

编写说明

《中学教学全书》是一部大型的供中学教师教学参考用的工具书。其中《物理卷》的编写宗旨，是为中学物理教师服务，也就是为第一线工作的物理教师在备课时提供参考资料。对教学经验丰富的教师来说，一般无需查阅参考资料，但由于受到记忆上的限制，有时还得查一查，比较一下，使自己在教学时表达得更清晰、简洁。对缺乏教学经验、上岗不久的教师来说，就迫切需要有一本教学工具书，以使备课更收实效。

本书由物理学史，概念、定律、定理，教学方法，实验四部分组成，每部分按力学、热学、电磁学、光学、原子物理学排列，采用条目形式编写，便于读者查阅。

参加本书编写的有（按四部分、各分支学科排列）：应兴国、陆瑞征；钱振华、许兆新、陆全康、王森、钟亭芳、沈蒹；袁哲诚、陈延沛；冯容士。

参加本书审稿的有（按姓氏笔画为序）：张立、张瑞琨、张馥宝、贾起民、徐文柳、徐志超。

我们在编写过程中，得到不少专家、同行的关心和支持，并提出了不少建议，在此表示深切的谢意。由于时间仓促，水平有限，书中不妥之处，望专家、教师提出批评、指正。

编者

1996年3月

序言

国家教育委员会副主任 柳 斌

在过去的十年中，上海教育出版社陆续出版的各科教师手册曾在教育界，尤其普教界产生了较大影响。作为那一时期中小学教师学历补偿的参考读物，作为知识复苏阶段中小学教学的备课工具，那套手册曾立下了汗马功劳。然而，毕竟时光已流过十载，站在新世纪的大门口，耳畔是改革的猎猎旗声，这匹跋涉了十个春秋的汗马有点力不从心了，它需要梳理、调整、充实，才能肩负起造就一代高素质跨世纪人才的重任。基于这一历史的使命感，又是这些或多年从事师范教育，或在普教第一线积累了丰富经验，或长期置身于教材研究和编写工作中的同志们，再一次聚集起来，开始了对整套手册（中学九个分册，小学六个分册）的全面修订和编写。

要在较高的立点，对原有手册的知识内容作科学的梳理，这是修订的共识之一。

较高的立点无疑在各学科的前沿。了解、介绍、掌握学科最新发展动态，并藉此来审视以往手册中确定的知识重点、某些定论、甚或一个条目的表述方式，缺憾便一览无遗。以物理学科为例，当激光在世界前沿科学技术发展中越来越显示出支柱作用的时候，倘若我们对它仍只作一般的介绍就十分欠缺了。因此，修订既要消除缺憾，剔去陈旧，还必须为科学的不断发展留有余地。尽管在初等或中等教育的教学中不一定会涉及多么高深的理论，但唯有当教师对本学科的精神与发展了然于胸时，才能在学生的心中萌出哥德巴赫猜想。

对原有手册的知识结构作合理的调整时，要加强教学与社会联系的成分，这是修订的共识之二。

当前基础教育正从应试模式转到提高国民素质的轨道上来，把课本知识与社会实际联系起来，以加强学生的社会责任感和培养他们的动手能力，改变读死书的状态已成当务之急。调整原有手册中的知识结构正是以此为精神，并在量上体现出来，如化学学科增加了“化学与社会”、“化学与环境”等章节，语文学科则在写作部分增加了关于心理学、社会心态、社会与人等问题的论述，对艺术作品的分析也更注重社会氛围与人物的关系。事实上，这一调整与目前多套教材都强调素质教育，强调扩大知识面，强调调动非智力因素等是很合拍的。

留出一定的篇幅为教学法部分充实新的内容，肯定和介绍学科教学的新手段，这是修订的共识之三。

在国门大开的今天，各方面与国际接轨已势在必行，新的教学实验用具不断出现，电脑正在普及，科学的命题法和教学评估正使各级教学进入更好的循环，新的教学大纲又为第二课堂的开展保证了时间，有利于学生个性发展的兴趣活动又激发了学生第一课堂的学习积极性……我们有那么多的灵魂工程师在忙碌着、研究着、设计着，在手册修订之际，对这些先进的教学手段作一个总结、归纳，形成大家可仿可效的全新概念的学科教学法不是一件很有意义也很实在的事吗？

修订、编写工作历时三年，各个分卷即将陆续问世，大家曾想为它取个响亮的名字，转而又想，既然教育工作者被喻为布满枝头的绿叶，为着花的开放、果的成熟而甘于平凡，那么，就还是让它以最朴素的面貌静静地去到教师们的书案上吧。

编写说明

《中学教学全书》是一部大型的供中学教师教学参考用的工具书。其中《物理卷》的编写宗旨，是为中学物理教师服务，也就是为第一线工作的物理教师在备课时提供参考资料。对教学经验丰富的教师来说，一般无需查阅参考资料，但

由于受到记忆上的限制，有时还得查一查，比较一下，使自己在教学时表达得更清晰、简洁。对缺乏教学经验、上岗不久的教师来说，就迫切需要有一本教学工具书，以使备课更收实效。

本书由物理学史，概念、定律、定理，教学方法，实验四部分组成，每部分按力学、热学、电磁学、光学、原子物理学排列，采用条目形式编写，便于读者查阅。

参加本书编写的有（按四部分、各分支学科排列）：应兴国、陆瑞征；钱振华、许兆新、陆全康、王森、钟亭芳、沈旒；袁哲诚、陈延沛；冯容士。

参加本书审稿的有（按姓氏笔画为序）：张立、张瑞琨、张馥宝、贾起民、徐文柳、徐志超。

我们在编写过程中，得到不少专家、同行的关心和支持，并提出了不少建议，在此表示深切的谢意。由于时间仓促，水平有限，书中不妥之处，望专家、教师提出批评、指正。

编者

1996年3月

中学教学全书

物理卷

张瑞琨 主编

上海教育出版社出版发行

（上海永福路123号）

（邮政编码：200031）

各地新华书店经销 上海中华印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 23.75 插页 4

字数 601,000 1996年12月第1版

1996年12月第2次印刷 印数 8201—13220本

ISBN 7-5320-4855-1/G·4825

定价：（软精）28.00元

王冠之谜

相传亥尼洛国王做了一顶金王冠，他怀疑工匠用银子偷换了一部分金子，国王要阿基米德（Archimedes，前 287—前 212）鉴定它是不是纯金制的，且不能损坏王冠。阿基米德捧着这顶王冠整天苦苦思索。有一天，阿基米德去浴室洗澡。他跨入浴桶，随着身子浸入浴桶，一部分水就从桶边溢出。阿基米德看到这个现象，头脑中像闪过一道闪电，“我找到了！”他忘记了自己裸露着身子，从浴桶中一跃而出奔向街头，狂呼“攸勒加，攸勒加！”（找到了）在这一欢呼声中诞生了流体静力学。



阿基米德

阿基米德拿一块金块和一块重量相等的银块，分别放入一个盛满水的容器中，发现银块排出的水多得多。

于是阿基米德拿了与王冠重量相等的金块，放入盛满水的容器里，测出排出的水；再把王冠放入盛满水的容器里，看看排出的水是否一样，问题就解决了。根据各种历史记载，我们不能肯定工匠是不是老实，但阿基米德却从这个实验得出了著名的浮力定律。

首先，阿基米德在这个实验中提出了物质比重的概念，指出重量相等的金块、银块，排开水的体积是不同的。阿基米德还在《论浮体》一书中，通过严密的逻辑方法，证明了他的浮力定律。他的基本公设是：“液体按其本性，在其粒子均匀和连续分布的情况下，受挤压作用较小的粒子将被受挤压作用较大的粒子挤出去；这个液体中的个别粒子将受到它上面的粒子的垂直压力。”他从这个公设出发证明了：静止液体的表面是球形的，这个球心与地心相合；与液体有相同比重的物体将完全浸入液体中，但又不会深深地沉下去；比重比水小的物体将浮出水面，物体浸入水中的部分不足的重量将由露出部分的重量加以补偿，从而使浮体建立平衡。这样，与浸入水中部分的同体积水的重量才等于整个物体的重量。于是，阿基米德以下述两个推论的形式确立了自己的浮力定律：

“推论VI，比重比液体轻的物体浸入液体中时，将受到一个向上的力，这个力等于与该物体同体积的液体的重量超过该物体本身重量的部分；

推论VII，比重比液体重的物体浸入液体中时，将越来越下沉，直达到底部，它在液体中失去的重量，等于它同体积的液体的重量。”

总之，浸入液体中的物体所失去的重量，就等于它排开的液体的重量。这就是著名的阿基米德定律。

亚里士多德的错误理论流传 2000 年

古希腊哲学家亚里士多德（Aristotle，前 384—前 322）第一个对古代科学的进展作了总结，第一个试图建立力学普遍定律。

亚里士多德不仅把机械运动看作是运动，还把静止物体性质的变化，物体尺寸的增加等等也看作是运动。他认为一切机械运动应分成两大类：天体的运动和一般的地面物体的运动。他认为第一类运动是沿圆形轨道的匀速运动，这些运动没有开始，也没有终结，是永恒的。造成这些运动的原因是某个起始的动力、某种精神力量（上帝）。因此，亚里士多德认为，天体的运动是完善的，天空中的一切现象都是完美无缺的：运动是圆周运动，天体的形状是严格的球形，它们的表面是光滑的等等。而在地面上则相反，一切现象都是不完善的，物体的运动也是不完善的，它总是有自己的开始和终了。

除此之外，亚里士多德还认为，除了下落运动以外，重物的运动总是“被迫的”，“一切运动的物体必定受某物驱动”。下落物体的运动是自然运动，运动的原因在于重物本身。亚里士多德假设，一切“被迫”运动，包括匀速直线运动，都是在力的作用下发生的。他还认为，此时力并不正比于加速度（像牛顿所确定的那样），而是正比于速度。这些就是亚里士多德力学的基本原理。

亚里士多德的力学的基本原理，在科学上是错误的。席卷西欧的文艺复兴运动，推翻了统治近 2000 年的以亚里士多德为代表的古希腊力学学说。伽利略关于自由落体、摆和碰撞等一系列杰出的实验研究，为牛顿的动力学理论的诞生打下了坚实的基础，由此，物理学向前迈出了一大步。

天文学革命

自古以来，人们从日出日落、星移斗转等天象，自然地认为地球是宇宙的中心，日月星辰都围绕着地球运转。古希腊学者亚里士多德等人最先提出了“宇宙以地球为中心”的观点，到公元 140 年左右，亚历山大城的天文学家托勒密（Ptolemy，约 90—168）在他的巨著《天文学大成》中，提出了较完整的宇宙以地球为中心的学说（即后人所称的“地心说”）。这一学说的要点是：①地球位于宇宙的中心，且静止不动。月球、水星、金星、太阳、火星、木星、土星等由近及远依次围绕着地球运转。②每个行星都在一个小圆轨道“本轮”上匀速转动，同时又在一大圆轨道“均轮”上绕地球匀速转动。用本轮、均轮这两种圆周运动和其他一些规定，就可以解释当时所观测到的行星的视运动现象。

到中世纪，托勒密的地心说被欧洲教会利用来作为上帝创造世界的理论支柱，由此取得了学术界的统治地位。在教会的严密统治下，人们在 1000 多年中未能挣脱“地心体系”的桎梏，直到波兰天文学家哥白尼（N. Copernicus，1473—1543）对此提出挑战。

1473 年哥白尼出生于波兰东部的托伦城，就学于克拉科夫大学，后来又 to 意大利求学。1513 年回到了自己的祖国，在波罗的海沿岸的弗隆浦尔克度过了大半生。



哥白尼

哥白尼在意大利求学时，就已怀疑托勒密的世界体系的正确性，且疑虑越来越大。

大约在 1515 年他写了一篇论文，表示反对托勒密的学说，并探讨了世界的日心体系。但是这篇论文没有发表。哥白尼在生命快要终结之时，积 40 年研究成果，写就了《天体运行论》一书。这书在他去世那年，即 1543 年正式出版。

该书中，哥白尼系统地提出了“日心说”。

他认为地球不是宇宙的中心，而是一颗普通的行星，太阳才是宇宙的中心。除此以外，哥白尼学说的主要内容有：①水星、金星、火星、木星、土星这 5 颗行星与地球一样，都在圆形轨道上匀速绕太阳公转；行星运动以一年为一个周期，这是地球每年绕太阳公转一周的反映。②月球是地球的卫星，每月绕地球转一周，同时跟地球一起绕太阳公转。③地球每天自转一周，地球的自转造成日月星辰每天东升西落的现象。哥白尼的日心说比托勒密的地心说更能解释当时所观测到的天文现象，后来的观测事实又不断证实并发展了这一学说。

限于当时的科学水平，哥白尼学说也有一些缺点和错误：①把太阳当作宇宙的中心是不妥的，太阳只是太阳系的中心天体，而不是宇宙的中心。②行星的轨道应是椭圆而不是圆；同时，行星的运动不是匀速的。在哥白尼之后，意大利思想家布鲁诺（G. Bruno，1548—1600）认为，太阳并不是宇宙的中心，他大胆提出了宇宙是无限的且不存在中心的正确见解。德国天文学家开普勒（J. Kepler，1571—1630）明确指出行星运动的轨道是椭圆，而太阳则位于这个椭圆的一个焦点上，从而解决了行星运动速度不均匀的问题。布鲁诺和开普勒的这些见解都是对日心说的重要发展。

哥白尼著作的出版是科学史上的一次革命。在这以前，科学只是“神学的附庸”。现在，哥白尼竟然说出了不仅是反对亚里士多德，而且也是反对圣经的话来，这就从根本上动摇了宗教赖以统治的思想基础，他给罗马教廷带来的冲击是可以想象的。

自由落体和斜面实验

地面上重物的下落是人类最早观测到的自然现象之一。千万年来，人们根据自己的日常经验都认为重物下落得快，轻物下落得慢。古希腊学者亚里士多德更把这上升到“理论”：重的物体落地快，轻的物体落地慢。



伽利略

真正对自由落体运动进行科学研究的是意大利物理学家伽利略(G. Galilei, 1564—1642)。他在比萨大学任教期间，多次对亚里士多德的观点提出疑问，他巧妙地设计了一个“佯谬”：如果亚里士多德的论断成立，即重物比轻物下落速度大，那么将一轻一重的两个物体拴在一起下落，“快的会由于被慢的拖着而减速，慢的会由于被快的拖着而加速”，因而它将以比原来那个重物小的速度下落，但这两个物体拴在一起要比原来那个重物更重些。这样，伽利略就从亚里士多德的重物较轻物下落得快的论断，导出了重物下落得更慢的结论。这表明“亚里士多德错了”。伽利略认为，只有假定重力加速度与物体的重量无关，才能消除这个矛盾。

伽利略向亚里士多德的挑战触怒了许多学者、教授，于是产生了流传广泛的斜塔实验故事。

比萨斜塔高 179 英尺，由于塔基问题，塔身发生倾斜，那正是理想的落体实验场所。伽利略为了证明他的论断，邀请了许多人到斜塔旁观看，有他的支持者，也有他的反对者。伽利略一手拿着一个 1 磅重的铅球，另一手拿着一个 10 磅重的铅球，一步一步地登上斜塔。到了塔顶，他向下作了个手势请观众注意，随即双手平举两个铅球让它们同时下落，最后“啪！”的一声，两个重量相差 9 倍的铅球同时落地。伽利略胜利了。

这个实验是否由伽利略操作，从当时的各种文献记载（包括伽利略本人的著作）中都无法得到证实。但重要的是，斜塔实验反映了当时的研究者们，对自由

落体实验已有很深入的认识：①自由落体的速度极快，为了体现重物、轻物下落速度不同造成下落距离不同，必须有相当的高度以形成这种差别。这就是自由落体实验要在 50 多米高处的当地最高的建筑物上进行的缘故。②意大利各地的高塔不少，为什么流传下来的却是一个“斜塔实验”？这可能是千百次失败带来的一个必然结果。由于伽利略当时名声显赫，崇拜者们就把斜塔实验的功劳归到他的头上。不过，下面的“斜面实验”确是伽利略亲自设计和操作的。

在垂直方向观测自由落体的落地，在当时的技术条件下是很困难的，因为即便在 50 多米高处下落的物体，到达地面也只要花 3 秒多钟。为了仔细观测重力作用下物体运动的特点，伽利略设计了一个能将运动时间“放大”的斜面实验。他在一块厚木板上刻一道槽，并将槽打磨得很光滑。再取一个坚硬、光滑并很圆的铜球，放在槽里滚动。抬高槽的一端，使槽倾斜，这样，铜球就在一个斜面上滚动。实验开始时，让铜球放在槽顶沿着槽滚下，并记录整个下滑时间。重复几次，“以便使测得的时间准确到两次测定的结果相差不超过一次脉搏的十分之一。进行这样的操作，肯定了我们的观察是可靠的以后，将球滚下的距离改为槽长的四分之一，测定滚下的时间，我们发现它准确地等于前者的一半。下一步，我们用另一些距离进行试验，把全长所用的时间与全长的二分之一、三分之二、四分之三，或者其他任何分数所用的时间相比较。像这样的实验，我们重复了整整 100 次，结果总是经过的距离与时间的平方成比例，并且在各种不同坡度下进行实验，结果也都如此……”伽利略在《两种新科学的对话》中所记述的这段话，已道出了匀加速运动中经过的距离与时间的平方成比例的基本规律。

根据斜面实验，伽利略还提出了惯性的概念。根据亚里士多德的物理学，保持物体匀速运动的是力的持久运动。但是，伽利略从小球在水平面上运动的实验推测，如果没有摩擦力等阻力的作用，小球将保持匀速运动。这就奠定了近代关于物质惯性的基础。遗憾的是，伽利略没有定义匀速运动是在一条直线上的运动，因而没有最后完成惯性的近代定义。

摆的研究

据说在 1583 年，年轻的伽利略在比萨教堂祈祷时，被那盏从教堂顶上悬挂下来的大油灯（长命灯）的来回摆动所吸引。他发现油灯的摆动很规则，那时还没有能准确计量时间的钟表，于是伽利略以他自己的“表”——即他的脉搏的跳动——来计算油灯摆动的时间。他发现，不论油灯的摆幅是大是小，摆动一个来回所需时间几乎相同。发现单摆的摆动周期与振幅无关，这是伽利略对物理学的一个贡献。后来他又通过更精确的实验得出，摆的振动周期与摆长的平方根成正比。



惠更斯

荷兰的惠更斯 (C. Huygens, 1629—1695) 对摆的研究取得了最突出的成果, 他的研究是与当时要解决精密钟表的结构问题相联系的。随着航海事业的迅速发展, 如何精确测定船舶位置成为一个极其重要的问题。除了用天文观测的方法外, 精确计时的方法也是一种常用的方法。长时间以来, 人们知道要解决这个问题必需有两只钟, 一只记录本地时间, 另一只则记录零度子午线时间, 且两钟都必须精确计时。当时, 走时较准确的是摆钟, 为了设计更精确的摆钟, 首先要求制造一种摆动准确等时的摆, 而不是像单摆那样近似等时的摆。惠更斯找到的解决办法是: 摆动点的轨迹应是一段摆弧而不是一段圆弧。他发现可以通过悬丝在两片摆线夹板之间运动来实现。

由于真正的摆并不是一个数学摆 (一个质点悬挂在一条数学线上), 而是一个绕着水平轴旋转的物理摆。于是惠更斯着手研究如何用给定的物理摆去确定等时摆动的数学摆的长度。为此, 他引进了惯性矩概念。他还发现了物理摆的悬挂点与摆动点的可互换性。

1658 年, 出版了《钟表论》一书。1673 年, 惠更斯的《摆钟》出版。书中, 既研究了摆钟本身, 又进一步系统地研究了以摆钟为基础的各种各样的理论。

万有引力理论的胜利

“万有”引力概念起源于人类对地面上物体的重力现象和天空中星球的引力现象的认识。在古代和中世纪, 重力被认为是位置的一种性质。亚里士多德认为, 宇宙万物都有各自的位置, 某物体一旦脱离了原位, 就要回复原位。石头之所以落地, 就是石头要回复到它原来所在的位置——地面上去。哥白尼提出了“日心说”, 设想太阳、月球和地球等行星各自都有自己的引力体系。在各星球上空的石头都会落到离它最近的引力体系中去, 因此, 地球上的石头要落向地面。

17 世纪, 萌发了从动力学角度来解释天体运动的思想。英国御医吉尔伯特 (W. Gilbert, 1544—1603) 从磁球实验, 猜测太阳系的所有天体是通过磁力维系在一起的。开普勒受吉尔伯特影响, 认为引力类似于磁力, 太阳发出的磁力流 (即引力) 像轮辐一样在黄道面上沿太阳旋转方向转动, 从而推动行星围绕太阳运动, 引力的强度随着与太阳距离的增大而减弱。法国数学家笛卡儿

(R. Descartes, 1596—1650) 于 1644 年提出“旋涡”假说, 认为宇宙间充满

着一种稀薄不可见的流质“以太”，它们围绕各个天体形成大小、速度和密度均不相同的旋涡，带动天体（如太阳）及其周围的物体（如太阳系各个行星）绕转，并形成指向中心的作用，从而表现引力作用。旋涡学说把天体运动归结为动力学问题，是牛顿以前最有影响的引力理论。



牛顿

引力理论最重要的发展就是把天上的引力与地面的重力联系起来，从而把引力推到无处不存在的“万有”的地步。英国物理学家胡克(R. Hooke, 1635—1703)首先觉察到引力和重力本质相同。他曾经在山顶和矿井下进行实验，试图测定重力随与地心距离的远近而变化的规律；另一方面，他又提出引力随与吸引中心距离的不同而变化的思想。胡克认为，“一旦知道这种关系，天文学家就容易解决天体运动的规律。”1680年初，胡克在给牛顿的信中甚至提出了引力反比于距离平方的猜测。1679年，英国天文学家哈雷(E. Halley, 1656—1742)和伦恩(Ch. Wren,)按照开普勒第三定律，利用圆形轨道和匀速圆周运动的向心力公式，导出作用于行星的引力与它们到太阳的距离的平方成反比。但是，他们还不能证明行星在椭圆轨道中也是如此。1684年8月，哈雷从伦敦专程到剑桥大学向牛顿请教，牛顿(I. Newton, 1642—1727)说他早已完成了这一证明，但一时找不到证明手稿。这年年底，牛顿将重新作出的证明寄给哈雷。在哈雷的热情资助下，1687年出版了牛顿的名著《自然哲学的数学原理》，公布了他力学研究的全部成果，包括他对引力理论的研究。这一研究主要是在1665——1666年间进行的，这一时期由于瘟疫流行，剑桥大学停课，正在求学的牛顿回到故乡，潜心研究引力理论。关于牛顿是从“苹果落地”得到万有引力启发的传说，也是指那段时间。

地球上的重力与天体间的引力是不是一回事？从牛顿的一份手稿来看，他已经把重力问题引向空间。手稿中说：“就在这一年，我开始想到把重力引伸到月球的轨道上，并且在弄清怎样估计圆形物在球体中旋转时压于球面的力量之后，我就从开普勒关于行星公转的周期的平方与其轨道半径的立方成比例的定律中，推得推动行星在轨道上运行的力量必定和它们到旋转中心的距离的平方成反比例。于是我把推动月球在轨道上运行的力和地面上的重力加以比较，发现它们差不多密合。”这是牛顿在1665——1666年间想到的问题，可是牛顿迟迟不发表有关引力的理论。其可能是他使用的地球大小的数据不精确，于是得出的推动月球在轨道上运行的力和重力不符；也可能是计算时遇到许多困难。因为讨论行星和太阳时，它们相距甚远，天体都可看作是质点。月球和地球之间距离没有那么大，就不能简单地把它们当作质点。此外，以苹果的大小和它与地球的距离相比，

地球是巨大无比的，要计算地球各部分对苹果的引力总和很困难。哈雷向牛顿求教有关彗星运动问题，促使牛顿重新考虑引力理论。1685年牛顿证明一个由具有引力的物质组成的球吸引它体外的物体时，和所有质量都集中在中心时一样。理论上允许把太阳、月球、地球都当作一个个质点，问题便大大简化。突破这一障碍后，牛顿把天体间的力和地球吸引物体坠落的力联系起来，重新回到重力和月球的老问题上来。他采用了有关地球的新数据，证明地面上物体的坠落和月球沿闭合轨道运行出于同一原因，并把这一结论推广到所有的行星运动中去，提出了著名的万有引力定律。

牛顿所完成的万有引力定律，经过科学实践的检验得到了普遍承认。著名物理学家周培源把这一检验过程归结为三点：第一，万有引力理论应能解释旧理论所能解释的一切现象；第二，新理论还应能解释已经发现的但却是旧理论所不能解释的现象；第三，也是最关键的一点，它还应能预言一些新现象，并且能为尔后的实验或观测所证实。

关于地球的形状，是对牛顿理论的第一个重大考验。在运用万有引力定律解释岁差现象时，牛顿指出每一行星由于自身的旋转运动，赤道部分应该隆起，星体应为两极扁平的球体。里切尔在卡因岛观察到的摆钟变慢的现象，被牛顿看作是赤道处引力场变小，即地球是个扁球体的证据。因此，赤道隆起部分将一部分接近太阳和月亮，另一部分远离太阳和月亮，它们受到的引力作用也不同，使太阳和月亮的引力摄动作用不通过地球中心，从而使地球的轴作一种缓慢的圆锥运动，造成了二分点的岁差现象，牛顿近似地估算出地球的扁率为 $1/230$ 。18世纪30年代，当牛顿的学说传到法国，立即受到巴黎天文台台长卡西尼

(J. Cassini, 1677—1756)等人的激烈反对，他们根据笛卡儿的旋涡假说和错误的纬度长度的测量，认为地球是两极凸出的长椭球体。

为了得到更准确的大地测量结果，法国科学院于1735和1736年先后派出两个测量远征队，分赴赤道地区的秘鲁和高纬度的拉普兰德，在两地的经度圈上测量等角的一段弧长。测量结果基本上证实了牛顿的结论。拉普兰德队的领队莫泊丢(Maupertuis)和成员克雷洛(Clairault)后来都成为牛顿学说的支持者。

第二个支持来自哈雷彗星的研究。在牛顿之前，彗星被看作是一种神秘的现象。牛顿却断言，行星的运动规律同样适用于彗星。哈雷根据牛顿的引力理论，对1682年出现的大彗星(即后来命名的哈雷彗星)的轨道运动进行了计算，指出它就是1531年、1607年已出现过的同一颗彗星，并预言它将在1758年再次出现。1743年克雷洛计算了遥远的行星(木星和土星)对这颗彗星的摄动作用，指出它将推迟于1759年4月经过近日点。这个预言果然得到了证实。

引力常数的测定，是地面上的实验对万有引力定律提供的直接证明。1798年，英国物理学家卡文迪许(H. Cavendish, 1731—1810)把两个小铅球系在一根直杆的两端，用一根细线从中间吊起，然后用两个大铅球靠近小铅球，通过细线的扭曲测量了大球与小球之间的引力作用，从而得出引力恒量值，并计算了地球的质量和密度。

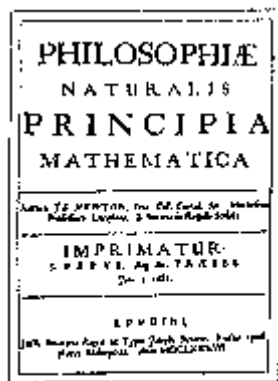
对牛顿万有引力理论最有力的支持，来自海王星的发现。18世纪末到19世纪初，发现人们对天王星的运动的观测和理论结果之间存在着明显的偏差。英国青年大学生亚当斯（J. C. Adams, 1819—1892）在1843—1845年，法国天文学家勒威耶（U. J. J. Leverrier, 1811—1877）于1845年，各自独立地根据牛顿理论进行了计算，预言了天王星轨道外的一个未知行星的质量、轨道和位置。勒威耶将他的计算结果写信告诉了柏林天文台的加勒（J. G. Galle, 1812—1910），加勒于1846年9月23日夜在预定的地点发现了一颗新的行星，这就是对天王星的运行产生规则的摄动作用的海王星。它的发现，被认为是牛顿引力理论的伟大胜利，因为像这种以新理论来精确地预言一颗未知行星的存在，并为1年后的天文观测所证实的事例，在天文学发展史上是前所未有的。万有引力理论取得辉煌胜利时，牛顿已离开人世100多年。由此可见，科学真理经得起时间的考验。

牛顿力学三定律的建立

1687年牛顿《自然哲学的数学原理》的出版，标志着经典力学体系的建立。这部巨著分为两大部分，第一部分包括“定义和注释”与“运动的基本定理或定律”两编，第二部分是这些基本定律的应用编。

在“运动的基本定理或定律”中，牛顿写下了机械运动的3个基本定律。他说：“每个物体继续保持其静止或沿一直线作等速运动的状态，除非有力加于其上迫使它改变这种状态。（抛射体，只要不因空气阻力而被减速，或因重力而被向下拉落，就永远保持在它的运动之中。一个陀螺，其各部分由于内聚力的作用而不断离开其各自的直线运动，除非受空气阻力而减速，它决不会停止转动。行星和彗星这些较大的物体，由于在较自由的空间中所受的阻力较小，也能在更长的时间内保持它们的前进和环绕运动。）

“运动的改变和所加的动力成正比，并且发生在所加力的那个直线方向上。（如果任何一个力产生一个运动，那么加倍的力就产生加倍的运动，三倍的力就产生三倍的运动，不管这个力是一下子一起加上去的，还是相继地逐渐加上去的。如果一个物体原先是在运动的，那么由该力所产生的那个运动——由于它总是沿着产生它的力的方向——和原先的运动，就看它们的方向一致或者相反而相加或相减；当它们的方向彼此倾斜时，它们就倾斜地联合起来，从而产生一个由两个方向合成的新的运动。）



牛顿的名著《自然哲学的数学原理》的封面

“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。（任何东西拉引或推压另一个东西时，同样也要被另一个东西所拉引或推压。如果你用手指推压一块石头，那么手指也要被石头所推压。如果有一匹马拉引一块系于绳上的石头，那么这匹马——如果我可以这样说——将为相等的力朝后拉向石头；因为这条拉紧的绳，同样有使自己松弛或伸直的倾向，就将以同样的程度把马拉向石头和把石头拉向马，并且它阻止其中一个的前进和推动另一个的前进在程度上也是一样的。如果一个物体撞在另一个物体上，并且由于它的力的作用而改变后者的运动，那么这物体的运动也将——由于相互推压的相等——发生一个相等而指向相反方向的变化。这些作用所引起的那些相等的变化，不是物体速度的变化相等，而是物体运动的变化相等；这就是说，如果这些物体不为任何其他障碍物所阻。这是因为运动的变化相等，那些指向相反方向的速度变化便和物体的质量成反比。）”

牛顿运动三定律中的第一、第二定律，是在伽利略的工作基础上总结出来的。但是，伽利略没有明确地提出质量概念，而牛顿从几个不同的角度论述了质量问题，还用数学推导和实验测量来说明质量和重量成正比。伽利略在研究速度变化问题时，已包含了加速度概念。牛顿用自己创建的无限小运算，将加速度作为速度对时间的微商来处理，也就是从任何原点到质点位置的矢径对时间的两次微商。这比伽利略的思想更前进了一步。

牛顿运动三定律的建立，为经典力学奠定了基础。人们往往就把经典力学称为“牛顿力学”。

牛顿力学的新发展

17 世纪以伽利略—牛顿为代表的科学革命的胜利，促进了 18 世纪 30 年代工业革命的到来。而工业革命带来的生产力的发展，又促使社会对力学、物理学和工程技术提出新的、更高的要求。

在这样的背景下，力学理论不断向实用化、普遍化、数学化方向发展。总的说来，经典力学理论在牛顿以后大体是平行地沿着矢量力学和分析力学两个方向发展的。前者发展成为当时工程力学的各个分支，后者发展成为理论物理学的各分支。

矢量力学的发展：牛顿力学的矢量处理方法以及运用第二定律的二阶运动微分方程求解，对于质点动力学问题是比较有效的。但质点越多，受力（包括众多的约束力）越多，运动越复杂，计算就越繁琐，上述方法往往也无能为力。为了克服这些困难，逐渐发展了动量、动量矩和动能三大定理以及它们在特殊条件下（如封闭体系）的三个守恒定律。利用守恒定律，一般只要知道过程的始末状态，可以忽略体系中十分复杂的相互作用力和约束力，能简单、方便地解决问题。这就构成了今天经典力学中的整个矢量力学体系，它包括如下三大部分：①刚体力学。研究刚体在受力状态下的运动。按运动状态的不同，又可分为刚体静力学和刚体动力学两大分支。②流体力学。按研究对象的不同，可分为水静力学、水动力学和空气动力学三大分支。水动力学是船舶外型、水坝水渠、输水或输油管道设计的理论基础。空气动力学是飞机、导弹等一切飞行体设计的理论基础。随着飞行体速度的不断提高，又产生了高速（超声速）空气动力学和高超声速（是声速的几倍乃至十几倍）空气动力学。③变形体力学。研究物体在受力状态下既有运动、又有形变的情况。变形体力学又分为弹性力学和塑性力学。此外流体力学和变形体力学合称为连续介质力学。

分析力学的发展：即使有三大运动定理或三大守恒定律在一定条件下的简化，矢量力学对于多质点、多约束、非常见坐标系和运动参照系等种种越来越复杂的问题，不论是描写力或描写运动，都遇到越来越大的困难。18、19世纪的力学家和数学家从哲学上、物理学上和数学上进行了大量的探索，这种探索是从以下四方面来进行的：①为寻找一种比牛顿定律更广泛适用、更简便的普遍原理，出现了虚功原理、达朗贝尔原理、最小作用原理、哈密顿原理等等。②用广泛适用于各种运动形式的“能量”与“功函数”这两种标量函数（以后发展为拉氏函数 L 和哈密顿函数 H ）来代替力和动量这样的几何矢量。③为对系统进行整体研究，便从虚功原理、最小作用原理发展为数学上的变分方法，并且引入了广义坐标和纯代数方法等，形成了一套独特有效的“分析方法”。④分析力学的基本理论体系表现为微分形式与积分形式两种可以相互推导的等价形式。微分形式就是从虚功原理、达朗贝尔原理得到拉格朗日的所谓“力学普遍方程”，进而到拉氏方程。积分形式，即从莫泊丢原始的最小作用原理发展为哈密顿原理。英国数学家哈密顿（W. Hamilton, 1805—1865）自己则称之为“稳定作用原理”。因为“事实上伪装节约的数量常常在那里浪费消耗”，“而且自然界有很多现象作用是极大的或稳定的”。

分析力学不仅用统一的方法解决了各种力学问题，而且其意义远远超出了经典力学范围。人们发现，能量观点和拉氏方程、哈氏原理及正则方程，完全适用于其他形式的物质运动，无论在电动力学、统计物理、相对论还是量子力学、量子场论乃至基本粒子领域内，它们也是分析问题的基本工具或出发点，分析力学就成了我们跨入理论物理学和现代物理学的入门课程。

牛顿的重大贡献

牛顿的科学成果对尔后 200 多年自然科学的发展产生了重大影响，他的伟大集中体现在三项发现中。

(1)发现万有引力定律。在牛顿之前，人们已经知道世界上存在两种“力”：地面上的物体都受到重力的作用，天上的月球和地球之间以及行星和太阳之间都存在引力。这两种力究竟是性质不同的两种力，还是同一种力的不同表现？牛顿经过 21 年的研究探索终于提出了万有引力定律，宣告了天上地下的万物都遵循同一规律运动，彻底否定了宗教势力宣扬的天上地下不同的思想，这是人类认识史上的一次飞跃。

(2)发明微积分。在牛顿之前，法国笛卡儿通过引进坐标系，建立了解析几何。笛卡儿引进了变量，这就改变了古希腊以来数学中常量占统治地位的局面。

牛顿在笛卡儿几何变量的基础上，经过精心定义引入了“极限”概念。两个相互依赖的物理量，当它们逐渐变小时（牛顿称之为“流数”），其比率也在逐渐变化，当自变量达到无限小值时，这个比率就达到一个极限值（牛顿称为“流率”，即今天的“导数”或“微商”）。牛顿把这种变量数学称之为“流数术”，这就是微积分的最早的一种形式。牛顿把变量引进运动学之后，解决了困扰当时科学家的两大难题：在变速运动中，已知路程如何求速度，已知速度怎样计算路程。

牛顿和与他同时代的德国数学家莱布尼兹分别独立地发明的微积分，将常量数学发展为变量数学，给人类研究变化着的世界万物提供了有力的工具。难怪恩格斯会作出这样的评价：“在一切理论成就中，未必再有什么像微积分的发明那样，被看作是人类精神的最高胜利了。”

(3)发现光谱。牛顿发现白光是由折射率不同的黄、橙、红、绿、靛、蓝、紫七种色光组成的。牛顿的发现奠定了光谱学的基础，而现代光谱学则是人们研究物质结构的有力工具。牛顿将这一发现用来改进望远镜，制成了消色差望远镜，由此奠定了现代大型光学天文望远镜的基础。

牛顿取得的巨大成就，是近代科学发展史上的里程碑。然而这位科学巨匠自己却说：“如果我所见到的比笛卡儿要远一些，那是我站在巨人的肩上的缘故。”这句临终赠言，也道出了牛顿之所以成为历史伟人的奥秘所在：善于学习和继承前人的科学遗产，并在继承的基础上创新。

测温技术的发展与温度计的发明

第一台测量温度的科学仪器是伽利略于 1593 年发明的，该测温器是一个颈部极细的玻璃长颈瓶，瓶中装有一半带颜色的水，并把它倒过来放在碗里，碗里

也盛有带同样颜色的水。随着温度的变化，瓶中所包含的空气便收缩或膨胀，颈中的水柱就会上升或下降。

1631年公布了法国化学家詹·雷伊（J. Rey）对伽利略测温器的改进，他将测温器的长颈瓶再倒过来（即正摆），用水的膨胀来表示冷热程度。但管子未封口，因水的蒸发会产生误差。在雷伊之后约25年，意大利佛罗伦萨的院士们用蜡封了管口，在玻璃泡里装上酒精，并把刻度附在玻璃管上，这样的结构已接近后来的温度计。1659年巴黎天文学家博里奥（I. Boullian）制造了第一支用水银作测温质的温度计。

以后，温度计的制作和改进主要从两方面进行：第一，为了定出温标，需要确定“定点”，导致人们对冰和其他物质的熔解和凝固温度的研究，发现了在一定条件下，这些温度是恒定不变的。第二，需找出合适的测温质，从而促进了对物体热膨胀的研究。

德国格里凯选择马德堡初冬和盛夏的温度为定点，佛罗伦萨院士们选严寒时下雨或结冰的气温与牛或鹿的体温为定点，他们还发现冰的熔点是不变的。1688年，道伦斯（Dolence）提出用冰冻时的温度和黄油熔解的温度为定点温度。

1702年，阿蒙顿（G. Amontons）改进了伽利略测温器，他将一个球连接到一个U形管上，管中装有水银，并保持球内空气的容积不变，用U形管两臂水银面的高度差来测量球内空气的温度，他用水的沸点和冰的熔点作为定点。

第一支实用温度计是迁居荷兰的吹制玻璃的工匠华伦海特

（G. D. Fahrenheit, 1686—1736）制成的。1709年开始制作酒精温度计，1714年得知阿蒙顿在水银热膨胀方面的研究后，转向制作水银温度计，并创造了净化水银的方法，使水银能在温度计中普遍使用。他把冰、水、氨水和盐的混合平衡温度定为 0°F ，冰的熔点定为 32°F ，而人体的温度为 96°F 。1724年后他又把水的沸点定为 212°F 。他发现每种液体都有一个固定的沸点，且随大气压变化而变化。这一发现对精密的计温学是个很大的贡献。华伦海特把 0°F 和 212°F 作为基本点的刻度法至今还在美国和美洲采用，称为“华氏温标”。

法国勒奥默（R. A. E. Reaumur, 1757）长期致力于酒精温度计的研究。发现酒精（和 $1/5$ 的水混合）的体积若在水的冰点时为1000单位，则到达水的沸点时将变为1080单位。1730年制作的酒精温度计取水的冰点为零度（ 0°R ）、水的沸点为 80°R ，在这两个定点中间分成80等分。勒氏温标曾较多地在德国采用。

1742年瑞典天文学家摄尔修斯（A. Celsius, 1701—1744）用水银作测温质，采用百分刻度法，以水的沸点为 0°C ，冰的熔点为 100°C 。8年后把两点对调，确立了摄氏温标。应该指出，上面所说的摄氏温标只是旧摄氏温标，今天科学界和计量界所说的摄氏温标是以热力学第二定律来定义的，和摄尔修斯的定义完全不同，只在某些范围内有相似的取值。

热质说的兴衰

“热”是什么？自古以来就有不同看法。15世纪以后，热的本性问题又引起科学家的注意，培根从摩擦生热等现象中得出“热是一种膨胀的、被约束的而在其斗争中作用于物体的较小粒子之上的运动”。玻意耳指出热是物体各部分发生的强烈而杂乱的运动。笛卡儿把热看作是物质粒子的一种旋转运动。胡克用显微镜观察了火花，认为热并不是什么其他的东西，而是物体各个部分的非常活跃和极其猛烈的运动。牛顿也认为热不是一种物质，而是组成物体的微粒的机械运动。18世纪，罗蒙诺索夫根据摩擦（或敲击）生热，物体受热而熔化，及物体的发芽、腐烂过程都受热而加快、受冷而减慢等现象，得出热的根源在于物质的运动的结论。

上述这些热的唯动论虽然是正确的，但尚缺乏足够的实验根据，还不能成为科学理论而被普遍接受。随着古希腊原子论思想的复兴，热是某种特殊物质实体的观点也得到流传，伽桑狄认为运动着的原子是构成万物的最原始的不可再分的世界要素，热和冷也都是由特殊的“热原子”和“冷原子”引起的，这个观念把人们引向“热质说”。最终在18世纪，认为热是某种特殊物质——热质的观点占了上风。

“热质”这个名词是拉瓦锡等人于1787年提出来的。拉瓦锡和拉普拉斯等人认为热是渗透到物体空隙中的所谓“热质”构成的，拉瓦锡甚至把“热质”引入化学元素表中，热质被看作是一种不可称衡的“无重流体”，它的粒子彼此排斥而为普通物体的粒子所吸引。波尔哈夫认为热的本源是钻在物体细孔中、具有高度可塑性和贯穿性的物质粒子，它没有重量，彼此相斥，且弥漫于全宇宙。

布莱克是热质说的重要倡导者，他在研究热量在几个物体之间的转移时发现其总量不变，这个规律很容易用热是一种实物来说明。他仿照化学中盛行一时的燃素说对热的本性作了错误的解释，以为热也是一种没有重量、可以在物体中自由流动的物质。

热质说简单、容易地解释了当时发现的大部分热现象：物体温度的变化是吸收或放出热质引起的；热传导是热质的流动；对流是载有热质的物体的流动；辐射是热质的传播；热膨胀是热质粒子间的排斥；物质状态变化时的“潜热”是物质与热质发生“化学反应”的结果；摩擦（或碰撞）生热是由于“潜热”被挤压出来以及物质比热变小的结果。在热质说观点指导下，瓦特改进了蒸汽机，傅里叶建立了热传导理论，卡诺从热质传递的物理图象及热质守恒规律得到了卡诺定理，等等。但是在18世纪末，热质说受到严重的挑战。

1798年，美国物理学家本杰明·汤普逊（B. Thompson，即伦福德伯爵，1753—1814）在德国慕尼黑进行炮膛钻孔时，发现钻孔所产生的热现象和热质说的推论相反。根据热质说，锐利的钻头比钝钻头应能更有效地切削炮筒的金属，从中放出更多的和金属结合的热质。但是，实际上钝钻头放出的热质更多。一个简直不能切削的钝钻头，在马匹的拖动下转动，过了2小时45分钟，竟使18磅左右的水沸腾。伦福德从一系列钻孔实验中得出：“在这些实验中被激发出来的热，除了把它看作‘运动’以外，似乎很难把它看作为其他任何东西。”

1799年，英国科学家戴维（Davy, Humphrey, 1778—1829）用钟表机件使放在真空中的两块冰相互摩擦，整个实验仪器都保持在 -2°C 以下，结果冰融化了，得到的是 2°C 的水。这一实验无法用热质说说明，因为没有什么东西能向冰提供热质，冰的融化只能是摩擦形成的。由此戴维断言“热质是不存在的”。

伦福德和戴维实验虽然有力地驳斥了热质说，支持了热的运动说，但由于那时尚未形成能量转换观点，热质说仍然流行。直到19世纪中叶，还不断有人从热质说观点反对焦耳的研究结果。直至19世纪40年代，建立了能量守恒和转化定律，热质说才彻底被抛弃。

能量守恒定律的确立

中国古代和古希腊的哲学家早已提出“运动不灭”思想。对能量守恒原理的具体认识是从力学研究开始的。伽利略通过斜面和摆的研究，意识到物体下落过程中所获得的速度能够使它重新跳回原来的高度，但不会更高。1669年，惠更斯通过完全弹性碰撞的研究，认识到各个物体的质量与速度平方的乘积的总和，在碰撞前、后保持不变。1686年，莱布尼茨根据落体定律在机械运动范围内引进“活力”概念，把 mv^2 看作运动的量度，指出利用这个量可以表明自然界里运动的不灭性。约翰·伯努利一再谈到“活力守恒”。丹尼尔·伯努利把机械能守恒用于流体运动。18世纪后半叶，欧勒已经认识到质点在有心力作用下运动，当质点和吸引中心达到一个确定的距离时，其活力都是相同的。

永动机之不可能实现是导致能量守恒原理建立的重要线索。随着动力学的发展，人们逐渐形成了“功”和“能”的概念。18世纪末、19世纪初以来，各种自然现象之间的普遍联系与转化相继被发现：

伦福德、戴维的实验支持了机械运动与热之间的转化，卡诺关于热机效率的研究已接触到热功当量的概念。拉瓦锡于18世纪已经了解到化学反应中的热现象的重要性。

1821年德国物理学家塞贝克（T. Seebeck）发现两种不同金属的接点处加热会产生电动势，如果电路闭合，则有电流通过。

1842年楞次开始研究电流的热效应，他发现放出的热量与电流强度的平方、导线的电阻和通电时间成正比，它是电流转化为热的一条规律，也就是今天所说的焦耳-楞次定律。

到19世纪40年代，建立能量守恒原理的基础已具备，最后的确立由迈尔、焦耳和亥姆霍兹完成。

（1）迈尔的工作。罗伯特·迈尔（R. Mayer, 1814—1878）是德国医生，在一艘驶往印尼爪哇的船上，迈尔给病员放血时发现：静脉血的颜色不像生活在温带的人那样暗淡，而是像动脉血那样新鲜。他想到食物中含有化学能，它像机

械能一样可以转化为热。在热带高温情况下，机体只需吸收食物中较少热量，所以机体中食物的“燃烧”过程减弱了，静脉血中留下较多的氧，从而它像动脉血那样“新鲜”。1842年迈尔从“无中生有，有不变无”、“原因等于结果”等哲学观点出发，表达了物理、化学过程中能量守恒思想。迈尔把“力的不可破灭性”称为“第一个性质”，而把“原因具有取不同形式的能力”称为“第二个性质”，他说：“把两个性质合并起来，可以说，原因（在量上）是不可消灭的，而（在质上）是可以转化的东西”。这就是说“力”是一种原因，它是不可消灭的但却是可以转化的。迈尔还提出建立不同“力”之间数值上的当量关系的必要性：“例如我们应确定，为把该物体重量相等的另一物体从 0° 加热到 1° ，应该把这个重物升到一定高度。”他根据当时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重量的水从 0° 加热到 1° ，即1千卡=365千克米。”



(2) 亥姆霍兹的贡献。德国生理学家、物理学家赫尔曼·亥姆霍兹 (H. L. F. von Helmholtz, 1821—1894) 是从生理学问题开始对能量守恒原理进行研究的。他于1847年在《论力的守恒》一文中论述了能量守恒和转化的基本思想，他提出“在质点间的吸引力和排斥力作用下，质点的所有运动中，如果吸引力和排斥力的强度只与距离有关，那么张力（指位能）在量上的损失始终等于活力（指动能）的增加，反之张力的增量始终等于活力的损失，因而，所有活力和张力之和始终是一个常数。”亥姆霍兹把所有的能量形式都归结为“活力”或“张力”，他研究了能量守恒原理在其他物理过程中的应用，指出无摩擦的力学过程，引力作用下的运动，不可压缩的液体和气体的运动，理想弹性体的运动都属于这一类例子。存在摩擦或吸收作用时，如果发生活力损失，那就会转化为其他形式的力，首先是热。亥姆霍兹详细分析了电磁现象，得出了在静电、静磁相互作用中的能量表示，还从电容器的能量表达式得出了电容器放电时在连接导

线里所放出的热量的数值。亥姆霍兹指出把力的守恒原理应用于生物机体中所进行的过程是可能的。

(3) 焦耳的实验研究。自学成才的英国物理学家焦耳 (J. P. Joule, 1818—1889) 关于热功当量的测定, 是确立能量守恒原理的实验基础。从 1840 年开始, 焦耳多次进行通电导体发热的实验。把通电金属丝浸没在水中, 测算水的热量的变化情况, 结果发现通电导体产生的热量与电流强度的平方、导体的电阻和通电时间的乘积成正比。比楞次早一年得到了电流的热效应定律。接着, 焦耳根据电路中的热损耗和电动机所作的机械功的关系, 明确提出了功和热量等价性的概念。1843 年 8 月, 在一次学术报告会上, 焦耳作了题为“论磁电的热效应和热的机械值”的报告。报告中描述了 4 个实验, 其中一个是在磁场中让电磁体在水里旋转, 分别测量运动线圈中感应电流所产生的热量和维持电磁体旋转所作的功。发现热量和机械功之间存在着恒定的比例关系。焦耳从这里测得了第一个热功当量值: 1 千卡热量相当于 460 千克米的机械功。

当时许多物理学家对测出的热功当量值持怀疑甚至反对的态度。焦耳以极大毅力, 用不同方法, 长时间反复实验以期证明。1843 年, 焦耳通过摩擦测得热功当量值为 424.9 千克米 / 千卡。1844 年通过对压缩空气做功和空气温度升高的关系的实验, 测得热功当量值为 443.8 千克米 / 千卡。尤其在 1847 年, 焦耳精心地设计了一个著名的热功当量测定装置, 也就是用下降重物带动叶浆旋转的方法, 搅拌水或其他液体产生热量。这样得到的热功当量值是 428.9 千克米 / 千卡。从 1849 到 1878 年, 焦耳反复做了 400 多次实验, 所得的热功当量值几乎都是 423.9 千克米 / 千卡, 这和现在的公认值 427 千克米 / 千卡相比, 只小了 0.7%。焦耳用惊人的耐心和巧夺天工的技术, 在当时的实验条件下, 测得的热功当量能够在几十年时间里不作较大的修正, 这在物理学史上也是罕见的。难怪威廉·汤姆孙称赞说: “焦耳具有从观察到的极细微的效应中作出重大结论的胆识, 具有从实验中逼出精度来的高度技巧, 他得到了人们充分的赏识和钦佩。”

自然界厌恶真空

人们早就知道, 只要抽去水管里的空气, 形成真空, 水就会沿着水管往上流。亚里士多德为了解释抽水现象, 说了一句“名言”: “自然界厌恶真空”。这句话的意思是: 大自然是不让真空存在的, 一旦出现真空就让水来填补, 于是, 水就被抽上去了。真空出现在哪里, 水就跟到那里。

但是, 从古罗马以来, 人们就注意到一个现象: 用来输送水的虹吸管, 当它们跨越高 10 米以上的山坡时, 水就输送不上去; 在超过 10 米深的矿井里, 水泵怎么也抽不上水来。大自然为什么只能填补 10 米以下的真空, 而不能填补 11 米、12 米以上的真空呢? 伽利略注意到空气有重量, 他的学生托里拆利

(E. Torricelli, 1608—1647) 从这一事实出发, 把真空问题的研究推进了一大步。托里拆利认为, 既然空气有重量就会产生压力。正是空气的压力把水往上压, 压到 10 米高时, 水柱的重量正好等于作用在它上面的空气压力, 水就再也

压不上去。托里拆利说：“我们是浸沉在空气海洋的底部中生活，毫无疑问，根据实验可知空气是有重量的。”



格里克进行马德堡半球实验时的情景

为了证实他的观点，托里拆利用水银代替水来作试验。水银的流动性与水差不多，但由于它的比重是水的 13.6 倍，原先要用 10 米高水柱显示的结果，现在只要用不到 1 米高的水银柱就行了。托里拆利让人制作了一根 1 米长的玻璃管，一端封闭，一端开口。先将水银灌满玻璃管，然后用手指堵住开口的一端，再将管子倒过来放进一只盛满水银的瓷槽里。当他放开按住管口的手指时，管里的水银很快下降，当水银降到距槽里的水银面 76 厘米高时，就不再降低。换算一下就可得出，76 厘米高水银柱产生的压强，正好等于 10 米水柱的压强。这个实验形象地显示了由大气压力所产生的压强恰好等于 76 厘米高的水银柱的压强。以后，托里拆利发明的这个实验装置就成为测量大气压强的气压计。自从有了气象预报后，气压单位曾长期沿用厘米（或毫米）水银柱高来表示。

大气压力究竟有多大？这方面最为生动的事例发生在德国。1650 年，德国工程师格里克（O. von Guericke, 1602—1686）发明了抽气泵，这样，人们就能较容易地获得真空。1654 年，格里克进行了有名的“马德堡半球实验”。他制造了两个直径为 14 英寸的铜半球，每个半球上铸有铜环，其中一个半球上装有可供抽气的带活塞开关的孔。将两个半球合在一起，然后抽去球中的空气，这样，周围的大气就紧紧把两个半球压在一起。格里克在德国东南雷根斯堡的一个广场上，请皇帝来观看他的大气压实验。表演时全城轰动，百姓倾城而出。两个铜环上各用 8 匹强壮的马来拉，尽管马夫卖力地驱赶马匹，但仍然拉不开铜球。把铜球从马背上解下来，打开抽气开关放进空气后，只要轻轻一拉，两个铜半球就分开了。这是第一次用演示实验生动地表明了大气压的存在。

气体定律的发现

关于气体定律的研究，实际上是关于“自然界厌恶真空”这场争论的继续，英国的罗伯特·玻意耳（R. Boyle, 1627—1691）最先开展气体力学的研究。



玻意耳

1659年，玻意耳作了一系列关于空气压力和稀薄空气的实验。1662年，玻意耳把一定量的空气用水银封入短端封闭的U形玻璃管中，发现这部分空气能够与开口端中高得多的水银柱相平衡。玻意耳的经验思维，错过了发现开口端水银柱的高度与闭口端空气体积之间的规律性联系。他的合作者卡尔德、汤立蒙从玻意耳的数据中发现了气体的体积与压强成反比的关系。玻意耳承认了这个结论，并进一步在小于大气压的情况下用实验加以证明，从而在历史上建立了运动现象之外的第一个定量的自然规律。

1676年，法国物理学家埃德米·马略特（E. Mariotte, 1620—1684）也独立地发现了“玻意耳定律”，并发表了“关于空气本质的实验”的论文，因此这定律有时也叫玻意耳-马略特定律。

1702年，法国阿蒙顿对伽利略空气温度计作了改进。他利用连在U形管一端的玻璃球中的空气作测温质，使球内空气的容积保持一定，温度的数值则由长臂内水银柱的高度表示。实际上，阿蒙顿已建立了气压的变化与温度变化的关系，相当于给出后来发现的盖·吕萨克定律的实验证明，即

$$\frac{p}{p_1} = \frac{1 + at}{1 + at_1}$$

许多人用实验来测定不同气体的热膨胀系数 α ，其结果很不一致。从1801年起，法国化学家、物理学家盖·吕萨克（L. J. Gay-Lussac, 1778—1850）对气体物理性质进行了系统的研究，很快就发现，任何气体在压强不变的情况下，热膨胀系数均不变。1802年，他发现在压强恒定的条件下，理想气体从冰点升高到水的沸点时，如果用百分温度计作标准（摄氏温标），温度每升高 1°C ，气体的体积就增大了原来体积的 0.00375 倍，近似于 $1/267$ 。这就是盖·吕萨克定律。

早在1787年，法国查理（J. A. C. Charles, 1746—1823）先于盖·吕萨克提出气体的压力和体积随温度升高而增大和膨胀的定律，所以后来就将气体体积随温度膨胀的定律叫做查理定律。

1802年，道尔顿发现了混合气体的总压力等于每一单独成分的分压力之和，这就是道尔顿分压定律。

盖·吕萨克将他所发现的气体定律与玻意耳—马略特定律结合起来,得到如下的状态方程

$$\frac{pV}{1+at} = C,$$

式中 C 为常数。

法国物理学家勒尼奥 (H. V. Renault) 于 1842 年以更高的精度证实

了这个方程,并测得 $\alpha = \frac{1}{273}$. 于是,如果取 $T = t + 273$,则状态方程可写成

$$pV = RT.$$

这就是现代形式的理想气体方程。

气体动理论的建立

17 世纪,物质原子论的思想得到复兴,热与物体内部粒子运动有关的思想也被不少学者以不同形式提出。

1638 年,法国学者伽桑狄 (P. Gassendi, 1592—1655) 假设各种物质都由大量在各个方向运动的坚硬粒子所组成,各种不同物质粒子的不同形状使它们以不同形式结合,并表现出不同的特性。他用这个假说解释了物质三态的区别。伽桑狄的论述重新引起人们对原子论的注视,17 世纪持“热是运动”着法的科学家,大多接受了古代原子论观点并利用它对气体进行研究。

1738 年,瑞士物理学家丹尼尔·伯努利 (Daniel Bernoulli, 1700—1782) 指出气体的压强是气体粒子与器壁碰撞的结果,并导出玻意耳定律。他还讨论了气体压强随温度的变化,指出任何体积固定的气体压强的增大,都意味着气体粒子作更剧烈的运动。伯努利的气体模型,无疑是走向气体动理论的重要一步。

18 世纪 40 年代,俄罗斯学者罗蒙诺索夫 (M. B. Ломоносов, 1711—1765) 提出热是由物质内部看不见的微小粒子的运动产生的,这种运动是杂乱无规则的。热的传递是由于高温物体中的微粒把运动传给低温物体中的微粒所造成的。

那时,人们对粒子、原子、分子之间的区别还没有科学的认识。19 世纪初,随着化学原子论的确立,意大利物理学家阿伏伽德罗于 1811 年引入“分子”概念。英国物理学家瓦特斯顿 (J. J. Waterston) 在 1845—1846 年间首次提出

“弹性球分子模型”。1856 年,德国物理学家柯尼希 (A. K. Krönig) 提出了理想气体模型:分子是弹性小球,在没有相互作用时作匀速直线运动,只在碰撞时才有相互作用。并导出

理想气体压强公式 $p = \frac{N \cdot cm^2}{6V}$ ，式中 c 为分子速度， N 为容器内气体分子

数， V 为容器体积。他的论文引起了普遍重视，大大推进了气体动理论的研究。

作为一种物理学理论的气体动理论的建立和完善，是与克劳修斯、麦克斯韦和玻耳兹曼的工作分不开的。

克劳修斯 (R. Clausius, 1822—1888) 在研究热力学第二定律的同时，从微观上对气体动理论进行了探讨。他以分子对器壁的碰撞说明气体压强的形成，在推导气体压强公式时引进统计概念，得到了压强

公式 $p = \frac{1}{3}nmv^2$ 这里 v^2 是分子运动速率平方平均值。克劳修斯还提出了理想

nmv^2 ，这里 v^2 是分子运动速率平方平均值。克劳修斯还提出了理想气体分子运动模型，指出分子本身的体积与气体所占的整个体积相比是无限小的；分子每次碰撞所经历的时间比起两次碰撞间的时间间隔来是无限小的；分子力的作用是无限小的。若上述条件不满足，理想气体定律就不适用。

克劳修斯的另一个重要贡献是 1858 年引进了气体分子的平均自由程概念，解决了气体扩散速度的疑难问题。

1859 年，英国物理学家麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831—1879) 发现了分子热运动的无规性，且在几率概念的基础上运用严格的统计方法导出了麦克斯韦速度（速率）分布律。

奥地利物理学家玻耳兹曼 (L. Boltzmann, 1844—1906) 把分子运动论的理论研究推向了高峰。1868—1871 年间他把麦克斯韦速度分布律推广到外力场作用的情况，得出了粒子按能量分布的规律——玻耳兹曼分布律。进而得出气体分子在重力场中按高度分布的规律，据此能很好说明大气的密度和压强随高度的变化。至此，气体动理论已能解释当时在气象、化学、物理学领域的研究中所发现的与气体运动有关的种种现象。

玻耳兹曼的另一伟大贡献是沟通了从微观着手建立的气体动理论与从宏观的热机运动规律抽象出来的热力学。1872 年，建立了非平衡态分布函数的运动方程——玻耳兹曼积分—微分方程；建立了 H 定理。1877 年，把熵 S 和系统的热力学几率 ω 联系起来，得出 $S \propto \ln \omega$ 。1900 年，普朗克引进了玻耳兹曼常数 k ，使 $S = k \ln \omega$ 。通过这个关系，玻耳兹曼把分子的力学过程和系统的热力学过程统一了起来。

从布朗运动到佩兰实验

1827年，英国植物学家罗伯特·布朗（R. Brown, 1773—1858）用显微镜观察到水中的花粉或其他微粒在不停地作无规则运动，这种运动后来被称作“布朗运动”。这种奇怪现象究竟意味着什么？首先，它不是一种生物现象，因为不仅悬浮于水中的花粉颗粒，而且其他非生物微粒（例如矿物颜料的微粒）也作这样的杂乱运动。其次，也不可能是因加热不均匀而在液体中形成的一种液流。直到19世纪70年代，才用液体分子的热运动给予正确的解释。

1905年，爱因斯坦和奥地利物理学家斯莫路霍夫斯基（M. von Smoluchowski）发表了对布朗运动的理论研究结果。证明布朗粒子的运动是由于液体分子从四面八方对它们的撞击引起的，这种撞击的不规则性和偶然性，使来自不同方向的作用一般地说并不互相完全抵消，由于布朗粒子非常小（线度仅 10^{-4}cm ），周围分子不均匀碰撞所产生的不平衡力的作用足以使它发生运动。

通常，每个布朗粒子在液体中所受分子的碰撞约 10^{21} 次/秒，因此，粒子的瞬时运动是无法观测的，人们只能每隔一定时间（如20秒，30秒）记录一次它的位置。设每次观察相隔的时间为 t ，从理论上可以求出布朗粒子在 t 时间内的位移在 X 轴上的投影 x 的方均值

$$\overline{x^2} = \frac{kT}{3\pi\eta r} t$$

这是爱因斯坦关于布朗运动理论的一个重要公式，人们称之为爱因斯坦公式。

1908年，法国物理学家佩兰（J. B. Perrin, 1870—1942）用实验证实了爱因斯坦公式，并由此求得了阿伏伽德罗常数。佩兰利用与大气分子的垂直分布相类似的一种胶态粒子，这种粒子在密度比它小的液体中，不会全部沉淀到容器底部，而是永久保持悬浮状态。这些粒子的大小足以用显微镜观察到，因此能够对处于液体中不同高度的单位体积内的粒子进行计数。佩兰发现单位体积内的粒子数，随高度升高而减少，与大气中单位体积的分子数随高度而变化的规律相同。此外又观察到粒子是处于不断运动之中，即所谓“布朗运动”。佩兰推论胶态粒子的性质和“气体”分子类似，而这种粒子大到肉眼能观察并能计数。假如能配制成一种胶体悬浮液，其中所有粒子都完全相同，并能测定每个粒子的质量 m ，以及真实地描述粒子的竖直分布状况，那么，数出悬浮液中已知两个高度处单位体积的粒子数目，就能求得阿伏伽德罗常数 N_A 。佩兰最后求得的 N_A 为 $6.5 \times 10^{23} \sim 7.2 \times 10^{23}$ 。

佩兰实验的成功是对气体动理论的极大支持。在此之前，分子运动论及其代表人物玻耳兹曼遭到了马赫、奥斯特瓦尔德等权威人士的围攻，玻耳兹曼由于疾病的折磨以及论战的压力，最后于1906年自杀。佩兰用实验证实分子运动的客观存在后，奥斯特瓦尔德立即放弃了自己的观点。从此，确立了气体动理论在物理学中的地位。

蒸汽机的发明与改进

16、17 世纪时，煤作为燃料被广泛应用，刺激了煤矿开采，为解决矿井的排水问题，需要利用蒸汽动力。达·芬奇等人都先后设计、研制了蒸汽动力装置。

1698 年，英国矿山技师塞维里 (Th. Savery, 1650—1715) 制造了一具蒸汽水泵，这是一个人工操作、利用蒸汽压力排出管中水的简单装置。

1690 年，法国普平 (D. Papin, 1647—1712) 在德国制成第一个有活塞和汽缸的实验性蒸汽机。

英国铁匠纽可门 (Th. Newcomen, 1663—1729) 根据塞维里和普平的设计，发明了蒸汽机，并于 1712 年有效地应用于矿井排水和农田灌溉。这是一个用一只活塞的封闭圆筒式汽缸，活塞借一根杆系于一根横杆的一头，横杆的另一头连着排水泵。它和塞维里机都存在耗煤量大、效率低，只能作往复直线运动的缺点，限制了蒸汽动力的应用。



瓦特

真正能产生巨大工业效果的蒸汽机是 18 世纪 70—80 年代由瓦特发明的。詹姆斯·瓦特 (J. Watt, 1736—1819) 原为格拉斯哥大学的仪器修理技工，1759 年开始进行一系列有关蒸汽力量的试验。1763 年在布莱克帮助下发现纽可门机有相当大的热量浪费，原因是活塞每一次被冷却时，汽缸同时被冷却，事后又需重新加热。根据布莱克的比热和“潜热”理论，瓦特计算了各种引擎的耗热量，证明小引擎的耗热量最大。为了克服蒸汽的消耗，瓦特在汽缸外单独加一个冷凝器，专供废汽冷却，而主汽缸始终保持着高温。瓦特经多次失败，终于在 1769 年制成一台“单动式蒸汽机”，1782 年又研制了动力大、能使所带动的机器作旋转动作的蒸汽机，后来又增加了飞轮和离心调速装置，蒸汽机便达到了近代水平。

卡诺循环与热机理论

19世纪初，蒸汽机在工业、交通运输中的作用越来越重要，但关于控制蒸汽机把热转变为机械运动的各种因素的理论却未形成。法国军事工程师萨迪·卡诺（S. Carnot, 1796—1832）于1824年出版了《关于火的动力的思考》一书，总结了他早期的研究成果。卡诺以找出热机不完善性的原因作为研究的出发点，阐明从热机中获得动力的条件就能够改进热机的效率。卡诺分析了蒸汽机的基本结构和工作过程，撇开一切次要因素，由理想循环入手，以普遍理论的形式，作出关于消耗热而得到机械功的结论。他指出，热机必须在高温热源和低温热源之间工作，“凡是有温度差的地方就能够产生动力；反之，凡能够消耗这个力的地方就能够形成温度差，就可能破坏热质的平衡。”他构造了在加热器与冷凝器之间的一个理想循环：汽缸与加热器相连，汽缸内的工作物质水和饱和蒸汽就与加热器的温度相同，汽缸内的蒸汽如此缓慢地膨胀着，以致在整个过程中，蒸汽和水都处于热平衡。然后使汽缸与加热器隔绝，蒸汽绝热膨胀到温度降至与冷凝器的温度相同为止。然后活塞缓慢压缩蒸汽，经过一段时间后汽缸与冷凝器脱离，作绝热压缩直到回复原来的状态。这是由两个等温过程和两个绝热过程组成的循环，即后来所称的“卡诺循环”。

卡诺根据热质守恒思想和永动机不可能制成的原理，进一步证明了在相同温度的高温热源和相同温度的低温热源之间工作的一切实际热机，其效率都不会大于在同样的热源之间工作的可逆卡诺热机的效率。卡诺由此推断：理想的可逆卡诺热机的效率有一个极大值，这个极大值仅由加热器和冷凝器的温度决定，一切实际热机的效率都低于这个极值。



卡诺

卡诺的研究具有多方面的意义。他的工作为提高热机效率指明了方向；他的结论已经包含了热力学第二定律的基本思想，只是热质观念的阻碍，他未能完全探究到问题的最终答案。由于卡诺英年早逝，他的工作很快被人遗忘。后来，由于法国工程师克拉珀珑（B. P. E. Clapeyron, 1799—1864）在1834年的重新研究和发展，卡诺的理论才为人们所注意。克拉珀珑将卡诺循环在一种“压（力）-容（积）图”上表示出来，并证明卡诺热机在一次循环中所做的功，其数值恰好等于循环曲线所围的面积。克拉珀珑的工作为卡诺理论的进一步发展创造了条件。

热力学的诞生

在发现了能量守恒和转化定律，并且对热的本质的认识也有了改变之后，人们对热现象的研究主要表现在下述两个方面：

首先，虽然科学家们已经认识到热是一种运动，但并没有详细研究热运动。他们只是根据能量守恒定律来考虑热能转化为功的本领，他们研究热运动能量的特点（与力学、电学的等等其他形式的能量相比较）和运动的热形式转化成其他形式的特点。由此，导致了物理学的一个专门分支——热力学的建立。建立热力学的功劳主要归于德国物理学家克劳修斯（R. Clausius, 1822—1888）和英国物理学家威廉·汤姆孙（即开尔文）（W. Thomson, L. Kelvin, 1824—1907）。

还在 1850 年，即发现能量守恒定律后不久，克劳修斯写就了一篇论文，在论文中描述了他基于热是运动的概念对热机的工作原理所进行的研究。克劳修斯认为，当热机工作时，并不是把从加热器获得的全部热量都交给了冷却器，而是有一部分热量转化为热机所作的功。

一般说来，当给予某个物体一定热量 ΔQ 后，该物体将对外作功 ΔA ，同时使自己的内能改变 ΔU ，因为它的温度、体积和整个状态都发生了改变。能量 U 称为物体的内能。考虑到能量守恒和转化定律，可以写成 $\Delta Q = \Delta A + \Delta U$ 。这意味着，赋予物体的热量被用于增加它的内能和对外作功。克劳修斯把这一原理称之为热的力学理论的基本原理。后来它被称为“热力学第一定律”。



开尔文

在研究热机的工作原理时，克劳修斯同意卡诺的看法，即为了使热机工作，必须有加热器、冷却器和工作物质。他与卡诺的区别在于，他认为从加热器获取的能量中有一部分交给了冷却器，这是白白浪费的。但是，克劳修斯指出，虽然卡诺是从对热的本性的错误认识出发的，但他仍然得出了一个正确的结论，即任何热机的效率都一定小于卡诺可逆机的效率，后者只与加热器和冷却器的温度有关（卡诺原理）。

但卡诺对这一原理的证明是错误的，因为他的依据是存在热质。克劳修斯指出，只要依据人们以前未曾注意到的热的某种一般特性就可以证明卡诺原理。这

一特性在于，热“通过由热体往冷体的过渡而始终趋向于温差下降”。克劳修斯把这一原理称之为“热的力学理论的第二个基本原理”。

稍晚，克劳修斯又给出了上述原理的稍有不同的另一种说法：必须有某种补偿，热才能从较冷的物体过渡到较热的物体；也就是说，这种过渡必定伴随着其他物体的某些变化的发生，例如它们的状态、体积、温度的改变。这个一般原理后来被称为“热力学第二定律”。

几乎与克劳修斯同时得出类似结论的还有英国物理学家威廉·汤姆孙。用现代语言来说，汤姆逊的表达形式如下：仅仅依靠将单一物体冷却到低于周围物体中最冷物体的温度来连续地获取功是不可能的。

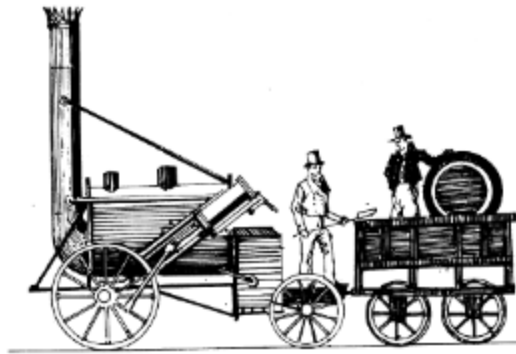
后来人们又给出了热力学第二定律的其他一些表达形式。这些表达形式都是等效的，我们在这里只指出其中的一种表达式：制造第二类永动机是不可能的。所谓第二类永动机就是能从周围物体汲取能量而不断做功，即只依靠使周围物体冷却而作功的设备。

蒸汽机与产业革命

自从 1782 年瓦特发明了现代蒸汽机的原型机，直到 1800 年才实现蒸汽机的工业化生产，因为在这 18 年里，需解决工艺方面的问题和大规模投产的资金问题。首先要解决的工艺问题是漏气问题。瓦特利用加工炮筒的镗床解决了加工气缸的精度要求。其次，蒸汽机输出的是动力，要使被它带动的工具机作功，还必须解决蒸汽机的往复运动与工具机轮子的旋转运动间的连接问题，这被瓦特发明的曲轴解决了。由于泄密，别人抢先登记了专利，瓦特便另外发明了行星轮装置予以解决。至此，瓦特完成了从动力机到工具机的生产技术体系。

要大规模生产蒸汽机，必须投入大量的资金，瓦特就去求助企业家罗巴克和布尔顿。布尔顿把瓦特请到自己工厂里，建立布尔顿—瓦特商会，专门制造蒸汽机，并在一家工厂里试用成功。从 1785 年开始，蒸汽机投入生产。

经过不断改进的瓦特蒸汽机与其他蒸汽机相比，提高工效 5 倍，节约燃料 75%，且能与任何工具机连接。蒸汽机的出现大大改变了工业生产的面貌。1807 年美国工程师富尔顿（R. Fulton, 1765—1815）利用英国制造的蒸汽机建造了“克莱门梭”号轮船，定期航行于哈得逊河上。这种以蒸汽为动力的轮船不仅跑得快、载得重，而且改变了帆船“靠天行船”的被动局面，促进了航运事业的发展。到 19 世纪 30 年代，以轮船为主的内河航运、近海甚至远洋航运事业都很发达。在陆上运输方面，1825 年英国工程师史蒂文逊（G. Stephenson, 1765—1848）铺设了英国第一条铁路。短时间内，铁路就覆盖了欧洲与美国。



史蒂文逊发明的火车头
(大轮是由蒸汽机带动的飞轮,车厢里装的是煤,大桶里装的是水)。

1760—1840年期间,由于广泛使用蒸汽机,在英国出现了从以农业和手工业生产为主的封建主义经济向以工业和机器生产为主的资本主义经济发展的产业革命。这一革命不仅深刻地改变了社会的物质生产状况,而且产生了社会变革(城市的兴起,工人阶级和资产阶级的出现,科学技术得到广泛应用等等),使英国全面进入了资本主义社会。英国的产业革命又波及欧洲大陆,先是比利时,后是法国、德国都实现了工业化。20世纪初,美国也实现了工业化。日本通过明治维新的变革,也实现了工业化。

从低温物理到高温超导

18世纪时,由于化学工业的发展对气体的液化不断提出新的要求。从18世纪末到19世纪中叶,通过降温和压缩的办法先后实现了氨、氯气、硫化氢、二氧化硫、乙炔、二氧化碳等气体的液化。到1854年,除了氢、氧、氮等几种气体外,当时已知的其他气体都能被液化。而用增加压力的办法企图使氢、氧、氮等几种气体液化的一切实验都失败了,从而使这些气体获得了“永久气体”的称号。

1863年,英国化学家安德鲁斯(Andrews)发现了“临界温度”。1869年,他又指出所谓“永久气体”只不过是临界温度很低的气体,只要找到能获得更低温度的方法,它们也是可以被液化的。这就为“永久气体”的液化指明了正确的方向。

1852年,焦耳和威廉·汤姆孙在研究气体的内能与体积变化的关系时,发现了“焦耳—汤姆孙效应”,即充分预冷的高压气体,通过多孔塞在低压空间绝热膨胀后,一般要发生温度变化。这就为获得低温提供了一个新的途径。1875—1880年,德国工程师林德(K. Linde, 1842—1934)根据焦耳—汤姆孙效应,采用“循环对流冷却”的方法,制成了气体压缩式致冷机,发展了气体液化技术,并导致氧、氮和氢液化的成功。

1908年,荷兰物理学家昂纳斯(H. K. Onnes, 1853—1926)在莱顿大学他所建立的低温实验室里实现了1.15K的低温,将刚发现不久的氦气液化,从而消

除了最后一种“永久气体”。1911年，昂纳斯用液氮冷却水银，当温度下降到 -269°C 左右时，发现水银的电阻完全消失，这种现象就称为“超导电性”（简称超导）。为了证实电阻达到零，他们将一个铅环放在磁场中，使之冷却到超导转变温度以下，然后突然撤去磁场，结果发现铅环中的感生电流能持续流动下去。1933年，荷兰迈斯纳（K. W. Meissner, 1891—1959）又发现，处于正常态的物体在外磁场中，其内部存在有磁力线，但当它冷却到超导转变温度以下时，磁力线立即被排斥出去，这就是超导体的完全抗磁性，亦称“迈斯纳效应”。

由于超导电性在工业和科技领域展现的诱人前景，人们对超导材料情有独钟。但是，长期以来从正常状态转变为超导态的临界温度太低，大大限制了超导的应用。这就促使人们寻找高临界温度的超导（即“高温超导”）材料。“低温”超导材料主要是多种金属的合金，如铌锆合金、铌钛合金、铌锡合金。1986年1月，瑞士苏黎世IBM研究实验室的科学家用钇—钡—铜氧化物获得了 -243°C 的超导转变温度，从而掀起了世界性的高温超导研究热潮。目前，高温超导材料的应用正朝着大电流应用（强电应用），电子学应用（弱电应用）和抗磁性应用三个主要方向发展。超导造福人类的时代即将来临。

静电和静磁研究

16世纪英国御医吉尔伯特（W. Gilbert, 1544—1603）比较系统地研究了静电现象。他认为“随使用一种金属制成一个指示器……很小心地把它放在支架的尖端上……在这个指示器的一端，移近一个轻轻摩擦过的琥珀或者光滑的（或磨过的）宝石，这指示器就会立即转动。”吉尔伯特的工作停留在定性的阶段，进展不快。

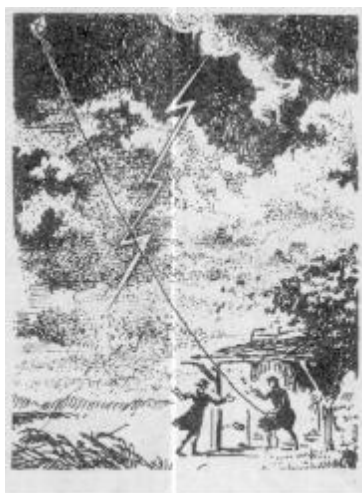
18世纪后期，贝内特发明验电器，这种仪器一直沿用到现在。它可以近似地测量一个物体上所带的电量。另外，库仑发明了扭秤，用它来测量静电力，推导出库仑定律，并将这一定律推广到磁力测量上。

科学家使用了验电器和扭秤以后，静电现象的研究工作就从定性走上了量化的道路。



库仑

古代对自然界出现的各种电现象，不了解它们内在的联系，认为它们是各不相干的。如摩擦起电被认为是由于一种“流体”而引起的；生物电被归结为肌肉的力量。有些现象实在无法解释，只能求助于神的力量。如地中海航行者认为，在暴风雨天气中，出现在船的桅杆上的光辉是保护神爱尔摩在显灵。随着人类对电现象的探索，逐渐发现自然界中许多电现象出于同一根源。据说 1751 年，法国有位科学家在研究电鳐放电现象时，不小心被鱼放电击昏。待清醒后感到其与摸莱顿瓶受到的电击一样，他猜测这两者可能是同一种自然现象。1752 年，美国社会活动家富兰克林（B. Franklin, 1706—1790）用风筝将雷电引了下来，把“天电”收集到莱顿瓶中，从而弄明白“天电”和“地电”原来是一回事。



富兰克林的风筝实验

在电的本质问题上，起初流行一种所谓“二流体论”，认为电有两种，一种是摩擦玻璃棒所得的“玻璃电”；另一种是摩擦琥珀所得的“琥珀电”。后来富兰克林对此提出异议，他认为电只有一种，即所谓“单流体学说”。

经过长期对自然现象的观察和研究，人们对静电现象有了一定程度的认识。但是对电的本质问题，一直到研究物质结构后，才算比较清楚。

对磁现象进行较系统研究的也是吉尔伯特。他在 40 岁左右开始研究磁石和琥珀的性质。《磁学》是他的一部名著。伽利略和开普勒对这部著作有较高的评价。吉尔伯特详细地研究了磁石的吸引和排斥，指向南北的性质，磁偏角和磁倾角等。吉尔伯特认为磁石指向南北的原因是地球本身，地球就是一块大磁石。他用天然磁石加工成球形，模拟地球，并且用许多小磁针放在上面，它们的指向跟在地面上不同位置的指南针的指向相仿。

吉尔伯特提出把磁针排列的方向用粉笔画在球形磁石上，就形成一些子午圈，它们会聚到磁石上两个相反的端点，称为“磁极”。他又说：小地球的力向四面八方延伸……每当铁或其他磁体在它影响所及的范围内出现时，就受到吸引，而且越靠近磁体，吸引力就越大。这实际上已迈向“场”的概念。

吉尔伯特还对琥珀吸引物体的性质作了研究，提出了“电吸引”这个名词，并对磁力和电力作一比较。他认为两者是不同的。磁石总能吸引磁石或铁，琥珀

要摩擦后才能吸引物体；磁石只能吸引少数几种物质，而带电体能吸引多种物质；磁石有两个区域吸引磁体，带电体吸引物体时，朝着一个中心区域。

对静电现象进行深入研究并总结出科学定律的是法国物理学家库仑（Ch. — A. deCoulomb, 1736—1806）。1784年，库仑参照米切尔在1750年使用的扭秤和自己对扭力的知识，设计了一台库仑扭秤，用它作了一系列实验。库仑首先确定电荷之间的排斥力遵循反平方律，然后再推广到电荷之间的吸引力。库仑得到的反平方律的误差是4%，就是排斥力反比于 $r^{2.04}$ ，吸引力反比于 $r^{1.96}$ 。特别值得一提的是，在当时没有公认的测量电量方法的情况下，库仑根据对称性，采用一个巧妙的方法来比较不等量电荷之间的效果。库仑认识到两个大小相同的金属球，一个带电，一个不带电，两者互相接触后，各自带原来电量的一半。库仑用这个办法依次得到了带有原来电量的二分之一、四分之一、八分之一、十六分之一等等的电荷。库仑证明，如果其中一个球带电量减少一半，那么两球的作用力就减小到原来的二分之一；如果两个球带电量都减少一半，那么两球的作用力就减小到原来的四分之一。库仑概括了反平方律以及力和电量的关系，得出公式

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

式中 K 是常数， q_1 、 q_2 分别是两球的电量， r 是两球的中心间距。这就是著名的“库仑定律”。在库仑前后，还有好几个物理学家曾从事反平方律的研究，有的方法更巧妙，结果更好。例如卡文迪许早于库仑在1773年得出反平方律，误差只有2%。但是库仑第一个明确得出电作用力和两个带电体电量之间的定量关系。

电源的发明

自然界存在着磁的载体——磁铁，这给磁学研究带来很大方便；然而，自然界却不存在电的载体（带电粒子除外），必须通过人工方法才能获得较大量而又较稳定的电荷及电流，这就是人们不断探索各种起电方法和发明各种电源的原因。

大约在1660年，德国的格里凯发明了第一台能产生大量电荷的摩擦起电机。他将一个足球大小的硫磺球支在一根轴上，让它自由转动，并用手掌在球面上摩擦，从而获得越来越多的电荷。

法国皇家花园的管家迪费1733年发现绝缘的金属也可以通过摩擦的办法起电。他否定了吉尔伯特、格雷等人的关于一切物体可以分为“电的”和“非电的”的论断，认为所有物体都可以摩擦起电。他甚至极其勇敢地以自己的身体，即所谓“非电的”身体来作带电实验。他让助手把自己用绝缘丝悬吊在天花板上，使自己的身上带电，当助手靠近他时，迪费感到针刺般的电击痛，并产生火花放电及噼噼啪啪的声响。这表明人体这种“非电的”物体也可以带电。迪费还改进了验电器，用金箔代替金属棒，并用它对带电的玻璃棒及琥珀进行试验，发

现不同的材料经摩擦后所产生的电是不同的。迪费将玻璃上产生的电命名为“玻璃电”，将琥珀上产生的电命名为“树脂电”。为解释这两种不同的电，提出了二元电液理论。

荷兰莱顿大学的物理学教授穆申布鲁克（P. van Musschenbroek，1692—1761）研究了电在空气中消失的现象。为了寻找一种保存电的方法，穆申布鲁克于1745年做了这样一个实验：将一支枪管悬挂在空中，用起电机与枪管相连，枪管中引出一根铜线，铜线浸入一个盛有水的玻璃瓶中。他让助手一只手握着玻璃瓶，自己在一旁使劲摇动起电机。这时助手的另一只手不小心触到枪管上，猛然感到一阵强烈的电击，高喊了起来。于是，穆申布鲁克与助手互换了一下，结果他也产生了同样的“恐怖感觉”。由此得出结论：把带电体放在玻璃瓶内可以把电保存下来。当时还搞不清楚起保存作用的究竟是玻璃瓶，还是瓶子里的水？后人就把这种能蓄电的瓶子称作“莱顿瓶”。莱顿瓶的发明，为科学界提供了一种贮存电的有效的方法，为进一步深入研究电的现象提供了一种新的强有力的手段。

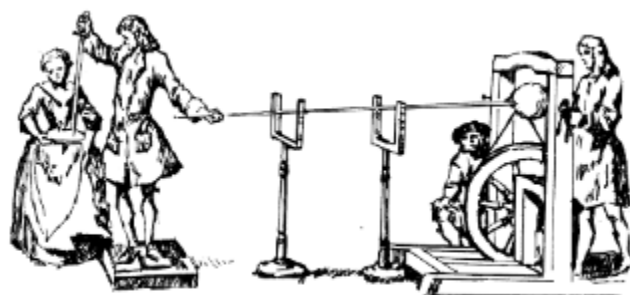
1786年9月20日，意大利波洛尼亚的一位解剖学教授伽伐尼（L. A. Galvani，1737—1798）和他的两个助手正在作青蛙解剖实验，随手将青蛙放在解剖桌上，这时一名助手不慎将手中的解剖刀的刀尖触到了一只蛙腿的神经上，顿时青蛙的四条腿猛烈地发生痉挛。站在旁边的另一名助手同时看到放在一旁的起电机跳起了一个大火花。伽伐尼重复了这个实验，观察到同样的现象。之后，伽伐尼又以严谨的科学态度，选择各种不同的条件，在不同的日子里重复了这类实验，结果青蛙腿都发生痉挛。由此得出，动物体本身内部存在着一种“动物电”。只要用一种以上的金属与之接触，这种电就能激发出来，犹如莱顿瓶放电一样，从而引起了动物体肌肉的运动。而且这种动物电与普通的摩擦电是一样的电，只是起因不同而已。伽伐尼还据此制成了伽伐尼电池。伽伐尼的发现惊动了当时欧洲的学术界，意大利巴维亚大学的自然哲学教授伏打（C. A. Volta，1745—1827）大为赞赏，称伽伐尼的发现“在物理学和化学史上，是足以称得上划时代的伟大发现之一。”



伏打

伽伐尼提出的“动物电”被不少人接受，因为那时人们自然地联想到海洋中那些带电的鱼，诸如电鳗，电鳐，似乎别的动物体内也贮藏着这种动物电，但是伽伐尼的观点也受到一部分学者的挑战。伏打就不同意伽伐尼关于动物电的观点，1792年他先用实验证明伽伐尼电的本质是两种不同金属与湿的动物体连接

在一起而引起的，蛙腿只是起到验电器的作用。之后，伏打花了3年时间，用各种金属搭配做了许多实验。他在一次实验中将许多金属排列成一个序列，其次序如锌、锡、铅、铜、银、金、……等，这就是著名的“伏打序列”。他发现只要按这个序列，将前面的金属紧接着下一种金属搭配起来，相互接触，那么前面一种金属就带正电，后面一种金属则带负电，无一例外。1800年，伏打据此制成了有名的“伏打电堆”：他用30片、40片、60片甚至更多的铜片，让每1片铜片与1片锡片接触，形成铜片与锡片两两成组。然后，在一组组的金属片中充入水，或导电性能比纯水更好的食盐水、碱水，或填上一层用这些液体浸透的纸或皮革，就能产生相当多的电荷。伏打不仅用这个电堆产生了同莱顿瓶里一样的电，而且证明了它明显地具有反复产生的性能，把电堆的两端用金属导线连接起来可以获得持续的电流。伏打的成就深得各界的赞赏。伏打电堆的发明，使人们第一次获得稳定而持续的电流，这就为科学家从研究静电现象到研究动电现象提供了坚实的技术基础。



18世纪时的电学表演

欧姆定律的提出



欧姆

1820年7月奥斯特发现了电流的磁效应，只经过4个月，安培就建立了安培定律。德国物理学家欧姆（G. S. Ohm, 1787—1854）则从另一方面进行探索，研究导线中的电流遵循的规律。他受到热流规律（一根导热杯中两点间的热流大小正比于这两点的温度差）的启发，推想导线中两点之间的电流大小也许正比于这两点之间的某种驱动力。欧姆把这种未知的驱动力称作“验电力”，也就是现在所说的“电势差”或“电压”。欧姆在这个设想的基础上，作了一系列实验，不过实验遇到了不少困难。起初，欧姆采用伏打电堆作电源，因工作不稳定，效

果不理想。后来改用温差电池，才获得了稳定的电流。第二个困难是电流大小的测量。欧姆原来利用电流的热效应，通过热胀冷缩方法来测量电流的大小，但是没有取得理想的效果。后来他巧妙地利用电流的磁效应，设计了一个电流扭秤，才有效地解决了这个问题。欧姆用一根金丝悬挂一根水平放置的磁针，待测的通电导线放在磁针的下面，并和磁针平行，用铋—铜温差电池作电源。欧姆反复作了多次实验，得到了如下关系：

$$X = \frac{a}{b + x},$$

式中 a 、 b 是常数，分别和电源的电动势和内电阻相对应； X 是磁针偏转角，和导线中电流强度相对应； x 是导线长度，和外电路的电阻相对应。这是欧姆定律的最早形式，发表在 1826 年德国《化学和物理学杂志》上，论文题目是“金属导电定律的测定”。1827 年 5 月，欧姆写成《伽伐尼电路的数学论述》一书，把这个规律总结成下述形式：

$$S = \gamma E,$$

式中 S 就是导线中的电流强度， γ 就是电导率， E 就是电压，这就是欧姆定律，后来人们把它整理成

$$U = IR.$$

电流磁效应的发现

从 18 世纪 30 年代以来，关于闪电改变钢铁物件磁性的现象已屡见报导。1751 年，富兰克林发现莱顿瓶放电能使钢针磁化。19 世纪初，戴维观察到磁铁能够吸引或排斥电极的碳棒之间的弧光，并使弧光平动地绕转。这些都是电和磁之间相互联系的早期发现。但是，由于吉尔伯特和库仑都断言电和磁之间不可能有什么关系，妨碍了人们对这类现象作深入的研究。而丹麦物理学家奥斯特

(H. Ch. Oersted, 1777—1851) 关于电流的磁效应的发现，揭开了这两种现象的内在联系，使电磁学的研究进入一个迅速发展的时期。

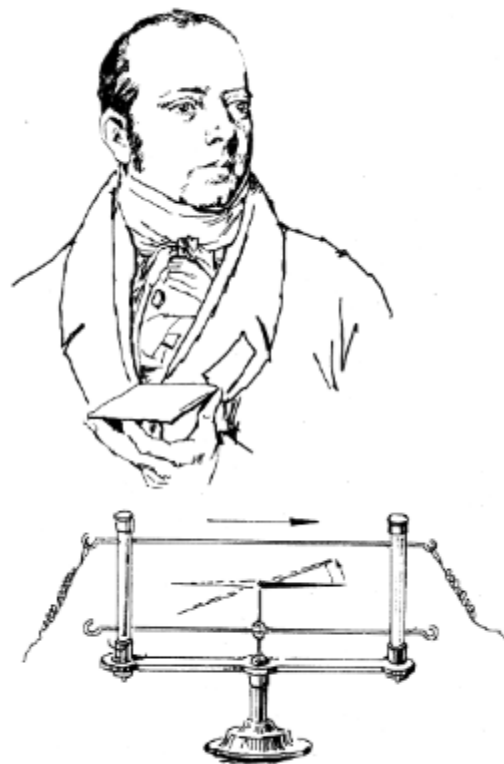
奥斯特受到德国哲学家康德关于自然力都源于共同的基本力，以及基本力向其他各种力转化思想的影响，相信电、磁、光、热和机械运动等自然现象之间存在着内在联系。富兰克林的发现更使他坚信电与磁的转化不是不可能的，关键是要找到转化的具体条件。

奥斯特从自己和前人沿着电流方向寻找磁效应的失败中，想到这一效应可能像电流通过导线时所产生的热和光那样是向四周散射的，是一种侧向作用，所以应当把磁针放在导线的上下、左右进行观察。1820 年 4 月在一次关于电和磁的讲课快结束时，他抱着试试看的心情把很细的铂丝与玻璃罩中的磁针都沿磁子午线方向放置，然后接通伽伐尼电池，发现铂丝附近的小磁针向垂直于导线的方向

偏转过去。这个现象虽然没有引起听众的注意，却使奥斯特十分激动。在此后 3 个月的时间内，他先后作了 60 多个实验，除了把磁针放在不同的位置考察电流对它的作用方向和强弱外，还把玻璃、金属、木头、水、树脂、陶器和石头等放在导线和磁针之间进行观察，发现这些非磁性物质都不妨碍电流对磁针的偏转作用。

