是外参量。

对于一个确定的热力学系统，状态参量是一组互相独立的可以用于完全确定系统宏观性质的参量，系统的其它宏观性质是这一组状态参量的函数。当一个均匀的热力学系统处于平衡态时，描述这个系统宏观性质的状态参量的数目相对于该系统处于非平衡态时状态参量的数目来说为最少。例如处于平衡态的简单气体系统，状态参量只有两个，它们可以是气体的压强和气体的体积，也可以是气体的温度和气体的体积。一旦选定二个状态参量(例如气体的压强和体积)以后，其他宏观参量(例如气体的温度)就是这些状态参量的函数，且称这种函数关系为该气体的物态方程。

对于一般的热力学系统，描述其平衡性质的状态参量可分为四类：几何参量(例如体积)；力学参量(例如压强)；化学参量(例如化学组分的摩尔数)；电磁参量(例如电场强度)。热力学系统的全部宏观性质都可以表示为这四类状态参量的函数。

**准静态过程** (quasistatic process) 热力学理论中最重要的过程。在这种过程进行之中的每一步，热力学系统都处于平衡态。

当一个热力学系统的状态随时间发生改变时，它所经历的每一个状态实际上都是非平衡态，此时一般不能用热力学状态参量来描述状态的变化。但是，当宏观变化过程进行得足够缓慢，而且过程中每一个非平衡态恢复为平衡态所需的时间(称为弛豫时间)又极其短暂，则在该过程中的每一时刻，热力学系统可近似地看作处于平衡态。在宏观过程进行得无限缓慢的极限情况下，热力学系统在过程的每一步都处于平衡态。显然这是一种理想过程，这种过程就称为准静态过程。准静态过程虽然不能完全达到，但是可以无限趋近。此外，由于只有对准静态过程，才可以用系统本身的平衡态参量进行描述，因此热力学中所讨论的过程常常首先是准静态

过程。

在外力做功引起系统状态变化的过程中，如果外力导致系统体积改变  $V$  所需的时间  $t$  远远大于该系统从非平衡态恢复到平衡态所需的弛豫时间，而且在做功过程中又不存在摩擦阻力，则该过程就可以近似地看作准静态过程。此时外界压强所作的元功可表示为  $dw = -pdV$ ，这里  $p$  就是系统处于平衡态的压强，也就是说，在无摩擦的准静态过程中，可以用系统本身的状态参量变化来表示做功的大小。类似地，在传热导致系统温度发生变化的过程中，如果改变温度  $T$  所需时间  $t$  远远大于温度恢复均匀而达到热平衡所需的弛豫时间，而且在传热过程中不存在热量损耗，则该过程也可近似看作准静态过程，且可以用系统本身状态参量——温度的变化来表示传递热量的数值。

**准确度 (accuracy)** 仪器本身的准确程度，与测量者的实验水平无关。通常用最小分度值或者最小分度值与量程值之比的百分值来描述。例如米尺的最小分度值为 1 毫米，所以米尺的准确度为 1 毫米。游标常数为 0.05 毫米的游标尺，准确度为 0.05 毫米。螺旋测微器的准确度为 0.01 毫米。物理天平的准确度分别为 0.02 克、0.05 克和 0.1 克三种。电流表、电压表的准确度常用最小分度值与量程值之比的百分值，以“级”来表示。例如直流伏特表的测量范围为 3 伏，最小分度值为 0.1 伏，则其准确度为：

$$\frac{0.1}{3} \times 100 = 3.3 ,$$

习惯上没有 3.3 级的标准，只有 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0、4.0 等几种，所以 3.3 应靠到 4.0 级准确度。级别越高，准确度越低，刻度越稀。

**自动控制技术 (automatic control technology)** 在无人直接干预的情况下，通过自动化装置对控制信号进行测量、变换、传递和计算，从而控制被控对象（如机器和生产过程），使被控对象达到预定的运动状态或所要求的控制功能的一门综合性技术。它的基本内容包括自动控制理论、自动控制工具及其应用。

自动控制理论发展初期，主要是以反馈理论为基础的自动调节原理。随着工业生产和科学技术的发展，它已发展成为一门独立的学科，即控制论。它是一门研究各种不同系统（如机器系统、生命系统、社会系统）内部的控制和通信的一般规律的科学。现代控制理论比经典理论有了很大的发展。经典控制论主要是用来解决单输入—单输出的问题，而现代控制论主要用来解决多输入—多输出的问题。

自动控制技术的工具最初是以机械、气动、液压等类型为主；50 年代后，逐步发展为电动（继电器、接触器等）和电子式技术为主，气动、液压、射流技术也有进一步发展。目前，自动控制装置一般是机电式、气动式、液压式和电子式的混合系统。主控制器一般以电子式为主，而执行机构一般以机电式、气动式和液压式为主。随着当前电子计算技术的推广应用，单片机和微机在自动控制中已得到了应用，给自动控制技术带来了新的生命力。

自动控制的应用范围非常广泛。从一般住宅屋顶上水箱水位的继电器控制，到采用大量电子、机电设备组成的自动化流水线生产过程，以及机场和铁路的管理、人造卫星发射等等，都离不开自动控制技术。特别是，近年来人们把控制论应用到各种社会系统，这就更加证实了这门学科具有

强大的威力。

**自发辐射 (spontaneous radiation)** 原子、分子或离子等微观粒子从较高的能量量子状态自发地向较低的能量量子状态的过渡，称为自发跃迁。在自发跃迁过程中微观粒子所减少的能量等于两个量子状态能量的差值。这部分能量差值如果转化为体系的热运动，并不发射光子，称为无辐射跃迁；如果以光子的形式发射出来，便称为自发辐射。

**自感系数 (coefficient of self-induction)** 简称“自感”。表示导体回路产生自感应能力的物理量。常用符号  $L$  表示。等于回路中电流的时间变化率为 1 单位时的自感电动势，即

$$L = \frac{\varepsilon}{dI/dt},$$

式中和  $dI/dt$  均以绝对值计。若回路由  $N$  匝线圈组成，则自感也等于回路的磁通链数  $N \phi_m$  与电流强度  $I$  之比，即

$$L = \frac{N\phi_m}{I},$$

式中  $\phi_m$  是电流强度为  $I$  时通过每匝回路（线圈）的磁通量。当介质的磁导率不随电流的磁场发生变化时，上述两定义式是一致的。自感系数决定于回路的形状、大小、匝数以及回路空间的介质分布。少数几种回路的自感可以计算出来，如空心长直螺线管的自感为

$$L = \mu_0 n^2 V,$$

式中  $V$  为长直螺线管的体积， $n$  是单位长度上的线圈匝数， $\mu_0$  是真空磁导率。自感的单位为亨利，符号为  $H$ 。

**自感现象 (phenomenon of self-induction)** 简称“自感”。通电回路中，因电流变化而在自身回路中引起感应电动势的现象。1832 年由美国物理学家亨利首先发现。所引起的感应电动势称自感电动势。按法拉第电磁感应定律，一回路的磁通量无论由于什么原因发生变化时，都会在该回路中引起感应电动势。当回路自身电流发生变化时，通过回路的磁通量  $\phi_m$  也要变化，这就必然引起感应电动势  $\varepsilon$ 。因此，自感是一种特殊的电磁感应现象，自感电动势可表示为

$$\varepsilon = \frac{-d\phi_m}{dt}。$$

当回路的形状、大小和所在空间的介质分布都不随时间变化时，线圈中的磁通量与电流强度  $I$  成正比： $\phi_m = LI$ ，比例系数  $L$  就是该线圈的“自感系数”。这时线圈中的感应电动势可表示为