1820 年 7 月 21 日，奥斯特发表了题为“电的冲突对磁针的作用的一些实验”

一文，公布了他的重要发现。他认为，在通电导线的周围产生了一种横向的环绕电流的“电冲突”，它可以透过所有非磁性物体，但却被磁性物体所阻抗，从而推动磁性物体发生偏转，这就是电流的磁效应。



奥斯特及奥斯特发现“电流磁效应”
的实验装置

奥斯特的发现既证实了电与磁之间相互联系的客观存在，又在长期以来已为人们所熟悉的沿着两个物体连线方向的相互作用之外，发现了沿垂直方向起作用的一种旋转力，这是对中心力观念的有力冲击。

从右手定则到电动力学

1820 年 8 月间，法国物理学家阿拉果（F. Arago, 1786—1853）在瑞士得知奥斯特发现电流的磁效应的消息，敏锐地感到这一成果的重要性，迅即于 1820

年9月初从瑞士赶回法国。刚回到巴黎不久，就向法国科学院报告了奥斯特的这个最新发现。阿拉果的报告立即在法国科学界引起了巨大的反响。当时，科学上极其敏感、最能接受他人成果的法国物理学家安培（A. M. Ampere, 1775—1836）对此作出了异乎寻常的反应。第二天就重复了奥斯特的实验，并加以发展。一周后（9月18日）向法国科学院报告了第一篇论文，阐述了他重复做的电流对磁针作用的实验，并提出了圆形电流产生磁性的可能性。安培还在这个实验中发现磁针转动的方向与电流方向的关系服从右手定则，后人称它为“安培右手定则”。此后安培又创造性地发展了实验的内容，研究了电流对电流的作用，这比奥斯特的实验大大前进了一步！9月25日他向法国科学院提交了第二篇论文，阐述了他用实验证明了两个平行载流导线，当电流方向相同时互相吸引，当电流方向相反时互相排斥。以后，安培又研究了各种形状的曲线载流导线间的相互作用，并于10月9日向法国科学院提交了第三篇论文。安培花了二、三个月时间集中研究电流之间的相互作用。他将极其精密的实验技巧和相当高超的数学知识结合，提出了1个假设，做了4个实验。这4个实验设计得十分巧妙，采用的都是示零法。它们证明了①电流元具有矢量性质，即许多电流元的合作用等于各单个电流元所产生的作用的矢量叠加；②作用在电流元上的力是与它垂直的；③各电流元的长度和相互距离增加同一倍数时，作用力不变。安培提出的1个假设是，两个电流元之间的相互作用力是在它们的连线方向上。在此基础上，安培总结得出两电流元之间的作用力与距离平方成反比的公式，即提出了著名的安培定律。



安培及安培研究“电流对电流的相互作用”的实验装置

安培并没有满足于此，于1821年1月前后，又提出了著名的分子电流假设，认为每个分子的圆电流形成一个小磁体，并以此作为物体宏观磁性形成的内在根据。安培还对比了静力学和动力学研究的对象及其名称，提出研究动电的理论应称为“电动力学”。他总结了当时有关动电的理论研究，于1822年发表了“电动力学的观察汇编”，1827年发表了“电动力学理论”。在安培得出电流元相

互作用公式之前，法国科学家毕奥(J. B. Biot, 1774—1862)和沙伐尔(E. Savart, 1791—1841)发表了题为“运动中的电传递给金属的磁化力”的论文，阐述了载流长直导线对磁极的作用反比于距离 r 的实验结果。后来法国数学家拉普拉斯(P. S. Laplace, 1729—1827)用绝妙的数学分析，把上述实验结果提高到理论，得出了毕奥—沙伐尔—拉普拉斯定律(简称毕—沙—拉定律)，给出了电流元所产生的磁场强度的公式，阐明电流元在空间某一点所产生的磁场强度的大小正比于电流元的大小，反比于电流元到该点的距离，磁场强度的方向按右手螺旋法则垂直于电流元和场点的距离。

从1820年7月21日奥斯特发表电流的磁效应到12月4日安培提出安培定律，仅仅经历了4个半月，但电磁学却经历了从现象总结到理论归纳的大飞跃，从而开创了电动力学的理论。这些成就反映了当时杰出的物理学家的敏捷思想以及无与伦比的数学水平，也反映了他们锲而不舍的科学钻研精神。

“十年磨一剑”——法拉第对电磁感应的研究

1820年奥斯特发现了电流的磁效应，它引起了英国物理学家迈克尔·法拉第(M. Faraday, 1791—1867)的兴趣。1821年法拉第演示了一根通电导线绕磁极旋转的实验。电力能转变成机械力，那么，机械力能不能转变为电力呢？法拉第下定决心，要解决这一问题。他在日记本上写着：“转磁为电”。他苦苦思索，千方百计地设计各种实验，但却一次又一次失败。在整整10年的岁月里，法拉第一直在探索着。

1831年8月29日对法拉第来说，是个终生难忘的日子。他用软铁焊

接成圆环，铁环的外径是6英寸，厚 $\frac{7}{8}$ 英寸。环的半边上绕3个线圈，连

起来就成为1个大线圈，分开就是3个小线圈。每个线圈用24英尺铜线绕成，再用棉线将导线隔开，包上棉布，使导线之间、导线与铁环之间都绝缘。环的另一边用相同的铜导线60英尺，以相同的方法和同样的方向绕在上面，做成另一线圈。两个线圈的两端各相隔半英寸左右。后一线圈连在3英尺远的电流计上。当法拉第将大线圈接上电池时，电流计的指针突然偏转。但是，指针晃动一下就停止了。当他打算把电池拆掉时，指针又偏转了，可是偏转的方向相反。



法拉第

法拉第继续做各种试验，他把电流计从后一线圈上拆下，接到大线圈的一个线圈上，大线圈的另外两个线圈接上电池，这时指针的偏转大多了；

法拉第又把电池的两极对调，发现电流计指针反向偏转；他又多加几节电池，重复上面实验，指针偏转更大……

法拉第并不满足于这些实验取得的成就，他坚信磁能够转化为电。几星期后，他抛开电池，在一个纸做的空心圆筒上，用 220 英尺铜线分层绕了 8 个线圈，再连成 1 个大线圈，并把它接到电流计上。当一块条形磁铁插进空心圆筒时，电流计指针摆动了，“转磁为电”的理想终于实现。

1831 年 10 月 28 日，法拉第将一铜盘放在永久磁铁的两磁极之间，从铜盘的轴心和边缘引出两根导线，转动铜盘时，两根导线上产生稳恒电流。这就是最原始的发电机。它的重大意义是不言而喻的，发电机的发明使人类从蒸汽时代进入电气时代。

麦克斯韦建立电磁场理论

经典力学以质点运动和超距作用作为讨论问题的基石。受力学的影响，许多物理学家把电磁力的作用也归之于超距作用。法拉第从实验中发现电或磁的相互作用和它们之间的媒质有关，这使他领悟到电磁力不可能是一种超越空间、且和媒质无关的超距作用。法拉第提出了场的模型。他认为带电体或磁体在周围空间产生电场或磁场，电作用或磁作用是通过场传递到别的带电体或磁体的。



麦克斯韦

法拉第的场模型，突破了经典力学的机械论框架。年青的詹姆士·克拉克·麦克斯韦（J. C. Maxwell, 1831—1879）对此发生浓厚兴趣，正如他以后所说的那样，他主要是抱着替法拉第的观念提供数学基础的希望，来写作论著的。麦克斯韦的工作以法拉第的场模型为基础，他看到法拉第提供的物理图象，正适合用数学手段把它抽象成理论体系。他从力线着手进行这项工作。

1855年，他给剑桥哲学学会宣读的论文中，详细地论述了法拉第引入电场和磁场概念的重要意义。1862年，发表了“论物理的力线”，阐述了位移电流的概念，位移电流是建立电磁场理论的重要环节。1864年，麦克斯韦发表了“电磁场的动力理论”，论述了电磁场具有能量，而电磁波就是能量的流动过程。在此，他已将所有的电磁现象统一起来。1873年，麦克斯韦的重要著作《论电和磁》问世，这部著作凝聚了电磁学的全部精华，对电磁场理论作了全面、系统、严密的论述。从中得出，一切电磁场变化的传播过程是以有限速度进行的，电磁场的传播速度和光速相等，因而光波也是一种电磁波。

1887年，赫兹用实验证实了电磁波的存在，并证明了电磁波和光波的一致性，从而结束了对电磁场理论的一切怀疑。麦克斯韦创立的第一个经典场论，不仅成功地导出电和磁效应整个领域的简明数学表达式，而且在许多技术部门产生了巨大影响。从设计电机、电子设备到光学仪器，都离不开麦克斯韦的基本理论。

赫兹和电磁波实验

麦克斯韦理论所包含的深刻和新颖的思想，一时难以被物理学家理解。要人们接受它，还需要有更强有力的证据。1870年以后，亥姆霍兹尝试统一当时已有的几种电磁理论，发现关键是需要证明“位移电流”的存在。1879年，柏林科学院以“用实验建立电磁力和绝缘体介质极化的关系”为题，设立了有奖征文，要求证明以下3个假设：（1）如果位移电流存在，必定会产生磁效应；（2）变化的磁力必定会使绝缘体介质产生位移电流；（3）在空气或真空中，上述两个假设同样成立。

赫兹（H. R. Hertz, 1857—1894）是亥姆霍兹的学生。1886年10月，赫兹用放电线圈做火花放电实验，偶然发现和放电线圈靠得很近的另一个开口的绝缘线圈中有电火花跳过。赫兹立即联想起7年前未完成的物理竞赛题，那是亥姆霍兹提出的一个用实验检验麦克斯韦理论正确性的难题。他向自己提出了一个新的任务：用实验检验是否存在麦克斯韦所预言的电磁波。从1886年10月25日起，赫兹开始有计划地进行实验。12月2日，他在感应圈的两个电极上各接一根12英寸长的铜棒，每根铜棒的一头接边长为16英寸的正方形锌板，另一头接黄铜小球，两个黄铜小球正相对着，当作发生器。另外，赫兹用一段硬质铜导线弯成环形，两端各接一个可以调节距离的黄铜小球，组成检波器。发生器和检波器相距10米。当发生器通电后，在检波器的两个铜球间明显产生了电火花，实验成功了！实验证明，发生器确实发出了电磁波，并且被检波器接收到。

接着，赫兹测量了电磁波在真空中传播的速率，算得其值为 2×10^8 米 / 秒，它和麦克斯韦预言不完全一致。因此，赫兹又花了好几个月的工夫，作了一系列检验性实验，检查实验结果是否可靠。其实实验毫无问题，只是赫兹计算错了。后来，物理学家本凯莱用赫兹的实验数据重新计算，得到电磁波的速率为 3×10^8 米 / 秒。1887 年 11 月 5 日，赫兹满怀信心地给亥姆霍兹寄去一篇题为“论在绝缘体中电过程引起的感应现象”的论文，阐明实验证明了法拉第和麦克斯韦理论的正确性。亥姆霍兹看后十分高兴，当即用明信片告知赫兹：“手稿已收到，好！星期四我就把手稿交付排印。”论文一发表，赫兹顿时成了科学界轰动的人物。赫兹实验庄严地宣告：人类利用电磁波的时代来到了！

交流电与直流电大战

19 世纪末，在爱迪生 (T. A. Edison, 1847—1931) 的推动下，直流电已经有了相当广泛的应用。不过在实用中，直流电存在很大缺点：不仅花费大量的铜线，而且不能作远距离输电，每平方英里地区，需要一个单独的发电机供电，很不经济。出生于克罗地亚的发明家特斯拉 (N. Tesla, 1856—1943) 考虑采用交流电来代替直流电。交流电系统使用高电压、小电流供电，然后利用变压器调节电流、电压，来适合用户需要。它的突出优点是可以用细导线实现远距离送电。

但是，这种既经济又科学的方案一提出，立即遭到爱迪生的强烈反对。出于竞争的需要，爱迪生不择手段地声称采用交流电比直流电危险得多。为了证明交流电的安全性，特斯拉特地制作了一个“特斯拉线圈”。它是由一个感应圈、两个大电容器和一个初级线圈仅几圈的互感器组成。这种装置可以产生频率很高的高压电流，不过这种高压电的电流极小，对人体不会产生显著的生理效应。特斯拉在一次记者招待会上，让交流电从“特斯拉线圈”通过自己的身体，点亮了电灯，甚至还融化了电线。在场的记者个个目瞪口呆，取得了极大的宣传效果。特斯拉的胜利，加速了交流电的推广使用。

特斯拉与爱迪生之间的矛盾是如此之深，以致当他知道自己将与爱迪生一起分享 1912 年的诺贝尔物理学奖时，他表示不接受授奖。最后，这年度的诺贝尔物理学奖便转发给了瑞典物理学家达列。

从晶体管到“硅谷”

本世纪 20 年代以来，电子学应用领域的迅速发展，促使真空管广泛使用。但是，真空管体积大、寿命短、自身功率消耗高、玻璃外壳容易破碎等缺点，促使科学家寻找新型器件。

人们早就发现某些矿石晶体（例如方铅矿）具有整流性能。1932 年，在贝尔实验室的布拉顿 (W. H. Brattain, 1902—) 等人的研究发现，整流是半导体

的一种表面性质。人们就开始把注意力集中到那些具有半导体性质的晶体（如硅和锗）的研究上。这项研究后来由于第二次世界大战爆发而中断。1946年，以肖克利（W. Shockley, 1910—）为首的研究小组又重新开始这方面的研究，并得出结论：给半导体表面施加一个电场，应该有可能控制表面附近的载荷子数目。1947年12月底，当布拉顿和巴丁（J. Bardeen, 1908—）在研究锗的响应时间时，发现了晶体管效应：在锗表面放置2个仅相隔0.005厘米的微型金属接触点，当通过其中一个点的电流有微小变化时，另一个点的功率输出就会大大改变。这表明锗晶体可用来制造放大器。这就导致“点接触型晶体管”的问世。大约过了1个月，肖克利又发明了另一种晶体管——结型晶体管，它通过将一定量杂质掺入高纯度的半导体材料（如单晶硅）中，以影响材料中的电子迁移率，从而达到放大效应。这种结型晶体管是一种层状结构，即在半导体单晶上制备2个p-n结，组成一个p-n-p（或n-p-n）结构，中间的n型（或p型）区域叫基区。两旁的两个区域分别称为发射区和集电区。这3个区都有电极引出，以便与外电路连接，从而将输入的信号放大。布拉顿、巴丁、肖克利3人由于发明了晶体管而共同获得1956年度的诺贝尔物理学奖。晶体管的发明彻底改变了电子线路的结构，并使电子计算机的制造与应用发生了革命性的变化。

本世纪40年代末开始发展的印刷电路板工艺和刚问世的晶体管制造技术的结合，导致了集成电路的发展。1958年第一块集成电路研制成功，虽然它只有1个晶体管，2个电阻和1个电阻电容网络，但它却预示着电子工业发展中一个崭新时代——微电子工业的到来。集成电路使电子线路和整机设备朝微型、低功耗和高可靠性方面前进了一大步。

晶体管的问世使电子计算机从用电子管制造的第一代，发展到第二代，而集成电路及80年代初出现的大规模集成电路，则使电子计算机很快发展到第三代、第四代，目前的超大规模集成电路已使电子计算机发展到具有人工智能的第五代。由于微电子技术的发展，极大地推动了人类社会向信息时代迈进。同时，它又引起世界范围内的新技术革命。微电子技术、信息技术、生物技术、航天技术、新能源技术、新材料技术等高技术，以其巨大的活力改变着传统的社会生产方式和产业结构，推动社会生产力飞跃发展，并成为国与国之间，特别是大国之间竞争的主要手段。世界各大国都把发展高技术和高技术产业作为立国之本和新的国策，竞相采取强有力的措施：一是制订投资大、带动力强的高技术研究发展计划，如美国的“星球大战计划”、西欧的“尤里卡”计划；二是创建高技术区，以比较集中的区域，集中的投资，集中的智力推动高技术产业化，美国的硅谷就是高技术区的著名代表。

硅谷位于美国加利福尼亚州北部的圣克拉拉县境内，一个长48千米、宽16千米的狭长地带。这里原本是个水果之乡，从50年代开始发展电子工业，到80年代初达到鼎盛时期。那里共有8000多家企业，其中集中了美国96%的半导体公司，由于半导体工业是以硅为主要原材料的，所以人们称之为“硅谷”。80年代初，硅谷年销售额超过400亿美元，成了美国经济发展最快的地区。

硅谷地区有8所大学，9所专科学校和33所技工学校，其中包括世界著名的斯坦福大学，以及圣克拉拉大学和圣何塞大学。这是一个知识密集的地区，拥有加州博士的1/6。硅谷的电子工业就是依托这里的人才优势才得以迅速发展。

例如，因发明晶体管而获诺贝尔奖的肖克利博士于 1958——1960 年“下海”，在硅谷办起了“肖克利晶体管公司”，招聘了 8 位才华横溢的年轻人，后来这 8 位年轻人都成了半导体工业的骨干，他们先后办起了半导体工业的骨干企业“仙童公司”、“阿姆科公司”和“英特尔公司”等等。尤其是英特尔公司，现已成为当今世界最大的计算机芯片制造商，目前最热销的 386、486、586 等型号的计算机芯片大多出自英特尔公司。

显微镜和望远镜

显微镜是由荷兰人列文虎克（A. vanLeeuwenhoek, 1632—1723）发明的。他用高质量的、短焦距的单片透镜制成显微镜，结构简单，一架显微镜只有一个固定的放大率，通常在 50~300 倍之间。

列文虎克利用自制的显微镜细致观察，1674 年观察了微生物和原生动物，1684 年第一个精确描述了血液中的红细胞的形状。1683 年从牙垢物中首次看到了微生物。列文虎克的单片透镜显微镜，严格说来只是一个放大镜，但这种单式显微镜的观察效果有时却比复式显微镜好，因为后者存在有色反射问题，而当时还不能消除色差。

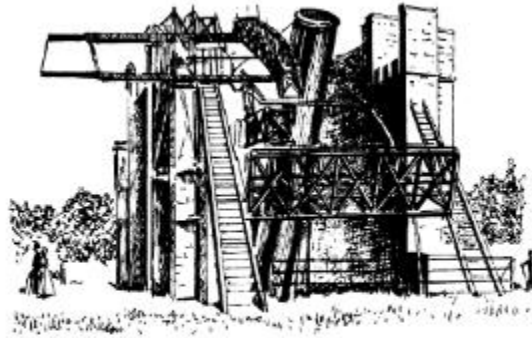
英国物理学家胡克除了发现弹性定律外，还爱好光学，动手改制了复式显微镜。这种显微镜由接物镜和接目镜两个镜头所组成，可放大 270 倍左右。胡克用这种复式显微镜观察各种物体的放大形象，并记录在 1665 年出版的《显微图记》一书中。其最有价值的发现是他在观察木栓的组织时发现了“细胞”。他不仅引入了“细胞（cell）”一词，还为以后的细胞学说的问世铺平了道路，因而是生物学发展史上的一个重要里程碑。

第一个望远镜据说是荷兰眼镜师李普塞（H. Lippershey, 约 1570—1619）在一个偶然的场合中发明的。当时他发明的望远镜的目镜是凹透镜，镜身是单筒的。为了适应人用双眼观察的特点，后制成双筒望远镜。

发明望远镜的消息立即传遍了欧洲，激励了开普勒对其作进一步的研究。他设计了新型望远镜，把目镜从过去的凹透镜改为凸透镜，制成了用两块凸透镜构成的“开普勒望远镜”。开普勒在研制望远镜的同时，对光学作了进一步研究，写成了《折光学》一书，并于 1611 年出版。书中他运用几何光学原理对望远镜作出了正确的解释。

望远镜能清晰地观察到远处景物的消息传到意大利，伽利略亲自动手用一片凸透镜和一片凹透镜制成一个“伽利略望远镜”，经过多次改进，使物像放大近千倍，并使物镜移近 30 多倍。伽利略把望远镜对着天空，他发现月亮并非光滑如镜，在月球上有山和谷；他发现银河实际上是由无数的恒星组成的；他发现木星有 4 颗主要的卫星；……伽利略将这些都写进《星际使者》一书中。他的发现为哥白尼的日心说提供了强有力的证据，这也是望远镜在科学研究中的第一次应用。

望远镜很快在天文、航海、战争中发挥了重要作用。李普塞把他发明的望远镜献给荷兰政府，作为武器，在反抗西班牙的独立战争中立了大功。



18世纪世界最大的望远镜

牛顿在色散实验的基础上，发现透镜成像的色差。为了改进望远镜的成像质量，牛顿提出应该运用与颜色无关的反射原理来制造望远镜。他于 1668 年亲自设计并制造了第一架反射望远镜，它能放大 30~40 倍。后来牛顿又制造了一个更大的反射望远镜，该镜至今仍保存在英国皇家学会的图书馆里。反射望远镜比折射望远镜具有许多实用上的优点，主要是它可以做得很大。今天世界上最大的光学望远镜都是反射式的，例如，1949 年安装在美国帕洛马山上的以赫耳命名的口径为 5 米的反射望远镜。

本世纪出现了“射电望远镜”，实际上，它不是用光学元件构成的，而是一架无线电天线。1931—1932 年间，美国无线电工程师詹斯基（K. G. Jansky，1905—1950）在研究短波收音机的噪音时，将具有高度指向性的天线指向天空各处，无意中发现，当天线指向天球上某些区域，特别是指向银河附近的时候，噪声特别响。当天线指向银河中心时，这种“宇宙噪音”达到最尖锐的程度。詹斯基是个业余天文爱好者，他的天文知识告诉他，这种“宇宙噪音”可能是某些恒星发射的无线电波。就这样，来自某些星球的太空无线电波（射电波）被詹斯基发现了。射电的发现大大拓宽了人类观察宇宙的“窗口”，并引起了 20 世纪天文学的革命。现在，射电望远镜分成可移动式及固定式两大类。可移动式射电望远镜的直径已达 100 米，而位于波多黎各一山谷中的一架美国固定式射电望远镜的直径竟达 305 米。

折射定律的确立

公元 2 世纪，古希腊的托勒玫撰写了《光学》一书，书中记载了他对折射现象的研究。他用一种装置测定了光线由空气进入水中时的入射角和折射角，并根据所测得的一系列数据，认为折射角和入射角成反比。托勒玫是第一个用实验测定折射关系的人，此后的 1000 多年时间，人们在寻找折射定律的正确形式上没有多大进展。

1611年，开普勒出版了几何光学的经典著作《折光学》一书。在书中，他指出托勒玫的折射定律只适用小于 30° 角的情况，但是开普勒本人却没有找到折射定律的正确形式。不过，开普勒关于折射定律的研究比托勒玫前进了一步，他认为折射角是由两部分组成的，一部分正比于入射角，另一部分正比于入射角的正割。

1621年，荷兰莱顿大学数学教授斯涅耳（W. Snell, 1591—1626）在一篇文章中对折射定律作了这样的叙述：对于给定的两种介质，入射角和折射角的余割之比总是保持相同的值。以数学公式表示即是，当光线从空气中以入射角 i 进入水中后，以折射角 r 产生折射，则有 $\sin r / \sin i = \csc i / \csc r = \text{常数}$ 。斯涅耳的发现打开了近代光学的大门，但当时并没有公开发表。在他去世之后，于1626年在他的遗物中找到，并公诸于世。斯涅耳的折射定律是用实验验证的，没有作理论上的推导。

1637年，法国数学家笛卡儿（R. Descartes, 1596—1650）在《光学》一书中，首次正式公布了具有现代形式的折射定律： $\sin i / \sin r = n_2 / n_1$ ，式中 n_1 、 n_2 分别为第一种媒质和第二种媒质的折射率，光线是从第一种媒质进入第二种媒质的。笛卡儿是从光的微粒说出发推导出折射定律的，他的推导基于三条假设：①在较密的介质中光速较大；②在相同的介质里，光速对各种入射角都有相同的比率；③在折射时，平行于折射面的速度分量保持不变。现在看来，①、③两条假设是错误的。

为了对笛卡儿的结论和假设作出证明，不少数学家，如哈密顿（W. R. Hamilton）和高斯（C. F. Gauss）等，都进行了努力，但是都没有得出完满的结果。法国数学家费尔马（P. Fermat, 1601—1665）在作了一些新的假设后，得出了折射定律。1657年，他提出了光在介质中传播时所走的路程取极值的“费尔马原理”，又假定光在较密的介质中速度较小，则可推出光的反射定律和折射定律，由此人们对光的运动有了更深刻的认识。光的折射定律和反射定律的确立，奠定了几何光学的基础。

关于光的本性之争

光究竟是什么的争论很早就已经开始了，直到17世纪，通过牛顿和惠更斯的争论，才逐渐明确关于光的本性的两种学说。荷兰物理学家惠更斯在前人（笛卡儿、格里马第、胡克等）工作的基础上，比较系统地提出了光的“波动说”。在1690年出版的《论光》一书中，惠更斯把光是一种流体波动的假设和光具有一定的传播速度这两点结合起来，认为光是在“以太”媒质中传播的球面纵波。从这样一种波动说出发，惠更斯能推出反射定律和折射定律。他断定，光在进入较密的透明介质时，速度要慢下来，这样就能解释光的折射现象。惠更斯还能解释某些透明晶体的双折射现象。这种奇异的光学现象是丹麦的巴塞林那斯在研究冰洲石时发现的。一束光线经过冰洲石后会分成两束，其中一束遵守折射定律，称为“寻常光线”；另一束光不遵守折射定律，称为“非常光线”。这两束光线产生了两种不同的折射，因此，人们能看到物体的两个像。

惠更斯波动说的核心，是后人以他的名字命名的“惠更斯原理”。此原理把振动介质的每一个质点都看成一个振动中心，在它的周围形成一个波。这就提出了一种绘制波前图的方法，它可以巧妙地描绘出光在传播过程中的各种状态。惠更斯的学说虽然冠以“波动”一词，但他对波动过程的基本特性却缺乏透彻的了解。例如，惠更斯没有指出光现象的周期性，这是由于他所谓的波动实际上只是一种脉冲而不是一个波列。又如，在描述波动的基本要素中，惠更斯没有提出波长的概念，更没有指出光波的波长极短这一特点，因此在说明光的直线传播时显得很勉强。正是因为惠更斯波动说存在的这些根本性缺陷，所以当这一学说遭到以牛顿为首的一派的反对后，被忽视了一个多世纪。



牛顿在研究光谱

关于光的本性问题，牛顿在 1704 年出版的《光学》一书中认为，光的直线传播是有利于“微粒说”的主要论据，因为牛顿的光微粒是按照力学定律沿直线飞行的。牛顿用一个弹性小球撞击平面时发生反弹的类比，来解释光的反射；当光从空气进入透明介质时，由于介质对光微粒的引力作用，它们的速度就发生变化，这就形成了光的折射。

不过，牛顿的“微粒说”里仍保留了“波动说”的一些要点。例如，牛顿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，这就好像投入水中的石块在水面上激起波浪一样。总起来说，牛顿对光的本性的看法虽然包含着波动性的一面，但他更倾向于微粒说的观点，而他的支持者和崇拜者们却把牛顿推举为微粒说的代表。这场关于光的本性的争论延续了 100 多年，由于牛顿的权威性，微粒说在这场争论中一直占统治地位。

波动光学发展三部曲

从 1801 年起，沉寂达 1 个世纪之久的光的波动说开始复兴，并逐渐形成理论体系完整的波动光学。这一学科的发展经历了 3 个阶段，首先是英国医生兼物理学家杨（T. Young, 1773—1829）于 1801 年进行了著名的杨氏干涉实验，并在此基础上提出了他的干涉原理。光的干涉现象是微粒说无法解释的，因为两束光微粒相遇怎么会形成明暗相间的分布？在暗条纹处那些光微粒到哪里去了？

然而，用波动说就很容易解释这一切：有亮条纹出现是因为两列光波是同相的，它们的振幅在这里互相叠加；在暗条纹处两列光波是反相的，它们的振幅互相抵消，使这些地方的净能量等于零，而两列光波的全部能量都分配在那些亮条纹处。杨还从他的干涉实验估算了太阳光中的有效波长的平均值为 $1/45000$ 英寸（相当于 5700 \AA ），这与现代的测算值 5550 \AA 相当吻合。认识到光的波长极短这一点意义重大，光的直线传播等特性都与此有关。正是这一条件，光的衍射在通常条件下才显示不出来，只有当光波遇到了针孔、狭缝等比光波波长大不了多少的物体时才会产生。杨以干涉原理为基础，建立了波动光学的基本原理，并用这一理论去解释当时已知的许多光学现象，牛顿环、衍射图象的分布等等。

光的衍射是与光的干涉同样重要的一种表征光的波动特性的现象，自从格里马第发现光的衍射现象以来，几乎没人对此作过深入的研究，连牛顿和惠更斯也没有看出这种现象的重要性。首先注意到衍射现象重要性的是法国工程师菲涅耳（A. Fresnel, 1788—1827）。1818年，他演示了小孔衍射，并用数学方法计算出由小孔衍射所产生的一圈一圈明暗相间的同心圆式的条纹分布。在此过程中，菲涅耳还创造了一种非常简便的光学处理方法——菲涅耳波带法，解决了许多复杂的光学计算问题。菲涅耳以波的干涉原理充实了惠更斯原理，从而形成了具有物理意义的惠更斯—菲涅耳原理。它是新波动说的基础，并成为今天的波动光学（又称物理光学）的基本原理。从这一原理出发，菲涅耳不仅成功地解释了光的直线传播，而且还解释了光通过小圆孔、圆屏、直边、狭缝时产生的衍射现象，并指出光波波长极短对这些现象的意义。



杨



菲涅耳

对光的衍射研究也作出过重要贡献的是德国物理学家夫琅和费（J. von Fraunhofer, 1787—1826）。菲涅耳衍射实验，其光源和光屏距衍射孔的距离都不是无限远，因而对衍射孔都有一张角，这种衍射叫“菲涅耳衍射”。夫琅和费将望远镜对准远处的狭缝光源，并让狭缝成像在目镜焦平面附近，这样，入射光与出射光都是平行光，相当于光源和光屏相对于衍射孔都移到了无穷远处。这种衍射叫“夫琅和费衍射”，它的理论处理比菲涅耳衍射简单，但却实用。因为许多平行而等间距排列的狭缝，在夫琅和费衍射条件下就成为一具衍射光栅。

在对光的干涉、衍射现象进行深入研究并推动了波动光学的建立时，对光波是一种什么性质的波动这一重要问题的研究一直悬而未决。不论是杨还是菲涅耳，在他们的波动理论中都假定光波是纵波。但是，这一观点在解释光的偏振现

象时遇到了严重困难。在对光的偏振现象作深入研究后，1817年杨提出了光可能是横波的假设，这一观点使许多困难问题都迎刃而解。光是横波的观点，使光的波动理论完成了它的最后形式。到19世纪中叶，光的波动理论已经取得很稳固的地位。

从光微粒到光量子

牛顿的光的微粒说中的光微粒，是一种机械微粒：它们是按照力学定律沿直线飞行的，这就很自然地形成了光的直线传播；这种微粒具有弹性，在撞击平面时会发生反弹，由此可以解释光的反射；当光微粒从空气进入透明介质时，由于介质对光微粒的引力，其速度发生变化，从而形成光的折射。不过，牛顿的微粒说只能解释上述这些经典的光学现象，遇到像“光电效应”之类的近代光学现象，就无能为力了。

电子在光的照射下从金属表面发射出来的现象称为“光电效应”。1902年，德国物理学家勒纳德（P. Lenard, 1862—1947）找到了光电效应的两条实验规律：①存在一个照射光的最长波长，只有短于这个波长的光的照射，才能将电子从金属表面打出来；②光的强度只决定打出电子的数目，与打出电子的能量无关。这两条实验规律无论用经典的微粒说还是波动说都无法解释。1905年，年轻的物理学家爱因斯坦应用普朗克提出的能量子概念，成功地解释了光电效应。爱因斯坦提出光辐射也是以一束一束的能量形式存在的，这种能量束称为“光量子”（简称光子）。单个光子的能量为 $\epsilon = h\nu$ ，式中 ν 是这种光波的频率， h 是普朗克常数。电子从金属表面被光子打出来是由于弹性碰撞所致，它的动能 $E_k = h\nu - W$ ，这里 W 是使电子脱离金属原子所需作的最低限度的功，称为“逸出功”。根据这个关系式可以完满地解释光电效应的实验结果。爱因斯坦假设的光子与电子弹性碰撞的情况是否存在？1923年，美国物理学家康普顿（A. H. Compton, 1892—1962）在X射线的散射实验中观测到光子和自由电子的弹性碰撞现象，即康普顿效应，从而进一步肯定了光具有粒子性。

量子论中的光子不同于牛顿微粒说中的光微粒，光子的能量是和表示波动特征的光频率相联系的，这样的光子既有波动特性，又有微粒特性，是一种具有“波粒二象性”的物质。1924年，法国物理学家德布罗意（L. V. P. R. deBroglie, 1892—）在光的波粒二象性的启发下大胆设想：既然在通常情况下表现为波动的光也具有粒子性，那么，在通常情况下表现为粒子（如电子）的物质是否也具有波动性呢？他认为这种波的波长与粒子的动量成反比，并预言了电子的波的波长。1927年，美国贝尔电话实验室的戴维孙和革末及英国物理学家G. P. 汤姆孙使用不同的方法，分别独立地证明了电子具有波动性。

颜色成因与光谱学

在人类所观察到的自然现象中，最常见的就是这个缤纷世界的五颜六色。欧洲人对于颜色的成因最早持亚里士多德的观点，即颜色不是物体的客观属性，而是人们的主观视觉印象。一切颜色都是由亮与暗、白与黑按比例混合而成。棱镜发明之后，人们看到白色的太阳光透过棱镜后，变成一条红、橙、黄、绿、靛、蓝、紫的7色光带。对于这样一种太阳光谱的形成，中世纪比较权威的解释是，太阳光进入棱镜时的角度不同，形成棱镜对这些光线的折射不同，因而形成不同的颜色。亦即棱镜的折射使白色的阳光通过时产生了颜色。1666年，牛顿对太阳光谱进行了深入研究，并进行了他自称的“判定实验”：他在一间暗室里放了两个三棱镜，让太阳光束先通过棱镜A，然后色散到一个上面有条狭缝的屏幕上，再转动A让7种色光依次通过狭缝后再经过棱镜B进到第二个屏幕上。如果颜色是因为光线进入棱镜时的角度不同形成的，那么，这7种色光通过棱镜B之后还会形成更多的颜色。但实验结果显示，7种色光通过B后仍保持原来的颜色及折射率的大小，即被A折射得最厉害的蓝、紫色光，经过B后仍然折射得最厉害；而红、橙色光在A、B两个棱镜中都折射最小。于是牛顿弄清了太阳光谱的成因：它是由7种不同颜色的色光所组成的，其中不同颜色的光具有不同的折射本领。牛顿的发现奠定了光谱学的基础。

1752年，苏格兰人梅耳维尔（T. Melvill）将食盐、硝石、钾碱等物质放进酒精灯火焰中，观察其产生的光谱。他发现，不同物质会发射出数量不同且颜色不同的光线，凡是含钠的物质都发出明亮的黄光，他把这称之为“钠线”。遗憾的是梅耳维尔的论文没有引起人们重视。继牛顿之后，夫琅和费也深入研究了太阳光谱，他用望远镜观察太阳光谱，在明亮的色带上发现了许多黑线，后人将此暗线称为“夫琅和费线”。夫琅和费本人没有能对这些暗线的成因作出明确的解释。1859—1862年间，德国物理学家基尔霍夫（G. R. Kirchhoff, 1824—1887）和化学家本生（R. W. Bunsen, 1811—1899），使用本生发明的能提供高温、不发光的气体火焰的“本生灯”，进行光谱实验。本生灯产生的高温能使许多物质（包括一些金属）被蒸发，发射出自己的光谱线。基尔霍夫和本生确定，光谱中的明线可以作为某种金属元素存在的确实标记，从而开创了现代光谱学。此外，他们发现太阳光谱中的黑线，仍是太阳上某些金属元素所发出的亮线，在通过太阳蒸汽时被吸收而形成的。由此，确定太阳大气中存在着钠、镁、铜、锌、镍等元素。这一发现具有划时代的意义，因为它开创了研究星球化学构成的新时代。



基尔霍夫

基尔霍夫进一步发现不同物质能发射不同颜色的光，而且同一种物质在不同温度和不同压力下发出的谱线也不同。1896年，荷兰物理学家塞曼（P. Zeeman, 1865—1943）观测到光谱线在强磁场中发生分裂的现象（塞曼效应）。这种现象和物质的原子结构有关，因此，塞曼效应开创了利用光谱研究物质的原子结构的新时代。早期的光谱研究只限于可见光区域，后来逐渐向红外和紫外方向发展。今天，小到分子原子，大到星球宇宙，人类对自然界的认识很大程度上都有赖于各种光谱带来的信息。

光以太与相对论

由杨、菲涅耳等人建立并发展的波动光学以及麦克斯韦的电磁场理论，都认为存在光以太。因为，若没有这种传播光波的媒质存在的话，波动是无法传播开去的，就像没有空气就不能传播声波一样。从满足波动光学、电磁场理论的要求来说，这种光以太应具有怎样的性质呢？一方面光以太应该坚固得像钢一样，才能传播以 10^{15} Hz 的极高频率作横向振动的光波；另一方面，光以太又要比空气还稀薄，这样天体才可以在其中毫无阻力地自由运行。为了寻找一种具有如此奇特性质的类比物，各种各样的设想应运而生，可是没有一种设想能自圆其说。

19世纪后期，由于光学技术的发展，天文学家和物理学家能以足够的精度去测量光速——物理世界中的最大运动速度。同时，这也促使美国物理学家迈克尔逊（A. A. Michelson, 1852—1931）和化学家莫雷（E. W. Morley, 1838—1923）提出了测量光以太存在判据的实验设想。他们认为，由于渗透在宇宙间的光以太是绝对静止的，地球相对它运动时，地面上的光源向两个不同方向发出的两束光，在经历了不同的光程差后再相会时，应该引起干涉效应并能被观测到。1887年，他们以当时技术条件所允许的足够精度进行了多次实验，却观察不到干涉条纹的移动。实验结果否定了原来关于存在光以太的设想，这就使当时的物理学家面临困难的抉择：究竟是宇宙中根本不存在光以太，还是地球没有在太空中运动？如果是后者，那么早有定论的哥白尼的“地动说”又该作何解释呢？

1905年，年轻的爱因斯坦（A. Einstein, 1879—1955）明确提出：“光以太是多余的”，并以光速不变原理和相对性原理为基础，创立了相对论（狭义相对论）。相对论是对牛顿力学的绝对时空观的一次革命，从相对论时空观看来，光的传播是不需要以太作为媒介的，光速不变原理不过是空间时间特性的一种反映。爱因斯坦根据“狭义相对性原理”——所有物理定律的运动方程对于洛仑兹变换来说都应该保持形式不变，改造了牛顿力学，把它作为一种低速下的近似，包含在相对论力学之中。同时，以经典力学为基础的热力学、统计力学、流体力学等经典力学分支，随之都得到了改造。这样，在相对论和量子论的基础上，现代物理学大厦建造起来了，并以惊人的速度蒸蒸日上。



爱因斯坦

人的活动	最高值 (dB)	理想值 (dB)
体力劳动 (听力保护)	90	低于 70
脑力劳动 (语音清晰度)	60	低于 40
睡眠休息	50	低于 30

激光与现代光学

光学作为物理学中最古老的一门基础学科，历经了 300 余年后，似乎达到了顶峰。然而，激光的出现，使停滞不前的光学展现了“柳暗花明又一村”的前景。

激光的产生起源于爱因斯坦的“受激辐射”概念的提出。通常情况下，处于高能态的粒子将“自发辐射”。1916 年，爱因斯坦提出了另一种辐射——“受激辐射”。很显然，这种辐射发出的光获得了放大，而且这种放大的光是相干光。要实现受激辐射，首要的条件是处于高能态的粒子数多于低能态的粒子数。但是，在通常条件下，却难以满足。因此，在很长一段时间里，受激辐射似乎是一种无法实现的理想状态，人们并不重视爱因斯坦所作的这一科学预言。

量子力学的建立和发展，完善了爱因斯坦的受激辐射理论。更为重要的是，人们希望获得强度高、单色性好(即波长单一)的微波，并出现了“量子电子学”。1951 年，美国物理学家珀塞尔 (E. M. Parcell, 1912—) 和庞德 (R. V. Pound) 在核感应实验中，首次实现了微波受激辐射。1954 年美国科学家汤斯 (C. H. Townes, 1915—) 等人制成了第一台氨分子束微波激光器。

1958 年，美国的肖洛 (A. L. Shawlow, 1921—) 和汤斯，苏联的巴索夫 (N. G. Basov, 1922—) 和普罗霍洛夫 (A. M. Prohorov, 1916—) 等人提出了实现受激辐射光放大的原理，发表了“莱塞” (Laser, 受激辐射光放大器的英文字头缩写) 的设计方案。1960 年 7 月，美国的梅曼 (T. H. Maiman) 利用红宝石 (一种原子体系) 作工作介质，用脉冲氙灯加以激励，首次获得了激光。由此，

汤斯、巴索夫和普罗霍洛夫共同获得了 1964 年度的诺贝尔物理学奖。肖洛则获得了 1981 年度的诺贝尔物理学奖。

第一台激光器问世后，形形色色的激光器就犹如雨后春笋般地出现，并且得到了广泛应用；产生了许多“非线性光学现象”，例如自聚焦（或自散焦）和倍频效应，形成了一门高度综合性的新学科——激光科学。它改变了传统光学的面貌，成为现代光学的重要内容。

原子论的复兴

原子论起源于古希腊时期，哲学家德谟克利特等人认为，物质是不连续的，分到最后将由一些不可再分的东西所组成。他把这种物质的基元命名为“*atomos*”（“原子”），古希腊文的意思是“不可再分的东西”。而哲学家亚里士多德等人则认为物质是连续的，世界万物是由土、空气、水、火这四种元素所组成，而天则由第五种元素“以太”所组成。

17 世纪时，英国化学家玻意耳批判了古希腊哲学家和中世纪炼金术士的“元素”观点，将化学元素科学地定义为不能再被分解的最简单物质（单质）。通过卡文迪许、拉瓦锡等许多化学家的工作，发现水可以分解成氧和氢两种元素，空气是由氧、氮、氢等元素混合而成的，燃烧（火）是碳和氧的化合，土则包含多种矿物。这样，古希腊人所谓的四种“元素”，按科学定义来看，没有一种可算得上是真正的元素了。

随着几十种元素的发现，人们又进一步提出元素是由什么组成的呢？英国化学家道尔顿在研究气体物理性质的基础上，提出了他的原子学说。他认为，化学元素是由非常微小的、不可再分的原子组成的；同一元素的所有原子，各方面的性质都相同，不同元素的原子重量不同；有简单数值比的元素原子结合时，就发生化合。这样，道尔顿的原子学说就把古希腊相互矛盾的原子论和元素说统一起来了。

在原子学说和气体分子运动论相结合的基础上，人们逐步建立起近代的原子分子学说。但是，原子和分子究竟是否存在这个根本问题，科学界、哲学界一直争论到 20 世纪初。1905 年 4 月和 5 月，爱因斯坦接连发表了两篇论文，不仅在理论上解释了 1827 年发现的布朗运动，而且提出了测定分子大小的新方法。1908 年，法国物理学家佩兰据此作出实验，测定结果证实了爱因斯坦的理论预测。这一成就迫使当时最顽固的原子论反对者奥斯特瓦耳德和马赫也不得不服输。

伦琴与 X 射线

真空放电管的发明和阴极射线的发现，引起了科学家的极大兴趣。德国物理学家伦琴（W. K. Röntgen, 1845—1923）一次在检查套管是否漏光时，偶然发

现在附近 2 米远处一涂有亚铂氰化钡（一种荧光物质）的屏幕上闪耀着青绿色的光辉。他不断挪远屏幕，所得结果都相同。他知道阴极射线绝不会在空气中走那么远，那么，这到底是什么东西呢？经过研究，发现这种新射线是由放电设备的玻璃管壁上的阴极射线所产生的，它不仅能使某些物质发出荧光，而且还能穿透玻璃、厚纸板，甚至金属，能透过黑纸使照相底片感光。伦琴称这种性质未知的射线为“X 射线”。1895 年 12 月 28 日，伦琴宣布了这一发现，并公布了 X 射线照出的手骨照片。



伦 琴

伦琴的发现震惊了整个科学界，许多物理学家转而研究 X 射线。J. J. 汤姆孙和卢瑟福证实 X 射线能使气体电离。1912 年，德国物理学家劳厄(M. T. F. Laue)，用晶体作光栅，得到了 X 射线的衍射图，证明 X 射线是一种波长很短的电磁波。1906 年，英国物理学家巴克拉 (C. C. Barkla) 发现，当 X 射线被金属散射时，其穿透本领随金属的不同而迥然不同，表明金属都有自己的“特征 X 射线”。1913 年英国年轻的物理学家莫斯莱 (H. G. J. Moseley, 1887—1915) 得出了各种金属的特征 X 射线的波长，并且发现了一个重要规律：各种元素的波长非常有规律地随着它们在周期表中的排列顺序而递减。利用这个规律，莫斯莱准确地确立了各元素的原子序数，并且发现它们恰与核电荷数相等。他的发现对于认识原子内部结构和元素周期律有很大意义。瑞典物理学家西格班(K. M. GSiegbahn) 扩展了莫斯莱的工作，发现了一系列新的 X 射线，并且精确地测定了各种元素的 X 射线谱。X 射线是研究物质结构的重要工具，且广泛应用于高分子化学和分子生物学中。

放射性的发现

X 射线发现后，许多科学家被吸引去研究这种新的具有巨大穿透力的辐射。1896 年法国物理学家贝克勒尔 (A. H. Becquerel, 1852—1908) 对一种称为硫酸双氧铀钾的荧光物质进行了研究。他把这种硫酸盐放在用黑纸包起来的照相底片上，再让它们受阳光照射。因为阳光不能透过黑纸，所以对照相底片不起作用。如果激发出的荧光中含有 X 射线，它就能穿透黑纸使照相底片感光。结果，底片感光了，他以为这是被激发出的 X 射线的作用。但是，有一次连续几天阴雨，实验无法进行，他便把上面放着硫酸双氧铀钾的底片放在暗房的抽屉里。几天后，他把底片冲洗出来，结果出乎意料：虽然未经阳光照射，底片却由于受到很强的

辐射而变得很黑。这使他异常惊奇，因为这决不是荧光或阳光所造成的。经过多次实验，判明它就是硫酸双氧铀钾中的铀。这就是最早发现的放射性现象；铀是人们第一个发现的放射性元素。



克贝勒尔

这一发现公布后，玛丽·居里（M. S. Curie, 1867—1934）很快投入了这一新的研究领域。她测量了铀的辐射强度，并发现铀的辐射强度正比于铀的数量而与其他任何因素无关。她不知疲倦地测定其他化学元素或化合物，发现钍也具有这种辐射能力。她建议把这种辐射能力叫做“放射性”。后来，她又发现沥青铀矿中的放射性比已测得的铀的放射性强得多。于是，她大胆假定沥青铀矿中存在一种比铀的放射性强得多的未知新元素。为了寻找这个未知的元素，比埃尔·居里（P. Curie, 1859—1906）同妻子玛丽·居里共同研究。他们通过繁重的劳动，从大量的沥青矿渣中去提取那个未知元素，最后发现了两种新元素，一种取名为“镭”，另一种取名为“钋”，以纪念自己的祖国——波兰。钋的放射性比铀强 400 倍，镭的放射性比铀强 200 万倍，但它们的含量极少。这个发现再次轰动了科学界。但是也有些科学家表示怀疑。居里夫妇又花了整整 4 年的时间，在简陋的工棚里，在原始的条件下，历尽千辛万苦，于 1902 年终于从几吨粗杂的沥青矿渣中，分离出 1 / 10 克的氯化镭。

镭有许多奇异的特性，它以一定的速度不断地蜕变时，能发出很强的辐射，使近旁的气体电离，使许多物质发出荧光，对生物有机体有杀伤力。



比埃尔·居里和玛丽·居里

天然放射性元素能够放射出 α 、 β 、 γ 三种射线，于是，原子不可分的观念被彻底打破了。

1902年，卢瑟福和索迪（F. Soddy, 1877—1956）提出原子自然衰变的理论，阐明放射性的本质就是放射性元素的原子自发地转变为另一种原子的过程。他们指出，天然放射性元素都以固定的寿命放出射线，逐步地转变为其他放射性元素，最后成为没有放射性的铅，结束衰变过程。这就证明了元素不是不可改变的，而是可以转化的。

阴极射线与电子的发现

19世纪中叶以来，电的应用日益广泛。由于电力工业的发展，出现了高压输电过程中的漏电问题，同时为了寻找新的电光源，人们深入研究气体中的放电现象。这个现象，早在1836年，法拉第就已注意到，他曾想试验真空放电，但因缺少获取高真空的手段未能实现。1854年，德国玻璃工盖斯勒发明了“盖斯勒真空管”。后来有人利用“盖斯勒真空管”成功地实现了真空放电，发现对着阴极的管壁上出现了美丽的绿色光辉。1876年，德国物理学家戈尔茨坦指出，这种绿色光辉是由负极上所产生的某种射线射到玻璃上产生的，他把这种射线称为“阴极射线”。

阴极射线究竟是什么？物理学家有不同的看法，有人说是电磁辐射，有人说是某种粒子流。英国物理学家瓦利（C. F. Varley, 1828—1883）和克鲁克斯（W. Crookes, 1832—1919）证明这种射线能被磁铁所偏转。1895年，法国科学家佩兰发现金属圆筒内收到阴极射线后圆筒就带负电。1897年，J. J. 汤姆孙（J. J. Thomson, 1856—1940）证明阴极射线不仅能被磁铁所偏转，而且还能被电荷所偏转，并且确定它是带负电的粒子流。他巧妙地测出了阴极射线在磁场和电场中的偏转度，求出这种粒子的荷质比 e/m 约为氢离子的2000倍，确定它的质量相当于氢原子质量的二百分之一左右。他还发现不管怎样改变放电管中的气体（空气、氢气、二氧化碳等），也不管怎样改变电极的材料（铝、铁、铂等），阴极射线粒子的荷质比总保持不变。由此可以断定这种粒子应是电极材料原子的基本组成部分，进一步的研究证明它是一切元素的原子的组成部分。J. J. 汤姆孙以“电子”命名这种粒子。

电子的发现再一次否定了原子不可分的观念，正如J. J. 汤姆孙所说，从前认为不可分的原子，现在已经由于有很小的粒子从里面跑出来而被分开。

黑体辐射与量子假说

处在不同温度和环境下的物体，都以电磁辐射形式发出能量。而理想物体——黑体发射电磁辐射的能力，比同温度下的其他物体强。在黑体辐射中，存在各种波长的电磁波，其能量按波长的分布与黑体的温度有关。为了从理论上解释黑体辐射的特性，德国物理学家维恩导出了一个黑体辐射能量按波长分布的“维恩公式”。但是，这个公式只适用于波长较短、温度较低时。英国物理学家瑞利和金斯也导出了另一个公式，但是，它却只适用于波长较长、温度较高时。理论

与实验不符合的情况主要发生在短波长的紫外区域，因此这一困难被称为“紫外灾难”。为了找到一个在各种波长范围内都能与实验事实相符合的黑体辐射公式，物理学家绞尽了脑汁。



普朗克

1900年，德国物理学家普朗克（M. K. E. L. Planck, 1858—1947）根据黑体辐射的实验数据，利用内插法建立了一个普适公式，其中引入了一个常数 h ，后被称为普朗克常数。1900年10月9日，他在德国物理学会上报告了自己的成果，这个公式被认为是正确的普适公式。普朗克认为这个公式必能从某些理论中推导出来，他运用经典物理学的所有理论和方法，都没有获得成功。失败在哪儿？普朗克注意到在过去的理论中，器壁上的分子、原子被看作吸收电磁波的“振子”，在能量上可以连续变化，电磁波和振子之间的能量交换，可以连续地减少或增大，正是这种连续变化导致了“紫外灾难”。

普朗克面临着一种选择，是坚持旧的观点而不顾事实呢，还是面对事实抛弃旧的观点呢？他尊重事实，放弃了经典的能量均分原理，勇敢地提出了能量子假说。黑体是由许多振子组成的，振子的能量不是连续地变化的，当它吸收和辐射频率为 ν 的电磁波时，只能是一份一份地进行，每份能量为 $\epsilon = h\nu$ ，每个振子的能量是这个基本能量单位的整数倍。根据这个假设，从理论上可推导出普朗克公式。1900年12月14日，普朗克在德国物理学会上报告了自己的研究成果，他的公式得到肯定，但他的能量子假设却受到冷待。

能量子假说的提出，给经典物理学打开了一个缺口，为量子物理学安放了一块奠基石，宣告了量子物理学的诞生。

卢瑟福发现原子核

电子是从原子中发射出来的，随之而来的一个问题是：原子是由电子组成的吗？J. J. 汤姆孙推断原子不可能仅仅由电子组成，否则的话，电子之间的静电斥力会把这样的组合一下子拆散。同时，通常情况下的原子都是电中性的，而仅仅由电子组成的原子却是带负电的。由此他设想，原子中必定有等量的正电荷存在，它们在原子中是怎样分布的？J. J. 汤姆孙设想原子中的正电荷以液态方式均匀分布在原子的整个体积里，而电子则“浸”在这正电液体中，并在其平衡位置附

近作振动。他对原子结构所设想的这一模型，后来被人们形象化地称为“葡萄干蛋糕模型”，又叫“无核原子模型”。



卢瑟福

1909年，曾当过 J. J. 汤姆孙的研究生、来自新西兰的卢瑟福(E. Rutherford, 1871—1937) 指导他的助手盖革和马斯顿进行了著名的 α 粒子散射实验。他们用 α 粒子去轰击很薄的金箔做的靶子，并通过荧光屏记数来观测穿过金箔的 α 粒子被金原子散射的情况。实验表明，绝大多数 α 粒子笔直地穿过金箔，或与金原子碰撞后被稍微偏折一下。但是，有极少数的 α 粒子被金原子偏折了很大的角度，偶尔还发现个别向后弹回来的 α 粒子，这是令人费解的。因为根据 J. J. 汤姆孙的原子模型来计算，根本不可能出现向后反弹回来的 α 粒子。事后卢瑟福回忆道：“在我的一生中，那是一件最难以置信的事。这就像你发射了一颗 15 英寸口径的炮弹射向一张薄薄的卫生纸时，却被那张纸弹回来而打在你身上一样不可置信。”但是，实验事实是毋庸置疑的。

始终把实验看得高于一切的卢瑟福认为 J. J. 汤姆孙的模型也许有问题，于是，在 1911 年，他就设想了另一个模型。在卢瑟福的原子模型中，原子的中心有一个核心，叫原子核。电子围绕着原子核在不停地运动，所以他的模型又被称为原子的有核模型。原子质量的绝大部分，以及原子的全部正电荷，都集中在原子核上。这样就很容易说明为什么会有极个别被反弹回来的 α 粒子。卢瑟福从实验上发现原子核的存在一事具有重大意义，它开创了原子核物理学这一新领域，他被人们尊称为原子核物理学之父。

氢光谱与玻尔原子模型

氢原子的光谱很早就被人们所了解，它有一系列谱线，其波长分布在从红外、可见光到紫外的广阔范围内。1885 年，瑞士中学教师巴耳末在业余研究氢光谱时，找到一个经验公式，用它可以精确地算出氢光谱中当时已发现的四条谱线的波长。后人把这四条谱线称为巴耳末线系。此后，又发现了帕邢系、布喇开系、赖曼系等氢原子光谱线系，它们都可以各用一个经验公式来计算本线系内各条谱线的波长。能不能找到一个公式来统一计算氢原子光谱各个线系内各条谱线的波长呢？

根据经典理论，卢瑟福提出的原子的有核模型是不稳定的，不停地围绕着原子核运动的电子，将不停地辐射出能量，最后落到原子核上，这不能说明氢原子的稳定性。同时，不停地辐射能量的氢原子，应该发射连续光谱而不是分立的线光谱。



玻尔

1913年，刚从英国留学归来的年轻的丹麦物理学家玻尔（N. H. D. Bohr, 1885—1962）根据卢瑟福原子有核模型提出了他的氢原子理论。为了克服模型与经典物理学的矛盾，他提出了两条基本假设：原子中存在电子运动的稳定轨道状态，并对应着一定的能量（能级）；当原子从一能级跃迁到另一能级时将发射或吸收一定频率的光。根据这两条假设，玻尔定量地算出了氢原子稳定状态轨道的半径和能级，导出了光谱学中的巴耳末线系的计算公式，理论计算与实验数据完全符合，玻尔的理论取得很大成功。特别重要的是，他的理论使得长期积累的光谱实验资料，整理成明晰而有条理的系统。从此，原子光谱和分子光谱成为研究原子或分子结构的有力工具。

玻尔的理论虽然取得了伟大的成就，但也有不少缺点和局限性。这在于玻尔理论的基础仍然没有完全脱离经典物理范畴，只是经典物理理论加上量子条件的折衷产物。

从量子论到量子力学

玻尔的原子理论是量子理论发展的一个重要里程碑，但他的理论并没有从根本上抛弃经典理论，它仍把微观粒子当作经典力学的质点，并运用了轨道的概念。

玻尔理论的这种局限性，为当时的德国物理学家玻恩（M. Born, 1882—1970）所注意到了。1924年末，他写了一本《原子力学》，虽然玻恩所要写的东西已全部包含在内，但他却把这本书称作第一卷。第二卷在哪里？原来玻恩认为玻尔的理论一定会被一种崭新的学说所替代，他打算用第二卷来写这种尚未出世的理论。

1924年，法国的德布罗意受爱因斯坦光量子假说的启发，认为实物粒子同光子一样，也具有波粒二象性。

1925年，玻恩的学生、德国年轻的物理学家海森堡（W. K. Heisenberg, 1901—1976）提出了一个解决玻尔理论困难的办法。他认为关于原子我们确切知道的就是它们所发出的光的频率、强度这些可观察的量；如果真的存在着电子轨道，其特征参数不可能不在原子的定态特性及辐射性质中显示出来，而实际上没有任何实验可以证实电子按一定轨道运行，因此，玻尔的电子轨道的概念很可能是虚构的。他认为应该仅仅以那些原则上可观察的量之间的关系为根据来建立新的理论。

以原子内部存在巴耳末-里德伯频率梯级这一实验事实为根据，借助于对应原理来猜测新理论的数学方法，1925年，海森堡写成了一篇《对于一些运动学和力学关系的量子论的重新解释》的重要论文，并创造了一种数学方法。在这种方法中，他大胆地抛弃了电子轨道的概念，力学中的正则方程仍在哈密顿形式下被保留下来，但各个共轭变量都被换成

了一些服从非对易性算法的算符。那种算法中既涉及普朗克常数，又涉

$\sqrt{-1}$ 及这个符号。海森堡同玻恩和约尔丹密切合作，把这种方法发展成

为系统的矩阵力学。而玻恩则以此为主题写成了他的《原子力学》第二卷。

海森堡的理论发表后，在英国年轻物理学家狄拉克（P. A. M. Dirac, 1902—）心中激起了新的思想火花。狄拉克利用对应原理，在经典力学中寻求类比，找到了一种比矩阵更方便、更普遍的数学方法——“泊松括号”。利用这种方法他顺利地把经典方程改造成为量子力学方程。1925年11月，狄拉克完成了题为《量子力学的基本方程》的论文。接着，他又完成了第二篇论文《量子代数学》，使量子力学成为概念自主、逻辑一致的理论体系。

在海森堡、玻恩等人创立矩阵力学的同时，奥地利年轻的物理学家薛定谔（E. Schrödinger, 1887—1961）通过另一种途径，采用另一种方法创造了波动力学。

德布罗意关于实物粒子具有波动性的假说提出后，由于受到爱因斯坦的称赞，引起了薛定谔的重视。他在从事原子光谱的研究时就注意到，在原子光谱的复杂现象中确实隐藏着一些简单的量子数。但是，他认为这些量子数不应当像玻尔理论那样直接从外部注入，而应当运用一种数学方法由自身内部自然产生。德布罗意的假说把波同自由运动的粒子联系起来，为此，薛定谔深受启发。他设想，就像几何光学是波动光学的近似一样，经典力学可能也是波动力学的近似，两者构成特征性的比例式：

经典力学：波动力学=几何光学：波动光学。

根据这种类比，他试图把德布罗意波推广到非自由态粒子上。经过一番努力，他得到了一个简洁的解，推导出来的能级是以某种算符的本征态及本征值的形式

出现的。他立刻把他的方法应用到氢原子的电子。薛定谔发现如果非相对论性地处理电子，所得结果将在非相对论的近似上符合于观测的记录。他把研究成果写成论文，1926年波动力学问世。

薛定谔用波函数来描写微观粒子的波动性，建立了波函数所服从的波动方程——薛定谔方程。这个方程在量子力学中的地位，相当于经典力学中的牛顿方程。由于受波函数标准条件的限制（单值、有限、连续和归一化），只有当薛定谔方程中总能量具有某些特定值时才有解。这些特定的能量值叫做本征值，它可能是一系列分立的数值，每一个本征值相当于一个能级，所得结果与实验相符。在波动力学中，各种量子化条件和量子数，不像玻尔理论那样人为地假定，而是在求解薛定谔方程的过程中自然地引出。薛定谔成功地解决了氢原子光谱等一系列问题。薛定谔理论是德布罗意见解的一个自然扩展，也是哈密顿发展的牛顿经典力学的自然扩展。

这样，在同一领域，对于同一对象，出现了两种形式完全不同但同样有效的理论。矩阵力学运用的是代数方法，它的出发点是粒子；而波动力学运用的则是微分方程，它的出发点是波动。1926年，薛定谔等人发现，通过数学变换从一种理论可以转换到另一种理论，它们实质上是同一种理论。因此，这两种力学后来就统称为“量子力学”。由于波动力学所运用的数学方法比较方便，又为一般物理学家所熟悉，就成了量子力学的通用形式。

介子与核力理论

在研究原子核的性质过程中，人们逐渐弄清了原子核内部核子间的核力具有这样的特征：核力是一种短程力，核力的作用半径接近于 1.5×10^{-13} 厘米，在这个范围内其强度量级相同，超过这个范围，其强度迅速减弱到可以忽略；核力是一种强相互作用力，原子核内的质子间尽管存在着强大的静电斥力，而其个别粒子仍以700万电子伏特数量级的能量相结合，这种把核子结合在一起的力显然不能归结为电磁作用力或引力的某种表现。那么，这是一种什么样的力呢？

海森堡和费米都曾企图用类似于两个带电粒子间的相互作用是由于相互发射和吸收光子的方法来解决核力问题。1934年，塔姆（J. Y. Tamm, 1895—1971）进一步对核子间交换电子和中微子产生的相互作用进行计算，并指出这样产生的力远比核力强度小（小 10^{10} 倍）。

1934年10月，日本物理学家汤川秀树（Hideki Yukawa, 1907—1981）提出了核力的介子理论。汤川假设核力是任意两个核子之间交换一种尚未发现的新的重粒子产生的，他在文章中写道：“……将海森堡和费米理论从形式上改变一下，就可以消除这一缺陷。重粒子从中子状态跃迁到质子状态并非始终伴随着辐射轻粒子——电子和中微子，而有时候可能伴随着辐射另一种重粒子，这个重粒子把发生这种跃迁时释放出的能量带走……。如果后一过程的几率比第一过程的几率大得多，那么中子和质子间的相互作用将比费米理论所预期的强得多，这时辐射轻粒子的几率实际上不变。”

汤川秀树通过计算，认为这种新粒子的质量约是电子质量的 200 倍。因为这种粒子的质量介于质子和电子之间，后来被安德森命名为“介子”。

汤川秀树的论文发表后，除日本的一些物理学家外，并没有引起国际上的重视。1937 年，安德森 (C. D. Anderson) 和尼德迈耶等人在研究宇宙射线时发现了质量为电子质量 200 倍左右的一种新粒子，人们认为这就是汤川秀树所预言的介子。这样汤川秀树的理论才引起了许多科学家的重视。可是，研究越是深入，人们越是发现这种粒子不像汤川秀树所预言的粒子。因为这种粒子与原子核的相互作用很弱，差不多比电磁作用还弱 10^{11} 倍。1947 年，英国物理学家鲍威尔 (C. F. Powell, 1903—1969) 和他的同事在用核乳胶技术探测宇宙射线的实验中，发现了一种质量约为电子质量 273 倍的粒子，称为“ π 介子”。这种粒子与原子核具有很强的相互作用。直到这时，汤川秀树的理论才得到了证实。上面提到的安德森发现的介子称为“ μ 子”。

汤川秀树的核力理论给出了粒子间相互作用的一种重要的物理机理，后来人们称之为汤川型相互作用。它对于粒子物理学的发展具有重大的意义，特别是在粒子物理学发展的初期，起了巨大的推动作用。随着研究的不断深入，人们认识到核力的机理实际上比汤川秀树理论所阐述的要复杂得多，目前对核力的本质仍在继续探索之中。

原子核能的发现

1903 年，居里和拉博尔德 (A. Laborde) 注意到，特别纯的镭盐样品经常显示出比周围更高的温度，每克镭每小时总计放出 100cal 的热量。随着放射性研究的深入，这个问题的答案变得清楚了。放射性射线从原子内射出时，它的粒子带来较大的动能，这些动能的一小部分就转变为热能。

由于镭的射线每时每刻不停地在放射，它时复一时、日复一日、年复一年地一直在释放能量，直到 1622 年之后才使自己的放射性强度衰减为开始时的一半。因此，在这 1600 多年内，镭所释放的能量总和将是惊人的。这种放射性能量比化学能大几百万倍。由于放射性现象是由原子核的活动所引起的，很明显这种放射能只能来自原子核。原子核里可能蕴藏着如此巨大的能量吗？爱因斯坦早在 1905 年发表的质能关系式 $E=mc^2$ 就已经预示了这种可能性。

人类真正能利用原子核能起源于两大事件。一件是人工放射性的发现。贝克勒尔和居里夫妇发现的放射性，都是由天然放射性元素产生的。1934 年，居里夫妇的女儿、女婿约里奥-居里夫妇 (F. Joliot, 1900—1958; I. Curie, 1897—1956) 在用 α 粒子轰击铝 27 时，得到了放射性同位素磷 30。原先不具有放射性的元素经人工轰击后，转变成具有放射性的另一种元素，这样获得的放射性叫“人工放射性”。这一发现为人工实现新的核反应开辟了一条新路，引起了全世界科学家的极大兴趣。另一件是中子的发现。1932 年，英国物理学家查德威克 (J. Chadwick, 1891—1974) 发现了中子。中子的质量与质子相同，但不带电。中子的发现在理论上和实践中都产生了很大影响。理论上，很快就提出了

原子核是由中子和质子组成的核结构模型。实践中，由于中子不带电，很容易接近静电力强大的原子核，成为轰击原子核引起新的核反应的理想“炮弹”。

1934年，意大利物理学家费米（E. Fermi, 1901—1954）把这两点结合起来，用中子作为“炮弹”，系统地轰击了周期表上的63种元素，得到了37种新的放射性同位素。同年10月，费米和他的助手又观察到，当中子束通过某种含氢物质时，中子引起人工放射性的效能就会增大。费米认为，这是由于中子与氢原子弹性碰撞，中子被慢化的结果。慢中子及其效应的发现，是原子能发展史上具有重大意义的成果之一。

1938年，德国科学家奥托·哈恩（O. Hahn, 1879—1968）和施特拉斯曼（Strassman）用中子轰击铀时，发现产生的物质具有钡的全部化学特征。这就表明，铀吸收中子后，并没有变成更重的元素，而是分成了差不多大小的两半。这个实验结果传到了在丹麦避难的奥地利女物理学家梅特纳（L. Meitner）和她的侄子弗里什（O. R. Frisch）那里，他们经过认真思考和讨论，大胆打破了传统观念，明确作出了铀裂变的结论。不久，许多国家的科学家都成功地重复了这个实验，从而使铀核裂变得到了确认。约里奥-居里等人很快又在实验中证明，每次核裂变可以释放出二、三个中子，这就为核裂变链式反应的可能性提供了必要的条件。一旦链式反应实现，它就会释放出巨大的能量，这就是原子核能，即人们通常所说的原子能。

原子弹与曼哈顿工程

1933年，希特勒上台以后采取排犹政策，在纳粹迫害之下大批犹太人被关进集中营，少数得以逃脱的也被迫流落他乡，其中有不少优秀科学家，如爱因斯坦、玻恩、费米。他们中的大部分人到了美国。

1939年初，当铀核可以裂变的消息传到美洲大陆时，流亡在美国的匈牙利物理学家西拉德（L. Szilard）马上预言可能存在铀核裂变链式反应。不久，约里奥-居里和冯·哈尔班等人的实验证实，某些铀核裂变时确实会再放出两个到三个第二代中子，且释放出巨大的能量。而这种链式反应是在50万亿分之一秒的时间内发生。这么巨大的能量在这么短暂的时间里释放出来，将形成强烈爆炸。西拉德担心，这样一种新的爆炸方式要是被纳粹获得，那对全世界将是一场巨大的灾难。

事不宜迟，西拉德会同另一位逃亡美国的匈牙利物理学家威格纳等人到美国政府和军方游说，但未引起任何重视。1939年8月，西拉德等人说服了当时威信最高的爱因斯坦，请他出面写信给美国总统罗斯福，陈述铀裂变有可能用来制造威力空前的炸弹，并特别提到德国人也在进行的工作，这促使罗斯福作出了迅速采取行动的决定。

1942年夏天，美国在英国和加拿大的合作下，全面开展了代号为“曼哈顿工程”的大规模开发原子能的计划。奥本海默（J. R. Oppenheimer, 1904—1967）博士被任命为洛斯-阿拉莫斯实验室主任，领导原子弹的设计和研制工作。

实验室里的铀核裂变的链式反应与作为原子弹爆炸时的链式反应，其规模相差甚远，要研制原子弹就必须仔细研究大规模链式反应，这个任务落到费米的肩上。费米领导一班青年科学家解决了三个难题：①用石墨作为减速剂减慢中子速度，增加原子核俘获中子的机会，使大规模链式反应继续下去。②用金属镉“吞食”中子，阻止链式反应的进行。③将铀、石墨和镉三者做成“堆”，人工控制链式反应。1942年底在费米的领导下，在芝加哥大学建成了世界第一座核反应堆，1942年12月2日下午，首次实现了人工控制的核链式反应。从此，人类进入了利用核能的原子能时代。



奥本海默



费米

1945年7月16日，试验成功了第一颗原子弹。同年8月6日和8月9日，美国先后把一枚铀弹和一枚钚弹分别扔在日本的广岛和长崎。

杨振宁、李政道与宇称守恒定律

粒子的性质，除了质量、电荷、自旋以及半衰期等外，还有一种“宇称性”。宇称的概念是1924年在分析分子光谱时最先提出，并总结成为“宇称守恒定律”；1927年，威格纳（E. P. Wigner, 1902—）证明了在原子现象中宇称守恒。以后又进一步推广到原子核物理和粒子物理中。

1954—1956年间，人们在观察当时称为 θ 和 τ 粒子的衰变现象时，发现了一个疑问，即“ θ - τ 疑难”。精确的实验证明， θ 与 τ 这两种奇异粒子的质量、电荷、自旋、半衰期等都相同，它们似乎应是相同的粒子；可是 θ 衰变为2个 π 介子， τ 衰变为3个 π 介子。即

$$\begin{aligned}\tau^\pm &\rightarrow \pi^\pm + \pi^\pm + \pi^0, \\ \theta^\pm &\rightarrow \pi^\pm + \pi^0.\end{aligned}$$

对实验结果的分析表明，3个 π 介子的总角动量为零，宇称为负；而2个 π 介子的总角动量如果为零，则宇称为正。因此，如果确认宇称守恒定律严格成立，那么 τ 与 θ 就不可能是同一种粒子；如果认为 τ 与 θ 是同一种粒子，宇称守恒定律就不成立。

值得注意的是，当时所有关于衰变的理论都是建立在宇称守恒的基础上，这些理论与实验符合得相当好。因此一般人都认为宇称守恒定律是无需怀疑的，而当时已有的理论对此又无法作出圆满的解释。

就在这种情况下，美籍华裔科学家杨振宁（1922—）和李政道（1926—）经过仔细的分析研究，对宇称守恒定律在弱相互作用过程中是否成立的问题提出了质疑，他们指出：“在检查了当时已存在的关于这个概念（指宇称概念——编者）的实验基础以后，得到下述结论：和一般所确信的相反，在弱相互作用中实际上并不存在左右对称的任何实验证据。如果左右对称在弱相互作用中并不成立，则宇称的概念就不能应用于 θ 和 τ 粒子的衰变。因此 θ 和 τ 可以是同一种粒子。”

1956年9月，杨振宁在一次国际理论会议上所作的关于“目前对新粒子的了解”的演讲中，报告了他和李政道共同研究的结果，并提出了用实验来验证的方案。几个月之后，在哥伦比亚大学工作的美籍华裔物理学家吴健雄与美国的几位物理学家一起，用钴60的衰变实验验证在这种 β 衰变的过程中宇称确实不守恒。

杨振宁和李振道由于发现在弱相互作用中宇称不守恒而共同获得了1957年度诺贝尔物理学奖。

概念 定律 定理

参照物

描写运动物体的位置和位置的变化时，作为参考依据的物体。

说明：

观察者通常是“站”在参照物上来研究物体的运动的，就是说他是与参照物一起运动的，或说观察者与参照物之间无相对运动，所以观察者往往把参照物看成是“静止”不动的。

参考系

参照物与坐标系的总称。有时简单地就把参照物称参考系。

说明：

(1) 如果相对某一个参考系测定物体的运动，当该物体不受外力或所受合外力为零时，它严格地保持静止或匀速直线运动，则此参考系称为惯性参考系。也就是说牛顿第一运动定律成立的参考系称为惯性参考系，简称惯性系；牛顿第一定律不成立的参考系称为非惯性参考系，简称非惯性系。相对于一个惯性参考系是静止或匀速（直线）运动的参考系也是惯性系。

(2) 实验证明：恒星、太阳系（以恒星或太阳中心为坐标原点、以指向任一恒星的直线为坐标轴的参考系）是十分精确的惯性系。地球可以看成近似程度相当好的惯性系，所以研究地面上物体的运动，通常把地球选作惯性参考系。

在处理运动学问题时，参考系的选择带有随意性，即可以视求解问题的方便任意选取。当然，同一物体相对不同的参考系显示为不同的运动。但在求解动力学问题时，必须选择惯性参考系，否则牛顿运动定律将不再成立。

(3) 参考系曾作参照系，据“全国自然科学名词审定委员会”1988年公布的《物理学名词（基础物理学部分）》规定参考系不称为参照系。

时间

物理学中的一个基本物理量，反映物质运动过程的持续性和顺序性。

说明：

(1) 在国际单位制中，时间的主单位是秒。

(2) 时间的量度总是以稳定的周期运动为基础，以选为标准的周期运动的周期的若干倍或若干分之一作为时间的单位。长期以来，以地球的自转和公转作为时间计量的基础，依此定出年、月、日、时、分、秒为时间单位。为了克服地球自转与公转的不均匀性，1967年第13届国际计量大会决定采用“原子时”为时间计量标准，规定“秒是铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的持续时间”。

(3) 时间概念包括时刻与时间间隔两个方面，前者表征事件发生的顺序先后，后者表征物质过程持续的长短。我们常用一根带箭头的无限长直线来表征时间，这一直线称为时间轴。轴上每一点代表一个时刻，两个时刻之间的线段长度代表时间间隔的大小，取定某一点为现在时刻，则从该点出发指向箭头方向的各点代表将来时刻，背向箭头方向的各点代表过去时刻，时间轴可以把时间的延续性、单向性及序列性反映出来。

(4) 本世纪初建立的相对论揭示了时间、空间与物质运动的联系，否定了牛顿的绝对时空观，指出两个事件的同时性不是绝对的，而是相对的，与事件所在的参考系有关，非因果事件的时间次序先后亦是相对的，任何物质过程的持续时间的长短亦是相对的，即时间进程的快慢亦是相对的。

机械运动

物体之间或物体各部分之间相对位置随时间的变动。

说明：

(1) 物体的机械运动，主要包括平动、转动和振动三种基本形式。其他比较复杂的机械运动均可看作是这三种基本运动的复合。

(2) 对物体机械运动的描述具有相对性，同一物体的运动对于不同参照物（观测者）可以有不同的表述。

(3) 机械运动是物质普遍运动的最简单、最基本的形式。其他各种运动，如热、电等物理运动，物质的化学运动，生物的生命运动都比机械运动复杂。这些运动形式既包含机械运动，又不能完全归结为机械运动，各种不同运动形式内部均具有区别于其他运动形式的特殊性。

平动

机械运动的一种常见形式。一个物体位置移动时，物体上任意两点的连线始终平行的运动。又称“平移”，“平行移动”。

说明：

(1) 物体平动时，其中任意一点的运动情况（包括速度、加速度及运动轨道的形状等）完全相同，因而物体上任何一点的运动都可代表整个物体的运动。所以，作平动的物体，不论其大小和形状如何，都可以看成为一个质点。

(2) 平动物体的运动轨迹可以是直线，也可以是曲线。不能单由物体作直线运动还是曲线运动，来判定物体是否作平动。

(3) 严格说物体的平动应当指刚体的平动，即该物体是不会变形的刚体。

转动

一般指刚体的转动，是机械运动的又一基本形式。包括定轴转动（绕一固定直线的转动）和定点转动（绕一固定点的转动）两类。

说明：

(1) 刚体定轴转动时，其上各点均绕固定轴作圆周运动。即各点的运动轨迹都是圆，且所有圆心均在该固定转轴上，各点所作圆周运动的角速度也相同。值得指出，物体的质心绕固定轴作圆周运动时，物体并不一定作定轴转动，也可以是平动，这时物体上各点所作圆周运动的圆心并不都在固定转轴上。

(2) 定点转动的刚体在任一瞬时，亦可看作为绕过定点沿某一方向的转轴之转动，但这一转轴的方位随时间而改变，所以，这时情况比定轴转动要复杂得多，对定点转动的描述亦困难得多。

(3) 质点绕一固定点作距离不变的运动，也可以称质点的定点转动。空间质点的定点转动比较复杂，而在一平面上质点绕固定点的运动，即为圆周运动。

振动

物质系统常见的一种运动形式。物体在平衡位置附近作的往复运动，称机械振动；物质系统的某一物理量，在某一定值附近作往复的变化，亦称为振动。

说明：

(1) 机械振动是最常见的振动，如钟摆、乐器弦线、音叉的振动。然而，任何物理量，例如机械位移、电量、电压、电流、能量，围绕某一定值随时间作反复的变化，都叫做振动。

振动普遍存在于各种自然现象之中，如电磁现象中的“电磁振荡”是电场强度、磁场强度的振动；交流电路中则是电压、电流强度的振动；固体中原子的晶格振动；多原子分子中原子的分子振动；另外还有动物心脏的跳动、地震以及化学反应中物质浓度的周期性变化等等。虽然这些振动发生在本质不同的物质系统之中，但是各种形式的振动，包括机械的、电磁的、原子的、化学的、生物等等，它们的基本规律是共同的，具有相同的基本运动方程，即振动方程。

(2) 振动系统在不受外界作用（或合外力为零）、且阻尼又可忽略的情况下，完全由系统内部不同形式能量（动能与势能、电能与磁能等）交互变化所自然进行的振动，称为固有振动（振荡）或自由振动。系统受到阻尼（如摩擦、电阻），振动能量不断消耗，振动逐渐衰减以至消失的振动称为“阻尼振动（振荡）”。当系统受到外界周期性（强迫力）作用，不断得到能量补充，而被迫进行的振动，则称为“受迫振动”。

位矢

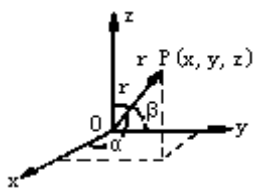
表示质点在空间位置的矢量。

说明：

(1) 质点在空间的位置可以用选定坐标系中的位置坐标 (x, y, z) 来表示，亦可以用一根由坐标原点指向质点所在位置的有向线段 \vec{OP} ，

矢 r 来表示 ($r = \vec{OP}$)，如图。位矢 r 的大小为 $|r| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ，其方向则可用方向余弦表示为：

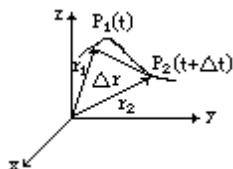
$$\cos \alpha = \frac{x}{r}; \quad \cos \beta = \frac{y}{r}; \quad \cos \gamma = \frac{z}{r}。$$



(2) 若质点的空间位置用位矢 r 表示，当质点在空间移动时，其位矢是时间的函数，即 $r = r(t)$ 。利用位矢描述质点的运动十分方便， $r(t)$ 随时间的变化率就是质点的速度。特别是当质点的运动轨迹比较复杂时，利用位矢 r 描述其运动，数学运算显得简洁。

位移

描述质点空间位置变化的物理量。它是一个矢量，称为位移矢量，记作 Δr ，定义为式中 r_1 、 r_2 分别为位移初始时刻与终止时刻质点的位矢，如图所示。



说明：

(1) 位移矢量 Δr 的方向从初始位置指向终止位置，其大小等于初始位置 P_1 与终止位置 P_2 之间的距离。

(2) 位移与路径不同，路径是质点运动所历经的空间轨迹，与同一位移相对应的路径可以通过初始位置 P_1 与终止位置 P_2 的任意多条曲线。

(3) 位移与路程亦不同。路程是标量，它是质点运动所经过的路径曲线之长度。一般只要质点有运动，其路程通常就不为零，而位移则不然。例如，质点若沿闭合路径运动一周，其位移等于零，但其路程则不为零，而等于闭合路径之周长。

(4) 位移是一个与所选参考系有关的矢量，不同参考系中同一个空间运动可以有不同的位移矢量。质点相对于静止参考系的位移称为“绝对位移”，相对于活动参考系的位移则称为“相对位移”。

速度

描述物体运动快慢与方向的物理量，它是一个矢量，等于位矢对时间的变化率。它的大小等于单位时间内物体通过的距离，它的方向代表物体运动的方向。

说明：

(1) 在国际单位制中，速度的单位是米 / 秒。常用的单位还有千米 / 小时。国际上通用的航海速度单位是节，1 节=1 海里 / 小时。

(2) 速度又分平均速度和即时速度（也称瞬时速度）。

(3) 力学上所讲的物体的运动速度一般都指即时速度。

速率

描述物体运动快慢的物理量。指速度的大小。若在 Δt 时间内物体沿轨道所经过的路程为 Δs ，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，位移的大小 $|\Delta r|$ 与路径 Δs 趋于相同，则速率 v 为

$$v = |\mathbf{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta r|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}。$$

说明：

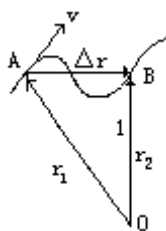
(1) 对于速度来说，速度的大小与速率是相同的，而对平均速度来说， Δt 时间内的位移大小不一定等于路程，所以一般平均速度的大小与速率不相同。例如，物体作曲线运动时，质点速度的方向处处改变，平均速度的方向就是该段时间内位移的方向，平均速度的大小是该段曲线对应的弦长与时间的比值，而速率是该段曲线的长度与时间的比值，显然速率不等于平均速度的大小。唯当 $\Delta t \rightarrow 0$ ，即曲线弧长=曲线所对弦长时，两者才相等。

(2) 速率是标量。

平均速度

描述物体在一段时间内运动的平均快慢的物理量。物体沿任一路径运动时，如果从 A 到 B 的位移为 $\Delta r = r_2 - r_1$ ，经历的时间为 $\Delta t = t_2 - t_1$ ，则这段时间内的平均速度 \bar{v} 为

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1},$$



方向即为位移 Δr 的方向。

即时速度

又称瞬时速度。精确反映物体在任一时刻的运动快慢与方向的物理量。它是一个矢量，等于位矢的导数，也就是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，平均速度的极限，即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt},$$

它的方向即运动路径在该点的切线方向。

加速度

表示物体运动速度变化的物理量。有平均加速度与瞬时加速度之分。加速度反映运动物体速度变化的快慢，以单位时间内的速度变化量来表示。如果运动物体从速度 v ，经历 Δt 时间后速度变为 v_t ，则平均加速度 \bar{a} 及瞬时加速度 \bar{a} 分别用下列公式来定义：

$$\bar{a} = \frac{v_t - v}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta t},$$
$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}。$$

由于速度的变化在大小及方向上都可能很不均匀，因此在一段时间内的平均加速度仅是速度变化的粗略描写。在一般物理学定量计算中通常考虑的是瞬时加速度，而且往往简称为加速度。

说明：

(1) 在国际单位制中，加速度的单位是米 / 秒²。

(2) 加速度是重要物理量之一。由于牛顿第二运动定律 $F=ma$ 表述了加速度与物体质量及外力之间的关系，即 $a=F/m$ ，所以加速度就成了运动学与动力学联系的桥梁。

(3) 值得注意的是平均加速度的方向，既不是初速度的方向，也不是末速度的方向，而是 Δv 的方向；而瞬时加速度的方向，则是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 Δv 的极限方向，即 dv 的方向。

在直线运动中， a 的方向就在运动直线上，如果 a 的方向与运动方向一致，则表示物体在加速；如果 a 的方向与运动方向相反，则表示物体在作减速运动。

在曲线运动中， a 的方向总是指向曲线的凹侧。在匀速圆周运动中， a 的方向指向圆心，称为向心加速度，常用 a_n 表示；而在变速圆周运动或一般曲线运动中，加速度除了有向心（法向）加速度分量 a_n 以外，还有沿运动轨道切线方向的切向加速度分量 a_t ，它们合成而得的总加速度 $a (=a_n+a_t)$ 指向轨道的凹侧。

质量

质量有惯性质量与引力质量之分。

说明：

(1) 尽管惯性质量和引力质量是反映物体的两种不同性质，它们的定义和测量方法都不同，但实验证明同一物体的这两种质量成正比，当选择适当的单位时，两者的数值完全相同，因此一般将它们统称为质量。

(2) 在国际单位制中，质量的主单位是千克（kg）。以保存在法国巴黎附近国际计量局中的国际千克原器的质量为质量的单位——1 千克。

我国现用的其他质量单位有吨（T）、原子质量单位（u）及克拉等，它们与千克的换算关系是：

1 吨=10³ 千克；

1 原子质量单位=1.6605655×10⁻²⁷ 千克；

1 克拉≈7.8749×10⁻⁵ 千克。

其中“原子质量单位（u）”简称“原子单位”，是原子物理学中常用

的一种质量单位,规定以碳12(C¹²)核素原子质量的 $\frac{1}{12}$ 为1原子质量单位

(3) 对于低速物体（指物体运动速度 v 远小于真空中的光速 c，即 v ≪ c）来说，认为其质量是不变的。但根据狭义相对论理论，对于高速（v→c）运动的物体来说，其质量随速度而变，有

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

的关系，式中 m₀ 为物体静止时的质量（静质量），m 是物体以速度 v 相对于惯性系运动时的质量（动质量），c 是光在真空中的传播速度。由公式可见，当 v ≪ c 时，有 m ≈ m₀，即低速时物体质量不变可以看成是高速时的极限情况。

(4) 物体的质量与能量之间存在一定的转换关系：

$$E = mc^2,$$

此式就是著名的爱因斯坦质能关系式。据此可以把质量看成是物体内部储存的能量的量度，而且由于 c = 3×10⁸ 米 / 秒，c² 是个极大的数值，质能关系式表明微小的质量中蕴藏着巨大的能量。

(5) “质量是物体所含物质的多少”中，“所含物质”的涵义是含混不清的，它既不是指物体中所含分子、原子的数量，也不是指“物质的量—摩尔数”，更没有说明不同种类物体的“物质的量”如何测量或比较，所以，这种说法仅是

一种通俗、初浅的表述，但它具有一定的可操作性，即可以用天平来称衡物体所含的物质的多少，因而容易为初学者接受。

(6) 鉴于中学物理教学中不引入引力质量的概念和惯性秤，而同一物体的惯性质量又等于引力质量（用相同单位时），于是，就可用天平来测量物体的质量，而不强调区分引力质量和惯性质量。

惯性质量

物体惯性的量度。若用 m_1 和 m_2 分别表示两个物体的惯性质量，用 a_1 和 a_2 分别表示这两个物体在相同大小的力的作用下获得的加速度，则有

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \text{ 或 } m_1 = \frac{a_2}{a_1} m_2。$$

如果选定其中任何一个物体的惯性质量为惯性质量的单位，就能确定另一物体的惯性质量。

说明：

(1) 物体惯性的大小表现在物体受力作用时改变其运动状态的难易程度。在同样的外力作用下，惯性大的物体所获得的加速度较小，运动状态较难改变；惯性小的物体所获得的加速度较大，运动状态较易改变。物体惯性的大小，在经典力学中用物体的质量大小来表示，这样度量的物体的质量就是惯性质量。

(2) 惯性质量可用惯性秤来测量。

(3) 根据惯性质量的定义可得各物体在相同力作用下获得的加速度与它们的惯性质量成反比，即

$$a \propto \frac{1}{m}。$$

它依据的实验事实是：受相同力作用时，任意两物体的加速度之比 $\frac{a_0}{a_1}$

为一常数。

引力质量

度量物体间引力作用大小的物理量。若用 m_0 和 m_1 分别表示两个物体的引力质量，用 f_0 和 F_1 分别表示这两个物体各自置于距第三个物体相同距离时所受到的引力的大小，则有

$$\frac{m_0}{m_1} = \frac{F_0}{F_1} \text{ 或 } m_1 = \frac{F_1}{F_0} m_0。$$

若选定其中任一物体的引力质量为引力质量的单位，就能确定另一物体的引力质量。

说明：

(1) 引力质量可用天平来测量。

(2) 引力质量与惯性质量相等，从经典物理和狭义相对论的观点来看纯属偶然，但从广义相对论观点来看却是根本性的。

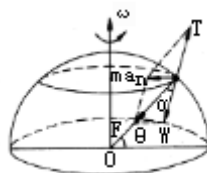
重力

静止在地面上的物体由于地球的吸引，并考虑到地球自转的影响而使物体受到的力。

说明：

(1) 地面上的物体由于随地球自转而作圆周运动，圆心在地轴上，所以每一个地面物体都有指向地轴的径向加速度 a_n ，这个向心加速度是由地球对物体的万有引力 F ，以及为使物体相对地面静止而受到地面对物体的一个支持力 T 的合力所提供，如右图所示。利用牛顿运动定律显然有

$$T + F = ma_n,$$



与这个地面支持力 T 方向相反、大小相等的力就是物体受到的重力 W ，即有

$$W = -T = F - ma_n。$$

设 R 为地球半径， ω 为其自转角速度，略去 ω 的高次项后，重力的大小为

$$W \approx \frac{GMm}{R^2} - m\omega^2 R \cos^2 \theta$$

$$= \frac{GMm}{R^2} \left(1 - \frac{1}{289} \cos^2 \theta \right),$$

式中 G 为引力常数, M 为地球质量, m 为物体质量, θ 为物体所在处的地理纬度。 α 为重力方向偏离地球引力方向的角度, 它与纬度 θ 有如下关系:

$$\alpha = \frac{\omega^2 R \sin^2 \theta}{2g}。$$

(2) 从上定义可见, 重力的大小和方向一般是与引力不同的。重力比引力小, 同一物体在纬度越低的地方所受的重力越小。一个物体所受的重力, 在两极处最大, 在赤道上最小。重力的指向与引力的指向有一微小角度 α 的偏差。通常所讲的铅垂方向, 正是指重力的方向。

(3) 由于地球实际上并不是一个理想的球体, 在两极处较扁平, 物体的重力与纬度之间的关系, 在实用上应修正为

$$W = \frac{GMm}{R^2} \left(1 - \frac{1}{191} \cos^2 \theta \right)。$$

从上式可见, 纬度不同处的重力大小略有差别, 在精度要求不高的情况下, 可略去这一差别, 而认为重力与引力大小相同。

(4) 对于离地面高度为 h 的物体, 其重力就是地球对它的引力

$$W = \frac{GMm}{(R+h)^2}。$$

因高度 h 一般总比地球半径 R 小很多, 所以近似有

$$W = \frac{GMm}{R^2} \left(1 - \frac{h}{R} \right)。$$

由于高度对引力的修正比纬度的修正大, 考虑高度修正时, 不再考虑纬度不同的差别。

弹力

物体与物体相互接触、相互挤压而发生弹性形变，形变物体由于要恢复原状而彼此间发生的相互作用力。

说明：

(1) 凡是相互接触并发生弹性形变的物体之间都存在弹力。在弹性物体内部，由于形变，物体各部分之间也存在着弹力相互作用。刚体不发生形变，严格说刚体内部及它们之间并不存在弹力。当然刚体是一理想模型，实际的物体不可能如刚体完全没有形变。坚硬的岩石、钢铁等刚性物体，它们在外力作用下很难发生形变，但总会发生一点微小的形变，由于这一微小的形变，就会产生极大的弹力。

(2) 弹力的表现形式有很多种，压力、支持力、张力、拉力、推力以及弹簧的弹力是最常见的几种形式。

在弹性限度内，弹力的大小与形变成正比，达到平衡时，等于引起形变的外力。弹力的方向就两个物体之间来说，总是与引起形变的作用力方向相反。在中学物理中所讨论的主要是两个坚硬物体间由于压缩或拉伸形变产生的弹力和柔软物体跟其他物体间由于拉伸形变产生的弹力。弹力的方向，前者垂直于接触面，后者沿柔软物体拉伸方向，且都与形变趋向相反。

(3) 弹力的本质是分子之间的电磁相互作用。由物质分子运动论知道，组成物质的分子间存在着相互作用的引力与斥力。物体无形变时，内部分子处于正常位置，分子间的引力等于斥力，分子在各个方向上受力平衡。在弹性限度内，当物体受其他物体作用发生形变时，分子之间就要发生相对位移，分子间的引力就不等于斥力，分子的平衡状态就遭到破坏，分子间就表现出引力或斥力相互作用，从而抗拒形变。随着分子间距离增加或减小（仍在物体弹性限度以内），相互作用的引力或斥力不断增加，直到跟外力平衡，物体不再被拉伸或压缩。撤去外力后，正是这种斥力或引力，使物体恢复原状。

应力

在弹性力学中，物体内部任一截面的两方单位面积上的相互作用力。

说明：

(1) 在国际单位制中，应力的单位是牛顿 / 米²。

(2) 应力一般可分与截面垂直的正应力（或法向应力）和与截面相切的切应力（或剪应力）两种。

应变

亦称“相对变形”。物体受力作用时，它的大小或形状相对改变，即单位长度或单位体积的形变。

说明：

(1) 应变是无量纲的纯数。

(2) 应变又分线应变、剪应变和体积应变。线应变是物体上某微小线段在形变后，长度的改变 Δl 与线段原长 l 之比。剪应变（角应变）是物体上两相互垂直的微小线段，在形变后所夹角度的改变值。体积应变是物体形变后，体内任一微小单元体积的改变 Δv 与原单位体积 v 之比。

弹性

材料或物体在外力作用下产生形变，若撤去外力后，形变随即消失，恢复原来形状和尺寸的性质。

范性

亦称塑性。材料或物体受力后，应力超过弹性极限后，仍能继续形变，而不立即断裂；这时即使撤去外力，仍存在一部分形变的性质。

说明：

其大小通常以延伸率或断面收缩率来度量。

弹性模量

度量物体受力时形变大小的物理量。指在弹性限度内，应力与应变的比值。

说明：

(1) 弹性模量又分纵向弹性模量（杨氏模量）和剪切弹性模量。杨氏模量为正应力与线应变之比；剪切弹性模量为剪应力与剪应变之比。

(2) 对同一种材料，在弹性极限内，弹性模量是一常数。

弹性极限

材料或物体发生形变时，若撤去外力，发生的形变完全消失而恢复原状，该应力的最大极限值称弹性极限。

说明：

- (1) 若应力超过弹性极限，撤去外力，物体就不能恢复原状。
- (2) 不同材料或物体的弹性极限各不相同。
- (3) 对同一材料或物体，弹性极限的数值一般随温度的升高而减小。

胡克定律

关于弹性物体的形变与作用力之间关系的定律。定律指出，在一定的应力范围内，弹性物体的应变与所加应力成正比。

说明：

(1) 上述定律由英国物理学家胡克于 1660 年发现（1676 年发表），故称胡克定律。

(2) 值得指出，胡克定律的上述表述，更加深刻地反映了物体受力和形变的关系。应力定义为单位面积上所受的相互作用力，这就与物体的截面积无关，应变定义为相对形变，这就与物体原来的形状和大小无关。

(3) 注意区别弹性模量、弹性系数及倔强系数这三种不同的量。弹性系数就是弹性模量的倒数，即物质应变与应力之比，它和弹性模量一样，是表示物质的弹性性质。倔强系数表示在弹性范围内物体所受外力和由此引起的物体形变量的比值，它表示弹性物体的性质。

摩擦力

相互接触的两物体，在接触面上发生的阻碍相对运动或阻止相对运动趋势的相互作用力。

说明：

(1) 摩擦力一般可分为静摩擦力和滑动摩擦力。在所有其他条件均相同时，两物体之间的滑动摩擦力比最大静摩擦力小。

(2) 关于摩擦力的起因，从 15 世纪的意大利科学家达·芬奇到 18 世纪的法国物理学家库仑，经过实验研究，得出了关于摩擦力与正压力、速度、面积等

关系的经验定律。有关摩擦力的本质，直到今天还不十分清楚，但可以肯定与物质分子间的电磁相互作用有关。根据摩擦表面分子的粘附理论，认为物体接触时，由于表面不可能极平整，实际的接触面积比表观的接触面积小得多（前者往往只是后者的万分之几），因此在接触点处有很大的应力，大大超过“弹性极限”，接触处产生“塑性形变”，许多接触点“冷焊”在一起，即在接触点处两物体的分子间距已小到分子引力作用范围内，于是两个紧压着的接触点处产生了分子-原子性的表面粘附现象。当一物体在另一物体上被拉动时，摩擦阻力就伴随着成千上万的细小“焊点”的扯裂而产生。这一理论能较好地解释金属之间的摩擦，但不能很好解释木材等的摩擦。

以上论述都只涉及固体之间的摩擦力，液体和气体的摩擦力则由它们的粘滞性决定。

(3) 摩擦力做功与路径有关，所以摩擦力是一种非保守力。

(4) 不能将摩擦力看作只是一种阻力，有时也可以是动力，可以做正功。例如，传送带上物体所受的静摩擦力，就是它运动的动力；卡车起动时，车上的货包与车厢间可能出现相对滑动，但此时货包所受的滑动摩擦力仍然是使货包随车前进的动力。

(5) 判断物体是否发生相对滑动时，可以先假定没有发生滑动而保持相对静止，从运动方程式解出为阻止相对滑动所需的静摩擦力。然后将此静摩擦力与最大静摩擦力比较：若该静摩擦力小于或等于最大静摩擦力，则结果合理，说明假定正确；若所需的静摩擦力超过最大静摩擦力，则结果不合理，说明假定的情况与实际不符，即事实上发生相对滑动。在有相对滑动的情况下，也先假定物体相对滑动的方向（依此决定滑动摩擦力的方向），并求得各物体的运动情况，再将结果与假定情况比较：若求得的物体的运动方向与假定方向一致，则结果合理，假定正确；若求得的物体的运动方向与假定方向相反，说明结果不合理，假定方向与实际相违，此时需要调整运动方向（滑动摩擦力的方向相应变更），重新计算和检查结果。

静摩擦力

物体受力，虽可能产生滑动，但仍处于相对静止状态，这种阻碍起动的摩擦力称静摩擦力。

说明：

(1) 静摩擦力与使物体发生相对运动趋势的外力或其某分力是一对平衡力。静摩擦力从零开始，随外力的增大而增大，直到使物体开始滑动的一瞬间，达到最大极限值（称最大静摩擦力）。静摩擦力的方向永远和外力的方向（即物体运动趋势的方向）相反。

(2) 最大静摩擦力的大小与正压力成正比，即

$$f_s = \mu_s N,$$

式中 μ_s 称为静摩擦系数，决定于接触面的材料性质、表面状态（光洁、干湿程度等）及温度等。

滑动摩擦力

两物体在接触面上相互作用的阻碍滑动的力，简称摩擦力。

说明：

(1) 实验证明，当滑动的相对速度不是太大时，滑动摩擦力的大小与滑动速度、接触面的大小无关，只与正压力成正比，即

$$f_k = \mu_k N,$$

式中 μ_k 为滑动摩擦系数，取决于接触面的材料性质和表面的状态（光洁、干湿程度等）。

(2) 滑动摩擦力一般是耗散性的力，物体的动能往往通过摩擦变成热能而耗散掉。

力

物质之间的一种普遍相互作用。其效果是使物体的运动状态发生变化或使物体的形状发生变化。

说明：

(1) 人对力的最初认识是源于人的肌肉对外物的作用，人在提、推、拉、抛重物时，肌肉感到紧张，就认为肌肉对物体有力的作用。汉字的力，在篆书中的写法，就是人体筋肉的象形。

力的概念虽然出现得很早，但关于力和运动关系的正确认识，直到 16 世纪才由伽利略首先提出。伽利略把力和物体获得的加速度联系起来。牛顿归纳总结提出了三大运动定律，明确指出力是物体产生加速度的原因，并建立了力的定量定义。

(2) 力是矢量，有大小和方向，而力对物体的作用效果还与其作用点的位置有关。力的大小、方向与作用点称为力的三要素。

(3) 在国际单位制中，单位是牛顿，1 牛顿=1 千克·米 / 秒²。

(4) 我们常见的力有万有引力，重力，摩擦力，弹力以及电磁力等等。近代科学则证明，形形色色的不同种类的力，都是四种基本自然力的不同表现。这四种基本自然力就是万有引力、电磁力、强作用力以及弱作用力。这四种力的主要特征列表如下：

力的种类	相互作用的物体	力的强度	力程	宏观表现
万有引力	一切质点	10^{-36}	∞	有
弱作用力	大多数粒子	10^{-11}	$<10^{-17}\text{m}$	无
电磁力	荷电粒子	1	∞	有
强作用力	核子、介子等	10^2	$<10^{-15}\text{m}$	无

自本世纪 30 年代人们发现自然界存在四种基本相互作用后，就企图进一步探索这四种自然力之间的联系。爱因斯坦是第一个探索者，企图把电磁力与万有引力统一起来，但没有成功。20 世纪 60 年代温伯格和萨拉姆等人，利用杨振宁提出的规范场理论，提出了把电磁力与弱作用统一起来的所谓弱电统一理论，该理论在 80 年代初得到实验证实。在弱电统一成功的基础上，人们又进一步提出了弱电强的大统一理论，很快又建立了超对称理论，企图把引力最后亦统一起来，但至今尚未得到有实际意义的结果。追求四种自然力的完全统一，是今天物理学的一个最前沿的研究领域。

力矩

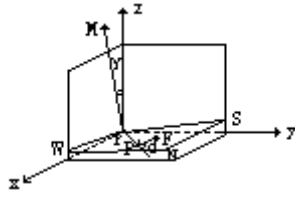
表示力对物体作用时产生转动效应的物理量。

力矩是一个矢量。常分为力对某点的力矩及力对某轴线的力矩两类。

说明：

(1) 力 F 对空间某点 O 的力矩 M 定义为一矢积，即

$$M=r \times F,$$



式中 r 为从 O 点到力 F 的作用线上任一点 P 的矢径（如图）。根据矢积的定义，矢量 M 垂直于由 r 和 F 组成的平面 $OSNW$ ，其方向由右螺旋法则决定；矢量 M 的大小为

$$M=rF\sin\alpha,$$

式中 α 为矢量 r 与 F 之间的夹角。因此，力矩 M 的大小就等于力的大小 F 和从 O 点到力作用线的垂直距离 $r\sin\alpha$ 的乘积。

力 F 对某轴线的力矩的大小，就等于力对轴线上任一点的力矩在该轴线上的投影。例如上图中力 F 对于 Z 轴的力矩 M_z ，就等于力 F 对 O 点的力矩 M 在 OZ 轴上的投影，即

$$M_z=M\cos\gamma,$$

式中 γ 为力矩 M 与 OZ 轴正方向之间的夹角。因轴取定后，投影只有正或负的区别，所以对于固定转轴的力矩可作为标量处理，其大小在中学物理中为力与力臂的乘积，力臂即力的作用线与转轴之间的垂直距离。

(2) 力矩这个物理量反映力的大小、方向和作用点对物体转动的影响。物体绕固定轴转动时，力对该转轴的力矩使物体获得角加速度，并使物体的动量矩发生改变，力矩愈大，物体的转动状态改变愈快。

(3) 力矩的量纲与功的量纲相同。力矩的单位由力的单位与长度单位所决定。当力与长度均采用国际单位制单位时，力矩的单位为“牛顿·米”。工程上常用公斤作为力的单位，而用米作长度单位，相应的力矩单位则为“公斤·米”。

力偶

大小相等、方向相反，但不在同一直线上的一对平行力。

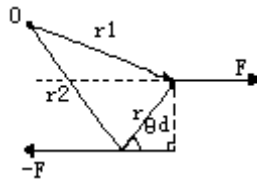
说明：

(1) 力偶的合力为 0 ，因此它不改变物体的平动状态，只改变物体的转动状态，或者使物体发生剪切形变。

(2) 力偶对物体的作用效果决定于力偶矩。力偶矩即力偶对任意点的力矩。设任意点 O 为取矩点，则力偶 F 与 $-F$ 对于 O 点的力矩

$$\begin{aligned} M &= r_1 \times F + r_2 \times (-F) = (r_1 - r_2) \times F \\ &= r \times F, \end{aligned}$$

式中 $r = r_1 - r_2$ 是连接力偶的两个平行力之作用点的矢量。所以，力偶矩是一常矢量，它与取矩点 O 的位置无关，即给定力偶的力偶矩是恒定的。力偶矩垂直于力偶所在的平面，它的指向用右螺旋法则确定，其大小 $M = rF \sin \theta = Fd$ ， $d = r \sin \theta$ 为力偶作用线之间的垂直距离，称为力偶臂，如下图所示。



(3) 不论如何改变力偶的力和力偶臂，只要保持力偶矩大小和方向不变，则力偶的作用效果不变。例如，两个力偶在同一平面上，只要它们的力偶矩的大小相等，指向相反，则这两个力偶就达到平衡，不必有共同的转动中心。

施于刚体的一个力系，可用施于刚体质心的一个力和一个力偶代替。

(4) 力偶的转动效应决定于力偶矩，力偶矩的单位即力矩的单位。

力的合成

当物体同时受到几个力作用时，如果可以用一个力来代替它们，使产生的效果相同，那么这一单个力叫做那几个力的合力。这种等效替代法就叫做力的合成。

说明：

(1) 方向沿同一直线的几个力的合成比较简单，其合力的大小就是这些力的代数和之绝对值，而方向则沿同一直线，指向由代数和的符号来确定。

(2) 共点力的合成遵循平行四边形法则。由两个力合成的方法，先求出任意两个力的合力，再求第三个力与求出之合力的合成，依次继续，即可求出任意多个力的合成。

力的分解

如果一个力作用于物体上，可以按其作用效果，利用两个或两个以上的力去代替，那么这种等效替代叫做力的分解。这两个（或几个）力叫做该作用力的分力。

说明：

(1) 力的分解也可采用平行四边形法则。不过力的分解时已知的是平行四边形的对角线而求其两邻边。如果没有其他限制，对于同一条对角线，可以作出无数个不同的平行四边形，即同一个力可以按不同的条件分解为无数对大小、方向都不同的分力，但按其作用效果，可得确定解。

(2) 值得注意，在研究一个力分解为几个力的作用时，应不再考虑原来的已被分解的该力的作用；在研究几个力合成为一个合力的作用时，也应只考虑合力，而不再考虑合成这个力的几个分力的作用。这在力的分析时特别重要。

密度

表示物质在空间分布密集程度的物理量。如果某物质的质量为 m ，

均匀分布在体积为 V 的空间里，则该物质的密度为 $\rho = \frac{m}{V}$ 。

说明：

(1) 在国际单位制中，密度的单位为千克 / 米³。常用的密度单位还有克 / 厘米³、吨 / 米³等。

(2) 物质的密度常与温度有关，多数物质温度升高，密度变小。气体的密度还与压强和干燥程度有关，所以在表述物质的密度时，常需讲明它的压强、温度等状态。例如，纯水在标准大气压、4℃时的密度为 1.00×10^3 千克 / 米³；标准状态下干燥空气的平均密度为 1.293 千克 / 米³。

(3) 有些物质在空间的分布，比较集中在二维的面上或一维的线上，例如，薄的铁板及细铁丝。这时常常用面密度及线密度的概念。

(4) 对于非均匀分布的物质，或者说在空间任意分布的物质，我们可以用平均密度及密度分布（或者说分布密度）的概念。

相对密度

物质的密度与标准水（标准大气压、4℃时的纯水）的密度之比。是无量纲的物理量。

线密度

均匀分布在单位长度上的物质质量，记作

$$\eta = \frac{m}{L}。 \quad \text{EMBED Equation.2}$$

面密度

均匀分布在单位面积上的物质质量，记作

$$\sigma = \frac{m}{S}。$$

平均密度

任意一部分空间的物质，其质量与体积之比，称为该体积中的平均密度，记作

$$\bar{\rho} = \frac{\Delta m}{\Delta V}。$$

密度函数

平均密度的极限，即

$$\rho(x, y, z) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}。$$

说明：

为了精确反映物质在空间各处不均匀分布的状况，可对平均密度求

极限，即 $\bar{\rho} = \frac{\Delta m}{\Delta V}$ ，取 $\Delta V \rightarrow 0$ 的极限，就得到密度函数的概念。

数密度

单位体积中的粒子的数目。

说明：

- (1) 反映分子、电子等粒子的分布状况。
- (2) 在国际单位制中，数密度的单位是 $1 / \text{米}^3$ 。

压强

物体在单位面积上受到的法向力的大小。对于均匀受力的固体，如果其受力面积为 S ，垂直作用在其上的力为 F ，则压强

$$p = \frac{F}{S}。$$

说明：

- (1) 国际单位制中，压强的单位是帕斯卡，简称帕，1 帕斯卡=1 牛顿 / 米²。

压强常用的单位还有巴（毫巴）、毛、标准大气压强、毫米汞柱、达因 / 厘米²等。它们的换算关系为：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 帕} &= 9.869 \times 10^{-6} \text{ 大气压} = 10 \text{ 达因} / \text{厘米}^2 \\ &= 7.501 \times 10^{-3} \text{ 毫米汞高。} \end{aligned}$$

在气象学中规定 1 巴 = 10^5 帕，在厘米克秒制中 1 巴 = $\frac{1 \text{ 达因}}{\text{厘米}^2}$ ，两者不可混淆。

- (2) 压强与压力的英文都是 pressure，但在我国它们是有严格区分的两个物理量。均匀受力情况下，压力=压强×受力面积。

(3) 流体的静压强。在静止流体中每一点都要受到压强，在同一深度处各方向的压强都相等。微观上认为压强是由分子间相互作用的排斥力产生的。宏观上认为流体内部某一点的压强是由其上部液柱所受重力引起的。对于均匀的密度为 ρ 的静止流体，其内部深度为 h 处的压强为

$$P = \rho gh,$$

式中 g 是重力加速度。而流动流体内的压强，则与其流动的状态（转动、湍流、稳流等）及流速等均有关。

(4) 量度热力学系统的力学参量之一。从分子运动论的观点分析，气体的压强是指大量气体分子与器壁碰撞时，在单位时间内作用于器壁单位面积上的总冲量。

帕斯卡定律

是密闭液体传递外加压强的规律，即加于密闭液体的任一部分的压强，能保持其大小不变沿着液体朝各个方向传递到各处(包括液体内部以及与液体接触的器壁)。该规律由法国数学家、物理学家帕斯卡发现，由此而命名为帕斯卡定律。

说明：

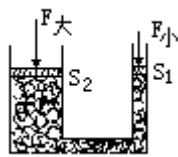
(1) 帕斯卡定律旧译为巴斯噶定律。

(2) 帕斯卡定律的基础是液体的不可压缩性。液体的体积随压强变化的规律可表示为

$$V=V_0 [1-\beta (p-p_0)] ,$$

式中 p_0 为标准大气压强， V_0 为压强 p_0 时液体的体积， β 为液体的压缩系数。

压缩系数是个常数，且均很小，如水的压缩系数为 $\beta =5\times 10^{-5}$ /大气压。故通常认为液体是不可压缩的。对于密闭容器中的液体来说，因液体是不可压缩的，所以各处密度相等。又由于各处的高度差不大，则其内部静压强跟外加压强(往往可大到几十、几百个大气压)相比，可以忽略不计，因此可以将密闭液体内各点的压强都看成与外加压强相等，这就是帕斯卡定律。



(3) 根据帕斯卡定律，在类似图示的连通器中，在小活塞上作用一个较小的力，通过活塞将其产生的压强加于液体，由密闭液体传递后可以在大活塞上获得一个相当大的力。这就是液压机的制造原理。

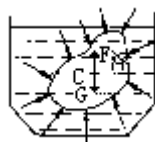
阿基米德定律

部分或全部浸于静止流体中的物体，将受到向上的浮力。浮力的大小等于物体所排开的这部分流体所受到的重力；浮力的作用点在物体排开的这部分流体原来的重心位置处。

说明：

(1) 由古希腊学者阿基米德首先发现浮力的规律，故后人称之为阿基米德定律。

(2) 对于浸没在流体中的物体所受的浮力可作如下分析（下图）：



任意形状的物体浸没在流体中时，它与流体接触的表面上都要受到周围流体对它的静压强，而且随着物体表面所处深度的增加，压强也增大，因此，对相同大小的面积元来说，下部的面积元所受压力比上部面积元的大，这种压力处处与物体的表面垂直，整个物体所受的总压力应是各面元上压力的合力。显然，这合力也就是流体中与物体同样形状、相同体积的原来那部分流体所受周围流体对它的作用力（因为周围流体对该部分形体的作用力，并不由于物体的更换而变化）。由该部分流体原处于静平衡状态，推知这个作用力应该与原来该部分流体所受的重力是一对平衡力。即这个作用力与被排开的这部分流体所受的重力大小相等、方向相反，且都作用在被排开流体的重心处。也就是说，物体所受周围流体对它的作用力的大小与被它排开的流体所受的重力相等；方向与被排开流体所受重力的方向相反，永远向上，故称为浮力。而浮力的作用点（称为浮力中心）在被排开的那部分流体原来的重心处。实验和计算可知，浮力的大小可用下式计算

$$F_{\text{浮}} = V_{\text{排}} \cdot \rho_{\text{流}} \cdot g,$$

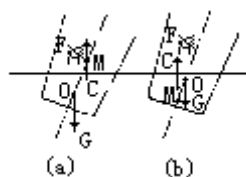
式中 $V_{\text{排}}$ 是被物体排开的流体的体积， $\rho_{\text{流}}$ 是流体的密度， g 是重力加速度。

(3) 对于部分浸于液体中的物体（如船舶、浮标等漂浮物），可视为全部浸没于流体中：下部是液体，上都是气体。所以要根据浸在液体和气体中的体积分别计算浮力，总的浮力是这两部分之和。而且因为气体的密度比液体的密度小得多，所以在精度要求不太高的情况下，可忽略上部气体产生的浮力而只计下部液体产生的浮力。

(4) 注意，一般物体的重心 O 与其浸没于流体中时所受浮力的中心 C （右图）是不重合的，又可能不在同一铅垂直线上，而且物体所受重力 G 的大小与浮力 $F_{\text{浮}}$ 的大小也不一定相同，这两个力将对物体构成一组力矩。物体在这组力矩的作用下，一方面绕其质心转动，直至转到 G 和 $F_{\text{浮}}$ 处于同一铅直线上；另一方面向上（当 $F_{\text{浮}} > G$ 时）或向下（当 $F_{\text{浮}} < G$ 时）运动，直至浮于流体表面或沉于底部，当 $F_{\text{浮}} = G$ 时，物体可悬浮于流体中任何一深度处。



对于船舶等漂浮于液面的物体来说，浮力中心和重心的相对位置影响其稳定性。因为船舶颠簸时，浮力中心的位置发生改变（如果船上货物没有固定或大量人员移动，重心的位置也会改变），如果浮力的作用线与船舶的中心线的交点 M 在重心 G 的位置之上 [上图 (a)]，则浮力和重力的合力矩将使船舶恢复平衡。如果 M 点在 G 点之下 [上图 (b)]，则浮力和重力的合力矩将使船舶继续倾侧，以至倾翻。因此必须使船舶等物的重心尽量降低，以增加其稳定性。



(5) 浮力既然是流体作用在物体上、下表面的压强差引起的，那么归根到底也就是由流体所受的重力引起的。因此在“重力”发生变化时，浮力也要相应发生变化。例如在失重情况下，浮力将相应变小（在完全失重的状态下，浮力将不复存在）；而在超重情况下，浮力将相应增大。

质点

指具有一定质量但可忽略其大小、形状和内部结构的物体。质点是为讨论问题方便，而由实际物体抽象出来的一个理想模型。

说明：

(1) 任何实际物体都有一定的大小和形状。物体运动时，内部各点的运动状况十分复杂；但当仅考察物体的整体运动，物体本身的大小比物体运动轨道的线度又小得多时，物体的大小及形状与所研究问题或者无关，或者关系很小，因而在研究这类问题时，物体的形状和大小可不予考虑，物体内部各部分运动状况的差别亦可忽略不计，而把物体作为一个质点来处理，问题便大大简化。例如，地球一方面绕太阳公转，另一方面作自转，地球上各点相对于太阳的运动是各不相同的。但是由于地球到太阳的距离是地球直径的 1 万多倍，所以当我们研究地球的公转时，把地球看作质点。

(2) 一个物体是否可当作质点对待，应根据所研究问题的性质而定。例如在跑道上起飞的飞机，当我们研究飞机起飞应当具有多大速度时，可以把飞机视为质点；而当研究飞机起飞的升力时，就不能再把飞机视作质点了。

另外，我们亦不可单凭物体的大小来决定能否把物体视为质点。一颗巨大的恒星，在研究其运行轨道时完全可以把它作为质点看待；但一个尺度微小的原子或分子，在研究其内部振动和转动时，就不能把它视为质点。

(3) 作平动的物体，不论其大小如何，总可以把它看作质点，因为平动物体上任一点的运动情况均相同，它的大小与形状均不影响物体的平动。

质点是力学中的一个重要概念，在许多问题中可以把整个物体视作质点而使问题简化；另外，当整个物体不能视为质点时，又常常可以把它看作许多质点的集合，即“质点系”。

刚体

物体内部任意两点间的距离始终保持不变，从而使其大小与形状永远保持不变的物体。

说明：

(1) 刚体是一种理想模型。事实上，真实的刚体是不存在的。任何物体在外力作用下，其内部各点之间的距离都有变化，反映到物体的大小、形状及各部分的相对位置均会发生改变。但在许多情况下，一些物体的这种变化并不显著，对所讨论问题的影响可以忽略，这时我们把物体看作刚体，所讨论的问题便大为简化，而所得结果仍和实际情况相当符合。这正是建立理想模型的目的。

(2) 在研究的问题中，实际物体是否为刚体，不应根据这个物体的坚硬程度，而应视具体情况而定，特别应根据研究目标及所讨论的对象而定。例如研究一钢杆的整体移动或转动时，可把它看作刚体，但当研究钢杆的弹性形变或内部应力时，就不能再把它看作刚体。

(3) 刚体作为无形变的理想物体，其弹性模量可以视作无穷大，因此在其内部传递信息的速度是无穷大，即信息的传递不需要时间，也就是说，超距作用可以通过刚体传递。事实上，任何作用的传递都是需要时间的，超距作用实际上不可能存在。所谓的超距作用，只能是一种可以不计传递时间的近似，也可说是一种理想模型。刚体与超距作用是互相联系的一对模型。

平衡

几个力（即力系）同时作用在一个物体上，物体的运动状态保持不变的情况。

说明：

(1) 物体的运动状态不变是指物体保持静止状态、匀速直线运动状态或绕轴匀角速转动状态。这三种状态分别叫做静平衡状态、平动平衡状态和转动平衡状态。

物体处在静平衡和平动平衡状态（此时的物体往往可视为质点）的条件是：作用在物体上的全部力（可视作共点力系）的合力为零，即所有这些力组成一个平衡力系。

物体处在转动平衡状态的条件是：作用在物体上的全部力对转轴的合力矩为零。

同时满足上述两个条件，则物体处在完全的平衡状态。

(2) 在重力场或其他有势场中，根据在平衡位置时物体势能的相对大小，可以将平衡分为稳定平衡、不稳定平衡和中性平衡等三类。

(3) “平衡”在物理学中使用较广，除了上面提到的物体的平衡、力的平衡和力矩平衡外，还有物理状态的平衡（如气、液态平衡，固、液、气三相平衡），物理量（负载、压强、温度等）的平衡，电学中的三相电的平衡等。

稳定平衡

静止物体受到微小扰动后能自动恢复原位置的平衡状态。

说明：

处于稳定平衡位置的物体势能最小，满足 $\frac{dV}{dx} = 0$ ，且 $\frac{d^2V}{dx^2} > 0$ ；此

时，若有外来微小干扰，势能增加，物体就偏离平衡状态；干扰消除后，由于有势力场的作用，物体就“自行”回到原位置。例如，直立的不倒翁。

不稳定平衡

处于平衡状态的物体，受到任何微小扰动后不再恢复原状的现象。

说明：

处于不稳定平衡状态的物体势能V最大，满足 $\frac{dV}{dx} = 0$ ，且 $\frac{d^2V}{dx^2} < 0$ ；

此时，若有外来微小干扰，势能减小，物体就偏离不稳定平衡位置，朝着势能较低的状态转变，而不恢复原状。例如，直立在桌面的筷子。

中性平衡

又称随遇平衡。处于该平衡状态的物体，受到微小干扰后，能在任意位置继续保持平衡的状态。

说明：

处于中性平衡的物体，势能满足 $\frac{dV}{dx} = 0$ ，且 $\frac{d^2V}{dx^2} = 0$ ，即势能为常

量或零。例如，均质圆球在水平面上的平衡。

牛顿第一运动定律

任何物体都保持其静止或匀速直线运动的状态，除非作用在它上面的力迫使它改变这种状态。

说明：

(1) 牛顿第一定律是力学的基础，首先提出了物体的惯性概念。它指物体本身具有一种企图保持原有运动状态不变的性质，或者说物体具有反抗运动状态变化的性质，这就是物体的惯性。所以，此定律亦称为惯性定律。

(2) 第一定律还提出了“力”的概念，定性地指出了力与运动的关系。力是物体间的一种作用，是改变物体运动状态的原因，不是维持物体运动的原因，打破了历史上长期束缚人们思想的亚里士多德的错误观念。

(3) 第一定律又给出了惯性系的定义。一个不受力作用的物体将保持静止或匀速直线运动状态不变，这只是在特定参考系中才成立，这样的参考系叫做惯性参考系，简称惯性系。

(4) 物体在没有受到外力作用或所受合外力为零的情况下，究竟是静止还是作匀速直线运动，除了与参考系有关外，一般要看初始运动状态。若初始时刻物体处于静止状态，则它将保持静止；若初始时刻物体处于运动状态，则它将以当时的速度作匀速直线运动。

(5) 牛顿第一运动定律首先由伽利略提出，以后在牛顿总结动力学规律时，把它称为第一运动定律。它是一个独立的定律，不能从牛顿第二定律推出。因为

必须首先由它定义惯性系，而第二定律是建立在第一定律基础之上的。从这个意义上说，惯性定律是研究整个力学问题的出发点。

牛顿第二运动定律

物体在受到外力作用时，所获得的加速度的大小与外力成正比，与物体的质量成反比，加速度的方向与外力的方向相同。其数学表达式为

$$f=ma,$$

式中 f 是物体所受到的所有的合外力， m 为物体的质量， a 为物体的加速度。

说明：

(1) 牛顿第二运动定律是经典力学的核心，定律将力和质量这两个概念紧密相联。牛顿第一定律只是定性指出了力和运动的关系，第二定律进一步给出了力和运动的定量关系。定律阐明了力、质量和加速度三者的定量关系，包括力与质量的定量度量的定义。

(2) 关于力的定量定义。为了定量地表示力的大小，我们可以任意选定一个物体作为度量力的标准物体，把力施于标准物体上，使物体产生加速度，把产生某一加速度值的力定义为一个单位。当另一个力作用到标准物体上，所产生的加速度是单位力所产生加速度的几倍，则该力就为几个单位的力。这样利用不同的力在标准物体上所产生的加速度不同，就定义了力的度量。值得指出，这样的定义实际上包含了一种人为的约定，即人为规定了作用在选定的标准物体上的力与所产生的加速度成正比。而作用在其他物体上，直至外推到作用在一切物体上的力均与其产生的加速度成正比，这个结论才是定律本身的内容，是对自然界规律的反映，是否正确必须由实验来检验。

(3) 关于质量是物体惯性大小量度的定义。把同一个力作用到不同质量的各个物体上，得到不同的加速度，人为规定各个物体的质量与它们在同一给定力作用下获得的加速度成反比，即物体质量越大，所获得的加速度越小，也就是越难改变其原有的运动状态，即物体的惯性越大，所以质量是物体惯性的量度。选定一个物体的质量为一个单位，就可由此确定其他物体的质量大小。以上质量的定量定义，同样包含了人为的规定。而牛顿第二定律所指出的，在外力作用下物体的质量与加速度成反比，是一个普遍的结论，它应当对一切外力均成立，而且认为质量的大小是物体固有属性（惯性）的反映，与所受外力的大小无关。这些普遍的结论亦必须由实验证明其正确性。

(4) 值得指出，在历史上牛顿提出的这个物体运动的基本定律，主要是建立在对天体运动等大量实际物体运动规律的分析的基础上的，所得出的结论既有实验观测的总结，亦有在实验基础上所作的理论外推。定律的正确性并不在于得出结论时逻辑的严密性，主要是所得的结论为以后大量实践所检验和证实。牛顿

运动定律是一条古老的定律，在它创立至今的 300 多年内，不仅受到了大量实践的检验，而且在应用方面，特别是在天文学上，取得了极其辉煌的成就。今天，人造卫星，宇宙航行等大量新的科学实验及应用，都继续不断地证实了定律的正确性。与此同时，亦发现了牛顿运动定律在适用范围上的局限性。

(5) 牛顿力学中认为物体的质量是与速度无关的常量，因此牛顿第二运动定律可以表示为

$$f = ma = m \frac{dv}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{dp}{dt},$$

即物体的动量对时间的变化率与所受外力成正比，且动量变化发生在外力的方向上。这一用动量变化率表达的牛顿第二定律，应当认为是该定律更基本、更普遍的形式。这是因为一方面在物理学中动量这个概念比速度、加速度等更为普遍和重要；另一方面，现代实验证明，当物体的速度接近光速时，物体的质量已不再是常数，而是与速度有关的变量。这时用动量变化的形式表达的牛顿第二定律，实验证明还是正确的，而用加速度与质量乘积所表达的形式已不再适用。十分有趣的是，历史上牛顿提出这一定律时所采用的原始形式，正是动量变化率这一形式。

(6) 合外力的方向决定了物体加速度的方向，加速度的方向正反映了物体所受合外力的方向，而物体的运动方向往往与力的方向不一致。这是因为牛顿第二定律所反映的力与加速度的关系是瞬时关系，外力消失，加速度同时消失；外力改变，加速度也随之改变（包括大小与方向）。而物体每时每刻的运动方向，决定于每时每刻的即时速度的方向。某时刻即时速度的大小与方向，不仅与加速度的大小与方向有关，还与前一时刻的速度的大小与方向有关。所以，物体的运动方向应与所受合外力及其初始速度有关。

牛顿第三运动定律

凡有作用必有反作用，物体间的作用力和反作用力大小相等，方向相反，且沿同一直线。

说明：

(1) 定律揭示了力是物体间的相互作用，使力的概念更加完善、深化。牛顿第三定律使我们了解物体系中物体间的相互作用总是成对出现的，从而区分内力与外力对体系的动力学贡献之不同，进而简化物体系问题的有关运算。

(2) 应强调作用与反作用总是同时出现、同时消失的，单一的作用是不存在的。有作用必定有反作用，但它们是分别作用在两个相互作用的物体上的，所以不会抵消。这与作用在同一物体上的两个平衡力互相抵消是截然不同的。

(3) 作用力与反作用力必定是同一性质或同一类型的力。此外，作用与反作用是完全相互的，作用与反作用的名称完全可以互相置换。

(4) 在低速运动范围，不论是静止物体间的相互作用，还是运动物体间的相互作用；不论是匀速运动物体间的相互作用，还是加速运动物体间的相互作用；不论是持续的相互作用，还是短暂的相互作用都遵循第三定律。

独立作用原理

一个物理系统若参与多个运动或受到多个力的作用，那么任何一个运动或作用，都不会因为其他运动或作用的是否发生或存在而受到影响，即它们彼此是各自独立的，这就称为运动或力的独立作用原理，亦称为独立性原理。

说明：

(1) 独立作用原理是运动的合成和分解、力的合成和分解的基础。

(2) 独立作用原理是叠加原理的前提或出发点，有时两个原理实际上是指同一意思。例如，力的叠加原理就是力的独立作用原理。

叠加原理

物理学基本原理之一。

说明：

(1) 在数学上，如果描写系统的动力学方程是线性微分方程，则它的解满足线性叠加原理。

(2) 波的叠加原理：空间同时存在由两个或两个以上的波源所产生的波时，每个波并不因其他波的存在而改变其传播规律，而空间每一点的振动的物理量则等于各个波在该点激起的振动的物理量的矢量和。

(3) 场的叠加原理：空间同时存在由两个或两个以上的场源所激发的场时，空间各点的总场强等于该点各个场强的矢量和。

(4) 态的叠加原理：一个物质系统存在两个或两个以上的可能状态时，这些状态的线性和也是该物质系统可能存在的状态。

力学相对性原理

可以有三种等效的表述：

①在所有相互作用匀速直线运动的惯性系中，牛顿运动定律均成立，且形式不变；

②在任一惯性系内部，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是运动的，还是静止的；

③所有惯性系都是平权的、等价的，不存在一个特别优越的惯性参考系（例如绝对静止参考系）。

说明：

(1) 原理最早是伽利略提出的，所以亦称为伽利略相对性原理。1632年伽利略在他的名著《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》中有一段关于相对性原理的生动描述。那就是在一艘匀速运动的大船上，飞虫的飞行，水滴的下落，人的跳跃，均不会因为船的运动而受到影响，就与在静止船上发生的情形完全一样。伽利略以此来支持哥白尼的地动学说，同时揭示了一条极为重要的道理，即从船上发生的任何一种现象，你是无法判断船究竟是在运动，还是停止不动。也就是说运动与静止完全是相对的，不存在绝对静止或绝对运动的判据。

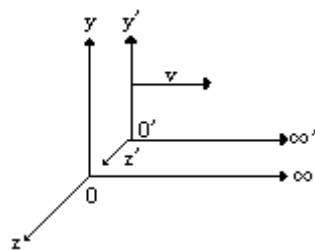
(2) 1905年爱因斯坦提出狭义相对论，保留并进一步推广了相对性原理，把该原理从力学范围推广到整个物理学，即物理定律应在所有惯性系中均成立，且形式相同。任何物理实验，包括力学的、电磁的、热学的……都不能判断所在惯性参考系是否在运动或静止。这一推广是十分自然的，事实上很难绝对地区分纯力学或纯电磁学的实验。爱因斯坦正是根据相对性原理和光速不变原理创立了狭义相对论，实现了物理学在本世纪初的一场时空观革新。所以，今天我们可以认为相对性原理是物理学的一条普遍的、极为基本的重要原理。

伽利略变换

经典力学中，两个不同惯性系的时间和空间坐标之间的变换关系。设惯性系 S' 相对于另一惯性系 S ，沿 x 方向以匀速度 v 运动，取两坐标原点相重合的时刻作为时间的零点（右图），则两参考系的时空坐标变换式为

$$\begin{cases} x = x' + vt, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = t'。 \end{cases}$$

以上变换式即称为伽利略变换。



说明：

(1) 伽利略变换反映了牛顿的绝对时空观，即时间是完全绝对的，与空间无关、与参考系无关。空间间隔、时间间隔与参考系无关，是绝对不变的。其核心是时间的流逝、空间的度量均与所选参考系无关，与物质的运动无关，时间、空间是物质运动之外的绝对存在。这样一种时间、空间的观念，是在经典力学范围内，长期观测、研究宏观低速物体运动所形成的。

(2) 伽利略变换符合力学相对性原理的时空坐标变换式。由于物体运动的加速度是空间坐标对时间的二阶导数，很容易证明，在不同惯性系 S 与 S' 中加速度不变，即有 $a=a'$ 。另外，牛顿力学中认为质量 m 是不变常数，则有 $m=m'$ 。所以，牛顿运动定律 $f=ma$ 这一公式，在不同惯性系中的形式相同，或者说牛顿运动定律具有伽利略变换的不变性，这正是伽利略相对性原理的要求。

(3) 包括高速运动在内，更加一般的时空坐标变换是洛仑兹变换，伽利略变换只是洛仑兹变换式在低速（速度远低于光速，即 $v \ll c$ ）情况下的极限。我们这里写出以上 S 系与 S' 系之间的洛仑兹变换：

$$\begin{cases} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \end{cases}$$

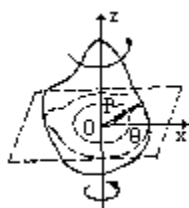
比较两种变换式，很容易看出，当 $v \ll c$ 时，洛仑兹变换就过渡到伽利略变换。

角位移

描述刚体转动时方位变化的物理量。

说明：

(1) 刚体绕一固定轴的转动是刚体转动的最简单的情形。这时刚体上所有点在同一时间内所转过的角度均相等，因此只要用一个角度 θ 就可以确定刚体的方位。通过刚体上任一点 P 作垂直于转轴的平面，称为转动平面。如右图所示，若 O 点是转动平面与转轴的交点，则角度 θ 是 OP 与 OX 直线的夹角，OX 是过 O 点垂直于转轴 OZ 的参考直线。角度 θ 称为方位角，并规定逆时针方向转动时 θ 为正。



设在时刻 t_1 ，P 点的方位角为 θ_1 ，而下一时刻 t_2 ，它的方位角为 θ_2 ，则在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 的时间间隔内转过的角度为

$$\Delta \theta = \theta_2(t_2) - \theta_1(t_1),$$

称为 P 点在 Δt 时间内的角位移。

(2) 在国际单位制中，角位移的单位是弧度，弧度是转过的弧长与半径之比，是一个没有量纲的量。

(3) 刚体绕一定点转动时，转轴就不再固定，转轴的方位可以随时变化。若转轴方位的变化是连续的，那么可以证明，具有固定点的刚体在每瞬时的运动，可以看成是绕通过定点的某一瞬时轴所作的瞬时转动。在不同的瞬时，瞬时轴的位置也不同，故刚体的整个运动过程可以看作是绕一系列的瞬时轴转动。定点转动的刚体绕瞬时轴转过一个无限小的角度，称为无限小角位移，用 $d\theta$ 表示，即其大小为

$$d\theta = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} [\theta(t_2) - \theta(t_1)] = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta \theta,$$

无限小角位移 $d\theta$ 是一个矢量，其方向规定为沿瞬时转轴的方向，指向由右螺旋法则确定。

(4) 值得指出，在刚体作一般转动时，在一段有限时间内的有限角位移 $\Delta \theta$ 不是矢量。刚体的一般转动比较复杂，在中学物理中，只讨论定轴转动，刚体作定轴转动时， $\Delta \theta$ 只分正、负，可视作标量。

角速度

描写刚体转动快慢和方向的物理量，就是角位移对时间的变化率。设在 Δt 时间内，刚体的角位移为 $\Delta \theta$ ，则在 Δt 时间内的平均角速度

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}。$$

在时刻 t_1 的瞬时角速度 ω 是个矢量，其大小为

$$\omega = |\omega| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}，$$

方向为无限小角位移 $d\theta$ 的方向，即沿该时刻的瞬时转轴，由右螺旋法则确定。

说明：

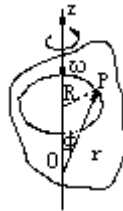
(1) 刚体作固定轴转动时，刚体上任一点的线速度 v 与角速度 ω 的关系，可用角速度 ω 与该点位矢 r 的矢量积表示，即

$$v = \omega \times r，$$

式中位矢 r 为刚体固定转轴上任一点 O 至该点的矢径，如下图所示。该点线速度的大小 $v = \omega r \sin \Phi = \omega R$ ，其中 $R = r \sin \Phi$ ，即该点到转轴的垂直距离。

(2) 刚体作定点转动时，刚体的整个运动过程可以看成是绕一系列的瞬时转轴的转动，所以，刚体的瞬时角速度向量 ω 就能真实地描述刚体在此瞬时转动的快慢及方向。这一向量由定点出发沿瞬时转轴，指向由右螺旋法则确定。

(3) 在国际单位制中，角速度的单位为弧度 / 秒。



角加速度

描述物体转动时，角速度变化的快慢和方向的物理量。设在时刻 t ，物体的角速度为 ω ，在时刻 $t+\Delta t$ 为 ω' ，则在 Δt 时间内的平均角加速度为

$$\bar{\beta} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega' - \omega}{\Delta t},$$

在时刻 t 的瞬时角加速度为

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt},$$

又称即时角加速度，简称角加速度。

说明：

(1) 在国际单位制中，角加速度的单位是弧度 / 秒²。

(2) 刚体绕固定轴转动时，角加速度矢量 β 的方向沿转轴，并与角速度矢量 ω 的方向相同或相反。若转轴方向的单位矢量为 k ，则

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} k,$$

当物体作加速转动时， $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ， β 与 ω 同向；当物体作减速转动时， $\frac{d\omega}{dt} < 0$ ， β 与 ω 反向。

(3) 刚体作定轴转动时，刚体上任一点的线速度等于

$$v = \omega \times r,$$

该点的加速度

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} \\ &= \beta \times r + \omega \times (\omega \times r) \\ &= a_t + a_n. \end{aligned}$$

式中 $a_t = \beta \times r$ 称为该点的切向加速度，大小为 $a_t = \beta r_n$ ， r_n 是该点到转轴的垂直距离，方向为 $\beta \times r$ 的方向； $a_n = \omega \times v$ 称为该点的法向加速度，大小为 $a_n = \omega^2 r_n = v^2 / r_n$ ，方向为 $\omega \times v$ 的方向。

(4) 物体作一般转动时，转轴可以随时改变，此时平均角加速度方向沿 $\Delta \omega = \omega' - \omega$ 方向，其中 $\omega' = \omega'(t')$ ，其方向为 t' 时刻的瞬时转轴的方向， $\omega = \omega(t)$ ，其方向为 t 时刻的瞬时转轴的方向。瞬时角加速度的方向则是平均角加速度在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限方向，亦即瞬时角速度的变化率之方向。总之，物体作一般转动时，比较复杂，在中学物理中一般不作讨论。

转动惯量

物体转动时其惯性的量度。刚体对某一转轴的转动惯量 I 定义为，组成刚体的每一质点的质量 m_i 与它到转轴的垂直距离 r_i 的平方的乘积之总和，即

$$I = \sum_i m_i r_i^2$$

说明：

(1) 在国际单位制中，转动惯量的单位是 $\text{千克} \cdot \text{米}^2$ 。

(2) 对于质量连续分布的刚体，相应于其质量呈线分布、面分布及体分布，其转动惯量可以分别以线积分（质量线密度为 λ ）、面积分（质量面密度为 σ ）及体积分（密度为 ρ ）表示，即

$$I = \int_L r^2 \lambda dl; \quad I = \iint_S r^2 \sigma dS; \quad I = \iiint_V r^2 \rho dV.$$

对于非刚体，因其位形可变，各质点相对于转轴的垂直距离也相应改变，所以其转动惯量不是定值。但任一瞬时的转动惯量值仍可用上述定义式来计算。



(3) 转动惯量是物体转动时惯性的量度，其性质完全可类比于物体的质量，即物体平动时惯性的量度。一个物体的转动惯量主要决定于其质量的大小、质量的分布和轴的位置。

(4) 比较物体的平动和转动的动力学公式，可以清楚地看出质量 m 与转动惯量 I 的地位和作用。





	动量	动能	动力学定律
平动	线动量	平动动能	牛顿第二定律




	$P=mv$	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$	$F = m\alpha = \frac{dP}{dt}$
转动	角动量 $L=I\omega$	转动动能 $E_k = \frac{1}{2}I\omega^2$	刚体定轴转动定律 $M = I\beta = \frac{dL}{dt}$

(5) 几种常见物体绕不同轴旋转时的转动惯量见下表:

刚体名称	转轴位置	转动惯量	图 形
薄壁圆环	沿直径	$I = \frac{1}{2}mr^2$ (r为半径)	
细 棒	过中心且和棒垂直	$I = \frac{1}{12}ml^2$ (l为棒长)	

(续表)

刚体名称	转轴位置	转动惯量	图 形
细 棒	过端点且和棒垂直	$I = \frac{1}{3}ml^2$ (l为棒长)	
矩形平板	过中心且和板面垂直	$I = \frac{1}{12}m(a^2+b^2)$ (a为长, b为宽)	
矩形薄板	沿中心线 (和板面平行)	$I = \frac{1}{12}mb^2$ (b为宽)	
实心圆薄板	沿直径	$I = \frac{1}{4}mr^2$ (r为半径)	

实心圆盘	过圆心且和 盘面垂直	$I = \frac{1}{2} mr^2$ (r 为半径)	
实心圆盘	过边上任一 点且和盘面 垂直	$I = \frac{3}{2} mr^2$ (r 为半径)	
实心圆柱 体	过中心且和 几何轴垂直	$I = \frac{1}{4} mr^2 + \frac{1}{12} ml^2$ (r 为半径, l 为 柱长)	

(续表)

刚体名称	转轴位置	转动惯量	图 形
实心圆柱 体	过圆心沿几 何轴	$I = \frac{1}{2} mr^2$ (r 为半径)	
空心圆柱 体	过圆心沿几 何轴	$I = \frac{1}{2} m(r_1^2 + r_2^2)$ (r_1 为内半径, r_2 为外半 径)	
薄壁圆筒	过圆心沿几 何轴	$I = mr^2$ (r 为半径)	
实心圆球	沿直径	$I = \frac{2}{5} mR^2$ (r 为球半径)	
球 壳	沿直径	$I = \frac{2}{3} mR^2$ (R 为球半径)	

切向加速度

质点作曲线运动时，所具有的沿轨道切线方向的加速度。

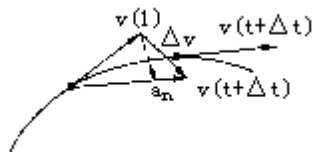
说明：

(1) 质点作曲线运动时，加速度为

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dt} e_{\tau} + v \frac{de_{\tau}}{dt} \\ &= a_{\tau} e_{\tau} + a_n e_n = a_{\tau} + a_n, \end{aligned}$$

式中 e_{τ} 、 e_n 分别为切向单位矢量和法向单位矢量。 a_{τ} 只考虑速度大小的变化，方向仍沿该时刻的切线方向，即为切向加速度。由右图可见，对切向单位矢量 e_{τ} 求导，可先讨论 Δv 的指

向，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，它所指方向就是 $\frac{de_{\tau}}{dt}$ 的指向，即沿与速度 v 垂直的方向。



(2) 质点作曲线运动时，切向加速度的数值 $a_{\tau} = \frac{dv}{dt}$ ，就是通常的标

量导数运算。

(3) 凡有速度大小改变的物体都有切向加速度。

法向加速度

质点作曲线运动时，所具有的沿轨道法线方向的加速度。

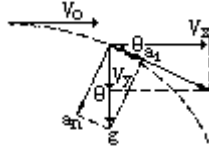
说明：

(1) 质点作曲线运动时，加速度为

$$a = \frac{dv}{dt} = a_t e_t + a_n e_n$$

$$= a_t + a_n,$$

式中 a_n 只考虑速度方向的变化，速度大小不变，即为法向加速度。



(2) 法向加速度 $a_n = \frac{de_n}{dt}$ 是矢量的导数, 运算比较复杂, 但可与匀

速圆周运动的向心加速度相类比, 它的大小 $a_n = \frac{v^2}{r}$, 其中 r 是该处轨道

的曲率半径, 它的方向 e_n 是轨道的法向, 即沿该处轨道切线的垂直方向, 指向轨道曲线凹的一侧。

(3) 凡有速度方向改变的物体都有法向加速度。

向心加速度

物体作圆周运动时的法向加速度, 方向永远指向圆心, 故称为向心加速度。

说明:

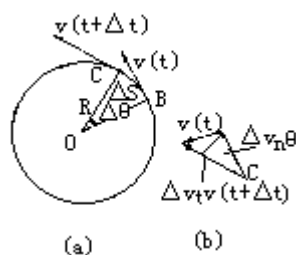
(1) 物体作匀速圆周运动时, 其切向加速度为零, 法向加速度 (即向心加速度) 的大小等于 v^2 / R , v 为匀速圆周运动的速度, R 为圆半径; 当物体作变速圆周运动时, 速度大小随时变化, 故其切向加速度不

为零 (等于 $\frac{dv}{dt}$), 也可随时变化, 但其向心加速度仍为 v^2 / R , 此处

v 为即时速度。

利用密切圆的概念, 即在考察点与曲线相切的圆, 其半径为曲线在该点的曲率半径, 圆心为该点的曲率中心。圆周运动的向心加速度概念还可推广为一般曲

线运动的法向加速度，公式仍为 $a_n = v^2 / R$ ，这里 v 为质点在考察点的即时速度， R 为曲线在考察点的密切圆的半径，也就是曲线在该处的曲率半径。



(2) 圆周运动向心加速度公式 $a_n = v^2 / R$ 的推导：

如上图 (a) 所示， $v(t)$ 和 $v(t + \Delta t)$ 分别为质点沿圆周运动经过 B 点和 C 点时的速度矢量。由加速度的定义得

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

如上图 (b) 所示，将速度矢量 $v(t)$ 移至 C 点，在矢量 $v(t + \Delta t)$ 上截取一段，使其长度等于 $v(t)$ ，作矢量 Δv_n 及 Δv_t ，有

$$\Delta v = \Delta v_n + \Delta v_t,$$

则

$$\begin{aligned} a &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_t}{\Delta t} \\ &= a_n + a_t, \end{aligned}$$

即加速度 a 可以看作由 a_n 和 a_t 两个分加速度的合成。其中 a_t 的大小显然表示质点速度大小变化的快慢，其方向与速度方向一致，即沿圆轨道的切线，这一分加速度就是切向加速度。对于匀速圆周运动，切向加速度等于零。

由上图 (b) 可见， $\Delta v_n = v \Delta \theta$ ，再由上图 (a) 可见， $\Delta \theta =$

$$\Delta s / R, \text{ 所以 } \Delta v_n = \frac{v}{R} \Delta s, \text{ 这样 } a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v \Delta s}{R \Delta t} = v^2 / R, \text{ 这}$$

就是 a_n 的大小。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时， $\Delta \theta \rightarrow 0$ ， Δv_n 的方向趋向于与速度 $v(t)$

的方向垂直， $v(t)$ 沿圆的切向，所以 a_n 的方向永远沿圆半径，并指向圆心，这一分加速度 a_n 就是法向加速度或向心加速度。

向心力

亦称法向力。是物体作匀速圆周运动时，所受到的永远指向圆心的力，或者物体作曲线运动时，所受到的指向曲率中心的力。

说明：

(1) 物体作匀速圆周运动时，产生向心加速度的力就是向心力。

它的大小为 $F_n = ma_n = \frac{mv^2}{R}$ ，式中 m 为物体的质量， v 为速度， R 为圆半径。

由此可见，当 m 、 v 一定时， R 越小，即轨道越弯曲，其所需向心力越大。

(2) 物体作变速圆周运动或一般曲线运动时，在速度的垂直方向上所受到的分力也指向圆心或轨道的曲率中心，则也叫做向心力。它的

大小同样为 $F_n = \frac{mv^2}{r}$ ，这里 r 为轨道的曲率半径。

(3) 向心力不是和重力、弹力、摩擦力、电场力、磁场力等相并列的另一种类型的力。任何一个力或几个力的合力，只要它的作用效果是使质点产生向心加速度，这个力或这几个力的合力就是向心力。

离心力

向心力的反作用力。

说明：

(1) 离心力与向心力是一对作用力与反作用力，大小相等、方向相反，作用在施力的物体上，而不是作用在作圆周运动或曲线运动的物体上。例如绳的一端系以重物，手执绳的另一端使其旋转，则手对重物施加的力，就是重物所受到的向心力，而手上感到的力，是重物对手的反作用力，就是离心力。

(2) 若参考系建立在作圆周运动或曲线运动的物体上，如果物体保持相对静止，就认为该物体受到一个与向心力大小相等、方向相反的平衡力，这个力就

是所谓的惯性离心力，有时亦简称为离心力。惯性离心力是一种惯性力，只出现在非惯性参考系中，它不是物体相互作用的作用力，不存在施力体，仅仅是因为参考系的非惯性运动所造成的。

开普勒定律

德国天文学家开普勒发现的行星运动所遵循的规律。包括第一定律、第二定律和第三定律。

第一定律（轨道定律）：所有行星都沿各自的椭圆轨道运行，太阳位于这些椭圆的一个焦点上。

第二定律（面积定律）：太阳到行星的矢径在相等的时间内扫过相等的面积。

第三定律（周期定律）：任一行星绕太阳公转的周期 T 的平方与它离太阳的平均距离 R （或其轨道的长半径）的立方成正比，即

$$KT^2=R^3,$$

式中 K 称为开普勒系数，是对太阳系中一切行星都相等的一个常数。若上式中 T 以地球年为单位， R 以天文单位为单位，则 $K=1$ （1 天文单位（即地球与太阳的平均距离）= $1.496 \times 10^{11}\text{m}$ ）。

说明：

（1）丹麦天文学家第谷·布拉赫（1546—1601）连续 20 年仔细观察，并详细、精确地记录了行星的运动。他的学生开普勒，则致力于数据分析计算，终于总结出以上三条行星运动规律。其中第一、第二定律于 1609 年发表在《新天文学》的论著中，第三定律于 1619 年发表在《世界的和谐性》一书中。

（2）开普勒定律是经验定律，每一条定律都是从观察行星运动所取得的资料中总结出来的，它只涉及运动学、几何学方面的内容。定律仅对行星绕日运行作出了运动学描述，而没有给出行星运动的动力学原因。然而，开普勒定律是万有引力定律的基础，牛顿正是从开普勒总结出的行星运动规律中，根据动力学定律导出万有引力定律的。

（3）如果认为使行星轨道运动的作用力是太阳对它的万有引力，即认为行星的绕日运动是在有心力（始终指向太阳的）作用下的运动，那么根据仅受有心力作用，运动物体的角动量守恒的规律就可推出开普勒第二定律，也就是说开普勒第二定律是有心力场中运动的必然结果。

（4）第三定律亦是在万有引力作用下行星运动的必然规律。设行星作圆周运动，半径为 R ，周期为 T ，速度为 v ，有

$$T = \frac{2\pi R}{v}, \quad T^2 = \frac{4\pi^2 R^2}{v^2},$$

行星受太阳的引力作用，又有

$$G \frac{Mm}{R^2} = \frac{mv^2}{R}, \quad \frac{GM}{R} = v^2,$$

上两式联立，则有

$$T^2 = \frac{4\pi^2 R^3}{GM},$$

$$KT^2 = R^3,$$

即

这就是开普勒第三定律。

(5) 天文学家在众多星体的运行中，作出正确的观测结果，再经过运算分析，得出行星运动的规则，即开普勒三定律，由此牛顿才建立了万有引力定律。可见，物理学始终是一门实验科学，许多正确的物理理论是建立在大量的实验观测基础之上的。牛顿万有引力定律的发现是以大量的天文观测为基础的，决不是简单地从苹果落地启发灵感的结果。

万有引力定律

任何两个质点间都存在相互吸引力，该力的大小和两质点质量的乘积成正比，和它们间的距离的平方成反比；方向沿两质点的连线。其数学表达式为

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2},$$

式中 m_1 、 m_2 分别为两质点的质量， R 为两质点间的距离， G 为引力常数。在国际单位制中， $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ 。

说明：

(1) 牛顿是从开普勒三定律出发，建立万有引力定律的。牛顿根据开普勒第一定律，且为了简化问题，设想某行星以周期 T 不是沿椭圆而是沿半径为 R 的圆形轨道运动。又根据开普勒第二定律，设行星作匀速圆周运动的速度为 v ，

那么行星的向心加速度为 $a=v^2/R$ ，而周期 $T=2\pi R/v$ 。然后根据开普勒第三定律 $KT^2=R^3$ 。最后根据牛顿第二定律，得知行星所受太阳的引力为

$$F = ma = m \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 K m}{R^2},$$

式中 m 为行星质量。所以，引力 F 与距离平方成反比。再根据牛顿第三定律，行星也应以反作用力 F' 吸引太阳，且 $F=F'$ ，上式表明 F 与行星质量 m 成正比，所以 F 应与太阳质量 M 成正比，因此， $4\pi^2 K$ 显然与 M 成正比，令其比例系数为 G ，则 $4\pi^2 K=GM$ ，代入上式，最后得

$$F = G \frac{Mm}{R^2}。$$

牛顿再把这一结论外推到宇宙中任何两个质点之间，就得到了万有引力定律。

(2) 英国科学家卡文迪许通过实验于 1798 年测得万有引力常数 G 为 $6.754 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ 。

(3) 万有引力公式中的质量反映的是物体引力的性质，是物体与其他物体间产生引力大小的量度，称为引力质量，它与反映物体抵抗运动变化的性质的惯性质量在意义上是完全不同的。但实验证明，任何物体的引力质量严格等于其惯性质量。其深刻涵义于本世纪初由爱因斯坦阐明。

(4) 万有引力定律是自然界最重要的定律之一，它对天文学的发展起了决定性的作用，其最成功的事例当属海王星预言的证实。人造卫星、宇宙飞船的运行轨道的研究，也离不开牛顿的这一理论。

爱因斯坦引力理论

即广义相对论，又称时空几何动力学。这是爱因斯坦继狭义相对论之后，在对引力理论经过深入研究后，于 1916 年提出的一种全新的引力理论。这一理论完全不同于牛顿的引力论，它把引力场归结为物质周围的时空弯曲，把物体受引力作用的运动，归结为物体在弯曲时空中沿短程线的自由运动。因为广义相对论中把引力归结为时空的几何属性，因此，爱因斯坦的广义相对论是不存在“引力”的引力理论。

说明：

(1) 广义相对论是建立在等效原理和广义相对性原理（亦称广义协变原理）之上的。等效原理是从物体的惯性质量与引力质量相等这个基本实验事实出发，

认为引力与非惯性系中的惯性力等效，两者原则上是无法区分的；广义相对性原理则认为惯性系与非惯性系平权，物理规律应当在任何参考系中均可表示，反映物理规律的数学方程式在所有参考系中应当具有相同的形式。

从上述两原理出发，引力可以等效为惯性力，惯性力必定出现在作一般加速运动的参考系中，而一个加速参考系的特征可以通过时空坐标的变换理论，用四维时空的几何结构来描述，这样一个引力场通过等效原理就归结为一个四维物理时空的几何场，并将该几何场选定为弯曲的黎曼空间，这也就是通常说的弯曲时空。若将黎曼空间的度规张量看作引力场的引力势，即得爱因斯坦引力场方程

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu},$$

这是一个二阶偏微分的张量方程，是由 10 个方程联立而成，式中 $R_{\mu\nu}$ 和 R 是两个反映时空曲率的几何量，分别称为李西张量及标量曲率； $g_{\mu\nu}$ 是时空度规； $T_{\mu\nu}$ 称为能量动量张量，描写引力源物质的分布及运动。这个场方程所反映的引力作用是动态的，不是超距作用，而是以光速传递的作用。

广义相对论中引力场由度规场代替，物体在引力作用下的运动，被物体沿弯曲时空中的世界线即短程线的运动所替代，运动方程就是弯曲时空中的短程线方程

$$\frac{d^2x^\mu}{ds^2} + \Gamma^\mu_{\nu\tau} \frac{dx^\nu}{ds} \frac{dx^\tau}{ds} = 0,$$

这是四维时空坐标 x^μ ($x^0x^1x^2x^3$) 所满足的世界线方程， ds 为世界线元， $\Gamma^\mu_{\nu\tau}$ 称黎曼空间联络，有引力场强的意义。以上就是广义相对论的基本内容。

(2) 可以证明，广义相对论是比牛顿引力论更加一般的理论，牛顿引力论即万有引力定律是广义相对论的弱场近似。当弱引力场条件成立时，广义相对论的场方程及运动方程（短程线方程），可以化为牛顿引力势的油松方程及牛顿引力场中的物体运动方程，即

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho \quad \text{及} \quad \frac{d^2r}{dt^2} = -\nabla\Phi,$$

式中 Φ 即牛顿引力势， $-\nabla\Phi$ 即为引力场强，就是普通的牛顿第二定律。

(3) 广义相对论建立后，即为光线在太阳附近的偏折，水星近日点的进动以及光谱线在引力场中的频移三大经典实验证实。以后，又被雷达回波时间延迟、穆斯堡尔效应检测频移等更高精度的实验所证实。20 世纪 60 年代以来，一系列

天体物理上的新发现：3K 微波背景辐射，脉冲星，类星体，X 射电源等，都有力支持了广义相对论。

爱因斯坦一直把广义相对论看作自己一生最重要的科学发现，他说“要是我没有发现狭义相对论，也会有别人发现的，问题已经成熟。但是我认为，广义相对论不一样。”确实，广义相对论比狭义相对论包含了更深刻的思想，这一全新的引力理论，至今还是一个最好的引力理论。伟大的科学家汤姆孙曾经把广义相对论称作为人类历史上最伟大的成就之一。

宇宙速度

使地面上的物体摆脱地球或太阳引力的束缚，飞向宇宙空间所必须具有的最小发射速度。根据飞向星际空间后，物体运动情况的不同，分别有第一、第二、第三 3 种宇宙速度。

第一宇宙速度也叫环绕速度，指使物体从地面发射后，能绕以地球为圆心的圆周运动所需的最小发射速度。其值为 $v_1=7.9\text{km/s}$ 。

第二宇宙速度也叫逃逸速度，指使人造天体脱离地球引力作用范围飞向太阳，并在以太阳为圆心的圆轨道上运动所需的最小发射速度。其值为 $v_2=11.2\text{km/s}$ 。

第三宇宙速度指使人造天体脱离太阳系飞向星际空间所必须具有的最小发射速度。其值为 $v_3=16.7\text{km/s}$ 。

说明：

(1) 宇宙速度都是相对地球而言的速度。一般在计算时往往不计及人造天体从地面出发时空气阻力的影响，而且考虑发射时尽可能利用地球的自转或公转速度。

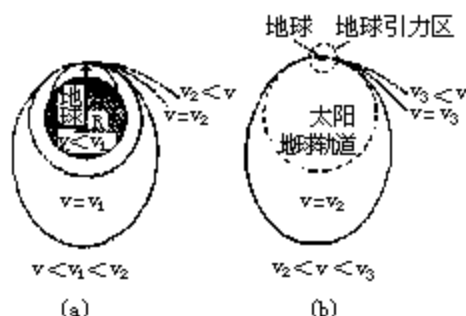
(2) 以第一宇宙速度发射的物体，环绕地球作圆周运动时，就是人造地球卫星。

具有第二宇宙速度的物体，在地球引力范围内，作抛物线运动，进入太阳引力范围后，以太阳为圆心作圆周运动，此时物体就是人造行星。

具有第三宇宙速度的物体，在地球附近，相对地球作双曲线运动，脱离地球引力后，相对太阳作抛物线运动，最后脱离太阳。

当物体具有介于第一、第二宇宙速度之间的速度时，将环绕地球作椭圆运动。地球位于椭圆的一个焦点处，发射点为近地点（下图）。

当物体速度介于第二、第三宇宙速度之间时，在地球引力范围作双曲线运动，脱离地球引力后，环绕太阳作椭圆运动（变成太阳的一个行星），太阳位于椭圆的一个焦点处。在此范围内，选用不同的速度和适当的轨道，物体就可以飞往任何行星。



黑洞

指物质空间出现的一个特别的时空区域。在这个区域中由于存在特别强烈的引力作用，它的时空就变得特别弯曲，以至这个区域内的光与其他粒子都只能单方向落入引力源，而决不会静止或向外运动，其引力源亦只能不断收缩而变为密度无穷大的奇点。

说明：

(1) 我们知道，一个质量为 M 的恒星上，当质量为 m 的物体之速度 v_e 满足

$$\frac{1}{2}mv_e^2 = G\frac{mM}{r}$$

时，即为物体脱离该恒星的逃逸速度

$$v_e^2 = \frac{2GM}{r},$$

式中 G 为万有引力常数。

当 v_e 为光速 c 时，则

$$r = r_s = \frac{2GM}{c^2} \text{ o}$$

此式告诉我们，在 $r \leq r_s$ 的球形区域中，即使光也无法逃离（辐射）。以上简单的计算结果令人惊奇的是恰恰与广义相对论的计算结果完全一致，正是这个

半径为 r_s 的球形区域叫做球对称黑洞， r_s 称为该恒星的引力半径或席瓦西尔半径。

(2) 仅仅依靠引力本身，就能使星体崩坍收缩为一个黑洞。我们知道，恒星的演化是以其内部核反应作能源为标志的，这能源维持着星体内部的压力及温度分布，而正是内部压力抵挡了星体的自引力作用，实现了力学的平衡。一颗恒星当其内部核燃料耗尽，核反应停止后，这样的晚期恒星它将演化为哪一类天体：白矮星、中子星还是黑洞，完全取决于其自身的质量。理论计算表明，当恒星质量 $M > 3.2M_{\odot}$ (太阳质量) 时，晚期在它的内部再也没有抵挡住引力的作用机制，因此不再存在稳定结构，这种星体将无止境地一直塌缩下去，最后形成黑洞。

(3) 一颗恒星形成黑洞后，任何信息都不能传出，但还存在许多外部的观测效应，为黑洞的存在提供有力的证据。寻找黑洞主要利用对密近双星的观测。所谓密近双星是靠得很近的两个星体，在相互引力作用下形成环绕运行的一个系统。如果一个黑洞和一个正常恒星构成密近双星，那么我们可以通过正常星的运行周期、质量，来判明其中黑洞的存在。另外，被黑洞潮汐力撕裂后的物质必然被吸积到黑洞中，这些吸积物向黑洞中坠落时，巨大的能量将以 X 射线或 γ 射线辐射出来，所以，强烈的 X 射线源也常常是寻找黑洞的主要线索之一。

现在大多数天文学家认为，“天鹅座 X-1”这一密近双星系的一员，最可能是黑洞，但还有争论。人们正通过其他途径努力寻找黑洞存在的更确定的证据。

(4) 在黑洞理论方面，英国当代著名物理学家霍金 (S. W. Hawking) 作出了重要贡献。1971 年，提出了黑洞面积不减定理；1974 年，进一步把量子力学与广义相对论相结合，提出了黑洞的辐射理论，这就是 20 世纪 70—80 年代引起物理学界轰动的“霍金辐射”。

功

量度能量转换与传递的物理量。功的大小等于质点受到的力和它的位移的标积，即可写成

$$dw = F \cdot dr = Fdr \cos \varphi,$$

式中 F 为质点所受到的力， dr 为质点在力作用下所作的一段微小位移， dw 即在这段微小位移上力所作的功。

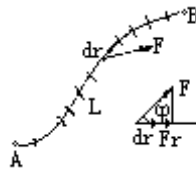
说明：

(1) 功是标量，没有方向，但有正负。当 $0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2}$ 时， $dw > 0$ ，

力对质点做正功；当 $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 时，力与位移垂直，力对质点不做功；当 $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$ 时， $dw < 0$ ，力对质点做负功，这时我们常说是质点在运动中克服力 F 做了功。

若质点沿一曲线路径 L 从 A 到 B ，力 F 对它做的功

$$W_{AB} = \int_A^B dw = \int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$$



这一积分，在数学上称力 F 沿路径 L 的线积分，等于把路径分成许多小段后（上图），在各小段上力 F 作功之和。

假如力是恒力 F ，位移是一段直线距离 r ，那么力 F 所做的功，就等于力在位移方向上分力与位移的乘积，即

$$W = F \cdot r = Fr \cos \varphi$$

(2) 必须从功与能量的关系上，及系统通过作功引起能量变化上来理解功的定义。从功的定义式中，我们仅可以把功理解为力的空间累积，而与力的空间累积相联系的效果，就是系统能量的变化。在宏观机械运动范围内，物体系统的动能与势能，通过物体间以宏观位移的方式转化能量，功就是这种能量转换及传递的量度。能量的变化必须通过作功的过程来实现，所以功是一个过程量。当然，除了通过作宏观功以外，还可以通过热传递（可理解为微观功）的方式实现能量转化。值得注意的是，功只是能量变化的量度，而决不等同于能量本身。

(3) 在关于功的定义中，对于位移的理解应加以注意，最常见的是三种理解：一是指力所作用的质点的位移；二是指力的作用点的位移；三是指力所作用物体的质心的位移。对于个别质点来说，这三种说法是一致的，但对于质点系来说，它们是有差别的。

如何判断这三种理解的正误或优劣，还是应根据功是能量变化的量度这一物理实质。当以物体质心位移来定义功时，结合质心运动定理即可推出外力作功的功能关系，它只能反映外力所作的功等于质心平动动能的变化，而不能反映除质心平动动能之外的能量变化，例如物体绕质心转动动能的变化。因此，采用质心位移来定义功不能全面反映质点系的能量变化，这种定义不可取。

当采用力的作用点的位移定义功时，结合牛顿运动第二定律可以推出

$$\begin{aligned}
 W &= \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}_{\text{力点}} = \int m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \cdot d\mathbf{r}_{\text{力点}} = \int m \frac{d\mathbf{r}_{\text{力点}}}{dt} \cdot d\mathbf{v} \\
 &= \int m \mathbf{v}_{\text{力点}} \cdot d\mathbf{v},
 \end{aligned}$$

注意上式中的 $\mathbf{v}_{\text{力点}}$ 为力的作用点的变动速度, 而 $d\mathbf{v}$ 为质点运动速度的微分; 一般说来 $\mathbf{v}_{\text{力点}}$ 不一定等于 \mathbf{v} , 所以上式右边不能通过积分而得出质点的动能增量来。这就是说, 当采用力的作用点移动定义功以后, 就没有相应的动能定理, 即不能正确理解功是能量变化量度这一个基本出发点, 这样定义显然是不合适的。

所以, 我们这里还是明确采用质点的位移来定义功, 因为只有这样才有正确的物理基础。

(4) 在国际单位制中, 功的单位是焦耳, 1 焦耳=1 牛顿·米。

功率

表示做功快慢的物理量。指单位时间内作的功或消耗的能量。功率是标量。

说明:

(1) 国际单位制中, 功率的单位是瓦特, 1 瓦特=1 焦耳 / 秒。常用的功率单位还有千克力·米 / 秒、马力、伏安等。

(2) 对于均匀做功 (即做功快慢不变), 功率等于 t 时间里所作的总功 A 与 t 的比值, 即

$$P = \frac{A}{t} = \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{r}}{t} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v},$$

式中 \mathbf{v} 是恒速度 (或是 t 时间内的平均速度), \mathbf{F} 是恒力。

对于非均匀做功, 功率也可用 $P = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$ 来计算, 在这种情况下力与速度都随时间变化, 功率也随时间变化。由公式算得的功率称为即时功率, 式中 \mathbf{v} 是即时速度, 而 \mathbf{F} 是同一瞬时的力。

(3) 功率也是表示机械做功本领大小的物理量。功率大, 意味着单位时间内作的功多。多数机械的功率是恒定的, 当用这类机械工作时, 根据公式 $P = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$ 可知, 若施力较小, 则可有较大的速度; 若施力较大, 则只能获得较小的速度。例如给定车床电机的功率, 在粗加工时, 切削量较大 (即车刀的切削力必须大), 则进刀的速度只能很小; 而精加工时, 切削量很小, 则进刀的速度就可大大提高。同理, 汽车发动机的功率已设计确定, 所以汽车在上桥、爬山时, 它的速度必须减小。

机械效率

机械输出的有用功与同一时间内它从外界吸收的总功之比。机械效

率是个无量纲的物理量，一般以百分率表示。若用 η 表示机械效率，

则有 $\eta = \frac{\text{有用功}}{\text{总功}} \times 100\%$ 。

说明：

(1) 在使用机械做功的时候，机械一般受到两种力：一种是外界驱动机械运动、做功的力，叫做动力；另一种是阻碍机械运动的力，叫做阻力。阻力中的一部分属由机械带动工件、传动部件等所需的力，称为有用阻力；另一部分属机械运动时与周围物体的摩擦、碰撞等所造成的阻力，称为无用阻力。动力对机械做的功叫做动力功，也叫总功或输入功；而机械克服有用阻力作的功叫有用功或输出功，克服无用阻力作的功叫无用功或耗散功。有用功与无用功之和等于总功。实际上，无用功或多或少总是存在的，它决不会等于零，所以机械效率总小于 1。

(2) 机械输出的有用功总是小于外界输入给机械的总功，所以机械效率不可能大于或等于 100%。但是利用机械，以多走距离为代价，能省力。例如，利用斜面，动滑轮等简单机械即可省力。

机械利益

机械产生的对外作用力和外界施于机械的力的比。

说明：

(1) 机械利益可以等于或大于 1。

(2) 根据简单的数学原理可知，联合机械的总利益等于其各个机械的利益的乘积。

动能

是能量的一种形式，指物体（或质点）由于运动而具有的能量。无论物体是平动、绕轴转动、振动或是进行其他复合运动，都具有动能。平动物体的动能等于质量和速度平方乘积的一半，即

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2。$$

说明：

(1) 在国际单位制中，动能的单位是焦耳。其他常用的单位还有尔格、电子伏特、千克力·米等。

(2) 运动物体的动能仅取决于它的速率，而与它的运动方向无关，所以动能是标量、状态量。

由于物体的速度与所选惯性参考系有关，物体的动能就和参考系相关联，它是相对于选定的惯性系而言的。

(3) 在质点力学中，物体被视为质点，而它的运动就是指平动。所以上述动能公式中的速率是指质点平动的速率。

质点系的动能应为其所有质点的动能之代数和。

(4) 在刚体力学中，物体定轴转动时也具有动能，称为转动动能，

$$\text{其值为 } E_k = \frac{1}{2}I\omega^2。$$

(5) 当物体运动的速度接近真空中的光速 c 时，物体的质量将随速度而变，此时它的动能要用相对论给出的动能公式来计算，即

$$E_k = mc^2 - m_0c^2。$$

式中 m_0 为物体的静止质量， m 为物体的运动质量。 m 随速度而变，与 m_0 有如下关系：

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}。$$

值得指出，以上相对论的动能公式，形式上似乎与我们所熟悉的牛顿力学中的动能公式完全不同，事实上两者是完全一致的，当物体的运动速度远小于光速时，即当 $v \ll c$ 时，有

$$\begin{aligned} EM &= mc^2 - m_0c^2 [(1 - v^2 / c^2)^{-1/2} - 1] \\ &= m_0c^2 [1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} (\frac{v^2}{c^2})^2 + \dots - 1] \\ &\approx \frac{1}{2} m_0c^2。 \end{aligned}$$

EMBED

Equation. 2

以上计算中最后一个等式略去了 $(\frac{v^2}{c^2})$ 的高次项，因为在 $v \ll c$ 时，这些

项非常微小，完全可略去。由此可见，相对论的动能公式是比牛顿力学更加一般的公式，运用于包括高速运动（接近于光速）在内的物体动能的计算。

势能

是能量的一种形式，指由于存在相互作用的保守力，而使物质系统具有的、与各部分间相对位置有关的能量。

说明：

(1) 势能以前亦称位能。根据全国自然科学名词审定委员会 1988 年决定，以后“势”不再称“位”，故位能的名词也被取消。

(2) 按照保守力的性质，势能相应地可分为引力势能、重力势能、弹性势能、分子势能、静电势能、核势能等。其中引力势能、重力势能和弹性势能属力学范畴。

(3) 势能是表征保守力作功的物理量，是位置的函数，记作 $E_p(r)$ ，它对空间的导数（即梯度）的负值就等于保守力 $F(r)$ ，即有

$$\begin{aligned} F(r) &= F_x i + F_y j + F_z k \\ &= -\left(\frac{\partial E_p(r)}{\partial x} i + \frac{\partial E_p(r)}{\partial y} j + \frac{\partial E_p(r)}{\partial z} k\right), \end{aligned}$$

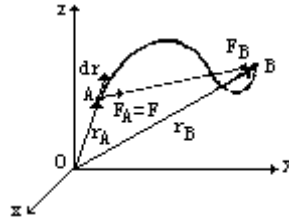
或者用积分式表示：

$$-\Delta E_p = E_{pA} - E_{pB} = \int_A^B F(r) \cdot dr$$

式中 E_{pA} 、 E_{pB} 分别表示质点在力场中 A、B 两点的势能， ΔE_p 是势能的增量。意思是质点从 A 点（位矢为 r_A ）运动到 B 点（位矢为 r_B ）时，其势能的减少量等于保守力 $F(r)$ 在此过程中所作之功。如果先选取 A 点为参考点，给该点的势能 E_{pA} 一个任意确定的值（通常取该值为零），那么，就可以计算出力场中任意一点的势能，即

$$E_{PB} = -\int_{r_A}^{r_B} F(r) \cdot dr + E_{PA} \quad \text{EMBED Equation. 2}$$

(4) 某点势能的绝对值随参考点位置的选择而改变（仅有相对意义），从作功角度来说，真正具有实际意义的是系统在两个位置之间势能的差值。



(5) 严格说来势能应该是以一对保守力（作用力和反作用力）相互作用着的两个质点（或系统）共同具有的能量，即有（上图）

$$\begin{aligned} \int_A^B F_A \cdot dr_A + \int_A^B F_B \cdot dr_B &= \int_A^B F \cdot d(r_A - r_B) \\ &= \int_A^B F \cdot dr \end{aligned}$$

它表明一对互为作用、反作用的保守力分别对两质点作功之和等于其中任意一个力在它们相对位移中所作的功。所以平日所说“一个保守力作的功”应该理解为“一对保守力的功”的同义语。为了简单起见，在势能的定义中常用上式右边的积分来计算功，然而恰是这一替代，掩盖了势能应该为以保守力相互作用的系统共有的真相，并简单地说是其中一个质点所有的能量。所以应该把“物体具有的势能”理解为是“物体与地球（或弹簧）系统共有的势能”的简单说法。由此可见，势能是随相对位置而变的能量。

(6) 由势能的定义知道，保守力作正功，系统势能减小；保守力作负功，系统势能增大。而且只要知道了势能的计算式，用代数方法就可求出两位置间的势能差，也就是求出保守力在这两位置间的功，这就为用计算势能来代替计算保守力的功提供了简便的方法。

重力势能

地球与地面附近各物体之间的引力势能。若以地球表面为零势能点，则物体的重力势能为

$$E_p = mgh,$$

式中 h 是物体 m 离开地面的高度， g 为重力加速度。

弹性势能

物体形变时，由于各部分之间存在弹性力的相互作用而具有的势能。

说明：

被压缩的弹簧和空气都具有弹性势能。在弹性极限内，若以弹簧自然长度为零势能点，弹簧的弹性势能为

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2$$

式中 k 是弹簧的劲度系数， x 是弹簧被拉伸或压缩的距离。

引力势能

物质系统的各物体之间，由于万有引力作用而共有的势能。

说明：

(1) 在物体与地球系统间，若以离地心无限远处为零势能点，则引力势能为

$$E_p = \frac{GmM_e}{r},$$

式中 G 是万有引力常数，

$$G=6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2,$$

m 、 M_e 分别为物体、地球的质量， $M_e=6.0 \times 10^{24} \text{kg}$ ， r 是物体到地心的距离。

(2) 如果上式将地球换成另一物体（如天体），则该式就是该物系的引力势能。

(3) 引力势能与重力势能，从计算式的形式上看，似乎是两回事，然而实际上除了选择的零势能参考点不同，使两者的计算结果差一个常数外，没有任何本质差异。

保守力

做功与路径无关，只取决于始、末位置的力。

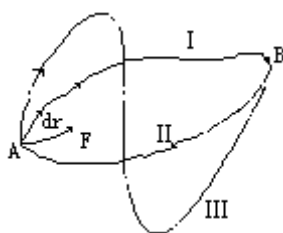
说明：

(1) 保守力做功可用数学式表示为

$$\int_A^B \underset{\text{(路径I)}}{F \cdot dr} = - \int_B^A \underset{\text{(路径II)}}{F \cdot dr},$$

或
$$\int_A^B F \cdot dr + \int_B^A F \cdot dr = \oint_L F \cdot dr = 0,$$

式中 L 是任何闭合路径。



上述任意一式都是判断一个力是否是保守力的必要条件。

(2) 保守力的定义还有下列几种等价的表述：

①若 F 是保守力，则在质点从 A 点运动到 B 点的过程中，F 作的功等于质点由 B 返回 A 的过程中 F 作的功的负值。

②若 F 是保守力，那么沿某一路径从 A 到 B，F 作的功，在沿任何其他路径由 B 返回 A 时，可以全部收回。

③沿任意闭合路径一周，保守力作的功为零。

④只要始、末位置确定，无论沿什么路径做功，保守力的功都相等。

(3) 可以证明，万有引力、重力、弹性力、静电库仑力等都属保守力。保守力均有对应的势能。

非保守力

做功与实际路径有关的力。

说明：

(1) 非保守力是与保守力性质不同的力，做功与路径有关是非保守力的基本特征。

(2) 非保守力的定义还有下列几种等价的表述：

①若一个力对沿着任何闭合路径运动一周的质点所作之功不为零。

②若在两点之间移动一个质点，力对质点所作的功取决于这两点间的具体路径。

(3) 事实上我们经常接触到各种各样的非保守力，例如炮弹的爆炸力，人或动物肌肉紧张时产生的肌肉力，柴油机、电动机的牵引力，摩擦力，粘滞力，阻尼力等。非保守力无对应的势能可言。

(4) 非保守力包括耗散力和非耗散力两类。

耗散力是指对系统或物体作负功，而使之总机械能减少的力。如摩擦力，阻尼力，粘滞力。

非耗散力指能对系统或物体作正功，而且做功与路径有关的力。如爆炸力，肌肉力，牵引力，电子感应加速器中的感应力。显然，感应力并不消耗电子等粒子的机械能，而是使它们加速，动能增大。这也足以说明非保守力完全可以是非耗散性的。然而，对于该类非保守力或因为不能写出力的具体函数形式，或因为不属于力学范畴的作用（通常涉及到由化学能、生物能、内能等能量转化为机械能的一些作用），而在力学中不加以研究。在力学范围内接触的非保守力大多数是耗散力，所以长期以来耗散力就成了非保守力的同义词。严格说来两者是有区别的。

动能定理

阐述质点的动能变化与外力对质点所作功的关系的物理规律。质点动能的增量等于作用在该质点上合外力所作的功，这称为质点动能定理，用数学式表示为

$$EK_2 - EK_1 = A = \int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r},$$

式中 EK_1 为质点的初动能， EK_2 为质点的末动能， A 为合外力 F 从 1 到 2 所作的功。

说明：

(1) 动能定理并不是经典力学中的一个独立的规律，它可由牛顿第二运动定律导出，但在涉及质点的位置与速度的关系问题时，应用动能定理显得更为方

便。动能定理与牛顿运动定律一样只在惯性系中成立，质点的动能是相对所选惯性系而言的。

(2) 在质点力学中，把物体视作质点，所以在中学物理中把动能定理表述为：作用在物体上的合外力的功等于该物体动能的变化。这样的叙述与以上定理是一致的。

(3) 动能定理的实质是说明力的空间累积效应。力对物体所作的功是力对空间的累积，功是过程量。通过作功过程，物体的运动状态发生变化，动能是状态量，两个状态间动能的变化与该过程的功在数值上相等，这就是动能定理。在应用动能定理时，应注意功与动能应取同一单位制中的单位。

(4) 当质点仅受到保守力作用时，由于保守力作功与物体移动的路径无关，仅与作功的始、末位置有关，则保守外力对质点所作的功，可以表示为始、末位置质点所具有的势能之差，即 $A=U_1-U_2$ ，这样动能定理就导致了机械能守恒定律，即动能加势能等于常数不变，用数学式表示为

$$EK_2 - EK_1 = U_1 - U_2,$$

$$EK_1 + U_1 = EK_2 + U_2 = \text{常数}。$$

(5) 当问题涉及到许多质点时，动能定理可推广到质点系，此时质点系的动能增量，等于外力和内力对质点系所做的总功。对于质点系动能定理，应注意系统内力所作的功，需逐个求出各内力所作的功，再求和，而不能先求合内力，再求合内力所作的功，因为合内力常常等于零，但各内力所作的总功不等于零。系统内力的功，在质点系动能定理中是不可忽略的重要的一项，它有时是改变系统动能的主要方面。例如，炮弹爆炸时，火药的爆炸力——内力所作的功，使各块弹片的动能增加，迅速飞开。又如，当两个物体间发生相对滑移时，它们间的摩擦力，亦是内力，这时做了负功，系统的总动能减小。

功能原理

阐述机械运动中功与能量关系的物理规律。在运动过程中质点系所受合外力作的功与系统内非保守力作的功之总和等于系统总机械能的增量，这一规律叫做功能原理。用数学式表示为

$$A_{\text{外}} + A_{\text{非内}} = \Delta E_p + \Delta E_k,$$

式中 $A_{\text{外}}$ 和 $A_{\text{非内}}$ 分别为合外力的功和非保守内力的功， E_p 和 E_k 分别为系统总的势能和动能。

说明：

(1) 功能原理中涉及到势能，而势能是以保守力相互作用的物体系或质点系具有的能量，所以功能原理只在物体系或质点系中成立。

(2) 中学物理中不出现“保守力”、“非保守力”、“耗散力”等概念，而且在力学范围内势能只涉及重力势能和弹性势能，并把它们简单地说成是“物体所具有的势能”，所以中学物理中将功能原理表述为：除了重力和弹力以外，其他外力（可分为动力和阻力）对物体所做的总功等于物体机械能的增量，即

$$A_{\text{动}} - A_{\text{阻}} = \Delta E_p + \Delta E_k,$$

式中 $A_{\text{动}}$ 、 $A_{\text{阻}}$ 分别为动力和阻力对物体作的功。

(3) 功能原理并不是经典力学中的一个独立的规律，它可由牛顿第二定律导出，但在只涉及运动物体的初、末状态（如位置、速度等），而不需考虑运动过程的问题时，应用功能原理显得更为简便。

(4) 注意不要把功能原理中非保守内力的功 $A_{\text{非内}}$ 狭义地理解为仅仅是耗散性内力的功。因为耗散力（如摩擦力等）做功常使系统的总机械能减少，而非保守内力做功，可以使系统机械能减少，也可以使系统机械能增加。例如，汽车加速时，汽车发动机汽缸中气体膨胀的结果，产生了内力，部分内力做功，使汽车加速、动能增加。这里气体产生的内力就是一种非保守力，而且是非耗散力，却对汽车作正功。

(5) 功能原理将机械能和其他形式的能量通过各种性质的力做功联系起来，为进一步导出机械能守恒的条件提供了依据。

机械能

物质系统的动能和势能的总和。常用 E 表示，即

$$E = E_p + E_k.$$

机械能守恒定律

力学中的重要定律。物质系统内只有保守内力做功，非保守内力（如摩擦力）和一切外力所作的总功为零时，系统内各物体的动能和势能可以互相转换，但它们的总量保持不变。

说明：

(1) 根据质点系的动能定理，我们有

$$W_{\text{外}} + W_{\text{内保}} + W_{\text{内非}} = Ek_2 - Ek_1,$$

由于保守内力所作的功可以表示为势能增量的负值，即

$$W_{\text{内保}} = - (Ep_2 - Ep_1),$$

这样就可得

$$W_{\text{外}} + W_{\text{内非}} = (Ek_2 + Ep_2) - (Ek_1 + Ep_1),$$

$$W_{\text{外}} + W_{\text{内非}} = E_2 - E_1.$$

此式表示，质点系在运动过程中，它所受外力的功与系统内非保守力的功之总和，等于它的机械能的增量。

当 $W_{\text{外}}=0$ 、 $W_{\text{内非}}=0$ 时，就有系统机械能保持不变的守恒定律

$$E_2 = E_1 = \text{常量}.$$

(2) 机械能守恒定律是牛顿运动定律的一个推论，因此只有在惯性系中成立。

当 $W_{\text{外}}=0$ ， $W_{\text{内非}}=0$ 以及 $F_{i\text{外}}=0$ 的条件下，系统的机械能守恒在所有惯性系中绝对成立。而当 $F_{i\text{外}} \neq 0$ ，但 $W_{\text{外}}=0$ ， $W_{\text{内非}}=0$ 时，系统的机械能守恒只对某个特定的惯性系成立。

(3) 在中学物理中，保守力遇到最多的是重力和弹力。因此，如果物体系各物体只有重力和弹力对它们做功，而无其他力做功时，系统机械能守恒。这一守恒是运动变化中的守恒，是转化中的守恒，总量的守恒，但就系统内各物体而言，其动能和势能各自并不是不变的，而是互相转化的。

机械能守恒定律是对一个过程而言的，在只涉及重力及弹力做功的过程中，机械能守恒定律应用时，只考虑初始状态和终了状态的动能和势能，而不考虑运动的各个过程的详细情况。因此，如果不要求了解过程的具体情况，用机械能守恒定律来分析某些力学过程，比用其他方法简便得多。

(4) 一个不受外界作用的系统叫做封闭系统或孤立系统。对于封闭系统，外力的功当然为零。如果系统状态发生变化时，有非保守内力做功，它的机械能就不守恒。但在这种情况下，对更广泛的物理现象，包括电磁、热、化学以及原子内部的变化等研究表明，如果扩大能量的范围，引入更多的能量概念，如电磁能、内能、化学能或原子核能，即能证明：一个封闭系统经历任何变化时，该系统的所有能量的总和是不改变的，它只是从一种形式的能量转化为另一种形式的能量，或从系统的此一物体传递给彼一物体。这就是普遍的能量守恒转化定律。机械能守恒定律只是它的一个特例，即限制能量形式仅为机械运动中的动能与势能。

能量守恒定律

物质的任何一种运动形式，如机械、热、电磁、化学运动，在一定条件下都能以间接或直接的形式转化成另一种运动形式，在转化过程中，作为物质运动度量的能量，恒保持不变。

说明：

(1) 能量守恒定律由法国哲学家、物理学家和数学家笛卡儿，德国化学家迈尔和物理学家赫尔姆霍茨，英国物理学家焦耳以及格罗沃等人加以论证和发展。这是自然科学中关于物质运动的最重要的普遍定律之一。能量守恒定律同细胞学说、进化论一起被恩格斯称为 19 世纪自然科学的三大发现。这一定律的发现，直接证明了物质运动的永恒性，为辩证唯物论提供了重要的自然科学依据。

(2) 物理现象中，除了机械能、内能之外，还有其他形式的能量，诸如与原子间作用相联系的化学能，与电磁作用相联系的电磁能、辐射能，与原子核间作用相联系的核能。在一般的运动过程中，个别形式的能量是变化的，不同形式的能量之间可以相互转化，但如果我们计及所有形式的能量，则对任何运动过程，能量的总和是不变的、守恒的。这一点已被迄今为止的所有实验所证实，还没有发现任何一个实验是违反能量守恒定律的。