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt},$$

式中负号则是楞次定律所要求的，它表示当回路中的电流增大时，自感电动势与电流方向相反，反抗电流的增大；反之，则与电流方向相同，反抗电流的减小。自感现象在回路电流变化时总是存在的，在电工、无线电和电子技术中有着广泛的应用。例如，日光灯的镇流器就是一个自感线圈。它在日光灯启动过程中产生自感电动势与 220 伏交流电动势同向叠加，使灯管中的气体电离而点亮灯管；以后又使自感电动势与 220 伏交流电动势反向叠加，使灯管在较低的电压下正常工作。在各种工程技术中，



自感元件常与电容器等一起组成各种振荡电路，以完成电磁波的发射、接收、滤波、放大和移相等功能。但在某些场合下，自感现象又是十分有害的。例如在供电系统中，切断强大的电流时所产生的自感电动势足以使空气电离而发生火花放电，甚至危及人身安全，引起火灾事故。为此，必须使用带有灭弧结构的特制开关。

**自聚焦 (self-focusing)** 强激光引起物质折射率发生非线性变化，从而改变激光束本身传播特性的一种非线性光学现象。当强激光通过光学媒质时，由于三次非线性电极化效应，可引起折射率产生如下变化： $n=n_0+n$ ，其中  $n_0$  是普通弱光下的折射率，则常数， $n$  为激光作用下的感应变变化量，与光强有关： $n=n_2|E|^2$  其中  $n_2$  是一个与三次非线性电极化率  $\chi^{(3)}$  有关的量： $n_2=2\chi^{(3)}/n_0$ 。激光束截面内的光强分布总是中心强而边缘弱，故当  $n_2$  为正值时，光束中心部分引起的  $n$  大于边缘部分。于是激光束通过这种媒质时等价于通过一个正透镜，会使光束发生会聚，这就称为自聚焦。若  $n$  为负值，这种媒质等价于一个负透镜，使光束发散，称为自散焦。自聚焦有很多利用价值，但是也可能导致光学元件损坏。

**自然光 (natural light)** 光波中含有所有方向的电矢量，而且平均来说它们对于光的传播方向形成轴对称分布，这种光称为自然光。光波是原子或分子内部能量状态发生改变时辐射出来的电磁波。由大量发光原子或分子组成的光源，在同一时间发出的光波各自具有不同的电矢量方向和不同的初相位。从统计角度看，它们的总和对于光的传播方向形成轴对称分布。因此，在自然光波场中的每一点，对于各个传播方向来说，同时存在各种取向的电矢量振动，它们彼此之间也没有固定的相位关联。自然光通过检偏器时，随着检偏器透光方向的转动，透射光强度保持相同，且等于入射光强度的一半。

《自然哲学的数学原理》(Philosophiae Naturalis Principia Mathematica) 本书是英国物理学家、数学家、天文学家牛顿的代表作。成书于 1686 年。原著是用拉丁文写的，后有多种文字的译本，中译本出版于 1931 年。该书的宗旨在于从各种运动现象探究自然力，再用这些力说明各种自然现象。全书是以若干的力学基本概念诸如质量、动量、惯性、力等定义开始的。紧接着阐述了著名的三大运动定律、矢量(例如力和速度)合成原理等。以下则由三编严谨的论述，展开上述的定义、定律和原理。

第一编是讨论万有引力定律和行星运动的，即在与理论天文学有关问题上应用了这些定律；以纯数学方式确定某一天体围绕另一天体旋转的轨道；求同一物体的不同部分共同施加于另一处于体外或体内的物体的引力之和的数学定理等，共 14 章，篇幅占全书的 42%，此系全书的基础。

第二编讨论了物体在有阻力的介质中的运动，包括流体静力学和动力学问题；液体内的波动过程和旋涡运动的规律；以及论述笛卡儿的以太旋涡假说与开普勒定律不相符合等，共 9 章，篇幅占全书的 30%。

第三编是万有引力理论在天体运动上的应用，包括行星围绕太阳的运动；卫星围绕行星的运动；地面上物体的降落运动和抛射运动；岁差以及潮汐现象等，共 5 章，实际上是牛顿十分壮观的宇宙体系的学说，它结束了为新宇宙观的确立而进行的斗争的一个阶段。

在《原理》中，牛顿所总结的运动方程，明确地揭示了表征外部对物

体的作用强度的力和表征物体运动状态变化的加速度之间的关系。加上由牛顿第三定律所确立的两个不同物体之间相互作用的关系，大大提高了牛顿力学的普适性，从而确立了严格的、用数值表示的机械运动的因果公式，为解决众多的力学问题提供了强大的理论工具。牛顿还从客观世界的物质统一性观念出发，在《原理》中，对前人发现的行星运动规律进行概括，发现了它们的内在联系，得出了万有引力支配着行星运行的结论，这样就可以根据万有引力定律进行运算，对太阳系内的行星、卫星及彗星的错综复杂的运动作出精确描述，有力地推动了天体力学的发展。

牛顿的这部著作，奠定了经典力学的基础，集中代表了 16 世纪下半叶至 17 世纪中叶的主要科学成就。尽管该书第 2 版增加了具有浓厚神学色彩的“总释”一节，但它运用力学规律来描述地球上的物体和天体的运动，从而把过去一向认为是截然无关的地球上的物体（属于所谓“世俗”的）运动规律和天体（属于神圣的“天堂”的）运动规律概括在一个严密的统一理论之中，这在人类认识史上是一次重大的飞跃，从科学上动摇了把“天上世界”和“地上世界”对立起来的神学宇宙观。该著作所拟定的力学世界图景和机械地解释自然现象的纲领，对 18 世纪机械唯物主义思想的形成和发展也有重大的影响。同时，该著作体现了与当时流行的形而上学思辨相对立的科学方法，主张理论概括工作应建立在对现象的考察上，通过观察和实验去发现能用数学形式概括的自然规律；强调不作假设而把有关定律作为力学理论的公理，努力去探求公理与现象之间的联系，从而有力地促进了物理学研究中公理化方法的运用，对近代自然科学和方法论的发展产生了巨大的影响。

**自旋 (spin)** 微观粒子的内禀角动量，是描述基本粒子，如电子、质子、中子等特征的一个重要的物理量。

电子具有自旋的假设最早由两位年青的荷兰物理学家乌仑贝克和古兹米特为了解释原子光谱的复杂结构于 1925 年提出。根据他们的假设，原子中的电子除了因绕核作轨道运动而具有“轨道角动量”外，还具有固有的“自旋角动量”，简称自旋。电子自旋角动量的值可表示为  $L_s = \sqrt{s(s+1)}h$ ， $s = \frac{1}{2}$ ， $h = \frac{h}{2\pi}$ ， $h$  为普朗克常数。现在已经认识到，各种基本粒子都具有特定的自旋，且“自旋量子数” $s$  只能取整数或半整数值。

例如 介子的自旋为  $s=0$ ，电子、质子、中子的自旋为  $s=\frac{1}{2}$ ，光子的自旋为  $s=1$ ，等等。自旋为正数的粒子称为“玻色子”；自旋为半整数的粒子称为“费米子”。一个粒子系统的角动量应包括两部分，即各组成粒子的轨道角动量和各组成粒子的自旋角动量。孤立系统角动量守恒是指总角动量，即轨道角动量和自旋角动量之和守恒。

在经典物理学中不存在自旋概念。自旋纯粹是一种量子效应，而且还是一种相对论性量子效应。在非相对论性量子理论中，自旋是作为一种假设而进入理论之中的。在相对论性量子理论中，可通过角动量守恒定律和运动方程，自然地导出自旋这个物理量。

在许多物理领域，如物质的磁性，原子光谱的精细结构和超精细结构，原子核结构，以及超导现象，超流现象等领域中，电子、质子和中子的自旋性质起了决定性作用。

**自由电荷 (free charge)** 在外电场作用下可以在宏观线度上自由移动的电荷。例如金属中的自由电子；酸、碱、盐等溶液以及电离气体中的正负离子（气体中的负离子通常是电子）。

在外电场作用下，自由电荷定向移动形成电流。材料中的自由电荷密度愈大，其导电性能愈好，反之，导电性能就差。

**自由落体运动 (motion of a free-falling body)** 在重力场中初速为零的下落运动。常指的是不存在空气阻力时的这种运动。地球表面附近的天空可以看作是恒定的重力场，在不计空气阻力时，自由落体运动的加速度就是重力加速度，以  $t=0$  为初时刻，自由落体运动的运动方程是  $s = y \frac{1}{2} gt^2$ ，这里位移  $s$  以向下为正。

**纵波 (longitudinal wave)** 见波。

**纵模 (longitudinal mode)** 沿谐振腔轴向的稳定光波振荡模式。简单而近似地说，纵模即频率。以气体放电管为例，通常它所发射的光波的频率宽度比较大。如果把放电管放在光学谐振腔内，经过谐振腔的选频，可使它所发射的光波的频率宽度变窄。例如氦放电管所发射的光波的中心频率为  $4.7 \times 10^{14}$  赫，频率宽度为  $\nu = 1.5 \times 10^9$  赫。如果谐振腔长度为 1 米，满足共振条件的许多光频率中相邻两个共振频率之差  $\nu' = 1.5 \times 10^8$  赫。氦放电管配置谐振腔后，发射的光波数为  $\nu / \nu'$ ，即有 10 种频率的光波。如图所示，曲线  $a$  代表放电管所发光波的频率轮廓，直线  $b$  的横坐标为中心频率，曲线  $a$  的半值宽度即放电管所发光波的频率宽度。配置谐振腔后，一定的腔长有一定的相邻共振频率之差。图曲线  $a$  下面的各条直线的间隔即为相邻共振频率之差。因此原来放电管所发光的频率范围很大，曲线  $a$  下面的各种频率的光都有。加上谐振腔后就不同，它要求相邻两光频率之差满足一定要求。例如图曲线  $a$  下面的频率中，只有各条直线代表的频率才可能。当然这些频率的光波也有自然宽度。

光学谐振腔的这种作用称为选模。腔长缩短，共振频率间隔增大，选模作用明显增加。例如上述氦放电

#### 腔中允许纵模数

管，若配置在一个 10 厘米长的谐振腔里，频率间隔为  $\nu' = 1.5 \times 10^9$  赫，就只有一个输出频率。但缩短腔长会显著降低激光功率。因此，一般用其它方法去达到选模的目的。

谐振腔内每一个允许的频率值，在腔内形成一系列驻波。每列驻波代表腔内光场沿纵轴的一种分布，习惯上称它为一个模式，或叫一个纵模。腔内如果只有一种光场分布，称单纵模，否则称多纵模。

**阻抗 (impedance)** 当电压和电流按正弦规律变化时，具有电阻、电感、电容的电路对交流电所起的阻碍和抵抗作用。它等于电路两端电压的最大值（或有效值）与输入电流的最大值（或有效值）的比值。单位为欧姆。

当最大值为  $I_m$ 、角频率为  $\omega$  的正弦交流电

$$i = I_m \sin \omega t$$

流经阻值为  $R$  的电阻时，电阻两端的电压为

$$u_R = R_i = R I_m \sin \omega t = U_{Rm} \sin \omega t$$

$$\text{或} \quad R = \frac{U_{Rm}}{I_m} = \frac{U_R}{I}$$

这里  $U_{Rm}$  为电阻两端电压的最大值； $U_R$  为电压有效值； $I$  为电流有效值。可见，在正弦交流电路中电阻两端的电压与电流的频率相同，位相亦相同。它们之间的关系可用如图 1 所示的矢量图表示。

图 1

电感线圈对交流电的阻碍和抵抗作用起源于感应电动势。当正弦交流电  $i = I_m \sin \omega t$  流经电感线圈时，线圈中将产生与电流强度成正比的磁通量  $\phi = Li$ ，比例系数即为该线圈的电感。感应电动势与磁通量的变化率  $(\frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt})$  成正比，因此

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L I_m \frac{d}{dt} (\sin \omega t) = \omega L I_m \cos \omega t$$

$$U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$\text{或} \quad \omega L \frac{U_{Lm}}{I_m} = \frac{U_L}{I}$$