(3) 研究表明，所谓物体的内能实质上就是物体所含分子的不规则热运动的动能和势能之和。以上所说的化学能、原子核能等实质上都可归结为相应微观粒子的动能和势能。

根据狭义相对论，物质的能量和质量相联系，这就是著名的质能关系式 $E=mc^2$ 。从相对论看来，物体质量随速度而变化，所以物体的能量 E 应是动能 E_k 与静能 m_0c^2 之和，即 $mc^2=E_k+m_0c^2$ ，因此，相对论的动能公式为

$$E_k=mc^2-m_0c^2,$$

那么这个物质的静止能量 m_0c^2 的含义究竟是什么呢？

以原子为例，一个原子的静止能量包括电子和原子核之间的静电势能和电子绕核运动的动能，再加上各电子和核的静止能量。电子的静能是个常数。因为到目前为止，我们不清楚电子的内部结构，更不能说明内部的运动情形，电子总是作为一个整体参与各种变化的。原子核的静能是由质子和中子的静能，以及它们的动能和相互作用的势能等三部分的总和组成。当原子核分裂时所释放出来的核能实际上就是中子、质子在核内的一部分相互作用势能，因此必然会表现在原子核的静止质量的亏损上。

关于物质的静能，目前大致只能认识到此。“物质无限可分”，但如何分法，按什么方式分，或者不可以再这样分下去，这都必须由实验来决定。今天，我们

虽然不知道电子、质子、中子等基本粒子的内部结构与运动形式，但是作为一个整体，它不论参与什么变化，还是满足能量守恒定律的。

冲量

施于物体的力和力的作用时间的乘积。恒力的冲量为

$$I = F \cdot \Delta t;$$

变力的冲量为

$$I = \int_A^B F \cdot dt。$$

说明：

(1) 在国际单位制中，冲量的单位是牛顿·秒。常用单位还有达因·秒等。

(2) 冲量是力对时间的累积效应，它是个过程量。冲量是矢量，它的方向由力 F 的方向决定。对于变力来说，求力的冲量必须分段计算，即把时间划分成无数小段，让每一段时间间隔中的力看作大小和方向不变，先求出各段的冲量，再求出各段冲量的矢量和，即得全部时间内的冲量。

(3) 在碰撞、爆炸、急刹车等过程中，物体受到的变力往往是作用时间短暂、方向不变而大小瞬息剧变，这种力叫做冲力。要测量冲力和它的作用效果，一方面难以准确测量，另一方面也不必知道力的大小变化细节，通常以作用时间内的平均力的大小来代替这些变力的大小，并以平均力的冲量来度量冲力对物体的作用效果。

(4) 几个力对物体作用，物体运动状态的改变取决于合力的冲量，即所有力的冲量的矢量和。

动量

物质运动的一种量度。是矢量。作机械运动物体的动量，其大小等于物体的质量 m 和其速度 v 的乘积，方向与速度 v 相同，即动量 $P=mv$ 。

说明：

(1) 动量与冲量具有相同的量纲，但在国际单位制中，动量的单位以千克·米/秒表示，而冲量的单位以牛顿·秒表示。

(2) 动量是矢量。物体系的动量则是各物体动量的矢量和。所以当物体系的动量为零时，系统内各个别物体的动量可以不等于零。因速度的量值依赖于参考系的选择，所以动量亦是相对所选定的惯性参考系而言的。

(3) 动量可作为物质运动的量度。对于作机械运动的实物，动量可以用来度量机械运动的运动量，这是当一个物体的机械运动转移给另一个物体时，我们就说它们之间发生了动量传递或转移。对于电磁场的运动，亦可用动量描写其运动，或者说作为场形的物质亦有动量。例如

电磁辐射（即光子）的动量就是 $p = \frac{h\nu}{c} k$ ，式中 h 为普朗克常数， c 为真

空中光速， ν 为电磁波的频率， k 为电磁波传播方向的单位矢量。

在物体运动速度可以与真空中光速 c 相比较时，就必须用相对论的动量表示式，即

$$P = mv = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} v,$$

式中 m_0 为物体的静止质量。

(4) 动能与动量都是描写物体机械运动的运动量的物理量，但是它们是有区别的。动能是标量，它的变化反映力的空间累积，即从力所做的功反映运动的变化，是物体从作机械运动转变为一定量其他形式运动能力的一种量度。所以，在研究机械运动与非机械运动转化时，只能用动能而不能用动量。

动量是矢量，它的变化反映力的时间累积，即从力所作出的冲量反映机械运动的传递，是物体将机械运动传递给另一物体的能力的一种量度。在研究机械运动与机械运动之间的转移时可以用动量。但在这同时，亦可用动能来描写物体的运动状态。总之，我们总是以动量和动能两个物理量，来全面描述物体运动的转移与运动形式的转化。例如，对于物体的碰撞过程，其中既有机械运动的传递，亦有机运动转化为非机械运动的变化，所以，我们必须用动量和动能两个量，从不同方面正确反映这一物理过程。

动量定理

阐述力对时间累积效应的物理规律。在 t_1 到 t_2 时间内，质点所受合外力的冲量等于该时间内质点动量的增量，即

$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = P_2 - P_1 = mv_2 - mv_1。$$

说明：

(1) 冲量和动量都是矢量，上述动量定理表式相当于沿直角坐标轴的三个分量式：

$$I_x = \int_{t_1}^{t_2} F_x dt = P_{x_2} - P_{x_1},$$

$$I_y = \int_{t_1}^{t_2} F_y dt = P_{y_2} - P_{y_1},$$

$$I_z = \int_{t_1}^{t_2} F_z dt = P_{z_2} - P_{z_1}.$$

表明合外力的冲量在某一方向的分量等于该方向质点动量分量的增量。在实际问题中，动量定理的分量式应用更普遍。

(2) 动量定理实际上是牛顿第二定律的微分表述形式，或称牛顿第二定律的“变形”，所以动量定理与牛顿运动定律一样只在惯性参考系中成立。关于定理中的动量增量的运算亦必须在惯性系中进行。

(3) 注意合外力的冲量方向是与物体动量增量的方向一致，而并不一定与质点的初动量或末动量的方向相同。动量是矢量，在计算动量的增量时，除了直线运动中可用代数法求之外，一般要用平行四边形法求解。

(4) 在碰撞、爆炸、打夯、击球之类问题中，力的作用时间很短暂，而力的大小的变化却很剧烈。对此类问题用动量定理来求解平均冲力及其对时间累积的平均效应就很方便。这时往往可忽略一些比冲力小得多的恒力（如重力）的影响。但若作用时间相当长，重力等恒力对物体动量的影响就必须考虑。例如打桩时，夯从高处自由下落的过程中，其动量的增量就是它所受重力冲量作用的结果。

(5) 在实际问题中，研究的对象往往是几个质点或物体组成的系统。质点系的动量定理同样可表述为：系统所受合外力的冲量等于系统总动量的增量，即

$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = \Delta P.$$

质点系动量定理和质点动量定理在形式上完全相同，这是因为系统的内力虽然可以使系统内个别质点的动量发生变化，但对系统的总动量没有影响，所以在质点系动量定理中仍然只需计算合外力的冲量。质点系动量定理在实际中有普遍的应用。

动量守恒定律

物理学的普遍定律之一。若系统(质点系)不受外力或所受外力的合力为零,则系统的总动量守恒。或者简单地说,在孤立系统中,系统的总动量始终不变。

说明:

(1) 由于系统的内力总是成对(作用力与反作用力)出现、且作用时间相同,内力的合冲量就一定为零,也即内力只改变个别物体的动量,而对系统的总动量不发生影响。因此在分析系统的动量是否守恒时,只需考虑合外力是否为零。

(2) 系统总动量守恒也可表述为:系统的初动量等于系统的末动量,即变化前、后系统的总动量为常(矢)量;或系统内一部分物体动量的增量等于其他物体动量的减少量(矢量)。

(3) 动量守恒定律可由牛顿第二、第三定律导出,而牛顿定律只在惯性参考系中成立,所以动量守恒定律也只在惯性系中成立,而且系统中各物体的动量必须相对同一惯性系来计算。

(4) 动量守恒和能量守恒是有区别的,当系统能量守恒时,一部分物体的能量增大,另一部分物体的能量必定减小;而动量是矢量,所以当系统动量守恒时,可能出现两种情况:其一是系统内一部分物体动量的增大(或减小)是以另一些物体动量的减小(或增大)为前提的;其二是系统内两部分物体的动量沿着相反的方向同时增大或减小,而总动量保持守恒。例如,火箭发射前总动量为零,发射时,火箭排放的气体向下的动量正好等于火箭上升的动量,所以系统的总动量仍保持为零。

(5) 动量守恒的条件是合外力为零,而不是合外力的冲量为零。根据动量定理,合外力的冲量为零,仅仅保证对应于该特定过程系统的初动量等于末动量,并没有说明系统的总动量一定守恒。

(6) 动量守恒定律是一条实验定律,它的结论完全由实验决定。虽然它可由牛顿第二、第三定律导出,但它比牛顿定律更普遍,在相对论和微观粒子范畴仍然适用(普遍的动量守恒定律并不依赖牛顿定律)。动量守恒定律是物理学中的一条十分普遍的基本规律。

角动量

描写力学体系转动特征的物理量,亦称动量矩。是矢量。

说明:

(1) 角动量的一般定义是相对于一固定点的。设质点的动量为 mv , 对某定点的矢径为 r , 则质点对于该定点的角动量定义为

$$L=r \times mv,$$

根据矢积定义知 L 的大小为

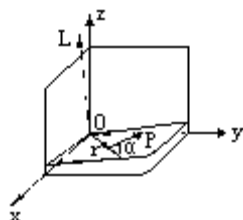
$$L = rmv \sin \alpha,$$

α 为 r 正方向与 mv 正方向的夹角, L 的方向由右螺旋法则决定。

质点对于定点 O 的角动量 L 在通过 O 点的任一轴线上的投影称为对轴的角动量, 如左图中对于过 O 点的三个坐标轴的角动量分别为

$$\begin{cases} L_x = L \cos \alpha, \\ L_y = L \cos \beta, \\ L_z = L \cos \gamma. \end{cases}$$

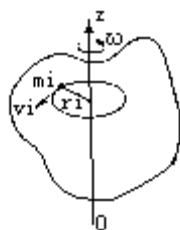
值得注意, 对于轴线的角动量是标量。



(2) 质点系的角动量, 等于各质点对某定点角动量的矢量和, 即为

$$L = \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \times m_i \mathbf{v}_i.$$

同样它对于过定点的轴线的角动量, 则为以上对定点的角动量在轴线上的投影, 亦为标量。



(3) 对于绕固定轴转动物体对转轴的角动量, 这里的物体既可以是刚体也可以不是刚体。如右图所示, 设转轴为 Z 轴, 则物体上各点的角速度均为 ω , 把物体分成 n 个质点, 取其中任意第 i 个质点, 其速度为 $v_i = r_i \omega$, r_i 为该质点离转轴 Z 的垂直距离, 它对转轴 Z 的角动量为

$$l_{iZ} = m_i v_i r_i = m_i r_i^2 \omega,$$

整个物体对 Z 轴的角动量为

$$L_z = \sum_{i=1}^n m_i r_{i^2} \omega = \left(\sum_{i=1}^n m_i r_{i^2} \right) \omega = I \omega,$$

即物体对转轴的角动量等于它对该轴的转动惯量与角速度的乘积。再次指出，这是一个标量，它亦等于对轴上任一固定点的角动量在 Z 轴上的投影。

(4) 特别值得注意，定轴转动刚体的角动量，可以根据以上对固定点的角动量定义来定义，这时对于定轴转动刚体的角动量，被定义为对固定转轴上任一点的角动量。这样定义的定轴转动的刚体角动量是一个矢量，而角动量矢量的方向并不一定与角速度方向（即转动方向）一致。只有在转轴正好是刚体的对称轴时，角动量矢量 L 的方向正好与角速度 ω 方向（OZ 轴方向）一致，故此时的角动量矢量 L，即对固定点定义的角动量，可以写为

$$L = I \omega,$$

式中 I 为刚体对于对称轴的转动惯量。

注意不要把 $L = I \omega$ 与 $L_z = I \omega$ 相混淆。 L_z 是刚体对 OZ 轴的角动量，是标量；而 L 是刚体对 O 点的角动量，是矢量，这样写法仅适用于刚体绕对称轴作定轴转动时才成立。若刚体不存在对称轴，或转轴不是对称轴，一般就不能表示为矢量式 $L = I \omega$ 。而投影式 $L_z = I \omega$ 是标量式，并不要求转轴一定是刚体的对称轴。

角动量定理

描述物体转动状态变化规律的基本定理。指在绕固定轴（或固定点）转动时，质点系所受的合外力矩等于它的角动量对时间的变化率，即

$$M = r \times F = \frac{dL}{dt}。 \quad \text{EMBED Equation. 2}$$

对于定轴转动的刚体，角动量定理也可表述为合外力矩 M 对固定轴 Z 的分量 M_z ，等于刚体对该轴的转动惯量 I_z 和角加速度 β 的乘积，即

$$M_z = I_z \beta = \frac{d(I_z \omega)}{dt}。$$

说明：

(1) 在角动量定理中，力矩、角动量和转动惯量等都是对同一转轴（或同一点）来说的。

(2) 与把 $F \cdot dt$ 称为力的冲量相仿，可把 $M \cdot dt$ 称为力矩对转轴（或对定点）的冲量矩或角冲量，那么，角动量定理也可表述为：作用在刚体上的合外力矩的冲量矩等于刚体角动量的改变量，常写作

$$M\Delta t = \Delta L。$$

显然，这里的 ΔL 是指在 Δt 时间内刚体角动量的变化量。

(3) 如果质点系统绕质心转动，那么，无论质心是固定的，还是运动的，角动量定理都成立。

角动量守恒定律

指任何物质系统不受外力矩作用或所受合外力矩之和为零时，系统的总角动量守恒。亦称动量矩守恒定律。即当 $M=0$ 时，

$$L = \text{常矢量}。$$

若系统所受合外力矩不为零，但在沿某一方向合外力矩的分量为零，或者说外力对某轴的力矩的代数和为零，例如 $M_z=0$ ，则系统总角动量在该方向上的分量保持不变，即 $L_z = \text{常数}$ 。由于系统对固定转轴的角动量可表示为对该轴的转动惯量 I 与角速度 ω 的乘积，所以系统对固定转轴的角动量守恒定律可表示为

$$I\omega = \text{常数}。$$

说明：

(1) 角动量守恒定律是物理学中的重要定律。它在微观粒子的量子理论中，以及实际生产和生活实践中有着重要的应用。

(2) 利用角动量守恒定律，物体系可以通过改变其质量对转轴的分布来改变转动惯量的大小，以使物体系的角速度发生相应变化，而保持角动量不变。例如芭蕾舞演员绕通过足尖的垂直轴旋转时，常将手臂和腿伸开以使转速减小。跳水运动员在空中常把身体卷曲起来使转速加快，而在接近水面时又将身体放开使转速减小。

(3) 不受外力矩作用时，系统角动量的方向和量值都不变。因此，高速转动的回转仪能不受飞机、潜艇运动的影响，保持自转轴指向恒定，而作为导航的“定向”装置。

转动动能定理

合外力矩对定轴转动刚体所做的功，等于刚体转动动能的增量。

说明：

(1) 在刚体作定轴转动时，外力矩 M 所作的功，等于力矩 M 与刚体的角位移（转角 θ ）的乘积，即

$$W_R = M\theta,$$

而刚体绕固定轴转动的动能为 $E_{k_R} = \frac{1}{2}I\omega^2$ 。 I 为相对转轴的转动惯量， ω

为角速度，转动动能的变化量为

$$\Delta E_{k_R} = \frac{1}{2}I\omega_2^2 - \frac{1}{2}I\omega_1^2,$$

因此转动动能定理可以写为 $W_R = \Delta E_{k_R}$ ，即

$$M\theta = \frac{1}{2}I\omega_2^2 - \frac{1}{2}I\omega_1^2.$$

(2) 以电动机启动过程为例，作用于转子的电磁动力矩减去摩擦力矩即为启动外力矩，它所作的功使转子获得动能；关闭电动机后，摩擦力矩作负功而使转子动能不断减少，直至耗尽动能转动停止。

对称性与守恒律

研究自然界中的守恒定律与自然界所固有的某些对称性之间的联系的定理。

说明：

(1) 物理学中存在许多守恒定律，最常见的有能量守恒定律、动量守恒定律、角动量守恒定律、电荷守恒定律等等。物理学中有这么多的守恒定律，决不是偶然的，有时物理定律在某些场合已不适用了，但守恒定律依然成立。现代物理学已认识到这些守恒定律是和自然界的更为普遍的属性——时空对称性相联系着的。

德国女数学家内特尔 (A. E. Noether) 在 1918 年证明了一个重要定理，即内特尔定理。定理证明了时间与空间的对称性质与物质的基本运动规律之间存在着密切的联系。

按照内特尔定理，物理规律如果具有空间坐标平移不变性，则相应地存在一个守恒定律，即动量守恒定律；物理规律如果具有空间转动不变性，则相应地存在一个守恒定律，即角动量守恒定律；物理规律如果具有时间平移不变性，则相应地存在一个守恒定律，即能量守恒定律。这些守恒定律是在经典物理学中早已熟知的，而内特尔定理则进一步揭示了守恒定律与某些时空对称性之间的对应关系。

(2) 物理学中的对称性观念可以概括为：如果某一现象或系统在某一变换下不改变，则说该现象或系统具有该变换所对应的对称性。因此物理定律的对称性又可以称为不变性。

空间变换及时间变换的对称性是最基本、最常见的对称性。任一给定的物理实验（或物理现象）的发展过程和该实验室所在的空间位置无关。这个事实叫空间平移不变性或空间平移对称性，亦称空间均匀性。动量守恒定律就是这种对称性的表现。任一给定的物理实验的发展过程和该实验装置在空间的取向无关。这个事实叫空间转动不变性或空间转动对称性，亦称空间各向同性。角动量守恒定律就是这种对称性的表现。任一给定的物理实验的进展过程和这实验开始的时间无关。这个事实叫做时间平移不变性或时间平移对称性，亦称时间均匀性。能量守恒定律就是时间的这种对称性的表现。

在现代物理理论中可以由上述对称性导出相应的守恒定律，而且亦可以进一步导出牛顿定律等这样一些物理定律来。

自然界的对称性并不可简单归结为时间、空间这两类对称性之中，物理学中还有与时间、空间相独立的（无关的）其他变换性质所体现的对称性，称为内部对称性，如对应于量子力学中相移对称的是电荷守恒定律。此外，在微观世界还有许多内部对称性，如宇称，同位旋，轻子数，重子数等等。

相应于每一种对称性，都必然对应存在着一个守恒定律。对称性已经成为人们认识自然的一个重要理论工具。

碰撞

运动物体相遇而接触或不直接接触，在极短时间内，通过相互作用，运动状态发生急剧变化的过程。

说明：

(1) 按碰撞前、后物体系的总动能是否守恒，可将碰撞分为弹性碰撞和非弹性碰撞。

按碰撞物体相对运动的速度方向是否在一直线上，可把碰撞分为正碰和斜碰。

(2) 各类碰撞都遵守动量守恒定律和能量守恒定律，就是说，参加碰撞的物体系在碰撞前、后的总动量和总能量是不变的。

(3) 碰撞过程分析

宏观物体碰撞时，它们的表面一般互相直接接触而相互作用；微观粒子碰撞时，彼此趋近到一定程度，发生显著的相互作用而改变原有的运动状态。

宏观物体碰撞过程中动量和能量的变化可分两个阶段分析。第一阶段为压缩阶段，这是从物体表面相互接触，相互挤压，到两物体发生最大形变，两物体具有相同速度时为止。在这一阶段中，由于两物体之间的相互作用力大小相等，方向相反，作用时间相同，两物体间相互作用的冲量大小相等，由此所引起的动量改变量亦相等，只是变化量方向相反，所以这一阶段的总动量守恒。由于这阶段物体发生形变，一部分动能转变为其他形式能量，动能便不守恒。这部分转化了的动能是否还会重新转变为物体的动能，取决于材料的性质。如果碰撞体是完全范性体（如湿泥球），形变不能恢复，这部分动能就转化为物体内能等其他形式的能量，不再转化回来，两物体粘在一起，以相同速度运动，这就是发生了完全非弹性碰撞，碰撞在第一阶段即告结束，碰撞前后，总动量守恒，总动能减少。如果相碰撞的两个物体是弹性体，碰撞进入第二阶段，即为恢复阶段。这一阶段自两物体从具有相同速度后开始分离，至完全脱离接触而分开为止。同样，在这一阶段中，由于两个物体间弹力的冲量大小相等，方向相反，动量的改变量也相等，只是方向相反，两物体的总动量继续守恒。再假定碰撞体是完全弹性体，那么在第一阶段中由于形变转化为弹性势能的动能，在第二阶段又全部转变为动能，所以碰撞前、后，动能守恒，这就是弹性碰撞。实际物体间的碰撞，则多数是介于以上两种情形之间，既不是弹性碰撞，亦不是完全非弹性碰撞，而是一般非弹性碰撞。

弹性碰撞

碰撞体速度的大小和方向都发生形变，但它们的内部状态没有变化的碰撞。

说明：

(1) 宏观物体的碰撞，如象牙、优质钢球的碰撞，碰撞后动能损失很小，可近似看作弹性碰撞。微观粒子中，低能电子和分子的碰撞是严格的弹性碰撞。

(2) 碰撞前、后，总动量守恒，动能守恒。

非弹性碰撞

碰撞体内部状态发生变化的碰撞。

说明：

(1) 在宏观物体的碰撞中，动能不可能严格守恒，所以实际上都属非弹性碰撞。微观粒子之间的碰撞，大部分属非弹性碰撞。

(2) 碰撞体内部状态改变是指物体变热、变形或破裂，原子受到激发，粒子的种类或性质发生改变等。

(3) 碰撞前、后，总动量守恒，总动能减少。

完全非弹性碰撞

碰撞后物体粘合在一起运动不再分离的非弹性碰撞。

说明：

微观粒子中，正、负离子碰撞组成分子属完全非弹性碰撞。

正碰

又称对心碰撞。两物体在碰撞前相对速度沿着它们的质心连线的碰撞。

斜碰

又称非对心碰撞。两物体在碰撞前相对速度不沿它们质心连线的碰撞。

恢复系数

物体在碰撞后的分离速度和它们碰撞前的接近速度的比值。

说明：

(1) 牛顿根据实验结果发现，恢复系数是一个随碰撞物体的质料

而异通常由实验测定。对于对心碰撞， $e = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2}$ ；对于弹性碰撞 $e = 1$,

即分离速度等于接近速度；对于完全非弹性碰撞， $e=0$ ，即分离速度为零；对于一般非弹性碰撞， $0 < e < 1$ ，即分离速度小于接近速度。

(2) 关于恢复系数的实验定律，亦称牛顿碰撞定律。

(3) 知道了相互碰撞的物体的恢复系数，就可以较为方便地求解一般的碰撞问题。

简谐振动

物体离开平衡点的位移（或其他物理量） x 随时间作余弦（或正弦）规律变化的运动，即运动方程可表示为

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

形式的运动称为简谐振动，或谐振动、线性振动。方程中 A 为振幅， ω 为角频率，是不随时间变化的常量， $(\omega t + \varphi_0)$ 为相位，它们是描述简谐振动的 3 个基本物理量。

说明：

(1) 简谐振动是最简单、最基本的振动形式。任何复杂的振动都可以看作一系列不同频率、不同振幅的简谐振动的叠加。

(2) 作简谐振动的物体，或者受到单一回复力的作用，或者所受多个力的合力是一回复力，即 $f = -kx$ 。

利用牛顿第二运动定律，一个质量为 m 的物体受回复力作用时所满足的

运动微分方程为 $m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx$ ，得谐振动方程

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

式中 $\omega^2 = \frac{k}{m}$ ， ω 为固有角频率（或圆频率）。其最简单的解即为

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0),$$

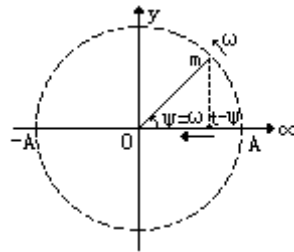
式中 A 、 φ_0 为常数，由初始条件（初位移及初速度）决定。由于方程是

线性方程， $\frac{d^2x}{dt^2}$ 与 x 成线性关系，振动也称线性振动。

(3) 作简谐振动的物体，由于只受回复力的作用，不受阻力等其他非平衡力的作用，振动时其振幅不变。从能量角度分析，振动过程中系统的动能与势能不断相互转换，而总能量保持不变，等于系统势能的极大值或动能的极大值，即

$$W_{\text{总}} = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}m\omega^2A^2。$$

(4) 利用参考圆表示物体的简谐振动的办法。以角速度 ω 作圆周运动的质点，在 x 轴或 y 轴上的投影点的运动即为简谐振动，而该圆的半径正是该振动的振幅，圆周运动的周期亦就是振动的周期，而振动的相位恰为质点作圆周运动时所移过的圆心角。初相为零的简谐振动的参考圆如右图所示。



(5) 弹簧振子的直线振动、单摆的小角度摆动以及圆锥摆的小角度振动都是简谐振动；而 LC 回路的电谐振亦是简谐振动，此时固有振荡

$$\text{频率 } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}。$$

由此可见，不论力学还是电学，只要发生简谐振动，均有相同形式的动力学方程（微分方程）。

回复力

大小与位移成正比，方向与位移方向相反，永远指向物体平衡位置的力。

说明：

回复力的数学表示式为

$$f = -kx，$$

式中 k 为比例系数，负号表示力的方向永远与位移方向相反。

共振

振动系统在周期性变化的外加强迫力作用下发生振动，当强迫力的频率接近或等于振动系统的固有频率时，系统受迫振动的振幅急剧增大的现象。

说明：

(1) 在实际问题中，振动系统内部除了回复力外，总存在阻力，因此系统的振动是衰减的。为了使受阻尼的振子（振动物体）作不衰减的振动，必须及时给它补充能量。补充能量的一种方式就是用外加强迫力作用到振子上，这时的振动，称为受迫振动。在周期性外力作用下的振子，会产生一种特殊的效应，即所谓的共振。发生共振时，虽然周期性外力并不很大，但它所造成的振动的振幅却特别大。

(2) 受迫振动的物体受到3种力的作用，即回复力 $-kx$ 、阻力

$-\eta \frac{dx}{dt}$ 和周期性外力 $F_0 \cos \omega t$ 。根据牛顿第二运动定律，有

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - \eta \frac{dx}{dt} + F_0 \cos \omega t,$$

令 $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ ， $2\beta = \frac{\eta}{m}$ ， $f_0 = \frac{F_0}{m}$ ，则得

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t,$$

这就是受迫振动的基本方程。如果振动系统开始是静止的，则加上周期性外力后，应有很小的振动，并逐渐加大，大到一定程度后，阻力的作用也加大，结果当阻力所消耗的能量与外力所给予的能量相等时，振动就稳定下来，即方程具有如下形式的振动解：

$$x = A \cos(\omega' t + \varphi_0)。$$

把此解代入以上受迫振动的微分方程，即可解出 A ， ω' ， φ_0 的值为

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}},$$

$$\varphi_0 = \text{tg}^{-1} \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2},$$

$$\omega' = \omega_0.$$

这一稳定的受迫振动解，描写了一个简谐振动，它的频率等于周期性外力的频率。

以上所得解的一个最重要特点是振幅 A 与外加周期力的频率有关，

而且，当 $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$ 时，上述 A 的表式中的分母达到极小，故振幅

A 达到极大，这个 ω 称为共振频率。这表明当外加周期力的频率为共振频率时，将引起最大的响应。一般阻力很小，所以可以近似地说，当 $\omega \approx \omega_0$ 时，即外加强迫力之频率接近或等于系统固有频率时，发生共振。

(3) 我们再从能量观点来分析一下受迫振动及共振。物体的振动振幅不变，即达到稳定振动时，振子的总机械能不变。说明由于阻力的存在，不断消耗着振子的机械能，而周期性外力在不断地对振子做功，补偿阻力的消耗。当所加周期性外力的频率 ω 接近振子的固有频率 ω_0 时，振子才能有效地吸收外力所提供的能量，而对其他频率的外力所提供的能量，振子是很少吸收的。这种振动系统对外加能量吸收所表现出的选择性，称为共振吸收。可以证明，只要外力的频率在下列范围

$$\omega_0 - \beta < \omega < \omega_0 + \beta,$$

振动系统所吸收的功率就不小于最大吸收（共振吸收）功率的一半。这个频率范围称为共振吸收的频带宽度，简称吸收带宽或带宽。显然，阻力越小，振子的带宽就越窄，即共振的特征越明显，它的选择性越好。

(4) 共振普遍存在于日常生活及工程技术中，例如，弦乐器的琴身和琴筒就是用以增强声音的共鸣器。又如，测振仪，测速仪等也都是利用共振现象制成的仪器。但在不少情况下，共振产生有害作用，必须设法防止。为了防止共振，常使系统的固有频率远小于强迫力的频率，即 $\omega_0 \ll \omega$ 。例如，摄制全息照片的工作台用铸铁制成，质量很大，并垫以柔软的橡皮。这样就使系统的固有频率很低，有效地避免了外来干扰的影响。

振幅

机械振动的最大位移量；或振动的物理量偏离平衡位置的最大值。以 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$ 所表示的简谐振动中， A 就是振幅。

说明：

(1) 简谐振动的振幅完全由振动系统的初始状态决定。对于机械振动，振幅由初位移 A_0 和初速度 v_0 决定，即

$$A = \sqrt{A_0^2 + \left(\frac{v_0}{\omega}\right)^2}。$$

当只有初位移，而初速度为零时， $A=A_0$ ，即振幅就等于初位移大小。

(2) 无阻尼自由振动的简谐振动系统的能量与振幅的平方成正比。例如弹簧振子的能量

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}kA^2,$$
$$A = \sqrt{\frac{2E}{k}} = \sqrt{\frac{2E}{m\omega^2}}。$$

(3) 对于非简谐振动，振动系统的振幅将随时间变化。例如，在阻尼振动时，振幅随时间逐渐衰减，直至最后为零，振动停止。

周期

作振动的物体或作振荡的物理量（如交变的电流、电压等）完成一次振动（或振荡）所需要的时间。

说明：

(1) 在国际单位制中，周期的单位是秒。

(2) 振动物体或物理量从一个状态出发，经过一个周期后，即回到开始的状态。

简谐振动的周期由振动系统本身的固有特性决定，不随外界条件而

变。例如弹簧振子的周期为 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ ，式中 m 是振子的质量， k 是弹簧

的劲度系数；单摆作小角度摆动时，可视作简谐振动，其周期为 $T = 2\pi$

$\sqrt{\frac{l}{g}}$ ，式中 g 为当地重力加速度， l 为摆长；LC振荡回路的振荡周期为 $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$ 。

(3) 对于阻尼振动，振动物体或振动物理量在完成一次振动后不能完全恢复原状，就以连续两次从同方向通过平衡位置所经历的时间为周期，这时周期值为

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}},$$

式中 β 为阻尼因子， ω_0 为振动系统的固有频率，即无阻尼时自由

振动的频率， $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ 为无阻尼时相应的周期。由此可见，由于阻力的存在，

周期变长。当阻力很大， $\beta \rightarrow \omega_0$ ，则周期 $T \rightarrow \infty$ ，质点的振动将消失。据此，若要消除一些不必要的振动，可以采用增加阻力的办法。

(4) 物体作圆周运动或椭圆运动时，亦可引入周期的概念。例如，

太阳系行星的绕日运动周期与它们的椭圆轨道的长半轴的 $\frac{3}{2}$ 次方成正比，

是开普勒第三定律，亦称周期定律。

(5) 任何周期性运动的物体（古代的沙漏、脉搏、原子振动等）都可作为计时器，它们的周期即可作为时间的一种单位。1967年第13届国际计量会议决定，以铯-133原子基态的两个超精细能级之间的跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的持续时间为1秒。

复摆

能绕固定轴摆动的刚体，或称物理摆。

说明：

(1) 复摆在摆角很小、且作无阻尼的自由振动时，也可视作简谐振动，其周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}},$$

式中 I 是刚体对固定轴 O 的转动惯量, m 是刚体的质量, l 是刚体的重心到转轴 O 的距离, g 为重力加速度。可见, 复摆的振动周期也仅由摆的固有性质决定, 与振幅无关。若令

$$L = \sqrt{\frac{I}{ml}},$$

则复摆的周期

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

在形式上完全与单摆周期公式相同, 对一定结构的复摆, 若其他因素不变时, 其频率或周期仅由 g 决定。

(2) 在摆钟中, 控制时针运走快慢的钟摆就是一个复摆; 在手表中, 控制时针运走快慢的是由游丝和摆轮组成的系统, 摆轮在游丝扭力矩作用下绕轴来回摆动, 其摆动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{G}},$$

式中 I 是摆轮的转动惯量, G 是游丝的扭转系数。

频率

单位时间内物体完成全振动的次数, 或者周期性变化的物理量单位时间内所完成的周期数, 亦称周率。常用符号 f 或 ν 表示。

说明:

(1) 在国际单位制中, 频率的单位是赫兹, 记作 Hz, 1 赫兹=1 / 秒。量纲是 $[T^{-1}]$ 。

(2) 频率与周期互成倒数, 即

$$f = \frac{1}{T}。$$

(3) 振动在空间的传播就成为波动，作为波的频率，表示单位时间内经过空间某一定点的波的个数。波长 λ 、波速 v 以及频率 f 有如下关系：

$$v = \lambda f; \quad \omega = \frac{2\pi v}{\lambda}。$$

各种不同性质的波具有不同的频率范围，对于频率很高的波，一般不用频率而常以波长表示。

角频率

简谐振动（振荡）频率的 2π 倍，亦称圆频率。常用符号 ω 表示，即有 $\omega = 2\pi f$ 。

说明：

- (1) 在国际单位制中，角频率的单位是弧度 / 秒。量纲是 $[T^{-1}]$ 。
- (2) 频率、周期和角频率的关系为

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}。$$

相位

表示任一时刻简谐振动物体运动状态的物理量，具体说即简谐振动表式中余弦（或正弦）函数中的角度变量（ $\omega t + \varphi$ ），亦称相。曾称“位相”。1988年物理学名词审定委员会决定正名为“相位”。

说明：

- (1) 作简谐振动物体的运动状态，由物体的位移和速度确定，而确定了振动物体的相位，就完全确定了物体的位移及速度：

$$x = A \cos (\omega t + \varphi),$$

$$\frac{dx}{dt} = -A \omega \sin (\omega t + \varphi) \circ$$

EMBED Equation.2

(2) 相位 ($\omega t + \varphi$) 是一个用角度来表示振动状态的物理量, 单位是弧度, 是一个没有量纲的物理量。在振动用参考圆法表示时, 相位角对应于旋转矢量与 X 轴的夹角, 它把振动在一个周期内的各种状态对应于 2π 转角内旋转矢量的位置。这样以相位角代替时间变量 t , 相当于把物理量变化的时间周期性以更加直观的空间角度的周期性来表达。所以, 振动在某一时刻的相位角, 完全唯一确定了振动物体的运动状态。

相位差

两个同频率的振动量 (随时间作周期变化的量) 的相之间的差值, 又称相角差、相差、周相差和“位相差”。

说明:

(1) 对同频率的振动, 相位差完全由初相位差决定。当相位差为 0 或 π 的偶数倍时, 则这两个振动同相, 说明两个振动的变化步调一致; 若相位差为 π 或 π 的奇数倍时, 则这两个振动反相, 表明两振动的变化步调正好相反; 当 $\varphi_2 > \varphi_1$ 时, 我们就说第二个振动变化超前于第一个振动, 或者说第一个振动变化落后于第二个振动。

(2) 两个简谐振动叠加时, 两个分振动的相位差对于合振动具有决定性的意义。例如, 对于同一直线上两个同频率简谐振动的合成, 两分振动的初相差 (即它们的相位差) $\Delta\varphi=0$ 时, 合振动就加强、相长; 而当 $\Delta\varphi=\pi$ 时, 合振动就减弱、相消。对于垂直方向的两个同频率简谐振动的合成, 两分振动的初相差还将决定合振动振子的运动轨迹, 旋转方向等等。

波

振动在空间传播的过程, 广义地说是偏离平衡状态的某种随时间变化的扰动在空间传播的过程。也称波动。

说明:

(1) 波动按其性质划分，有机械波和电磁波两类。机械波是机械振动在弹性介质中的传播；电磁波是交变的电磁场在空间的传播。这里主要介绍机械波。

(2) 机械波的形成需要两个条件：一是具有受到扰动的波源（或叫振源）；二是需要具有传播扰动的弹性介质。

值得注意波动仅仅是位移之类的扰动形式在弹性介质中的传播，而质点本身只在平衡位置附近来回振动，并没有“传播”出去，即质点在传播方向上不发生迁移。

(3) 波动按照其振动方向和传播方向的关系，可分为横波与纵波。横波的传播方向垂直于振动方向，而纵波则沿着振动方向传播。

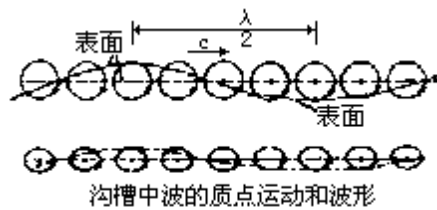
横波传播时，介质中相继出现凹、凸状，称为波谷和波峰。横波就是波峰和波谷的交替变化及推进。由此可见，在横波形成时，相邻两层介质间会有相对平移，即发生剪切形变，介质内部相应产生恢复原状的剪切弹性力。正是存在这种弹性力，波源的振动得以向四周传播。一般说来，固体能产生剪切弹性力，所以横波能在固体中传播。

纵波传播时，介质中出现密部和疏部，纵波的形成需要介质发生压缩和拉伸形变，并相应产生纵向弹性力。固体、液体和气体均能产生这种弹性力，所以纵波在固、液、气三种介质中都能传播。

(4) 在波动区域中，任一介质元都在平衡位置附近振动，具有一定的动能，并且由于介质发生了弹性形变，同时还具有一定的势能，所以振动在介质内的传播伴随着能量的传递。

在波动过程中，对任一介质元来说其能量是不守恒的，这是由于它与周围相邻介质元间有相互作用，进行着能量的交换，也就是说每一介质元都不断地从离波源较近的前一介质元处吸收能量，并传递给离波源较远的后一介质元。而且对每一介质元来说，在任何时刻它的动能和势能总是相等且同步变化的，即同时达最大值，同时达最小值和同时为零。这一情形与孤立质点振动时的情形大为不同，孤立质点振动时能量守恒，即动能达最大值时，势能为零，而势能达最大值时，动能为零。

(5) 水波是受雨滴或小石子的扰动，在水表面激起的波动。水波比较复杂，不能简单归结为横波或纵波。水波中质点的振动既有沿水面的横向分量，又有垂直于水面的纵向分量，即水质点是在表面层里沿圆周运动的。它可看成是两个频率相同、振幅相同、振动方向相互垂直的简谐振动的合成。水质点的振动不只限于水面，而且以越来越小的振幅向水下延伸。一般说来，水面以下的质点是沿着椭圆轨道运动的，可看成是两个同频率、不同振幅的垂直振动的合成。越向下振幅衰减越多，而且竖直分量比水平分量衰减更快。



上图表示水波中表面层和表面以下某一深度处质点的运动路径。水平点线表示处于静止状态时质点的位置，圆圈（椭圆）表示水面上（或水下深处）质点的运动轨迹，圆心是质点的平衡位置。当一波列从左向右通过液体时，黑点表示质点在某一时刻的位置，实（虚）曲线表示水波在该时刻的剖面图。

在水波中，作用在水体元上的回复力，一部分是由于液体静压强随深度变化而产生的压力差，另一部分则是由于水自由表面的弯曲引起的表面张力效应。在弹性固体的表面，也可形成类似的波。

(6) 微观粒子乃至任何物质都具有波动性，即具有一定能量和动量的自由粒子，沿粒子运动方向有一定波长、频率的平面波传播，称为物质波，它由法国物理学家德波罗意提出，故又称德波罗意波。物质波实质上是一种概率波，它跟经典物理中的波具有完全不同的物理意义。

波长

波在一个振动周期中传播的距离。在无衰减的情况下，每个周期内振动在均匀各向同性介质内传播的距离，即波长都相等，因此，波长也表示波动在空间上的周期性。波长常用符号 λ 表示。

说明：

(1) 在国际单位制中，波长的主单位是米。

(2) 相隔一波长的两点具有相同的振动相位。因此，波长也等于相邻两个振动相位相同的点之间的距离；对于横波则是两个相邻波峰（或波谷）之间的距离；对于纵波则是两相邻密部（或疏部）对应点之间的距离。

(3) 波长、波速与频率或周期有如下关系：

$$\lambda = vT = v / f,$$

式中 v 为波速， T 为周期， f 为频率。

值得指出，同一频率的波在不同介质中传播时波长是不同的，因为波的传播速度取决于介质的性质及波的类型（横波还是纵波）。不同频率的波在无色散介

质中传播时，波速是相同的，但在有色散的介质中传播时，不同频率的波有不同的波速。

波在线性介质中传播时频率不变，波在非线性介质中传播时，频率会改变。

(4) 波长与波列长度是两个不同的概念。后者是指一列波在空间延续的长度。例如单个原子一次发光的持续时间 $\Delta t \sim 10^{-8}$ 秒，发出的光波波列长度 $\Delta x \sim 10^{-1}$ 米。

波数

在波的传播方向单位长度内波长的数目,也即波长的倒数($k = \frac{1}{\lambda}$)

说明:

(1) 引入波数 k 以后, 沿 x 方向传播的简谐波可表示为

$$y = A \cos(\omega t - kx)。$$

波数冠以波的传播方向, 即 $k = kn$ 称为波矢量, n 为波的传播方向的单位矢量。

(2) 在量子物理中波数 k 再乘以 2π , 亦称波数, 即 $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$,

波矢量则为 $k = \frac{\omega}{v} n = \frac{2\pi}{\lambda} n$. 这是一个重要的物理量。例如, 具有波粒二

象性的微观粒子的动量 p 可表示为

$$p = \hbar k,$$

式中 $\frac{\hbar}{2\pi} = 1.054 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{S}$, \hbar 则是普朗克常数。

波速

波传播的速度。指振动状态在介质中的传播速度，它的大小决定于介质的性质。

说明：

(1) 一般所说的波速均指相速度。

(2) 机械波的波速决定于介质的弹性模量及其密度。对于固态介质，纵波的传播速度与杨氏模量有关，其值为

$$v_{\text{纵}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

横波的传播速度与切变模量有关，其值为

$$v_{\text{横}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

两式中，E 为介质的杨氏模量，G 为介质的切变模量， ρ 为介质的密度。由于固体的杨氏模量大于切变模量，在固体中纵波波速就大于横波波速。

电磁波在介质中传播时，其波速决定于介质的介电系数 ϵ 与磁导率 μ ，其值为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

真空中电磁波的传播速度等于真空中的光速

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}。$$

声波在气体中的传播速度则为

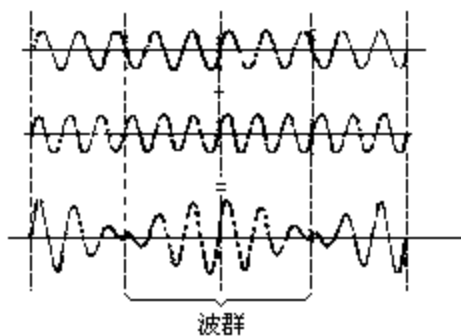
$$v_{\text{声}} = \sqrt{\frac{\gamma k T}{m}},$$

其中 $\gamma = c_p / c_v$ 为气体定压比热与定容比热之比，k 为玻尔兹曼常数，T 为绝对温度，m 则为气体分子的平均质量。在室温下空气中的声速约 340 米 / 秒。

群速度

波群中心（或任一认定的幅度）的传播速度。

说明：



(1) 任意一个脉动都可看作一系列不同频率、不同振幅的简谐波的叠加，形成波群，如左图所示。如果组成波群的各个分波的传播速度（相速度）均相同，这相当于在非色散介质中传播，则这时波群的速度就等于各分波的相速度，即群速度与相速度没有区别；当波群在色散介质中传播时，这时组成波群的分波的传播速度均不同，因此波群的形状亦会随时改变，此时波群的群速度就不等于相速度。光在真空中传播时，相速度与群速度相同。

(2) 群速度等于角频率 ω 与波数 k 的微商，即

$$v_{\text{群}} = \frac{d\omega}{dk} \circ \quad \text{EMBED Equation. 2}$$

(3) 实际上，波群能量的传播速度就是群速度。根据相对论可得一切波的群速度都不可能大于真空中的光速。

相速度

单色波中对应任一振动相位的状态向前传播的速度。

说明：

(1) 在各向同性均匀介质中传播的简谐波，是一种理想的单一频率的波，它的传播速度就是简谐振动相位的传播速度，即相速度。

(2) 相速度等于波长与波源振动频率的乘积，即

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{k}。$$

声波

在弹性媒质中传播的机械纵波。频率在 20 赫兹到 20000 赫兹之间，传入人耳时能引起听觉的机械纵波，叫做声波；频率高于 20000 赫兹的机械纵波，叫做超声波（简称超声）；频率低于 20 赫兹的机械纵波，叫做次声波（简称次声）。通常广义的声波是上述超声波、可闻声波、次声波三者的总称，简称声。

说明：

(1) 过去把“声”和“音”混用，现在则把“声”作为声波的总称，而把有音调的声作为“音”。

(2) 次声的频率可低至 10^{-3} 赫兹，超声的频率可高达 10^{11} 赫兹，由此可知声波的频率范围之广。近代声的概念不再局限于听觉范围内，对次声及超声已有深入的研究和大量应用，因此声波几乎就是机械振动、机械波的同义词。

(3) 在弹性媒质中，机械振动传播的过程，伴随有质点的位移、速度、压强、应力、温度等的综合变化的传播。所以，声波对人的影响，不仅取决于声的频率，还与上述这些变化以及变化的强度等有关。声波除了可引起人的正常听觉外，频率过高、强度特大的声波，还可使人产生痛觉，引起神经、生理、心理刺激等。因此，声强的上限叫做该频率的疼痛阈。

(4) 可闻声的频率范围是以多数人的感受来划分的，个别人的听觉可能超出此范围。动物耳朵对声波的感受范围与人耳的感受范围也不完全一致。有些动物对次声特别敏感，还有些动物则能发射或接受超声。

噪声

多种频率、不同强度杂乱组成，听起来有嘈杂感的声音。有时也泛指所有对正常工作环境有干扰、不希望出现的声音。

说明：

(1) 噪声原是与和谐、悦耳动听的乐音对立的概念。但在社会生活中，噪声和乐音没有严格的区分标准，一种声音是否视作噪声不只由它的物理特性决定，还是根据人的心理状态及需求情况而定。

(2) 电子持续地杂乱运动，或突发冲击性运动，及由于外来干扰信号（如雷电、电火花等）的影响而在电路中形成的非期望的杂波，也称为“噪声”。

(3) 噪声的强弱与其他声音一样是以声强、声级等指标来衡量的（参见声强、响度），多数以分贝数表示。

(4) 噪声的声源主要有交通噪声，工业噪声，码头及建筑场地的噪声及其他噪声等。

(5) 环境噪声的容许范围

人的活动	最高值 (dB)	理想值(dB)
体力劳动（听力保护）	90	低于 70
脑力劳动（语音清晰度）	60	低于 40
睡眠休息	50	低于 30

EMBED Word.Document.6 \s

(6) 可容许的户外噪声级 (dB)

区 域	基本噪声级		常 见 峰 值		偶 然 峰 值	
特别安静区（郊区，医院，疗养院）	5	5	0	5	5	0
安静区（城市居民区，学校，文化单位）	0	0	0	0	5	5
混合区（小商业，交通，居住，混合）	5	5	5	5	0	0
市中心商业区	0	5	0	5	5	0
大工业区						
交通干道两侧	5	5	5	5	0	0

(7) 噪声将污染环境，危害人的身心健康，必须严格控制和尽可能降低各类噪声，以保护人类及环境。

控制噪声的方法应依据噪声产生的原因。例如充分利用地形、地物屏障交通噪声，制造低噪声设备等。

音品

也称音色。表示声音特性的一个物理量，指由声波的音调所产生的听觉品质。声的音品取决于波形，也就是取决于其中泛音的数量、频率和相对强度。

说明：

(1) 单一频率的声音叫纯音，只有音叉等特制仪器才能发出纯音。纯音也是一种特色声音，音品清而纯。

(2) 复杂的声音叫复音，是由多种频率、不同强度（或振幅）的机械波合成。这些成份波按频率（或波长）排列成频谱。而乐音具有周期性，它的频谱是由一个最低频率 f_0 （叫做基频）及许多最低频率的整数倍的频率（如 $2f_0$ 、 $3f_0$ 、 $4f_0$ ……分别叫做两倍频、三倍频、四倍频……）的成份组成。基频对应的声音叫基音，各种倍频对应的声音叫泛音。具有相同基音，而泛音的成份、频率及振幅各不相同的两种声音，就是同一音调、不同音品的音。

(3) 频谱分析仪就是根据傅里叶变换原理把组成波或波列（包括光波、声波等）的各种频率成份及各成份的强度分析出来，并按频率的高低排列为“频谱”而显示出来的装置，以研究波的特征。

音调

声音的高低，曾称声高。音调主要决定于声音的频率，也与声压及波形有关。一个声音的音调可以与另一个具有确定声压和响度级的纯音相比较，如果经正常人耳的判断两者相一致，则该声音的音调就可用纯音的频率来描述。

说明：

(1) 音调的单位是美 (mel)。规定频率为 1000 赫兹而声压为 40 分贝的纯音所产生的音调为 1000 美。任何一个声音的音调，如果为听者判断为 1 美纯音音调的 n 倍，则该音调就是 n 美。

(2) 音调和响度(参见响度)一样都是一种主感量,因而不能用仪器测量,音调与频率虽有关,但却没有一一对应关系。对恒定强度的纯音来说,频率增大时,音调变高;但对恒定频率的纯音来说,声强增大时,音调却变低。

(3) 可以按照音调的高低把声音排列成音阶(由低到高排列、有一定频率和一定频率间距的一组纯音)。例如,自然音阶中的 C、D、E、F、G、A、B、C(即 1、2、3、4、5、6、7、1),音

调的相对频率为 256Hz, 288Hz, 320Hz, $341\frac{1}{3}$ Hz, 384Hz, $426\frac{2}{3}$ Hz, 480Hz, 512Hz 等。

(4) 音调与声调是两个不同的概念。声调常指语言声的音调和变化方式。我国汉语拼音中有阴(阴平)、阳(阳平),上(上声)和去(去声)等声调。

声强

表示声音强弱的物理量。空间某点在指定方向上的声强等于该点与指定方向相垂直的单位面积在单位时间内通过的声能量。

说明:

(1) 在国际单位制中,声强的单位是瓦特/米²。

(2) 声强定义为单位时间内通过垂直于声波传播方向的单位面积的平均能量,故也就是声波的能流密度。

一般声强与考察点声振动的振幅平方和频率平方均成正比。例如炮声震耳(声强约 $1\text{w}/\text{m}^2$) 主要是其振幅大,而超声波最大声强达 $10^9\text{w}/\text{m}^2$,则主要在于其频率很高。

通常声强随声音传播距离的增大而减弱,除了因为声的能流密度与传播距离的平方成反比外,还有介质对声能的吸收等缘故。

(3) 能引起人听觉的声音不仅要有一定的频率范围(20~20000Hz),而且要有一定的声强范围。对于一定频率的声音,要能引起听觉,其声强有上、下两个限度:下限是恰能引起人听觉的最小声强,叫做该频率声音的可闻阈;上限是指人耳能听闻的最大声强。高于上限的声强,人耳感觉疼痛,所以上限声强叫做该频率的疼痛阈。实验指出,不同频率的声波其声强的上、下限是不相同的。在上、下限之间的声强范围就是听觉范围(约 $10^{-12}\sim 1\text{w}/\text{m}^2$)。

(4) 由于声强的变化范围极大，数量级相差悬殊，为了比较介质中各点声音的强弱，更多地是利用声级（曾称声强级）。声级定义为声场中某点的声强 I 与标准声强 I_0 的比值的常用对数，即声级

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

式中 I_0 为标准声强，等于 $10^{-12} \text{w} / \text{m}^2$ (大约相当恰能听到的最弱声音的强度)，单位是贝尔 (B)。若采用分贝 (dB) 作单位，则上式可改写为

$$L_0 = 10 \lg \frac{I}{I_0}。$$

普通谈话声约 60 分贝。

响度

人耳感觉到的声音强弱。

说明：

主要取决于声振动的振幅和声压。响度随声强的增加而增大，但两者却没有简单的线性关系。声强相同而频率不同的纯音，未必产生响度相同的感受。响度大致与声级成正比，声级越高，人感觉越响。

共鸣

声学中由声波的作用而引起的共振现象。

说明：

(1) 为了引起共鸣，必须使接受声波的能发声的物体所具有的固有频率和声波的频率相同。

(2) 共鸣现象常用来增加发声体的响度以及改善声音的品质。各种乐器的共鸣箱就是为此目的而设计的，例如音叉下的木箱，琵琶、三弦、二胡及提琴等的琴身和琴筒。利用共鸣作用的频率选择性，使乐器发出响亮或低沉的乐音。

超声

频率超过 20000Hz，不能引起人耳听觉的声波，亦称超声波。超过 5×10^8 Hz 的超声，则称为“特超声”。

说明：

(1) 1883 年，德国葛尔登·哈特曼 (Galton Hartmann) 通过狭缝的高速气流吹到锐利刀口上首次获得超声。现在主要通过磁致伸缩效应或压电效应的换能器产生超声。压电换能器也从天然压电晶体过渡到价格低廉而性能良好的压电陶瓷，人工压电单晶，压电半导体及塑料压电薄膜等。这些材料使超声频范围从几十千赫提高到上千兆赫，产生和接收的波形也由单纯的纵波扩展到横波、扭转波、弯曲波、表面波等。

(2) 超声波的主要特性和作用

① 波长短，近似作直线传播，可应用于探伤、诊断、测定液位等；② 在固体或液体内部的衰减远比电磁波小，可应用于各种水声技术以及研究不透明固体的内部情况；③ 传播特性（如声速，声衰减）与媒质的各种性质密切相关，因此发展了很多非声学量的超声测定方法；④ 能量易于集中，可得到很高的声强，引起激震波、液体中的空化作用等特殊作用，产生机械、热、光、电、化学及生物等各种效应。超声技术广泛应用于工农业生产及医药卫生等方面。

(3) 20 世纪 40 年代开始，人们研究超声波在各种介质中的速度频散关系时，陆续发现了它们与各种分子弛豫过程以及微观谐振过程之间的关系，形成了“分子声学”这一分支。

目前已能产生并接收频率接近于点阵热振动频率 (10^{15} Hz 以上) 的特超声，利用这种量子化声能 (所谓“声子”) 可以研究原子间的相互作用、能量传递等问题。通过对特超声声速和衰减的测定，可以了解声波与点阵振动的相互关系及点阵振动各模式之间的耦合情况，还可用于研究金属和半导体中声子与电子、声子与超导结、声子与光子的相互作用等。至今，超声、电磁波和粒子轰击，并列为研究物质微观过程的三大重要手段，且正在形成与之相关联的“量子声学”新分支。

多普勒效应

指波源或接收器，或两者都相对于传波媒质运动时，接收器所收到的波的频率与波源的振动频率两者不同的现象：相互靠近时所接收到的频率升高，相互远离时所接收到的频率降低。亦称多普勒频移。

说明：

(1) 多普勒效应由奥地利物理学家多普勒 1842 年发现并解释了这一现象。以声波为例，当听者走向发声的喇叭时，所听到的音调变高；而听者远离喇叭而去时，所听到的音调变低。光波亦有相同的现象，从地球上观测一颗恒星发来的光，如果地球和恒星相互退行，则观测到的光线向光谱的红端移动，即频率变低；如果地球和恒星相互靠近，则观测到的光线向光谱的紫端移动，即频率变高。

(2) 多普勒效应可以作如下解释：当声源向接收器靠近时，接收器每秒收到的波的个数，将比声源每秒所发出的波的个数要多，因为声源在发出最后一个波时比在发射第一个波时更靠近接收器，这表示接收到的频率与声源相比变高。反之，当声源退离接收器时，接收到的频率与声源相比要低些。同样的论证也适用于固定的振源和运动着的接收器的情形。对于声波，多普勒频移公式为

$$f' = f \left(\frac{V + u}{V - v} \right),$$

式中 V 为媒质（如空气）中的声波速度，设媒质静止； v 为声源的速度，当它向着接收器运动时取正值； u 为接收器的速度，当它向着声源运动时取正值； f 为声源的振动频率； f' 为接收器收到的声波频率。

如果声源运动速度远小于声速时，即 $v \ll V$ （设 $u=0$ ），则

$$f' = f \left(1 + \frac{v}{V} \right).$$

(3) 光波的多普勒效应，亦可作类似的解释。只是声波（机械波）传播必须有媒质，所以声源及接收器的运动速度都相对于媒质而言。但光波是电磁波，它的传播不需要媒质，利用狭义相对论可以得到光波的多普勒频移公式为

$$f' = f \sqrt{\frac{c - v}{c + v}},$$

式中 c 为真空中的光速， v 为接收器与光源之间的相对速度。如果接收器正在远离光源，那么 v 取正， f' 小于 f ；如果接收器正在接近光源，那么 v 取负， f' 大于 f 。当 $v \ll c$ 时，忽略 $(v/c)^2$ 以上的高次项，取一级近似，则光波的多普勒频移公式变为

$$f' = f \left(1 - \frac{v}{c} \right),$$

这一公式与声波多普勒频移公式基本一致。

(4) 多普勒效应已在人造卫星的跟踪，测量遥远星体的退行速度，车辆的运动速度，以及测量管道中流体（石油、煤气）或血管中血液的流动速度等方面获得了广泛的应用。

热力学系统

热学所研究的对象，简称系统或体系。

说明：

(1) 物质的热性质与物质中的微粒运动有着不可分割的联系。任何物质都是由大量的微粒（分子、原子、离子、电子等）组成，所谓热运动就是组成物体的大量微粒的一种永不停息的无规则的杂乱运动。组成物体的微粒按照（经典的或量子的）力学规律运动。由于微粒间频繁地相互碰撞（相互作用），微粒运动的位置和速度（微观运动状态）迅速变化，但总体上存在确定的规律性（统计规律性）。

(2) 热力学系统是指在给定的范围内，由大量的微粒所组成的宏观物体。例如气体，液体（包括溶液），固体，液晶，等离子体。

(3) 我们所研究的热力学系统是有限的系统。若把热力学系统外的其他物体称为外界（或环境）的话，我们所指的外界主要是指系统周围对热力学系统起着影响的物体。

(4) 中学教学中，热力学系统主要限于气体、液体和固体。

平衡状态

如果系统性质均匀，且在不受外界影响或在外界条件不变的情况下，宏观状态（包括几何、力学、热学等一切宏观性质）不随时间变化，我们称之为平衡状态，简称为平衡态。

说明：

(1) 例如，当两个冷热程度不同的物体互相接触时，热的物体变冷，冷的物体变热，直到两物体最后达到各处冷热程度均匀一致的状态。我们说，此时整个系统处于热力学平衡态。

(2) 这里所说的不受外界影响，是指外界对系统既不作功又不传热。

(3) 需要指出，当一个热力学系统处在平衡状态时，体系内部的微粒仍在不停地运动着，只是它们运动的平均效果不变。表现出来的只是宏观状态不随时间而改变。这样一种平衡实际上是动态平衡。我们称之为热动平衡。

(4) 严格说来, 在实际情况中并不存在不受外界影响、且宏观性质绝对保持不变的系统。平衡态只是一个理想的状态。讨论有关热学问题时, 为了简化问题, 常常将实际状态近似看作平衡态。

(5) 在中学阶段, 只讨论热力学系统处在平衡状态时的某些性质, 并不研究系统是如何从一个平衡态到达另一个平衡态的。此时, 凡是提到的状态都指平衡态。

状态参量

当热力学系统处于平衡态时, 系统的状态不变。系统的状态可以用一些描述系统宏观性质的状态参量来表征。一定质量的气体组成的系统, 可由系统的体积、压强和温度来描述。这三个物理量称为气体的状态参量。

说明:

(1) 体积是几何参量, 压强是力学参量, 温度是热学参量。

(2) 描述气体的平衡状态, 可由三个量中任何两个变量来决定。这三个变量中有两个已知时, 第三个量也就随着确定。例如, 当气体的体积和温度具有一定的值时, 它的压强也就有确定值。这种热力学系统叫做两参量系统。如可用一组 (p, V) , (p, T) 或 (V, T) 两个参量来描写。这里 p 表示压强, V 表示体积, T 表示温度。

(3) 描写气体处在平衡态的方法也适用于液体的平衡态描述。

(4) 复杂的热力学系统的状态描述还需要增加更多的参量, 例如化学系统要增加化学参量, 等离子体要增加电磁参量。

体积

量度热力学系统占据空间大小的物理量。

说明:

(1) 在国际单位制中, 体积的单位是米³。

(2) 当气体系统中的分子数和体积一定时, 单位体积中的分子数叫做气体的密度。

(3) 气体体积增大的过程叫做膨胀过程, 体积变小的过程叫做收缩过程, 而体积不变的过程叫做等容过程。

理想气体

严格遵从理想气体状态方程的气体。

说明：

(1) 理想气体是一种理想化的模型，实际并不存在。实际气体中，凡是本身不易被液化的气体，在压强不太大，温度不太低的条件下，它们的性质接近理想气体。压强愈低，愈接近理想气体。

(2) 把实际气体当作理想气体处理时，对于研究问题，尤其是在公式计算方面可大大简化。

(3) 从分子运动论的角度来看，理想气体的微观结构具有下列特点：

微粒（分子、原子）本身的线度和微粒间的平均距离相比，可以忽略不计；微粒在运动过程中，除碰撞的一瞬间外，微粒之间以及微粒和器壁之间可以认为都无相互作用；每个微粒都可看作是刚性小球。微粒之间以及微粒和器壁之间的碰撞是完全弹性碰撞。

气体实验定律

在 17~19 世纪时期，对气体状态变化的规律进行了实验研究，得到 3 个定律：玻意耳-马略特定律，盖·吕萨克定律和查理定律。这些由经验确立的定律反映了气体状态变化的特征。

说明：

(1) 大量的实验结果表明，稀薄气体在压强不太大（和大气压比较）和温度不太低（和室温比较）的范围内，都近似遵循玻意耳-马略特定律，盖·吕萨克定律和查理定律。气体的压强越低，遵循的程度越高。在压强趋于零的极限情形下，一切气体都严格遵循这三条定律。这三条定律反映了一切气体所具有的共性。

(2) 为了概括并研究气体这一共同规律，引入理想气体的概念，气体实验定律也叫做理想气体定律。

玻意耳-马略特定律

在温度不变时，一定质量的气体的压强跟它的体积的乘积是不变的。它可以用数学公式表示如下：

$$pV=C。$$

式中 P 是压强， V 是体积， C 是常量，它的数值只和温度、气体的种类以及质量有关。如果气体的种类和质量一定，在温度不变时， C 就是一个确定的常量。

玻意耳-马略特定律的另一种表示形式：若以 V_1 和 V_2 表示气体在同一温度的两种压强 p_1 和 p_2 时的体积，那么从公式

$$pV=C$$

得到

$$P_1V_1=P_2V_2=C。$$

说明：

当气体质量一定时，气体包含的总微粒（分子或原子）数不变。等温变化意味着气体的平均动能不变，当气体的体积减小到原来的几分之一，分子的密度就增大为原来的几倍，因而在单位时间内，气体分子对器壁单位面积的碰撞次数就增加几倍，即压强增大到几倍。气体体积增大时，情况恰好相反。这就从微观分子运动论的观点解释了温度不变时气体的压强与体积成反比。

盖·吕萨克定律

当压强保持不变时，一定质量的气体的体积与绝对温度（也就是开氏温标） T 成正比，它可用数学公式表示成

$$\frac{V}{T} = C,$$

这里 C 是常量。

如果以 V_1 和 V_2 表示气体在同一压强的两种绝对温度 T_1 和 T_2 时的体积，盖·吕萨克定律还可表示成

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = C,$$

说明：

(1) 盖·吕萨克定律又可表述为：一定质量的气体，在压强保持不变的情况下，温度每升高（或降低） 1°C ，增加（或减小）的体积，约等于它在 0°C 时体积的 $1/273$ 。用公式可表述为

$$V = V_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right),$$

式中 V_0 是气体在 0°C 时的体积， V 是气体在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的体积。于是，一切气体的体膨胀系数 γ 为

$$\gamma = \frac{1}{273}^{\circ}$$

(2) 如果改用开氏温标，则

$$T = t + 273,$$

(1) 中公式可化成

$$V = V_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right) = V_0 \frac{T}{273},$$

即

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{273} = \text{常量}。$$

(3) 现代精确测得的气体体膨胀系数

$$\gamma = \frac{1}{273.15}^{\circ}$$

于是，开氏温标 T 与摄氏温标 t 的关系确定为

$$T = t + 273.15。$$

(4) 在中学阶段，开氏温标 T 和摄氏温标 t 间的换算，可取近似值 $T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273$ 。精确的换算关系应该是 $T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15$ 。

(5) 一定质量的气体压强保持不变，意味着单位时间里分子对器壁作用的总冲量不变。然而当气体温度升高时，分子平均速度增大，分子对器壁的冲量增大，即有使压强增大的倾向。在气体的总分子数保持一定的条件下，要使压强不变，必然是气体的分子密度相应减小，即气体的体积增大，以使压强有减小的倾向，这样才能保持压强不变。气体温度下降时，情况恰好相反。这就从微观分子运动论的观点解释了压强不变时气体的体积和温度成正比。

查理定律

当体积保持不变时，一定质量气体的压强 p 和绝对温度 T 成正比，它可用数学公式表示成

$$\frac{P}{T} = C,$$

这里 C 是常量。

如果以 P_1 和 P_2 分别表示在相同体积的两种绝对温度 T_1 和 T_2 时的压强，查理定律还可表示成

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = C,$$

说明：

(1) 查理定律又可表述为：一定质量的气体，在体积保持不变的情况下，温度每升高（或降低） 1°C ，增加（或减小）的压强等于它在 0°C 时压强的 $1/273$ 。它的数学表示式为

$$P = P_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right).$$

查理定律可改写成

$$P = P_0 (1 + \beta t),$$

$\beta = 1/273$ ，它叫做气体的压强系数。现代精确测得

$$\beta = \frac{1}{273.15}.$$

(2) 一定质量的气体，当体积保持不变时，如果气体温度升高，分子平均速度增大，气体的压强就增大；气体温度降低时，情况恰好相反，这就解释了在体积不变时气体的压强和温度成正比。

理想气体状态方程

处于热力学平衡态的气体具有确定的压强 p 、体积 V 和温度 T 。对于一定质量的气体，温度 T 是压强 p 和体积 V 的函数，这个函数关系可写成

$$T=f(p, V),$$

或

$$F(T, p, V)=0。$$

这个关系叫做气体的状态方程。它的具体形式则由实验确定。

理想气体的状态方程为

$$pV = \frac{M}{\mu} RT (= nRT),$$

或

$$T = \frac{\mu}{MR} pV。$$

这里 n 为气体的摩尔（克分子）数， M 为气体的质量， μ 为摩尔（克分子）质量， R 为气体常数。

说明：

(1) 根据阿伏伽德罗定律，在标准状态（压强 p 为 1 大气压，即 $p=1.013 \times 10^5$ 帕；温度为摄氏零度，即 $T=273.15\text{K}$ ）下，任何一种气体的一摩尔（即 $n=1$ ）体积 V 都等于 2.24×10^{-2} 米³。由此可得气体常数

$$R = \frac{pV}{T} = \frac{1.013 \times 10^5 \text{ 帕} \times 2.24 \times 10^{-2} \text{ 米}^3 / \text{摩尔}}{273.15 \text{ 开}}$$

=8.31 焦耳/摩尔·开。

(2) 如果 p 取大气压作单位， V 取升作单位，则

$$R=0.082 \text{ 大气压} \cdot \text{升/摩尔} \cdot \text{开}。$$

(3) 理想气体状态方程又叫克拉伯龙方程。

(4) 当气体的质量一定，在状态变化过程中的每一状态，其压强、体积和温度都符合

$$\frac{pV}{T} = \frac{M}{\mu} R = \text{常量}。$$

因此，任何两状态都满足关系式

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

(5) 各种气体在压强不太大、温度不太低的情况下，近似遵循理想气体状态方程。压强越低近似程度越高。在压强趋于零的极限情况下，各种气体都遵循理想气体状态方程。

道尔顿分压定律

包含几种不同化学组分的混合气体，在压强较低时，混合气体的压强等于每个组分的分压强之和。

说明：

(1) 如果用 p 表示混合气体的压强，用 p_1 、 p_2 、 \dots 、 p_n 分别表示各组分的分压强，则道尔顿分压定律可表示为

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n。$$

(2) 列出各组分的理想气体状态方程，并将所有的方程相加，就得到混合理想气体的状态方程：

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = \left(\frac{M_1}{\mu_1} + \frac{M_2}{\mu_2} + \dots + \frac{M_n}{\mu_n} \right) RT。$$

范德瓦耳斯方程

指非理想气体的状态方程。对于非理想气体，范德瓦耳斯考虑了分子间的引力和分子本身的体积，提出了一个对理想气体经过修正的非理想气体状态方程：

$$\left(p + \frac{M^2 a}{\mu^2 v^2}\right) \left(v - \frac{M}{\mu} b\right) = \frac{M}{\mu} RT$$

式中 M 为气体的质量， μ 为摩尔（克分子）质量， R 为气体常数； a 和 b 叫做范德瓦耳斯常数，可用实验方法测定。不同气体的修正值 a 和 b 是不同的。

说明：

(1) 分子体积所引起的修正：1 摩尔理想气体的状态方程

$$pv = RT,$$

式中 v 为 1 摩尔气体占据的体积。在理想气体模型中，忽略了气体分子本身的体积，所以 v 就是气体分子活动的空间。在实际气体中，分子本身的体积不能忽略，必须从气体所占的容积 v 中，减去一个反映气体分子本身所占的体积 b ，所以对理想气体状态方程作如下修正：

$$p(v-b) = RT.$$

(2) 分子间的引力所引起的修正：考虑到气体分子间有引力，靠近器壁分子受到容器内分子对它向内的引力作用，垂直于容器壁方向的动量就减少，因而器壁实际受到的压强要比不存在引力时的值小一些。对上式再作修正：

$$(p + \Delta p)(v-b) = RT,$$

即

$$p = \frac{RT}{v-b} - \Delta p.$$

从分子运动论观点，压强等于气体分子在单位时间内施于单位面积器壁的平均冲量。如果以 Δk 表示因内向拉力 f 的作用，分子在垂直于器壁方向上动量减少的数值，则

$$\Delta p = \left(\frac{\text{单位时间内与单位面积}}{\text{器壁发生碰撞的分子数}} \right) \times 2\Delta k.$$

显然， Δk 与内向的拉力成正比，而这个拉力又与单位体积内的分子数 n 成正比，即 $\Delta k \propto n$ 。但单位时间内与单位面积相碰的分子数也与 n 成正比，所以 $\Delta p \propto n^2 \propto 1/v^2$ 。写成等式有

$$\Delta p = \frac{a}{v^2}.$$

比例系数 a 由气体的性质确定。

于是，一摩尔范德瓦耳斯气体的压强为

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}。$$

这就是说，适用于一摩尔气体的范德瓦耳斯方程为

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v-b) = RT。$$

(3) 任意质量 M 的气体的范德瓦耳斯方程为

$$\left(p + \frac{M^2 a}{\mu^2 v^2}\right)\left(v - \frac{M}{\mu} b\right) = \frac{M}{\mu} RT。$$

(4) 实际应用中，如果需要较高的精确度，即使在较低的压强下，对于实际气体的描述，范德瓦耳斯方程还不符合要求。

统计规律

对大量偶然事件整体起作用的规律。在“大数量”现象中出现的新现象的最重要的特点就是在一定宏观条件下的稳定性，这是由统计规律所制约的。

包含着大数量粒子的体系，作为整体看来，它与个别粒子有本质的不同。对于这样的体系，统计规律所制约的稳定的联系是现象的本质的和必然的联系。

统计规律的另一个特点是永远伴随着涨落现象。统计规律与涨落现象是不可分割的，这正反映了必然性与偶然性之间相互依存的辩证关系。

说明：

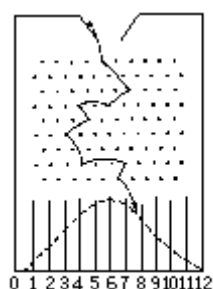
(1) 统计规律不可能脱离由动力学规律所决定的个别事件。气体中每个分子朝哪个方向运动，速率多大，何时发生碰撞都由动力学规律确定。但当体系中包含“大数量”粒子，导致出现本质上全新的运动形式时，其最重要的特点就是在一定宏观条件下的稳定性，这是由统计规律所制约的。只要气体中分子的数目足够多，在保持温度恒定这一宏观条件下，不管个别分子怎样运动，大量分子整体的速率总是遵从麦克斯韦分布的。这便是“大数量”现象的稳定性。

一切与热运动有关的宏观量（如压强和温度）的数值都是统计平均值。在任一给定的瞬间，所测量到的宏观量的数值，一般都与统计平均值有偏差。这就是涨落现象。

(2) 统计规律性的研究可利用“概率”的概念。“概率”是指所有可能发生的各类事件中，某类事件发生的可能性有多大。概率可用事件发生的次数占总次数的比来表示。总次数越少，发生的偏差越大；总次数越多，发生的偏差就越小；如果总次数趋于无限，出现的概率就达到确定值。这意味着，概率必须以“大数量”为前提。

(3) 伽尔顿板演示实验。如下图所示，在一块竖直的木板上部，有规则地钉上大量铁钉，木板的下部用竖直的隔板，隔成许多等宽的狭槽。在板面覆盖一块玻璃，板的顶部有一个漏斗形入口，可以倒入小球。每个小球和铁钉经过多次碰撞，落在某一条狭槽内。这种演示实验装置叫做伽尔顿板。

从入口处放入一个小球，在下落过程中先后和很多个铁钉碰撞，最后落入某一个狭槽。重复进行多次实验，每次小球落入哪个槽内无规律而言，仅具有偶然性。当进行“大数量”次数实验后，可以看到小球在槽内的分布是有规律的：在中央槽内，小球最多；在离中央越远的槽内，小球越少。用粉笔在玻璃板上按小球的分布可画出一条如图中所画的连续曲线。



把小球从伽尔顿板的小槽中取出，重复实验，发现每次所得分布曲线与图中所画的连续曲线几乎重合。小球的总数愈多，实验曲线重合得愈好。

实验表明，一定数量的小球，在铁钉排列形式不变的条件下，不管这些小球分批分个倒入，还是把全体小球一批倾入，只要小球数量足够多，它们在狭槽中的分布总是形成一条确定的曲线。这便是在一定宏观条件下，“大数量”现象的稳定性。如果只采用少量的小球作实验，重复多次后发现，每次所得的分布曲线彼此有显著差别，且无一定规律。这表明，统计规律必须以“大数量”粒子为前提。

即使采用“大数量”粒子做实验，仔细观察小球在狭槽中的分布曲线，发现曲线只能彼此近似重合，不能完全一致。这表明，在统计规律中一定出现涨落现象。

最概然速率

当气体处于热力学平衡态，分子符合麦克斯韦速率分布，与麦克斯韦速率分布 $f(v)$ 的极大值对应的速率。

说明：

(1) 最概然速率

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \approx 1.41 \sqrt{\frac{RT}{\mu}}$$

这里 T 是气体温度， R 是气体常数（参见理想气体状态方程）， k 是玻尔兹曼常数， μ 是气体摩尔质量和 m 是分子质量。

(2) 速率比 v_p 大的分子数占总分子数的 57%，而速率比 v_p 小的分子数占总分子数的 43%。

平均速率

全体分子的速率的平均值。

说明：

(1) 气体处于热力学平衡态时，分子的速率分布为麦克斯韦分布，

其平均速率 \bar{v} 为

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \approx 1.59 \sqrt{\frac{RT}{\mu}}$$

(2) 讨论分子运动的碰撞问题和计算分子运动的平均自由程时，要采用分子的平均速率。

方均根速率

全体分子速率平方的平均值 $\overline{v^2}$ (方均速率) 的平方根，记作 $\sqrt{\overline{v^2}}$ 。

说明：

(1) 气体处于热力学平衡态时，分子的速率分布为麦克斯韦分布，其方均根速率为

$$\sqrt{\bar{v}} = \sqrt{\frac{8kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \approx 173 \sqrt{\frac{RT}{\mu}}$$

(2) 分子的方均根速率、平均速率、最可几速率都和 \sqrt{T} 成正比，

并和 \sqrt{m} 或 $\sqrt{\mu}$ 成反比；其中方均根速率 $\sqrt{\bar{v}^2}$ 最大，平均速率 \bar{v} 次之，最可几速率 v_p 最小。在室温下它们的数量级一般为每秒几百米。

温度

彼此处于热平衡的物体有一个共同的状态参量，这就是温度。

说明：

(1) 温度是表示物体冷热程度的物理量。从分子运动论观点看来，温度标志着物体内部大量分子杂乱运动的剧烈程度，温度是大量分子的平均平动动能的量度。

如果用 $\bar{\epsilon}$ 表示分子平均平动动能， T 为温度， $\sqrt{\bar{v}^2}$ 为方均根速率， m

为分子质量和 k 为玻尔兹曼常数，从分子运动论得出

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT$$

式中 $3k/2$ 是一个常数，只要气体的温度 T 确定后，气体分子的平均平动动能也就完全确定。任何理想气体在同一温度下，它们的分子平均平动动能都是相同的。因而确定物体温度的是其内部分子热运动的平均平动动能。

(2) 几个热力学系统，当它们之间相互处于热平衡状态后，都具有相同的温度。在各个系统和外界不发生热量交换的条件下，如果把这几个已达到热平衡的系统分开，并不会改变每个系统本身的热平衡状态，它们的温度也不会改变。这说明彼此处于热平衡的物体有一个共同的状态参量：温度。

温标

温度的数值表示法。温标是温度的标尺，为量度物体温度高低而对温度零点和分度方法所作的一种规定。

说明：

(1) 日常生活最常用的一种温标是瑞典天文学家摄尔修斯于 1742 年首创的，简称为摄氏温标。摄氏温标把在标准大气压下水的凝固点（即下固定点）定作 0 度，把水的沸点（即上固定点）定作 100 度。再把基本标距分成 100 格，每格作为一分度，每一分度定作一摄氏度。摄氏温标的单位是摄氏度，用 $^{\circ}\text{C}$ 表示。例如，23 摄氏度记成 23°C 。

(2) 另一种经常采用的温标是华氏温标。这是水银温度计创始人华伦哈依特于 1714 年提出的。他把处于标准大气压下水的凝固点（即下固定点）定为 32 度，把水的沸点（即上固定点）定为 212 度，再把基本标距分成 180 等分。华氏温标的单位是华氏度，记作 $^{\circ}\text{F}$ ，例如，89 华氏度记成 89°F 。

(3) 已知摄氏温度 t_{C} ，化成华氏温度 t_{F} 的公式为

$$t_{\text{F}} = \frac{9}{5}t_{\text{C}} + 32。$$

反之，已知华氏温度 t_{F} ，换算成摄氏温度 t_{C} 的公式为

$$t_{\text{C}} = (t_{\text{F}} - 32) \times \frac{5}{9}。$$

(4) 开氏温标也称作热力学温标或绝对温标 T ，它与摄氏温标 t_{C} 的换算关系为

$$T = t_{\text{C}} + 273.15，$$

或

$$t_{\text{C}} = T - 273.15。$$

在精密度不高的实验中，采用下列近似公式

$$T \approx t_{\text{C}} + 273，$$

或

$$t_{\text{C}} \approx T - 273。$$

例如，绝对温度 300 度记作 300K 或 300 开。

温度计

测量温度的仪器。

说明：

(1) 温度计的种类繁多。1592年伽里略首创历史上第一个温度计。1714年华伦哈依特制成当时认为准确的第一个水银温度计。常用的测量温度的仪器有水银温度计、酒精温度计。学生实验用的温度计，还常使用煤油温度计。煤油的沸点高于 150°C ，凝固点低于 -30°C ，对于中学物理实验测量的温度范围，煤油温度计比较合适。

(2) 较精确的温度计有定容气体温度计和定压气体温度计。利用固定体积的气体的压强随温度变化的性质来测定温度的仪器叫做定容气体温度计。利用固定压强的气体的体积随温度变化的性质来测定温度的仪器叫做定压气体温度计。

绝对零度

绝对温标的零度。

说明：

(1) 根据 $t_c = T - 273.15$ 的换算关系，得出绝对零度是 -273.15°C 。

(2) 通常，换算关系近似地取 $t_c = T - 273$ ，绝对零度近似地取 -273°C 。

(3) 从分子运动论观点，理想气体分子的平均动能 $\bar{\epsilon}$ 由温度 T 确定

(参见) 温度。当 $T \rightarrow 0$ 时， $\bar{\epsilon} \rightarrow 0$ ，似乎可以把绝对零度说成是“理想

气体分子停止运动时的温度”。这种讲法只是一种理想的推理，并没有事实根据。事实上，一切实际气体在温度接近 -273.15°C 时，早已变成液态或固态，理想气体定律早已失效，而且在接近绝对零度的低温物理范畴，需要采用量子理论。

三相点

纯物质的气（汽）、液（水）、固（冰）可以三相平衡共存。各种物质在三相共存时具有固定的压强 p_t 和温度 T_t 。在 $p-T$ 坐标平面图上， (p_t, T_t) 是一个点，叫做三相点。

说明：

(1) 任一物质处于三相点时有确定的温度和压强，它比前面采用的两相共存的冰点和沸点作为两个标准点要准确。

(2) 国际权度会议决定，把水的三相点作为标准的固定点，并把它规定为 273.16 开 (K)。标准间距 1K 规定为水的三相点温度的 $1/273.16$ 。

热量

热力学系统间相互作用的一种方式是通过热量传递。热量从温度高的系统传递给温度低的系统。做功和热量传递是系统相互作用的两种方式。除了做功以外，体系将一部分能量传递给另一个系统的方法就是通过热量的传递。这就是说“热量是一种能量变化的量度”。

说明：

(1) 当研究一个系统的热力学过程时，如果这个系统（环境）放出热量，该过程就叫做放热过程；如果在过程中系统从外界（环境）吸收热量，那么该过程就叫做吸热过程。实验表明，如果系统从某一初始状态出发，可以通过不同的过程变化到同一终了状态，那么，在这些不同过程中系统所吸收（或放出）的热量一般是不相同的。即是说，热量与具体过程有关。它和功一样，都是过程量。

(2) 既然热量可以用来量度能量的变化，热量就可以采用能量的单位来表示。在国际单位制中热量的单位用焦耳表示。热量还采用卡或大卡作单位，它与热质说时的“卡”意义完全不同。

热功当量

热量的单位可采用“焦耳”或“卡”，这两个单位间的换算关系为“1卡=4.18焦耳”，这个关系叫做热功当量。

说明：

(1) 热功当量是 1840 年到 1879 年，英国物理学家焦耳经过大量实验发现的。

(2) 焦耳实验有力地证明了，被传递的热量和功一样，不是什么特殊的物质，而是能量传递的一种形式，它有力地驳斥了“热质说”。热质说被否定后，“热量”这个名词和它的单位“卡”仍然保存下来，不过已失去了原来的意义，“卡”只成了能量的一种单位。

1“大卡”就是1“千卡”。1大卡= 10^3 卡。

比热容（比热）

某种物质的比热容是指该物质的热容量[某种物质温度升高（或降低） 1°C 时所吸收或放出的热量]和该物质的质量之比，简称比热。

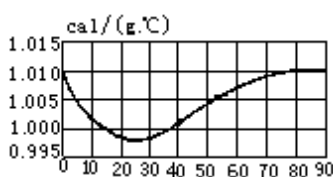
说明：

(1) 一摩尔物质的温度升高（或降低） 1°C 时所吸收（或放出）的热量，叫做物质的摩尔热容量，简称摩尔热容。

(2) 某种物质的比热容是指单位质量的该物质温度升高（或降低） 1°C 时所吸收（或放出）的热量。

(3) 在国际单位制中比热的单位是焦耳/千克·开，常用的单位还有卡/克· $^{\circ}\text{C}$ 和千卡/千克· $^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 比热容的大小也因温度的高低、压强和体积的变化而有所不同。例如，水的比热容，严格地说，只有当温度从 14.5°C 上升到 15.5°C 时，才等于 1 卡/克· $^{\circ}\text{C}$ 。下图展示的是水的比热容在 0°C 到 90°C 之间的变化情形。



由于水的比热容在不同温度间隔的差别很小，通常计算中对这微小的差异不加考虑。

不仅水如此，任何别的物质在温度改变时，它的比热容的数值也都有很小的变化，通常物质比热容表中所给的数值，都是指它们的平均值。

(5) 比热容是反映物质的吸热（或放热）本领大小的物理量。它是物质的一种属性。任何物质都有自己的比热容，即使是同种物质，由于所处物态不同，比热容也不同。

气体的定容摩尔热容量

1 摩尔气体，当体积保持不变，在没有化学反应和相变的条件下，温度改变 1 开所吸收或放出的热量，简称定容摩尔热容。

说明：

(1) 在热力学系统中，与液体和固体不同，气体的热容量和气体的热膨胀关系很大，在体积恒定时的热容量和压强恒定时的热容量是不一样的。在气体的容积不变情况下，使单位摩尔的某种气体温度升高 1 开所需的热量，叫做这种气体的定容摩尔热容量，用 C_V 表示。

(2) 在定容过程中气体的体积不发生变化，所以气体吸收的热量全部用来增加它的内能（参见内能）。

(3) 1 摩尔理想气体的内能为 $\frac{1}{2}(t+r+2s)RT$ ， t 为气体分子的平动自

由度， r 为转动自由度， s 为振动自由度。于是，理想气体的定容摩尔热容量

$$C_V = \frac{1}{2}(t+r+2s)R。$$

单原子分子只有平动， $t=3$ ，因而 $C_V = \frac{3}{2}R$ 。双原子分子除有平动自

由度 $t=3$ 外，还有转动自由度 $r=2$ ，振动自由度 $s=1$ ，因而 $C_V = \frac{7}{2}R$ 。

(4) 一个质点在空间自由运动，它的位置由 3 个独立坐标决定，所以该质点有 3 个自由度。单原子分子可看作自由运动的质点，所以有 3 个自由度。双原子分子中两个原子是由一个键联接起来、其质心平动有 3 个自由度。决定两原子连线（键）的方位要 2 个坐标，因而该连线的转动自由度 $r=2$ 。两个原子沿着连线方向作微振动，因而振动自由度 $s=1$ 。

(5) 气体中分子不断相互碰撞，在碰撞过程中，一个分子的能量可以传递给另一个分子，一种形式的能量可以转化为另一种形式的能量，而且能量可以从一个自由度转到另一个自由度。由统计力学导出的能量按自由度均分定理得到：在温度为 T 的平衡状态，一摩尔理想气体的能

量等于 $\frac{i}{2}RT$ ，式中 i 为气体中每个分子的自由度数。

(6) 谐振动在一个周期内的平均动能和平均势能是相等的。分子内原子的微振动可近似地看作谐振动，所以对于每一振动自由度，分子除有平均动能外，还具有平均势能。因而如果分子的振动自由度为 s ，

则一摩尔气体分子的平均振动动能和平均振动势能各应为 $\frac{s}{2}RT$ 。于是

一摩尔气体分子的平均总能量为 $\frac{1}{2}(t+r+2s)RT$ 。

(7) 以上由经典统计力学导出的气体定容摩尔热容量 C_V 的理论值只与单原子分子气体的实验值很好地符合。对双原子分子气体，两者并不符合。这是因为原子和分子的转动和振动遵循量子理论，只有量子理论才能对气体热容量进行完满的解释。

(8) 能量按自由度均分定理可以叙述为：在温度为 T 的平衡状态，

理想气体中分子的每一个自由度都具有相同的平均动能，其大小都等于 $\frac{1}{2}$

kT 。这里 k 为玻尔兹曼常数。如果每一个分子的自由度数为 i ，那么每

一个分子总的平均动能为 $\frac{i}{2}kT$ 。对于理想气体来说，每一个分子的内

能就是 $\frac{i}{2}kT$ 。1摩尔气体有 N_A 个分子， N_A 为阿伏伽德罗常数。由于气

体常数 $R = kN_A$ ，1摩尔理想气体的内能则为 $\frac{i}{2}RT$ 。

气体的定压摩尔热容量

1 摩尔气体，当压强保持不变，在没有化学反应和相变的条件下，温度改变 1 开所吸收或放出的热量，简称定压摩尔热容。

说明：

(1) 气体的定压摩尔热容量用 C_p 表示。在压强不变的条件下，温度升高 1 开时，气体一定要膨胀而对外作功，所以除升高气体的温度需要热量外，还需要有一部分热量来补偿气体对外所作的功，所以气体的定压摩尔热容量总比定容摩尔热容量大。

(2) 固体和液体在不发生物态变化的情况下，外界供给的热量主要用来改变温度，而自身的体积变化很小，所以它们的定压摩尔热容量和定容摩尔热容量差别也很小，在一般计算中，不必加以区别。

(3) 理想气体的定压摩尔热容量比定容摩尔热容量大一个恒量 R ， R 为气体常数（参见理想气体状态方程），即 $C_p = C_v + R$ 。

(4) 理想气体的定容摩尔热容量 $C_v = \frac{i}{2}R$ ，因而它的定压摩尔

$$\text{热容量 } C_p = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R。$$

(5) 实际应用中常用到 C_p 和 C_v 的比值（叫做热容比），即

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}。$$

$$\text{理想气体的热容比 } \gamma = \frac{i+2}{i}。$$

绝热过程

指系统状态改变过程中，不从外界吸收热量，也不放出热量。

说明：

(1) 理想气体可逆绝热过程的特征是体积的 γ 次方（绝热指数）和压强的乘积为一定值。

(2) 蒸汽在汽轮机内膨胀做功的过程和空气的升降过程可近似看作绝热过程。

内能

宏观静止的物体（热力学系统）内部分子热运动的各种形式的动能（平动动能、转动动能和振动动能）以及分子间势能的总和。

内能是热力学系统的状态函数。

说明：

(1) 从 1840~1879 年, 焦耳进行的大量实验中, 系统平衡态的改变 (如水的温度改变) 都只靠机械功或电功来完成的。

焦耳实验令人信服地指出, 当系统 (如水) 的状态从平衡态 1 (其温度为 T_1) 改变到平衡态 2 (温度为 T_2) 时, 在各种不同的绝热过程 (参见绝热过程) 中, 实验测得的功的数值都相同。因而可以看到任何一个系统在平衡态都有一个状态函数 (即平衡态参量的函数), 叫做系统的内能, 以 U 表示; 当系统从平衡态 1 到平衡态 2 的任一绝热过程中, 内能的增加量 $U_2 - U_1$ 等于外界对系统所作的功 W , 即

$$U_2 - U_1 = W。$$

U_1 表示系统在平衡态 1 的内能, U_2 表示系统在平衡态 2 的内能。

(2) 根据系统从一个平衡态过渡到另一个平衡态时所消耗的绝热功, 可以确定两态的内能差。实际应用中关心的只是两态间的内能差。

(3) 从微观的结构看来, 宏观静止的热力学系统中的内能包括分子热运动的动能, 分子间的相互作用能, 分子、原子内的能量, 原子核内的能量等等。此外, 若是带电粒子系统, 则还应包括相应的电磁形式能量。当然, 在系统经历一个热力学过程时, 并非所有这些能量都发生变化。通常只需考虑发生变化的那些能量, 并由此计算两个平衡态的内能差。

(4) 公式 $U_2 - U_1 = W$ 并不能完全确定系统的内能, 内能函数中还包含一个任意的相加常数。这个常数是某一被选定为参考态的内能, 其值可以任意选定或规定为零。这种情况与力学中考虑重力场中物体重力势能差时, 对参考点的重力势能数值的选定相类似。

分子力

指分子和分子间的距离十分接近时所显示的相互作用力。分子间同时存在着引力和斥力的作用, 而引力和斥力的大小是随分子间的距离变化而变化的。在某一瞬时, 分子间究竟表现为斥力还是引力, 取决于它们的合力, 这个合力就是分子力。

说明:

(1) 许多实验事实都揭示了分子间有相互作用力。

在一定温度下气体可以凝聚成液体和固体的事实, 说明分子间有吸引力。液体和固体难以压缩的事实, 说明当分子靠得很近时, 分子间可产生排斥力, 以阻止它们进一步靠拢。

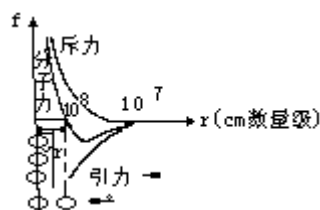
(2) 分子之间的相互作用力主要起源于电磁力。所有分子都由原子核和电子组成。原子核带正电，电子带负电。分子内的原子核和电子都在不停地运动。分子中所有电子的总荷电量与原子核的荷电量大小相等而符号相反，这些分子都处于电中性状态。

当两个分子相互靠近时，每个分子上的电荷就受到扰动而稍微离开它们的正常位置，两个分子中异号电荷之间的平均距离就小于同号电荷之间的平均距离，因此产生分子之间的吸引力。分子内部电荷的这种重新排列，只有在分子靠得相当近的时候才会发生。所以这些分子力只在短距离内起作用，它们是短程力。作用力程大约为 10^{-9} 米。如果两个分子进一步靠近，以致它们的外层同号电荷开始重叠起来，这时分子间的作用力就变成排斥力。

(3) 分子力表现为引力还是斥力跟分子间的距离有关。从下图可以看出，当 $r=r_0$ 时，引力和斥力的作用抵消，分子力等于零，分子处于平衡状态。分子处于平衡状态时的距离 (r_0) 就叫做平衡距离。不同物质的 r_0 略有不同，一般都在 10^{-10} m 的数量级。