这里  $U_{Lm}$  为电感两端电压的最大值， $U_L$  为电压有效值。可见，在正弦交流电路中，在电感上的电压与电流的频率相同，但位相不同，电压的位相超前电流  $90^\circ$ （或  $\frac{\pi}{2}$ ），或者说电流的位相滞后电压  $90^\circ$ （或  $\frac{\pi}{2}$ ）。它们的关系可用如图 2 所示的矢量图表示， $L$  称为电感元件的感抗，常用符号  $X_L$  表示，即

$$X_L = \omega L,$$

图 2

其值与交流电的频率  $f$  和电感值的乘积成正比，即  $X_L = 2\pi fL$ 。

在电容为  $C$  的电容器两端加正弦交变电压

$$u_C = U_{cm} \sin \omega t,$$

在电容器两极板上的电荷为  $Q = CU_C = CU_{cm} \sin \omega t$ 。电流强度就是该极板上电荷的变化率，所以通过电容元件的电流为

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \omega C U_{cm} \frac{d}{dt} (\sin \omega t) = \omega C U_{cm} \cos \omega t$$

$$= I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$\text{或} I = \omega C U.$$

其中  $U_{cm}$  为电容器两极板上电压的最大值， $U_C$  为电压有效值， $I$  为电流有效值。电容上的电流与电压频率相同，但位相不同，电流的位相超前电压  $90^\circ$ （或  $\frac{\pi}{2}$ ），或者说电压的位相滞后电流  $90^\circ$ （或  $\frac{\pi}{2}$ ），它们的关系可用如图 3 所示的矢量图表示。

$\frac{1}{\omega C}$  称为电容元件的容抗，常用符号  $X_C$  表示，

所以

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

其值与交流电的频率  $f$  和电容值  $C$  的乘积成反比。

图 3

图 4

较复杂的电路总可以看作是由许多电阻、电感和电容元件所组成。电路中的总电压、总电流以及各分电压和分电流之间的大小关系和位相关系与电路的具体结构有关。例如对于  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路（见图 4），设电流的初位相为零，有数值为  $I$ ，则电阻  $R$  上的电压初相位也是零，电压有效值为  $U_R = IR$ ；电感  $L$  上的电压初位相为  $\frac{\pi}{2}$ ，电压有效值为  $U_L = X_L I = \omega L I$ ；电容  $C$  上的电压初位相为  $-\frac{\pi}{2}$ ，电压有效值为  $U_C = X_C I = \frac{1}{\omega C} I$ 。这些关系可以通过图 5 表示出来。总电压的初位相  $\phi$  和有效值  $U$  可以通过这种矢量图算出，结果为

图 5

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left( \frac{U_L - U_C}{U_R} \right) = \text{tg}^{-1} \left( \frac{X_L - X_C}{R} \right).$$

RLC 串联电路总阻抗为

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

RLC 串联电路的总阻抗  $Z$  与电阻  $R$  和电抗  $X = X_L - X_C$  的关系可用阻抗三角形的关系表示。

**阻尼谐振动 (damping harmonic vibration)** 物体系统在阻尼作用下，因能量损失而使振幅逐渐减小的振动，又称减幅振动。以  $x=0$  表示物体的平衡位置，回复力是  $-kx$ ，阻尼力是  $-r dx/dt$ ， $r$  称为阻尼系数。在此两力作用下，物体的运动方程是

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

这里  $m$  是物体的质量。令  $k/m = \omega_0^2$ ， $r/m = 2\beta$  ( $\omega_0$  是此振动系统的固有频率， $\beta$  称为阻尼因数)，物体的运动方程又可表示为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$$

根据阻力（或阻尼因数）大小的不同，此方程有三种不同类型的解。

(1) 欠阻尼 ( $\beta < \omega_0$ )

$$x = A e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \phi),$$

式中  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ ，A 和  $\varphi$  是由运动初条件决定的常数。在欠阻尼情形中，位移随时间变化的关系如图 1 所示。欠阻尼情形中的阻尼谐振动的“振幅”不断衰减。阻尼力越大（ $\beta$  值越大），“振幅”衰减得越快。

图 1

(2) 过阻尼 ( $\beta^2 > \omega_0^2$ )

$$x = C_1 \exp[-(\beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2})t] + C_2 \exp[-(\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2})t]。$$

(3) 临界阻尼 ( $\beta^2 = \omega_0^2$ )

$$x = (C_1 + C_2 t) e^{-\beta t}，$$

过阻尼和临界阻尼情形中的运动实际上已不是往复运动。在初速为零时，这两种运动甚至来不及越过平衡位置就很快趋向于平衡位置。由图 2 看出，在这种情形中，临界阻尼运动（曲线 1）比过阻尼运动（曲线 2）更快地趋向平衡位置。所以，在有些希望避免来回振动，并希望尽快地趋向平衡位置的装置（例如电表的指针回零装置）中，采用临界阻尼情形。

图 2

**最概然分布** (most probable distribution) 参见玻耳兹曼统计。

**最概然速率** (most probable speed) 参见麦克斯韦速率分布律。

**左手定则** (left-hand rule) 确定载流直导体在均匀外磁场中受力方向的一种法则，又称“电动机定则”。

伸出左手，四指平摊，大拇指与其余四指垂直。设想让磁场线垂直地从掌心进入，并使四指沿载流导体中电流的方向，则大拇指所指方向即为该载流导体所受磁力的方向。因为载流导体所受磁力是安培力，一般情形下的受力情况应根据安培定律计算确定。

**坐标-时间图象** (coordinate-time graph) 也称位置-时间图象或位移图象。质点沿直线运动时，以时间为横轴和以位移为纵轴，描写坐标与时间关系的曲线图。若以  $s$  表示直线运动中的位移，以  $t$  表示时间，

#### 左手定则

并假定  $t=0$  时质点的位移等于零，则匀速直线运动的坐标-时间图象是通过坐标原点的一根直线，如图(a)所示。简谐振动  $s = A \sin(\omega t + \varphi)$  的坐标-时间图象是一正弦曲线，如图(b)所示。

#### 匀速直线运动的坐标—时间图象

##### 简谐振动的坐标—时间图象

在坐标—时间图象中，曲线上某一点  $(t, S)$  处的斜率表示质点在时刻  $t$  的速度。

**坐标系** (coordinate system) 在一定的参考系中为确定空间中点的位置所采用的坐标系统。按规定方法选取的一组有序实数称为该点的坐标。如果这样规定坐标的取法，使参考体上的各点有不随时间变化的坐标，

那么，给定了各点的坐标，就相当于确定了参考系本身，这时坐标系本身起到了参考系的作用。于是，物体相对于参考系的运动常常说成物体相对于这种坐标系的运动。常用的坐标系有：直角坐标系、平面极坐标系、柱面坐标系、球面坐标系、椭球坐标系、抛物坐标系等。对于空间同一点，在不同坐标系中的坐标是不同的。

**直角坐标系** 又称笛卡儿直角坐标系。以两两互相垂直且过同一点的数轴作为坐标轴的坐标系。在图 1 中，由互相垂直的数轴  $Ox$ 、 $Oy$  和  $Oz$  作为坐标轴所构成的坐标系，就是一个直角坐标系。如轴  $Ox$ 、 $Oy$  和  $Oz$  三轴之间的关系符合右手法则，称为右手直角坐标系；如它们符合左手法则，就称为左手直角坐标系。通常使用的是右手直角坐标系。空间中一点  $P$  的直角坐标  $(x, y, z)$  的规定方法是， $|x|$ 、 $|y|$  和  $|z|$  分别是  $P$  点与坐标面  $Oyz$ 、 $Ozx$  和  $Oxy$  之间的距离。若  $P$  点位置相对于坐标面  $Oyz$  在  $x$  轴正向，则坐标  $x$  规定为正数；若  $P$  点位置相对于平面  $Oyz$  在  $x$  轴负向，则  $x$  为负值。坐标  $y$  和  $z$  的正负按类似方法规定。

图 1

**极坐标系** 又称平面极坐标系。在平面上选一固定点  $O$ ， $O$  点称为极点，从  $O$  点引出走向的射线  $Ox$ ， $Ox$  称为极轴，平面上一点  $P$  的极坐标  $(r, \theta)$  的规定方法是： $r$  是  $P$  点与极点  $O$  之间的距离， $\theta$  是从  $Ox$  转到  $OP$  的角度，若这个角度是逆时针向的， $\theta$  取正值，否则  $\theta$  取负值。 $r$  和  $\theta$  分别称为  $P$  点的极径和极角（图 2）。极坐标的这种规定方法称为极坐标系。同一点  $P$  的极坐标  $(r, \theta)$  和直角坐标  $(x, y)$  之间的关系是  $x=r\cos\theta$ ， $y=r\sin\theta$ 。

图 2

**柱坐标系** 通过极坐标平面上的极点  $O$ ，加上与极坐标平面垂直的坐标轴  $Oz$  所构成的坐标系（图 3）。空间一点  $P$  的柱坐标  $(r, \theta, z)$  的规定方法是： $r$  和  $\theta$  就是  $P$  点在极坐标平面上的极坐标， $z$  的绝对值是  $P$  点与极坐标平面之间的距离，如  $P$  点在极坐标平面上方， $z$  取正值，否则  $z$  取负值。同一点  $P$  的柱坐标  $(r, \theta, z)$  与直角坐标  $(x, y, z)$  之间的关系是

$$x=r\cos\theta, y=r\sin\theta, z=z。$$

**球坐标系** 空间一点  $P$  相对于直角坐标系  $Oxyz$  的位置也可以用球坐标  $(r, \theta, \varphi)$  表示（图 4）。其中  $r$  是  $P$  与坐标原点  $O$  的距离， $\theta$  是  $Oz$  轴与  $O$ 、 $P$  连线的夹角大小， $\varphi$  是由  $Oz$  轴与  $P$  点所决定的平面（ $OPP$  平面）与坐标面  $Oxz$  所夹的角。面对  $Oz$  轴看，若从  $Oxz$  平面逆时针向转过  $\varphi$  角与  $OPP$  面重合，则角  $\varphi$  取正值；否则角  $\varphi$  取负值。在球坐标系中， $O$  点称为极点， $r$  称为极径， $\theta$  称为余纬度角， $\varphi$  称为方位角或经度角。同一点的球坐标与直角坐标之间的关系是

$$x=r\sin\theta\cos\varphi, y=r\sin\theta\sin\varphi, z=r\cos\theta。$$

图 4

**作图法** (graphical method) 是数据处理的几何法，也是各变量在实验范围内关系的形象表示法。由曲线的特点和变化规律可建立准确的物理概念和推导出物理规律。

为了准确地揭示出变量间的关系，画出准确的实验曲线，应按如下作图要求完成曲线的绘制工作。

(1) 选用毫米方格纸，或者根据图示变量间的关系，选用对数-线性坐标纸、双对数坐标纸或极坐标纸等，作为绘制曲线的坐标纸。

(2) 坐标轴的分度值要取得恰当，原则上做到坐标分度和测量分度完全相同。

(3) 图上应注明坐标轴的名称、单位及整数值的标度。通常选择测量精确度较高的变量为自变量，即取  $x$  轴，较低的为因变量，取  $y$  轴。

(4) 图上的实验数据点可用“+ ·...”等符号表示，符号中的交叉点，代表测量数据点的位置。数据点外面的框框或线条最好与该点的误差大小取得一致，以示数据不确定度的大小。

(5) 根据测量点的分布，用直尺和曲线板描绘出平滑的实验曲线。连成的实验曲线不要求通过所有的测量点，但应通过它们的误差区。没有通过的测量点应均匀地分布在曲线的两旁。如果有可能，根据测量点的误差分布，画出一条宽度合适变化的粗细带子，更能反映出测量点间的关系。

(6) 若曲线是一条直线，可用直尺绘出来，并指明直线的斜率值和截距值，最后写出直线的方程：

$$y=a+bx$$

在求斜率时，寻找的两点  $P_1(x_1, y_1)$  和  $P_2(x_2, y_2)$  应尽量分离得远些，并在实验测量点决定的直线上。同时要注意  $a$  和  $b$  的有效数字位数，不能随意增减。

因此，作图的过程是数据处理的一个重要部分，对实验点的观察、连接、计算使实验者有可能将实验事实上升到理论上的分析和研究，最后得到物理规律。如果实验曲线不是直线，可以寻找与曲线相像的函数式，进行拟合，从而确定函数式中的某些常数。这在一般物理实验书的曲线拟章节里都可找到详细的操作方法和步骤。如果曲线找不到合适的函数式，可以采用多项式拟合法。在物理中许多概念和规律都用多项式表示，并根据需要选择多项式的幂。例如根据落体实验，测到落体不同时刻的位置值，作出了如下所示的曲线。从曲线可知，当  $t=0$  时，即初时刻时，物体处在  $x_0$  位置，则曲线可用

$$x=x_0+At+Bt^2$$

描述。为了验证上述数学公式是否准确，可进行如下变换，变换的目的是变换后的表示式或者是常数，或者是直线方程，因为常数和直线都有检验的方法和准则。如果能变换成直线方程，但检验出来不是一条直线，显然变换前的公式是错误的，反之是准确的。对于落体多项式的变换，采取如下方法，即取

$$\frac{x-x_0}{t}=A+Bt$$

的形式，并令  $y=\frac{x-x_0}{t}$ ， $x=t$ ，因此  $y=A+Bx$ 。如果纵坐标取  $y$  变量，横坐标取  $x$  变量，应该是一条截距为  $A$ 、斜率为  $B$  的直线。如果在  $x-t$  坐标里，得不到直线，说明  $x=x_0+At+Bt^2$  是不准确的，可能是  $x=x_0+At+Bt^2+Ct^3\dots$ ，反之，不仅原式准确，同时可求出  $A$  和  $B$  值，那么落