在 $r>r_0$ (从 10^{-10} m 到 10^{-9} m 之间) 时，两分子间的斥力和引力的平衡遭到破坏，它们都随着距离的增大而减小，但斥力减少得更快，合力表现为引力。

当分子间距离超过 10^{-9} m 时，分子间的作用力变得十分微弱，这时可以认为分子间已没有相互作用力。



当 $r<r_0$ (在 10^{-10} m 和分子的有效直径 σ 之间) 时，两分子间的斥力和引力都随着距离的缩小迅速增大，但斥力比引力增长更快，合力表现为斥力。当 $r=\sigma$ 时，两分子已“相碰”。分子的有效直径 σ 一般和 r_0 同数量级，当然， σ 总小于 r_0 。

(4) 对构成物体的大量分子中的每个分子来说，以这个分子为中心，以 10^{-9} m 为半径作一球面，只有处在球面内的其他分子对于它才有作用力。这个球形范围，叫做分子力的作用球，球的半径为分子力的作用半径。

气体动理论

研究热现象本质的学说。

说明：

(1) 气体动理论的内容包括：宏观气体或液体是由大量的微粒（分子或原子）组成；气体或液体内的分子都在不停地运动着，这种运动是杂乱的，分子杂乱运动的剧烈程度和气体或液体的温度有关；分子之间存在着相互作用的引力和斥力。

(2) 按照气体动理论，热现象是大量分子无规则运动的表现，温度表示大量分子无规则运动的激烈程度，内能是大量做无规则运动的分子具有的能，热量是系统内能变化的量度。

布朗运动

指悬浮在液体或气体中的微粒作永不停息的杂乱运动。

说明：

(1) 分子在气体中的运动不能直接观察，但可以通过实验间接推测，布朗运动就是这类实验中的一个。

(2) 布朗运动，从显微镜中可以观察到这些颗粒都在不停地作杂乱运动。如果把视线集中在某一颗粒上，就可以看到这个颗粒在作短促的杂乱跳跃，方向不断改变。

(3) 悬浮颗粒作杂乱运动的原因：液体内的分子不停地作杂乱的运动，分子不断地从四面八方撞击悬浮颗粒。由于在任一瞬间，分子从各个方向对颗粒的撞击力是互不平衡的，颗粒总是向着撞击作用较弱的那个方向运动。如果撞击力不断改变方向和大小，颗粒的运动方向也随之不断改变。由小颗粒作杂乱的布朗运动，反映了液体内部分子在不断地作杂乱运动。

(4) 通常在液体中，每个微小颗粒受周围分子的碰撞，每秒约有 10^{21} 次。在空气中，虽然气体分子的密度较小，但每秒碰撞的次数至少也有 10^{15} 次。在这么频繁的碰撞下，所观察到的只是小颗粒的一种平均运动。

(5) 实验结果表明，微小颗粒作布朗运动的剧烈程度与温度的高低有密切关系。随着温度的升高，悬浮颗粒的运动加剧，实质是分子的杂乱运动变得剧烈。

固体的线膨胀

在温度变化不太大时，固体在某一方向上的伸长量随温度的增加而增长的现象。

说明：

线膨胀遵循的规律：

$$l_t = l_0 (1 + \alpha_l t),$$

式中 α_l 为线膨胀系数，它的单位是 1/度。一般金属的线胀系数为 10^{-5} /度左右。

固体的面膨胀

在温度变化不太大时，固体的表面积随温度的增加而增大的现象。

说明：

面膨胀遵循的规律：

$$S_t = S_0 (1 + \alpha_s t),$$

式中 α_s 为面膨胀系数，它的单位是 1/度，其量值 $\alpha_s \approx 2\alpha_l$ 。

固体的体膨胀

在温度变化不太大时，固体的体积随温度的增加而增大的现象。

说明：

体膨胀遵循的规律：

$$V_t = V_0 (1 + \alpha_v t),$$

式中 α_v 为体膨胀系数，它的单位是 1/度，其量值 $\alpha_v \approx 3\alpha_l$ 。

热膨胀

温度改变时，物体（热力学系统）发生的胀缩现象。

说明：

(1) 固体、液体和气体的热膨胀各不相同，固体膨胀最不明显，液体其次，而气体最显著。

(2) 液体没有一定的形状，只有一定的体积。对于液体来说，有意义的只是体膨胀，它遵循 $V_t = V_0 (1 + \beta t)$ 的规律，式中 β 是液体的体膨胀系数，一般液体的体膨胀系数比固体大得多。

(3) 气体的热膨胀规律比较复杂。当一定质量气体的体积随温度上升而发生变化时，它的压强也将发生变化。实验发现，一定质量的气体当它的压强保持不变时，它遵循 $V_t = V_0 (1 + \gamma t)$ 规律，式中 γ 是气体的体膨胀系数。一切气体的体膨胀系数都近似相等， $\gamma = 1/273 \text{ 度}^{-1}$ 。

(4) 绝大多数物质，在温度升高时，体积增大，但也有少数物质，在某一温度范围内，温度升高时，它们的长度和体积反而缩小，也就是它们的线膨胀系数和体膨胀系数都为负值。这种现象叫做反常膨胀。例如，锑、铋、铸铁都有反常膨胀现象。又如水在 4°C 时密度最大，在 4°C 以上遵循热胀冷缩规律，从 4°C 降低到 0°C 的范围出现“冷胀”的反常膨胀现象。冬天， 0°C 的水浮于表面凝结成冰就是这个原因。

热传递

热力学系统的热量转移过程。它通过热传导、对流和热辐射三种方式来实现。

说明：

在实际的物体传热过程中，热传递的三种方式（热传导、对流和热辐射）往往是伴随着进行的。

热传导

当热力学系统里各处的温度不均匀时，热量从温度高处传递到温度低处的现象。

说明：

(1) 热传导是固体热传递的主要方式。

(2) 各种物质的热传导性能不同。一般金属都是热的良导体。玻璃、木材、棉毛制品、羽毛、毛皮以及液体和气体都是热的不良导体。石棉的热传导性能极差，常用作绝热材料。

对流

流体（气体或液体）中较热部分和较冷部分之间通过流体循环流动使温度趋于均匀的过程。

说明：

（1）对流通常是流体（气体或液体）热传递的主要方式，气体的对流现象比液体明显。

（2）对流可分成自然对流和强迫对流两种。由于温度不均匀而引起的自然发生的对流叫做自然对流。由于外界的影响，如对流体搅拌而形成的对流叫做强迫对流。

（3）在气体或液体中，热传导过程往往和对流同时发生。

热辐射

物体因自身的温度，不断以电磁波的形式向外发射能量的现象。

说明：

（1）物体的温度愈高，辐射愈强。辐射的电磁波波长分布情况也随温度而变。温度较低时，主要以不可见的红外光进行辐射，在 500℃ 以至更高温度时，则顺次以可见光至紫外光辐射为主。

（2）热辐射虽然也是热传递的一种方式，但它和热传导、对流不同。它不依靠媒质把热能直接从一个系统传给另一个系统。热辐射是远距离传热的主要方式，如太阳的热能就是以热辐射的形式，经过宇宙空间传给地球的。

晶体

内部原子（或分子、离子、原子集团）有规则地呈周期排列的固体。

说明：

（1）晶体中粒子（原子、分子、离子或原子集团）是有规则地排列着的。如果用点表示粒子（原子、分子、离子或原子集团）的质心，则这些点在空间的排列具有周期性。

（2）表示晶体粒子质心所在位置的点叫做结点，结点的总体叫做空间点阵。

(3) 凡是晶体都具有规则的几何形状。例如，食盐晶体是立方体，冰雪晶体为六角形。岩盐、云母、明矾、水晶、冰、金属等都是晶体。

(4) 具有一定的熔点是一切晶体的宏观特性。在一定的压强下，对晶体加热，在晶体还未开始熔解时，它的温度逐渐升高。升到熔解温度（熔点）时，晶体开始熔解。从这时开始，直到晶体全部熔为液体这段时间里，固态与液态共存，即使继续加热，温度仍保持不变。当晶体全部熔成液体后，再继续加热，液体温度才会升高。

(5) 晶体的一个基本特性是各向异性，即在各个不同的方向上具有不同的物理性质，如力学性质（硬度、弹性模量等），热学性质（热膨胀系数、导热系数等），电学性质（介电常数、电阻率等），光学性质（吸收系数、折射率）。

(6) 显露在晶体外表的晶面往往容易劈开。例如，云母的结晶薄片，在外力作用下很容易沿平行于薄片的平面劈开。要使云母在薄片上裂开则要困难得多。由此说明晶体在不同方向上具有不同的力学性质。

非晶体

内部粒子（原子、分子、离子或原子集团）没有规则排列的固体。

说明：

(1) 固体可以分成晶体和非晶体两大类。例如玻璃、松脂、沥青、橡胶、塑料和人造丝都是非晶体。

(2) 非晶体没有一定的外形。

(3) 非晶体没有一定的熔点。这是非晶体和晶体的主要区别。非晶体在熔解过程中，随着温度的升高，它首先变软，然后逐渐由稠变稀。例如，在吹制玻璃器皿时，将玻璃放在火焰上加热，玻璃并不立刻熔成液体，而是首先变软。利用这种特性，可把玻璃制成所需要的形状。

单晶体

具有规则外形的单个大晶体。

说明：

(1) 一些天然晶体，例如氯化钠、石英、方解石等都具有规则的外形，这一特性可用来作为鉴别矿物的重要方法。

(2) 单晶体的外形是由若干个面围成的凸多面体，这些面叫做晶面。

多晶体

由许多单晶体微粒（晶粒）构成的晶体。

说明：

(1) 每一晶粒内部是各向异性的，但由于晶粒在空间方位上的排列是杂乱的，所以多晶体的物理性质表现出各向同性。例如明矾和金属是多晶体，它们没有规则的几何外形，物理性质各向同性。

(2) 多晶体具有一定的熔点。

熔解

物体（热力学系统）从固态转变为液态的过程。晶体物质熔解时，固态和液态可以平衡共存的温度叫做熔点。

说明：

(1) 用气体动理论的观点分析，晶体的熔解过程可以分成三个阶段：

第一阶段（熔解开始前）：从热源获得的热量，主要用来增加分子的平均动能，因而物体的温度升高。当它的温度升高到一定值时，分子的动能足以破坏晶体的结构，晶体开始熔解，这时的温度叫做熔点。

第二阶段（熔解过程）：在熔解过程中，热量消耗在破坏晶体的结构上，仅仅使分子势能发生变化，分子的平均动能没有改变。所以在熔解过程中，晶体的温度保持不变。

第三阶段（熔解終了后）：此时晶体的结构已完全破坏，也就是晶体由固态已完全转变成液态。当热源再继续供给热量时，液体吸收的热量使分子的动能增大，温度继续升高。

(2) 非晶体的结构和液体很相似，可以把非晶体看成粘滞性很大的液体。由于它的分子排列是杂乱的，热源传递给它的热量主要是使分子的平均动能增大。因此，非晶体在熔解过程中，它的温度是逐步上升的。

(3) 在熔解时体积的变化情况对熔点随压强的变化有密切关系。大多数物体在熔解时体积增大，熔点随压强的增加而升高。反常的情况是熔解时体积减小，

冰熔解为水时的情况就如此，此时熔点随压强的增加而降低。通常列出的物质熔点表是指 1 个大气压下的熔点。

(4) 晶体中若含有杂质，则熔点降低。

(5) 合金的熔点一般低于各成分的熔点。

凝固

物体（热力学系统）从液态转变为固态的过程。凝固点是液态物质凝固时，液态和固态可以平衡共存的温度。

说明：

(1) 同种晶体在某一压强下的熔点也就是它的凝固点。凝固点或熔点的大小与物质的种类和它所受的压强有关。

(2) 非晶体没有凝固点。它们在熔解或凝固时和晶体完全不同：熔解是一种“软化过程”，随着温度升高，非晶体逐渐软化，其流动性越来越大，最后变成液体。凝固则是相反的过程。

结晶

溶液中生长晶体的过程。

说明：

(1) 结晶过程是无规则排列的原子形成空间点阵的过程。

(2) 结晶时，总是先有少数原子按一定规律排列起来，形成晶核。然后再围绕晶核生长成为晶粒。

熔解热

单位质量的晶体，在熔点时，从固态完全熔解成同温度的液态时所需要的热量，又叫做熔解潜热。

说明：

(1) 1 摩尔的晶体，在熔点时，从固态完全熔解成同温度的液态时，所需要的热量，叫做该晶体的摩尔熔解热。

(2) 单位质量的晶体物质在凝固点从液态转变为固态时所放出的热量叫做凝固热。由于同一晶体的熔解热和凝固热相等，所以统一用熔解热这一名词来表示。

汽化

物体（热力学系统）从液态转化为气态的过程。

说明：

(1) 汽化有蒸发和沸腾两种形式。

(2) 汽化时需要吸收热量。

液化

物体（热力学系统）从气态转化为液态的过程。

说明：

(1) 液化时物质放出热量。

(2) 临界温度以下的气体，都可以液化。可通过加压或冷却，或加压和冷却并用的方法来实现液化。

蒸发

发生在液体表面的汽化过程。它可以在任何温度下进行。

说明：

(1) 用气体动理论对蒸发现象可作如下解释：液体内分子以不同的速度运动着。当处在液面的某些分子的动能，大于飞出时克服液体内分子间引力所需的功时，这些分子就能脱离液面向外飞出。这些分子和其他分子碰撞后，有可能再回到液面上或进入液体内部。如果飞出的分子大于飞回的，液体就在蒸发。

(2) 在蒸发过程中，比平均动能大的分子飞出液面后，如果不给液体补充能量，液体的温度将下降。

(3) 不同液体蒸发的快慢是不同的。

(4) 对于敞开的容器中的液体来说，液体蒸发的快慢与表面的大小，温度的高低，压强的大小和通风条件都有密切关系。液面敞开时，由于蒸汽分子向远处扩散，返回液体的分子数总是小于跑出液面的分子数，液体不断蒸发，直到液体全部转化为蒸汽时，蒸发过程才结束。

(5) 在密闭容器内，随着蒸发过程的进行，容器内蒸汽密度不断增大，返回液体的分子也随着增多，直到单位时间内跑出液体的分子数等于返回液体的分子数时，蒸发现象在宏观上停止了。这种与液体保持动态平衡的蒸汽叫做饱和蒸汽（参见饱和蒸汽压），它的压强叫做饱和蒸汽压。

沸腾

在液体表面和内部同时发生的汽化过程。在一定的外界压强下，沸腾只能在某一特定温度（沸点）下进行。

说明：

(1) 液体在沸腾时，温度保持不变。液体所受外部压强增大时，它的沸点升高；反之，沸点降低。

(2) 在相同压强下，不同液体的沸点不同。

(3) 用气体动理论对沸腾过程可作如下解释：沸腾可分两个阶段来分析。我们以放在玻璃瓶里的水的加热过程进行讨论。

第一阶段（沸腾前）：把水放在玻璃瓶里，对瓶底加热，由于水中溶有空气，在加热时瓶底出现小气泡，气泡里含有空气和水汽。气泡内部的水汽，由于液体的不断蒸发，总是处在饱和状态。继续加热，气泡受热膨胀，泡内的空气密度减小。在浮力的作用下，气泡脱离瓶底而上升。当气泡上升到比较冷的水的上层，由于泡内的饱和汽压小于外部压强，气泡又逐渐变小，里面的饱和汽逐渐凝结成液体，最后只剩下空气和少量的水汽跑出液面。

第二阶段（沸腾时）：随着温度的升高，气泡内的饱和汽压增大到外部压强时，气泡不再变小，而这时气泡周围的液体迅速向气泡内蒸发，气泡将继续增大，从液面冒出，形成沸腾现象。

(4) 蒸发与沸腾虽然都是液体通过气液界面的汽化过程，但在沸腾时，液体内部涌现大量的小气泡，增加了气液界面，加快了汽化的速度。

(5) 蒸发和沸腾从宏观角度看是有区别的。蒸发只在液体表面发生，而沸腾却在液体表面和内部同时发生；蒸发可以在任何温度下进行，而沸腾只能在沸点时发生。

汽化热

单位质量的液体在温度保持不变的情况下，转化为气体时所需要的热量，又叫做汽化潜热。

说明：

(1) 1 摩尔的液体在温度保持不变的情况下，转化为气体时所需要的热量，叫做这种物质的摩尔汽化热。

(2) 单位质量的气态物质在温度保持不变的情况下，转化为液态时所放出的热量叫做凝结热。在相同的热学条件下，同种气体的汽化热和凝结热相等，所以统一用汽化热这一名词来表示。

(3) 同种液体在不同温度时汽化热是不同的，温度升高，汽化热减小。这是由于同种液体分子间的引力大小相同，温度较高的液体分子的平均动能较大，只需供给它较少的热量就足以使这些分子克服周围分子的引力而飞出液面。

(4) 不同液体的汽化热是不同的，这是因为各种液体分子间的引力大小不同，克服不同分子力作的功也不同。

热平衡方程

考虑绝热系统内有几种温度不同的物体，原来温度不同的物体通过热传递（热交换）而达到温度相同。高温物体放出的热量 $Q_{\text{放}}$ 等于低温物体吸收的热量 $Q_{\text{吸}}$ ，即

$$Q_{\text{放}}=Q_{\text{吸}}。$$

这个式子称作热平衡方程，或叫做热交换定律。

说明：

(1) 热平衡方程是量热学中的一个基本定律。方程只适用于绝热系统（和外界不发生热交换的系统）内的热交换过程，也就是说必须满足下述两个条件：整个热交换过程无热转变为功和功转变为热的问题；整个热交换过程无热量损失。

(2) 在分析热交换的过程中可能出现的几种情况，按放热和吸热两类列表如下：

放热($Q_{放}$)	吸热($Q_{吸}$)
物体由于温度降低而放热	物体由于温度升高而吸热
$Q_{放}=c \cdot m \cdot \Delta t$	$Q_{吸}=c \cdot m \cdot \Delta t$
物体在凝固过程中放热	物体在熔解过程中吸热
$Q_{放}=L_f \cdot m$	$Q_{吸}=L_f \cdot m$
物体在液化过程中放热	物体在汽化过程中吸热
$Q_{放}=L_v \cdot m$	$Q_{吸}=L_v \cdot m$
燃料燃烧时放热	
$Q_{放}=qm$	

表中 m 为物体的质量， c 为比热， Δt 温度差， L_f 为熔解热， L_v 为汽化热和 q 为燃料燃烧值。

饱和汽

单位时间内跑出液体的分子数等于单位时间内返回液体的分子数时，这种与液体保持动态平衡的蒸汽叫做饱和蒸汽（饱和汽）。

说明：

(1) 在密闭容器内，随着蒸发过程的进行，容器内蒸汽的密度不断增大，返回液体的分子数也不断增多，当单位时间内从液体里逸出的分子数和返回液体的分子数相等时，液面上方汽的密度不再变化。但是，由液体里逸出和由汽返回液体里的分子的运动仍然在不断地进行，只是汽和液体间达到了动态平衡。

(2) 在一定温度下，单位时间内返回液体的分子数，只决定于蒸汽的密度，因此，当两相达到平衡时，蒸汽的密度具有恒定的值，这就使得饱和蒸汽压（饱和汽的压强）与蒸汽所占的体积无关，也和该体积中是否有其他气体没有关系。

(3) 如果温度不变，容器内饱和汽的密度就保持不变。这时如果增大饱和汽的体积，汽的密度一定减小，饱和汽成了未饱和汽，容器内的液体又开始蒸发直到汽达到饱和，汽的密度又恢复原状。反之，如果减小饱和汽的体积，汽的密度一定随着增大，要恢复原状，就有一部分饱和汽转化为液体。总之，有液体存在时，只要液体和汽的温度保持不变，无论饱和汽的体积增加或减少，饱和汽的压强并不改变。也就是说，一定液体的饱和汽压的大小只和它的温度有关，和它的体积无关。饱和汽与一般的气体性质不同，它的压强、体积和温度的相互关系并不遵循理想气体三条实验定律。

过饱和蒸汽

在一定温度下，超过饱和蒸汽应有的密度而仍不液化或凝华的蒸汽（参见凝华）。

说明：

（1）过饱和蒸汽的密度对应于较高温度时的饱和蒸汽的密度，而前者的温度低于后者的温度，所以过饱和蒸汽也叫做“过冷蒸汽”。

（2）处于过饱和状态的过饱和蒸汽并不稳定，如果受到扰动或出现蒸汽凝结时的依附物，如尘埃、带电粒子，就会部分液化或凝华而回到饱和状态。

（3）自然界出现过冷蒸汽的现象是经常能见到的。高空中的水蒸气有时处于过冷状态而并不凝聚成云。喷气式飞机飞过时，喷出的微粒提供了凝聚的条件，于是在晴空中拖出长长的云带。

云室

根据蒸汽的凝结理论和过饱和现象而制成的仪器。

说明：

（1）威尔逊于1912年根据过冷蒸汽是一种不稳定状态（亚稳态）的性质制成云室。它的原理是在云室内制成过饱和蒸汽。当放射性物质发射的高能带电粒子经过时，蒸汽分子发生电离，过饱和蒸汽以这些离子为凝结中心而凝结成液滴。在云室中这些液滴就形成一条很窄的云带。用强光从侧面照射，就可以直接看到这种径迹。

（2）云室可用来探测微观粒子的运动径迹。

未饱和汽

还没有达到饱和程度的蒸汽叫做未饱和蒸汽，简称未饱和汽。

说明：

（1）液体在汽化时，它的分子不断从液体中飞出，形成蒸汽，但由于分子的热运动，也有些分子要从蒸汽中返回液体。在一定的温度下，如果单位时间内

返回液体的分子数小于飞出的分子数，蒸汽的密度还可以继续增加，在宏观上表现出蒸发继续进行，这时的蒸汽就是未饱和汽。

(2) 未饱和汽与一般气体一样，近似地遵循气体的三个实验定律。

(3) 未饱和汽变成饱和汽有两种方法：增加压强（或减小体积）；降低温度。增加压强使汽的密度增加，从而增加单位时间内返回液体的分子数。降低温度可以降低液体分子的平均动能，从而减少单位时间内飞出液体的分子数。因此，不论用上述那种方法，都可能使液体和蒸汽达到动态平衡，使它变成饱和汽。

反之，把饱和汽变成未饱和汽也有两种方法：降低压强（或增大体积）；升高温度。

绝对湿度

空气中所含水蒸气的压强或单位体积空气中所含水蒸气的质量。

说明：

(1) 根据空气的绝对湿度的两种定义，它们的单位分别用毫米水银柱高和1立方米空气中所含水蒸气的克数来表示。

(2) 空气的干湿程度和单位体积的空气里所含水蒸气的量有关。当温度一定时，一定体积的空气中，水蒸气密度愈大，蒸汽压也愈大，所以通常采用空气里所含水蒸气的压强来表示绝对湿度。

(3) 湿度是表示空气里干湿程度的物理量。除了绝对湿度外，空气的湿度还有多种表示方法，如相对湿度和露点。

相对湿度

空气中所含水蒸气密度和同温度下饱和水蒸气密度的百分比值。

说明：

(1) 相对湿度表示空气中的水蒸气离开饱和的程度。

(2) 在温度相同时，水蒸气的密度和压强成正比。由此，空气的相对湿度也可定义成：在某一温度时，空气的绝对湿度（即实际水蒸气压强）跟在同一温度下的饱和水蒸气压强的百分比值。

露点

空气里所含的实际（未饱和）水蒸气的压强等于某饱和汽压强时的温度。

说明：

（1）人们常常通过测定露点来确定空气的绝对湿度和相对湿度，所以露点也是空气湿度的一种表示方式。

（2）气温和露点接近，此时的相对湿度百分比值大，人们感觉气候潮湿；气温和露点差值大，此时的相对湿度百分比值小，人们感觉干燥。人体感到适中的相对湿度是 60~70%。

（3）露点的测定，对农业生产尤显重要。由于空气的温度下降到露点时，空气中的水蒸气就凝结成露。如果露点在 0℃ 以下，那么气温下降到露点时，水蒸气就凝结成霜。知道了露点，可以预报是否发生霜冻。

临界状态

物质的饱和汽的密度等于它的液体的密度时，物质所处的状态。

说明：

（1）在临界状态，液体具有最大的比容。

物质必须在一定的温度和压强下才能达到临界状态，临界状态的体积称作临界体积，因而一定质量液体的体积，最大不能超过临界体积。

（2）物质在临界状态的压强叫做临界压强，临界压强是饱和蒸汽压的最高限度。

（3）在临界状态，液体及其饱和蒸汽间的一切差别都消失（如汽化热等于零），气、液之间的分界面也不存在。

临界温度

物质处于临界状态的温度。

说明：

（1）每种物质的临界状态都是确定的，包括临界温度，临界压强和临界比容。不同物质的临界温度是不同的。

(2) 在临界温度以上，无论怎样增大压强，气体物质均不会液化。

(3) 在一个玻璃管内封入适量的液态乙醚，加热使其温度升高，当达到临界温度时，液面就消失了。需要指出的是，从实验中观察到的现象不是液面逐渐下降，液态乙醚逐渐汽化，以至最后全部汽化，而是当液面还很高时，液面就逐渐模糊进而消失。这是因为在临界状态，液体与饱和蒸汽的比容相等，两者之间的一切差别都消失。

(4) 可以把临界温度以上的气态物质叫做气体，而把临界温度以下的气态物质叫做汽。

升华

固态物质不经过液态阶段，直接蒸发变成气态的过程。

单位质量的固态物质升华时所吸收的热量叫做升华热。

说明：

(1) 在压强比三相点压强低时，加热固体，就能使固体直接转变成气体。

(2) 升华时分子直接由固体点阵粒子转变成气体分子，一方面要克服粒子间的结合引力做功，另一方面还要克服外界的压强做功。升华热等于熔解热与汽化热之和。

(3) 在升华情况下，和固体平衡的蒸汽压强即为固体上方的饱和蒸汽压。

(4) 升华时需要吸收大量热量，因此升华可用来致冷。干冰的熔点为 -78°C ，它是一种在食品工业和科学研究中广泛使用的致冷剂。

凝华

气态物质（蒸汽）不经过液态阶段而直接凝结成固态的过程。

单位质量的气态物质凝华时所放出的热量叫做凝华热。

说明：

(1) 在相同的热学状态下，同种物质的升华热等于凝华热。

(2) 人工降雨的一种方法是在不降水的冷云中撒布干冰。实际过程是，干冰一进入云体，很快升华，升华时吸收大量的热，使周围空气的温度急剧下降，

从而使云中的水汽凝华成冰晶。当冰晶增大到一定大小后下降，接近地层时遇到较暖的空气层后，便化成雨降落到地面。

燃料燃烧值

单位质量的燃料完全燃烧所放出的热量。

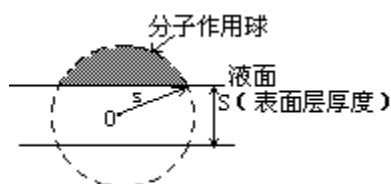
说明：

在国际单位制中，燃烧值的单位是焦耳/千克。常用的单位还有卡/克，千卡/千克。

表面张力

液体与气体相接触处的表面，犹如一紧张的有弹性的薄膜，有收缩的趋势。若在液体表面上想象画一根线，则该线两侧的液面相互存在着拉力的作用。这个位于液面内、处处与此线垂直的拉力称为表面张力。

说明：



(1) 从分子的角度看，液体的表面并不是一个几何面，而是有一定厚度的薄层，它的厚度等于分子引力的有效作用距离 s (s 为分子作用球半径)。薄层中的分子与液体内部分子相比，缺少了一些能吸引它的分子（右图斜线部分）。因此，由引力所引起的负势能少了一些，也就是说，与液体内部分子相比，分子的势能高了一些。如果液体的表面增大时，表面层的势能就要增大。由于势能总有减少的倾向，表面就有收缩的趋势，这反映表面层存在如上图所示的表面张力。

(2) 从分子间相互作用力的角度来看，液体内部的分子虽然受到周围分子的作用力，但由于周围分子的分布是对称的，这些作用力是各向同性的，其合力为零。由上图所示，表面层中的分子缺少了画斜线部分分子的引力，于是表面层中分子受到的力各向异性，这些力的合力不能相互抵消，这就形成了表面张力。

润湿现象

液体和固体接触时，它们的接触面趋于扩大，且相互附着的现象。

说明：

(1) 不同种分子间的相互吸引力叫做附着力，同种分子间的相互吸引力叫做内聚力。润湿现象是由固、液分子间的相互吸引力（附着力）大于液、液分子间的相互吸引力（内聚力）决定的。

(2) 在附着力大于内聚力的情况下，分子受到的合力垂直于附着层指向固体。这时，分子在附着层内比在液体内部具有的势能小，液体分子要尽量挤入附着层，结果使附着层扩展。

不润湿现象

液体和固体接触时，它们的接触面趋于缩小，且相互不能附着的现象。

说明：

(1) 润湿和不润湿现象是液体和固体接触处的表面现象。

(2) 不润湿现象是由固、液分子间的相互吸引力（附着力）小于液、液分子间的相互吸引力（内聚力）决定的。

(3) 在内聚力大于附着力的情况下，分子受到的合力垂直于附着层指向液体内部。这时，要将一个分子从液体内部移到附着层，必须反抗合力做功，结果使附着层中势能增大。由于势能总有减小的倾向，附着层就有缩小的趋势，液体不能润湿固体。

(4) 液体能不能润湿固体，决定于它们两者的性质，而不单纯由液体单方面的性质决定。同一种液体，对不同的固体，可能是润湿的，也可能是不润湿的。

(5) 润湿和不润湿现象在工业上有重要应用。例如，根据矿粒子与某种液体不润湿，而砂石与该种液体润湿的性质，利用浮洗法可将矿粒与砂石分离开。具体过程：在浮洗矿石时，把矿物细末与一定的液体混成泥浆。然后加一定量的酸使之与砂石反应生成气泡。再利用矿粒与液体不润湿，矿粒与气泡相接触时，就粘附在气泡上而被气泡带到表面。砂石因与液体润湿仍留在槽底。这样就把矿粒与砂石分离开。

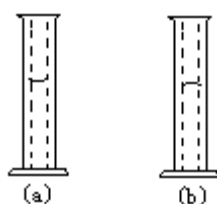
毛细现象

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。

说明：

(1) 把细玻璃管插入水中，由于水能润湿玻璃，水接触玻璃的表面层（附着层）的面积有扩大趋势，于是靠近玻璃壁处的水面呈向上弯的形状。把水装在玻璃管内，靠近玻璃壁处的液面也呈上弯的形状，如图（a）所示。

把细玻璃管插入水银，由于水银不润湿玻璃，水银接触玻璃的表面层（附着层）的面积有缩小趋势，于是靠近玻璃壁处的水银面呈向下弯的形状。把水银装在玻璃管内，靠近玻璃壁处的液面也呈下弯的形状，如图（b）所示。

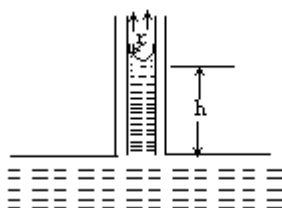


(2) 如下页图所示，毛细管的半径是 r ，液体（水）的表面张力系数为 α ，玻璃壁作用于液面的力为 $2\pi r\alpha$ 。

液面上升的高度为 h 。如果液体的密度为 ρ ，则液柱的重（竖直向下的重力）为 $\pi r^2 h \rho g$ ，这里 g 为重力加速度。

根据两力平衡，得 $2\pi r\alpha = \pi r^2 h \rho g$ ，由此可得毛细管中液面上升的高度

$$h = \frac{2\alpha}{r\rho g}。$$



不润湿情况，液体下降，下降的高度可按类似方法计算。

(3) 日常生活中见到的毛巾或纸张吸水，地下水沿土壤上升等现象都是毛细现象。天气干旱时，播种后常常把地面压紧，使土壤颗粒构成很好的毛细管，水分便沿管上升到地面，从而浸润种子。冬天把土地耕松，主要目的之一就是破坏土壤的毛细管，水分就不易上升至地面，以减小蒸发。

热力学第零定律

若两个热力学系统中的每一个都和第三个热力学系统处于热平衡，则它们彼此也必定处于热平衡。

说明：

(1) 热力学第零定律为建立温度概念提供了实验基础。它反映处在同一热平衡状态的所有热力学系统都具有共同的宏观特征。定义这个决定系统热平衡的宏观性质为温度。

(2) 一切互为热平衡的物体都具有相同的温度，这是用温度计测量温度的依据。测量时使温度计与待测系统接触，经过一段时间，当它们达到热平衡后，温度计的温度就等于待测系统的温度。

(3) 热力学第零定律表明制造温度计是可能的。

热力学第一定律

自然界一切物质都具有能量，能量有各种不同的形式，能够从一种形式转化为另一种形式，从一个物体传递给另一个物体，在转化和传递中能量的数量保持不变，也叫做能量守恒定律。

说明：

(1) 在系统状态变化过程中，它的能量（内能）的增加等于在这个过程中外界对系统所做的功和外界传递给系统的热量的总和。这是热力学第一定律的一种表述方法，用数学公式可表示为

$$\Delta U = Q + W,$$

式中 ΔU 为正值时，表示系统的内能增加； Q 为正值时，表示外界对系统传热； W 为正值时，表示外界对系统做功。

(2) 外界传递给系统的热量等于系统内能的增加和系统对外界所作的功的总和。这是热力学第一定律的另一种表示方法，用数学公式可表示为

$$Q = \Delta U + A,$$

式中 ΔU 与 Q 的意义与(1)中相同；但 A 为正值时，表示系统对外界做功。于是 A 的正、负与 W 恰好相反，即 $A = -W$ 。

(3) 在绝热过程中 $Q=0$, 于是 $\Delta U=W$ 。这就是说, 系统内能的增加 ΔU 等于外界对系统作的功 W (绝热功)。

在非绝热过程中, 系统内能的增加 ΔU 与外界对系统作的绝热功 W 的差值异于零。根据热力学第一定律 $\Delta U-W=Q$, Q 称作热量, 这给热量 Q 下了一个完全与热质说无关的科学定义。

(4) 热力学第一定律说明能量是守恒的, 永动机永远不可能制造成功。

热机的效率

转变为有用的机械功的热量跟燃料燃烧时放出的热量的比值。

说明:

(1) 凡是能够利用燃料燃烧时放出的能量来做机械功的机器叫做热机。

(2) 热机在工作过程中, 发热器 (高温热源) 里的燃料燃烧时放出的热量只有一部分被工作物质 (工质) 所吸收。燃料的燃烧效率

$$\eta_c = \frac{\text{工质从发热器得到的热量 } Q_1}{\text{燃料燃烧时放出的热量 } Q}。$$

热机的工作物质从发热器所得到的那部分热量 Q_1 也有一部分转变为机械功, 其余部分热量 Q_2 随工作物质排出, 传给冷凝器 (低温热源)。热机的热效率

$$\eta_t = \frac{\text{转变为机械功的热量 } (Q_1 - Q_2)}{\text{工质从发热器得到的热量 } Q_1}。$$

热机的机械效率 η_m 是指推动机轴做功的热量 Q_3 和热机工作过程中转变为机械功的热量 $(Q_1 - Q_2)$ 的比值, 即

$$\eta_m = \frac{Q_3}{Q_1 - Q_2}。$$

如果用 η 方表示热机的效率, 则

$$\eta = \eta_c \eta_t \eta_m = \frac{Q_3}{Q}。$$

热力学第二定律和卡诺定理主要讨论热机的热效率 η_t 的问题。但要提高整个热机的效率，除了提高 η_t 的值外，对于 η_c 和 η_m 的问题也不能忽视。

热力学第二定律

热力学第二定律有两种表述方法。

开尔文表述：不可能从单一热源吸取热量，使之完全转变为机械功而不产生其他影响。

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引起其他变化。

说明：

(1) 开尔文表述和克劳修斯表述是等效的。

(2) 人们曾设想制造一种能从单一热源吸取热量，使之完全变成有用的机械功而不产生其他影响的永动机，它并不违反热力学第一定律，但违反热力学第二定律，因而是不可可能的。

(3) 热力学第二定律说明“热量不可能全部转化为机械功”。

熵

热力学系统的状态函数，用符号 S 表示，状态 B 与状态 A 的熵之差为

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{\delta Q}{T},$$

δQ 表示在从状态 A 变到状态 B 的过程中，系统从温度为 T 的热源吸取的热量。

说明：

(1) 熵的定义和热能的定义类似，只能得到熵的差值。在许多实际问题中，为了方便，可选取某一状态的熵为零，这一状态叫做参考态，则其他状态的熵就完全确定了。

(2) 热力学第二定律也可表述为：在孤立系统内发生可逆过程时，系统的熵保持不变；在孤立系统内发生不可逆过程时，系统的熵增加。

(3) 从分子运动论和统计力学的观点看来, 熵的增加表示系统从概率小的状态向概率大的状态演变, 也就是从比较有规则、有秩序的状态向更无规则、更无秩序的状态演变。

卡诺循环

由两个可逆等温过程和两个可逆绝热过程组成的理想循环。

说明:

(1) 卡诺循环中, 工作物质只需与两个温度恒定的热源相接触, 从这一点来讲, 它是最简单的循环过程。

(2) 在两个热源间工作的可逆循环只能是卡诺循环。由于交换热量是可逆的, 要求工作物质与热源有无限接近的温度, 则工作物质从高温热源 (其温度是 T_1) 吸热必须是在温度为 T_1 的等温过程中进行, 并在温度为 T_2 (低温热源的温) 的等温过程中向低温热源放热。因只有两个热源, 故当工作物质与热源分开, 并从 T_1 过渡到 T_2 和从 T_2 过渡到 T_1 的两个可逆过程, 必定是绝热过程。

卡诺定理

在两个给定的温度之间工作的两类热机, 不可逆热机的效率总是小于可逆热机的效率; 在两个给定温度的热源之间工作的一切可逆热机, 其效率都相等, 与工作物质无关。

说明:

19 世纪初, 蒸汽机在工业上的广泛应用, 提高热机的效率已成为科学家和工程师的重要课题。卡诺在 1824 年指出, 热机要能有效地做功, 它至少必须工作在一个高温热源和一个低温热源之间。卡诺发表了关于热机效率的基本定律, 这就是卡诺定理。

卡诺热机

在高温热源 (温度为 T_1) 和低温热源 (温度为 T_2) 间作卡诺循环的理想热机。

说明:

(1) 由热力学可以证明, 卡诺热机的效率 $\eta_i = 1 - T_2/T_1$ 。卡诺热机的效率只决定于两热源的温。若 T_1 越大, T_2 越小, 效率就越高。

(2) 卡诺热机虽然是一种理想热机，但对它的研究为提高热机的效率指明了方向。

热力学第三定律

当温度趋向于绝对零度时，体系的熵趋向于一个固定的数值，而与其他性质（如压强）无关。

说明：

(1) 上述结论是 1912 年能斯脱根据对低温现象的研究得出的，称为能斯脱定理。

(2) 常用的表述还有：绝对零度不可能达到；不可能用有限个手续使物体冷却到绝对零度。

(3) 能斯脱定理的各种表述统称为热力学第三定律。

(4) 热力学第三定律在低温物理研究中起着指导作用。当温度趋于绝对零度时，体系处于最低能量状态，变为完全有序。既然熵是分子体系无序程度的量度，那么在绝对零度时，熵必定达到它的最低值。

电荷

物质的固有属性之一。它有正电荷与负电荷两种，同种电荷互相排斥，异种电荷则相互吸引。

说明：

(1) 电荷本身不是物质，但电荷与物质不可分离，自然界中不存在脱离物质而单独存在的电荷。实验表明，凡是带电的粒子，其静质量都不为零。

(2) 通常物体由原子组成，原子中有带正电的原子核和带负电的电子，由于正、负电荷相等，一般物体呈中性而不带电。但当中性物体经过摩擦、加热、感应或照射等变化时，往往因获得或失去一部分电子而呈现出荷电状态。例如，一些荷电物体具有吸引轻小物体的特性。

(3) 迄今为止的实验表明，自然界中任何电荷都是电子电荷的整数倍，所以，电子电荷的绝对值称为基本电荷，其量值按现代最精确测量的结果为

$$e = 1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ 库仑。}$$

我们说电荷是量子化的，即任何物体所带电荷的数量是不连续的。目前比电子电荷更小的电荷是否存在，尚还没有定论，但即使发现了比

电子电荷更小的电荷，如 $\frac{1}{3}e$ 、 $\frac{2}{3}e$ 等，我们相信电荷仍然是量子化的，

只是那时电荷的最小单位比今天的 e 要小而已。电荷量子化是自然界中一个深刻而又普遍的规律。

值得指出，在我们学习的经典电磁学范围内，一般宏观物体所带电量比电子电荷大得多，故不必考虑电荷量子化这一事实，通常说物体的电荷可以具有任意值。

电量

指物体所带电荷的多少。

说明：

(1) 在国际单位制中，电量的单位是库仑 (C)。1 库仑电量等于 1 安培的电流通过导体时，在 1 秒钟内流过导体任一截面的电量。

(2) 1950 年前的电量单位，库仑定义为能从硝酸银溶液中电解出 0.001180 克纯银的电量。因上述两种库仑相差极微，应用时不加区别，统称库仑。

电荷守恒定律

一个孤立系统的总电荷数不变，即在任一时刻存在于该系统内的正电荷与负电荷的代数和保持不变。

说明：

(1) 这是一条严格的自然定律，在所有宏观或微观过程中都成立，它作为一条最基本的理论假设，其正确性不是由个别实验所能证实的，而是由迄今为止所有观察实验无一违背其结论而被确认。

(2) 反映了在自然界中，电荷的产生与消失总是正、负电荷成对出现的。在宏观过程中，物体荷电状态的改变，往往是由电子的得失而产生的，一部分物体得到了多余的电子就显示荷负电的特性，而失去电子的另一部分物体就呈现出正电的特性，它们得失的总量总是相同的。在微观过程中，粒子的衰变产生带电粒子，正、反粒子的湮灭又使粒子所带电荷消失，但我们从未观察到只产生带正电的粒子而不同时产生带负电的粒子的事件。

(3) 我们知道质量、长度、时间间隔这些基本物理量在相对论中并不是不变量, 即不同运动速度的观测者测量这些量所得结果是不同的。但电荷不同于上述这些量, 即使在相对运动的不同惯性系中, 测量同一个电荷的电量, 其结果都相等, 这就是电荷的不变性。

库仑定律

静电学的基本实验定律。

1785 年法国科学家库仑 (C. A. Coulomb, 1736—1806) 利用扭秤实验总结出如下规律: 真空中两个静止的点电荷之间的作用力与它们所带电量的乘积成正比, 与它们之间的距离平方成反比, 作用力的方向在它们的连线上。这一规律用矢量公式可表示为

$$\mathbf{F}_{12} = K \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{r}_{12}。$$

式中 q_1 、 q_2 分别表示两个点电荷的电量 (带有正、负号), r_{12} 表示两点电荷之间的距离, \mathbf{r}_{12} 则表示从电荷 q_1 指向电荷 q_2 的位置矢量, K 为比例系数, 由公式中各量所选单位而定。 F_{12} 表示电荷 q_2 受电荷 q_1 对其的作用力。当两个点电荷 q_1 与 q_2 同号时, F_{12} 与 r_{12} 同方向, 表明电荷 q_2 受 q_1 的斥力; 当 q_1 与 q_2 异号时, F_{12} 与 r_{12} 的方向相反, 表示 q_2 受 q_1 的引力。

说明:

(1) 在国际单位制中, 电量的单位为库仑 (C), 距离的单位为米 (m), 力的单位用牛顿 (N), 实验测定比例常数 $K = 8.980 \times 109 \text{Nm}^2/\text{C}^2 \approx 9 \times 109 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 。通常还引入另一常数 ϵ_0 (称真空的介

电常数), 使 $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi K} = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$ 。

(2) 库仑定律关于电力与距离平方反比的规律, 具有特别重要的意义, 所以一直经历着不断的实验检验。1873 年麦克斯韦实验得出, 定律中分母 r 的指数与 2 的差别 $\delta < 5 \times 10^{-5}$, 精度比库仑实验提高了 3 个数量级。1971 年威廉斯等的实验测得上述 $\delta < 3 \times 10^{-16}$, 所以, 库仑定律关于电力平方反比律已经成为物理学最精确的实验规律之一。

(3) 库仑定律关于平方反比律结论的重要性, 还在于它与光子静止质量 m_γ 是否为零有密切的关系。现代的物理理论量子场论认为, 各种相互作用都是粒子交换引起的, 电磁相互作用通过交换光子实现。如果光子的静质量 $m_\gamma \neq 0$, 则电

磁力为非长程力，即电力的平方反比律就会有偏差（ $\delta \neq 0$ ）；只有当 $m_r=0$ ，则 $\delta=0$ ，电力严格保持平方反比律。另外，假如 $m_r \neq 0$ ，则电荷守恒定律将破坏；黑体辐射公式要修改；不同频率的光波在真空中的速度将不同（真空色散），这一系列的物理学基本规律的破坏当然是不可想象的，所以光子静质量 m_r 是否严格为零，物理学家不断地用各种方法来加以检验。上述 1971 年关于 δ 的实验结论，即 $\delta < 3 \times 10^{-16}$ ，相当于 $m_r < 2 \times 10^{-47}$ 克，而最近用天体物理学的方法测得 $m_r < 10^{-60}$ 克，基本接近为零，但是是否严格为零，仍受到物理学家的普遍关注，并将进一步受到检验。

(4) 库仑定律的适用范围：现代高能电子散射实验证实距离 r 小到 10^{-17}m 的范围，定律仍然精确成立；而现代人造地球卫星关于地球磁场的测量可以得出库仑定律精确地适用于大到 10^7m 的范围。一般估计在更大范围内，库仑定律仍然有效，只要 m_r 严格为 0，电磁力是长程力，理论上可以一直延伸至无限远处。

(5) 通常对库仑定律的表述，常常说是真空中两个点电荷之间的相互作用力，这样说是为了忽略其他电荷的影响，并没有错。但是必须指出，即使存在其他物质，如介质、导体，甚至充满电荷周围，库仑定律仍然成立。不过此时必须计及介质所出现的极化电荷以及导体出现的感应电荷。

(6) 库仑定律成立的条件是静止点电荷。静止是指两点电荷相对静止，且相对于观察者静止（均在惯性系中）。定律可以推广到静止源电荷对运动电荷的作用，而不能推广到运动源电荷对静止电荷或运动电荷的作用。因为源电荷运动时，它所激发的电磁场以光速在空间传播，所以这时电荷之间的相互作用不是瞬时的超距作用，牛顿第三定律不再成立，而库仑定律所规定的两个点电荷之间的作用是满足牛顿第三定律的。

电场

存在于电荷周围的一种特殊物质，其基本特性是对处于电场中的电荷施以力的作用。

说明：

(1) 电场可分为静电场和感应电场。

(2) 电场是物质，除了能对物质发生相互作用外，还具有质量、能量、动量等物质的基本属性。说其是特殊物质，是指它与实物在存在形式上有所不同，普通实物处于空间某一有限区域，场则一般弥漫于整个空间，几个场还可以处于同一空间而不互相影响，电场还服从叠加原理。这些都与实物不同。

(3) 值得指出，电场是统一电磁场的两个方面中的一个侧面，孤立的电场亦是存在的，它是电磁场的一种特殊存在方式。例如静电场就是最常见的单独出现的电场。

静电场

由静止电荷激发的电场。

说明：

- (1) 是保守场，其电力线不闭合，起始于正电荷，终止于负电荷。
- (2) 是有势场，场中可引入电势的概念。

感应电场

由变化的磁场激发的电场。

说明：

- (1) 涡旋场，其电力线是闭合的。
- (2) 非势场，场中一般不能引入电势的概念。
- (3) 产生感生电动势的根源，即电磁感应的本源。

电场强度

从力的角度描写电场各处的强弱及方向的物理量。电场强度是一个矢量，其定义式为

$$E = \frac{f}{q},$$

式中 q 为放入电场中的试探电荷的电量， f 为在电场中的 q 所受到的电场力。

由此可以说，场强 E 的大小等于场中该点处单位正电荷所受电场力的大小，方向即为该正电荷所受电场力的方向。

说明：

(1) 描写电场本身特性的物理量，因此，在定义中虽引入了试探电荷 q ，但场强 E 与试探电荷无关，即使在电场中未置入试探电荷 q ，该点仍具有场强 E 。

而且为了使试探电荷的放入，不影响所考察的电场的分布，试探电荷的电量应足够小，其几何线度也应充分小，即可视为点电荷，以使其所在位置可视作一个点。

(2) 在国际单位制中，电场强度的单位是牛顿/库仑。

(3) 根据库仑定律，电量为 Q 的点电荷，距离它为 r 处的场强为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^3} r$$

这一公式具有基本的重要性，点电荷系及电荷连续分布的带电体，均可根据点电荷场强公式及场的叠加原理求出。

(4) 值得指出，场强的定度式 $E = \frac{f}{q}$ 是为建立场强概念而引入的。

但在实际测量中一般不用此式，而常常利用场强等于电势梯度的关系式，通过测量电场中邻近两点间的电势差来确定。这时场强的单位取为伏特/米。

场的叠加原理

如果在同一空间，有不同场源产生的几个场 E_1 、 E_2 、……、 E_n ，那么该空间任一点的总场强 E ，就等于不同场源单独存在时在该点产生的场强的矢量和，即

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n。$$

这就是场的叠加原理。

说明：

(1) 场的叠加原理说明，不同电荷在同一空间里所产生的电场，是相互独立而无影响的，因此，总的电场即为各个分场之线性相加。

(2) 场的叠加原理，在数学上要求这些场的动力学方程必须是线性微分方程，作为线性微分方程的解必定满足叠加原理。对于宏观电磁场的运动必定满足麦克斯韦方程组，而麦氏方程组是线性微分方程组，所以，作为麦氏方程组的解，不论静电场，还是运动电荷的场，直至一般电磁场均满足场的叠加原理。

(3) 正是根据库仑定律和场的叠加原理，点电荷系的场强可以表示为各点电荷在空间同一点之场强的矢量和，即

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i r_i}{4 \pi \varepsilon_0 r_i^3};$$

而电荷连续分布的带电体所产生的场, 可以看作由无限细分的许多电荷元在空间产生的场的叠加。对于体电荷分布的带电体的场即为

$$E = \iiint_{\Omega} \frac{\rho r dv}{4 \pi \varepsilon_0 r^3},$$

对于面电荷分布的带电体的场即为

$$E = \iint_{\Sigma} \frac{\sigma ds}{4 \pi \varepsilon_0 r^3},$$

对于线电荷分布的带电体的场即为

$$E = \int_L \frac{\eta r dl}{4 \pi \varepsilon_0 r^3},$$

以上积分中的 ρ 、 σ 和 η 分别为电荷的体密度、面密度和线密度。

电力线

为形象地描写电场而引入的一族假想曲线。曲线上各点的切线方向与该点的电场方向一致, 曲线在各处的疏密程度与该处的电场强度的大小成正比。

说明:

(1) 电力线的概念最早由法拉第引入。只是受当时机械论的影响, 认为电力线是某种实体, 是某种媒体的紧张状态, 这是不对的。事实上电荷之间通过电场作用, 并无实体的力线相连, 电力线只是一种假想的力线, 形象描述了场的分布, 正是由于这一特点, 保留了电力线这一概念。

(2) 在静电场中, 我们把电力线画成代表总电场强度 E 的连续曲线, 则静电场中的电力线具有以下特点:

① 电力线起始于正电荷, 终止于负电荷;

② 电力线永远不会在没有电荷的地方相交, 这是因为电场中每一点的场强只有一个方向, 所以在电场中每一点只能有一条电力线通过;

③电力线永不闭合，这是因为静电场是一保守场，在静电场中任何闭合曲线上的线积分永远为0，即有

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0。$$

这说明假如电力线闭合，沿电力线的积分就不为0，就与上式矛盾。

④电力线处处与等位面垂直，这是因为场强方向就是等位面的法线方向。静电场中的导体是等位体，表面为等位面，所以导体上的电力线必定与导体表面垂直，且没有一条电力线两端都在同一导体上。

⑤匀强电场中的电力线必定是一族平行的直线。

(3) 在感应交变电场中，电力线则是围绕着磁力线的闭合曲线，因为感应电场与静电场完全不同，静电场是有源无旋的保守场，感应电场则是无源有旋的非保守场。

电通量

表征电场中电力线流散特性的物理量。一般定义通过场中某一曲面的电通量 ϕ_e 为一面积分，即

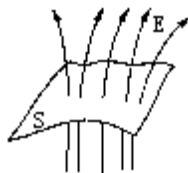
$$\phi_e = \iint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \iint_S E \cos \theta \, dS,$$

式中 E 为该曲面上的场强， dS 为面元矢量，其大小为面元的大小，方向为面元的法线方向， θ 则为 E 与 dS 之间的夹角。

说明：

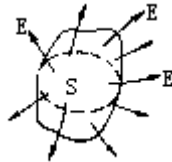
(1) 电通量的大小亦可形象地说成是场中通过某一曲面的电力线的条数。

(2) 电通量所表示的是电场中电力线的聚散特征，即通过电力线的汇集与分散来描写电场的分布特性。其中通过闭合面的电通量



$$\phi_e = \oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \oiint_S E \cos \theta dS$$

更集中反映了这一特性。对于闭合面总是取曲面之外法线为正方向，这样穿出曲面的电通量为正；穿入曲面的电通量为负。若通过闭合曲面的电通量为零，则表示穿出曲面的电力线与穿入的电力线数目相等，或者说没有电力线出入。



(3) 闭合面的电通量为正时，表示曲面内有净正电荷；闭合面的电通量为负时，表示曲面内有净负电荷；闭合面的电通量为零时，表示曲面内正、负电荷相等，即无净电荷。

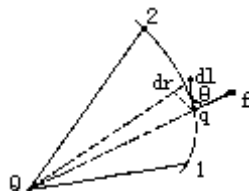
电势能

电荷在静电场中所具有的势能。

说明：

(1) 物体在引力场中受到万有引力作用，它具有势能，电荷在静电场中受到库仑力的作用，库仑力公式与万有引力公式在数学形式上完全一致，作简单的类比，可见，在静电场中引入电势能的概念是十分自然的。进一步分析静电场是有源无旋场，即静电场的电力线是有始有终永不闭合的，这样的力场可以严格证明是保守力场，即场力对电荷所作的功与路径无关，仅与电荷移动的起点及终点位置有关，这就是引入势能的基础，而电势能实际上就是与电荷在场中的位置有关的一个单值函数。

(2) 电势能的具体计算总是与静电场做功相联系的。在点电荷 Q 的电场 E 中，电荷 q 从位置 1 到位置 2，沿任意路径移动，场力所作的功



$$A = \int_1^2 q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_1^2 qE \cos \theta dl$$

$$\begin{aligned}
&= \int_1^2 qE dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^3} dr \\
&= \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_2} \\
&= W_1 - W_2
\end{aligned}$$

从上可见，静电场力所作的功确与路径无关，仅与位置变量 r_1 、 r_2

有关。当我们再选定无穷远处的电势能为零时，式中 $W_1 = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r_1}$ ， $W_2 = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r_2}$

即电荷 q 在点电荷 Q 的电场中位置 1 及位置 2 处的电势能。

非点电荷的带电系统总可以看成点电荷系的集合，其场为各点电荷场的叠加，所以，以上结果有普遍意义，即一切静电场中场力作功均与路径无关，均可引入电势能。

电势能为电场与电荷共同所有。正像把“地球与物体的系统所具有的重力势能”简单地说是“物体所具有的重力势能”一样，对于“电荷具有电势能”也应该理解是“电场与电荷系统所具有的电势能”。

(3) 在点电荷 Q 的电场中，电荷 q 在任意位置的电势能取为 $W = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r}$

r 为两点电荷之间的距离，这意味着电荷 q 在无穷远处的电势能为零。这样，场中某处的电势能就等于电荷从该处移到无穷远处的过程中，电场力对它所作的功；或者说，电荷从无穷远处反抗电场力移动到该处时外力所作的功。

(4) 场力对电荷所作的功，可以用电荷在场中相应位置的电势能之差来表示，即

$$A = W_1 - W_2。$$

若 $W_1 - W_2 > 0$ 。则场力对电荷作正功，消耗电势能；若 $W_1 - W_2 < 0$ ，则电荷反抗电场力作功，场力对电荷作负功，增加电势能。

(5) 电荷分正、负，电荷之间既有吸引又有排斥作用，这与质点之间仅有万有引力作用不同。与引力势能不同，当我们选定无限远处为电势能的零点时，电势能的正、负号选取，既与激发场的电荷符号有关，又与场中电荷符号有关。

对于异号电荷之间的电势能，因相互吸引，势能减小，故为负值，两者距离越大，电势能的绝对值越小，电势能越大；而同号电荷则与上述相反，电势能为正值。

值得指出，一切势能本身只具有相对意义，电势能亦不例外，所以，对于电势能本身取值的大小及正、负号并无绝对意义，不同位置的电势能之差才具有实际意义。

电势

从场力作功的角度描述静电场特性的物理量，也称电位。静电场中某一点的电势，等于单位正电荷在该处所具有的电势能，可表示为

$$U=W/q,$$

式中 U 为电势， q 为电量， W 为 q 在该点的电势能。

说明：

(1) 在国际单位制中，电势的单位是伏特，

$$1\text{伏特} = 1 \frac{\text{焦耳}}{\text{库仑}}。$$

(2) 电势是表征电场本身特性的物理量，因此，电场中一点的电势仅与激发场的电荷（大小及分布）有关，而与场中该处是否有电荷无关。但场中某点的电势能则是与该处电荷的大小成正比的，电势能与电势的关系是

$$W=qU。$$

(3) 电势是标量，取定零电势后，电势取值有正、负号之分，例如正电荷所激发的电场之电势，在选定无限远处电势为零后，则空间各点电势为正；相反，负电荷场的电势为负。不同电荷所激发电场的叠加场的总电势，等于各分场电势之代数和，即

$$U=U_1+U_2+\cdots+U_n。$$

注意，这时各分场应选择共同的零电势点。

(4) 电势值本身与电势能一样只具有相对意义，而有绝对意义的是电势差，所以，零电势的选取具有任意性，一般以处理问题的方便为原则。例如，点电荷所激发的电场，常取无穷远处为零电势点；实验室及电气工程上常取大地电势为零；电子仪器等则选取电器外壳为零电势点。

(5) 电场中电势相等的点的集合可以构成一个曲面，称为等势面，比如静电场中导体为等势体，其表面即为等势面。为了形象地描绘电场中的电势分布，可以在电场中画出一系列的等势面。譬如，点电荷场的等势面是以点电荷为球心的一系列同心球面。电场中等势面永远与穿过面的电力线垂直。相邻的两个等势面之间的电势差常取为恒值，这样电场越强处，电力线越密集，等势面则越紧密。

(6) 电势与场强是从不同方面来描写电场特性的两个物理量，它们两者有紧密的联系。简单地说，电场强度是电势的梯度，即电势对空间的最大变化率。对于均匀电场，由于场强处处相同，这时场强 E 的大小等于沿电势降落方向单位距离上的电势差，即

$$|E| = \frac{U_a - U_b}{d},$$

式中 d 为在电场方向上 a 、 b 两点间的距离，电场方向为沿电势降落方向。

对于一般非均匀电场，场强必须用电势沿空间各个方向的变化率来求，由于场中任一点电势沿各个方向的变化率并不相同，其中沿某个方向（等势面的法线方向）的变化率为最大，而该点场强 E 的大小即这一电势最大变化率的值， E 的方向即在此方向上，指向相反。数学上称场强 E 是冠以负号的电势梯度，表示为

$$E = -\text{grad}U = -\frac{\partial U}{\partial n} n_0,$$

式中 $\text{grad}U$ 为电势梯度符号， $\frac{\partial U}{\partial n}$ 即为最大变化率， n_0 为最大变化率方向

的单位矢量（梯度方向为由低电势指向高电势方向），负号表示场强的方向正好是梯度的反方向。电势沿任一方向的变化率即场强 E 在该方向上的投影。

(7) 电势是标量，电场强度是矢量，所以在计算求解静电场问题时，一般求解电势方程而不求解场强方程；在实际测量中，一般也总是测量空间各点的电势或电势差，测得各点电势后就很容易求得场强。从这个意义上说，电势具有特别的重要性。

静电平衡

指一带电体系处于电荷不再移动而静止，电场分布不再随时间变化时的状态。

说明：

(1) 导体达到静电平衡的必要条件是其内部场强处处为零。

(2) 导体达到静电平衡时，导体为一等势体，导体表面为一等势面；导体内部体电荷密度处处为零，电荷只能分布在导体的外表面上；导体外表面上的电场强度可以不为零，但场强方向一定处处垂直于导体表面，场强大小与导体表面对应点的电荷面密度成正比。

(3) 导体达到静电平衡所需的弛豫时间，对于一般金属 $\tau = 10^{-17}$ 秒，这个值很小，可见导体内的体电荷即使出现，亦很快消失，导体可以在极短瞬间达到静电平衡。值得指出，电荷的消耗靠电子的输运实现，因此，弛豫时间不会小于电子在晶格间碰撞的平均碰撞时间（约 10^{-14} 秒），故 τ 不可能小于 10^{-14} 秒。在以上 τ 的推导过程中，用到了 $j = \lambda E$ ，但当频率非常高时， $j = \lambda E$ 不再成立，瞬时过程用傅里叶展开，可知对应的频率已非常高。

(4) 静电平衡时，导体上的电荷分布是唯一的。这是指在导体和电荷的分布固定不变的静电场中，放入导体的形状、大小和位置都固定不变时，导体上原有电荷分布或出现的感应电荷的分布是唯一确定的。

静电感应

静电场中的导体内，自由电荷受场力作用移动，电荷重新分布，最后达到静电平衡，从而使导体不同部位出现正、负电荷的现象。

说明：

导体放入静电场中，导体内部的电场强度不为零，在电场作用下，导体内部的自由电荷移动，导体上不同部位分别有正、负电荷积累，这些导体上的电荷就产生一个附加电场，其方向与外场方向相反，当电荷积累到附加场完全抵消导体内部的外电场时，自由电荷不再移动，导体达到静电平衡，这就是整个静电感应的过程。

静电屏蔽

一个导体空腔内的电荷分布及电场强度不受外界影响，或空腔内的电荷及电场不影响外界的现象。

说明：

(1) 导体空腔内的电荷分布和电场不受外界的影响，并不是空腔导体外的电荷不在空腔内产生电场强度，而是空腔外的电荷同时引起导体空腔外表面上出现相应的感应电荷，这些感应电荷在空腔内产生的电场强度恰好与腔外电荷的电场强度完全抵消，也就是说空腔壁上及壁外所有电荷在腔内产生的电场强度之矢

量和恒为零，这正是静电平衡的条件。这样就使外界对空腔内的电荷分布及电场都没有影响。但是空腔外的电场改变使得空腔内的电势亦要改变，不过空腔内各点电势改变同一数值，各点之间的电势差不变，也就是电场强度不变，所以，导体空腔外的电场改变只能改变空腔内电势，不影响电场强度。因此，导体空腔可以起到屏蔽外场的作用。

(2) 导体空腔内电荷的分布改变不影响空腔外的电场，这是由于空腔内的电荷分布仅影响空腔内表面上感应电荷的分布，不影响空腔外表面上感应电荷的分布，腔外电场就不受影响。但是当空腔内部电荷的电量改变时，空腔外表面上感应电荷的电量也要改变，腔外电场强度亦要改变，也就是说，这时的空腔不能屏蔽掉内部电场对腔外空间的影响。因此，不接地的导体空腔的静电屏蔽，只能屏蔽外部的电场，有时称为外屏蔽。

值得指出的是：尽管空腔不接地，但只要它是完全封闭而不能打开，那么，根据电荷守恒定律，腔内电荷的电量将永远保持不变。在这种情况下，空腔内部场对外界就没有影响。也就是说，这时的空腔既可屏蔽外场对内部的影响，又可屏蔽内部场对腔外场的影响。

(3) 对于接地的导体空腔，由于空腔电势恒定保持为零，空腔内、外就完全隔绝、互不影响，起到完全的静电屏蔽作用。

注意，不要随便说接地导体空腔外表面上感应电荷流入大地，或者说接地导体空腔表面上无电荷，其实可以确定的只是导体空腔的电势一定为零且恒定不变，至于其上有否电荷，如何分布还与腔内、外电荷的分布及导体的形状、分布等有关。

电容

表征导体容纳电荷及贮藏电能特性的物理量。

电容定义为导体所带电量 Q 与它所具有的电势 U 之比，一般用字母 C 表示，其定义式为

$$C = \frac{Q}{U}。$$

从上述定义可见，电容的意义是使导体每升高单位电势所需的电量。

说明：

(1) 在国际单位制中，电容的单位是法拉，即

$$1\text{法拉} = \frac{1\text{库仑}}{1\text{伏特}}。$$

(2) 导体的电容，严格说应为孤立导体的电容。所谓“孤立”导体，是指在某导体附近没有其他导体和带电体。孤立导体的电势完全由其所荷电量多少及导体本身的特性所决定，这时所定义的导体的电容是一个与Q和U均无关的常数，它是仅与导体的尺寸及形状有关的描述本身特性的量。

电容器

电路中用以积储电荷及电能的基本元件。

说明：

(1) 按型式分，电容器有固定的、可变的和半可变的3类。按极片间使用的介质分，则有空气电容器、真空电容器、纸介电容器、塑料薄膜电容器、云母电容器、陶瓷电容器和电解电容器等。

(2) 电容器的电容为

$$C = \frac{Q}{U_1 - U_2} = \frac{Q}{V}，$$

式中Q为一导体所带电量，V为导体组之间的电势差。

(3) 电容器不仅能储电，也能储存电能。其储存的电能是在给电容器充电时，消耗电源能量以电势能形式储存在电容器中的，它的大小为

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2。$$

上式表明电压一定，电容量C大的电容器储能多，说明电容C也是电容器储能本领大小的标志。对于同一个电容器来说，充电电压越高，储存电能越多。但每个电容器均有一定的耐压值，超过耐压值，电容器将击穿，所以充电电压最高以耐压值为限。

(4) 电容器的电容大小，也与电容器内所充介质的性质有关。介质的介电系数 ϵ 越大，电容量也越大。

(5) 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、耦合等作用的主要元件。

电流

带电粒子的定向运动，有时也作为电流强度的简称。

说明：

(1) 形成电流的带电粒子常称为载流子，它可以是电子、质子或正、负离子，在半导体中还可能是带正电的“空穴”。产生电流的条件除了具有带电粒子外，一般还应存在电场，以使带电粒子作定向运动。

(2) 金属导体中的电流是由导体内的电场对自由电子的作用，使其沿电场方向作定向漂移而形成。

(3) 真空中的电流常由外加电场使阴极发射出来的电子加速作定向运动而形成。阴极射线实际上就是真空中的高速电子流。

(4) 稀薄气体放电所形成的电流，常由向阳极运动的电子及向阴极运动的阳离子所组成。

(5) 电解质溶液中，由浸在溶液中的正、负电极板间的电压所形成的外加电场，迫使溶液中正、负离子作定向漂移运动而形成。正、负离子定向运动方向相反，而电流方向相同。液体内部总电流是正、负离子电流的总和。

电流强度

表征电流强弱的物理量，有时也简称为“电流”。如果在一段时间 Δt 内通过导线某一截面的电量是 ΔQ ，则通过该截面的电流强度 I 是

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}。$$

说明：

(1) 电流强度是单位时间内通过导线某一横截面的电量。

(2) 在国际单位制中，电流强度的单位是安培，即

$$1\text{安培} = 1\frac{\text{库仑}}{\text{秒}}。$$

(3) 一般都利用电流的各种效应来测量电流强度。

电流密度

表征空间各点电流的强弱与方向的物理量。它是矢量，其大小等于空间某处通过垂直于载流子运动方向的单位面积上的电流强度，即单位时间内通过垂直于载流子运动方向的单位面积上的电量，方向即空间该点正电荷的运动方向。常用符号 j 表示，即有

$$j = \frac{\Delta I}{\Delta S} j_0 = \frac{\Delta Q}{\Delta S \Delta t} j_0,$$

式中 ΔS 为垂直于载流子运动方向的截面积， ΔI 为流过 ΔS 的电流强度， ΔQ 则为 Δt 时间内流过 ΔS 之电量， j_0 为正电荷运动方向的单位矢量。 j 与电流强度 I 的关系为 I 是 j 的面积分：

$$I = \int j \cdot dS.$$

说明：

(1) 在国际单位制中，电流密度的单位是安培/米²。

(2) 在实际应用中，除了导线中的电流外，还常常遇到大块导体流动的电流、电解液中的电流、气体放电时气体中的电流等等。这时，因空间各处载流子的密度，沿各个方向的平均速度都不相同，很难用一个截面上的电流强度来描写空间各点的电流特征，就必须对空间各点逐点进行描述，从而有必要引入电流密度的概念。

(3) 根据欧姆定律，一段导线中的电流强度 I 与加在这段导线两

端的电压 U 成正比，即 $I = \frac{U}{R}$ ， R 为这段导线的电阻，是个常数。而一

大块导体或液体、气体中，各处的电流密度 j 与其对应的电场强度 E 的关系为：

$$j = \sigma E.$$

式中 σ 为导体的电导率，这就是所谓的欧姆定律的微分形式。在这种形式中，电流密度 j 与所在点的场强 E 成正比。

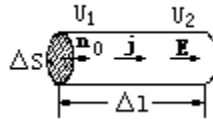
(4) 欧姆定律的微分形式可从一段导线上的欧姆定律简单推出。设一段导线长为 Δl ，截面积为 ΔS ，电导率为 σ ，则由电阻定律知该段导线的电阻为

$$R = \frac{\Delta l}{\sigma \Delta S},$$

联系到 I 与 j 的关系及 U 与 E 的关系

$$I = j \cdot n_0 \Delta S,$$

$$U = E \cdot n_0 \Delta l,$$



再根据一段导线的欧姆定律，则有

$$j \cdot n_0 \Delta S = \frac{E \cdot n_0 \Delta l}{\Delta l / \sigma \Delta S} = \sigma E \cdot n_0 \Delta S,$$

比较方程两边即有

$$j = \sigma E.$$

由此可见，欧姆定律及其微分形式两者本质相同而形式不同。

(5) 在液体、气体中有电流时，常常把电流密度 j 与其中载流子密度（单位体积中的载流子数目） n 、载流子电荷 q 、载流子运动速度 v 相联系，写成

$$j = npv.$$

电阻

描述电路中两点间在一定电压下决定电流强度的物理量。常用符号 R 表示。数值上等于物质两端电压 V 与通过物质的电流强度 I 之比，即

$$R = \frac{U}{I}.$$

电阻表示导体对电流的阻碍作用。

说明：

(1) 在国际单位制中，电阻的单位是欧姆，

$$1 \text{ 欧姆} = 1 \frac{\text{伏特}}{\text{安培}}.$$

(2) 电阻是导体本身的属性，它只取决于导体本身的材料性质、几何形状和温度等，而与所通过的电流无关。当通过电流时，导体的电阻表现为其两端有电压，没有电阻就没有电压。

(3) 我们说一段导体的电阻为常数，是指导体的电阻与所加的电压、通过的电流无关，该电阻即称为线性电阻。电阻为线性元件时，其阻值还可以与温度有关，温度不变时，电阻才固定。

(4) 金属导体的电阻，常用的定性解释是金属内部的自由电子与金属晶体的晶格原子碰撞而产生，但严格的微观理论是量子力学，利用量子力学才能给出定量的微观解释。

电阻定律

给定材料制成的横截面均匀的导体，它的电阻 R 与导体的长度 l 及横截面积 S 的关系为

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

式中比例常数 ρ 称为电阻率。

说明：

(1) 电阻定律是确定导体电阻值的实验定律，该定律说明一段导体的电阻与其长度成正比，与横截面积成反比。

(2) 这个定律只是在温度不变的条件下成立，因为材料的电阻率随温度改变。

(3) 若导体的横截面积 S 不均匀，或导体材料各处的电阻率 ρ 不均匀，则可以分段取导体微元的电阻 dR ，使其满足电阻定律而有

$$dR = \rho \frac{dl}{S},$$

整段导体电阻等于各微元电阻之和，取积分为

$$R = \int dR = \int \rho(x) \frac{dx}{S(x)}.$$

电阻率

表征导体材料电阻特性的物理量。一种材料的电阻率等于用该材料制成的长为1米、横截面积为1米²的导体的电阻数值。

说明：

(1) 在国际单位制中，电阻率的单位是欧姆·米，一般常用的单位是欧姆·毫米²/米。

(2) 导体的电阻率不但与材料的种类有关，而且还和温度有关，在温度不太低时，电阻率 ρ 与温度 t (°C) 有线性关系，为

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

式中 ρ_t 和 ρ_0 分别是 t °C 和 0°C 时的电阻率， α 叫做电阻温度系数，随材料的不同而不同。

(3) 不同材料的电阻温度系数可以差别很大，例如铜的 α 值为 4.3×10^{-3} 度⁻¹，而锰钢合金的 α 值很小，为 1×10^{-5} 度⁻¹。锰钢合金的温度系数特别小，其电阻随温度变化的影响就非常小，常利用这种材料制成标准电阻。某些半导体材料的电阻温度系数特别大，利用它可以做成温度敏感元件，即热敏电阻。

(4) 有些金属及金属化合物的温度在降低到接近绝对零度时，它们的电阻率突然减小为零。这时导体变成了超导体。

(5) 普通白炽灯的灯丝电阻，通电（高温）与不通电（常温）时，阻值差异很大。

电导率

表征物质材料导电性能优良程度的物理量。定义为电阻率的倒数，电导率一般用 σ 表示，即

$$\sigma = \frac{1}{\rho}。$$

说明：

(1) 在国际单位制中，它的单位是 1/欧姆·米或西门子/米。

(2) 根据电导率的定义，电导率具有电阻率的一切特性，只是数值与之成倒数，电导率越大的材料，电阻率越小。习惯上优良导体材料常用电导率来表征其导电特性。一般对于同一材料，视方便任用 ρ 或 σ 。

欧姆定律

电学基本定律之一。描述稳恒电流电路中的电流、电压与电阻相互间的依存关系，一般可表示为两种形式：

部分电路欧姆定律：通过一段导体的电流强度 I 与导体两端的电压 U 成正比，即

$$I = \frac{U}{R},$$

式中 R 为比例常数，即为该段导体的电阻。

闭合电路欧姆定律：通过闭合电路的电流等于电路中电源电动势（除以电路中的总电阻（外电路电阻 R 及电源内电阻 r 之和），即

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}。$$

说明：

(1) 所谓部分电路是指不包含电动势的电路，最简单的电路是只含有电阻的电路。欧姆定律表征这种电路上的伏安特性曲线为直线。特点是电阻值不随电压、电流值而改变。

(2) 欧姆定律亦可推广到交流电路，交流电路的欧姆定律形式不变，只是交流电路中的电压、电流应用复数表示，交流电路的负载亦应用复数阻抗表示，即有

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}},$$

式中 \dot{Z} 、 \dot{U} 、 \dot{I} 分别为同一段电路上的复阻抗、复电压及复电流。

(3) 对于闭合电路欧姆定律亦可表示为

$$\varepsilon = IR + Ir = U_R + U_r,$$

即电源电动势等于外电路上的电压降（称外压降）与内电路上的电压降（称内压降）之和。当外电路开路时，外电路电阻为 ∞ ，此时电源的电动势全部降在外电路上，称为路端电压（等于电动势）；当外电路短路时， $R \rightarrow 0$ ，此时电源电动势全部降在内电路上。由于内电阻一般很小。短路电流就很大，极易破坏电路和电源，应尽量避免。

（4）欧姆定律给出了电压与电流的关系，这表示电场在一段均匀导体内引起的总效果。为了更精细地逐点描述导体内各点电场与对应点的电流的关系，就有了欧姆定律的微分形式 $j = \sigma E$ （参见电流密度）。

电动势

定量描述电源转化能量本领的大小的物理量。一般定义为，在电源内部，单位正电荷从负极移向正极的过程中，非静电力所做的功。记作

$$\varepsilon = \frac{A_{\#}}{q} = \int^{-+} E_k \cdot dl,$$

式中 ε 为电动势， $A_{\#}$ 为非静电力在电源内部把正电荷 q 从负极推到正极所做的功， E_k 为非静电力之等效场强。

说明：

（1）在国际单位制中，电动势的单位为伏特。

（2）电源是一个换能器，即把非电能转化为电能，这种能的转换需通过非静电力的作功过程。所谓非静电力是指在使电荷移动的效果上与力相当的一种“等值力”，在不同类型的电源中，由于转化为电能的其他能量形式各不相同，电源中形成非静电力的过程和原因亦不同。例如，在电池中非静电力起源于物质的化学作用；在热电偶中起源于“电子气”的扩散作用；在电磁感应中起源于磁场对运动电荷或涡旋电场对电荷的作用。尽管不同电源中非静电力的物理本质是不同的，但是作为各种电源能移动电荷这一特点是共同的，可以抽象为一个统一的非静电力的概念。

（3）不要混淆电动势与电势差这两个概念。电动势反映电源把其他形式能量转变为电能的能力大小；电势差反映电路中电能变为其他形式能量的多少。两者在能量转化的方向上正好相反，这也正是非静电力与静电力的本质区别。当电荷沿闭合电路绕行一周时，电源中的非静电力对电荷提供能量，使电荷反抗电场力作功，把其他形式能量转化为电能；电路中的电荷在静电力作用下移动作功，消耗电能，把电能又转化为其他形式能量。

(4) 电动势在电路中可取正号或负号，以表征电源在电路中放出能量作正功，或吸收能量作负功。具体来说，当通过电源的电流从负极流入，而从正极流出，即表示该电源对外放电作正功；相反，电流从正极流入，负极流出，则表示该电源正在充电作负功。因此，我们常以电源负极通过电源内部到正极的方向，表示电源电动势的正方向。电路中若流过电源的电流方向与电动势正向相同，则电动势取正值，反之则取负值，利用这一规定即可进行含源电路的代数运算。

(5) 电动势定义式 $\varepsilon = \int^+ E_k \cdot dl$ 中的 E_k 称为非静电力的等效场强。

种不同电源中， E_k 所等效的非静电力的性质和大小是完全不同的。在化学电池中， E_k 所等效的场存在于电极与电解液接触的界面薄层中；在电磁感应中， ε 若为动生电动势， E_k 即代表导线切割磁力线所产生的感生电场，它存在于切割磁力线的该段导体中； ε 若为电磁感应中的感生电动势， E_k 就是变化的磁场产生的感应电场 E_i ，它存在于变化的磁场的整个空间中，所以有 $(= \oint E_i \cdot dl$ 这样的公式，表示电动势等于感应电场在闭合回路上的积分，这一闭合回路即使没有导线存在，由于感应电场的存在，这一电动势同样存在，只是没导电回路，不出现电流。这一闭合回路上的积分不为零，说明感应电场不是保守场，而是一个涡旋电场，这正是感应电场与静电场的根本差别。

基尔霍夫定理

计算稳恒电流电路中多回路问题的基本定理，包括第一定理和第二定理。

基尔霍夫第一定理，亦称节点定理：在回路中几根导线汇合的节点处，各电流的代数和为零，即

$$\sum I = 0。$$

通常规定流向节点的电流为正，离开节点的电流为负。

基尔霍夫第二定理，亦称回路定理：在多回路中的任一闭合回路中，所有电源电动势之和等于各段电路上的电势降落之和，即

$$\sum \varepsilon = \sum IR。$$

说明：

(1) 基尔霍夫定理反映了稳恒电路中必须满足的两个守恒定律。第一定理反映的是电荷守恒定律。包围电路节点作一闭合面，那么定理说明该闭合面内电荷不变，即流入的电荷与流出的电荷等量。第二定理反映的是能量守恒定律。把回路定理改写为

$$\sum I \varepsilon = \sum I^2 R，$$

可以明显看出，所谓回路定理，实际上表明的是电流通过回路时，电源消耗的能量，正好等于各个电阻上放出的焦耳热。

(2) 可列的独立节点方程数目至多等于总的节点数 N 减去 1，即有 $(N-1)$ 个独立节点方程。

(3) 在多回路问题计算中，注意选取独立回路，即每一回路中至少有一段不是重复选用的。一般来说，独立回路数应该等于其网眼的数目，如右图所示网路，有 6 个网眼，可列 6 个独立回路方程。而节点方程和回路方程的总和应等于未知量的个数，否则不能求得全部未知量之解。



(4) 对于电路中的未知电流，可先假定其一个方向，然后求解，若计算结果为正值，表示假定方向就是实际电流方向；若计算结果为负值，表示实际电流方向与假定方向相反。

(5) 在应用回路定理时，应首先选定回路的绕行方向，当绕行方向与电阻上的电流方向一致时，该电阻上的电势降落取正值，反之取负值；而当绕行方向与电动势方向一致（指电源内部从负极到正极）时，电动势取正值，反之取负值。

电功

指电路中电流所做的功。通常的表达公式为 $W=IUt$ 、 $W=I^2Rt$ 或

$$W = \frac{U^2}{R} t。$$

说明：

(1) 在国际单位制中，电功的单位为焦耳。

电功还常用度作单位，1 度（电）=1 千瓦·小时。

(2) 电流在电路上所做的功，其本质还是电场力对电荷所作的功，而且在直流电路中所存在的电场就其性质属于静电场，电场力作功的结果使电势能减少，电势差趋于消失。但在直流电路中，电场力作了功，电阻上产生了焦耳热，电势差并不消失，这是因为直流回路中必定存在电源部分，在电源中非静电力克服电场力作了功，电势能增加，补足了损失的电势能，维持了电路上的电势差，使电路中的电流保持稳恒流动。在静电现象中，电场力作功消耗了电场能，由于

没有电源补充能量，电路上不能保持原有电势差，电流瞬息即逝，只能是一次短暂的放电过程。所以，电源是保证直流电流稳定的重要部件。

(3) 电功公式对于纯电阻负载的电路是等价的，可以互换使用。但当电路中含有产生反电动势的负载时，上述公式不可混用。

电功率

指电路中电流所做功的功率。通常的表达公式为 $P=UI$ 、 $P=I^2R$ 或 $P=U^2/R$ 。

说明：

(1) 在国际单位制中，电功率的单位为瓦特。

(2) 电功率公式对于纯电阻负载的电路是等价的，可以互换使用，但当电路中含有产生反电动势的负载时，上述公式就不可混用。例如电路上有电动机或被充电的蓄电池负载时，可设反电动势为 $\varepsilon_{反}$ ，那么电功率

$$P=IU=IU_R+I\varepsilon_{反}=P_R+P_{反},$$

式中 $P_R=I^2R$ 为消耗在电阻 R 上的电功率，转化为电阻上的热量； $P_{反}=I\varepsilon_{反}$ 为消耗在反电动势负载上的电功率，例如转化为电动机所做的机械功，或转化为化学能贮藏在蓄电池内部。

(3) 实验中一般用伏安法测定电路负载上的电功率。一种是电压表跨接在负载与电流表串联后的两端，另一种是电压表与负载并联，再与电流表串接。两种接法各有特点。

第一种接法： $P=IU=IU_R+IU_A+P_R+P_A>P_R$ 。伏、安两表读数的乘积大于实际消耗在负载上的功率。当负载阻抗很大时， $P_R\gg P_A$ ，所以 $P\approx P_R$ ，说明此时测量值比较符合实际。此种接法对于测量阻抗大的负载的电功率是合适的。

第二种接法： $P=IU=I_RU+I_VU+I_VU=P_R+P_V>P_R$ ，伏、安两表读数乘积还是大于实际消耗在负载上的功率。但当负载阻抗很小时， $I_R\gg I_V$ ，所以 $P\approx P_R$ ，说明此时测量值近似等于实际值。此种接法对于测量阻抗小的负载的电功率是合适的。

焦耳-楞次定律

关于电流热效应的一条定量规律。具体内容为：电流通过导体电阻放出的热量与电阻 R 、电流强度 I 的平方以及电流流过导体电阻所历经的时间 t 成正比，即

$$Q = cI^2Rt,$$

式中 c 为比例系数，其数值视所选单位而定。

说明：

(1) 在国际单位制中，热量的单位是焦耳，这时比例常数

$$c = 1\text{J} / (\Omega \cdot \text{A}^2 \cdot \text{s})。$$

如果热量仍然沿用过去的单位卡，其他量的单位取国际单位制单位，那么比例常数

$$c = 0.24\text{cal} / (\Omega \cdot \text{A}^2 \cdot \text{s})。$$

(2) 这条定律是焦耳在 1841 年，楞次在 1842 年分别独自发现的。实际上是能量守恒定律在电能转化为热能时的特殊形式。值得指出的是在电能转化为其他形式的能量时，总要伴随焦耳楞次热的发生，例如在电动机、电解槽中，电能除了转化为机械能、化学能外，还要放出热量。可以这么说，只要电流通过有电阻的地方总要产生热。

(3) 导体内电子在外场作用下获得了定向运动的动能，当它与离子晶格碰撞时，电子将这部分能量交给了离子，离子的振动能量增加，导体发热，这就是电流热效应的微观解释。

焦耳-楞次定律的微分形式为

$$P = \sigma E^2,$$

式中 P 为单位时间、导体单位体积内电流所放出的热量（或功率密度）， σ 为导体的电导率， E 为电场强度。

(4) 焦耳-楞次定律的微分形式，可以简单地从一段通电导体上推得。设一段导体长为 Δl ，截面积为 ΔS ，电阻为 R ，其上有电流 I ，则焦耳-楞次定律有

$$\begin{aligned} Q &= I^2 R t = j^2 \Delta S^2 \frac{\Delta l}{\sigma \Delta S} t \\ &= \sigma E^2 \Delta S \Delta l t, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Q}{\Delta S \Delta l t} &= \sigma E^2, \\ P &= \sigma E^2. \end{aligned}$$

这就是焦耳-楞次定律的微分形式。

法拉第电解定律

关于电流化学效应的实验定律，包括第一定律和第二定律。

法拉第电解第一定律：电解时，对于同一种物质，在电极上析出或溶出的质量 M 与通过电解液中的电量 ($Q=It$) 成正比，即

$$M=KQ=KI t,$$

式中比例常数 K 称为电化当量。

法拉第电解第二定律：电解时，若通过的电量相同，则析出不同物质的化学“克当量”数相等。或者说，元素的电化当量 K 与它的化学当量成正比，即

$$K = \frac{1}{F} \frac{A}{n},$$

式中 K 、 A 、 n 分别为元素的电化当量、克原子量、原子价， F 称为法拉第常数，它的数值为 96500 库仑/克当量，意义是电极上析出 1 克当量物质时，通过电解液的电量之库仑数。

说明：

(1) 在电解液中通过的电流，其载流子为正、负离子。因此，通电时随着电荷的流动，也有质量（物质）的流动，第一定律说明质量与电量成正比，这是易于理解的。电化当量 K 的意义是，电解液中通过 1 库仑电量时，在电极上析出物质的质量数。不同物质的 K 值是不同的。

(2) 不同物质原子在电解液中的离子，它的电荷数及质量数不同，特别是不同离子，质量可以差别很大。所以，当电解液中通过相同电量时，不同电解液中流过的物质质量是不同的，但如果采用“克当量”作为质量单位时，那么不同电解液中所流过的各相应物质的质量数是相同的。这就是电解第二定律的内容，它告诉我们，尽管电解时析出的物质不同，但是电极上析出 1 克当量物质时，电解液中所通过的电量都等于 96484 库仑（约 96500 库仑）。

实际上，对于不同物质，1 摩尔物质的质量是各不相同的，但其所含的粒子数（原子、分子或离子数）是相同的，这就是阿伏伽德罗常数 6.02×10^{23} 。假如一个离子荷一个基本电荷 1.6×10^{-19} 库仑，那么移过 1 摩尔物质的离子所通过的电量正是以上两个常数的乘积，约等于 96500 库仑，恰好就是法拉第常数。假如，每一个离子所荷电荷为几个基本电荷，即该元素的化学价大于 1，这时克原子量（摩尔）除以化学价恰好为“克当量”数。这正是法拉第电解第二定律的内容。

磁场

存在于运动电荷或电流周围的特殊物质。它的基本特性是对处于其中的电流或运动电荷施以力的作用。

说明：

(1) 磁的本源是运动电荷。磁场与电场是统一的电磁场的两个方面，磁场既可由电流激发，也可由变化的电场（即位移电流）激发。磁场与电场不同，不论是静磁场还是变化磁场，都是涡旋场，即其磁力线永远是闭合的，既没有起点，也没有终点，所以，磁场不是保守场，内部不存在势能，它是一种“非势场”。

(2) 永久磁体周围有磁场，但永久磁体的磁性本质上是由内部分子电流引起的，所以，其周围的磁场亦是由电流产生的。

(3) 说磁场是“特殊”物质，这与电场一样是与实物形态的物质相比较而言的。磁场亦有质量、能量，而电磁场还有动量，所以是物质；但磁场与实物又不同，例如同一空间区域可以有几个磁场共同占有，它的静止质量为零。

磁力线

形象地描述磁场大小、方向及分布的假想曲线。与电力线相似，曲线上各点的切线方向就是该点的磁场方向，曲线的疏密程度，表示该处磁场的强弱，磁力线越密处，磁场越强，稀疏处则弱。

说明：

(1) 与电力线不同，不论是永磁体激发的或电流激发的磁场，磁力线永远是闭合曲线。对于永磁体，虽然外部可以认为磁力线从N极出发到S极终止，但考虑到内部实际存在着的磁场，磁力线还是闭合的。

(2) 磁力线永远闭合，反映了磁场的一个重要特性，它是一个无源场，或者说决不存在单独的磁荷。

(3) 在磁介质存在的空间中，这里所说的磁力线实际上是指磁感应线（B线），即曲线上每一点的切线方向应当与该点的磁感应强度矢量B的方向一致，曲线的疏密程度表示该处磁感应强度B的大小。值得指出，在磁介质中，另一个描写磁场的辅助量是磁场强度矢量H，代表H的线与B线不同，它从N极出发，终止于S极，它与电力线一样是不闭合的。

磁性

是物质的固有属性，指物质能激发磁场并受到磁场力的作用的特性。

说明：

(1) 自然界中许多物质呈现磁性。然而如锰、铬、铝、铋、铜、银等所呈现的磁性很弱，不为人们所注意。人们注意的是呈现很强磁性的物质。人类最早发现的具有磁性的物体是天然铁矿石，它的化学成分是四氧化三铁 (Fe_3O_4)。

(2) 物质磁性的起源，是原子内部运动电子的轨道磁矩，以及原子核、电子、质子、中子等等的自旋磁矩。通常由于物质的热运动，原子和电子的磁矩取向混乱，故一般物质并不呈现磁性。物质在宏观上所呈现的磁性大小与其内部的原子及原子间的构造有着紧密而本质的联系。

(3) 19 世纪初，人们开始认识到电与磁之间有着不可分割的联系。当人们发现磁现象是由电流产生时，安培提出了一种理论，即一个物体的磁性是由该物体内部的大量的微小的闭合电流回路产生的，并假定这些回路中的电流一直不断地流动着，好像没有电阻似的。安培提出这种理论完全是推测性的，因为那时还不知道有任何电流可以永远不断地流动。今天我们认为这种物质的磁性理论是基本正确的，并称之为分子电流理论。这些基元电流回路就是由电子的自旋及电子绕核作轨道运动而形成的。

磁极

磁体上磁性特别强的区域。

说明：

(1) 磁体的磁极永远是成对出现的。悬挂的条形磁铁待转动停止后，其一端总是指向北方，称为北极 (N 极)，另一端则指向南方，称为南极 (S 极)。不同磁体之间，同名极相互排斥，异名极相互吸引。人们最早发现的磁现象完全类似于静止电荷间的相互作用，同性相斥，异性相吸。所以，历史上人们曾认为物质的磁性是由磁荷引起的，所谓磁极就是同种磁荷最集中的地方，磁性的极端所在之处，故有此名。

(2) 现代的磁学理论，正确揭示了物质磁性的电本质，否定了磁荷的存在，磁极只是磁性较强、较集中所在处的一个名词。至于说到磁单极，那完全是量子理论中的一个概念 (参见磁单极)。

(3) 值得注意，有的条形磁铁 (尤其以人造永磁铁见多)，其南北极并不在沿磁铁长度方向的两端，而是在宽度方向 (横向) 的两端。如电冰箱门的磁性密封条，文具盒旁侧的磁性吸条。磁极在磁铁上的位置是由充磁 (通以单向脉冲强电流) 时取的方向决定的。

磁单极

微观世界可能存在的一种只具单一磁极（磁北极或磁南极）的粒子。

说明：

(1) 磁单极理论的提出，最早与电荷量子化有关。根据量子力学要求，所有波函数在沿任意闭合曲线绕行一圈以后，其相位的变化值应当相等。由此，狄拉克得出了磁单极子的概念，即与所有带电粒子具有电荷 q 一样，磁单极子具有单一磁荷 g ，电荷 q 与磁荷 g 有如下的量子化公式

$$qg = nh,$$

式中 $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ； h 是普朗克常数。当取 $n = 1$ ，电荷 q 取电子电荷 e 时，最小的磁单极子的磁荷为

$$g_0 = \frac{h}{e} = 4.13560 \times 10^{-15} \text{ 伏特} \cdot \text{秒}。$$

(2) 磁单极子的场尽管微弱，但由于低温技术的发展，探测磁场的精度已达 10—15 特斯拉，因此，实验上探测磁单极是可能的。但所有实验的答案都是否定的。唯一的例外是卡夫雷拉 (B. Cabrera) 在 1982 年 2 月 14 日发现了一个可能是磁单极的事例，但没有重复观察结果的报导。

(3) 宏观电磁现象中的磁极永远是成对出现的，不存在单独的磁极，在宏观电磁理论中没有磁荷的地位。若发现磁单极子，则建立在不存在单独磁荷基础上的麦克斯韦电磁理论也不会失效。那时只需对经典电磁理论作些修改，就可包容磁单极而不影响整个理论框架。