体的运动规律就可找到了。经过实际数据的运算和作图，最后确实证实了原落体运动规律是准确的。

作图法在物理研究中具有十分重要的意义。作好曲线图，分析研究曲线图，并由此得到数学表示式，将为物理理论的研究提供重要的实验依据。

作用和反作用定律 (action and reaction law of force) 参见牛顿运动定律。

IBM 个人计算机 (IBM personal computer) 是当今微型计算机最主要的产品之一。IBMPC、PC/XT 均以 Intel-8088 作为 CPU，可寻址 1MB 的存储空间。8088 具有与 16 位微处理器 Intel-8086 相同的指令系统，其内部结构与 8086 也基本相同，区别仅在于外部数据总线为 8 位，因此更便于事务处理。IBMPC、PC/XT 不仅配置先进，而且软件丰富，除操作系统外，还有各种高级语言及应用软件，并有很多厂家不断为其推出新的应用软件。因此 IBM PC、PC/XT 有着广泛的应用领域，在科学计算、商业金融、企业管理、文化教育、娱乐、实验室、工业控制等各个方面都发挥着巨大的作用。

IBM 公司推出的 IBM PC/AT 以 Intel-80286 为 CPU。80286 具有 16MB 物理空间的寻址能力，可寻址 1KMB 的虚拟存储空间 (具有虚拟存储器管理和存储器保护功能)，具有比 8086 功能更强的指令系统和更高的运算速度。目前，以 32 位微处理器 Intel-80386 为 CPU 的微型计算机已为许多用户所使用，它不但能与小型机相媲美，而且在性能价格比、体积小、重量轻及所需维护程度等方面都具有明显的优势。现在更高性能的微处理器 Intel-80486 为 CPU 的最新微机也已经大批量生产，进入实用阶段，它标志着微型计算机发展到一个新水平。

IBM PC/AT 个人计算机基本的硬件配置有系统主机板、电源、键盘、显示器和含有一个软盘驱动器的主机，另外，按用户应用的需要还可选用许多扩充部件和外部设备。现在简要介绍主要部件的功能：系统主机板。在 PC-DOS 操作系统控制下，80286 能直接访问 640KB (RAM) 的系统主存 (寻址范围为 1MB)，可以将内存再扩充作为 RAM 磁盘用。在 64KB 的 ROM (只读存储器) 含有系统 BIOS、驻留解释 BASIC。需要时，ROM 区也可扩充到 128KB。主机板上有 16 级中断控制，7 个 DMA 通道，8 个可编程定时/计数器。实时时钟可为系统提供真实的日期和时间数据，记录系统的配置数据。在主机板上还可插入数学协处理器 80287，以组成 80 位数值数据处理，提高运算能力。还有喇叭、键盘接口及显示器类型的选择开关。2 个 PC 兼容扩展总线槽口，6 个 AT 扩展总线槽口。外部存储器。支持高密度软磁盘，格式化后的容量为 1.2MB，也可格式化 360KB 的软盘。高密度软磁盘驱动器可读标准 360KB 软磁盘，但写入后不能在普通 360KB 软磁盘驱动器再读出。适配器可接两个 1.2KB 或 360KB 的软盘驱动器，也可接入  $3\frac{1}{2}$  吋软盘驱动器。支持大于 20MB 的硬磁盘驱动器，具有高速的 PIO 数据传输。适配器可接 2 台容量大至 80MB 的硬磁盘驱动器。支持数据流磁带机，容量可从 27MB 至 60MB。外部设备。可配接 C、G、A (字符/彩色图形适配器)、MDA (单色图形/打印机接口适配器)、E、G、A (加强型彩色图形适配器)，以及 640×400、640×480 (PGA)、1024×1024 等高精度多色彩的图形适配器和图形显示器。串/并行适配器可与外部的并行打印机、绘

图仪、数字化仪、终端机连接以及作一般通讯。

IBM PC/AT 机首次通电开始使用，必须运行一次开工例行程序。开工例行程序的软件在系统高级诊断软磁盘中，它能设置真正的日期和时间，并定义系统硬件的配置情况，如系统中安装了几个软盘驱动器，容量为多少，几个硬盘驱动器，容量又为多少，是什么类型，系统的存储器容量多大，显示方式以及协处理器是否安装等。这些信息都将存放在 CMOS RAM 中，下次开机时，系统将访问这些信息，并在显示屏上全部显示出来。

IBMPC/AT 是一种引人注目的机器，它取得成功的一个重要原因是采用了像 XENIX 这样强有力的多用户多任务操作系统。另一方面，保留了 IBMPC、PC/XT 的特点，大部份软件和硬件适配器都可以不加修改或稍加修改就投入使用，这就为用户升级提供了方便。

IEEE-488 标准总线接口 (normal bus interface of IEEE-488) 美国电气与电子工程师协会于 1974 年通过的一种连接多个设备 (如计算机、电压表、电源、频率发生器等) 总线的标准接口。连接到总线的设备，可完成一种或多种功能：控制其它设备的控制器；从控制器获得信息的受话器；将信息送至控制设备的送话器。它不仅可用作测量系统的接口还可用作计算机及其外围设备的接口，特别是微型计算机及其外围设备的接口。

现在大部分生产仪器和外部设备的工厂都已配上了 IEEE-488 接口，据统计，目前世界上已有几千种仪器有这种接口，国内仪器大部分还没有。在微型机中一般作为系统配置的选件，将 IEEE-488 总作成接口卡的形式以供用户选用。因此配有接口卡的机器可通过电缆，将具有这种接口的仪器和设备用 IEEE-488 总线连接起来。

IEEE-488 数据传送时序 (transmission time schedule of data in IEEE-488) 假定计算机是控制器，讲者是智能仪表，听者是智能仪表和计算机，数据传送时序 (如图所示) 如下：讲者智能仪表等待计算机置 NRFD 为高电平，即表示计算机准备接收数据，讲者将数据送到数据总线上。在智能仪表将它的 8 位数据放到总线上稳定以后，智能仪表将 DAV 线从高电平跳到低电平，表示数据可使用。计算机感知 DAV 正在降低，假设已作好接收数据的准备，用降低 NRFD 线电平来回答。计算机将数据贮存到内部寄存器后，将 NDAC 线由低电平变为高电平。智能仪表感知 NDAC 线电平已经拉高，就将 DAV 信号线拉

高以示计算机总线上的数据不再可用。计算机检出 DAV 的变化之后，降低 NDAC 为低电平，告诉数据正在离开数据总线。计算机将 NRFD 再拉高电平，表示准备下一个数据。

#### IEEE-488 数据传送时序

IEEE-488 总线各信号线的功能 (functions of each signal line in IEEE-488 bus) IEEE-488 总线由 16 条信号线和 7 条地线及一条机壳接地线组成，总共 24 条。16 条信号线中，8 条为数据总线，3 条用于数据字节传送的控制总线 (握手线)，5 条管理线。

有关功能如下：

$DIO_1 \sim DIO_8$ ：数据总线，为双向，用于传送数据、地址、设备命令及状态信息。接脚序号为 1~4 和 13~16。

DAV：“讲者”控制的数据有效信号线，当讲者使这个信号变低时，表示它发到数据总线上的数据有效，总线上的所有听者可以读取。接脚序号为 6。

NRFD：“听者”控制的未准备好接收数据的信号线，当它为低时，表示至少有一个设备没有准备好接收数据，当准备好接收一个字节的数时，该线便被浮空成高电平。接脚序号为 7。NDAC：“听者”控制的未接收完数据的信号线，当所有听者收到数据总线上的信息后，便使此信号变高，当至少有一个设备未接收完数据时，该信号为低。因此可看出，数据传输速率取决于最慢的听设备。该信号接脚序号为 8。

DAV、NDAC 和 NRFD：三条信号线又称为联络信号线，或称为握手信号线。

ATN：由控制者驱动的关注信号线，用此信号对数据总线上的 8 位信息进行解释，引起讲者和听者的注意，当 ATN 信号为高电平时，表示数据总线将传送数据信息，此时讲者和听者才能使用数据总线来发送和接收数据，当该信号为低时，即逻辑“1”，表示数据总线上的信息是接口信息（接口地址或命令），此时，只有控制者可以发送信息，听者、讲者只能接收控制者发来的信息。信号接脚为 11。

E0I：结束或识别线，此线与 ATN 信号线一起用于指示数据传送的结束，或者用来识别一个具体的设备，当数据传送结束的最后一个字节使 E0I 为逻辑“1”，而且 ATN 为逻辑“0”时，表示数据传送结束。当使用 E0I 线识别时，首先 ATN 线必须为逻辑“1”，表示数据总传送的是地址，即对讲者和听者的命令分配，E0I 也为逻辑“1”时，表示传来的是识别信号，并与数据线将给出的事先设置的字节进行比较，可以知道是哪个设备请求服务，而不需要串行查询。该接脚序号为 5。

IFC：接口清除线，由控制者建立此线状态以控制总线上的各设备。当 IFC 为低电平时，整个总线停止操作，即所有讲者停止发送，所有听者不再被访问。该信号接脚序号为 9。

SRQ：这是将通过总线连接的各设备的服务请求线用“或”逻辑连接后形成的一条服务请求线，当它为低电平时，表示有设备请求服务。该信号接脚序号为 10。

REN：远程启动线，当为低时，系统中所有设备处于远控状态，即设备受远地程控数据的控制，本地控制开关和按键均不起作用；若为高，则远程控制不起作用。该信号接脚序号为 17。

PGND：机壳接地线，接脚序号 12。

GND：7 条信号接地线，接脚序号为 18~24。

IEEE-488 总线系统如下图所示。

UNIX 系统（UNIX operational system）包括三部分：核心部分为 UNIX 操作系统；最外层是应用软件和其他系统软件；中间是 shell 命令解释程序，是用户与系统核心部分的唯一接口。

UNIX 系统功能简单实用，使用方便，结构灵活。它采用了一系列先进技术和措施，解决了一系列软件工程问题。主要特点是：具有分级结构的可装卸文件卷文件系统。整个文件系统形成从目录表开始的树形分级结构。文件目录表和外设作为文件统一处理。文件无记录、无类型概念，所有文件均作为无格式的字符流序列。给用户提供了一个简单划一的接

口。按照用户的要求，系统可动态地产生和消灭子进程，用以执行用户的命令，系统提供用户进程之间简单的通讯功能。系统提供功能完备而使用灵活的命令程序设计语言，即 shell 语言，它又是该语言解释程序的简称。它是 UNIX 操作系统和用户间的接口。shell 作为操作系统的命令语言，使用户可以利用终端或从命令文件调用操作系统所提供的功能。UNIX 提供十几种程序设计语言和其它大量的子系统，如 C、FORTRAN77、BASIC、PASCAL、汇编程序、正文编辑程序、连接装配程序、符号查错程序、照相排字程序和公式排版程序等。UNIX 系统的内核及大部分软件都是用 C 语言编写的。C 语言虽不太高级，但使用方便，程序紧凑，效率高，大大方便了 UNIX 系统的阅读、修改并提供了高度的可移植性。

UNIX 系统运行以来由于它的各种特点，应用越来越广泛，现已移植到许多大、中、小、微型机上，成为国际上公认的相当成功的操作系统。

**3K 微波辐射背景 (3K microwave radiation background)** 根据标准热宇宙模型，来自宇宙早期温度非常高的辐射（以光子形式）今天仍应该在各处存在。残留的辐射是各向同性的，与其频谱相对应的温度已降低到只高出绝对温度几度。这个理论预言是由著名的科学家乔治·伽莫夫和他的学生拉尔夫·阿尔弗在 1948 年提出的。但是，直到 1965 年，这个预言才被两位美国微波天线工程师的发现所证实。为此，这两位工程师，彭齐斯和威尔逊在 1978 年获得了诺贝尔物理学奖。

在 1964 年之前，伽莫夫等的预言并不为人们注意，因为他们根本没有想到，宇宙的背景辐射是可以测量的。1964 年春，彭齐斯和威尔逊正在为贝尔电话实验室从事改进卫星通讯的研究工作。他们利用架设在新泽西州一座小山上的天线，测量来自高银纬度（即银河系盘面以外区域）的射电波强度。按照当时的技术，这种测量是相当艰难的，因为来自银河系或者其他区域的射电波强度极其微弱，常常被天线结构本身和放大器电路中因电子随机运动所产生的热噪声以及由于通过地球大气层所引起的噪声所掩盖。为此他们作了种种努力，采用低温设备，改进天线结构，剔除了本机噪声，同时，为了消除大气层噪声影响，他们设计了一个方案，即选择在银河系的噪声可小到忽略不计的射电波段（波长为 7.35 厘米），利用它先测出大气层的噪声值，然后再在其后的测量所得数据的处理中将它去除。显然，来自大气层的噪声与天线所指向的大气层厚度有关，即天线指向顶空时较小，而指向地平线时较大。可以预料，在扣除这种带有明显方向性的来自大气层的噪声之后，天线中就收不到这个波长段的射电讯号了。但出乎意料之外，在这波长上，他们收到了相当明显的与方向无关的噪声，由于这波长属于微波波段，故称之为“微波噪声”（或“微波辐射”）。更有意义的是进一步的观察发现，这种微波噪声既不随昼夜变化，又不随季节变化，非常稳定，以致他们无论怎样改进测试装置和天线结构，都不能去除这种令人“头痛”的“额外噪声”。