磁化

使原来不显现磁性的物体在磁场中获得磁性的过程。最易磁化的物质是铁磁性物质，如纯铁，碳钢。

说明：

(1) 铁磁性物质在外加磁场（称磁化场） H 中的磁化过程较复杂，常可用磁化曲线表示。

(2) 铁磁性物质的磁化现象不能用经典理论解释，必须用量子力学理论来解释。量子力学理论认为，电子之间存在一种“交换作用”，它使电子自旋在平行排列时能量处于最低状态。这种“自发的”排列使铁磁介质内部形成了磁畴。

在外磁场作用时，磁畴中自发磁化方向转向外磁场方向，由于不是个别分子的转向，而是一个个磁畴区的转向，铁磁质就呈现出很强的磁性。

磁滞现象

铁磁介质的磁化强度 M 不随外磁场 H 同步增加，同步减小，呈现 M 滞后 H 变化的磁化现象。简称磁滞。

矫顽力

为使已磁化的铁磁质失去磁性而必须加的与原磁化方向相反的外磁场强度。

说明：

(1) 矫顽力不仅与铁磁质的性质有关，而且还与铁磁质原先的磁化强度有关。

(2) 在制造永磁体时，需选择矫顽力大的材料，以尽可能保存磁性，不使消失。

(3) 在制造变压器、发电机、电动机等铁心或变频无线电电感元件时，需选择矫顽力小的材料，以使电流切断后尽快消失磁性。

剩余磁化强度

又称顽磁。铁磁性物质经过磁化，当外磁场撤去后仍能保存的一些磁性。

磁性饱和

磁化强度随外加磁场的增加而增加，到一定值后不再增加，达到饱和的现象。

磁化强度

描述磁介质磁化程度的物理量。它是矢量，常用 M 表示，等于单位体积内分子磁矩 m 的矢量和，即

$$M = \frac{\sum m}{\Delta V}。$$

说明：

(1) 磁介质的微观机构，最简单的模型常用一个小磁矩 m 来代表每一个分子电流。当介质未受外加磁场作用、未被磁化时，由于分子的热运动，各分子磁矩的取向各不相同，介质在宏观上并不呈现磁性。当介质放入外磁场中，内部分子磁矩受外磁场作用而转向一致（指分子磁矩的指向向外磁场方向偏斜），介质呈现磁性，即被磁化。利用单位体积内分子磁矩转向一致的程度，描述介质内部各处的磁化强度 M ，假如处处均匀磁化， M 就是一个常矢量。

(2) 磁化强度矢量 M 的大小与介质的性质及外磁场的强弱有关。对于非铁磁性介质， M 的大小与外磁场强度 H 成正比，即

$$M = X_m H,$$

式中比例常数 X_m 称为介质的磁化率，对于顺磁质， $X_m > 0$ ；而抗磁质， $X_m < 0$ （抗磁质的磁化机制与以上不同，这里不另叙述）。当介质为铁磁质时，以上线性关系不成立，铁磁质的 X_m 不但很大，且是磁场强度 H 的函数。

磁矩

表征一个电流回路磁效应强弱的物理量。它是一个矢量，大小等于回路中的电流强度 I 与回路面积 S 的乘积，方向用右螺旋法则确定，即以电流流向为螺旋转动方向，螺旋前进方向即为该回路磁矩方向。它常用符号 m 表示为

$$m = ISn,$$

式中 n 为电流回路所在平面的法线正方向。

说明：

(1) 在国际单位制中，磁矩的单位是安培·米²。

(2) 磁矩亦称磁偶极矩，历史上是利用一对靠得很近的磁荷来定义的，完全与电偶极矩相类似。

(3) 磁矩这一概念，现在更多地用来描述微观粒子，是表征微观粒子的一个重要物理量。除了用分子磁矩来描述分子电流外，还用轨道磁矩来描述原子中电子的绕核运动，用电子自旋磁矩来描述电子的自旋。此外，原子核、质子、以及不荷电的中子等基本粒子均具有磁矩。

磁通量

表征磁场流散特性的物理量，又称磁感应通量。

通过磁场中任一面元的磁通量等于磁感应强度 B 在该面元法线方向上的分量与该面元的乘积，即

$$\Delta \phi = B \cdot \Delta s = B \Delta s \cos \theta,$$

式中 θ 为面元法线与 B 之间的夹角。

说明：

(1) 在国际单位制中，磁通量的单位是韦伯，

$$1 \text{ 韦伯} = 1 \text{ 特斯拉} \cdot \text{米}^2。$$

(2) 磁通量与磁力线均是描述磁场分布的物理量。磁力线可与流体的流线相类比，磁通量则可与流量相类比。所以，磁通量是以磁力线通过场中某个面积的条数，即从力线的流散特性方面来描述场的特性。其最大特征是通过任意闭合面的磁通量永远为零，这与磁力线永远闭合，不存在孤立磁荷是一致的。表示磁场是一个无源场。

(3) 在交变场中，磁通量的变化率定量地确定了感生电动势的大小。在磁路设计中，磁通量亦是必须考虑的一个重要物理量。

磁感应强度

描述磁场强弱和方向的物理量。常用符号 B 表示。

场中某点的磁感应强度的方向表示磁场方向，即该处小磁针 N 极的指向，它的大小可以用进入场中的运动电荷所受力的的大小来确定，即

$$B = \frac{F_{\text{最大}}}{ev},$$

式中 e 、 v 分别为运动电荷的电量及速度， $F_{\text{最大}}$ 为运动电荷当其速度方向与磁场方向垂直时所受的力（电荷在场中该点沿不同方向运动时受到的力的大小均不同，但以其速度方向与磁场方向垂直时受的力最大）。

说明：

(1) 在国际单位制中，磁感应强度的单位是特斯拉，

1 特斯拉=1 牛顿/安培·米；

常用的单位还有高斯，

1 高斯= 10^{-4} 特斯拉。

(2) 计算电流产生磁场的基本公式是毕奥-萨伐尔定律。定律把任何闭合回路产生的磁感应强度 B 看成是回路上各个电流元 Idl 产生的元磁感应强度 dB 的矢量叠加，即

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

式中 r 为电流元到考察点 P 的位置矢量， μ_0 为真空中的磁导率。

通以电流强度为 I 的无限长直导线周围（距电流为 r 处）的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} e_0.$$

通以电流强度为 I 的圆形导线（半径为 R ）中心的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} n_0.$$

通以电流强度为 I ，单位长度绕以 n 匝的长直螺线管内部的磁感应强度为

$$B = \mu_0 n I l.$$

以上 e_0 、 n 、 l 分别为 B 方向的单位向量。

原则上任何电流的磁场均可由毕奥-萨伐尔定律求得，但可能较繁琐，所以常用典型电流的场的叠加来计算。

(3) 磁感应强度 $B=B(x, y, z, t)$ 能描述空间各点，包括真空或介质内的磁场的分布。由于历史原因，取名为磁感应强度，而未称为磁场强度。磁场强度不表示空间各点磁场的大小，只是讨论磁介质内部磁场时引入的一个辅助量（参见磁场强度）。

$B=B(x, y, z, t)$ 与时间 t 亦有关，表示变化场，假如 B 不随时间变化，则是恒定磁场或称静磁场。

磁场强度

讨论磁介质内部磁场时，引入的一个辅助量。常用符号 H 表示，它与磁感应强度 B 的关系为

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

式中 B 为介质内部的磁感应强度， M 为介质的磁化强度。

说明：

(1) 历史上，人们与电荷产生电场类比，认为磁场由磁荷产生，并用类似电场强度的定义，规定单位磁荷所受的磁场力称为磁场强度 H 。

后来，人们认识到磁荷并不存在，真正激发磁场的是电流，在磁场中受到力的作用的也是电流。从电流观点建立起的磁场学说发现，用电流在场中受力所定义的磁场强弱和方向的物理量是磁感应强度 B ，它与 H 有如上的关系。

(2) 电流的磁场学说认为，传导电流激发的磁场，在介质内部引起分子电流的磁矩转向，使介质磁化。因此，在介质内部的磁感应强度 B ，应由传导电流激发的场 B_0 和介质内部束缚电流激发的场 B' 叠加而成，即

$$B = B_0 + B'。$$

传导电流是可测量的，但束缚电流实际上是无法测量的，所以，在讨论磁介质内部的磁场时，希望首先计算出一个辅助量，这个量所代表的磁场的强弱仅仅与传导电流所激发的场有关，而排除介质束缚电流磁场的影响，这个量恰好就是磁场强度 H 。在计算介质内部磁场大小时，可以先计算出 H ，然后根据介质的磁导率 $\mu = \mu_0 \mu_r$ （用实验可以测出各种介质的 μ_r ），就能确定介质内部的磁感应强度 B ，即

$$B = \mu H。$$

因此，以电流产生磁场的观点看， H 只是一个用于确定 B 的辅助量。

(3) 磁场强度 H 的环流与传导电流 I 的关系，可由安培环路定律确定，即

$$\oint_L H \cdot dl = \sum I。$$

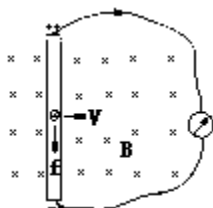
电磁感应

导体在静磁场中运动或者由于磁场变化而在回路内产生电动势或电流的现象。由此产生的电动势或电流相应称为感应电动势或感应电流。

说明：

(1) 从物理本质或者说从感应电动势产生的原因，电磁感应可分为两类：

①导体在稳恒磁场中运动，导体中的自由电子受到洛仑兹力的作用，使导体两端出现正、负电荷的堆积（如图），形成电势差，这段导体就如同一个电源，该电势差就是这个电源的电动势。这样形成的电动势，称为“动生电动势”，其大小为



$$\varepsilon = \oint (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l},$$

式中 v 为导体运动的速度， B 为磁感应强度，积分遍及整个导体回路。若运动导线为一段长为 l 的直导线，速度 v 与 B 、 l 两两相垂直，这时以上的积分可简化为

$$\varepsilon = Bvl。$$

②由磁场变化而产生的电动势称为“感生电动势”，计算式为

$$\varepsilon = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}。$$

以上第一个积分为线积分，积分回路可以选择任意回路，回路上并不需要在导线；第二个积分为面积分，积分曲面是以线积分回路为边界之曲面。式中 E 是由变化磁场 B 所产生的电场，它是一种涡旋电场（称为感生电场）。在没有导体的空间同样存在，在闭合回路上积分不为零，而是此回路上的电动势。

(2) 电磁感应所反映的变化磁场激发感生电场的事实，反映了电与磁之间紧密相连、互相依存的关系。既然变化的磁场能激发电场，那么变化的电场亦应能激发磁场，麦克斯韦由此出发，提出了“位移电流”的假设，并总结、推广，建立了完整的经典电磁场理论。电磁感应现象及其规律的发现，极大地推动了电磁学的发展，它是从静电场、稳恒电磁场理论发展到交变电磁场理论的一个转折点。同时，电磁感应现象亦广泛地被应用于发电机、电动机、变压器等等一系列电力工程之中，是工农业生产进入电气化的重要理论基础。

法拉第电磁感应定律

导体回路中感应电动势 ε 的大小与穿过回路的磁通量的变化率成正比，即

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}。$$

说明：

(1) 在国际单位制中，以上公式中磁通量 ϕ 用韦伯、时间 t 用秒作单位，电动势 ε 的单位为伏特，即

$$1\text{伏特} = 1\frac{\text{韦伯}}{\text{秒}}。$$

(2) 法拉第总结了大量电磁感应的实验现象，正确得出了磁通量的变化引起感应电动势的结论。值得指出，感应电动势比感应电流更能反应电磁感应现象的本质。因为闭合回路中有电流时，回路中必定存在电动势；即使不存在导体回路，没有感应电流发生，感应电动势仍然可以存在；另外，回路中的感应电流的大小除了与电动势大小有关外，还与回路电阻大小有关，而电动势则与回路电阻以至回路是否存在都没有关系。

(3) 定律正确指出感应电动势与穿过回路的磁通量的变化率成正比，与回路中穿过的磁通量的多少无关。定律正确反映了电磁感应是一个动态过程，磁通量变化越快，越剧烈，感应电动势越大。

(4) 以上公式仅适用于单匝导线组成的回路。假如是多匝线圈，那么当穿过线圈的磁通量变化时，整个线圈中产生的电动势就等于各匝线圈产生的电动势之和。当每匝线圈磁通量变化相同时， N 匝线圈的电动势 ε 为

$$\varepsilon = -N\frac{d\phi}{dt}。$$

(5) 法拉第电磁感应定律中的负号表示感应电动势（的正、负总

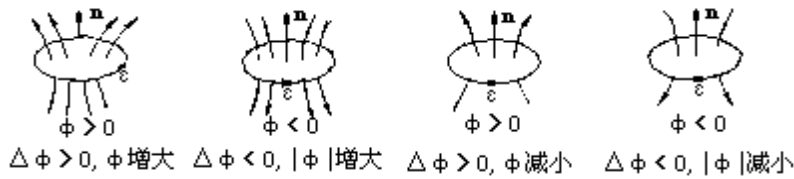
量变化率 $\frac{d\phi}{dt}$ 的正负相反。所以,这个负号实际上反映了感应电动势的

方向,是楞次定律的数学表述。例如,当正方向 ϕ 增大,则 $\frac{d\phi}{dt} > 0$, 这

时 ε 取负号,表示感应电动势方向与绕行方向相反;而当反方向 ϕ 增大

时, $\frac{d\phi}{dt} < 0$, 这时 ε 取正号,表示电动势方向与绕行方向一致,其他依

此类推,如下图所示。



楞次定律

闭合回路中感应电流的方向，总是使得它所激发的磁场阻止引起感应电流的磁通量的变化。

说明：

(1) 楞次定律是根据判断回路中的感应电流方向来确定感应电动势的方向，是电磁感应定律关于确定感应电动势方向的一种表述。

在某些特定情况下，如自感、互感现象中，不必先确定感应电动势方向，可以利用楞次定律直接确定感应电流的方向，这样处理更加简单、敏捷。

(2) 楞次定律的实质是能量守恒定律在电磁感应现象中的特殊表述。按照楞次定律，把磁棒插入线圈或从线圈中拔出时，都必须克服斥力或引力做机械功，这个功转化为感应电流所释放的焦耳热。事实上，所有电磁感应现象中，凡出现感应电流时，都必须做功消耗能量以使线圈（闭合回路）中的磁通量改变。假如产生的感应电流不是阻止原有磁通量的改变，或者反而加剧其磁通量的改变，那么能量就会无中生有，而且愈来愈多，这是违反能量守恒定律的。

(3) 若不需要具体说明感应电流的大小及方向而只需说明感应电流所引起的机械效果时，利用楞次定律就显得特别方便。如电磁阻尼现象可解释为：一切金属导体在磁场中移动切割磁力线时，在导体中感应出的电流所产生的磁场总是阻碍其运动的，因而形成阻尼。从这里亦特别生动地反映出，楞次定律正是能量守恒定律在电磁感应现象中的体现。

超导

在一定温度下一些导电材料的电阻突然减小为 0 的性质。

说明：

(1) 超导是本世纪的重大发现之一。1911 年荷兰物理学家昂尼斯 (H. K. Onnes) 发现汞在温度 4.173K 以下时，电阻突然减小到 0；并首先称此现象为“超导”。自此以后，人们又相继发现了许多金属（如铟、铌、锡、铅、铝）、合金（如铌-钛、铌-锆）和化合物（如 Nb_3Sn 、 Nb_3Al ）在低温下都具有超导的性质。

质。1985 年之前发现的超导材料，其要求温度都在 23.2K 之下的极低温度区，实际应用的局限性很大。寻求具有较高温度下的超导材料，始终是这一领域科学家的奋斗目标。

1986 年 4 月瑞士科学家缪勒和柏诺兹首次发现镧钡铜氧在温度达 30K 以上时具有超导性。由此，高温超导材料的研究有了突破性的进展。美国、日本和我国都相继报道了获得温度为 40K、46.3K、48.6K、98K、123K（甚至更高温度）的超导材料。目前大部分材料的转变温度仍然在液氮温区（氮的液化温度 126.16K）。各国在研制高温超导的同时，超导材料技术在应用上的开发研究已实际启动并悄然深入展开。有人预计，在本世纪末、下世纪初，高温超导材料及应用将有重大发展。

（2）超导体的电磁特性

超导体的电阻准确为 0，即按目前的测量精度，超导体的电阻率至少低于 $10^{-21} \Omega \cdot m$ 。这样小的电阻率已不会有实际后果。因此，超导体中一旦形成电流，只要保持超导状态不变，其电流就不会减小。这种电流称为“持久电流”。有人在超导铅环中激发了几百安培的电流，在持续两年半的时间内没有发现可观察到的电流变化。超导电流不需要电场维持（超导体具有完全的抗电性，即它的体内的电场强度 $E=0$ ），也不产生焦耳热损耗，超导体是一种真正的理想导体。

超导体的另一个重要特性是完全的抗磁性。这是 1933 年迈斯纳、奥森弗尔德等人最先从实验中发现的。超导体内部的磁感应强度恒为 0，即超导体能将体内的磁场完全“排挤”出去。这里包含两种情况：一种是把原来内部没有磁场的超导体样品移到磁场中时，由于移入过程中穿过样品的磁通量发生变化，而在样品表面产生感应电流，感应电流在超导体内部产生的磁场正好抵消外磁场，因而超导体内的磁场为 0；另一种是已处在磁场中的样品，原先是非超导态的，内部有磁场，当其温度降低而转变成超导态时，其内部磁场也会完全消失。这是因为物质在转变为超导体过程中，在其表面也会产生电流，这电流在其内部产生的磁场完全抵消了原来的磁场。材料具有减弱其内部磁场的特性叫做抗磁性，超导体因能使其内部磁场为零，因此说它是具有完全的抗磁性。超导体内部磁场为零，磁力线完全不能通过超导体的现象，称为迈斯纳效应。

具有持久电流的超导环能产生很强的磁场，而且只消耗很少的能量，但是强磁场对超导体有相反的作用，即强磁场可以破坏超导电性。例如，在绝对零度附近，0.041T 的磁场就足以破坏汞的超导电性。接近临界温度时，甚至更弱的磁场也能破坏超导电性。破坏超导电性的最小磁场称为临界磁场，以 B_c 表示。临界磁场的存在限制了超导体中能够通过电流。例如，在一根超导线中有电流通过时，产生磁场，当电流增大，它所产生的磁场超过临界磁场时，导线的超导电性消失，磁场可进入导线内部。比如，在绝对零度附近，直径为 0.2cm 的汞超导线，最大允许通过 200A 的电流，电流再大，它将失去超导电性。实用的超导材料要求临界磁场 B_c 越高越好。目前已制备出高临界磁场的超导材料，如 Nb_3Sn （铌三锡）的 B_c 高达 22 特斯拉。

（3）关于超导电性的理论解释

超导电性是一种宏观的量子现象，只有依据量子力学才能给予正确的微观解释。1957年巴丁（J. Bardeen）、库柏（L. N. Cooper）和斯里弗（J. R. Schrieffer）联合提出了超导的微观理论（现在被称为BCS理论）。这一成就使他们三人获得了1972年的诺贝尔物理学奖。

BCS理论解释产生超导现象的关键是，在超导体中电子成对出现（叫做“库柏对”）。如何形成电子对，又如何利用库柏对解释超导现象，涉及到很多量子力学的知识，这里从略。关于高温超导材料的理论，至今还处在开创阶段，这些材料的超导机制不能用BCS理论来解释。

超导体

指具有超导性质的导体。

洛仑兹力

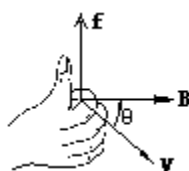
运动电荷在电磁场中所受的作用力。洛仑兹力 f 为

$$f=q(E+v\times B),$$

式中 q 为电荷， v 为电荷运动速度， E 与 B 分别为电场强度与磁感应强度。显然，运动电荷在电磁场中所受的力是电场、磁场分别对电荷作用力之合力，有时把公式中的第二项，即电荷在磁场中所受的力称为洛仑兹力。

说明：

(1) 关于洛仑兹力的方向，公式中第一项 $f_e=qE$ 是电荷所受电场力，对于正电荷来说，其受力方向即为电场方向；而对于负电荷，则力的方向正好相反。公式中第二项 $f_m=qv\times B$ 是电荷在磁场中受到的作用力，它是速度 v 与磁场 B 的矢积，方向用右手螺旋法则确定，即右手四指先沿 v 的方向然后经小于 180° 角转向 B 的方向，伸直拇指所指方向即运动正电荷所受力的方向（右图）。假如为负电荷，则受力方向正好相反。



洛仑兹力公式所表示的力的大小可分别表示为

$$f_e=qE, f_m=qvB\sin\theta,$$

式中 θ 为 v 与 B 之间的夹角。

若上式中所有的量均采用国际单位制中的主单位，那么力的单位是牛顿。

(2) 洛仑兹力的方向永远与运动速度垂直，所以该力只改变其速度的方向而不改变速度的大小。由此可见，该力永远不对电荷做功。

(3) 值得指出，洛仑兹力公式中运动电荷的速度 v ，常常被随便说成是电荷相对于磁场的速度，其实这是错误的。正确的应当是电荷相对于所选惯性参考系的速度。对于稳恒电流的磁场，场源与参考系相对静止时，以上两种说法才是等价的。另外，“相对于磁场的速度”，实际上就把磁场看作参考系了，应当注意“场”是不可作为一个参考系的，因为它本身是一些相对量，随不同参考系而变换。

(4) 洛仑兹力并不遵循牛顿第三定律，即不可能找到像经典力学中那种同时出现、大小相等、方向相反的反作用力。这是因为运动电荷在空间不仅激发变化的电场，而且还激发变化的磁场，即产生交变的电磁场，电磁场在空间以光速传播，虽然相互作用通过电磁场传播速度很快，但总需要时间，这样就使牛顿第三定律成立的前提——超距作用——不再存在。但是，如果考虑到运动电荷和电磁场之间的动量交换，那么对于由电荷与场所构成的封闭系统来说，包括电磁场在内的动量守恒定律还是成立的。

(5) 带电粒子在电磁场中的运动及其应用一个质量为 m 、电量为 q 的粒子，以速度 v 沿垂直于磁场方向进入一均匀磁场（右图）。由于它受到的洛仑兹力 $f_m=qvB$ 总与速度垂直，粒子在垂直磁场的平面内作圆周运动，利用牛顿第二定律很容易算出粒子圆运动的轨道半径 R 为



$$R = \frac{mv}{qB},$$

而圆运动的周期，即回旋周期 T 为

$$T = \frac{2\pi m}{qB}。$$

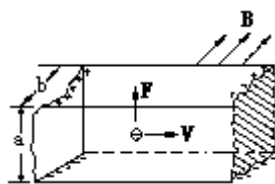
从上两式可见，粒子进入磁场后，其回旋半径与速度成正比，而回旋周期与速度无关。带电粒子在磁场中作回旋运动的这些特点，常用来制造回旋加速器、质谱仪、电子显微镜等仪器。

霍耳效应

指在通以电流的导体或半导体上，沿垂直于电流方向加一磁场，则在导体或半导体的横侧面上出现电势差的现象。

说明：

(1) 霍耳效应是由于载流子在磁场中受到洛仑兹力的作用（下图），在载流导体的横侧面上造成电荷堆积，形成横向电场。随着底部和顶部多余电荷的增多，横向电场不断增强，当电场对电荷的作用力（ qE_t ）与磁场对电荷的作用力（ $qv \times B$ ）相平衡时，载流子恢复沿原来水平方向的漂移运动，电流又重新恢复为稳恒电流。由以上平衡条件



$$qE_t = qvB$$

可知，横向电场大小为

$$E_t = vB,$$

在导体横向两侧出现的电势差为

$$V_t = E_t a = vBa,$$

式中 a 为电场方向导体的宽度。

(2) 导体中电流 I 与载流子漂移速度 v 有如下关系：

$$I = nabqv,$$

式中 n 为载流子浓度。由此式得出的 v 代入上式，则得

$$V_t = \frac{IB}{nqb}。$$

可见霍尔电势差的大小与电流 I 成正比，与磁感应强度 B 成正比，与导

体厚度 b 成反比，即 $V_H \propto \frac{IB}{b}$ ，这与实验测量结果完全一致。

(3) 霍尔效应常用于半导体的测试，还可制成高斯仪，简单而精确地测量磁场 B 。

安培力

载流导线在磁场中所受的作用力。因法国物理学家安培首先在实验上发现，故称安培力。通有电流强度为 I 、长度为 l 的直导线，放在磁感应强度为 B 的均匀磁场中，导线所受安培力的大小为

$$F = IBl \sin \theta,$$

式中 θ 为导线中电流方向与磁场 B 方向之间的夹角；力垂直于 I 与 B 确定的平面，其方向可以用右手螺旋法则确定，即右手四指首先沿着电流方向，然后弯向 B 方向，伸直的大拇指（垂直于四指运动平面）的方向即导线受力的方向，这与中学教材上介绍的左手定则是一致的。

说明：

(1) 在安培力的公式中， I 、 B 、 l 均采用国际单位制单位，则安培力的单位是牛顿。

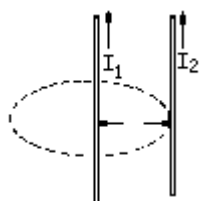
(2) 安培力（包括方向）可用矢量公式表示为

$$F = I \mathbf{l} \times \mathbf{B}.$$

(3) 一般形式的安培力公式，用电流元 $I d\mathbf{l}$ 在磁场 B 中所受力的矢量和表示，即有

$$F = \int I d\mathbf{l} \times \mathbf{B},$$

式中积分是对通电导线作线积分， B 可为一般分布之非均匀磁场。



(4) 两条平行通电直导线之间的作用力，可以通过以上公式简单地算出设两条平行直导线相距为 r ，分别通以电流为 I_1 及 I_2 ，电流 I_1

在 I_2 处所产生的磁感应强度的大小是 $B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$ ，所以， I_2 在 B_1 磁场处所受安培力为

$$F = I_2 l B_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r},$$

单位长度通电导线所受到的力为

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}.$$

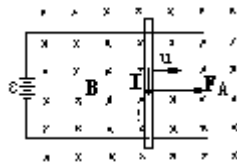
可见两平行通电导线间的相互作用力的大小与两电流的乘积成正比，与它们之间的距离成反比；作用力方向根据左手定则或右手螺旋法则可确定：当两导线通以同向电流时，相互吸引；当通以反向电流时，相互排斥远离。

(5) 通电线圈在匀强磁场中所受力矩的大小，不论形状如何，均等于

$$M = ISB \sin \theta,$$

式中 θ 为线圈磁矩方向与 B 之间的夹角。通电线圈在磁场中受力矩作用而转动，以线圈磁矩沿 B 方向为（稳定）平衡位置。

(6) 安培力与洛仑兹力两者既有联系又有区别。载流导线在磁场中所受的安培力，实质上是导线内自由电子所受洛仑兹力的宏观表现。但是，洛仑兹力的方向始终与运动电荷的速度方向垂直，因此它永远不作功，而载流导线在磁场中运动时，安培力是作功的，这两者并不矛盾。



设长为 l 、通有电流为 I 的直导线，在均匀磁场 B 中以速度 u 向右运动（左图），显然导线所受安培力为

$$F_A = IlB,$$

此力的方向与直导线移动方向一致，因此，安培力在 Δt 时间内所作的功为

$$\Delta W_A = F_A u \Delta t = IlBu \Delta t.$$

设导线中自由电子定向漂移速度为 v ，考虑到整个导线有向右运动的速度 u ，电子相对参考系的速度为

$$V = v + u,$$

电子所受洛仑兹力为

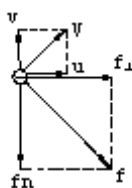
$$\begin{aligned} f &= -eV \times B = -ev \times B - eu \times B \\ &= f_{\perp} + f_{\parallel}. \end{aligned}$$

如图所示， f_{\perp} 及 f_{\parallel} 分别为垂直于导线及平行于导线的两个力，亦可看作是总的洛仑兹力的两个分力。其中 f_{\perp} 方向与 u 一致，该力对电子所作的功为

$$\Delta W_{\perp} = f_{\perp} u = evBu \Delta t,$$

考虑到载流导线中自由电子定向漂移速度 v 与电流强度 I 的关系

$$I = nSve,$$



式中 n 为自由电子平均密度， S 为导线横截面， e 为电子电荷。此式代入上式有

$$\Delta W_{\perp} = e \frac{I}{uSe} Bu \Delta t = \frac{IBu}{nS} \Delta t,$$

两边乘上导线段长度 l ，则有

$$\begin{aligned} nSl \Delta W_{\perp} &= IBlu \Delta t, \\ N \Delta W_{\perp} &= \Delta W_{\perp} = IBlu \Delta t = \Delta W_A. \end{aligned}$$

式中 $N = nSl$ 为导线段中总电子数。显然可见，洛仑兹力沿导线垂直方向的分力所作功的和正是安培力所作的功。而另一沿平行于导线方向的分力所作的功一定为负功。且数值与上述功相等，所以，洛仑兹力作的总功等于零，即洛仑兹力 f 与 V 垂直，不作功。从物理意义上说， f_{\parallel} 所作的负功，即为外电源 \mathcal{E} 提供的电场力，维持电子向上运动所作的功。从能量转化角度来说，此电路中通过电源把其他形式的能转化为电能。当电流流过回路时，一部分电能通过电阻转化为焦耳热，另一部分在通过磁场时，由洛仑兹力的一个分力转变为安培力而作功，实现由电能向机械能的转化。

导体

指能够良好地传导电流的物体，其电阻率在 $10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 以下者。如铜、铝、铁等金属及某些合金和酸、碱、盐溶液。

说明：

(1) 物体能否导电，不是绝对的，故通常以电阻率的大小的范围来划分导体与绝缘体。

(2) 导体的导电机制，是由其内部可以自由移动的自由电子或离子所决定的。金属内部存在大量的自由电子，称为“第一类导体”；酸、碱、盐溶液（亦称电解液）中，有许多带有不同电荷的离子，离子浓度越高，导电性能越好，利用离子导电的电解液称为“第二类导体”。

绝缘体

指几乎不导电的物质，其电阻率在 $10^7 \Omega \cdot \text{m}$ 以上者。又称电介质。如玻璃，石英，云母，陶瓷，塑料，橡胶，金属氧化膜，干燥的空气、木头。

说明：

(1) 绝缘体内部分子、原子由其共价键或离子键结合，其原子核与电子彼此紧密束缚，几乎不产生自由电子或离子，物质内部没有可以自由移动的电荷，所以不导电，绝缘性能很好。

(2) 绝缘体在外场作用下，内部电偶子转动或正、负电荷相对移动，介质便极化，当外电场特强时，电介质会被击穿而失去绝缘性。

半导体

指导电性能介于导体与绝缘体之间，电阻率大约在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 的物质。如锗、硅及某些化合物。

说明：

(1) 半导体的导电特性，主要不是其导电性能介于导体与绝缘体之间，而是其各种导电性能不固定，容易变化，亦容易控制。

(2) 半导体的特点有：①纯净的半导体导电性能很差，但掺入少量杂质后，导电性能可以接近导体，电阻率能提高好几个数量级；②随温度变化（在某一温度区域内），半导体的电阻率发生急剧变化，并往往出现负的温度系数；③光照可以使半导体电阻率变小，而金属一般不变。

(3) 半导体导电方式有电子导电和空穴（正电荷）导电两种，电子导电的称 N 型半导体，空穴导电的称 P 型半导体。

(4) 半导体的导电特性，均与其内部能带结构有关。我们知道，金属导体的价带（价电子所在的能带）并不为电子所占满，或者其价带虽然为电子所占满，但与上面一个空带在能量上有部分交叠，因此，价电子还是相当自由的，即在外场作用下很容易改变其能量状态成为自由电子。而半导体的价带被电子所填满，与上面一个空带隔开一定的能量距离，称为“禁带宽度”。室温下，一定数量的价电子可以从满带跃迁到上面的导带中成为自由电子，使半导体具有一定的导电能力，但自由电子比金属少得多，所以电阻率比金属大。而绝缘体的禁带宽度比半导体大得多，基本上没有什么自由电子，所以几乎不导电。

压电效应

某些电介质晶体在外力作用下引起应变时，能在某些方向上产生与应变成正比的电极化现象，从而在晶体的某些相应表面上产生异号的极化电荷，两端表面间出现电势差的现象。能产生压电效应的晶体称为压电晶体。

说明：

(1) 压电效应是 J·居里和 P·居里兄弟在 1880 年发现的。压电晶体都是非对称晶体，大致可分为两类。一类是单晶，如石英、酒石酸钾钠（洛瑟盐）、锆酸铋；另一类称为压电陶瓷，如钛酸钡、锆钛酸铝。1969 年还发现某些有机薄膜，如聚偏氟乙稀具有优良的压电性。

某些压电晶体具有铁电性，即在一定温度范围内具有自发电极化的性质，而且自发电极化的方向能因外电场作用而重新取向。钛酸钡等压电陶瓷都是铁电晶体。

(2) 压电晶体的应用非常广泛，能制成压电电声换能器，晶体振荡器，压电点火器等，另外，也可利用它来产生超声波。

电致伸缩

电介质在电场中发生弹性形变的现象。

说明：

(1) 电致伸缩是压电效应的逆效应。

(2) 电致伸缩的物理机制是电介质置于电场中，它的分子发生极化，沿着电场方向，一个分子的正极与另一个分子的负极衔接，正负极互相吸引，整个电介质就在这个方向上收缩，直到其内部的弹性力与电引力平衡为止。

交流电

指大小和方向随时间变化的电流。

说明：

(1) 交流电随时间变化的形式多种多样，交流波形千变万化，但是，所有非正弦变化或非周期变化的交流电都可以看作许多不同频率、不同振幅的正弦交流电的叠加。

(2) 交流电的有效值，是在相同时间内产生相同热量的直流电值，即交流电的方均根值，为

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}。$$

对于正弦交流电 $i = I_m \sin \omega t$ ，则有

$$I_{\text{eff}} = I_m / \sqrt{2}。$$

就是说交流电的有效值是最大值的 0.707 倍。

交流仪表上的读数、交流电器设备上标明之额定电压及额定电流均为有效值。

正弦交流电

随时间按正弦规律作周期性变化的交流电。即

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi_0) ，$$

式中 I_m 为最大值（振幅）， ω 为角频率， $\omega t + \varphi_0$ 为周相（相位）， φ_0 为初相。

说明：

(1) 不但电流，而且电压、电动势都可以随时间按正弦规律变化，总之，它可以看作是一种电的振动，与机械振动类似。正弦交流电的特性，由振幅、频率、相位三个因素决定。两个交流电的叠加相当于两个振动的叠加，所以，特别应当注意相位之间的关系。两个交流电（电压、电流或电动势），如果它们的相位相同，则可以用其振幅简单相加；若相位不同，即存在相位差，则应把每个交流电看作一个矢量，然后作矢量的叠加。

(2) 市电，即电力网所供给的电流都是正弦交流电。我国规定供电的标准频率为 50Hz。民用单相电压为 220 伏，这是电压的有效值，而不是它的振幅（最大值）。

位移电流

电位移通量对时间的变化率，即

$$I_D = \frac{d}{dt} \int \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}_0$$

由于 $I_D = \int \mathbf{j}_D \cdot d\mathbf{S}$ ，则位移电流密度

$$\mathbf{j}_D = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t},$$

而 $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ ，式中 \mathbf{E} 是电场强度， \mathbf{P} 是介质的电极化强度，于是

$$\mathbf{j}_D = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t},$$

式中 $\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ 仅是由于电场的变化所引起的位移电流密度， $\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}$ 称为

极化电流密度。介质的电极化强度与介质中的场强成比例，由此可见，位移电流的实质是变化的电场。

说明：

(1) 位移电流的概念首先是由麦克斯韦在总结、推广电磁理论时，为了使描写磁场特性的安培环路定理，从只适用于稳恒条件推广到一般的交变情况而作为假设引入的。

稳恒电流的磁场满足安培环路定理，即有

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_f,$$

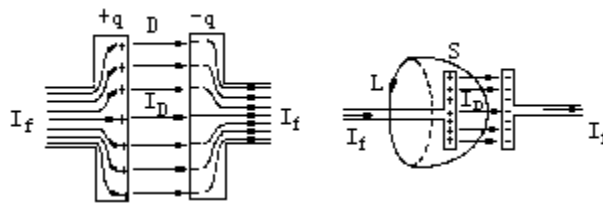
式中 I_f 是穿过以闭合回路 L 为边界的任意曲面之传导电流。对非稳恒电流，安培环路定律不再成立。

麦克斯韦假定在非稳恒条件下，除传导电流激发磁场外，还有位移

电流 $I_D = \frac{d}{dt} \int \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$ 也激发磁场，故磁场的安培环路定理应改写为

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_f + I_D = \int (\mathbf{j}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \cdot d\mathbf{S}.$$

这样即使在传导电流中断的地方，如电容器内部，则因有电位移通量的变化，而有位移电流（如图），传导电流与位移电流合在起保持连续性，改写后的安培环路定理仍然成立。



(2) 早先的安培环路定理只说传导电流是激发磁场的源泉。麦克斯韦假设位移电流存在，把安培环路定理推广到交变情形，这一假设的实质为位移电流同样是激发磁场的源泉。所以麦克斯韦位移电流假设的中心思想是变化着的电场激发涡旋磁场。另一方面我们知道，法拉第电磁感应定律指出变化着的磁场激发涡旋电场。这两者正是产生电磁波的基础，所以，麦克斯韦在提出位移电流假设后，立即预言了电磁场以波动方式传播，即存在电磁波。而赫兹实验验证了电磁波的存在，为位移电流的假设提供了有力的证据。

(3) 名为位移电流，但并不表示有真实电荷在空间移动，只是表征电位移通量的变化，亦即描述电场变化之强弱程度，它与传导电流一样能在周围空间激发磁场，但与传导电流不同，并不产生热效应，亦没有化学效应。

交流电路的欧姆定律

对包括电阻、电容、电感的交流电路，其欧姆定律为

$$U = IZ \text{ 或 } I = \frac{U}{Z},$$

式中 I 、 U 分别为电流、电压值， $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ 为电路阻抗。

说明：

(1) 交流电路利用欧姆定律进行运算时，因 R 、 L 、 C 各元件上电流、电压的相位不同，所以不能简单相加，应考虑其相位后，采用矢量相加的方法。电路的总阻抗可根据欧姆定律最后算出。

(2) 对于 R 、 L 、 C 串联电路，总电压并不等于各段元件上分压之和，即 $U \neq U_R + U_C + U_L$ 。

串联电路每个元件中电流是共同的，所以，以电流为基准，考虑到

电容上的电压落后于电流 $\frac{\pi}{2}$ 相位，电感上的电压超前于电流 $\frac{\pi}{2}$ 相位，

而电阻上的电压与电流同相位，分别用阻抗与电流的乘积表示各元件的电压，则有

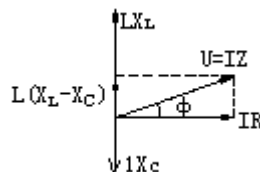
$$\begin{aligned}U_R &= IR, \\U_C &= IX_C = \frac{I}{\omega C}, \\U_L &= IX_L = I\omega L.\end{aligned}$$

考虑到相位，各个电压之矢量图如下图所示，总电压为

$$U = \sqrt{(IX_L - IX_C)^2 + (IR)^2} = I\sqrt{(X_L - X_C)^2 + R^2} = IZ,$$

总阻抗则为

$$Z = \sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + R^2},$$



电压与电流的相位差为

$$\phi = \text{tg}^{-1} \frac{X_L - X_C}{R}。$$

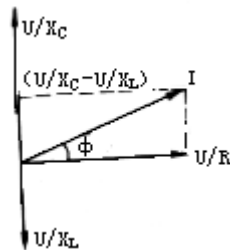
(3) 对于 R、C、L 并联电路，由于每个元件两端电压相同为 U，考虑到各分电流相位不同，分别为

$$I_R = \frac{U}{R},$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = U\omega C,$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L}。$$

各个电流之矢量图如右图所示，总电流为



$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_C} - \frac{U}{X_L}\right)^2}$$

$$= U \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2},$$

总阻抗则为

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}},$$

电流与电压相位差为

$$\phi = \text{tg}^{-1} \frac{\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}}{\frac{1}{R}} = \text{tg}^{-1} \frac{(X_L - X_C)R}{X_C X_L}。$$

自感现象

通电导体回路中，由于本身电流变化而在电路中引起感应电动势的现象。导体回路中所产生的自感电动势的大小与回路中电流的变化率成正比，即

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt},$$

式中比例系数 L 称为回路的自感系数，简称自感。

说明：

(1) 自感现象的本质为电磁感应现象。当回路中电流变化时，通过该回路的磁通量发生变化，从而在回路中产生感生电动势，这感生电动势就是自感电动势。根据楞次定律，自感电动势的方向必定是阻碍回路中电流变化的，也就是说，当回路电流变小时，自感电动势的方向应与回路中原电流方向一致，以阻碍电流的减小；而当回路中电流变大时，回路中的自感电动势方向应与原电流方向相反，以阻碍电流的增加。因而，回路的电感始终是阻碍电流变化的。导体回路的自感现象可与力学中的惯性现象作类比，两者都是阻碍体系本身运动状态的变化。

(2) 自感现象从能量守恒观点来考察，可以看出自感线圈在阻碍电流增长的过程中，本身储藏了磁场能，而在阻碍电流减小的过程中，又把储存的磁场能释放出来，这与电容器的充、放电过程相类似。自感线圈中，当电流增大时，是电源克服自感电动势所做的功转化为磁场能，而当电流减小时，线圈中的磁场能转化为电能，回授给电源。

(3) 值得指出，线圈中的自感电动势阻碍其中电流的变化，并不阻碍电流稳定地通过线圈，电流变化得越剧烈，线圈两端的自感电动势值也越大。在交流电路中，自感线圈两端的压降其实就是它的自感电动势。

自感

表示导体回路产生自感应能力的物理量。

说明：

(1) 自感与回路的形状、大小及周围介质的磁导率密切相关；对于线圈回路，则与匝数、线圈直径及长度，还有线圈内部磁芯材料的性质等有关。

(2) 在国际单位制中，自感的单位是亨利，即回路中电流每秒变化 1 安培时，产生的自感电动势为 1 伏特，这一回路的自感系数为 1 亨利。

(3) 自感可与物体的质量相比较。例如，在线圈回路中所储藏的

磁场能量为 $W_m = \frac{1}{2}LI^2$ ，而物体运动时所具有的动能为 $W_k = \frac{1}{2}mv^2$ ，反

映了内在性质上的共同之处。

(4) 通电线圈中的磁通量 Φ 与其中的电流 I 成正比，即

$$\Phi = LI,$$

这个比例系数也就是线圈的自感。

涡流

放在迅变磁场内的大块导体，在其内部感应出的自成闭合回路、形如涡旋状的感生电流，又称傅科电流。

说明：

(1) 涡流的大小决定于磁场变化的快慢，以及导体电阻的大小。磁场变化越快，导体电阻越小，涡流越大。一般大块导体的电阻很小，因此，大块金属内部常产生很大的涡流。

(2) 涡流在金属内部流动时，电流很大，可以释放大量的热，工业上常利用涡流的热效应制成高频感应加热炉，应用于特种金属的冶炼等方面。

(3) 利用涡流的电磁阻尼现象制成电磁制动和电磁驱动装置，应用于工业生产。

(4) 巨大的涡流在电机、变压器等铁心内部产生大量的热，这对电器是有害的，大量的热损耗也浪费了能源。为了防止涡流的危害，变压器和电机的铁心都采用很薄的硅钢片叠压而成。因硅钢片的电阻率比普通钢大，各片硅钢片之间相互绝缘，增加了电阻，减小了涡流。

互感现象

一个（初级）电路中电流的变化，引起邻近另一个（次级）电路中产生感应电动势的现象。互感电动势的大小与初级电路中电流的变化率成正比，即

$$\varepsilon_2 = -L_{21} \frac{dI_1}{dt},$$

式中 ε_2 为次级电路中的互感电动势， I_1 为初级电路的电流，比例系数 μ 为互感。

互感

表示电路中产生互感应能力的物理量。

说明：

(1) 在国际单位制中，互感的单位为亨利。

(2) 互感系数 L_{21} 的大小与两电路的形状、大小及相互距离，相对位置及周围介质的性质有关。

(3) 若两个自感系数分别为 L_1 及 L_2 的线圈用闭合铁心相连，而初、次级线圈又耦合得十分紧密，即可看作为一种理想的耦合。在理想耦合

时，互感系数 $L_{21} = \sqrt{L_1 L_2}$ 。在一般情况下，两线圈耦合并不很紧密，

即其中某一线 k 称为耦合系数，表示两线圈耦合的紧密程度， $0 < k \leq 1$ 。

(4) k 值的大小，与两线圈的相对位置及周围介质材料的性质有关。在实际应用中，为了减小互感的干扰，应减小 k 值，可采用两线圈垂直放置、远离或屏蔽隔离的办法；若需加强互感，则可将两线圈平行、紧靠放置，或直接选取耦合系数较大的线圈。

感抗

指交流电路中，电感对电流的阻碍作用。数值上等于电感 L 与交流电源的角频率 ω 的乘积，记作 X_L ，即

$$X_L = \omega L = 2\pi fL。$$

说明：

(1) 在国际单位制中，感抗的单位是欧姆。

(2) 电感对交流电的阻碍作用，其物理本质是交流电通过电感时，电感上产生的自感电动势阻碍着电流的变化。设交流电流 $i = I_m \sin \omega t$ ，

则在电感 L 两端的交流电压 u 等于电感上产生的自感电动势 ε_L 的负值,

即 $u = -\varepsilon_L$, 而 $u = -L \frac{di}{dt}$, 所以

$$\begin{aligned} u &= L \omega I_m \cos \omega t \\ &= I_m X_L \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ &= U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \end{aligned}$$

其中 $U_m = I_m X_L$, 可见利用感抗 X_L 来代表自感电动势对电流的阻碍作用, 相当于一个“电阻”。电感两端的电压即等于电流与感抗的乘积, 而电感上

的电压在相位上超前电流 $\frac{\pi}{2}$ 。

(3) 在实际电路中, 电感起着“阻交流通直”的作用。由于 $X_L = \omega L$, 感抗与 ω 、 L 均成正比, 频率越高、 L 越大时, 感抗越大, 则电流越难通过。但对直流电, $\omega = 0$, 则感抗为零, 所以直流电很易通过。

(4) 在纯电感电路中, 感抗阻止交流电通过, 但并不消耗电能。

这时通过电感的交流电流与其两端的电压有 $\frac{\pi}{2}$ 的位相差, 在整个交流电通过的一个周期中, 半个周期(两个 $\frac{1}{4}$ 周期)吸收电能, 将它作为磁能储藏起来; 另半个周期(两个 $\frac{1}{4}$ 周期)磁能释放, 仍“送还”给电源, 所

以并无能量损失。这当然指理想的电感, 实际电感线圈由于存在电阻, 将损耗一部分电能。

容抗

指交流电路中, 电容对电流的阻碍作用。数值上等于电容 C 与交流电源的角频率 ω 乘积的倒数, 记作 X_C , 即

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}。$$

说明：

(1) 在国际单位制中，容抗的单位是欧姆。

(2) 交流电通过电容，实际上就是电容器两极板上不断充、放电的过程。在此过程中，电荷积累而产生的电势差，既反抗电荷的继续堆积，又阻止电荷的释放，即阻碍电流的变化，这就是形成容抗的物理本质。

(3) 对于带同样电量的电容器来说，电容越大，两板的电势差就越小，所以容抗与电容成反比。另一方面，交流电频率越高，充、放电进行得越快，电容器两极板上所能积累的电荷就越少，形成的电势差也小，电容对电流的阻碍作用就小，所以，容抗与频率也成反比。当 $\omega=0$ 时，其容抗为无穷大，即直流电不能通过电容器，所以，电容器是“通交隔直”元件，在电路中用来旁路交流信号，隔断直流电流。

(4) 电容器极板上的电量与电压的关系为

$$q=CU。$$

设交流电压 $u=U_m\sin\omega t$ ，则电容上的电流为

$$\begin{aligned} i &= \frac{dq}{dt} = \omega CU_m \cos\omega t \\ &= \omega CU_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

其中 $I_m = \omega CU_m = \frac{U_m}{X_c}$ 。可见利用容抗 X_c 来代表电容对电流的阻碍

用，相当于一个“电阻”。电容中的电流即等于电压被容抗相除，而电

容上的电流在相位上超前电压 $\frac{\pi}{2}$ ，正好与电感上电流和电压的相位关系相反。

(5) 在纯电容电路上，容抗阻止交流电通过，但并不消耗电能。

这是由于电容上的电流与电压两者有 $\frac{\pi}{2}$ 的相位差。在整个交流电通过的一个周期中，半个周期(两个 $\frac{1}{4}$ 周期)吸收电能，电容器充电；另半个周期(两个 $\frac{1}{4}$ 周期)释放电能，电容器放电，所以并无能量损失。

阻抗

指交流电路中，电阻 R、电感 L、电容 C 各元件对交流电所起阻碍与抵抗作用的总效果。数值上等于电路两端的电压有效值与总电流有效值之比，常用 Z 表示，即

$$Z = \frac{U}{I}。$$

说明：

(1) 在国际单位制中，阻抗的单位是欧姆。

(2) 交流电路的最重要的特点是电压与电流随时间的变化一般不同步，即它们之间存在相位差。因此，交流电路的总阻抗与组成电路的各电阻、感抗、容抗之间的关系，不是简单的代数和关系。

(3) 用复数计算正弦交流电路比较方便。交流电压 $U(t) = U_0 \cos(\omega t + \varepsilon_1)$ 表示为复电压 $= U_0 e^{j(\omega t + \varepsilon_1)}$ ，交流电流 $i(t) = I_0 \cos(\omega t + \varepsilon_2)$ 表示为复电流

$\dot{I} = I_0 e^{j(\omega t + \varepsilon_2)}$ ，则复阻抗

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U_0}{I_0} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} = Z e^{j\varphi}，$$

复阻抗 \dot{Z} 的模(绝对值) Z 表示阻抗的大小，辐角 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 表示

该电路上电压与电流的相位差。

对于电阻 R，电感 L 及电容 C 各纯元件的复阻抗，根据定义表示如下：

电阻R: $Z_R = R$, $\varphi = 0$, 复阻抗 $\dot{Z}_R = R$;

电感L: $Z_L = \omega L$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$, 复阻抗 $\dot{Z}_L = \omega L e^{j\frac{\pi}{2}} = j\omega L$;

电容C: $Z_C = \frac{1}{\omega C}$, $\varphi = -\frac{\pi}{2}$, 复阻抗 $\dot{Z}_C = \frac{1}{\omega C} e^{-j\frac{\pi}{2}} = -j\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C}$ 。

(4) 利用复数表示交流电路上的电压、电流及阻抗后, 电路的计算在形式上完全与直流电路相同。比如交流电路的RLC串联电路的阻抗计算:

$$\begin{aligned}\text{电路的复阻抗}\dot{Z} &= \dot{Z}_R + \dot{Z}_L + \dot{Z}_C \\ &= R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} \\ &= R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right),\end{aligned}$$

$$\text{阻抗}Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

$$\text{相位角}\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega RC}。$$

RLC 并联电路的阻抗计算:

$$\begin{aligned}\text{电路的复阻抗}\dot{Z} &= \left(\frac{1}{\dot{Z}_R} + \frac{1}{\dot{Z}_L} + \frac{1}{\dot{Z}_C}\right)^{-1} \\ &= \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C\right)^{-1} \\ &= \left[\frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\right]^{-1} \\ &= \frac{\omega LR}{\omega L + jR(\omega^2 LG - 1)}\end{aligned}$$

$$\text{阻抗}Z = \frac{\omega LR}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2(\omega^2 LG - 1)^2}},$$

$$\text{相位角}\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{R(1 - \omega^2 LG)}{\omega L}。$$

电磁波

指空间以波动方式传播的交变电磁场。

说明：

(1) 电磁振荡在空间的传播不需要媒质，它靠天线中由振荡电路所激发的振荡电流，引起周围空间交变电磁场的交互交换，交替激发，从而向空间不断传播的，电磁波正是这种空间传播的电磁场。具体地说，变化的磁场激发涡旋电场，变化的电场，即位移电流激发涡旋磁场，不断循环往复，不断向远处传播，如下图所示（电磁场在某一直线上传播过程的示意图）。



电磁场振荡的传播机制示意图

(2) 任何波动过程都是能量的传播过程，电磁波是传递电磁能的过程。单位时间内通过与传播方向垂直的单位截面的能量叫做能流密度。传送电磁波的能量密度称为坡印庭能流密度矢量，记作 S ，它与空间电磁场 E 及 H 有如下关系：

$$S = E \times H,$$

它的大小就是能流密度的大小，它的方向就是能流的方向，也就是电磁波的传播方向。

(3) 在没有自由电荷，也没有传导电流的真空中，所传播的平面电磁波有以下几个特点：

① 电磁波是横波，即振动的电场 E 与磁场 H 均与传播方向垂直，设 k 为传播方向的单位矢量，则有

$$E \perp k, H \perp k.$$

② 电场 E 与磁场 H 亦互相垂直，即

$$E \perp H.$$

③ 交变电场 E 与交变磁场 H 变化的相位相同，即同相，且 k 与 E, H 成右螺旋系，即 $E \times H$ 的方向总是沿电磁波的传播方向 k 。

④ E 与 H 的幅值成比例，设 E_0, H_0 为电场、磁场的幅值，则有

$$\sqrt{\epsilon_0} E_0 = \sqrt{\mu_0} H_0.$$

⑤电磁波在真空中的传播速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}。$$

(4) 1865年，麦克斯韦由电磁理论预见了电磁波的存在，20年后，赫兹证实了麦克斯韦的预言，即电磁波的存在及光波的本质是电磁波。

电磁波谱

按照波长或频率的顺序依次把无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线等各种电磁波排列起来组成的波谱。

说明：

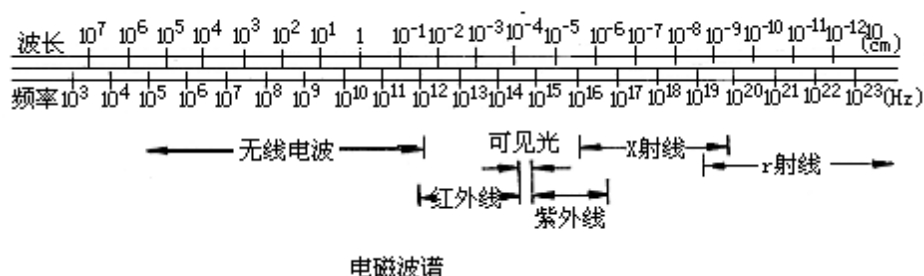
(1) 习惯上常用真空中的波长作为电磁波谱的标度，任何频率的

电磁波在真空中的传播速度都是 $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} 3 \times 10^8$ 米，所以真空中的电

磁波长 λ 与频率 f 成反比

$$\lambda = \frac{c}{f}。$$

下图是按频率和波长两种标度绘制的电磁波谱，由于波长或频率范围很广，图是以对数标度画出的。



(2) 波长较长的电磁波是无线电波，波长从千米到毫米（频率从几百千周到几百万兆周）。依波长，无线电波常分为中波（3000~50米）、短波（50~10米）和微波（从1米~1毫米）。中波和短波用于无线电广播及通信；微波波长很短，频率特别高，用于雷达定位及微波炉加热技术。工业上的感应加热则一般用频率较低的波段（大约几千周即可）。

(3)可见光的波长范围不大,大约在 $7600\text{\AA} \sim 4000\text{\AA}$ 左右($1\text{\AA} = 10^{-8}$

厘米)。比可见光波长更长一点的是红外线,大约从 $7600\text{\AA} \sim 10^{-1}$ 毫

米,红外线的热效应特别显著,应用有取暖、夜视等。波长比可见光再

短的则是紫外线,从 $4000\text{\AA} \sim 50\text{\AA}$,它有显著的化学效应和荧光效应,

应用有医学上杀菌,日光灯中激发荧光照明等。可见光、红外线、紫外线都是由原子或分子等微观客体的振荡所引起的。

(4)波长更短的电磁波则是X射线,约在 $10^2 \sim 10^{-2}\text{\AA}$ 之间,它由

高速电子流轰击金属靶得到,由原子中的内层电子发射出来的。主要用于医学上的诊治及工业上的探伤等。

(5)比X射线更短的电磁波是放射性辐射的 γ 射线,波长从 1\AA 左右

开始,直到更短。它实际上是一束能量极高的光子流,是由原子核内射出的。

(6)电磁波各波段的界限并不十分明确,相互重叠。人们对电磁

波各波段的性质的了解已比较透彻,目前除了波长极短($10^{-4} \sim 10^{-5}\text{\AA}$

下)的一端外,不再留有任何未知的空白。

光

一定波长范围(一般指 1000\mu m 到 0.04\mu m)的电磁波。它或是能引起视觉(可见光),或是能用光学仪器、摄影等手段来察觉。

光具有波粒二象性。

可见光

波长在 0.77\mu m (红光)到 0.39\mu m (紫光)范围内的电磁波。

可见光能引起视觉。

不可见光

一般指红外线和紫外线。

红外线

也称“红外光”。指波长在 $1000\ \mu\text{m}$ （微波）到 $0.77\ \mu\text{m}$ （红光）范围内的电磁波。

红外线不能引起视觉，但有显著的热效应。

紫外线

也称“紫外光”。指波长在 $0.39\ \mu\text{m}$ （紫光）到 $0.04\ \mu\text{m}$ （X射线）范围内的电磁波。

紫外线不能引起视觉，常用于杀菌、消毒等。

波粒二象性

微观粒子有时显示出波动性，有时又显示出粒子性，这种在不同条件下分别表现为波动和粒子的性质，称为波粒二象性。

说明：

人们最早是在光的本性中认识波粒二象性的。即一方面光子具有集中的能量、质量和动量，即具有粒子性；另一方面，波的强度（振幅的平方）与粒子在空间各处出现的概率密度成正比，即大量高速运动粒子具有波动性。到了 20 世纪 20 年代，人们发现电子、质子、中子、原子等微观粒子都具有这种波粒二象性。

光的微粒说

对光的本性的一种认识。17 世纪时曾为牛顿等人所提倡。认为光是一种微粒子流，按照力学规律沿直线行进。

用光的微粒说很容易解释光的反射和折射现象，因此当时曾被普遍接受。但是，19 世纪初发现了光的干涉现象。因光的微粒说不能解释，人们就选择了光的波动说。到 19 世纪末和 20 世纪初，人们研究光的发射、吸收以及光与物质相互作用等问题时，发现光的波动说又不能解释这些现象。这就促使爱因斯坦于 1905 年提出了光由某种粒子（被称为“光量子”）组成的学说，这就给旧的“微粒说”赋予了新的意义。

光的波动说

对光的本性的一种认识。17 世纪时由惠更斯所创立。认为光是一种机械波，是在一种称为“以太”的特殊媒质中振动的弹性振动波，并提出了著名的惠更斯原理。按照这个原理，用光的波动说很好地解释了光的反射和折射定律，成功地解释了晶体双折射现象。19 世纪，英国科学家托马斯·杨进行了著名的杨氏实验，测定了光波波长，并提出光的干涉原理。1808 年马吕斯发现光的横波性。1818 年法国科学家菲涅耳用次波干涉原理发展和完善了惠更斯原始形式的光的波动说，解释和阐明了光的干涉、衍射。与此同时，托马斯·杨在菲涅耳、阿喇果研究偏振的基础上提出光的横波说。1805 年傅科首次用实验证明光在水中的传播速度小于空气中的传播速度。这一结果为波动说提供了有力的实验依据，使光的波动说获得最终确立。

光线

表示光传播路径的有向几何线。

说明：

(1) 光线是人们对大量实验事实进行观察和思维的抽象，其实给人们引起视觉的只是光束；而孤立的一条光线是得不到的，就像现实生活中找不到几何中的直线一样。

(2) 光波在媒质中沿着光线方向传播时，相位不断地改变，同相位的各点组成光的波面。光线就是波面的法线，而波面则是垂直于光线的曲面或几何平面。在均匀的各向同性媒质中，光的传播方向总是和波面法线方向重合，通常只需考虑光的传播方向，可以不去考虑相位，因此，在光学技术成像问题和照明工程问题中，仅借助于光线或波面的概念，应用几何光学的基本原理和实验定律，就可以进行必要的计算，而不必涉及光的波动性，故几何光学也称为光线光学。

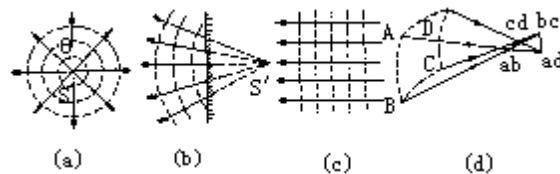
(3) 在各向异性的媒质（如水晶、方解石、云母、液晶等）中，非常光（e光）的传播方向和波面法线方向一般不重合，光线也不一定与波面垂直。

光束

通过某一确定区域的一簇光线。

说明：

在均匀的各向同性媒质中，光线与波面垂直，因此同心光束对应球面波，如下图（a）、（b）。平行光束对应平面波，如下图（c）。平行光束可看作是位于无穷远处的点光源所发出的同心光束，该光束形成半径为无限大的球面波。此外，还有一种光波的波面既非球面，也非平面，是任意形状的曲面，其相应的光束为不聚交于一点的非同心光束，对应于非球面的高次曲面波，如下图（d）。



同心光束

各光线本身或其延长线交于同一点的光束。各光线的这一交点称为光束的心。同心光束可分为发散光束、会聚光束、平行光束。发散光束有实发光点，会聚光束有虚发光点，平行光束的交点被认为位于无穷远处。

发散光束

参见同心光束。

会聚光束

参见同心光束。

平行光束

参见同心光束。

光源

任何能够向外辐射一定波长范围的电磁波的物体。

说明：

从能量的观点看，光源把某些其他形式的能转换成辐射能。按照能量转换形式的不同，可以把光源分成热光源和冷光源。按照所辐射的电磁波的波长的不同，则可把光源分成可见光光源和不可见光光源。

可见光光源

又称发光体。指能辐射波长为 $0.77\ \mu\text{m}$ 到 $0.39\ \mu\text{m}$ 范围的电磁波的物体。

可见光光源向外辐射的电磁波可引起人的视觉，故得名。

不可见光光源

主要指向外辐射紫外线或红外线的光源。

紫外线和红外线不能引起人的视觉，故得名。

次级光源

本身不发光，但漫射或反射来自光源的光的被照物体。

例如月球、反射镜、漫射体、荧光体，本身并不是光源。它漫射或反射了光源的光，有时可把它称为次级光源。

实光源

包括光源，以及光源或是次级光源所形成的实像。

虚光源

光源或是次级光源所形成的虚像。

热光源

热辐射光源的简称。即把热能转换成辐射能的光源。例如普通的白炽灯、卤钨灯。

冷光源

非热辐射光源的简称。即把电能（包括气体放电管，如日光灯、高压汞灯、高压钠灯、金属卤化物灯）、化学能（火焰和某些氧化过程）、光能（荧光或磷光）转换成辐射能的光源。

光速

光在真空中的传播速度。

光速是重要的物理常数之一，根据 1983 年 10 月第 17 届国际计量大会公布的数值为 299792458m/s。

说明：

(1) 通过实验，测得各种波长的电磁波（光）在真空中的传播速度都相同。这是定义光速的基础。

(2) 真空中的光速在相对于光源静止或作匀速直线运动的任何惯性参考系中都相等。此即“光速不变原理”。它和相对性原理一起，构成了爱因斯坦狭义相对论的基础。

(3) 光速是一切物质运动速度的上限。

(4) 光在其他媒质中的传播速度都小于光速，但随媒质的性质和光波的波长而不同。

(5) 国家标准 GB3102.6—93 规定，光速的物理量符号为 c 或 c_0 。

(6) 在物理学的二般计算中，常取 $c=3\times 10^8\text{m/s}$ 。

光速不变原理

光速在任何惯性系中都保持不变。

说明：

光速不变原理是爱因斯坦在斐索和迈克尔逊-莫雷对运动媒质中光速测量的实验基础上得到的。

（光的）媒质

通常把光所通过的空气、水、冰、玻璃等物质称为光的媒质。

场是光在真空中传播时所依赖的特殊媒质。

光密媒质

光在两种不同媒质中，折射率较大的媒质（光在其中的速度较小）叫做光密媒质，而折射率较小的媒质（光在其中的速度较大）叫做光疏媒质。

说明：

光密媒质和光疏媒质是光在两种不同媒质之间相比较的相对概念。例如对于水和酒精这两种媒质来说，水是光疏媒质；而对于水和冰这两种媒质来说，水却是光密媒质。

光疏媒质

参见光密媒质。

反射

当光从第一媒质入射到第二媒质时，一部分光仍回到第一媒质的现象。

当两种媒质之间是光滑的平面界面时，光的反射遵循反射定律，一束平行光线经反射后仍是平行光线。

当两种媒质的界面是粗糙表面时，遵照反射定律，发生漫反射。

反射定律

发生光的反射时，确定反射光的方向的定律。具体说来，即

- (1) 反射线在入射线和界面法线所决定的平面内；
- (2) 反射线和入射线分居法线的两侧；
- (3) 反射角的绝对值等于入射角的绝对值，即 $i_1 = -i'_1$ 。

说明：

(1) 反射定律对界面是光滑平面或粗糙表面都适用，只是光滑平面上各点的法线互相平行，而粗糙表面上各点的法线方向各不相同。

(2) 反射定律对声波、无线电波也同样成立。

(3) 反射定律只适用于静止的界面，对于观察者作高速运动的界面不适用。

漫反射

参见反射。

全反射

当光从光密媒质射向光疏媒质的界面时，全部反射回原媒质的现象。

说明：

(1) 全反射是折射现象的一种特例。当光从光密媒质射向光疏媒质时，折射角总大于入射角，当入射角增大到某一数值时，折射角等于 90° ，此时对应的入射角叫做临界角。因此，全反射现象可理解为当光从光密媒质射向光疏媒质时，入射角增大到一定程度时的必然结果。

(2) 产生全反射必须是光从光密媒质射向光疏媒质，且入射角 $i_1 \geq$ 临界角 i_c 。其数值取决于相邻两媒质的折射率之比

$$i_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}。$$

(3) 全反射时，全部光能都反射回第一媒质，但也有光波进入第二媒质，它沿两媒质的分界面传播，其振幅随离开分界面的距离按指数衰减。一般来说，进入第二媒质的深度约为一个波长，而平均看，进入第二媒质的光波的平均能流密度几乎为 0，即不可能有光透过第二媒质。

(4) 当入射角在临界角附近变化时，光的强度也将变化。入射角由小到大趋近临界角时，折射光强度逐渐减小，反射光强度逐渐增大。入射角达到或超过临界角后，折射光的强度减到 0，反射光的强度达到 100%。

(5) 应用

①阿贝 (Abbe) 折射计和浦耳弗里许 (Pulfrich) 折射计。利用测临界角来确定折射率。

②全反射棱镜。利用光在棱镜中的全反射来改变光的传播方向，这种装置常在观察地面物体用的高倍双筒望远镜中作正像器使用。

③光学纤维。是应用全反射原理传播光能的元件，广泛应用于内窥、潜望、高速摄影、通信等各个方面。

临界角

参见全反射。

光学纤维

是利用全反射规律，使光在均匀、透明玻璃柱体的内壁面上经连续多次全反射，沿着它从一端传到另一端，而强度衰减不大的光学元件。

说明：

(1) 一般使用的光学纤维，是由带套层的圆柱形透明细丝，直径约 5~10 微米的多根或单根玻璃（或石英、透明塑料）纤维，在高温下拉制而成。每根纤维分内外两层，内层材料的折射率为 1.8，外层材料的折射率为 1.4。当光从内层射到两层纤维的界面时，入射角小于临界角的光线就会被折射出纤维，而入射角大于临界角的光线，就会在两层材料的界面上经历多次全反射后，从一端传到另一端。用大量这样的玻璃纤维并成大束，光在各条纤维之间不会串通。如果将它排成有序的阵列或纤维束，不仅能传导光能，也可用来沿弯曲通道经过长距离

传输光所成的图象。仅限于传光能的纤维束称传光束，同时能传图象的纤维束称传像束，两者不同处在于后者要求纤维束中的光学纤维在两端面上的位置必须有严格的几何相似关系。

(2) 光学纤维能传送的入射光束与材料的折射率的选取有关。

(3) 除了反射光学纤维外，还有折射型光学纤维，这类纤维能使光线向轴线会聚，它的折射率分布是沿轴线渐变的。它具有光程短、自聚焦、光的透过率和像的分辨率高等优点。

(4) 光学纤维能直接传像，柔软、不怕震，并可弯成任意形状，又可做得很细，它能深入人体内部（膀胱、胃、肠、子宫和关节等）和结构复杂的机器部件中不易达到的部位进行窥视或照明。

(5) 光学纤维能导光的现象，广泛应用于各种形式的光纤照明器、信号显示器、通信和无线电传真系统。

(6) 光学纤维能传感，对欲测物理量（温度、速度、加速度、位移、磁场强度、压力等）能进行精确测量，且测量的精度高、不受电磁干扰、结构简单、使用方便，因此可用作光纤传感器。

折射

当光从第一媒质（折射率为 n_1 ）入射到第二媒质（折射率为 n_2 ）时，在光滑的平面界面上，一部分光由第一媒质进入第二媒质，它的传播方向发生改变的现象。

折射定律

在光的折射现象中，确定折射光的方向的定律。具体说来，即

(1) 折射线在入射线和界面法线所决定的平面内；

(2) 折射线和入射线分居在法线的两侧；

(3) 入射角的正弦跟折射角的正弦之比，对于一定的两种媒质来说是一个常数，即

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}, \quad \text{或} \quad n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2。$$

说明：

(1) 折射角与入射角的正弦之比与入射角无关，是一个与媒质和光的波长有关的常数。比例常数 n_{21} 称为第二种媒质相对于第一种媒质的折射率。

(2) 折射定律对声波、无线电波也同样成立。

(3) 折射定律只适用于静止的媒质，不适用于对观察者作高速运动的媒质。

折射率

表示在两种媒质（各向同性）中光速比值的物理量。

说明：

(1) 光从第一媒质进入第二媒质时（垂直入射除外），入射角 i 和折射角 r 的正弦之比为一常数，并等于两媒质的相速度之比，这一常数叫做第二媒质对第一媒质的相对折射率，记作 $n_{21} = \sin i / \sin r = v_1 / v_2$ 。

(2) 任何媒质相对真空的折射率叫做绝对折射率，简称为媒质的折射率，记作 n 。媒质的折射率等于真空中的光速 c 与媒质中光的相速 v

之比。即 $n = c / v = \sqrt{\varepsilon\mu} \approx \sqrt{\varepsilon}$ 。

说明：

(1) 光在真空中的传播速度最大，因此媒质的绝对折射率总是大于 1，即 $n > 1$ 。

(2) 两种媒质的相对折射率与绝对折射率的关系为

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n_{12}}, \text{ 或 } n_{12} \cdot n_{21} = n_1 \cdot n_2。$$

(3) 透明媒质的光密度是它的折射率的一种量度，具有较高折射率的媒质就说它具有较高的光密度，具有较低折射率的媒质就说它具有较低的光密度。

(4) 在物质媒质中，单色光的速度 v 与它的颜色有关，因此与折射率有关，这就是折射色散现象。

(5) 除真空外的任何媒质，折射率的值不仅取决于光的频率，还取决于媒质的状态（温度、密度等）。稀疏媒质（如标准条件下的气体）的折射率近似等于 1。

(6) 一般的折射率数值是指对钠黄光（波长为 $0.5893 \mu\text{m}$ ）的折射率。

(7) 由于光的折射，从一种媒质中看另一种媒质中的物体，所得的视深度与实际深度不一样。视深度与实际深度的关系，可由媒质的相对折射率决定，通过折射定律推算出来。

(8) 如果光线斜射入一块厚度为 d 的透明平行板，则出射光线与入射光线平行而有侧位移。侧位移

$$\begin{aligned}\Delta d &= \frac{\sin(i - i')}{\cos i'} d \\ &= \sin\left(1 - \frac{\cos i}{\sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 i}}\right) d,\end{aligned}$$

式中 n_1 、 n_2 分别为空气、平行板的折射率， i 、 i' 为入射角、折射角。 Δd 的大小是由入射角、组成透明平行板物质的折射率决定。

相对折射率

参见折射率。

绝对折射率

参见折射率。

光程

光在媒质中传播的几何路程 s 与该媒质折射率 n 的乘积。一般用 L 表示光程，可记为

$$L = s \cdot n。$$

说明：

(1) 光在真空中传播时, 折射率 $n=1$, 光程等于光的几何路程, 即 $L=s$ 。因为媒质的折射率 n 等于真空中的光速和媒质中光速之比, 所以光程 L 也就是在相同的传播时间 t 内, 光在真空中所通过的路程。即

$$L = s \cdot n = s \cdot \frac{c}{v} = c \cdot t。$$

借助光程的概念, 能把光在媒质中所经过的路程折算为光在真空中传播的路程, 便于比较光在不同媒质中所走路程 (或所费时间) 的长短。

(2) 利用光程和真空中的波长, 可以计算光因传播距离而产生的相位变化。设光波在媒质中的传播方向每经过一个波长 λ_n 的距离, 其振动的初相位改变 2π , 则经过 s 距离时初相位的改变为 $2\pi s / \lambda_n$ 。由于光在媒质中传播 s 距离所经过的波长数 s / λ_n 等于真空中传播 ns 距离所经过的波长数 ns / λ , 故真空中的波长 $\lambda = n \lambda_n$, 因而

$$\frac{2\pi s}{\lambda_n} = \frac{2\pi s \cdot n}{\lambda} = \frac{2\pi L}{\lambda}。$$

(3) 两列相干光波在不同媒质中传播时, 对干涉或衍射图样起作用的不是它们的几何路程之差, 而是两列光波的光程之差, 称为光程差。光程差决定了两列光波的相位差, 它们之间的关系为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \sigma,$$

式中 $(=n_2r_2 - n_1r_1)$ 为光程差。当光程差等于一个波长 λ 时, 该两点间的相位差恰好为 2π 。

光程差

参见光程。

光路可逆原理

对于光在两种媒质的分界面上的反射或折射, 如果光线逆着原来反射线的方向或折射线方向射到界面时, 它就可以逆着原来入射线方向反射或折射。即当光线的方向反转时, 光将循原路径逆向传播。

说明:

(1) 光路可逆原理可由反射定律和折射定律导出。

(2) 光路可逆原理对于每一反射面和折射面都适用，甚至对经任意多次反射和折射的很复杂的光路也适用。

(3) 斯托克斯 (S. G. Stoksls, 1819—1903) 利用光路可逆原理，巧妙地得出光在两种媒质的界面上振幅反射率和透射率之间的倒边关系。

透镜

表面为两个不相互平行的折射曲面，或一个曲面和一个平面的透明体。常由玻璃或水晶制成，是光学仪器中的一种重要元件。

光线经过透镜的两个表面折射，发生会聚或发散，可以成像。

按形状和成像要求的不同，透镜可分成许多种类。例如球面透镜、柱面透镜和会聚透镜、发散透镜。

球面透镜

两面都是球面，或一面是球面、一面是平面的透镜。

柱面透镜

母线互相平行的两个柱面，或一面是柱面、一面是平面的透镜。

凸透镜

球面透镜的一种。其中央部分比边缘部分要厚一些，故得名。凸透镜又可根据其形状的不同而分成双凸透镜、单凸透镜、凹凸透镜等三种。凸透镜有会聚光线的作用，故又称会聚透镜。

凹透镜

球面透镜的一种。其中央部分比边缘部分要薄一些，故得名。凹透镜又可根据其形状的不同而分成双凹透镜、单凹透镜、凸凹透镜等三种。

凹透镜有发散光线的作用，故又称发散透镜。

会聚透镜

即凸透镜。

发散透镜

即凹透镜。

光心

透镜主轴上的一个特殊点。通过该点的光线射出透镜时的方向和射入透镜时的方向相互平行，但可以有侧移。

焦点

平行于主轴的平行光束经透镜折射或曲面镜反射后相交（或反方向延长后相交）的交点，通常也称为透镜的第二焦点。如果透镜所成的像在无穷远处，物体所应放在主轴上的一点称为透镜的第一焦点。两焦点各在透镜的一边。薄透镜两边的焦点对称，一般透镜此两焦点不对称。

焦点分为实焦点和虚焦点。

实焦点

经凹面镜（或凸透镜）反射（或折射）的光线的实际会聚点。

虚焦点

经凸面镜（或凹透镜）反射（或折射）后的发射光线的反向延长线的交点。

主焦点

位于主轴上的焦点。

副焦点

垂直于主轴焦平面上的各个点。

焦平面

通过透镜（或球面镜）主焦点并垂直于透镜主光轴的平面。每个透镜都有两个焦平面。

焦距

曲面镜或透镜中某一点到其主焦点之间的距离。

说明：

透镜的焦距决定于其两表面的曲率半径、透镜厚度、材料和周围媒质的折射率。

透镜成像公式

描述透镜成像时的物距、像距和焦距之间的关系。

说明：

(1) 薄透镜的成像公式为

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n - n_1}{r_1} + \frac{n_2 - n}{r_2}。$$

式中 s 为物距， s' 为像距， n 为透镜材料的折射率， n_1 和 n_2 分别为透镜前、后方媒质的折射率， r_1 和 r_2 为透镜前、后两球面的曲率半径。若在空气中，即 $n_1 = n_2 = 1$ ，则

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)。$$

式中 f 为薄透镜的物方焦距， f' 为像方焦距， r_1 与 r_2 应遵循符号法则：若球面的曲率中心位于球面的右侧，则该球面的曲率半径取正值，反之则取负值。对凸透镜，第一球面的曲率中心在球面的右侧，故 r_1 取正值。第二球面的曲率中心在球面的左侧，因此 r_2 取负值。根据上述焦距公式可知，对凸透镜（会聚透镜）有 $f \cdot f' > 0$ ，对凹透镜（发散透镜）有 $f \cdot f' < 0$ 。由此可组成双凸、平凸、凹凸等凸透镜和相应的凹透镜。

（2）薄透镜的物像公式

①利用薄透镜的焦距表示式，可得物像公式的高斯形式

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f}，$$

式中物距 s 和像距 s' 都从光心算起。

相应的横向放大率等于像高 y' 与物高 y 之比，即

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}。$$

②若用 x 代表从物方焦点 F 起算的物距，用 x' 代表从像方焦点 F' 起算的像距，并规定当物点在 F 之左，则 $x > 0$ ，物点在 F 之右，则 $x < 0$ 。当像点在 F' 之左，则 $x' < 0$ ，像点在 F' 之右， $x' > 0$ ，可得物像公式的牛顿形式

$$xx' = ff'。$$

相应的横向放大率为

$$\beta = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}。$$

透镜成像作图法

求透镜物像关系的一种方法。

说明：

(1) 成像作图应注意：实际光线用实线，延长线和辅助线用虚线，每条光线上需标明箭头，以示光的方向。图中还需标明比例和所有已知量及待定量的数值，以示像的位置、性质和大小。

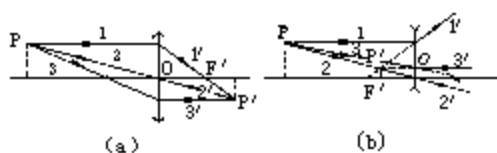
(2) 按照成像的含义，通过物点的每条光线的共轭光线都通过像点（“通过”指光线本身及其延长线），所以只需选两条通过物点的入射光线，画出它们的共轭出射光线，其交点就是像点。

(3) 对轴外物点 P 成像作图的三条光线：

① 平行于主光轴的入射光线，经透镜后通过像方焦点 F' （光线 1-1'）。

② 若薄透镜两侧的折射率相同，通过光心 O 的入射光线，经透镜后方向不变（光线 2-2'）。

③ 通过物方焦点 F 的入射光线，经透镜后平行于主光轴。



对凸透镜，如下图 (a) 所示。对凹透镜，如下图 (b) 所示。(4) 对轴上物点或任意入射光线的成像作图法。如果物点 P 在轴上，则三条光线便合为一条，此时可利用焦平面性质来求轴上物点的像或任意入射光线的共轭线。

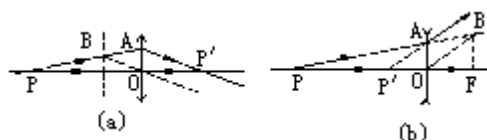
① 利用物方焦平面的作图法，步骤如下：

由 P 点沿主光轴作入射光线 PO，经透镜后方向不变；

过 P 点作任意光线 PA，交透镜于 A，交物方焦平面于 B；

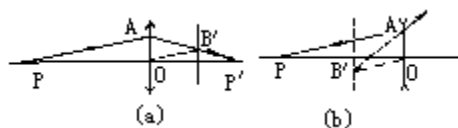
作辅助线（副光轴）BO，过 A 点作平行于 BO 的折射光线，与主光轴交于 P' ，即是像点。

对凸透镜，如下图 (a) 所示。对凹透镜，如下图 (b) 所示。



② 利用像方焦平面作图法，步骤如下：

经 P 点作任意光线，交透镜于 A；过 O 点作 PA 的平行线，交像方焦平面于 B'；连结 AB'，其延长线交主光轴于 P'，则此点即为所求像点。对凸透镜（或凹透镜），如下图（a）或（b）所示。



放大率

表明光学系统中物和像之间某种对应关系的比值。

说明：

（1）物体由不同的光学系统造成的像的性质（即像的大小、虚实和倒正）因物体的位置不同而不同。三种放大率正是为了说明物和像之间的这种关系。

（2）横向放大率，也称垂轴放大率。等于垂直于光轴方向的像高 y' 与物高 y 之比，用 β 表示。即

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{-ns'}{n's} = -\frac{fs'}{f's}$$

式中 n 和 n' 分别为物方和像方媒质的折射率； f 和 f' 为物方和像方焦距； s 和 s' 为物距和像距。 $\beta > 0$ 得正立像， $\beta < 0$ 得倒立像。 $|\beta| > 1$ 得放大像， $|\beta| < 1$ 得缩小像。

（3）纵向放大率，也称轴向放大率。等于像距 $\Delta s'$ 与物距 Δs 之比的极限，用 a 表示，即

$$a = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta s'}{\Delta s} = \frac{ds'}{ds}$$

（4）角放大率。出射光线与主光轴夹角 u' 的正切和入射光线与主光轴夹角 u 的正切之比，用 r 表示，即

$$r = \frac{\text{tgu}'}{\text{tgu}} = \frac{\gamma n}{\gamma' n'} = \frac{n}{n' \beta} \text{ 或 } \frac{n}{n'} = r \beta$$

表示光束会聚和发散程度之比。

（5）三种放大率之间的关系

$$a = \frac{n'}{n} \beta^2, \quad \beta = ar。$$

上述关系表征了物方和像方共轭的几何关系，很有实用价值。它与光学仪器放大率的概念不同，后者为光学仪器的特性参数。

棱镜

透明材料做成的多面体。它是表面由两个或两个以上的不全平行的折射平面构成的光学元件。

说明：

棱镜的种类很多，有用于分析光谱的，有用于起偏振光的，最多见的是用于变更光线传播方向的（如潜望镜、光学望远镜中的棱镜）。比起透镜来，棱镜的能量损失少得多。

散射

当波通过非均匀媒质时，部分偏离原传播方向而沿四周散开传播的现象。

说明：

（1）光的散射反映了光与物质的相互作用。媒质吸收入射光能量，一部分转化为媒质热运动能量，是真吸收；另一部分以散射光形式向周围辐射，是散射消光。对温度不高的纯净液体和晶体，真吸收是主要的，表现为光的吸收过程；对稀薄气体和混浊媒质，散射消光是主要的，表现为光的散射过程。

（2）均匀媒质在入射光作用下，不会发生散射现象，而悬浮粒子以及分子均会产生散射现象。

瑞利散射定律

线度小于光的波长的微粒散射时，散射光的波长与入射光的波长相同，散射光的强度与入射光的波长的4次方成反比，即

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}。$$

说明：

(1) 该定律由瑞利 (T. B. Ragleigh, 1842——1919) 于 1872 年提出。

(2) 电子在入射光波作用下按 $A\sin\omega t$ (A 为振幅, ω 为圆频率) 规律运动。当电子加速运动时, 产生交变电场, 辐射电磁波, 电磁波的振幅与电子的加速度成正比, 光强又与振幅成正比, 便得

$$I \propto a^2 \propto \omega^4。$$

(3) 由此可得, 短波光的散射比长波光强。

喇曼散射效应

又称并合散射或联合散射效应。单色光被分子散射后, 频率发生改变的现象。

说明：

(1) 由印度物理学家喇曼 (C. V. Raman, 1888——1970) 和苏联物理学家门捷斯塔姆 (Л. И. М а н г е л ь щ т а м, 1879——1994) 在各自研究液体和晶体内的散射时发现的。

(2) 其频率改变的原因是入射光的光子与分子发生作用, 将能量传递给分子, 以激发分子振动和转动能级; 或者在分子由高的振动和转动能级跃迁到低的能级过程中, 光子获得能量。

(3) 利用喇曼散射可以测定分子振动的固有频率, 判断分子的对称性、分子内部的力的大小及一般有关分子动力学的性质。

另外, 还能分析化合物的成份。

衍射

又称绕射。指波在传播过程中遇到障碍物或孔隙时所发生的展衍现象。

说明：

(1) 衍射现象的显著与否决定于波长和障碍物的线度大小的相对关系。如果障碍物的线度大小与波长相当, 则衍射现象显著; 如果障碍物的线度远大于波长, 衍射现象就变得很微弱, 所以, 光的衍射现象是光的波动特性的最基本的表现, 而光的直线传播不过是衍射现象的极限表现而已。

(2) 衍射按光源、障碍物和观察屏三者的位置关系可分为两类：一类是光源和观察屏两者或两者之一离障碍物为有限远时（球面波）的情形，称为菲涅耳衍射或近场衍射。另一类是光源和观察屏均离障碍物为无穷远（平面波）的情形，称夫琅和费衍射或远场衍射。

惠更斯原理

波阵面上每一点都可以看作是能产生新的球面次波的新的点波源。

说明：

惠更斯原理虽然可以用来直观解释光的直线传播、光的反射和折射等一系列现象，粗略地说明一些光的干涉和衍射现象，但不能定量解释衍射光波沿不同方向传播的振幅的大小，因而无法确定衍射图案中的光强分布。

惠更斯-菲涅耳原理

波阵面上每个面积元都可以看成是新的振动中心，它们发出次波。在空间某点的振动是所有这些次波在该点的相干叠加。

说明：

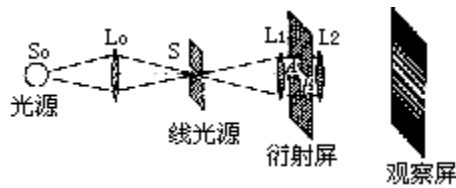
惠更斯-菲涅耳原理进一步揭示了光的直线传播和衍射现象的内在联系。

夫琅和费单缝衍射

平行光束通过一个长度与宽度相比，宽度可忽略不计的单狭缝（衍射屏）时，在其后方所产生的衍射现象。

说明：

实验装置如下图所示，单色强光源 S_0 发出的球面波，经透镜 L_0 会聚于狭缝 S 作为线光源，置于透镜 L_1 的物方焦平面处。经 L_1 使光线发出的柱面光波变成平行光波投射于狭缝 AB 上。然后再经 AB 后面的透镜 L_2 ，会聚成像于其像方焦平面处的观察屏上，在屏上产生一组平行于狭缝 AB 的明暗相间的衍射条纹。



夫琅和费双缝衍射

平行光束通过缝宽相等且互相平行的双狭缝（衍射屏）时，在其后方所产生的衍射现象。

说明：

实验装置是把夫琅和费单缝衍射屏换成一个两条平行的、宽度都相同的双狭缝，其中间由不透光部分隔开，其他装置不变。单色平行光垂直地投射于双狭缝时，由于缝宽很窄，双缝中的每一个缝可当作一个次波源，这两个次波源在衍射角的方向上发出的所有次波，经透镜会聚后，相干叠加，它们之间将发生干涉现象，在观察屏上得到双缝衍射图样。

夫琅和费圆孔衍射

从一点光源发出的平面波经圆孔后所产生的衍射现象。

说明：

光学仪器中的主要元件，如透镜、球面透镜、光阑等多呈圆孔形，故研究夫琅和费圆孔衍射颇显重要。

衍射光栅

简称光栅。具有空间周期结构和光学性能的衍射屏，能够对波阵面作平行、等宽而又等间距地分割而产生光的衍射。常作为色散元件来分离不同的波长。

光栅分为两类：如果在玻璃平面刻划出许多平行细槽，刻槽部分因散射而不透光，未刻划部分相当于狭缝透光，这种光栅叫透射光栅。透射光栅能使透射衍射光进行相干叠加。如果在一个抛光的金属镜面上刻槽，光在刻槽内发生漫反射，而在未刻划部分则作有规则的反射，这种光栅叫反射光栅。反射光栅能使反射衍射光进行相干叠加。这两种光栅都属平行、等宽且又等间隔的多狭缝，其相互平行的刻线能周期性地改变入射光的振幅（或光强）透过率（或反射率）的分布，即对入射光的振幅（或光强）进行调制，故又称为振幅光栅。

另一类光栅对入射光波的振幅（或光强）不起调制作用，但能对入射光波的相位产生调制作用，称为相位光栅。根据刻制方法的不同，又可分为原刻光栅、复制光栅和全息光栅。

说明：

(1) 平面透射光栅相当于一个多狭缝的衍射屏，因此，它的实验装置和夫琅和费单缝衍射相同，只需将单缝衍射屏改为光栅。

(2) 光栅每单位长度内刻痕的多少，决定于所欲分光的波长范围。

(3) 色散率的大小决定于单位长度内刻痕的数目，刻痕越多，色散率越大。

(4) 分辨本领决定于刻痕的总数。

透射光栅

参见衍射光栅。

反射光栅

参见衍射光栅。

振幅光栅

参见衍射光栅。

相位光栅

参见衍射光栅。

阶梯光栅

相位光栅的一种。

说明：

(1) 1898 年迈克尔逊设计了透射的阶梯光栅。它是用厚度和折射率都相同的平行平面玻璃板制成阶梯形。透过两相邻阶梯级的光波具有很大的光程差（或相位差），故可获得很高的光谱级数。为了避免高级数谱线的重叠，可先用棱镜分隔出所需的窄小光谱区，使单缝衍射的主极大值很窄，衍射后的光波集中在很窄的区域内。

(2) 阶梯光栅具有很高的分辨本领，通常用于观察级数很高的光谱。如果在阶梯上涂一层反射膜，则成为反射式阶梯光栅。

闪耀光栅

又称定向反射光栅，亦属相位光栅的一种。

说明：

(1) 1910 年由伍德首先刻制而成。闪耀光栅是在光学玻璃或熔凝石英的基板上镀一层铝膜，用特定形状的金钢石刀在铝膜上刻划出很密的平行等间距的锯齿状或三角形状槽，每个刻槽面是一个宽度为 a 的小平面镜，组成闪耀光栅的衍射单元。控制刻槽的形状（即控制闪耀角的大小），使衍射因子的中央主极大的方向从没有色散的零级光谱转移到有色散的光谱上，克服了普通透射光栅的零级主极大占有光能的大部分却无色散，实际使用的其他各级光谱强度弱却有色散的缺点，从而实现高分辨本领和强光谱，提高光能利用率。

(2) 闪耀光栅被广泛应用于光谱分光仪，或作为独立的分光元件。

全息照相

把从物体辐射来的光波振幅和位相的信息同时记录下来并使之重现的一种照相技术。

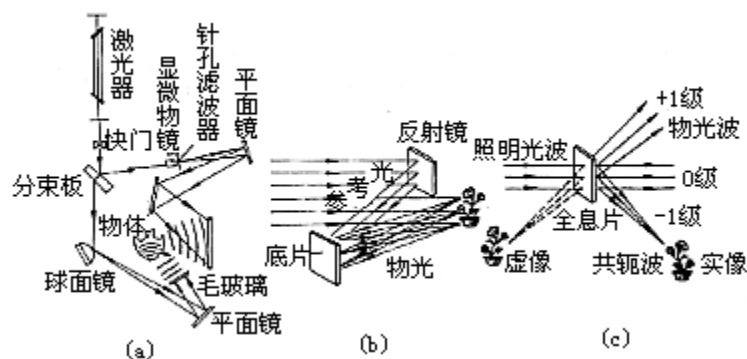
全息照相原理是 1948 年由英国科学家伽伯 (D. Gabor) 为了提高电子显微镜的分辨本领而提出，并首次获得了全息图及其再现像，从而创立了全息术。此后，特别是激光光源问世，使全息技术研究进入了新阶段，出现了多种全息方法，并开辟了新的全息应用领域。

说明：

(1) 全息照相分两步实现：

第一步全息记录：激光束经分束器分成两束，一束为参考光，投射（或通过反射镜反射）到记录媒质上（即感光底片），另一束投射到物体上经反射或透射后形成物光，也到达记录媒质上（下图（a））。参考光和物光相干叠加形成许

多明暗不同的干涉图样在记录媒质上，即可得到一张全息图（下图（b））。干涉图样的形状记录了物光与参考光间的相位关系，它的明暗对比程度反映了光束的强度关系。光束越强，反差越大。它巧妙地将物光波前上各点的振幅分布和相位分布的全部光信息转换为强度分布记录在底片上，这就是所谓的全息记录。



第二步波前再现：用同一波长的相干光束沿参考光方向照射在全息图上，则产生衍射。复杂的衍射波中包含有反映原物体的波前，此波前进入观察者的眼睛，观察者就可观察到原物体的立体虚像和立体实像如下图（c）所示。立体虚像和实像分居在全息图两侧，中间是衰减后的入射光束（照明光波，为零级波）。这样就得到了物光波和它的共轭波发生再现的效果。

（2）全息照相的特性

①再现物体形象立体感强、逼真。因为全息照相记录的依据是干涉原理，它通过物光波和参考光波的叠加相干记录下两光波之间的相位差分布，使得反映物体各点的亮暗和位置等方面特征的物光振幅和相位全部信息变为强度分布被记录下来。