这个无时不在的“额外噪声”究竟来自何方呢？不久人们就揭示了它的奥秘。由于我们地球所处的太阳系并不在银河系中心，而银河系也不是完全对称的球形结构，因此可断言，这个不随方向和时间而变化的“额外噪声”不是来自任何局部区域，而是来自广袤的宇宙太空。

根据普朗克黑体辐射公式，频率为  $\nu$  的辐射能量密度  $\rho_\nu$  与辐射频率（或波长  $\lambda = c/\nu$ ）、辐射温度  $T$  有如下关系：

$$\nu d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)} d\nu。$$

若将一定频率的辐射强度换算成相应的能量密度  $\nu$ ，然后利用上式，可算出相应的辐射温度  $T$ ，该温度被射电工程师们称之为“天线温度”，以此来表示天线所接收到的噪声强度。彭齐斯和威尔逊所接受到“额外噪声”的辐射温度为 3.5K，由于它比绝对零度大不了多少，因此，这两位工程师还在犹豫，究竟是否要发表他们的结果，他们根本没有意识到这竟是 30 多年来宇宙学中最惊人的发现！

差不多在同时，理论物理学家也在研究宇宙中的辐射问题，一位普林斯顿大学的年轻学者皮伯斯指出：宇宙的早期充满了辐射，在现今的宇宙太空中应当存在由这种强度极大的辐射所演化而来的“活化石”——辐射噪声。根据他的估算，该辐射温度应在 10K 或 10K 以上。当皮伯斯知道了彭齐斯和威尔逊的观测后，又重新进行了计算，结果发现这种剩余的宇宙辐射温度应在 3K 左右。在相互联系之后，彭齐斯、威尔逊和皮伯斯决定各自在同一期《天体物理》杂志上发表他们的文章。彭齐斯、威尔逊在仅一页的文章前，用了一个非常谨慎的标题《4080 兆赫上额外天线温度的测量》（4080 兆赫对应 0.0735m 波长），并在附言上指出，在本期同时发表的皮伯斯等人的文章是对这额外噪声温度的一个可能解释。暗示了这个额外的噪声温度就是宇宙的 3K 微波辐射背景。由于彭齐斯、威尔逊仅在 7.35 厘米这一波段上测量了宇宙的辐射背景强度，所以需要进一步澄清的是，在其他波长上宇宙的辐射背景的能量密度是否也是温度为 3K 的普朗克黑体辐射分布。通过大量的实验，人们测量了波长从 7.35 厘米到 0.33 厘米宇宙背景辐射电磁波的强度，所得出的结果均表明该辐射是在 2.7K ~ 3K 温度的普朗克分布。然而由普朗克黑体辐射公式可知，对于一定温度的辐射能量密度  $\nu$  随频率  $\nu$  的变化有一个极大值。在温度为 3K 时， $\nu$  的极值所对应的波长应在 0.1 厘米附近。从上述大量实验所测量的波长来看，测量的范围绝大多数是在这一极值的一侧，如果要完全证实宇宙辐射背景确实是满足温度为 3K 的普朗克分布的话，就必须对另一侧波长段进行测量。但困难的是当波长小于 0.3 厘米时，辐射波就难以透过大气层。1974 年人们通过间接方法对波长为 0.132 厘米的辐射进行了测量，结果表明其对应的温度也在 3K 左右。不久前，美国又利用航天飞机测定了小于 0.1 厘米波段的宇宙辐射背景的温度，其结果也是肯定的。现在我们可以认定，宇宙中确实存在着辐射背景。

根据已测定的现今宇宙中的辐射温度，代入到普朗克黑体辐射公式，并对频率  $\nu$  从零到无穷大积分，就可得出宇宙中单位体积内包含各种频率的光子辐射的能量  $u$ ；另外再由爱因斯坦光量子理论，频率为  $\nu$  的光子的能量为  $E_\nu = h\nu$ ，而单位体积内频率为  $\nu$  的辐射能量密度已由普朗克分布的公式给出。因此宇宙中单位体积内，频率为  $\nu$  的光子数应是  $n_\nu = \nu / E_\nu$ 。如果再将此式对频率  $\nu$  从零到无穷大积分，就不难得出温度为  $T$  时宇宙中单位体积内的光子数为  $N = 2.028T^3 \times 10^7$  个光子/ $m^3$ ，将现今宇宙辐射温度  $T=3K$  代入，便可推算出现今宇宙光子数密度是  $N_\gamma \sim 5.5 \times 10^8$  个光子/ $m^3$ 。而现今宇宙中单位体积内的核子数，可从宇宙物质发出的光谱等分析方法

得出，其值  $N_n \sim 3 \times 10^{-1}$  个核子/ $m^3$ 。于是有

$$\frac{N_\gamma}{N_n} \sim 10^9$$

即现今宇宙中存在的光子数是核子数的十亿倍，这是宇宙学中最重要数据之一。由热宇宙标准模型可知，从光子退耦时起，宇宙中光子数与核子数的比值就不再改变了，所以，上述的比值一直追溯到光子退耦时仍然是正确的。

另一方面，按照热宇宙模型理论，随着宇宙的不断膨胀，宇宙的温度也在下降。当宇宙的温度下降到使每个光子的平均能量低于原子的结合能时，此时的光子已不再能电离原子了，光子也就成了自由光子，它与宇宙物质退耦了。若将原子的结合能除以玻尔兹曼常数  $k$ ，则可算出宇宙中光子的退耦温度为  $10^3K$ 。当宇宙温度降至  $10qK$  时，正是宇宙的演化从辐射为主时期转变为物质为主时期，此时宇宙中单位体积内的辐射能  $u$  应等于物质能。辐射能  $u$  与温度  $T$  的四次方 ( $T^4$ ) 成正比；物质能可近似地认为是宇宙中单位体积内的核子数  $N_n$  乘上核子的静能  $m_n c^2$  (忽略其它轻粒子的静能)，根据上述关系就可求出此时的温度，其结果竟仍是  $10^3K$ ！与大爆炸学说，即标准热宇宙模型绘出的结果惊人地一致。

以上这些结果公布后，犹如给沉寂了多年的大爆炸理论注射了一针兴奋剂，并使人们开始对这 20 多年前提出的，多少显得有些不可思议的大爆炸学说在认识上产生了一次飞跃。

根据最新测定结果，宇宙背景辐射温度是  $2.7K$ 。