②全息照片的每一部分，不论大小都能使整个原物体再现。也就是说，即使全息照片碎了，其任一碎片都能完整地再现原物体的整个形象。这是因为全息照片在记录过程中物体上每一部分反射的光波都覆盖在底片的整个面上。

③同一张底片经多次曝光，可记录许多景物的像，且各个景物的像再现时能够不受其他像的干扰而单独显示。这是因为对不同的景物采用不同的入射角度的参考光束，所得干涉图样随物光和参考光之间的夹角大小而变化，再现时，各个景物的再现像就会在不同衍射方向上出现，从而分离各个景物的像。

（3）全息照相应用较广，不仅光波，而且红外、微波和声波都可用全息术。甚至电子计算机也能制备全息模板。例如，全息显微术、信息存贮术、全息无损探伤。

干涉

在一定条件下两列（或几列）波在空间相遇，因相互叠加而产生强度变化，在某些区域始终加强，在另一些区域始终减弱，形成稳定的强弱分布的现象。

说明：

(1) 光波是电磁波，光的干涉的产生条件：

①两束光必须有相同的振动频率。

②两束光在相遇点的振动方向必须相同（即叠加光波有互相平行的光振动分量），并且振幅相差不大。

③两束光在相遇点的振动具有稳定的相位差，稳定的时间要大于或等于观察时间。

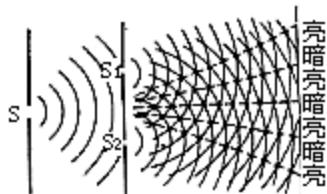
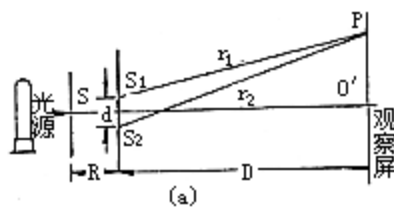
(2) 通常的独立光源是不相干的。

(3) 通常以干涉条纹的清晰程度来衡量两列光波相干的程度。干涉条纹清晰，表示两列光波相干程度高；干涉条纹不清晰，表示两列光波相干程度低；没有条纹，表示两列光波不相干。

(4) 光的干涉现象证明了光的波动本性，并且还可进一步推广到其他现象中，凡有强弱按一定分布的干涉图样出现的现象，都可作为该现象具有波动本性的最可靠、最有力的实验证据。

杨氏双缝干涉实验

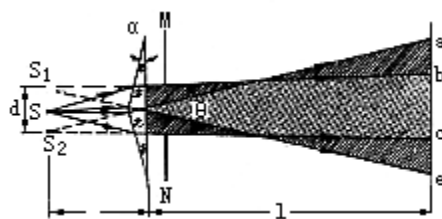
英国物理学家托马斯·杨用开有小孔的屏得到两束相干的光波，并以明确的形式确立了光波叠加原理，用光的波动性解释了干涉现象。



(b)

左图 (a) 为历史上著名的杨氏干涉实验装置。在强烈的单色光源前面放一个开有小孔 S 的不透明的屏，后面置有另一个开有两个十分靠近的小孔 S_1 和 S_2 的屏，在较远的地方放置一观察屏。在屏上可以观察到一组几乎是平行的明暗相间的直线条纹，如左图 (b) 所示。为了提高干涉条纹的亮度，实验装置中的 S、 S_1 、 S_2 用三个互相平行的狭缝来取代原来的小孔。改进后的装置称为杨氏双缝干涉实验。

菲涅耳洞棱镜



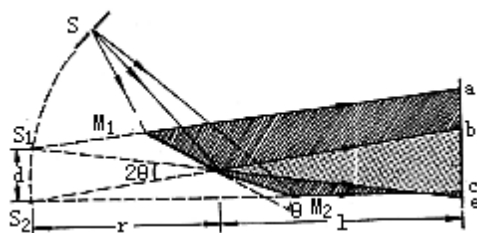
由两个相同的、顶角很小的薄三棱镜接合成一个双棱镜，如下图所示。其主截面垂直于缝光源 S。缝光源发出的光束，经双棱镜折射成两束相干光波，好似分别发自两个虚光源 S_1 和 S_2 ，它们分别是 S 经双棱镜上、下两个三棱镜所成的像。在两光束的交叠区内产生干涉。若把挡光屏 MN 放在如图所示的位置，则仅在 bc 区域内可观察到干涉条纹，如果把挡光屏 MN 从光路中除去，两光束将在整个 ae 区域内重叠而产生干涉。其原理及干涉条纹的性质与杨氏实验相同，两个虚光源 S_1 和 S_2 的作用也如杨氏实验中的双缝。

屏上两相邻条纹（明或暗）间的间距

$$\Delta X = \frac{(r+1)}{d} \lambda = \frac{(r+1)\lambda}{2(n-1)a \cdot r}$$

式中 n 为棱镜折射率， α 为棱镜的顶角。

菲涅耳双面镜



由两块夹角很小的平面反射镜 M_1 和 M_2 组成，如下图所示。由缝光源 S 发出的单色柱面波经 M_1 和 M_2 反射后，得到两束相干光波。 S 经 M_1 和 M_2 所成的虚像 S_1 和 S_2 为两个虚光源，它们对两镜面的交点（线）所成之角是两镜本身夹角的两倍。两相于光束在叠加区域（图中 bC ）内出现干涉现象，呈亮暗相间的干涉条纹于屏上。其原理和条纹性质亦与杨氏实验相同。屏上两相邻条纹（明或暗）间的间距

$$\Delta X = \frac{(r+1)}{d} = \frac{(r+1)}{2r\theta} \lambda$$

若采用激光光源，使振动方向与镜面平行，则 θ 角较大， $d=2r\sin\theta$ ，

如果使 $r \gg 1$ ，以平行光入射于双面镜，则 $\Delta X = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$ 。

洛埃镜

用一块背面涂黑的平面镜，如下图所示，使缝光源 S_1 和虚光源 S_2

互相平行，入射光束对平面镜的掠射角几乎为零。即入射角近似于 $\frac{\pi}{2}$ 。

缝光源 S_1 发出的光波一部分直接射到屏上，另一部分掠射于平面镜 MN ，获得反射光束后再射到屏上。这两束相干光可看成是缝光源 S_1 和镜面虚像（虚光源） S_2 发出，叠加后在屏上可观察到干涉条纹。屏上两相邻干涉条纹的间距可用杨氏实验中屏上两相邻条纹的间距的计算式求得。



说明：

(1) 洛埃镜干涉实验的特点是：当观察屏与平面镜边缘相接触时（图中 OO' 位置），虽然光束从 S_1 、 S_2 到屏与镜端接触点 N 的几何路程是相等的，似应是亮纹，但却是暗纹，说明 S_1N 与 S_2N 有 $\lambda/2$ 光程差，或有 π 相位差。由于直射光不可能有这种相位变化，故只能在反射时发生相位变化。

(2) 洛埃镜实验表明：入射光在掠射（ $i_\lambda \approx 90^\circ$ ）或垂直入射（ $i_\lambda \approx 0^\circ$ ）两种情况下，光从折射率较小的光疏媒质到折射率较大的光密媒质（镜面）时，

反射光的振动方向对于入射光的振动方向恰好相反，都将在反射过程中产生 π 相位跃变，它相当于光程多走半个波长，常称此现象为半波损失。从光密媒质到光疏媒质时反射光无半波损失；在任何情况下透射光都没有半波损失。

半波损失

参见洛埃镜。

薄膜干涉

当从点光源发出的一束光投射到透明板或薄膜的分界面上时，它携带的能量一部分被板面或膜片表面反射，另一部分透入板或膜片，被板内或膜片的底面反射，然后再从板或膜片表面折出。反射和透射的能流正比于光振动振幅的平方。这样一束入射光，经透明板或膜片内外表面反射被分为两束具有一定光程差的相干光波，再经透镜会聚（或用眼睛直接观察）叠加而出现的干涉现象。

牛顿环

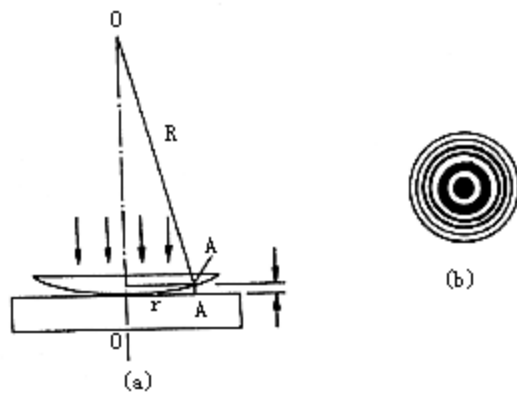
又称牛顿圈。光的一种干涉图样，为一些明暗相隔的同心圆环。

说明：

(1) 在一平玻璃板上放一曲率半径很大的平凸透镜，如下图所示，凸球面与平玻璃板接触并构成尖劈形空气薄膜。当平行单色光垂直入射时，显示的一组等厚条纹是以接触点 O 为圆心的同心圆环，这是牛顿首先观察并加以分析的，因此叫牛顿环。其亮、暗条纹的半径分别为

$$\text{亮条纹: } r_j = \sqrt{R(j + \frac{1}{2})\lambda}$$

$$\text{暗条纹: } r_j = \sqrt{Rj\lambda}$$



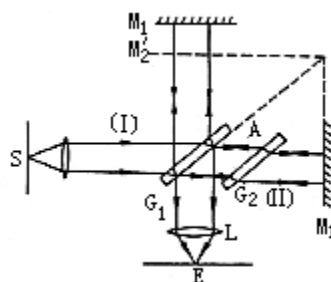
式中 j 为干涉级数， λ 为波长， R 为透镜的曲率半径。光从光疏媒质到光密媒质界面反射时存在半波损失，故反射光所产生的牛顿环条纹的中心处是一暗点。对于透射光所产生的牛顿环条纹的中心处是一亮点。牛顿环所产生的干涉条纹的规律是越靠近中心，条纹的级数越低。

(2) 利用牛顿环，可精确地检验光学元件表面的准确度，可精密地确定压力或长度的微小变化。

迈克尔逊干涉仪

根据光的干涉原理制成的干涉仪，在精密测量方面有着广泛而重要的应用。

下图为迈克尔逊干涉仪的光路图。主要光学部件包括两面高度抛光的反射镜 M_1 和 M_2 、一对平行平面玻璃板 G_1 和 G_2 ，其中 M_2 固定， M_1 用螺旋控制，可作微小移动。 M_1 和 M_2 分别与光束 (I)、(II) 垂直。 G_1 和 G_2 是两块材料相同、厚薄均匀而且相等的平行光学玻璃，在 G_1 的一个表面镀有半透膜，起分光作用。 G_2 起补充光程的作用，称补偿板。从光源 S 发出的平行光束，以 45° 的入射角射到 G_1 的半透膜上，半透膜将光束分成强度几乎相等的反射光束 (I) 和透射光束 (II)。光束 (I) 和光束 (II) 分别经 M_1 与 M_2 反射后折回，再透过 A 进入观察系统 L 。在屏 E 处形成干涉条纹。



说明：

(1) 它是利用分振幅法获得光干涉的仪器，其中光束 (I) 与 (II) 分自同一束光，因而是相干光束，在相干长度内可以在屏上获得干涉条纹。

(2) 所用的光必须来自扩展光源。点光源与狭缝光源不能产生所需的干涉条纹。

(3) 一般而言，所用的光必须是单色的或接近于单色的。特别是当 G_1 到 M_1 和 M_2 的距离相差很大时，更是如此。若用白光，除非光程差小到不超过几个波长，否则就看不到干涉条纹。用白光作光源时，中央条纹为白色条纹（一般为圆形条纹），两旁出现彩色条纹。如果 G_1 背面镀银，中央条纹则为暗纹。

(4) 由于迈克尔逊干涉仪将两束相干光束完全分开，它们之间的光程差可以根据要求作各种改变，测量结果可以精确到与波长相比拟。历史上，迈克尔逊用他的干涉仪最先以光的波长测定了国际标准米原器的长度。还研究了光谱线的精细结构，推动与促进了原子物理与计量科学的发展。迈克尔逊干涉仪的原理还被发展和改进为其他许多形式的干涉仪器。

双折射

同一束光射入各向异性媒质（晶体）后，在晶体内分成两束折射光的现象。是 1669 年由巴托里奴在方解石晶体中发现的。

说明：

(1) 两束折射光，其中一束光的波速与传播方向无关，遵循折射定律，称为寻常光；另一束光的波速随传播方向而变，不遵循折射定律，其折射线不在入射面内，入射角与折射角的正弦之比不为恒量，称为非常光。两束光都是线偏振光，且振动方向互相垂直。

(2) 双折射现象源于构成晶体的原子、离子和分子是各向异性的振子。但任何各向同性的物质，也可通过外界作用，例如加压、加电场或磁场，人为地获得双折射现象。

(3) 利用双折射可以制作各种偏振器、波片和应力分析仪等。在激光应用中，电光调制技术、激光的倍频、参量振荡技术等也都利用了双折射现象。人工双折射在光测弹性等技术领域，有更广泛的应用前景。

光弹性效应

又称应力双折射效应。某些各向同性媒质，在机械应力作用下，显示出各向异性的光效应。

说明：

(1) 非晶体受到内应力时，就呈现各向异性而产生双折射现象。

(2) 观察应力作用下的双折射现象可在两相互正交的起偏器和检偏器之间放入一非晶体，当非晶体受到与水平轴垂直方向上的压力或拉力时，非晶体的光学性质就和以与水平轴垂直方向为光轴的单轴晶体相仿，而成为具有双折射性质的各向异性媒质。

(3) 利用光弹性效应能判断应力分布情况，制成光测弹性仪，发展了全息激光测弹性技术。

单轴晶体

具有一个光轴方向的晶体。

说明：

(1) 在单轴晶体中，一束光的波速与传播方向无关，沿各方向传播的速度 v_o 都相同，故其波面是一球面。另一束光的波速随方向而变，沿各个方向传播的速度不同，在沿光轴方向的波速与一束光相等，也为 v_o ，因此上述两波面沿光轴方向相切或重合。垂直于光轴方向的波速为 v_e ，其他方向上的波速介于 v_o 和 v_e 之间，其波面是旋转椭球面。

(2) 在晶体中有两个主折射率。

(3) 单轴晶体，按波速 v_o 和 v_e 的大小及相应的主折射率 n_o 和 n_e 分为负晶体和正晶体两类。

波片

使两束双折射光之间产生相位差的光学元件。通常由石英、云母等双折射晶体制成。

说明：

(1) 制做波片是双折射晶体体的另一重要用途。波片是从单轴晶体中切割的平行平板，其光轴平行于晶体表面。两束双折射光之间产生的光程差为 $(n_o - n_e) d$ ，则相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d$$

式中 d 为波片的厚度。

若经两束光的叠加，一般将形成椭圆偏振光。若波片的厚度 d 满足 $\delta = k\pi$ (k 为整数)，叠加成线偏振光；若 $\delta = (2k+1)\pi/2$ ，且 $\alpha = 45^\circ$ 时，叠加成圆偏振光。

(2) $\delta = \pm \frac{\pi}{2}$ ，即具有 $\pm \frac{\pi}{4}$ 光程差的波片，称为四分之一波片。当线

偏振光的入射振动面与波片光轴的夹角 α 为 45° 时，通过四分之一波片的光为圆偏振光，反之，当圆偏振光经过四分之一波片后，则变为线偏振光。

(3) $\delta = \pm \pi$ ，即具有 $\pm \lambda/2$ 光程差的波片，称为二分之一波片或半波片。线偏振光通过二分之一波片后，仍为线偏振光，但是，其合振动的振动面与入射线偏振光的振动面转过 2α 。若 $\alpha = 45^\circ$ ，则出射光的振动面与原入射光的振动面垂直，也就是说，当 $\alpha = 45^\circ$ 时，二分之一波

片可使线偏振光的振动面旋转 $\frac{\pi}{2}$ 。

(4) $\delta = \pm 2\pi$ ，即具有 $\pm \lambda$ 光程差的波片，称为全波片。线偏振光通过全波片后，仍为线偏振光，但其合振动的振动面与入射线偏振光的振动面平行。

偏振

横波的振动矢量对于传播方向的不对称现象。

说明：

光的偏振现象是光的横波性的重要标志。

偏振光

电矢量的振动方向不变或具有一定规则变化的光。

按其振动状态又可把偏振光分为 4 种：线偏振光、部分偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光。

线偏振光

电矢量的振动仅限于某一固定方向的光，其端点轨迹在垂直于传播方向的平面内的投影为一直线。

线偏振光的矢量方向与传播方向构成的平面叫做振动面，包含传播方向在内并与振动面垂直的平面（即磁矢量所在的平面）叫偏振面。线偏振光的振动面是固定的平面，因此也称它为平面偏振光。

部分偏振光

电矢量的振动包含各方向，但不同方向的振幅大小不等，在两个互相垂直的方向上振幅具有最大值和最小值的光。

圆偏振光

电矢量以光线为轴作旋转运动，其端点的轨迹在垂直于传播方向的平面内的投影为一圆的光。圆偏振光可视为两个频率相同、振动方向互相垂直、振幅相等，具有恒定相位差的线偏振光的合成。

椭圆偏振光

电矢量以光线为轴作旋转运动，其端点的轨迹在垂直于传播方向的平面内的投影为一椭圆的光。椭圆偏振光可视为两个频率相同、振动方向互相垂直、具有恒定相位差的线偏振光的合成。若两线偏振光沿+z 方向传播，它们的偏振分别沿 x、y 方向，则其两个分量表达式为

$$E_x = A_x \cos \omega t, \quad E_y = A_y \cos (\omega t + \Delta \varepsilon)。$$

椭圆的形状取决于振幅 A_x 、 A_y 和相位差 $\Delta \varepsilon$ 。

偏振度

描述光波偏振程度的物理量。当部分偏振光在通过检偏器时，透射光的强度随其偏振方向而变，则偏振度的值为

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

式中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别是与最大振幅和最小振幅相应的光强。对线偏振光， $I_{\min}=0$ ，偏振度 $P=1$ ，故线偏振光是偏振度最大的光，亦称为全偏振光；部分偏振光的偏振度介于 0 与 1 之间，其偏振度越接近于 1，偏振化程度越高。

自然光

电矢量的振动对于光的传播方向是对称而均匀分布的光。

说明：

(1) 自然光是相对于偏振光而言的，一般指由光源直接发出的光。

(2) 对自然光，与最大振幅和最小振幅相应的光强 $I_{\max}=I_{\min}$ ，偏振度值 $P=0$ 。因此，自然光也称为非偏振光。

光的吸收

光通过媒质时，随着在媒质中的传播距离的增加而光强减小的现象。通常通过实验用一束单色平行光照射在物质上，测出光强随穿透距离衰减的规律来研究光的吸收。

说明：

(1) 光的吸收反映了光与物质的相互作用。从宏观看，表现为光能减弱的消光现象。从微观看，光通过物质时，光波的电矢量使物质结构中的带电粒子作受迫振荡，光的一部分能量供给作受迫振荡，如果物质粒子与其他原子或分子碰撞时，振动能量转变为平动动能，使分子的热运动能量增加，则这部分光能消失，转换成热能。

(2) 光的吸收定律：

①物质的厚度以等差级数增加时，光的强度以等比级数减弱。

②被吸收的光能与光路中吸收光的分子数成正比。

一般吸收

若某种媒质对通过它的各种波长的光的吸收程度几乎相等，即吸收系数与波长无关，则称这种媒质具有一般吸收。

光通过呈现一般吸收的媒质时，光波几乎都能从媒质透射，所以又可称媒质对这一波长范围（指可见光及其邻近波段）的光是透明的。通常所说的透明体，如水晶、玻璃，是指对白光呈现一般吸收。

选择吸收

若媒质对某种波长的光的吸收特别强烈，则称这种媒质具有选择吸收。当媒质对某种波长（指紫外或红外光）吸收系数很大时，它对该波段的光的反射率也特别大。

选择吸收是光和物质相互作用的普遍规律。在可见光范围内为一般吸收的物质，往往在紫外和红外波段内表现为选择吸收，而对可见光进行选择吸收，会使白光变为彩色光。

光的色散

复色光分解成单色光而形成光谱的现象。

说明：

(1) 色散现象反映了光和物质的相互作用。其经典理论解释如下：媒质原子和分子中的带电粒子在准弹性力的作用下，保持在各自平衡位置附近，具有一定的固有振动频率。当外来光波透入媒质时在入射光波的电场作用下，媒质原子或分子发生极化，形成电偶极子，并在入射光波的强迫力作用下，依入射光频率作受迫振动，产生次级子波发出辐射，或由于分子间的相互碰撞而受到阻力。这些电偶极子形成了媒质内各处的变化的电矩。它们发出与光波同频率的辐射，并从光波吸收能量。

(2) 光的色散现象起始于 1672 年牛顿首先利用三棱镜的色散效应把日光分解为彩色光带，并用交叉棱镜法把色散曲线直观地显示出来。实验表明，在可见光区域内，无色透明物质的色散曲线形式很相似。

(3) 媒质的折射率或色散率均随波长增大而减小的现象称为正常色散。其基本规律是：波长越短，折射率增大越快；波长越短，色散率越大；波长一定时，不同媒质的折射率，色散曲线上该点位置的斜率越大，即色散率越大；不同媒质的色散曲线各有其特殊形状，不能由一曲线按比例转换为另一曲线。因此，不同材料制成的棱镜所产生的光谱中，各对应谱线的间距按不同的比率分布。

1836 年克希 (A. L. Cauchy, 1789—1857) 给出了正常色散的经验公式。

(4) 1862 年勒鲁 (F. P. Le-Roux, 1832—1907) 发现的折射率随波长增加而增加的现象为反常色散，它是任何物质在吸收带附近所共有的现象。反常色散

与光的吸收总是伴随在一起的，它发生在媒质强烈吸收的波段，而正常色散则发生在媒质很少吸收的波段。

(5) 各种物质的色散曲线虽然不同，但对同一种媒质其全部色散曲线具有共同特点，即在相邻两个吸收带之间，折射率单调下降，每次经过一个吸收带，折射率急剧加大。总的趋势是曲线随波长的增加而抬高，即吸收带内的色散是反常色散；吸收带外的色散是正常色散；远离吸收带的地方，折射率随波长变化缓慢，而接近吸收带的区域则变化较快，在吸收带内（反常色散），则变化非常迅速。

(6) 复色光通过光栅或干涉仪时，由于衍射或干涉的作用也能使各种色光色散。广义上讲，色散不仅指光波分解成频谱，而且某一物理量只要随频率而变，都叫做色散，如旋光色散。

光谱

非单色光按波长大小依次排列的一条光带。

说明：

(1) 光谱是光的频率（波长）成分和强度分布的关系图，是研究原子、分子结构的重要途径之一。

(2) 不同的光源具有不同的光谱。光谱按其产生的本质不同，可分为原子光谱和分子光谱。按产生的方式不同，可分为发射光谱、吸收光谱和散射光谱。

(3) 光谱可用光谱仪测量。光谱仪种类很多，但基本都由光源、分光器和记录仪三部分组成。

发射光谱

由原子或分子所发出的辐射产生的光谱。按其表现形态不同，可分为线光谱、带光谱及连续光谱三种。

线光谱

原子气体发射的光谱，光强集中在一些分立的波长值附近形成的一条条谱线。每条线光谱近似为单色光，这些谱线表示原子中的电子由一个能级变到其他能级时所发射的电磁波的波长，因此也叫做原子光谱。

带光谱

由一条条宽度不等的光带组成的光谱。是由分子辐射其转动能或振动能，或同时辐射这两种能量产生的。

连续光谱

波长连续分布的光谱。如气体放电、白炽固体的光谱。

吸收光谱

具有波长连续分布的光通过物质时，某些波长的光被物质吸收，产生明线或暗带组成的光谱。

说明：

同一物质的发射光谱和吸收光谱之间有着严格的对应关系。通常某种物质自身发射哪些波长的光，它就强烈地吸收哪些波长的光。也就是说，发射光谱中的亮线对应于吸收光谱中的暗线。

散射光谱

当光通过物质时，除了光的透射和光的吸收外，由光的散射产生的光谱。

原子光谱

由原子内部电子运动状态改变(即能级跃迁)而产生的发射光谱或吸收光谱。

说明：

原子光谱由许多分立的谱线组成，每种原子以自己的特征光谱按一定规律组成若干组光谱线系。

分子光谱

由分子内部运动状态改变而产生的发射光谱或吸收光谱。

说明：

- (1) 分子光谱包括转动光谱、振动光谱和分子电子光谱三种。
- (2) 分子光谱的型式决定于分子的结构和运动规律。

物体的颜色

由物体反射或透射的各种不同波长的辐射引起人眼不同颜色的感觉。

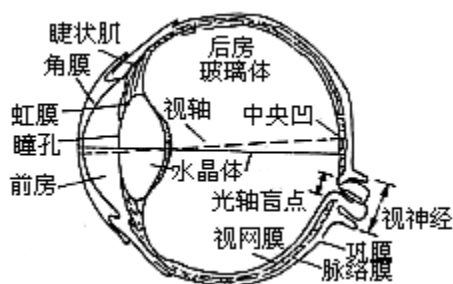
说明：

- (1) 发光物体的颜色，决定于它所发的光内所含的波长。
- (2) 非发光物体的颜色主要决定于它对照射光的吸收和反射情况。若它对照射光完全反射，则称白体；若它对照射光完全吸收，则称黑体；若部分反射、部分吸收，则称灰体。
- (3) 通常所谓的物体的颜色，是指它在白光照射下所显示的颜色。
- (4) 人对不同波长的光波，产生不同的颜色感觉。波长峰值在 440~450nm，人眼就产生蓝色感觉；波长峰值在 530~540nm，人眼就产生绿色感觉；波长峰值在 560~570nm，人眼就产生红色感觉。若光线由许多波长不同的单色光组成，人眼就产生由这些色光重叠而成的复色的感觉。

眼睛

人们获得光信息的感觉器官。是一个相当复杂的天然光学系统，犹如一架变焦距的照相机。

说明：



(1) 眼的结构如下图所示，它由巩膜、角膜和视网膜组成，直径约 25 毫米。最外层为白色强韧的膜作保护层。

此膜在眼球正前方突出的透明部分称为角膜，折射率为 1.376，入射光线的大部分弯折都发生在空气和角膜的界面上。其余部分为不透明的巩膜，俗称“眼白”。角膜与晶体之间充满水状液，称前房。前房之后为虹膜，虹膜类似于照相机中的可变光阑，其中心圆孔称为瞳孔，瞳孔的张大与缩小随光的强弱而变，它的直径可在 2~8 毫米范围内自动改变，以控制进入眼睛的光通量。眼球中与照相机镜头对应的主要部分是晶状体，它的外形似双凸透镜，折射率约为 1.386，呈不均匀分布，越靠近中心，折射率越高，有利于减少像差和提高折光能力。晶状体前表面的曲率半径比后表面大，相当于一个变焦距透镜。眼的调节可改变它的表面曲率半径。晶状体的后方空间为后房，其间充满着含有大量水分的胶性玻璃状液，叫玻璃体。水状液和玻璃状液的折射率与水的折射率相近，约为 1.336。后房的内壁为视网膜，相当于照相机中的感光底片。视网膜中心有一凹陷，称黄斑，黄斑中央的微小区域叫中心凹或中央凹。中心凹和晶状体节点的连线称视轴，它与光轴的夹角约为 5° 。

物体通过角膜、瞳孔、晶状体和玻璃体折射后，成一倒立实像会聚于视网膜上，刺激感光细胞而产生视觉。

(2) 眼睛的分辨本领与网膜结构有关。黄斑是视网膜上视觉最灵敏的地方。观看景物时，睫状肌牵制晶状曲率，转移眼球以视轴对准该景物，使其像刚好成在黄斑中心。眼睛的视场虽然很大，水平方向视场角约 160° ，垂直方向约 130° ，但只在中央视角（视轴附近） $6^\circ \sim 7^\circ$ 范围内分辨本领最高。趋向网膜边缘，分辨本领急剧下降。但这并不妨碍人们看清周围景物。因为眼球在眼窝内是能够随意转动，它可随时使视场的中心瞄准所要注视的地方而对周围景物进行自动扫描。

(3) 眼睛的分辨本领与照明条件有关。在白天的照度条件下，黄斑内的最小分辨角接近 $1'$ ；在夜间照明条件最差的时候，眼睛的分辨本领大大下降，最小分辨角在 1° 以上。

(4) 眼睛是一架变焦距的照相机，它的变焦距镜即为晶状体。眼睛借助睫状肌的松弛或紧缩以改变晶状体表面的曲率半径而改变其像方焦距。当观察远物时，睫状肌完全放松，晶状体前表面曲率变小，曲率半径变大，焦距变长；观察近物时，睫状肌收缩，晶状体前表面曲率增大，曲率半径变小，焦距缩短。这种调节（或调焦）能够保持像距不变，使不同距离的物点都能在视网膜上形成清晰的像。

眼睛的调焦能力有一定的限度。睫状肌完全放松和最大限度紧张时能清楚地看到的点分别称为该眼球的远点和近点。正常眼处于没有调节的自然状态，它的远点在无穷远处，近点随年龄而异。如果眼球调节机能不正常或形变，都足以使远点或近点发生反常变化。近视眼的晶状体曲率太大或眼球的轴过长，无穷远的物成像在视网膜前，必须用发散的透镜来矫正；远视眼的晶状体曲率太小或眼球的轴过短，无穷远的物成像在视网膜后，近物虽经晶状体的极度弯曲，物体的

像仍成在视网膜后，但须把物放得远些，才能看清楚，故须用会聚的凸透镜来矫正；老花眼是由于年龄增大，眼睛的调焦能力衰退而形成，也必须用凸透镜来矫正。若角膜折射面不为球面，各环带面的曲率不相等，因而产生像散现象，必须用球柱面透镜或复曲面透镜来矫正，称为散光眼。

在适当的照度下，物体离开眼睛 25 厘米时，在视网膜上形成的像最清楚，且不容易感到疲劳，这个距离叫明视距离。

(5) 当物体发光停止作用后，人眼的视觉并不马上随之消失，而

能暂留一个短时间的现象。这个暂时保留时间约为 $\frac{1}{16}$ 秒，即当闪烁光

源闪光每秒超过 16 次，则眼球感觉视为连续发光，电影就是利用这种特性制作的。

(6) 一般，单一眼睛对物体成像只有平面感觉，而双眼看到的整个物体的印象比平面范围大，且左右两眼看到的方位不同，合成产生立体感。同时，也能判别物体的远近。实体镜和立体图片的配合，就是人为地把平面印象造成与立体印象相同的感受的结果。若用双镜头相机，同时拍摄同一物体，可获得犹如双目视觉中，两眼所看到该物体的两幅不同方位的图象，然后用实体镜使左右两眼同时分别观看左右两幅图片，以获得与观察实物相同的视觉，形成立体感。立体电影就是依据此原理。

明视距离

最适合正常眼睛观察物体的距离。一般规定为 25 厘米。光学仪器均据此来设计。

投影仪

将一定大小的透明图片放大并成像于屏幕上的光学仪器。主要由光源、聚光器和放映镜头等部分组成。

说明：

(1) 长度放大率等于 $\frac{\text{像距}}{\text{物距}}$ ，近似等于 $\frac{\text{像距}}{\text{焦距}}$ 。

(2) 广泛应用于影院、学校。

显微镜

使微小物体或物体的微小部分产生放大的像，以便观察的光学仪器。将目镜和物镜（均由透镜或透镜组构成）分别固定在一金属管的两端，即组成显微镜。

说明：

- (1) 其角放大率等于物镜的线放大率与目镜的角放大率的乘积。
- (2) 其分辨本领主要由所用光的波长和物镜的数值孔径决定。
- (3) 显微镜具有放大率高和分辨本领大的特点，故广泛应用于生物学、医学和工农业生产中。

望远镜

用以观察远处物体的光学仪器。中学物理中一般介绍伽利略望远镜、开普勒望远镜和牛顿反射式望远镜。

伽利略望远镜

物镜为会聚透镜而目镜为发散透镜的望远镜。

说明：

- (1) 其放大率等于物镜焦距与目镜焦距之比。
- (2) 其所成像为一正立的虚像。
- (3) 常用以观剧或看表演。

开普勒望远镜

物镜、目镜均为会聚透镜的望远镜。

说明：

- (1) 其所成像均为倒立的虚像。

(2) 因放大率大，常用于航海、军事窥测和野外观察。

反射式望远镜

物镜为一个很大的凹镜，凹镜的焦点前装一个小平面镜，目镜为会聚透镜。

说明：

(1) 在凹镜的反射光尚未会聚到焦点时，就由平面镜反射到目镜成实像。

(2) 由于凹镜的口径可以做得很大，能集中较多的光，成像清晰、明亮。

(3) 用于天文观测。

照相机

利用光学原理把物体形态真实地记录在胶片上的一种仪器，由镜头、机身、快门、取景器组成，有的还包括测距器、测光表、自拍器等。

分光镜

一种目视的分光仪器。利用棱镜色散原理制成，其作用是将复色光分解为单色光。主要由准直管、棱镜台和望远镜构成。

理想光学系统

能够使任何同心光束保持同心性的光学系统。

说明：

(1) 理想光学系统有如下性质：

①物方每个点，对应像方一个共轭点。

②物方每条直线对应像方一条共轭直线。

③物方每个平面对应像方一个共轭平面。

(2) 如果是轴对称的理想光学系统，还具有以下性质：

①主光轴上任一点的共轭点仍在主光轴上。

②在垂直于主光轴平面的共轭面仍与主光轴垂直。

③在垂直于主光轴的不同平面内横向放大率相同，在垂直于主光轴的不同平面内横向放大率一般不等。

物

能自身或被照明后向各个方向发射或漫射光线，且是发散或会聚入射同心光束的中心。

说明：

(1) 物体上任一发光点都可作为点光源，称为物点。物由物点组成。

(2) 对一个光学系统来说，如果入射光束是发散的同心光束，则该同心光束的发散中心为实际存在的物点，称为实物点，或称实物。

(3) 如果入射光束是会聚的同心光束，则该同心光束要会聚到一点，但实际未会聚于一点，即非实际存在的物点，称为虚物点，或称虚物。例如，对两个或两个以上光学系统来说，光经第一个光学系统后是会聚的，不等会聚光束进入会聚中心点就已入射到下一个光学系统，而且又确实是物，它能够通过光学系统成像，不过只能称虚物。因此虚物出现在几个光学系统联合成像的问题中。

像

物体发出的同心光束经光学系统后，仍保持同心性不变，形成与原物相似的图景。

说明：

(1) 从物点发出的同心光束，经光学系统后，光线方向虽然改变了，但出射光束仍有一个中心，称为像点，像由像点组成。

(2) 若出射的同心光束是会聚的，它的中心是光线的真实交点，则称该像点为实像。若出射的同心光束是发散的，它的中心是光线的反向延长线的交点，则称该像点为虚像。

(3) 实像与虚像的区别。实像可以在光屏上显示（如照相机底片上所成的像）。摄影、幻灯和放映电影都必须利用实像，它能用眼睛观察。而虚像不能在成像处显示，只能在视觉中出现。在放大镜、显微镜、望远镜等助视仪器中观察到的物体的像都是放大的虚像。

实像

参见像。

虚像

参见像。

像差

光学系统所成的像与原物的面貌存在偏差的现象。

说明：

(1) 正确的像要求具有下列条件：

- ①物方每点发出的同心光束在像方仍保持同心光束。
- ②垂直于光轴的物平面上各点的像仍在垂直于光轴的一个平面上。
- ③在每个像平面内横向放大率是常数，从而保持物、像之间的几何相似性。
- ④像的各部分应保持与物同样的彩色。

不同时满足上述条件而产生的偏离即是像差。其中如果①和②条件不满足，就会破坏像的清晰度；如果②和③条件不满足，会使像变形；如果条件④达不到，会使像出现不准确的彩色，且使像模糊。

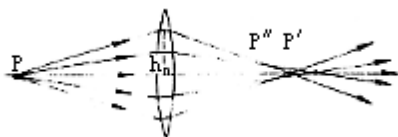
(2) 像差可分为单色像差和色像差两大类。单色像差有 5 种，即球面像差、彗形像差、像散、像场弯曲和畸变。色像差又分轴向（纵向）和横向两种。

(3) 上列像差统称为几何像差。即使把所有几何像差全部消除，由于存在衍射效应，理想成像条件仍不能满足，这时像的质量就要靠波动光学的理论来分析和评价。

球面像差

像差的一种。当透镜或球面镜的孔径较大时，从光轴上一物点发出的光束，经透镜或球面镜反射或折射后不再交于一点，呈现弥散的光斑的现象。

说明：



(1) 球面像差是同一点发出的近轴光线和远轴光线在通过透镜或球面镜后，像点不在同一位置而造成的。如左图所示，凸透镜成像时，近轴光线的会聚点 P' 比远离光线的会聚点 P'' 离透镜为远，故在 P' 和 P'' 之间任何一点的屏幕上，将得到一个边缘模糊而对称的像。

(2) 适当调配单个薄透镜球面的曲率（称配调整法）和选用适当的透镜组合，有时为了特殊需要也可采用非球面透镜，可消除球面像差。

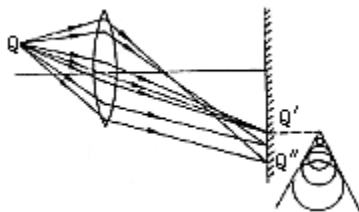
彗形像差

像差的一种。不在光轴上一物点发出的宽光束，经光学系统反射或折射后在像平面上不成点像，而形成一锥形弥散斑的现象。因其形状像拖着尾巴的彗星，故得名。

说明：

(1) 彗形像差只对光轴和主光线确定的平面对称，因而是几种像差中最坏的像差。

(2) 造成彗形像差的原因是光束对光轴的不对称。如下图可看到一个照度不均匀而形状似彗星的像。



(3) 可对给定物距，用配曲调整法消除单个透镜的彗差，也可改变光阑（限制光束的孔）位置或用胶合透镜来消除彗差。

像散

像差的一种。远离主轴上一物点发出的窄光束，经光学系统反射或折射后不能聚焦于一点，而会聚于两条远近不同且相互垂直的焦线上的现象。

说明：

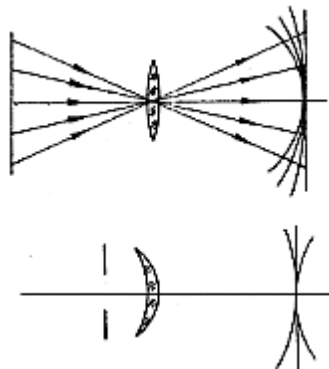
像散只与物点离轴的距离有关，可用几个透镜的组合矫正。

像场弯曲

又称场曲。像差中的一种。垂直于主轴的物平面上的所有点经光学系统后所成的清晰的像不是一个平面，而是一个曲面的现象。

说明：

(1) 像场弯曲是与像散有联系的一种像差。在消除像散后，每一物点成一像点，但垂直于光轴的物线所形成的像一般仍是抛物线形的弯曲，如左上图所示。助视仪器允许有一定大小的场曲，人眼可自动调节适应像场弯曲。但对照相机来说，因感光胶片总是平面，像场弯曲会使像变模糊，故必须消除。



(2) 像场弯曲可通过选配透镜两表面的曲率或在透镜前适当位置放一光阑来矫正，如左图所示。

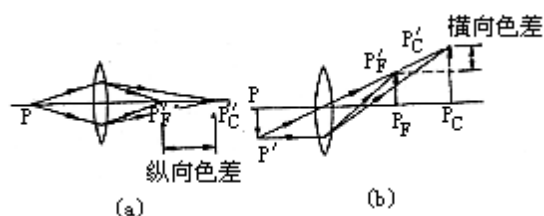
畸变

像差中的一种。物上的直线经光学系统成像后变为弯曲的现象。

说明：

(1) 畸变是由光学系统的放大率随光束和光轴间所成的角度改变而造成的。与球差、彗差和像散不同，畸变并不破坏光束的同心性，从而不影响像的清晰度。畸变表现在像平面内图形的各部分与原物不成比例。直线离光轴越远，畸变越大，但如与光轴正交并通过光轴，则不发生畸变。

下图 (a) 是放在物平面内的方格，若远光轴区域的放大率比光轴附近大，在像平面内就会出现下图 (b) 所示的情景，这现象称为枕形畸变（也称正畸变）；反之，若远光轴区域的放大率比光轴附近小，在像平面内就会出现下图 (c) 的情景，这现象称为桶形畸变（也称负畸变）。



(2) 在对称透镜中心置入一光阑，就可以使两种相反的畸变互相抵消。

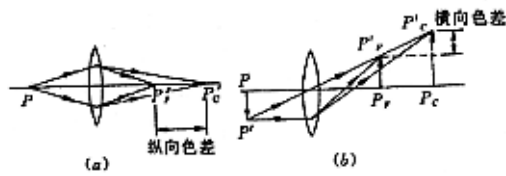
色像差

又称色差。像差中的一种。复色光经光学系统折射后所成的像的边缘呈彩色模糊的现象。

说明：

(1) 同一透镜对不同色光的折射率不同，焦距也不同，而像的位置与大小又决定于焦距，所以从物点发出的不同色光不能成像于同一点。如下图 (a)，P 为复色光在透镜的光轴上一物点，由近轴光束所成的像因色散而会聚在轴上不同位置，波长较长的红色折射光成像于 P'_c ，波长较短的蓝色折射光成像于 P'_f 。 P'_c 和 P'_f 之间的距离称为纵向色差（即位置色差）。透镜的焦距又因入射光波长的改变而引起横向放大率随波长而变，使垂轴物 PP' 因不同色光经透镜所造成的红色像和蓝色像不仅位置不同，且大小 $P_cP'_c$ 和 $P_fP'_f$ 也不相等，如下图 (b) 所示。此两像的高度差称为横向色差（即放大色差）。

各色光的焦距不同，焦点必重合，故能有效地消除色差。



(2) 利用不同玻璃材料制成的薄凹、凸透镜组合的消色差透镜，因其各色光的主平面重合，焦点必重合，故能有效地消除色差。一般采用两个光学性质不同的玻璃材料做成的透镜经胶合而成。

激光

激光的原意是通过辐射受激发射的光放大。国外用其英语“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”中各词的第一个字母组成“Laser”来称呼（译音是“莱塞”）。具体说来，原子如果处于高能态的能级 E_2 时，当一个能量恰为 $h\nu_{21}$ 的光子入射，则此原子受外来光子的感应（刺激）由高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 ，释放出一个能量同样为 $h\nu_{21}$ 的光子，使出射光波要比入射光波能量增大一倍。这两个光子再各自感应一个光子，成为 4 个光子，然后再各自感应为 8 个具有同频率、相同发射方向、相同偏振态、相同的相位和速率的光子，这种链式过程即为受激辐射的光放大过程。若此过程形成，光源就能在极短的时间内辐射出所有特征完全相同的光子，这种光就称为激光。

说明：

(1) 与普通光源相比，激光具有如下特性：

①方向性好。激光具有极好的方向性。它的能量在空间指向上高度集中。它在形成过程中由于谐振腔对光束方向的选择作用，使受激辐射的光子在谐振腔内来回振荡，致使激光器输出的光束发散角很小，非常接近于平行光。表现在激光光源的光束延伸几千米后扩展范围的线度不到几厘米。

②亮度高。由于激光的方向性很强，此光源的表面亮度就很高，照射在物体上会产生很大的照度。

③相干性好。激光的时间相干性和空间相干性都很好，表现在它的单色性很好。激光能量在频谱上高度集中，谱线宽度很窄，但波列相干长度很长。

从激光端面输出的是一束步调一致的光束，它在其波场空间中每一点有确定的传播方向，在其波前上各点间有稳定的相位关系，因此具有很好的相干性。

(2) 利用激光的三个特性，激光被广泛应用于激光通信、测距、准直、定向、激光加工、雷达、医学、显微光谱分析、核聚变全息等方面。

激光器

又称“光喷射器”、“莱塞”。利用受激辐射原理使光在某些激发的工作物质中放大或发射的器件。

说明：

(1) 激光器的种类很多，按其工作物质来分类，可分成气体激光器、固体激光器、液体激光器（亦叫染料激光器）和半导体激光器。按其工作方式来分类，又可分为连续激光器、脉冲式激光器、调 Q 式激光器和超短脉冲式激光器。

(2) 激光器一般由工作物质、光泵和光学共振腔三个部分组成。

气体激光器

以原子作工作物质的激光器。

说明：

(1) 分原子激光器（He—Ne 激光器）、离子激光器（氩激光器）和分子激光器（二氧化碳激光器、氮分子激光器）。常采用直流放电或交流放电方法激励。

(2) 具有容易连续运转、结构简单、造价低廉、输出的激光频率稳定、相干性好等优点，是目前应用最广的一类激光器，其中研究最详细、用得最广的数 He—Ne 激光器。

固体激光器

以固体作工作物质的激光器。

说明：

(1) 常见的固体激光器有红宝石激光器、钕玻璃激光器，掺钕的钇铝石榴石激光器（YAG）三种。前两种为脉冲式工作，后一种可连续式工作，也可脉冲式工作。

(2) 固体激光器的工作物质小、机械强度高，容易得到高能量和大功率的激光脉冲，但它们输出激光的相干性和频率稳定性都不如气体激光器。红宝石激光器是应用很广的固体激光器。

液体激光器

以液体作工作物质的激光器。

说明：

(1) 常见的液体激光器是可调谐染料激光器。它的工作方式可以是脉冲的，光泵用脉冲激光器（如氮分子激光器）或闪光灯；也可以是连续的，光泵用连续激光器（如氩离子激光器）。

(2) 液体激光器具有输出波长连续可调的特点，在可见光区和紫外光区最为简单方便。

半导体激光器

以半导体为工作物质的激光器。

说明：

(1) 半导体激光器的工作物质是用砷化镓、磷化铟、碲化锌等半导体材料。

(2) 具有体积小、效率高、质量轻、结构简单、坚固，对输出激光便于直接调制等特点。目前较实用的是砷化镓激光器，应用于光雷达、光通信和光计算机上。

光电效应

物质（金属）表面在光的照射下，逸出电子的现象。

说明：

(1) 光电效应的内容包括：①单位时间内发射的光电子数目正比于入射光强度，而与入射光频率无关。②光电子的初动能与入射光的强度无关，只与入射光的频率（波长）有关。频率越高，发射出的光电子的初动能越大，从而它的临界截止电压 V_0 的绝对值越大。③对每一种金属，当 ν 低于一定频率 ν_0 时，不论光强多大，光电效应不再发生。频率 ν_0 是由金属的特性决定的，称为截止频率，对应的波长 $\lambda_0=c/\nu_0$ 称为红限。④当入射光束照射在光电阴极上时，几乎同时就释放出光电子，产生光电效应。光照停止，光电效应也就消失，弛豫时间最多不超过 10^{-9} 秒。

(2) 爱因斯坦的光电效应的量子解释

爱因斯坦于 1905 年圆满地解释了经典理论无法解释的光电效应：当光照射在金属表面时，一个能量为 $h\nu$ 的光子，立即被金属中的某自由电子一次吸收，此间无需经过能量积累时间。电子把一部分能量用来克服金属表面对它的束缚力而耗功 W ，另一部分则为该电子离开金属后所具有的最大动能

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2 = h(\nu - \nu_0) = h\nu - W。$$

这就是爱因斯坦光电方程。如果 $h\nu > W$ ，那么电子带着剩余能量逸出金属，即成为光电子，因而产生光电效应。如果 $h\nu < W$ ，电子就不能逸出金属表面，没有光电子产生，因而没有光电效应。对某一定金属，有一定的光电极限频率 ν_0 。其大小由金属材料的逸出功决定，即 $\nu_0 = W/h$ ，相应的极限波长

$$\lambda_0 = c/\nu_0 = ch/W。$$

(3) 1916 年，密立根对一些金属进行反复、仔细测量，测得光电

子的最大动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 与照射的频率 ν 之间的关系是严格的线性函数关

系，对所有金属，其直线的斜率均不变。由直线的斜率测得普朗克常数 h 的精确数值与热辐射或其他实验中测得的 h 值很好地相符。

(4) 利用光电效应可以制造各种光电管和光电池。光电管在光度测量、电影、电视和无线电传真技术中起着把光信号转化为电信号的作用。光电计数、光电跟踪、光电保护等装置在工业自动化中也有广泛应用。铁硒光电池，适用于可见光范围，在照相技术中常用作曝光计。还可制成硅光电池、硅光电二极管、光敏电阻等器件。硅光电池较多应用在宇宙航行和太阳能发电中。

光子

电磁辐射的量子，不带电，是自旋为 1，静止质量为零的中性粒子。

1905 年爱因斯坦用光的量子说解释光电效应时提出，光子的能量

$$E = h\nu = hc/\lambda = mc^2 = pc，$$

$$E(\text{eV}) = 12397(\text{eV}\text{\AA})/\lambda(\text{\AA})，$$

式中 ν 为频率， h 为普朗克常数。1917 年又提出，光子不仅有能量，而且有动量

$$p=mc=E/c=hv/c=h/\lambda,$$

或者 $p=hk$ (波矢 $k=2\pi/\lambda$, λ 为光的波长)。

说明:

(1) 光子理论实验基础是普朗克黑体辐射、光电效应和康普顿散射。

(2) 光子是基本粒子, 由于光子只能在真空中以光速 c 传播, 根据相对论中质能关系式 $E=mc^2$ 及质量与速度关系式

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

考虑到光子能量 $E=hv$, 要使光子的质量为有限值, 必须认为光子的静止质量为零, 因此光子只有运动质量 $m=p/c=E/c^2$, 没有静止质量, 即 $m_0=0$ 。

(3) 光子是光和电磁波的能量与动量的携带者。光子的能量取决于辐射的频率, 光子能量范围可以从高能 γ 射线、X 射线、可见光到低能红外线、微波和热辐射。

(4) 光子的自旋动量矩 $J=h/2\pi$, 它是电子自旋动量矩的 2 倍。若取 $h/2\pi$ 为自旋动量矩的单位, 可简称光子自旋为 1。光子不带电, 其电偶极矩和磁矩都为零。

(5) 光子只参与电磁相互作用, 存在于一切带电粒子或具有磁矩粒子间的电磁相互作用过程中。如光电效应和康普顿效应。

光度学

研究可见光能量传播的计量科学。因可见光也是辐射能的一种, 所以光度学也是辐射量度学的一部分。

辐射能通量

辐射量度学中的最基本量, 也称辐射功率。单位时间内光源发出或通过一定接收截面的辐射能。在 CGS 和 MKS 制中, 它的单位分别是瓦 (W) 和千瓦 (kw)。

视见函数

不同波长的光对人眼的视觉灵敏度。

某一波长的光与5550Å波长的光，产生同样亮暗感觉所需的辐射能通量之比，即

$$V(\lambda) = \frac{\Psi_{5550}}{\Psi_{\lambda}}$$

叫做视见函数。

光通量

光源表面的客观辐射通量对人眼引起的视觉强度，它等于单位时间内某一波段的辐射通量与该波段的视见函数的乘积。

说明：

(1) 各色光的波长不同，人眼对不同波长的视见函数也不同，即使各色光的辐射通量相等，其光通量并不相等。

(2) 光通量的单位为流明，简称“流”，符号为 lm。

发光强度

光源在一定方向范围内发出的可见光辐射强弱的物理量，它等于点光源沿某一方向上单位立体角内发射出的光通量。

说明：

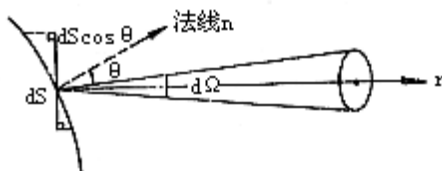
(1) 在国际单位制中，发光强度的单位是“坎德拉”，简称“坎”，符号为 cd。

$$1\text{坎德拉} = \frac{1\text{流明}}{1\text{球面度}}$$

(2) 发光强度不仅适用于发光体，而且适用于反射体。

亮度

表示发光面发光强弱的物理量。它等于发光面 dS 在某一方向 r 的发光强度 I 除以发光面在该方向的投影面积 $dS \cos \theta$ (下图), 即该发光面积在这一方向的光亮度上式表明, 在 r 方向上从单位投影面积在单位立体角内发出的光通量。



说明:

(1) 在国际单位制中, 亮度的单位为“坎德拉·米⁻²”, 符号为 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 。另外, 还有“流明/米²·球面度”或“流明/厘米²·球面度”, 符号为 $\text{lm}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 或 $\text{lm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

(2) 大多数发光体亮度随观察方向而变, 但有些光源, 其亮度与方向无关。

(3) 亮度不仅适用于发光体, 而且适用于反射体。

照度

受照面被照明程度的物理量。



它可用光入射在单位面积上的光通量数值来量度。如果照射在物体面积元 dS 上的光通量为 $d\psi$, 则此面积元上的照度 $E = d\psi / dS$ 。

说明:

(1) 对点光源来说, 照度反比于光源到受照面的距离 r 的平方, 而正比于光束的轴线方向 r 与受照面法线 n 间夹角 θ 的余弦。即

$$E = \frac{I d\Omega}{dS} = \frac{I \cos \theta}{r^2}$$

(2) 照度的单位是“勒克斯”, 符号为 (Lx), 或“辐透”, 符号为 (ph)。

$$1\text{勒克斯} = \frac{1\text{流明}}{1\text{米}^2} \quad 1\text{辐透} = \frac{1\text{流明}}{1\text{厘米}^2}$$

1 勒克斯=10⁻⁴辐透。如果把照度公式中的光通量换成辐射通量，即可得辐射照度，其单位为 W/m² 或 W/cm²。

磁光效应

又称磁致双折射效应。外磁场的作用使某些各向同性的透明媒质产生各向异性的效应。

说明：

(1) 某些透明媒质处于强磁场中，当光以不同于磁场方向通过时，也会出现双折射现象。

(2) 其实验装置与克尔效应的实验装置相似，只需将电场改为磁场。

(3) 法拉第磁致旋转效应也是一种磁光效应，1845年由法拉第发现。通常是在两个正交的偏振片中放置磁性物质的样品，若在平行于光的传播方向上加一强磁场，则线偏振光通过样品后其振动面转过了一角度。

(4) 磁光效应是媒质分子在外磁场作用下发生磁化而引起的。

克尔效应

某些各向同性的透明媒质在强电场作用下，变为各向异性，从而产生双折射现象的效应。是英国科学家克尔（J. Kerr, 1824—1907）于 1875 年发现的。

说明：

(1) 电光效应的一种。在电场作用下变为各向异性的媒质具有单轴晶体的特性，其光轴沿电场强度 E 的方向。实验表明，在单色光照射下，光的电矢量平行和垂直于电场方向时的两个折射率之差与电场强度平方和波长成正比，即

$$n_e - n_o = B \lambda E^2,$$

式中 B 为克尔常数，视液体的材料而定；λ 为真空中的波长。

(2) 在两正交的偏振片之间放入一个克尔盒，盒中装有平行板电容器的一对电极并盛有硝基苯液体。电极电场与两偏振片透光轴方向各成 45°。用单色

平行光照射起偏器，未加电压时，因两偏振片相互垂直，液体为各向同性，故无光通过检偏器。当两极加上强电压（ $E \sim 10^4$ 伏/厘米），液体在强电场作用下产生双折射现象，有光透过检偏器，出射光一般成为椭圆偏振光。

由于 $E=V/d$ ，当 V 的量值使相位差恰等于 π 时，两双折射光的光程差恰为 $\lambda/2$ ，透过检偏器的光最强，这时的电压称为半波电压，这样的克尔盒就成为电光开关。

(3) 克尔效应的优点是两折射率之差与电场强度的平方成正比，因此相位差与电场的取向无关。利用它，可制作电光调制器、高速光闸（光开关），在高速摄影、光束测距、激光技术中有重要应用。

(4) 克尔效应的产生源于物质分子在电场作用下引起极化。

泡克耳斯效应

压电晶体在电场作用下改变其各向异性性质的效应，由泡克耳斯（F. Pockels, 1865—1913）于 1893 年发现。

说明：

(1) 电光效应的一种。压电晶体在自由状态下为单轴晶体，外加电场作用后能变成双轴晶体，沿原来光轴的方向产生附加双折射效应。实验表现，压电晶体的两个折射率之差与电场强度 E 成正比，即

$$n_e - n_o = n_o^3 r E,$$

式中 r 为泡克耳斯常数，单位为米/伏。

(2) 按外加电场方向与光的传播方向是平行还是垂直，泡克耳斯效应可分为横向和纵向两种，其装置与克尔效应相似，只是把克尔盒换成泡克耳斯盒即可。

(3) 利用泡克耳斯效应可制作高速开关，并应用于激光技术中。

旋光性

线偏振光通过某些透明物质时，其振动面以光的传播方向为轴线发生旋转的性质。能使振动面旋转的物质称为旋光物质。由阿拉果（D. F. J. Arago, 1786—1853）于 1811 年发现。

说明：

(1) 当光通过旋光晶体（如石英等）时，线偏振光的振动面转过的角度 ψ 与晶体厚度 l 成正比，即

$$\psi = \alpha l,$$

式中 α 称为晶体的旋光率，它与物质的性质及波长有关。

(2) 当光通过旋光溶液（如松节油、食糖等）时，线偏振光的振动面转过的角度 ψ 与溶液长度 l 和溶液浓度 c 成正比，即

$$\psi = [\alpha] cl,$$

式中 $[\alpha]$ 称为溶液的“比旋光率”。

(3) 旋光性源于光波场对物质分子不同部位的相位差，分子的电矩与磁矩对入射光的反作用及分子本身或分子在晶体中排列的不对称性。

能量子和光量子

20 世纪原子（和亚原子）物理学的发展始于量子论的奠基者——普朗克和爱因斯坦提出的能量子和光量子这两个革命性概念。

最早是普朗克，在研究黑体热辐射时借助于麦克斯韦的电磁场理论和玻耳兹曼的统计理论，导出黑体辐射的能量（密度）分布函数

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp\frac{h\nu}{kT} - 1}$$

该式即为著名的普朗克辐射公式，其中 T 是辐射黑体的温度， k 是玻耳兹曼常数， c 是光速。然而，导出过程的关键更在于普朗克于 1900 年引入了能量子假设。具体地说，黑体空腔壁的分子、原子被视作为一些线性谐振子；普朗克假设，与辐射处于热平衡的振子体系的总能量对于单个振子有一定的分配方式，单个振子的能量彼此间并非连续递变，而是取能量单元，亦即能量量子 $\epsilon = h\nu$ 的 n 倍，其中 $n=1, 2, 3, \dots$ （ ν 是振子的振动频率）。这表示振子的能量是分立的，那么吸收和发射辐射就是一份一份地进行的。而比例系数 h 被普朗克称为作用量子，后来则被广泛地称作普朗克常数。按照普朗克的计算， h 取适当的数值，便可得到与实验相符合的黑体辐射的能量分布。当今测定的 h 值为 6.6262×10^{-34} 焦耳·秒。

普朗克的能量子假设只表明振子与电磁辐射交换的能量是分立的，并未说明被发射的光本身是否具有分立的能量。1905 年爱因斯坦进一步明确指出：“从点光源发射出的光束的能量，在传播中不是连续分布在越来越大的空间之中，而

是由个数有限的、局限在空间各点的能量子所组成，这些能量子能运动，但不能再分割，而只能被整个地吸收或产生出来。”紧接着，爱因斯坦把这种具有能量 $\varepsilon = h\nu$ 、不能再分割的辐射基元称作光量子（简称光子）。可见，爱因斯坦由普朗克能量子概念引伸到光量子概念，乃是既大胆、又十分自然的逻辑推理。光子以光速 c 运动。并由相对论得出，光子的静止质量为零，运动质量 $m = h\nu/c^2$ ；而其动量 $p = h\nu/c = h/\lambda$ （ λ 为光波长）。这样，物体发光是发射一个一个光子，吸收光也是吸收一个一个光子。上述便是爱因斯坦光量子理论（亦称光子说）的要点。光子说成功地解释了光电效应和康普顿效应；而其理论意义是披露了光的内禀粒子结构，揭示了光具有波动-粒子二重性质。至于波粒二重性（惯称“二象性”），正是微观粒子体系最基本的重要特征。

黑体辐射

能全部吸收投射其上的电磁辐射而毫不反射和透射的物体称为绝对黑体，简称黑体；此乃由以建立辐射定律的理想体系。内表面粗糙的密闭空腔开一小孔，则通过小孔射入腔内的电磁辐射便几乎能百分之一百地被吸收，故该空腔的小孔就可当作绝对黑体。

在普朗克作出能量子假设之前，由对黑体辐射的实验研究得出一些经验定律。第一条定律是由斯特藩于 1879 年发现，并由玻耳兹曼给出其理论证明的；该定律表明，黑体的发射本领（单位时间内发射的能量），正比于黑体温度的四次方。第二条是维恩位移定律（1893 年），乃指随着黑体温度升高，所发射的辐射最强的波长 λ_m 变短，即向光谱的紫色区移动。同一年，他又提出一个辐射能量密度 ρ 的分布公式

$$\rho(\nu, T) = a \nu^3 \exp(-\beta \nu/T);$$

其中， a 、 β 是经验参数。该式在短波（高频）区与实验完全符合，但不适用于长波区。第三条经验定律是由瑞利·金斯于 1899 年给出的，其表示公式为

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT = \frac{8\pi}{c\lambda^2} kT$$

该式仅在波长较长、温度较高时与实验符合；当波长变短时，它便失效了。并且，波长越短， ρ 越大，甚至可无限制地增大。这当然是荒谬的，历史上称其为“紫外灾难”。

上面两个公式的提出都局限于经典物理范畴及其概念框架。而和这两者相应的普朗克辐射公式（参见能量子和光量子），无论在短波区，还是在长波区，都与实验结果相符合；并可算出，普朗克公式在短波（ ν 大）区和长波（ ν 小）区分别过渡为上面这两个公式，且不会出现紫外发散的困难。因此，能量子概念的

引入，导致对黑体辐射的圆满解释；扫除了上述这个实际上是整个经典物理的“（紫外）灾难”。

康普顿效应

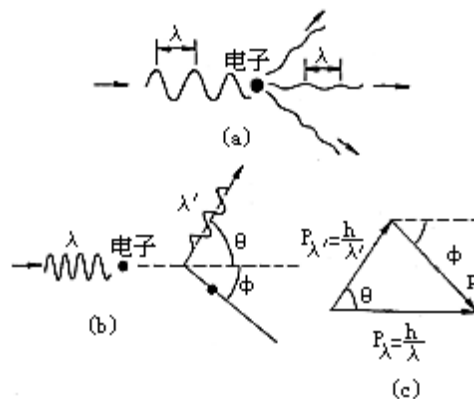
乃指光被自由带电粒子散射后，其散射光的波长发生改变的现象。

20年代以前已经发现，用X光（伦琴射线，即波长约为0.01~1nm的电磁辐射）照射物质，被其散射后波长会改变；康普顿运用爱因斯坦光子说对其作出解释。1923年，他通过光子与静止电子的弹性碰撞计算出散射光波长改变公式；同时测量了X光在石墨中散射后波长的改变量，正与计算值一致。这证实了X射线的粒子性，因此康普顿散射效应跟光电效应一样，被公认为光子说的实验证据。

说明：

(1) 光子说指明光子具有动量 $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ 。光子与静止电子碰撞，把一部分动量转移给电子，其动量减小为 $p' = \frac{h\nu'}{c} = \frac{h}{\lambda'}$ ，所以 $\lambda' > \lambda$ ，即波长增大，而电子得到动量后发生反冲。设电子的反

冲速度为 v ，其动量 $p = \frac{m_e v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ (m_e 为电子的静止质量)，又设光子的散射角为 θ ，如下图所示。



由能量守恒和动量守恒可得如下两式：

$$\begin{cases} hv + m_e c^2 = hv' + \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ \frac{m_e^2 c^2}{1 - v^2/c^2} = \left(\frac{hv}{c}\right)^2 + \left(\frac{hv'}{c}\right)^2 - 2 \frac{h^2 v v'}{c^2} \cos \theta \end{cases}$$

解此两式得

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta),$$

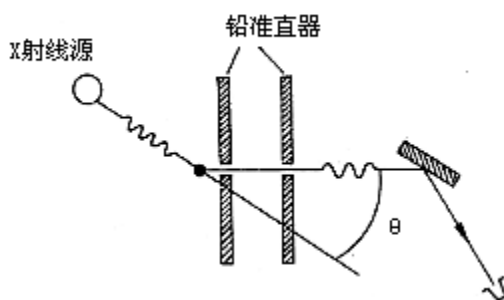
λ 和 λ' 分别为散射前、后的光波长，显然 $\lambda' > \lambda$ 。式中的

$$\lambda_c = h/m_e c$$

称为康普顿波长，它给出了波长改变量 $\Delta \lambda = \lambda' - \lambda$ 的数量级。可见， $\Delta \lambda$ 与 θ 有关，与入射光的波长 λ 无关；其数量级取决于散射靶粒子的

质量。对于电子， $\lambda_c = 2.42631 \times 10^{-2} \text{ \AA}$ 对于质子， $\lambda_c = 1.3214 \times 10^{-5}$ 。而X光波长是 \AA 数量级，故X光被电子的散射容易观测到 ($\Delta \lambda / \lambda$ 较大)。

(2) 下图为康普顿散射实验安排示意图。铅准直器让散射角为 θ 的光子通过，其波长 λ' 用晶体衍射方法测定。



(3) 散射光中还有波长不变的成分，这可解释成被靶原子的内层电子散射所致。内层电子被原子核紧紧束缚，因此实际上应看作是被靶核散射，故上面式中 m_e 应代以核质量，以致 λ_c 甚小， $\Delta \lambda \approx 0$ 。再则，康普顿散射实验中电子运动与入射光子相比非常缓慢（把电子看作静止），因此得到 $\lambda' > \lambda$ 的结果。而如果反过来，光子能量比电子小得多，两者碰撞时是电子将一部分能量转移给光子，那么散射光波长比入射光小；这种现象称作逆康普顿效应。

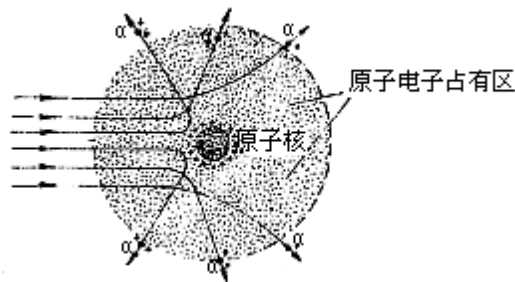
(4)康普顿效应还证实了微观粒子体系满足能量守恒定律和动量守恒定律。此外，由康普顿波长表式可以看出，普朗克常数 h 在其中占据显要地位；而且 $\lambda_c \propto h$ ，当 $h \rightarrow 0$ 时 λ_c 也就趋于零，故康普顿散射是典型的量子效应。

原子结构模型

原子是物质结构的一个层次，是构成元素的最小单元。从 19 世纪开始，人们认识到原子是可以分割的；至 1897 年，J. J. 汤姆孙发现电子，这是原子具有内部结构的有力证据。

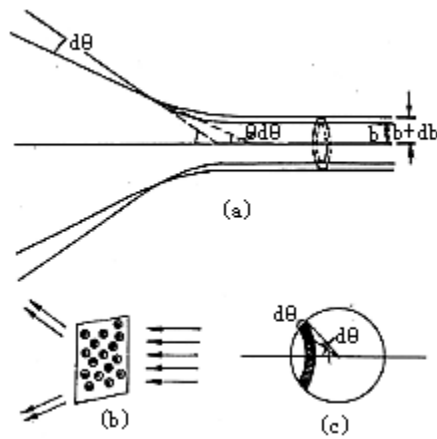
发现电子后，汤姆孙本人便提出一种结构模型，所谓被喻作“西瓜”或“葡萄干面包”的模型。该模型乃指：正电荷均匀地分布于整个原子球体内，而电子像西瓜籽或葡萄干那样嵌在其中。并且，电子对称地散布在一些同心球面上，每个球面上的电子数有限且一定；这样解释元素周期性的尝试取得令人注目的效果。然而汤姆孙模型终究被实验所否定。

长冈“行星”模型是由长冈半太郎提出的，乃指正电荷均集中于原子的中心，电子像行星绕恒星运行那样绕着中心运动。



公认为正确的是卢瑟福的核式结构模型(下图)，与长冈模型有相似之处(故也可称作“行星”模型)，但比其完善得多。1911 年卢瑟福提出：全部正电荷 Ze (Z 为元素的原子序数， e 为电子电荷的绝对值) 集中在原子球体中心、约占原子大小万分之一的小范围内，构成原子核，原子的几乎全部质量(占 99.9% 以上)也就集中于此； Z 个电子在核外空间凭借其与核电荷的库仑引力作用绕核旋转，实际上便是“行星”样的运动方式。

卢瑟福模型立足于盖革-马斯顿的 α 粒子散射实验以及卢瑟福散射公式。1909 年，盖革和马斯顿做了以 α 粒子轰击原子的实验，即让 α 射线束穿过金箔；发现约有八分之一的 α 粒子被反射回来，而绝大部分都穿过了金箔。这表明：第一，原子内大部分区域是空的；第二， α 粒子遇到处于原子球体中心的质量比它大的东西，当其所有正电荷均集中于此时，按依据库仑定律的计算得知，它可能被反射回来。所以实验结果与汤姆孙模型相悖。



由下图 (a) 可见，瞄准距离在 b 到 $b+db$ 之间的入射粒子经散射

向 θ 到 $\theta + d\theta$ 之间的角度射出，而是散射角微分为 $d\theta = \frac{2\pi r \sin\theta \cdot r d\theta}{r^2} = 2\pi \sin\theta d\theta$ 的空心圆锥体的立体角。卢瑟福导出了散射公式如下：

$$dN = ntN \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

式中， Z_1 和 Z_2 分别为入射粒子和靶粒子的电荷数（若入射粒子是 α 粒子， $Z_1=2$ ），即元素的原子序数； E 为入射粒子的动能； N 为单位时间内的入射粒子数； n 为靶粒子密度； dN 是 t 时间内在散射角 θ 处、立体角

$d\Omega$ 内的散射粒子数。此式表明 dN 正比于 $Z_2 \cdot n \cdot N \cdot t$ ；反比于 $E^2 \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2}$ 。

盖革—马斯顿的 α 粒子散射实验（1913 年）证实了这些比例关系，特别是证实了卢瑟福公式关于散射粒子数随散射角增大而明显减小的计算结果。只是对 $\theta=180^\circ$ （指反弹）的测量值有较大偏差，此因实验测量上有困难。尽管如此，实验结果与卢瑟福散射公式基本相符，从而也就证实了卢瑟福核式结构模型的可靠性。

原子光谱

原子或离子发射或吸收电磁辐射均对应于特定频率的电磁频谱，这称为原子光谱。原子或离子的种类不同，其谱线分布就完全不同。光谱图还反映出电磁辐

射的频率成分与强度分布的关系。原子光谱从射频段一直延伸到 X 射线频段；通常涉及红外、可见、紫外区域的频谱。

从 19 世纪后期起陆续发现氢、类氢和碱金属原子光谱的一些线系，并得出相应的经验规律。借助于原子光谱可研究原子结构。

说明：

(1) 1889 年，里德伯对于氢光谱线总结出一个普遍的公式（称为里德伯公式）：

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) = T(n) - T(n')$$

式中， $T(n)$ 和 $T(n')$ 称作光谱项； $\bar{\nu} = \nu/c$ 为波数。R为里德伯常数，是

经验参数；对于氢来说， $R=109737.32 \text{ 厘米}^{-1}$ 。此式表明，氢的任一谱线都可表达成两个光谱项之差，即氢光谱是各种光谱项之差的综合。对应于 $n=1, 2, 3, \dots$ 中之一，有 $n' = n+1, n+2, n+3, \dots$ 便构成一个线系，具体如下所述：

$n=1, n' = 2, 3, 4, \dots$ 组成的线系称作赖曼系，在紫外区；

$n=2, n' = 3, 4, 5, \dots$ 组成的线系称作巴尔末系，在可见区；

$n=3, n' = 4, 5, 6, \dots$ 组成的线系称作帕邢系，在红外区；

$n=4, n' = 5, 6, 7, \dots$ 组成的线系称作布喇开系，在红外区；

$n=5, n' = 6, 7, 8, \dots$ 组成的线系称作普丰特系，在红外区。

(2) 其他元素的原子光谱比氢光谱复杂些，例如类氢离子的光谱线由公式

$$\bar{\nu} = T(n) - T(n') = RZ^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$$

给定，其光谱项较之氢谱项相差一 Z^2 因子， Z 是类氢离子的核电荷数。不同元素的 R，其取值略有不同。而对于碱金属，其光谱项

$$T(n) = \frac{R}{(n + \alpha)^2} \quad T(n') = \frac{R}{(n' + \beta)^2}$$

式中 α 、 β 是修正参数。虽然有这些区别，但每一谱线的波数都为两谱项之差，且对于取定值的 n ， n' 必取 $n+1$ ， $n+2$ ， $n+3$ ，……。所以说原子光谱的谱线分布具有一定的规律性，当然这只是经验总结。

(3) 在玻尔氢原子理论诞生之前，对原子光谱的经验规律未能作出理论分析。

玻尔氢原子理论

此乃由玻尔于 1913 年建立的氢原子的半经典理论。

该理论的出发点是下述两条基本假定：

(1) 定态假定电子处于一些分立的定态，即只能在一些定态轨道上绕核作圆周运动。虽然是加速运动，但并无辐射。这些定态所对应的如下线积分满足量子化条件

$$I = \oint p_i dq_i = nh,$$

其中量子数 $n=1, 2, 3, \dots$ ， q_i 和 p_i 是运动电子的广义坐标和广义动量，线积分回路就是电子运行轨道。

(2) 频率假定当电子从一个能量为 E_i 的定态跃迁到另一个能量为 E_f 的定态时，原子便发射（或吸收）电磁辐射，其频率 ν 与跃迁始末两个定态能量之差的关系为

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

这实际上是两条与普朗克常数 h 有关的量子假定，由此提出了量子态概念和量子跃迁概念；但该理论还是基于卢瑟福的核式结构模型，电子是凭借库仑引力作绕核的圆周轨道运动，其方程为

$$m_e v^2 r = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0}$$

式中， m_e 是电子质量， r 是圆周轨道的半径， v 是电子速度， ϵ_0 是真空的介电常数。对于氢原子来说， $Z=1$ ，故而该理论是半经典的。

玻尔并注意到普朗克常数 h 具有能量乘时间的量纲，而电子在圆轨道上运动时的角动量的量纲也是能量乘时间，于是他设想轨道角动量 L 也是量子化的，即满足关系

$$L = mvr = n \frac{h}{2\pi} = nh (n = 1, 2, 3, \dots),$$

这可作为第三条假定。当然，从假定（1）、（2）出发，利用对应原理，即可导出角动量量子化的结论。

由假定（1）容易算出电子的能量为

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2 c} (n = 1, 2, 3, \dots);$$

再计及假定（2）的频率条件，便得辐射频率公式

$$\nu_{if} = \frac{|E_i - E_f|}{h} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

若 $(n_i < n_f)$ 。

与原子光谱中的里德伯公式对照，可得里德伯常数

$$R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c},$$

由此式得出的 R 值与实验测量值相当接近。

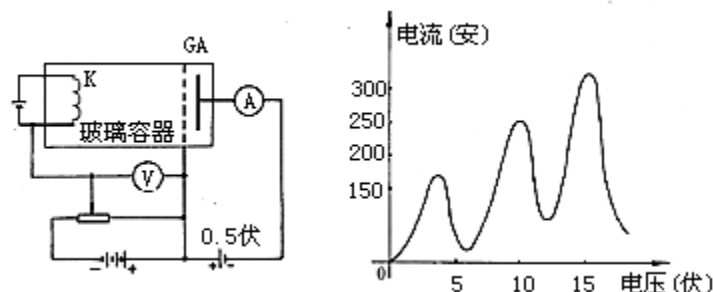
可见，原子光谱的经验规律为玻尔理论提供了充分的实验依据；反过来说，玻尔理论成功地解释了原子光谱的经验规律。

夫兰克-赫兹实验

这是一个证明原子内部能量量子化的实验。

1917 年夫兰克和赫兹进行了电子轰击原子的实验。下左图为实验装置示意图。在抽空的玻璃容器内注入少量汞，维持适当温度，使其形成一定气压的汞蒸汽。电子由热阴极 K 发出，在 K 和栅极 G 之间的电场作用下加速，尔后与 KG 间的汞原子碰撞。而在栅极 G 和阳极 A 之间加一个 0.5 伏的反电压。当电子的能量未升到某一临界值时，与汞原子发生的是弹性碰撞，以致不损失能量，到达栅极后还能克服反电压的作用，再抵达阳极 A；可是，当电子的能量升到该临界数值时，与汞原子发生的是非弹性碰撞，于是电子把能量传递给汞原子而降低速度，到达栅极后不足以克服反电压的作用，不能再抵达阳极。所以当 KG 间的加速电压由零开始上升时，回路电流也开始上升；当加速电压升至 4.1 伏时，电流下降；

加速电压继续上升，电流重又上升。加速电压上升至 9.0 伏，电流再次下降；加速电压继而上升至 13.9 伏，电流又一次下降；如此等等。上右图所示的图线正是回路电流随加速电压不断升高而所作的振荡变化，其峰值和谷值分别渐次上升。而相邻峰值所对应的加速电压均相差 4.9 伏。实际上，若除去仪器的接触电势，各峰值所对应的加速电压应为 4.9 伏、9.8 伏、14.7 伏……。



说明：

(1) 该实验表明，电子与原子作非弹性碰撞，把能量传递给原子，使原子从基态跃迁到激发态，4.9 电子伏正是汞原子的第一激发态与基态的能量差。实验中还观测到汞原子经历一次碰撞以后从激发态跃迁到基态的发射谱线。因此，该实验证实了玻尔提出的原子具有分立能级，即存在量子态的假定。

(2) 原子的能级实际上指其电子的能级，因为电子是原子内运动的主要承担者。在上一条目氢原子的电子能量表式中， $n=1$ 对应其基态能级； $n=2, 3, 4, \dots$ ，对应其激发态能级。使电子从 n 较小的能级跃迁到 n 较大的能级，便是使原子受激发；使电子达到 $n \rightarrow \infty$ ($E_n \rightarrow 0$) 的能量状态，便是使电子脱离原子，表示原子被电离。按能量表式计算，氢原子的基态能量 $E_1 = -13.6\text{eV}$ (电子伏)，故其电离能即为 13.6eV。

原子磁矩

通常指原子的磁偶极矩。原子磁矩包括电子磁矩和原子核磁矩两部分，但后者比前者小 3 个数量级，在原子物理范畴里可不予计入，故原子磁矩乃指电子的磁矩。

电子磁矩由电子轨道磁矩和电子自旋磁矩组成。原子中电子绕核运动，形成环形电流，宛若磁性偶极子。这种由电子的轨道运动产生的磁矩，即为电子轨道磁矩，记以 μ_1 ，它与轨道角动量 L 的关系式为

$$\mu_1 = -g_1 \gamma L,$$

其中

$$\gamma = \frac{e}{2m_e c}$$

称作旋磁比；而 $g_l=1$ ，是电子轨道运动的 g 因子。由轨道角动量及其在外磁场方向（取作 Z 方向）的分量的量子化条件，则有

$$\mu_l = -\sqrt{l(l+1)}\hbar \quad (l=0, 1, 2, \dots),$$

$$\mu_{lz} = -\gamma L_z = -\gamma m_l \hbar = -m_l \mu_B$$

$$(m_l=1, 1-1, \dots, 0, \dots, \dots, -(1-1), -1);$$

这里， $\mu_B = \gamma \hbar$ 称作玻尔磁子，其值为 9.27×10^{-24} 焦耳/高斯，是原子磁矩的一个自然单位。 l 及 m_l 分别为电子的轨道角动量量子数及轨道磁量子数。

1925 年，乌仑贝克和古兹米特假设，电子不是点粒子，应当还具有自旋运动，它具有固有的自旋角动量 S ：

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar \quad (s = \frac{1}{2})$$

它在外磁场方向（ Z 方向）上的分量只有两个，其值为

$$S_z = m_s \hbar (m_s = \pm \frac{1}{2}).$$

因此电子还具有相应的自旋磁矩

$$\mu_s = -g_s \gamma S,$$

它在 Z 方向上的分量为

$$\mu_{sz} = -g_s m_s \mu_B = g_s \mu_B \approx \pm \mu_B,$$

其中 $g_s \approx 2$ ，是电子自旋运动的 g 因子。

在电子自旋假设提出之前的 1921 年，史特恩和盖拉赫的实验证明了原子磁矩在外磁场方向上的分量是量子化的。实验采用银、氢等基态原子，其电子的轨道角动量乃至轨道磁矩为零，所以测得的是电子的固有（自旋）磁矩的 Z 分量，取值为一个玻尔磁子。

原子与辐射场的相互作用

原子体系与辐射场相互作用，两者交换能量，于是前者发生能级跃迁，必然伴随以辐射的吸收和发射；原子光谱正是其表示。在玻尔氢原子理论中已提及这个问题。对此进一步描述需借助爱因斯坦于 1917 年发表的辐射的发射和吸收理论。

原子体系从低能级 E_i 向高能级 E_j 跃迁，伴随以辐射的吸收，即原子从辐射场吸收能量，其值为两能级之差；亦即原子从辐射场吸收频率 $\nu_{ji} = (E_j - E_i) / h$ 的辐射光子。相反，原子体系从高能级向低能级跃迁，会发射辐射光子，即放出能量给辐射场。辐射的发射有两种情况。一为不受外界辐射场影响而发生的自发发射，一为受激发射。若仍将高低能级分别记以 E_j 和 E_i ，则受激发射是指在频率 $\nu_{ji} = (E_j - E_i) / h$ 的辐射光子激发下产生的发射，发射的辐射光子频率也为 ν_{ji} ；自发发射的辐射光子频率亦同此。提出受激发射概念是爱因斯坦对辐射理论的又一重大贡献。

说明：

(1) 爱因斯坦由高、低能级 E_j 、 E_i 之间的跃迁概率这个概念和热力学体系平衡的条件出发，导出了自发发射系数 A_{ji} 、受激发射系数 B_{ji} 和吸收系数 C_{ij} 之间的关系式：

$$\begin{cases} B_{ji} = C_{ij}, \\ \frac{A_{ji}}{B_{ji}} = \frac{8\pi h\nu_{ji}^3}{c^3} \end{cases}$$

推导中考虑到原子能级跃迁概率涉及辐射的吸收、自发发射、受激发射三种过程；这第三者的计入，才使上述关系式与普朗克辐射公式（参见能量子和光量子）相洽，并与实验结果相符。

(2) 原子发射辐射和吸收辐射所对应的光谱分别称为发射光谱和吸收光谱。前者往往是明线光谱，后者往往是暗线光谱——乃高温物体发出的白光通过物质时，某些波长（或频率）的光被物质吸收后形成的暗线光谱。显然，各种原子的吸收光谱中的暗线与其发射光谱中的对应明线，波长均相同。

(3) 原子不是在所有能级之间都能发生跃迁，而是在一些能级间满足跃迁的选择定则。比如在电偶极辐射情况下，自发发射跃迁的选择定则为

$$\Delta l = \pm 1, \Delta m = 0, \pm 1。$$

其中， Δl 和 Δm 分别表示跃迁时电子的角动量子数 l 和磁量子数 m 的变化值。

(4) 由于原子中电子自旋-轨道相互作用，原子能级分裂成多重结构，以致光谱线也形成多重结构。这称为原子光谱的精细结构。发射光谱和吸收光谱中均有精细结构出现。

泡利不相容原理

乃指原子中任意两个电子不可能处于完全相同的状态，即两者不可能有完全相同的一组量子数，亦即原子中每一量子态只能容纳一个电子。该原理由泡利于1925年提出；藉此可解释原子的电子壳层结构和元素周期律。

说明：

(1) 电子是一种费密子（参见基本粒子）。泡利不相容原理实为对所有费密子体系都适用的一条比较普遍的原理。鉴此，该原理可表述为：全同费密子体系中不可能有两个（或两个以上）粒子同时处于相同的单粒子态。

(2) 原子中电子的状态由一组量子数——主量子数 n ，轨道角动量量子数 l ，轨道磁量子数 m_l ，自旋磁量子数 m_s 确定。其取值 $n=1, 2, 3, \dots$ ； $l=0, 1, 2, \dots, n-1$ ； $m_l=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ ； $m_s = \pm \frac{1}{2}$ 。

$$2, 3, \dots; l=0, 1, 2, \dots, n-1; m_l=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l; m_s = \pm \frac{1}{2}。$$

(3) 按照泡利不相容原理，原子中电子分布于不同的状态，形成所谓的电子壳层结构。其中， n 相同的电子构成原子的同一壳层；以 $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$ 标志的壳层分别用记号 K, L, M, N, O, P, Q, \dots 表示。每一壳层包含的电子数

$$Z_n \leq \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2。$$

而 n 给定后， l 相同的电子构成同一支壳层；以 $l=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$ 标志的支壳层分别用记号 s, p, d, f, g, h, i, \dots 表示。第 n 壳层由 n 个支壳层组成。例如，若 $n=3$ ， $l=0, 1, 2$ ，则 M 壳层由 3s, 3p, 3d 这 3 个支壳层组成，共有电子 $Z_3 \leq 18$ 。同一支壳层的电子，其 n, l 相同，称为同科电子。当然，同科电子的 m_l, m_s 不同。换言之，原子中电子按壳层和支壳层分布，并因此出现（元素的）周期性。

(4) 原子中电子按 n, l 自小到大的顺序填入；但实际分布并非如此，即分布方式并非单受泡利不相容原理制约，而是还遵循着能量最小原理（乃指能量最低是原子最稳定的基态）。例如，钾 ($Z=19$) 原子的第 19 个电子不按顺序填 3d 支壳层，而是填 4s 支壳层；这是 4s 的能级反比 3d 低之故。实际上能级高低除取决于 n 的大小外，还与 l 有关，所以 n 较大的壳层的某一支壳层的能级有可能比 n 较小的壳层的某一支壳层低。于是，元素周期表中从第四周期开始，会出现 n 较小的壳层尚未填满，而 n 较大的壳层上倒已有电子填入的现象。

对应原理

反映量子理论与经典力学对应关系的原理，乃指在大量子数极限的情况下，量子体系的行为趋近于相应的经典力学体系。例如当量子数 n 很大时，分立的能谱便过渡为连续谱，即其能量趋近于连续变化的经典性状。

说明：

(1) 玻尔在创建氢原子理论时首先表述了这种对应关系的思想，并于 1920 年明确使用了对应原理这个名称。玻尔正是依据这一原理的思想导出氢原子能级公式以及圆轨道的角动量量子化条件。再则，玻尔在爱因斯坦关于自发发射的研究成果基础上，也依据对应原理思想给出了计算自发发射系数的方法。

(2) 一般以为，从玻尔提出氢原子量子理论到量子力学建立之前，一系列理论成果都是借助于对应原理得出的；至于海森堡从经典力学的哈密顿正则运动方程出发而建立矩阵力学，亦是“对应原理在逻辑上发展的结果”。

(3) 可以认为，对应原理是物理学中的一条普遍原理，不限于仅反映量子物理与经典物理的对应关系。任何旧理论与由它出发而推广、发展而成的新理论之间的对应关系也具有对应原理的涵义。新理论包含旧理论，在一定的极限条件下过渡为旧理论；在此条件下，新理论中的物质体系的行为趋近于旧理论中相应的物质体系。例如，相对论力学在粒子速度 $v \ll c$ (c 是光速) 的极限条件下过渡为牛顿质点力学。

物质波假设

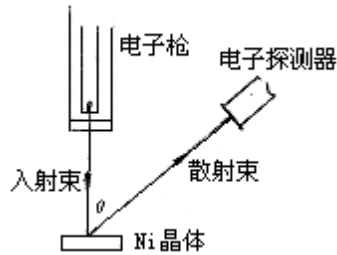
乃指德布罗意于 1923 年提出的关于物质粒子具有波粒二象性的假设；故又称为德布罗意波粒二象性假设。

德布罗意受爱因斯坦光量子论的启发，把光的波粒二象性概念推广到任何物质粒子；强调“任何物体伴随以波，而且不可能将物体的运动和波的传播分开”，这就是所谓的“物质波”。凡质量为 m 、动量为 p 的粒子，其伴随之物质波的频率和波长分别为

$$\nu = \frac{mc^2}{h}, \quad \lambda = \frac{h}{p};$$

这称作德布罗意关系式，实际上与爱因斯坦光量子的质量、动量的表式（参见能量子和光量子）完全一致。

说明：



(1) 物质波假设由戴维-革末实验（1927年）证实。该实验显示了电子在晶体表面的衍射现象。实验中以电子束投射到镍单晶上（右图），其散射电子束的强度随 θ 角而变，而且当 θ 取某些特定数值时，强度有极大值。这个实验表明电子具有波动性。1928年汤姆孙以快速粒子穿透薄金属片，由此也观察到了衍射图样。这两个实验都证实了物质粒子的德布罗意关系式的正确性。

(2) 粒子性和波动性是不同的宏观物质体系所具有两种不同性状。而这里说的波粒二象性，是以经典概念的语言描述微观粒子具有二重性状的特征；在不同的实验条件下，微观物质体系分别显示出波动性和粒子性这两种不同的“经典图象”。但既然普朗克常数 h 进入德布罗意关系式，则说明波粒二象性便成为量子物理的重要概念。

(3) 1926年薛定谔依据德布罗意波粒二象性假设建立了波动力学。之后他并证明其波动力学与海森堡等人建立的矩阵力学是完全等价的，两者是统一的量子力学的两种不同的形式体系。

(4) 针对波粒二象性，玻尔提出带有哲学意义的互补原理。该原理是说，波动性和粒子性这两种经典概念在描述微观物质体系的性状时是互斥的，然而并非在同一实验场合下发生冲突；况且两者缺一不可，对不同实验条件下所显示的不同图象，由各自作出适宜的解释。因此这两种经典概念为在实验中所展现的微观粒子的运动状态共同提供了“互补”的完整描述。

不确定关系

通常又称为测不准关系，乃是由海森堡于1927年提出的关于两个相互不对易的可观测力学量在测量时不能同时确定的关系式。例如，就坐标 x 和动量（的 x 分量） p_x 而言，其不确定关系式为

$$\Delta x \Delta p_x \geq h/2。$$

这表明在体系的同一态中同时测量 x 和 p_x ，两者准确程度所受到的限制。

说明：

(1) 对量子力学中任意一对相互不对易的力学量 A 和 B (以厄密算符表示) 来说, 若两者满足不对易关系 $AB-BA=ih$, 则有不不确定关系式

$$\Delta A \Delta B \geq h/2。$$

相反, 若 A 和 B 对易, 即 $AB-BA=0$, 则两者可同时确定, 此时体系的态是这两个力学量的共同本征态。

(2) 海森堡是依据对云室中的电子“径迹”考察而提出不确定性原理的。电子有波动性, 量子力学中不应当有经典“径迹”的概念; 他分析后意识到, 所显示的“径迹”不真是一条连续的线, 只不过是一系列分立而模糊的斑点, 即实际上是由一些水滴连成为线。这些水滴比电子大得多, 所以海森堡以为, 电子只可能以一定的不确定性处在某一位置上, 又以一定的不确定性具有某一速度; 这正是不确定性原理的基本思想。

(3) 不确定关系源于物质的波粒二象性。电子的衍射实验正反映了微观粒子不能同时具有确定的位置和动量, 因此两者不能同时被测准。上述不确定关系式一般被当作物质的波粒二象性的数学描述。

波函数及其统计解释

量子力学中描述微观物质体系, 或者说描述物质波的函数, 记以 $\psi(r, t)$, 即通常乃是以坐标 r 和时间 t 为宗量的复变函数。

1926 年玻恩对于德布罗意物质波假设, 提出相应的概率解释: 在空间某处单位体积里找到粒子的概率与该处物质波的强度, 即波函数振幅绝对值的平方 $|\psi(r, t)|^2$ 成正比。他指出: “对应于空间的一个状态, 就有一个由伴随此状态的德布罗意波确定的概率。”既然 $\psi(r, t)$ 被当作概率幅, 那么以 $\psi(r, t)$ 描述的物质波便为“概率波”, 具有统计性意义。这就是对波函数的统计解释。

说明:

(1) 薛定谔导出了波函数 $\psi(r, t)$ 所满足的对时间和空间坐标的偏微分方程——薛定谔波动方程, 以描述微观粒子的运动规律; 该方程是波动力学的核心。

(2) 电子的双缝干涉实验和其他实验证实了物质波的概率解释, 并表明波函数也满足态叠加原理; 概率解释是适应于微观物质体系具有波粒二象性这个客观事实的。

(3) 由波函数的统计解释来看, 物质波所遵循的运动规律是统计规律, 量子力学等量子理论是统计性理论。

原子核的构成

原子核由质子（记以 p）和中子（记以 n）构成。质子数和中子数

一定的原子核组成一种核素。任何一种核素的原子核都可记以 ${}^A_Z\text{XN}$ 。

其中，Z 为原子序数，即核电荷数，亦即核内质子数；N 为核内中子数； $A=Z+N$ 为核的质量数，亦即核内质子和中子的总数。而 X 代表与 Z 相联

系的一种元素符号。一般简记 ${}^A_Z\text{X}$ 为一种特定的核素。

说明：

（1）质子和中子的大小几乎相同，半径均为 0.8×10^{-13} 厘米。它们的质量也几乎相等，两者分别为

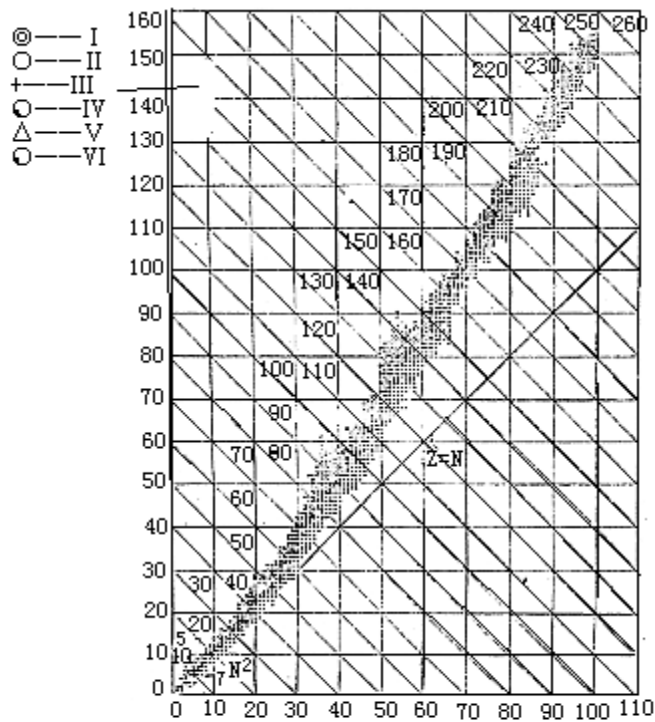
$$m_p = 1.007277u,$$

$$m_n = 1.008665u,$$

u 为原子质量单位， $1u = 1.660566 \times 10^{-27}$ 千克。质子带正电 e，中子不带电。主要除了在荷电性质方面有所区别外，其他性质大致相同，所以两者被统称为核子，并被看作核子的两个不同的量子状态（参见核力）。

（2）核素的性质当然与质子和中子均有关。核素图给出了核素按质子数 Z 和中子数 N 不同的分布状况。往往在以 Z 为横坐标、以 N 为纵坐标的二维 N-Z 图上标定所有核素的位置（下图）。图中画出了一条光滑曲线，稳定核素几乎都落在这条曲线上或紧靠曲线的两侧；这个区域称为核素的稳定区。这条曲线在 Z 上的一段几乎为直线（ $Z=N$ ）；当 Z 增大时，稳定线向 $N>Z$ 的方向偏转。稳定线上侧为丰中子核素区，其下侧为缺中子核素区。中子数（或质子数）过多或过少都是不稳定的。当今核素图标定了 300 多个天然存在的核素（其中百分之九十是稳定核素，百分之十是放射性核素），以及 1600 多个人工制造的放射性核素。

（3）在核素中，凡 Z 相同、N 不同的称为同位素；N 相同、Z 不同的称为同中子素；A 相同，N 和 Z 都不同的称为同量异位素。



I—稳定核；
 II— β^- 放射性核；
 III— β^+ 放射性核 (或K俘获)；
 IV— β^+ 、 β^- ；放射性核 (或K俘获)；
 V— α 放射性核 (β^- 、 β^+ ，K俘获)；
 VI— α 放射性核 (纯)；

I—稳定核； II— β^- 放射性核；

III— β^+ 放射性核 (或K俘获)； IV— β^+ 、 β^- 放射性核 (或K俘获)；

V— α 放射性核 (β^- 、 β^+ ，K俘获)； VI— α 放射性核 (纯)

核力

此即核子之间相互吸引的短程作用力。

原子核仅占原子体积的万分之一，密度高达 10^{14} 克/厘米³，质子和质子之间又有库仑斥力，能把核子紧密地聚集一起的乃是作用强度很高 (比库仑力大 100 倍) 的核力，故而是一种强相互作用。人们对强作用的认识从核力始。

说明：

(1) 核力是短程力。其力程比原子核的线度（约为 10^{-13} 厘米数量级）还小，一核子只能作用于邻近核子，作用范围甚至不能达到核的每一个核子。邻近核子不多，所以说，核力除有短程性外，作用饱和性也是它的一个明显特征。

(2) 核力还具有电荷无关性，此乃表示质子和质子、中子和中子、

质子和中子之间的核力均相等。例如， ${}^3_1\text{H}$ 核和 ${}^3_2\text{He}$ 核都由3个核子组成，

前者的结合能（8.5MeV）比后者的结合能（7.7MeV）大0.8MeV。前者只有1个质子，故核内无库仑斥力作用。而后者有2个质子，之间有库仑斥力作用；设其间距 r 为 2×10^{-13} 厘米=2 费米，则可算出其库仑排

斥作用（势）能为 $e^2/r = 0.7\text{MeV}$ 。如果把 ${}^3_2\text{He}$ 的总结结合能加上此值，正与 ${}^3_1\text{H}$ 的总结结合能相等。这个例子表明不同核子之间的核力是相同的。

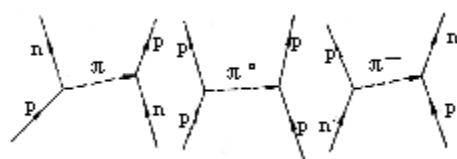
强相互作用的这种电荷无关性用同位旋——一种与普通空间中的自旋类似的内禀对称量子数来描述。核子的同位旋 $I=1/2$ ，其分量 I_z 可取 $1/2$ 和 $-1/2$ ，分别对应于质子和中子；亦即质子和中子是核子的同位旋（ $=1/2$ ）二重态。电荷无关性是核力的一个重要特征。

(3) 核子不能无限靠近，在极短程（间距小于 0.8 费米）内，核力表现为斥力。核力的具体作用机制至今尚未探索得十分明了。

(4) 与电磁作用是以交换“虚光子”而产生的交换力一样，核力也是一种交换“虚粒子”而产生的交换力。这种粒子是质量介于电子和质子之间的 π 介子（ π^0 ， π^+ ， π^- ）。下图是核力作用的费曼图。图中表示，两个核子之间的核力作用以交换一个“虚 π 介子”而实现。这是下述汤川介子理论的结论。

汤川秀澎于 1935 年提出核力的介子理论，阐明了核力是交换力的观点，并估算了介子的质量。其依据是能量和时间这两个量之间的不确定关系。设一个核子释放的一个“虚粒子”以光速行过了 Δx 距离（经历 Δt 时间）后，被另一核子所吸收。由不确定关系知，在 Δt 时间内最大的能量转移为

$$\Delta E = \frac{h}{\Delta t} = \frac{h}{\Delta x / c} = \frac{hc}{\Delta x}$$



若 ΔE 全部转化为“虚粒子”的静能，则其静止质量为 $h/(c\Delta x)$ 。 Δx 为核力的作用程，取为2费米，则容易算得其质量约为电子质量的200倍。直到1947年，汤川的预言才被证实，实验上终于找到参与强相互作用的 π^0 介子和 π^\pm 介子，其质量分别为电子质量的264倍和273倍。

原子核的结合能

原子核的质量并非核内所有质子和中子的质量之和，这是因为当核子结合成原子核时，会释放一部分能量，以致出现“质量亏损”；所释放的能量称为原子核的（总）结合能。这一原则对任何物质结构层次均成立：任何层次的粒子的质量小于其构成粒子的质量之和，其差值的 c^2 倍即为该层次粒子的结合能。

设原子核的质量为 m ，其结合能 B 由下式

$$m = Zm_p + Nm_n - \frac{B}{c^2}$$

确定。若计及原子中的电子质量，设相应之原子的质量为 M ，那么上式也可等价地写成

$$M = Zm_p + Nm_n + Zm_e - \frac{B}{c^2}。$$

于是结合能 B 可表示成

$$B = (Zm_p + Nm_n + Zm_e - M)c^2，$$

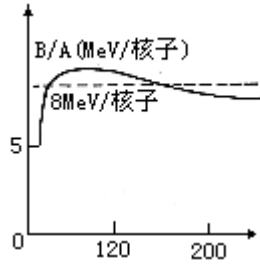
这里忽略了电子与原子核之间的结合能，即原子的结合能。

说明：

(1) 每个核子对于原子核的（总）结合能的贡献，以平均结合能 B/A 表示，往往称作比结合能。不同核素的原子核的质量不同，其比结合能不尽相同。下图画出了比结合能曲线，横坐标是核素的质量数。曲线两头低、中间高，表明中等质量的核素的 B/A 比轻核素、重核素都大。所以当轻核聚变、重核裂变时，因其生成核的比结合能增大，便导致原子核能的释放。

(2) 人们提出各种核模型以描述核结构及核内运动机制，其中由液滴模型得出核的结合能的半经验公式，还比较令人满意。所谓核的液滴模型是指，把原子核比作液滴，核子像液体分子一样均匀地分布于原子核的球体内；就是说，原子核被看作是具有均匀密度的不可压缩的“核液滴”。

依据该模型，核的（总）结合能大致包含如下几项：



①体积能因核子均匀分布，且核力作用具有饱和性，故核的（总）结合能仅与其质量数 A 近似成正比，而核半径 R 正比于 $A^{1/3}$ ，所以结合能的主项是正比于核体积的体积能，记以 $E_1 = \alpha_1 A$ 。

②表面能因核表面的核子只与表面之内的邻近核子作用，故其对（总）结合能的贡献比内部核子小些，所以须添入一取负值的修正项 E_2 （ E_2 称作核的表面能）。与液体的表面能相仿， E_2 与表面积成正比，故而与球半径的平方，以致与 $A^{2/3}$ 成正比，即 $E_2 = -\alpha_2 A^{2/3}$ 。

③非对称能由核素图可见，对于 Z 较小的核素，凡 $Z=N=A/2$ 的核素最稳定；而凡偏离 $Z=N$ 的核素的稳定度会降低。这便是所谓非稳定核

素对于 $\frac{A}{2} - Z$ 数的非对称性。所以（总）结合能表式中须添入一项以 $-\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2$ 标定的非对称能：

$$E_3 = -\frac{a_3}{A} \cdot \left(\frac{A}{2} - Z\right)^2$$

④库仑能因核内质子间的库仑斥力而须在（总）结合能表式中添入库仑作用（势）能 E_4 项。库仑力是长程力，核内一个质子与其他所有质

子，即总共 $Z-1$ 个质子都发生作用，那么共有 $\frac{1}{2}Z(Z-1)$ 对相互作用，

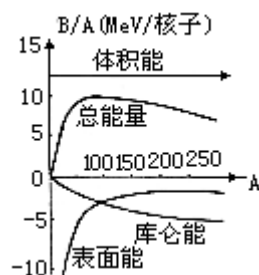
而每一对库仑作用能为 $-\frac{6}{5} \cdot \frac{e^2}{R}$ ，故 $E_4 \approx -\frac{3}{5}Z(Z-1)\frac{e^2}{R} = -\frac{3}{5}Z(Z-1)e^2(A)^{-1/3}$ 。当 $Z \gg 1$ 时， $Z(Z-1) \approx Z^2$ ，则 $E_4 \approx -\alpha_4 Z^2 A^{-1/3}$ 。

⑤奇偶能实验表明，原子核的稳定度还与 Z 、 N 是奇数还是偶数有关。偶偶核（ Z 、 N 均为偶数）最稳定，偶奇核（ Z 为偶数， N 为奇数）和奇偶核（ Z 为奇数， N 为偶数）次之，奇奇核（ Z 、 N 均为奇数）最不稳定，故而在总结结合能表式中须添入一所谓的“奇偶能”项 E_5 。

综上所述，（总）结合能的表式为

$$B = \alpha_1 A - \alpha_2 A^{2/3} - \frac{\alpha_3}{A} \left(\frac{A}{2} - Z \right)^2 - \alpha_4 Z^2 A^{-1/3} + E_5。$$

这是一个半经验公式，其中比例系数 α_1 ， α_2 ， α_3 ， α_4 以及 E_5 的取值均由实验确定。公式中的第一、二项的形式明显是取核的液滴模型之故；第三、五项主要由实验结果规定；第四项与库仑力的性质以及“核液滴”内质子的分布方式相关。结合能公式不是唯一的，有时考虑其他因素，还会有别的项出现。右图画出了（总）结合能及其主要成分的曲线。



放射性衰变

此乃一种核素自发地放出各种射线，从而蜕变成另一种核素的现象。

衰变方式很多，放出的射线也有多种，而主要有 α 射线（氦核 ${}^4_2\text{He}$ ） β

射线（电子）、 γ 射线（短波长——一般小于 0.1\AA 的电磁辐射，即高能光

子）；其衰变过程就相应地称为 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变。

衰变规律比较简单，容易导出。这是一种指数递减型的变化规律，其表式为

$$N = N_0 e^{-\lambda t}，$$

式中 λ 是衰变常数， N_0 和 N 分别是初始时刻和 t 时刻原子核的数目。显然

$$\lambda = - \frac{1}{N} \frac{dN}{dt}，$$

所以 λ 代表一个原子核在单位时间里发生衰变的概率。

说明：

(1) 原子核衰变到其数目为原有数目之一半所需的时间，称为半衰期，记以 $T_{1/2}$ 。从衰变规律表式可得

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

λ 和 $T_{1/2}$ 都是放射性衰变的特征量。

(2) 单位时间里发生衰变的原子核数是 $-\frac{dN}{dt}$ ，这便定义为核素的放

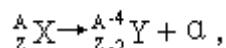
射性强度（或称作放射性活度，单位是“居里”），记以 A ，即

$$A \equiv -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}.$$

显然， A 也随时间变化，而且也服从指数递减型规律。初始时的放射性强度 A_0 就是 λN_0 。

(3) 许多放射性核素的衰变产物并非稳定核素，还会继续放出射线而发生衰变，其子核也可能仍继续衰变……；这样一而再、再而三地衰变下去，形成一个衰变链，直至最后产物为稳定核素才告终，这一连串过程称作级联衰变。

(4) 衰变过程满足能量守恒。例如 α 衰变



其中 X 为母核， Y 为子核， α 为氦核（ α 粒子），那么有能量守恒表式：

$$m_X c^2 = m_Y c^2 + m_\alpha c^2 + E_\alpha + E_r,$$

其中 E_α 为 α 粒子的动能， E_r 为子核的反冲动能。定义 α 衰变能 E_0 为

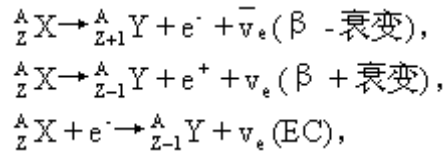
$$E_0 \equiv E_\alpha + E_r = [m_X - (m_Y + m_\alpha)] c^2.$$

若发生 α 衰变，当有 $E_0 > 0$ ；故此式可用以判断某核素是否会发生 α 衰变。

β 衰变和中微子假设

β 衰变乃指原子核放出电子或正电子的衰变过程。凡放出电子，是 β^- 衰变；凡放出正电子，是 β^+ 衰变。再则，从核外电子壳层俘获一个轨道电子的核转变称为轨道电子俘获（记以 EC），也属于 β 衰变形式；其中，K 俘获（K 壳层电

子被俘获)最易发生。实际上,这三种衰变过程都是使原子核的电荷数改变1个单位,质量数保持不变。三者的反应式如下:



其中, e^- , e^+ 分别为电子及其反粒子——正电子(参见电子); ν_e , $\bar{\nu}_e$

分别为(电子型)中微子及其反粒子。

中微子不带电,特别微小,不易检测。发现 β 衰变现象时,因不知有中微子,而以为反应不满足能量、动量守恒定律;而且不理解 β 射线谱为什么是连续谱。1930年泡利提出了中微子假设:

“只有假定在 β 衰变过程中,伴随每1个电子有1个轻的中性粒子(称之为中微子)一起被发射出来,使中微子和电子的能量之和为常数,才能解释连续 β 谱。”那么 β 衰变的反应能由三部分组成,即

$$E_0 = E_e + E_\nu + E_r = [m_X - (m_Y + m_e)]c^2.$$

子核的反冲动能 $E_r \approx 0$,所以当中微子能量 $E_\nu \approx 0$ 时,电子能量 $E_e \approx E_{em} \approx E_0$,这是电子能量(β 谱)的上限;当 $E_\nu \approx E_0$ 时, $E_e \approx 0$,故电子能量在0和 E_{em} 之间连续变化。

说明:

(1)费密在泡利的中微子假设基础上,于1933年提出 β 衰变的电子-中微子理论。该理论指明了 β 衰变的本质。 β^- 衰变是原子核内一个中子转变成一个质子,故核电荷数增1; β^+ 衰变是核内一个质子转变成一个中子,故核电荷数减1(EC也是核内一个质子转变成一个中子,但 β^+ 衰变是放出正电子,EC是吸收电子)。总之, β 衰变是质子与中子之间的相互转化。费密的理论认为,中子和质子可以看作是同一种粒子——核子的两个不同的量子状态,两者之间的相互转化相当于核子不同状态之间的跃迁,电子和中微子是跃迁的产物,事先并不存在于核内。这犹如 γ 衰变放出的光子是电子不同能级(其不同的量子态)之间的跃迁产物。

(2)引起 β 衰变的是电子-中微子场与原子核(实为与核子)的相互作用,此作用属于弱相互作用。作用结果使核子量子态改变,伴随以电子、中微子从其场中产生(对于EC,则是电子湮没、中微子产生)。这犹如电磁场(光子场)与电子相互作用(即为电磁作用),作用结果使电子的量子态改变,伴随以光子从电磁场中产生(或湮没)。人们对弱作用的认识正从 β 衰变始。

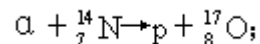
(3) β 衰变研究中的一项重大成果是李政道、杨振宁提出的弱作用下宇称不守恒，后为吴健雄的 ^{60}Co 极化核的 β 衰变实验所证实。

(4) 中微子假设至 1956 年才被证实，即其时观测到了反中微子。中微子不仅是弱作用领域的重要成员，尔今还是宇宙学研究中的关键角色，它在宇宙中含量多少、质量几何，直接关系到解决采取怎样的宇宙模型的问题。

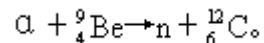
核反应

通常指一种核素在具有一定能量的粒子轰击下嬗变成另一种核素的现象。与自发性的放射性衰变不同，这种核转变往往是用人工方法实现的。

例如，历史上第一个人工核反应（1919 年）



又如发现中子的核反应（1930 年）



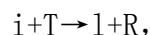
这两个核反应是以 α 粒子轰击氮核和铍核，使其嬗变成氧核和碳核，并产生轻粒子——质子和中子。

说明：

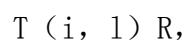
(1) 通过核反应可了解靶核的性质，从反应产物中寻找新粒子，探索亚原子粒子之间的作用机制。比如因核反应满足电荷守恒、能量守恒、动量守恒等诸定律，故由此可确定反应前后某粒子的运动状况和质量、电荷数等。

(2) 轰击粒子的种类多样，有轻粒子，如质子、中子、氘核、氦核以及高能光子；至于比氦核重的粒子引起的核反应，统称重离子反应。

(3) 核反应一般表示为



或



这里以 i, T, l, R 分别代表入射粒子, 靶核, 出射轻粒子, 剩余核 (嬗变核); 其静止质量和动能分别记以 m_i, m_T, m_l, m_R 和 K_i, K_T, K_l, K_R 。按照能量守恒定律可定义

$$Q \equiv [(m_i + m_T) - (m_l + m_R)] c^2$$

$$= (K_l + K_R) - (K_i + K_T)$$

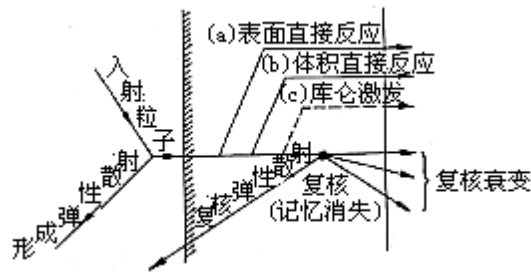
为反应能。此式称为核反应的 Q 方程。若反应后粒子总质量小于反应前粒子总质量, 即反应后质量有亏损, 则动能便有增益, 即 $Q > 0$, 反应是放能反应; 反之, 若反应后粒子总质量大于反应前粒子总质量, 即反应后质量有增益, 则动能便有亏损, 即 $Q < 0$, 反应是吸能反应。实际上, $|Q|$ 就是核反应所放出或吸收的能量。一般靶核静止, $K_T = 0$, 那么 $K_i = -Q + (K_l + K_R)$ 。要使吸能反应发生, 必须使入射粒子的动能大于阈能, 显然阈能大于 $|Q|$ 。

(4) 核反应截面定义核反应截面 σ 以表示入射粒子引起核反应的概率:

$$\sigma = \frac{-dx}{Nn dx}$$

式中 N 为靶核密度, n 为入射粒子的强度 (入射束流在单位时间里通过其正截面单位面积的粒子数), $-dn$ 是入射粒子束穿过靶箔后其强度的减小量, dx 为靶箔的厚度。

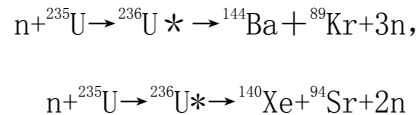
(5) 核反应机制有各种模型用以反映核反应的机制, 较有影响的是玻尔于 1936 年提出的复合核模型: 入射粒子被靶核吸收, 形成复合核 (简称复核); 过一段时间后, 其中某核子或核子集团获得足够能量而逃逸, 此即复合核的衰变。此外, 所谓直接作用模型乃指入射粒子还可能与靶核的核子 (包括表面的核子和内部的核子) 直接作用; 而库仑激发模型乃指靶核接受了入射粒子的能量可能被激发, 尔后再跃迁回低能态, 以致发射出光子; 如此等等。所以说, 入射粒子进入靶内后, 形成与靶核粒子的作用方式相当复杂的复合体系。当然, 若靶核或入射粒子不同, 以及若入射粒子的能量有别, 往往可用诸模型中之一为主来解释比较适合。然而, “复合体系”比复合核在含义上广泛一些, 代表入射粒子与靶核交换能量的一个过程; 这样显得确切些。1957 年韦斯科夫描述了核反应的全过程, 他认为共分三个阶段, 详见下图所示。在第一阶段, 入射粒子保持相对的独立性, 它们或被靶核吸收, 发生核反应, 或被靶核作弹性散射 (称作形式弹性散射, 广义上也属核反应范畴)。通过 (a), (b), (c) 方式作用的入射粒子在不同程度上保持原有性状。而复合核或者衰变, 放出另外的粒子; 或者放出与入射粒子相同的粒子, 而剩余核处于基态, 这称作复合核弹性散射。



核裂变

重核在轻粒子轰击下或自发地分裂成中等质量核的核转变。

1938年，哈恩和史特拉斯曼发现，当中子轰击铀核时，会使其分裂成两块质量相近的碎片，同时放出2~3个中子；这是裂变探索的开始。裂变方式多样，例如



为 ${}^{235}\text{U}$ 核裂变之常见方式。裂变后生成核的比结合能 B/A 升高，约增1MeV左右，即表示每个核子对裂变释放的原子核能总量平均贡献1MeV左右。那么，一个铀核裂变会释放能量200MeV上下；这是一个大数目，故原子（核）能是一种强能源。释放之能量表现为碎片（生成核）、放出的中子、伴随发生的 β 衰变产物等粒子的动能。

除中子外，其他轻粒子，如质子、氦核、 α 粒子、 γ 光子等也能诱发裂变。但中子诱发的裂变常会放出更多的中子，被发射的中子促使裂变自持地继续下去，形成链式反应；这样，大规模地利用原子能才成为可能。引入中子倍增系数 K ，然而 K 并不简单地等于反应式中发射中子数与入射中子数之比，它还与许多因素有关。显然，唯有当 $K \geq 1$ 时，才可能实现链式反应。

说明：

(1) 裂变机制玻尔与惠勒以核的液滴模型和复合核反应机制解释裂变过程。重核当俘获轰击粒子后，形成处于激发态的复合核（上面反应式中的 ${}^{236}\text{U}^*$ 即是），其集体振荡使原来的球状“核液滴”变形为椭球状。虽有“液”表面张力使其恢复球状，但库仑斥力会加剧形变，椭球就进一步拉长，最后断裂成两块碎片。

因此，发生裂变须具备两条：其一，库仑能 E_c 与表面能 E_s （参见原子核的结合能）之比

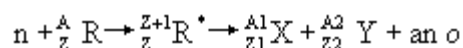
$$x \sim \frac{E_c}{E_s} \sim \frac{Z^2 / Z^{1/3}}{A^{2/3}} = \frac{Z^2}{A}$$

足够大。X 越大，表示库仑能与表面张力相比所起的作用越大，发生裂变的可能性也越大，所以 X 称为可裂变率。例如， $n + {}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{236}\text{U}^*$ 的 $Z^2/A = 35.9$ ，相当高； ${}^{239}\text{Pu}$ （钚）亦然。故两者易于裂变。其二，俘获中子后的复合核具有较大的激发能。如天然铀中 ${}^{235}\text{U}$ 的含量仅为 0.72%，而 ${}^{238}\text{U}$ 却占 99.27%；然而，前者仅需热中子（或称慢中子，动能为 0.025eV）就能诱发裂变，后者却须由快中子（动能高达 1MeV 以上）才可能诱发裂变。原因在于与 $n + {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{U}^*$ 相比， ${}^{236}\text{U}^*$ 处于较高的激发态（与各自的裂变势垒比较而言）；况且，后者一般以 γ ， β^- 方式衰变。

(2) 自发裂变当 Z^2/A 大到一定程度的受激原子核会发生自发裂变。在原子序数比钍（其 $Z=90$ ）低的元素中，由于裂变势垒很高，一般不会发生自发裂变；而在原子序数较大的元素中，发现有自发裂变的事例，但并不多。至于一些新的人工放射性核素，发现其主要以自发裂变的方式实现核转变。

(3) 促成核裂变的链式反应还有个临界体积的问题。核裂变燃料块不能过小，否则当中子通过它时来不及碰上可诱发其裂变的核就已飞离。通常以能够发生链式反应的燃料块的最小体积作为其临界体积。原子弹就有两个核燃料块，体积都小于临界体积；待普通炸药引爆把两块合并成一块后，总体积超过临界体积，链式反应便剧烈地发生，K 甚大，此即谓原子弹爆炸，产生极大的杀伤力。

(4) 除了 ${}^{235}\text{U}$ 外， ${}^{239}\text{Pu}$ （钚）也是最常用而有效的核燃料，也由中子诱发其裂变。此外， ${}^{233}\text{U}$ 也是一种核燃料。 ${}^{239}\text{Pu}$ 和 ${}^{233}\text{U}$ 的裂变性质与 ${}^{235}\text{U}$ 相类似。中子诱发的重核裂变的反应式可一般地写成



其中 R 是裂变核； R^* 是俘获 1 个中子的复合核，处于激发态；X，Y 为裂变产生的核；a 是裂变放出的中子个数。显然 $A = A_1 + A_2 + a - 1$ ， $Z = Z_1 + Z_2$ 。

核裂变反应堆

简称反应堆，乃是一种实现可控核裂变链式反应的装置。控制堆内链式反应，使其维持一定强度地进行下去，不发生爆炸而稳定地输出原子（核）能。

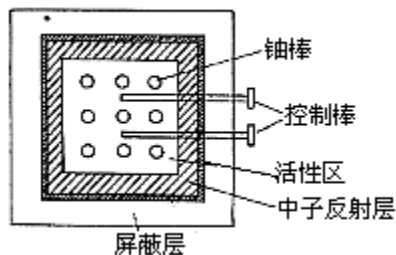
反应堆形式多样，以满足不同的用途。有用于发电或提供动力；有用于生产核燃料和其他放射性核素；也有用作中子源。

说明：

(1) 反应堆的工作原理参见核裂变。有两点很重要。第一，须控制链式反应强度，故装置中有控制棒，藉此维持中子倍增系数 $K=1$ ；即即使反应不会过剧

而发生爆炸事故，又使反应自持下去。第二，使反应放出的中子减速，成为热中子，以诱发 ^{235}U 裂变。

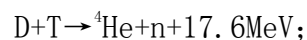
(2) 下图是非均匀式反应堆的示意图。取天然铀或浓缩铀作为核燃料，制成具有一定体积的圆棒（或其他形状），置于作为减速剂的重水或石墨中。至于均匀式反应堆，是将浓缩铀的盐类溶解在重水中，然后将此溶液注入具有一定体积的堆芯。控制棒用对中子吸收能力很强的镉或硼制成。控制棒插入堆芯；插入深度可以调节，以控制堆芯中的中子数量，并由此控制反应强度。裂变过程中直接放出的中子占中子数量 99% 以上；反应很快，1 秒钟内就可产生 1000 代中子，这样的中子称为瞬发中子。而另外还有 1% 的中子是由裂变碎片核衰变放出的，它们需经过几秒到几十秒才从碎片中放出，这样的中子称为缓发中子。只有当缓发中子放出后，反应堆的工作才达到临界状态 ($K=1$)，即链式反应才得以进行。所以在设计反应堆时要计入这部分缓发中子，使 $K=1$ ，如此方能使控制棒来得及进退。堆芯又称活性区。一般在堆芯四周设有反射层，把外逸的部分中子反射回堆芯。反射层外是堆的壳体。再外是很厚的屏蔽体，以免污染环境。



核聚变

乃指轻核聚合成较重核的核转变。

轻核聚变后其生成核的比结合能 B/A 升高。例如重氢核 D (氘核 ^2H) 和 T (氚核 ^3H) 聚合成氦核



此即表示，每个核子对聚变释放的原子（核）能总量平均贡献 3.5MeV，大大高出中子诱发 ^{235}U 裂变反应中每个核子贡献的 1MeV。况且，海水中氘的蕴藏量甚为丰富，那么由上述聚变反应似乎可获得万世不竭的巨大能源。可是，要人工控制实现核聚变比可控核裂变困难百倍。 ^{235}U 裂变由热中子（室温中子）诱发；适当地控制，链式反应便自持进行。而室温下轻核不会聚合。轻核得以聚合，依靠核子间核力的吸引作用，核力是短程力。但质子带正电，相互间又有电磁斥力作用，这是长程力。故

聚合过程中必须先克服库仑势垒，那么轻核必须具有极大的动能。依据平均动能等于 $\frac{3}{2}kT$ 的关系式可知，相应聚变温度极高，所以核聚变又叫作

热核反应。理论上估计，聚变温度 T 约为 10^8K 量级，此时聚变物质完全电离成等离子体。除了温度上的要求外，等离子体的密度 n 也须极高，这样才能使聚变核进入核力作用程范围（小于 10 费米）。而且维持高温、高密条件须有足够长时间以促成其聚合。这段时间称为约束时间 τ 。对于氘-氘反应， $n\tau = 10^{14}$ 秒/厘米³。此式称作劳逊判据。显见，要达到这些条件，先得付出极高的能量，技术上也有重重障碍。

核聚变的约束方式

实现核聚变，聚变物质必须约束起来，其约束方式有引力约束、惯性约束、磁约束。对磁约束等人工约束方式的探讨，正是建成可控核聚变反应堆的关键。

说明：

(1) 引力约束太阳就是核聚变所释放的原子（核）能。太阳等恒星不断进行着热核反应，其中主要是氢核聚变成氦核。恒星质量大，内部引力极强，聚变物质就靠强引力场约束在那么巨大的球形体积内；这种向心凝聚型的约束方式相当持久，而且反应进行速率比较小，反应温度也比较低。因此，恒星是稳定的自持核聚变的“天然反应堆”，能持续长久地“光芒四射”。

引力约束方式在比起太阳来说显得这么小的地球（其质量为太阳质量的三十分之一）引力场区域内是不起显著作用的，所以不能引作地球上对少量聚变物质加以人工控制的约束方式；况且要约束很长时间也还办不到。

(2) 惯性约束氢弹爆炸是人为已实现的核聚变例子。氘化锂（ ${}^6\text{Li}^2\text{H}$ ）是氢弹的原料。此爆炸实际是个混合过程。先用普通炸药引爆，促使分散的 ${}^{235}\text{U}$ （或 ${}^{239}\text{Pu}$ ）并合而发生裂变链式反应，以致释放大量能量而产生高温、高压，同时放出大量中子与 ${}^6\text{Li}$ 反应产生氚核。氚核与氘核在高温、高压下发生热核聚变，聚变产生的中子又能诱发铀燃料的裂变。整个裂变-聚变-裂变过程在一瞬间完成，从而产生比原子弹强几百倍的杀伤力。显然，聚变“点火”的极高温度是靠裂变引爆提供的。

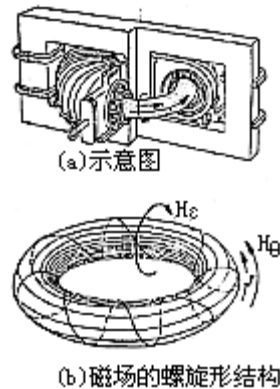
氢弹凭依惯性约束方式实现氘-氘聚变。在裂变引爆后一下子产生高温、高压，氘、氘因惯性来不及扩散，即惯性力对这高温的等离子体施以约束。这种约束方式在瞬时爆炸式聚变中可以发挥作用。

用激光“聚爆”（或电子束、重离子束“聚爆”），即用强功率激光均匀地从四面八方照射聚变物质靶丸，一下子使其成为高温高密等离子体；同样，凭依

惯性约束方式在极短时间 (10^{-9} 秒) 之内, 也就是说在靶丸未严重飞散之前实现核聚变。

爆炸式聚变当然是非可控的。以激光等束流集聚引爆的聚变物质很少, 不会造成什么伤害。目前惯性约束的种种方案都还未成功。

(3) 磁约束带电的等离子体在磁场中受洛仑兹力作用, 绕着磁力线运动, 从而被约束在垂直于磁场的方向上; 这便是磁约束, 是洛仑兹力对等离子体施加的约束。人工设计的磁约束装置有不少种类, 最有成功希望的是环形电流器 (简称环流器, 又叫作托卡马克)。如下图所示, 聚变物质的等离子体被置于围绕在变压器铁芯四周的环形真空容器内。当变压器初级线圈中通以强电流脉冲时, 等离子体便感生一强电流; 这环形等离子体电流就是变压器的次级“线圈”, 只有 1 匝。该电流加热等离子体, 同时形成一围绕它的磁场 H_{ϕ} ; 再则, 在环形容器外绕上线圈, 通以电流时便产生一沿着容器轴向 (即等离子体电流方向) 的磁场 H_0 。这两个磁场能把等离子体约束相当长时间。



对磁性约束方式的研究, 主要着眼于如何延长约束时间 τ 。目前托卡马克已达到点火条件, 即能量得失达到平衡; 据乐观的估计, 有能量盈余的可控核聚变反应堆可望在 21 世纪初期运转。

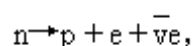
基本粒子

一般即指亚原子、亚原子核粒子, 它组成物质结构中比原子及其原子核更深的层次。中子发现后的 30 年代, 人们以为基本粒子只是构成原子的三种粒子: 电子、质子和中子。后来实验中陆续发现的、其寿命大于 10^{-20} 秒的粒子, 迄今有 40 种以上; 若把短寿命共振态粒子 (寿命小于 10^{-20} 秒) 也包括在内, 则总数不下于 800。高能物理研究表明, 基本粒子并不基本, 其内部还包含构成粒子, 因此当今物理学界普遍认为宜将亚原子、亚原子核粒子称作粒子。

说明:

(1) 粒子都具有确定的静止质量、电荷、自旋、同位旋、宇称等；还有重子数、轻子数以标志其所属类型；而奇异数、粲数等，则标志某些类型粒子的一些特殊性质。此外，每种粒子的平均寿命甚为不同。其中，光子、电子、中微子是稳定的，质子的寿命大于 10^{30} 年，也可看作是稳定粒子；而不稳定粒子的寿命除中子较长（917 秒）外，都在 10^{-6} 秒以下。不稳定粒子都有各自的衰变方式，并能相互转化。

例如，中子能转化成质子，其衰变方式为



式中 $\bar{\nu}_e$ 是反(电子型)中微子。

(2) 按自旋量子数为整数和半奇数之别，粒子分成两大类，前者称作玻色子，后者称作费密子。

(3) 每种粒子都有其反粒子。反粒子具有与(正)粒子相同的质量、自旋和平均寿命；但其电荷、磁矩、重子数、轻子数、奇异数、粲数等量，正反粒子等值而异号。至于其宇称，正反费密子相反，而正反玻色子相同。光子和 π^0 介子、 η^0 介子等的反粒子即其自身。

(4) 粒子之间的相互作用有 4 种：引力作用、电磁作用、强作用、弱作用（参见粒子间的相互作用）。按所参与的相互作用的不同，粒子分为 4 类：光子（电磁作用的传递粒子）、引力子（引力作用的传递粒子，由量子引力场理论所预言，未发现）、不参与强作用的轻子和参与强作用的强子。光子和引力子的自旋量子数分别为 1 和 2，都是玻色子（参见 414~415 页部分“基本”粒子表）。

轻子 包括电子 e ， μ 子， τ 子和相应的中微子 ν_e ， ν_μ ， ν_τ ，以及各自的反粒子（其中 ν_τ 尚未发现）。它们都是自旋为 1/2 的费密子。 μ 子和 τ 子除质量比电子 e 大外，其他性质几乎与其完全相同，故两者俗称重电子和超重电子。中微子不带电；习惯上以为其静止质量为零，但最近的探索表明并不为零，只是很小而已。至今尚未发现轻子具有内部结构，故它们还可称作基本粒子。粒子物理学家还猜测存在几代轻子，彼此间不直接相互转化；上面所列的这些轻子属于第一代。

强子除光子和上述几种轻子外，所发现的粒子都是强子。强子具有内部结构，即由夸克构成（参见强子结构）。强子又分为介子和重子两类。

介子是玻色子。已发现的赝标介子有 π 介子、 η 介子、K 介子、D 介子等，其自旋为 0；矢介子有 ρ 介子， ω 介子等，其自旋为 1。一般说来，介子的质量介乎轻子和重子之间。但以质量大小区分重子、介子、轻子并非绝对；实际上， τ 子比大部分介子、重子重，D 介子也比许多重子重。K 介子是奇异粒子。

重子是费密子。除核子外，其余重子的质量均超过核子，统称为超子；

包括 Λ 超子、 Σ 超子、 Ξ 超子、 Ω 超子、 Λ_c 超子及其反粒子。超子（除 Λ_c 外）是奇异粒子。大多数重子的自旋为 $1/2$ ，少数重子，如 Ω 超子的自旋为 $3/2$ 。

所谓奇异粒子，是指其具有如下奇异的性质：第一，产生过程是强作用过程，以致强烈迅速；而衰变过程是缓慢的弱作用过程，以致寿命较长（约为 $10^{-8} \sim 10^{-16}$ 秒）；第二，总是结伴地产生。奇异粒子以非零奇异数为标志。

电子

与原子核一起构成原子，具有单位负电荷的粒子，记以 e^- （或 e ）；属于轻子，参与弱作用和电磁作用。其静止质量为 9.1095×10^{-28} 克（或 0.511MeV ），电量为 1.602×10^{-19} 库仑（这就是电量的基本单位 e ），半径小于 10^{-13} 厘米。

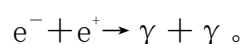
说明：

(1) 1881 年斯托尼依据法拉第电解定律，确认任何电荷都由基元电荷组成，并将基元电荷取名为电子。电荷有最小基元，此即后来称之为电荷量子化的概念。一般认为，电子是由汤姆孙于 1897 年前后发现的；及至 1909 年密立根通过油滴实验精确地测定了电子的电荷量。尔后根据电子电荷量 e 及荷质比 e/m ，便能确定电子的质量 m 。电子是人们最早发现并研究得最多的粒子，这里提及的实验发现都有重大的价值。

(2) 电子是最有用的研究“工具”，例如电子波动性（电子波）的发现证实了物质波假设（参见物质波假设）、波粒二象性概念的可靠性，从而有力地促进了量子理论的发展。又如对电子运动质量的测量，证明了相对论质量公式以至狭义相对论的正确性。

(3) 1928 年狄拉克提出相对论性量子力学，并由此预言正电子存在；4 年后，查德威克在搜索宇宙线时果然发现了正电子。正电子是电子的反粒子，记以 e^+ ，它除了电荷符号和磁矩方向与电子相反外，其他性质均与电子相同（当然两者的轻子数也反号）。

一对电子和正电子相遇，即湮没而转化成一对光子，即



相反，能量大于 1.022MeV 的 γ 光子与原子核碰撞时，会产生一对电子和正电子，这是电子-正电子对湮没反应的逆反应。因为电子和正电子的静止质量都为 0.511MeV ，故发生电子-正电子对产生反应的 γ 光子的能量值不能低于

0.511MeV 的 2 倍。这是实的低能光子的情况。而能量较高的带电粒子相互作用也会产生正、负电子对；即一般而言，正、负电子对是由其他正、反粒子对相互碰撞而湮没成虚光子，尔后转化而来的。至于强子与强子碰撞而产生正、负电子对的过程，通常被解释为：强子的构成粒子——正、反夸克对湮没成虚光子，尔后转化成正、负电子对。上述正、负电子对产生的过程实际是电磁作用的过程。按照电弱统一理论（参见粒子间的相互作用），正、负电子对也可以由实的或虚的中性中间玻色子转化而来，此乃弱作用过程。

同样，若正、负电子对的能量较高，则两者碰撞后湮没产生的不是一对实光子，而是通过虚光子而转化成正、负 μ 子对，或正、负 τ 子对。这两种过程也是电磁作用过程。若能量更高，通过虚光子甚至转化成一对正、反夸克，以致产生正、反强子对。

强子结构

高能物理的研究表明，强子并非基本的粒子，而具有内部结构。所谓强子结构，一般乃指强子的夸克结构模型。夸克是强子的构成粒子。

1964 年盖耳曼和兹外格（美国物理学家）分别假设夸克存在，强子乃由夸克构成。而国内有时把夸克称作层子。

现在普遍认为存在 6 种夸克。其中 3 种是轻夸克：上夸克 u，下夸克 d，奇异夸克 s；另 3 种是重夸克：粲夸克 c，底夸克 b 和顶夸克 t（这 3 种夸克分别以 3 种新量子数——粲数 c、b 量子数、t 量子数不为零为标志）。当然，每种夸克都有其反粒子——反夸克。重子由 3 个夸克构成，反重子由 3 个反夸克构成；

介子由 1 个夸克和 1 个反夸克构成。例如，p，n， π^+ 的构成分别

(uud)，(udd)，(u \bar{d})；再如 Ω^- 的构成为(sss)。夸克的主要性质列于下表

夸克	电荷 Q	同位旋		奇异数 S	粲数 C	b 量子数	t 量子数
		I	I _z				
u	2/3	1/2	1/2	0	0	0	0
d	-1/3	1/2	-1/2	0	0	0	0
s	-1/3	0	0	-1	0	0	0
c	2/3	0	0	0	1	0	0
b	-1/3	0	0	0	0	-1	0
t	2/3	0	0	0	0	0	1

说明：

(1) 各种夸克都是费密子，自旋均为 $1/2$ ，重子数都是 $1/3$ ，表明 3 个夸克构成 1 个重子。

(2) 夸克的电荷数 Q 为分数，从而拓宽了电荷量子化的涵义。这表明在物质更深的结构层次，电荷数的最小单位变成分数，那就是说电荷的量子是原来意义上理解的电子电荷的整数分之一。

(3) 既然夸克是费密子，就得满足泡利不相容原理，那么不可能由全同夸克构成强子。于是假定每类夸克有 3 种“色”；所谓加“色”，是指引入一种新的量子数，这样夸克的总数扩大了 3 倍。譬如 u 夸克有红 u 夸克、黄 u 夸克、绿 u 夸克 3 种，如此等等。如果同一强子中有 2 个、3 同类夸克（例如上述的 p , n , Ω^- ），那么它们的色量子数必定是不同的，即它们还是不同的粒子。

(4) 1974 年以后，发现一些新粒子，如 J/ψ , D^+ , D^- , D^0 , F^+ , F^- 和 Υ 等。新粒子与普通强子不同的是，它们的构成粒子中有重夸克。

比如 J/ψ 粒子的构成为 $(c\bar{c})$ ， Υ 粒子的构成为 $(b\bar{b})$ ， D 、 F 粒子由 c 夸克

和反轻夸克构成。新粒子的陆续发现，间接地支持了强子的夸克模型，并显示夸克种类的扩充。理论上认为， u , d ; c , s ; b , t 这 3 组夸克分别与 3 组轻子 e , ν_e ; μ , ν_μ ; τ , ν_τ （参见基本粒子）相对应。

粒子间的相互作用

研究物质粒子的运动变化，自然要考察粒子间的相互作用。随着物质结构探索的深入，对电磁、强、弱、引力这四种基本的相互作用场的性状之认识也日趋明朗。按照量子力学观念，把作用场量子化；相应之量子场理论不断地发展，从而为四种相互作用提供愈来愈恰当的描述。并且，相互作用的统一理论之探讨，已成为粒子物理的重要研究方向。

说明：

(1) 电磁力和引力是长程作用力，前者发生于带电物质之间，后者不限于带电的物质。两者都可以在宏观尺度的距离上起作用而表现为宏观现象；后者更在天体、宇宙范围里显示其突出地位，但在微观粒子尺度上因强度甚小而可忽略不计。宏观的电磁作用理论就是麦克斯韦电动力学，微观的电磁作用理论就是量子电动力学；这两门理论分别是经典场理论和量子场理论中的成功佳作。而宏观的引力作用理论乃是牛顿引力论和爱因斯坦引力论（即广义相对论），亦为两门杰出的经典场理论。但微观的量子引力理论尚在探讨之中。

在量子电动力学中，电磁场是量子化的光子场。或者说，电磁场的传递粒子是光子。光子性质已在前面一些条目中说明。带电粒子的电磁作用过程被解释成

虚光子的发射和吸收（即前文所述的彼此交换虚光子）。各种正、反带电粒子对都可湮没而转化为光子，光子也可在电磁场中产生。不同带电粒子彼此间的一些通过电磁作用的转化过程也往往

被解释成虚光子的产生和湮没。一个无量纲的量 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\eta c}$ ，称作精细

结构常数，用来标志电磁作用的强度，取值甚小（1/137），所以理论计算中按 α 幂次作微扰论展开，其结果与实验十分符合。

(2) 强作用不限于核子间的核力。凡强子都参与强作用，轻子不参与强作用，但两者都参与弱作用。强作用和弱作用是短程作用力。强作用的力程约为 10^{-13} 厘米，弱作用的力程小于 10^{-15} 厘米。强作用强度最大。强作用、电磁作用、弱作用、引力四者强度之比为 $1 : 10^{-2} : 10^{-5} : 10^{-39}$ 。

(3) 往往是某种作用力导致某些粒子反应。粒子反应满足一系列守恒律。每一条守恒律是指某一物理量、某一量子数的总量在作用过程中，即在反应前、后保持不变（是个守恒量）；所以每条守恒律反映粒子体系、反映相互作用某一方面的对称性。强作用比其他相互作用有更高的对称性；换言之，在强作用过程中，满足更多的守恒律。而弱作用的对称性最低；在弱作用过程中，如空间反射（P 宇称）、时间反演 T、电荷共轭 C（指体系内正、反粒子之间的变换）等方面的对称性均破缺，同位旋、奇异数等量也不守恒。电磁作用过程中，同位旋当然不守恒，余者都守恒。强、弱、电磁三种相互作用的对称性比较见下表。

相 互 作 用	守恒量													
	能量	动量	角动量	电荷 Q	电子 轻子 数 L_e	μ 子 轻 子 数 L_μ	重 子 数 B	同 位 旋 I	同 位 旋 分 量 I_z	奇 异 数 S	宇 称 P	电 荷 共 轭 C	时 间 反 演 T	联 合 变 换 CPT
强	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
电磁	√	√	√	√	√	√	√	×	√	√	√	√	√	√
弱	√	√	√	√	√	√	√	×	×	×	×	×	×	√

(4) 强作用过程进行迅速，电磁作用次之，弱作用更慢。三者的特征时间分别为 10^{-23} 秒以下、 $10^{-16} \sim 10^{-20}$ 秒、 10^{-10} 秒以上。

(5) 描述强相互作用比较有效的理论是量子色动力学。按该理论的解释，把强作用归结成强子的构成粒子夸克之间的作用力，其传递粒子为胶子。胶子是自旋为 1 的矢量玻色子，质量为零，色量子数不为零。但也有人认为夸克之间由胶子传递的作用应称之为超强相互作用，以区别于强子之间通过交换 π 介子（参见核力）或赝标介子、矢介子等玻色子而传递的强作用。

(6) 60 年代以后建立起来的弱电统一理论，把弱作用和电磁作用解释成同一种相互作用的两种不同表现，就如电作用和磁作用是电磁作用的不同表现一样。在较高能量尺度（ 10^2GeV ）上，两者是统一的“弱电作用”。该理论预言，弱作用的传递粒子是中间矢量玻色子 W^\pm 和 Z^0 （分别传递荷电弱流和中性弱流），自旋都为 1，宇称等不确定，质量很大，约为几十个 GeV。它们与光子一起，同为“弱电作用”的传递粒子。实验上发现了 Z^0 粒子，从而证实了弱电统一理论。

后来所谓的“大统一”理论把弱电作用与强作用也统一起来；在更高的能量尺度（ 10^{15}GeV ）上，它们是同一种作用力。其传递粒子包括 8 种胶子， W^\pm 、 Z^0 玻色子，光子，分别传递强作用，弱作用，电磁作用；此外还有 12 种未知粒子，传递未知的相互作用，所以夸克间的作用机制尚待进一步探讨。能量尺度进一步提高，可把它作为量子化场的引力作用一并统一起来，种种所谓“超引力”、“超对称”的理论模型还未给出认识一致的肯定结果。然而物质的统一性也正体现于物质间相互作用的统一性。在很高的能量尺度上，物质的对称性甚高，相互作用只有一种；能量降低，对称性逐渐降低，表现为强度不一、性状不同的各种相互作用从同一的作用中一一分离出来。

探索物质结构和相互作用这两者的深化是交织在一起的。亚原子物理和亚原子核物理的发展会把对这两个基本问题的认识推向新的水准。

教学方法

观察

人们通过感官或借助仪器，有计划、有目的地对客观事物进行系统考察和描述，这就是科学观察的方法。

观察是人们认识自然的最基本的方法，是获得感知、为建立科学理论提供原始资料的重要途径和手段。

说明：

(1) 有明确的研究对象和观察目的。如英国物理学家法拉第花了整整 10 年时间寻找“转磁为电”，终于观察到了当把磁铁插入绕有线圈的空心纸筒时，和线圈连接的电流计指针发生了摆动，由此发现了电磁感应现象。

(2) 综合运用感官，并借助科学仪器考察研究对象。例如观察回音——声波的反射及其产生条件，要凭听觉和视觉——观察钟表显示的时间差或测量声源和反射物间的距离。利用超声波进行水下目标探测时需借助仪器——声呐，且凭借听觉同时观察荧光屏上显示的回波信号来确定水下目标的位置。

(3) 力求全面地把握研究对象的各种属性，并以科学理论判断和理解观察的结果。例如英国植物学家布朗在显微镜下观察到悬浮在水中的花粉粒子和无生命的煤烟粒子的不规则运动，但未能正确地解释其原因。人们在重复的观察中还发现粒子越小、温度越高，粒子不规则运动的程度越明显。随着分子运动论的发展，人们才认识到粒子的不规则运动是它们受到来自各个方向的液体分子的碰撞不平衡所引起的。

(4) 系统地、全面地、如实地考察自然事物，准确而周密地记录事实，并加以统计和概括，为揭露事物和自然现象的本质及其规律提供科学依据。例如德国天文学家开普勒在丹麦天文学家第谷积累的 30 多年的高度精确的大量天体观测资料的基础上，对火星轨道进行周密计算与长期观测，摒弃了哥白尼提出的行星沿圆轨道运行的假定，提出了行星沿椭圆轨道绕太阳运行等著名的行星三大运动定律。

测量

从量的方面对事物进行考察的一种研究方法，是量的观察。其目的在于深刻地、精确地把握事物的质的特征及其数量关系。物理学中要研究事物的规律性，就需要对各种物理量，如长度、质量、时间、温度、电流强度、发光强度，进行考察和测量。

说明：

(1) 要有一个统一的标准。1971 年第 14 届国际计量大会在 1960 年通过的国际单位制 (SI) 的基础上，决定采用 7 个基本单位：长度单位米，质量单位千克，时间单位秒，热力学温度单位开尔文，电流强度单位安培，物质的量单位摩尔和发光强度单位坎德拉。有了这些基本单位就可以得出所有的导出单位。基本单位和导出单位就是进行科学测量的标准。

(2) 必须建立在对研究对象有比较深刻认识的基础之上。因为要进行量的观察。首先应明确表明研究对象的特征和属性，然后考虑尽可能提高测量精度的测量手段 (仪器、装置)。例如要研究从斜面上加速下滑的物体的运动是否属匀变速直线运动，首先应该知道匀变速直线运动的特征是加速度恒定，做匀变速直线运动的物体在相邻的相等时间内的位移差是一定值。在中学物理实验中常利用打点计时器记录数据，用毫米刻度尺测量各段相等时间内的位移，然后求出在相邻的相等时间内的位移差。根据位移差是否是定值，来判断物体的运动是否属匀变速直线运动。在这个实验中，长度的精确测量是至关重要的。

数学方法

在科学研究中针对研究对象不同的特点，运用数学概念、方法和技巧，对研究对象进行量的分析、描述、计算和推导，从而找出能以数学形式表达事物的量的规律性的方法。

16 世纪以后，物理学逐渐发展成为一门成熟的自然科学，它不仅用实验方法代替了以往整体的观察法，而且引进了数学方法。例如伽利略的自由落体定律、开普勒的行星运动三定律、牛顿运动定律和万有引力定律等，近代物理学研究由宏观领域深入到微观领域，根据在科学实验中所发现的新事实建立了许多与经典理论完全不同的新理论，而这些理论的建立都是在数学方法的帮助下完成的，例如麦克斯韦建立的电磁场理论，并运用数学方法的推导，预言了电磁波的存在；物理学研究进入微观高速领域之后，所产生的相对论和量子力学，都是采用数学方法作为表达形式。物理学的发展是和数学方法的运用分不开的。

说明：

(1) 数学方法为科学研究提供简明精确的形式化语言。运用数学方法研究事物规律，对量与量之间的关系、量的变化以及在量之间进行分析、比较、推导和运算时，都是以符号形式（包括图象、图表）表示的，也就是运用一套形式化的数学语言。这种简洁、明确、严密的数学语言已日益渗透到各门科学中去，成为表达科学概念和科学理论的重要形式和手段。用简明的数学公式、数学符号系统、形式化的语言表达自然规律以及规律和复杂现象的联系，才能在科学研究中进行定量描述和理论概括，反映自然规律的普遍性。

(2) 数学方法为科学研究提供数量分析和计算方法。运用数学方法可以通过认识事物的量来认识事物质的规定性。例如开普勒根据第谷积累的大量关于行星运动的观测资料，应用圆锥曲线理论，经过大量演算，建立了行星绕日变速运动的椭圆轨道模型，终于发现了行星到太阳的距离 R 跟行星绕日运行的周期 T 间的关系为 $R^3/T^2=K$ （恒量）。

(3) 数学方法为科学研究提供逻辑推理的工具。在科学研究中，数学方法是一种有效的进行推理和逻辑证明的工具，是建立科学理论体系的一个有效手段，且具有预见性。例如法国天文学家勒威耶根据天王星的运动轨道，与根据万有引力定律计算出来的结果总有比较大的偏离，便应用天体力学理论结合数学的分析和计算，预测天王星轨道外面存在一颗未被发现的行星，并精确计算了该行星的运动轨道以及它在各个时刻的位置。1846 年 9 月 23 日晚上，德国天文学家加勒把望远镜对准了勒威耶所预言的位置，立刻发现了后来被命名为海王星的这颗行星。又如电磁波的存在并预言它以光速传播，是由麦克斯韦用数学“推导”出来的，15 年后才由德国物理学家赫兹用实验证实；爱因斯坦通过质能关系式 $E=mc^2$ 的研究，预示了原子核反应中质量亏损所产生的巨大能量。以上事实表明，自然科学中的许多重要结论都是根据已知原理，运用数学的运算、交换法则，经过严密的数学推理证明后得到的。

推理

由已知一个或几个判断为前提，得出作为结论的新的判断的思维过程就是推理。在推理过程中，已知的判断叫做前提，推出的新的判断叫做结论——推论，把真实的前提和推论之间的必然联系叫做推理根据。一切推理都是由前提、推论和推理根据 3 部分组成的。

说明：

(1) 推理按前提的数量来区分，有直接推理和间接推理两种。只有一个前提的推理是直接推理。例如带电导体在达到静电平衡时，即电荷无宏观移动时，可以直接得到两个推论：导体是一等电势体，导体表面是一等电势面；导体表面附近电场中的电场线（电力线）必和导体表面垂直。有两个或两个以上前提的推理是间接推理。例如金属能导电，铜是金属，所以铜能够导电。

(2) 根据推理的思维进程的方向不同，又有归纳推理、演绎推理和类比推理等几种。

归纳推理是根据对某类事物中的个别现象的考察，所作出的关于该类事物的一般规律性的结论的新知的推理。归纳推理是一种扩大知识的方法。例如牛顿根据开普勒的行星运动定律，把天体间的力和地球使月球沿轨道运动的力及使地面附近物体坠落的力联系起来，归纳得出万有引力定律。

演绎推理是根据已知的一般原理，推知某个从属于该类事物的特殊事物的情况的新知的推理。演绎推理是一种必然性的推理。例如已知带电粒子在电场作用下能作定向运动，可以推知金属内自由电子在电场作用下能作定向运动，所以金属能导电；电解质溶液和电离了的气体中存在离子，所以，它们在电场作用下也能导电。

归纳推理是从个别到一般，因为个别之中包含着一般，所以通过个别可以认识一般。演绎推理是从一般到个别，因为一般存在于个别之中，某类事物共有的属性，其中每一个别事物必然都具有，所以，从一般必然能推知个别。归纳和演绎这两种推理形式是人们对客观现实的两种对立的认识方法的总结，它们既是对立的，又是统一的，缺少任何一个方面都不能认识真理。

类比推理是根据两个对象（或者事物）具有一系列相同的属性，而且已知其中一个对象（或事物）还具有其他的属性，由此推出另一个对象（或事物）也具有同样的其他属性。例如科学家利用光谱分析首先确认在太阳大气中存在氦。由于太阳上的其他元素，如氢、氧、氮、硫、磷、钾，地球上都有，于是就类推地球上也可能存在氦，后来果然在地球上找到了氦元素。但类比推理的结论是或然的，因为推理的根据并不充分。例如火星和地球相比较，发现它们有许多属性是相同的，地球上生命，于是就推测火星上也可能有生命。但迄今为止，包括利用降落在火星上的探测器在火星表面上所进行的生物化学实验结果来看，并没有

发现火星上有生命存在的迹象。这表明类比推理的结论，有待于进一步的实验验证。

类比

根据两个研究对象在某些属性或特征上的相似或相同，从而推断出这两个研究对象在其他属性或特征上也可能相类似的研究方法。

自然界中的事物和现象尽管是千差万别的，但在一些事物或现象之间，往往具有某些相类似的属性或特征。采用类比方法，就可用已经认识了的事物和现象为人们研究还没有认识的并且与之相类似的事物和现象提供类似的说明。例如，法国物理学家库仑在利用扭秤装置作了测定两个带电球体之间的相互作用力的大量实验基础上，采用与万有引力定律类比的方法，提出了两个点电荷之间的作用力跟电量成正比、跟它们之间的距离的平方成反比的假设。事实上当时还没有确定电荷数量的单位，且受仪器测量精度的限制，库仑提出这一假设纯粹是采用了类比法，当然，后来被理论和进一步的实验所证实。又如法国物理学家德布罗意在光的波粒二象性的启示下，采用类比法提出一切微观粒子都具有波粒二象性的假设，并从理论上建立了粒子与波动的联系。这一假设后来为电子射线通过晶体时与用伦琴射线通过同一晶体时一样能产生完全相似的衍射图样而得到证实。以后的许多实验中还发现，不仅电子具有波动性，其他微观粒子，如质子、中子、中性原子、分子也同样具有波动性。

控制变量

根据研究目的，运用一定的手段（实验仪器、设备等）主动干预或控制自然事物、自然现象发生发展的过程，在特定的观察条件下探索客观规律的一种研究方法。

自然界发生的各种现象往往是错综复杂的，并且被研究对象往往不是孤立的，总是处于与其他事物和现象的相互联系之中，因此影响研究对象的因素在许多情况下并不是单一的，而是多种因素相互交错、共同起作用的。要想精确地把握研究对象的各种特性，弄清事物变化的原因和规律，单靠自然条件下整体观察研究对象是远远不够的，还必须对研究对象施加人为的影响，造成特定的便于观察的条件，这就是控制变量的方法。

例如在研究气体的温度、体积、压强这 3 个状态变量之间的关系时，必须设法把决定气体状态的一个量或两个量用人为的方法控制起来，使它保持不变，然后来比较、研究其他两个变量之间的关系。在进行观察时，首先把研究对象限定为一定质量的气体，然后研究在温度恒定的条件下，它的体积跟压强的关系，得出了玻意耳定律。如果使一定质量气体的体积（或压强）保持不变，研究它的压强跟温度的关系（或体积跟温度的关系），便得出了查理定律（或盖·吕萨克定

律)。这三个定律都是用控制变量的方法得出的描述一定质量的气体的状态量之间的关系的实验定律，为建立理想气体模型、推导理想气体状态方程提供了可靠的实验依据。

在研究物体的加速度跟所受的外力和物体质量的关系时，也采用了控制变量的方法。如先研究物体质量不变时，在大小不同的外力作用下，物体的加速度用外力的关系；再研究在相同大小的外力作用下，物体的加速度跟质量的关系。这就是著名的牛顿第二定律。

理想模型

人们在观察自然现象时，常会发现要研究的对象中的一些性质，对于现象的过程及其最终结果具有决定性的影响，而另外的一些性质则起次要作用。为了便于研究，人们在观察和实验的基础上，运用抽象思维能力，忽略次要因素和过程，只考虑起决定作用的主要因素和过程，把研究对象形式化、纯粹化，这就是理想化的方法。建立理想模型是科学抽象方法的一种形式。

说明：

(1) 理想模型是以客观实体为原型进行科学抽象的产物，是对客体主要特征的反映。例如力学中研究的“刚体”模型是固体的形状、体积不易改变的突出反映；分子物理学中研究的“理想气体”模型是一定质量的真实气体分子本身的体积和气体体积相比，以及分子之间的作用力在低压、高温下都显得十分微小这一特征的反映；光学研究中的“绝对黑体”模型是某些物体几乎能够全部吸收外来电磁辐射而很少发生反射和折射的这一特征的反映。

(2) 理想模型是研究解决实际问题的基础。建立理想模型代替实际的研究对象，可以使研究的问题大为简化。例如研究抛体运动，可以忽略抛射体的形状和大小，把它看成“质点”，只研究它具有一定的初速度和只在重力作用下的平动运动的情况，而不考虑它自身可能的转动及受空气阻力的影响等，这对速度不大的真实抛射体来说，它的实际运动情况和理想情况是很接近的。在解决如炮弹飞行弹道这类实际问题时，仍是以理想模型的研究为基础，然后考虑实际对象在运动过程中其他因素的影响，把研究结果作各种修正，便能较好地解决实际问题。

(3) 由理想模型建立起来的相应理论有一定的适用范围。例如库仑定律只适用于“点电荷”的情况，对于两个靠得很近的带电体间存在的相互作用力，就不能简单地直接应用库仑定律。又如理想气体状态方程只能近似描述真实气体在低压、高温下各状态参量间的变化关系，而在高压、低温情况下，则必须考虑由于分子间作用力和分子体积的实际存在而进行修正。

假说

以客观事实和科学原理为基础的对于各种未知事实(包括现象间的规律性联系、事物的存在或产生原因、未来事件的出现等)的猜测,这就是科学的假说。它是科学研究工作者最重要的思维方法。

说明:

(1) 假说具有推测的性质。例如关于太阳系起源的各种假说,其中最有影响的是德国哲学家康德提出的“原始星云说”。

(2) 假说的基础是客观事实和科学原理。近20年来,科学家们根据30年代观察到的遥远星系所发出的光的红移现象,发现宇宙在膨胀和冷却等事实,认为星云不是“原始”就有的,而是经过一次“大爆炸”后才逐步形成的,提出了关于宇宙起源的新的假说。又如分子运动论是人们对扩散现象、布朗运动等大量客观事实观察的基础上提出的关于物质结构的一种假说。

(3) 假说是人们的认识接近客观真理的方法。例如关于光的本性的认识,历史上许多科学家曾经先后提出了对立的的不同假说。牛顿对光的反射、折射、色散等现象进行了大量的研究,认为光是由发光体射出的微粒所组成,后人称为“光的微粒说”,但“微粒说”无法解释光的衍射和干涉现象。惠更斯在长达15年的时间里,研究了光的反射、折射、衍射等现象,认为光和声现象相似,是在一种特殊弹性物质(以太)中传播的弹性机械波动,他所建立的“惠更斯原理”是“光的波动说”的核心。麦克斯韦在研究电磁场理论的基础上推算出电磁波的传播速度恰等于光速,由此推断光也是一种电磁波。爱因斯坦在研究光电效应时,把普朗克提出的辐射能量不连续——量子化概念推广到辐射的传播过程中,提出光量子假说,认为光辐射也是以一束一束能量形式存在的。运用光量子假说,成功地解释了光电效应。光的“微粒说”、“波动说”、“电磁说”和“光子说”的先后提出,反映了人们从不同侧面对光的本性认识的逐步深入,而且新提出的假说总是比原先的假说更接近事实本身。从光既具有粒子性又具有波动性的事实,人们逐渐认识到光具有波粒二象性。

实验

为了能够仔细观察研究某一现象(或过程)发生的原因、特点、量的决定因素和规律,尽可能排除外界各种干扰的影响,突出主要因素,在一定条件下使这一现象(或过程)重演。这就是科学实验的方法。

说明:

(1) 实验是建立理论的基础,也是检验理论的标准。

(2) 在科学技术领域中,根据不同的研究目的,一般有以下几种类型的实验:

决断性实验判定某种因素是否存在，某些因素间有无联系，决定某些假定或设想的取舍等的实验。

模拟实验限于时空条件或观察条件无法直接进行的实验，用人为方法创设一定条件模拟实际发生的现象的实验。

对照实验研究不同的条件与环境对事物的发展与变化造成的差异的实验。

析因实验探索影响某一现象的发生和变化过程的主要原因的实验。

在中学物理教学中，根据不同的教学目的和要求，一般有以下几种类型的实验：

探索性实验研究某些物理规律的实验。例如研究杠杆平衡条件、研究电磁感应现象的实验。这类实验安排在有关知识的教学之前进行，或可作为教学并进实验。其目的是让学生通过实验观察，对尚未学过的知识有一感性认识，并可归纳得出初步结论，为进一步学习有关规律打下基础。同时，探索性实验还具有让学生“发现”规律、激发学习兴趣、培养求实精神与科学方法的功能。

验证性实验验证某些物理定律的实验。例如验证牛顿第二运动定律、验证玻意耳定律的实验。这类实验安排在学习过有关知识之后进行，要求学生定量分析实验数据，从中得出结论，并与所验证的定律作比较，以达到验证目的。如果实验结论与物理定律有偏离，还应分析产生误差的主要原因。

基本训练性实验熟悉某些基本测量仪器的操作与使用的实验。这类实验的目的是训练实验操作技能。在初中有长度、质量、时间、温度、电流（强度）等基本物理量的测量以及串、并联电路的连接等基本操作的实验，这些实验涉及刻度尺、天平、停表、温度计、电流表等仪器的使用。在高中则有游标卡尺、打点计时器、多用表、示波器等仪器的使用。进行这类实验时，应严格强调各种仪器的操作规范，务必使学生学会正确操作和使用，而对仪器的工作原理则不需详细阐述。

测定物理常数和物理量的实验为测定某一物理常数或物理量而进行的实验。这类实验的目的是让学生运用已经学过的知识和熟悉的器材，测定某些物理常数和物理量。例如测定物质的密度、测定重力加速度、测定介质的折射率的实验。这类实验要求学生理解实验所依据的原理，明确实验的条件、步骤和过程。由于受器材和实验条件的限制，对所测定的量的准确程度一般不作过高要求。

设计性实验根据目的要求自行设计的实验。这类实验对学生实验能力的要求较高，教学大纲中对此一般不作具体规定。这类实验可在高年级总复习阶段适当开设。例如初中，在学生理解串、并联电路的特点，并熟悉电流表和电压表使用的基础上，可以让学生设计只用一个电表和一个已知电阻来测量另一个未知电阻的实验；在高中，可以让学生设计验证反冲运动中的动量守恒等实验。

物理概念的教学

物理概念是反映事物的物理现象的本质属性的思维形式，是构成物理知识的最基本的单位。教学时应注意：①明确概念引入的必要性和事实依据。②只有明确、掌握概念的定义，才可能明确、掌握被定义的概念。③了解概念的种类（矢量、标量，状态量、过程量，特性量、属性量，某种物理量的变化率等等），以使用比较法教学。若这种概念属首次学习，就必须着重使学生明确抽象概括的方法。④理解概念的定义、意义和跟有关概念的联系与区别。⑤定义的语言表达形式可以不同，但数学表式应该相同。⑥注意从定义式导出被定义的物理量的单位。

(1) 机械波不是物理量，没有定义式。机械波的现象直观而本质抽象，故常采用分析法教学，即从学生有感性认识的水波和演示绳上的波出发，使学生对波有个宏观印象，再用图和模拟波的演示仪器进行微观分析，得出机械波的定义（机械振动在媒质中的传播过程）和意义（传递能量的一种方式）。波的意义具有普遍性，比机械波的定义更重要。教学时还应注意波与振动的联系与区别；水波是重力波，成因较复杂，不宜多讲。

(2) 质点是个理想化的物理概念。从实物到物体，再从物体到质点，经过两次抽象概括。教学重点是：①使学生初步了解理想化的物理概念（光滑平面、理想气体、点电荷、电场线、光线等）在物理学研究上的作用；②用实例说明在什么情况下，物体可以当作质点。

(3) 速度描述物体运动状态的物理量，是矢量。速度的概念是在对物体运动的直观感觉的基础上抽象出来的，学生容易理解。一般定义为描述物体位置变化的快慢和方向的物理量。对具体的运动状态来说，

速度的外延有平均速度($\bar{v} = \Delta s / \Delta t$)、即时速度($v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s / \Delta t$)和匀速运动的速度($v = \Delta s / \Delta t = \text{恒量}$)。根据速度的定义式，速度又被

被称为位移对时间的变化率。在中学教学中，虽然不要求介绍速度内涵和外延的关系，但教师应该了解。若条件允许，在复习课中可作为提高的内容，使学生对速度概念有个整体的认识。

(4) 加速度速度、加速度都是人们为了研究运动规律的需要，通过对运动现象的观察、分析，抽象概括出来的概念。它们的定义式不是实验的结论，但可以用实验来说明。加速度可以参照速度用比较法进行教学。但要特别注意防止学生在方向上的错误认识：①加速度的方向跟速度的方向一致（正确的是规定跟速度增量的方向一致；决定于物体受力的方向）；②笼统地认为负加速度就是匀减速运动，正加速度就是匀加速运动；③认为加速度的正、负是表示加速度的方向；④正加速度的量值总比负加速度大。此外还应注意加速度跟速度、速度增量的联系与区别。

(5) 力所谓一个概念是明确的，就是指这个概念的内涵和外延是明确的。力的内涵少外延多。要明确力的内涵和外延，决非几节课所能达到。所以无论是

初中或高中的“力”的一节的教学，只能利用学生已有的生活经验和简单的实验，从几种具体的力抽象出力的初步概念。但只是认识力的重要起点，要上好这节课，并注意以后逐步提高、加深和完整。

(6) 功量度能量转化的物理量，是过程量，是标量。由于中学物理教材多数是先讲功后讲能，反过来用功来定义能，故功的定义只能在“机械能”章末出现。功这节课的教学重点应放在功的量度上。从实例的分析得出做功的两个不可缺少的因素，然后规定计算功的公式就是这

两个因素的乘积。用实验来确定 $W \propto F(\cdot)$ 和 $W \propto s(\cdot)$ ，从而得出功的

公式是不符合逻辑的。高中关于功的教学，是在初中的基础上，把计算功的公式一般化，并从数学角度讨论正功和负功。不从能量转化的观点来讨论正功和负功，物理意义是不明确的。这有待于以后的教学来补充和加深。

(7) 热量在热传递过程中，物体吸收或者放出热的多少（内能变化的量度），是标量。教学时应注意与温度、内能的联系和区别。区别的关键是热量是过程量，只有当物体在吸热或放热的过程中，才有热量的传递；而温度和内能是状态量，物体在一定状态下具有一定的温度和内能，而不具有热量。要使初中学生一下子理解热量的概念是困难的，要注意有计划地在有关教学中逐步明确、巩固和加深。

(8) 压强描述压力作用的强度的物理量，是状态量，是标量。教学时应注意：一般定义式 $p=F/S$ 普遍适用于固体和流体，而 $p=\rho gh$ 只适用于密度均匀的液体和气体。对于密度均匀的固体来说，矩形体、方形体和圆柱体等也可应用。静止的固体能够把作用在它上面的压力等值传递，但由于受力面积的变化，力可能集中，也可能分散，强度就变大或变小，也就是压强增大或减小。流体对压强的传递遵循帕斯卡定律。密度不均匀的流体，可以利用 $p=\rho gh$ 求平均压强。

(9) 密度表征物质的一种特性的物理量，是由物质内在因素决定的（分子的质量和单位体积的分子数）。若外部环境条件不变，每种物质都有一定的密度。定义为由某种物质组成的物体的质量跟它的体积的比值。密度的教学一般是通过实验确定物体的质量跟体积的比值。对于同种物质，比值是个恒量。对于不同的物质，比值一般是不同的。从而说明比值表征物质的一种特性，得出密度的定义。接着注意举实例和用具体数据说明物质的密度跟它的质量、体积不成正、反比关系。

(10) 电阻物质的一种电学特性，由导体本身的物理条件决定。定义为导体两端的电压跟通过这段导体电流的比值，即 $R=U/I$ 。请注意，式中 R 不一定是恒量。对于金属导体来说， R 是恒量， $R=U/I$ 就是欧姆定律的表式。若 R 不是恒量，说明这种导体不服从欧姆定律。电阻的教学可以采用类似密度、比热等的特性物理量的教学方法，通过实验分析形成概念。但要注意，不要把电阻定义式中 U/I 的比值说成非恒量不可；不要把电阻定义式和欧姆定律表式截然分开。

(11) 电场强度电场的一种特性。由于电场高度抽象，不能用实验来形成概念，人们就利用库仑定律和理想化的检验电荷做“想象的理想实验”，得出 $E=F/q$ ，从而形成电场强度的概念。教法除了实验外，其余的与其他特性物理量类似。

物理定律的教学

物理定律是对物理规律的一种表达形式。通过大量的观察、实验归纳而成的结论。反映物理现象在一定条件下发生一定变化过程的必然关系。物理定律的教学应注意：首先要明确、掌握有关物理概念，再通过实验归纳出结论，或在实验的基础上进行逻辑推理（如牛顿第一定律）。有些物理量的定义式与定律的表式相同，就必须加以区别（如电阻的定义式与欧姆定律的表式可具有同一形式 $R=U/I$ ），且要弄清相关的物理定律之间的关系，还要明确定律的适用条件和范围。

(1) 牛顿第一定律采用边讲、边讨论、边实验的教法，回顾“运动和力”的历史。消除学生对力的作用效果的错误认识；培养学生科学研究的一种方法——理想实验加外推法。教学时应明确：牛顿第一定律所描述的是一种理想化的状态，不能简单地按字面意义用实验直接加以验证。但大量客观事实证实了它的正确性。第一定律确定了力的涵义，引入了惯性的概念，是研究整个力学的出发点，不能把它当作第二定律的特例；惯性质量不是状态量，也不是过程量，更不是一种力。惯性是物体的属性，不因物体的运动状态和运动过程而改变。在应用牛顿第一定律解决实际问题时，应使学生理解和使用常用的措词：“物体因惯性要保持原来的运动状态，所以……”。教师还应该明确，牛顿第一定律相对于惯性系才成立。地球不是精确的惯性系，但我们在一段较短的时间内研究力学问题时，常常可以把地球看成近似程度相当好的惯性系。

(2) 牛顿第二定律在第一定律的基础上，从物体在外力作用下，它的加速度跟外力与本身的质量存在什么关系引入课题。然后用控制变量的实验方法，归纳出物体在单个力作用下的牛顿第二定律。再用推理分析法把结论推广为一般的表述：物体的加速度跟所受外力的合力成正比，跟物体的质量成反比，加速度的方向跟合外力的方向相同。教学时还应注意：公式 $F=Kma$ 中，比例系数 K 不是在任何情况下都等于 1； a 随 F 改变存在着瞬时关系；牛顿第二定律与第一定律、第三定律的关系，以及与运动学、动量、功和能等知识的联系。教师应明确牛顿定律的适用范围。

(3) 万有引力定律教学时应注意：①要充分利用牛顿总结万有引力定律的过程，卡文迪许测定万有引力恒量的实验，海王星、冥王星的发现等物理学史料，对学生进行科学方法的教育。②要强调万有引力跟质点间的距离的平方成反比（平方反

比定律），减少学生在解题中漏平方的错误。③明确 $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ 是万

有引力基本的、简单的表式，只适用于计算质点间的万有引力。万有引力定律是自然界最普遍的定律之一。但在天文研究上，也发现了它的局限性。

(4) 机械能守恒定律这个定律一般不用实验总结出来，因为实验误差太大。实验可作为验证。一般是根据功能原理，在外力和非保守内力都不做功或所作的总功为零的条件下推导出来。高中教材是用实例总结出来再加以推广。若不同形式的机械能之间不发生相互转化，就没有守恒问题。机械能守恒定律表式中各项都是状态量，用它来解决问题时，就可以不涉及状态变化的复杂过程（过程量被消去），使问题大大地简化。要特别注意定律的适用条件（只有系统内部的重力和弹力做功）。这个定律不适用的问题，可以利用动能定理或功能原理解决。

(5) 动量守恒定律历史上，牛顿第二定律是以 $F = \frac{dP}{dt}$ 的形式提出

出来的。所以有人认为动量守恒定律不能从牛顿运动定律推导出来，主张从实验直接总结。但是实验要用到气垫导轨和闪光照相，就目前中学的实验条件来说，多数难以做到。即使做得到，要在课堂里准确完成实验并总结出规律也非易事。故一般教材还是从牛顿运动定律导出，再安排一节“动量和牛顿运动定律”。这样既符合教学规律，也不违反科学规律。中学阶段有关动量的问题，相互作用的物体的所有动量都在一条直线上，所以可以用代数式替代矢量式。学生在解题时最容易发生符号的错误，应该使他们明确，在同一个式子中必须规定统一的正方向。动量守恒定律反映的是物体相互作用过程的状态变化，表式中各项是过程始、末的动量。用它来解决问题可以不涉及过程物理量，使问题大大地简化。若物体不发生相互作用，就没有守恒问题。在解决实际问题时，如果质点系内部的相互作用力远比它们所受的外力大，就可略去外力的作用而用动量守恒定律来处理。动量守恒定律是自然界最重要、最普遍的规律之一。无论是宏观系统或微观粒子的相互作用，系统中有多少物体在相互作用，相互作用的形式如何，只要系统不受外力的作用（或某一方向上不受外力的作用），动量守恒定律都是适用的。

(6) 欧姆定律中学物理课本中的欧姆定律是通过实验得出的。公式为 $I=U/R$ 或 $U=IR$ 。教学时应注意：①“电流强度跟电压成正比”是对同一导体而言；“电流强度跟电阻成反比”是对不同导体说的。② I 、 U 、 R 是同一电路的 3 个参量。③ 闭合电路的欧姆定律的教学难点和关键是电动势的概念，并用实验得到电源电动势等于内、外电压之和。然后用欧

姆定律导出 $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ (也可以用能量转化和守恒定律推导)。④ 闭合电路

的欧姆定律公式可变换成多种形式，要明确它们的物理意义。⑤ 教师应

明确，普通物理学中的欧姆定律公式多数是 $R = U/I$ 或 $I = (\frac{1}{R})U$ ，式中

R 是比例恒量。若 R 不是恒，导体就不服从欧姆定律。但不论导体服从欧姆定律与否， $R=U/I$ 这个关系式都可以作为导体电阻的一般定义。中学物理课本不

把 $R=U/I$ 列入欧姆定律公式,是为了避免学生把欧姆定律公式跟电阻的定义式混淆。这样处理似乎欠妥。

(7) 楞次定律可以采用探究教学法,让学生通过实验得到的结论归纳出定律。教学时应注意:①楞次定律是确定感生电流方向的规律,同时也确定感生电动势的方向。如果是断路,通常我们可以把它想象为闭合电路。②感生电流的磁场只能“阻碍”原磁通的变化,不能“阻止”它的变化。否则就不会继续产生感生电流。“阻碍”或者说“反抗”原磁通的变化,实质上是使其他形式能量转化为电能的一种表现,符合能量守恒定律。③要使学生熟练掌握应用楞次定律判定感生电流方向的3个步骤。④明确右手定则可看作是楞次定律的特殊情况,并能根据具体情况选用定则或定律来判断感生电流的方向。

物理原理的教学

物理原理是物理学中具有普遍性的基本规律。教学时应尽可能通过实验得出在特殊情况下原理内容的表述法,再通过逻辑推理,推广为具有普遍性的结论。

(1) 阿基米德原理任意形状的物体浸在液体里受到的浮力怎样计算?从这个较普遍的浮力计算问题引入课题。通过实验可以得到计算浸在水里的物体受到的浮力的阿基米德原理。改用另一种液体重做实验,并把结论推广为适用于液体的阿基米德原理。演示物体在气体中受到的浮力的实验,把特殊情况下的阿基米德原理推广为适用于一切流体的具有普遍性的基本规律。

(2) 功的原理在复习使用机械“有时可以省力,有时可以少移动距离”的基础上提出使用机械可以省功吗?由此引入课题。最好先让学生根据功的两个必要的因素和机械的利益进行讨论和设想,然后通过实验证明利用某种机械不能省功。再分析使用其他机械也不能省功的例子,从而推广得出“使用任何机械都不省功”的结论。实际上,使用任何机械总是费功的,这在机械效率的教学中要进一步说明。

物理定理的教学

物理定理是通过物理定律作论据而证明具有正确性的结论。教学时应注意使学生明确定理的推导过程;利用定理解题的优点和方法。

(1) 动能定理把论据和结论提供给学生思考和讨论。视学生的水平由学生或师生共同推导出动能定理的公式,再作以下讨论:①动能定理是反映功和能关系的一种特殊形式,是以物体(不提物体系)作研究对象,不涉及其他形式的能。②明确功的正、负和动能增量的关系。③通过例题说明应用动能定理解题的优点和方法。

(2) 动量定理从日常生活和生产实际中，有关作用力跟时间的关系的有趣实例引入课题。启发学生或师生共同推导出动量定理的公式后，再对前面所举的实例进行解释，这将有助于学生对动量定理的理解。教学时还应注意：①动量增量和冲量均为矢量，应用动量定理时应特别注意两者方向之间的关系。②冲量中的力可以是恒力，也可以是变力的平均力。应用动量定理解题所以简便，就在于不要求平均加速度。所以新课的例题应以求平均力为主。

(3) 理想气体的状态方程气态方程可以由理想气体的 3 个基本定律中的 2 个推导出来，它是从特殊到一般，而方程在一定条件下又回到特殊规律。方程的推导过程要两次控制变量。可见这个课题的教学是培养学生科学方法的良机。

物理理论的教学

物理理论是解释某种物理现象的学说。是由实验（直接的和间接的）概括出来的关于现象本质的有系统的结论。中学物理中有关物理理论大都是关于物质结构和微粒运动的学说，如分子运动论、电子论、安培磁性起源假说、光子说、原子结构。这些理论对于中学生来说，抽象难懂，枯燥乏味。教学时应特别注意语言生动，恰当运用比喻，并尽可能采用实验或模拟实验和电化教育等教学手段，来提高学生的兴趣和理解能力。

实验

固体的压强

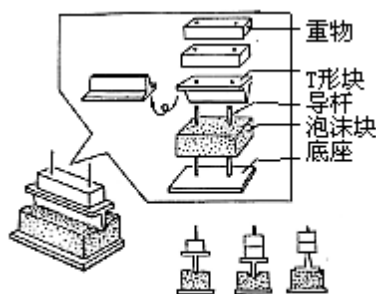


图 1

(1) 如图 1 所示，泡沫块穿过插在底板上的导杆。利用 T 形块可以改变受力面积，换用不同重物以模拟压力变化。

从泡沫块形变程度可演示压力产生效果（压强）跟受力面积和压力的关系。

(2) 如图 2 所示，取废食品罐，把开口处剪成利口。把罐放在沙箱的沙面上，压一块、两块砖（或其他重物）于罐上，观察罐底向下和向上放时下陷的程度，以演示压力产生的效果。演示时可准备两只相同的罐，并在罐侧面贴带有刻度的纸条以作对比。

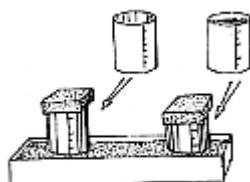


图 2

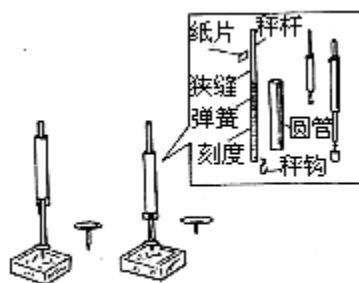


图 3

(3) 如图 3 所示，取两枚图钉，将其中一枚钉尖磨钝。用两用测力计测压力，先后把两枚图钉压入肥皂块，肥皂块所承受的压强是一定的，由实验可知当压力相同时，受力面积小的尖头图钉比受力面积大的钝头图钉产生的压强大；若要产生相同的压强，就需要在接触面积大的钝头图钉上施加较大的压力。

两用测力计结构如图 3 所示，这种测力计不但可拉、压两用，而且还有“记忆”功能。自制时，取一根木棒作秤杆，棒的一端开有狭缝，缝内插入一片厚度适当的纸片，棒上套有弹簧，把装有弹簧的圆棒插入圆管固定，将所受不同重力的砝码挂在秤钩上，在木棒上标上与砝码所受重力相应的刻度。用力拉测力计棒上的秤钩或用力压测力计棒的另一个端面时，都可使弹簧伸长，在弹簧伸长的同时，纸片便在槽内移动。撤走外力，弹簧就恢复原状，而纸片因摩擦而停留在原处，这样就可记录测力计达到的最大示数。

液体的压强

(1) 液体对压强的传递

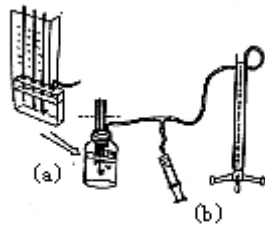


图 1

①图 1 所示为帕斯卡定律演示器。用注射器增加密闭的广口瓶里液体的压强，微小压强计能显示所加压强的大小，从瓶内 3 根玻璃管液面高度始终相同，说明密闭液体的各个方向传递的压强跟加在上面的压强相同。实验前应保证瓶塞、玻璃管和橡皮管等连接处封闭良好，并使微小压强计两液面相平。用扁平容器（图 1 (b)）替代传统广口瓶可提高演示效果，扁平容器可截取有机玻璃胶合而成。



图 2

②图 2 所示为帕斯卡球。演示时将活塞推至金属球处，旋去金属球，提起活塞，让筒的下部吸满水，再把金属球旋上。使球体朝上，推动活塞，水柱能向各个方向均匀喷射，说明“密闭液体能够把它受到的压强向各个方向传递”。若球体朝下演示，学生易误解为由于重力而射出。

帕斯卡球可自制。如图 3 (a) 所示，塑料瓶近底部的侧壁上用针刺小孔，把注射器针头插入瓶口软木塞即成。

图 3 (b) 所示装置中，当压气球向瓶内打气时，水连续不断从球的小孔中射出。演示了液体对压强的传递。

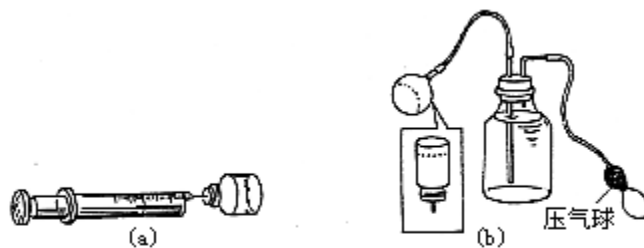


图 3

(2) 液压机模型

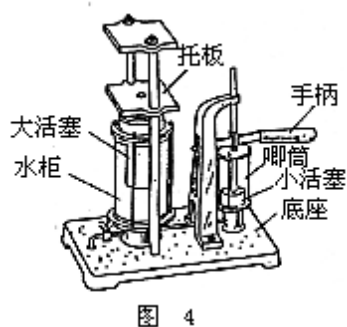


图 4

①图 4 所示是水压机模型。

底座上装有唧筒和水柜，它们的底部有管相通，并分别装有只能进水的单向阀。演示时，按动手柄，唧筒内活塞上、下移动，水一边从进水管吸入唧筒，一边被压入水柜。待水柜充满水后，继续按动手柄，加在唧筒液面上的压强通过水传递到大活塞，推动大活塞上移，举起重物。

图 5 所示为用两个直径不等的注射器连通起来做成的液压机演示器。

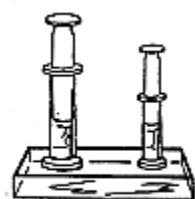


图 5

为了克服因注射器出口内径太小，液体流动时阻力太大而影响演示效果，可用铁球（直径约 2cm）击掉注射器底部（也可以磨掉），用有机玻璃做一个容器，把两注射器的底连通起来，注射器和容器间可用环氧树脂或玻璃胶封合粘结。

为了减少摩擦，可在注射器内壁涂上牙膏，来回推动活塞进行研磨，使用时再抹上稀润滑油（缝纫机油）。

两活塞顶端可胶上托盘以承担重物。

(3) 液体内部压强

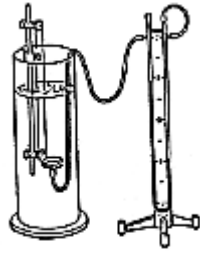


图 6

①图 6 所示是演示液体内部压强的实验装置。蒙有橡皮膜的金属盒可浸入液体任一深度，并在同一深度改变橡皮膜的方向。微小压强计液面差能显示液体内部的压强大小。

演示时应注意：金属盒上橡皮膜务必绷紧，且要平整，和橡皮管连接处不漏气。

容器里所盛的液体温度必须接近室温，否则因金属盒内气体受液体温度影响而增大实验误差。

上述实验装置可自制。U 形管可用内径为 3~4mm 的玻璃管弯制（图 7）。用小金属片将 U 形管固定在木支架上，支架面板上画上刻度。金属盒可用截去底的小塑料瓶代替。

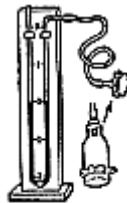


图 7



图 8

②如图 8 所示，在两端开口的长玻璃筒下端盖上圆片，将筒压入水中，因受水的向上压力，圆片不下落。如在筒内注水（可染色），开始时圆片并不落下；而当筒内水柱高度跟容器内水面一致时，圆片才落下。由此表明液体压强与深度有关而与液体体积无关。如改用酒精，当筒内酒精液面与水面相平时，圆片不落下；只有酒精液面高于水面一定高度时，圆片才落下。由此表明液体压强不仅与深度有关，还与液体密度有关。

③如图 9 所示，在小塑料瓶的瓶壁上用薄刀片纵向切几条刀口，瓶塞上插一根玻璃管，管上连一根橡皮管，管的另一端接一漏斗。演示时先使漏斗口与瓶口平齐，并注满水，瓶的切口处因塑料弹性并不漏水。逐渐提高漏斗位置，当水柱高度超过某一值时，刀口张开，水就喷射出来，模拟了著名的帕斯卡裂桶实验。

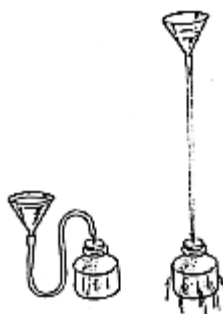


图 9

大气压

(1) 大气有质量

①用抽气机抽出瓶内的空气，然后用夹子夹紧橡皮管，把瓶放在天平上，加砝码使天平平衡。松开夹子，让外面的空气进入瓶内，天平就失去平衡。增加砝码，天平恢复平衡，这增加的砝码就等于瓶中空气的质量。因空气是无色透明的，演示过程中瓶内有无空气，学生无法感受。如图 1 (a) 所示，在瓶内放些纸屑，且喷入烟雾，抽气时，能观察到烟雾被抽去；当空气进入时，纸屑飞起来，

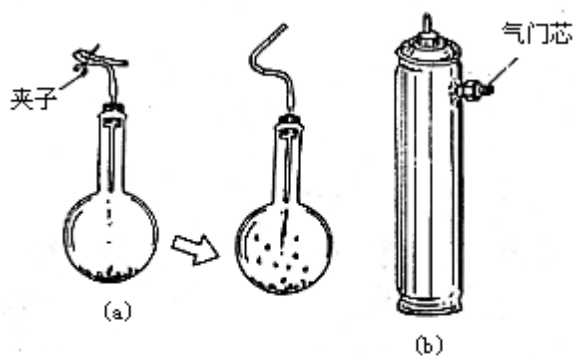


图 1

学生便清晰感到空气的进、出。这样把瓶内有、无空气在学生脑中形成强烈对比。还可在管口装上哨子，演示时学生不但看到空气冲入时纸屑飞舞的情景，而且还可听到空气进入时发出的哨声。

②如图 1 (b) 所示，喷雾空罐侧面焊一个自行车气门芯。演示时往罐内打气，比较充气前、后罐的质量，可演示空气有质量。一般容积为 100ml 空罐，用自行车打气筒打 10 余次，质量可增加 5~8 克。

(2) 证明大气压存在的几则演示

①图 2 (a) 所示为马德堡半球，它是一对由铸铁制成的空心圆盘，其中一个圆盘带有可启闭的气嘴。

演示时，先把两圆盘的对口处擦净，并抹上一薄层油脂，随后把两圆盘合在一起，要用力压一下并稍微转动一下再抽气。

半球的对口处有污垢时，实验不易成功。用可挥发性液体（如汽油）把对口洗净。拉半球时，不要扭转用力。如很容易拉开，大多是气嘴和对口处漏气。为了保证演示时安全，可用长约半米的绳子把两个半球的把手连起来，以防半球脱开时发生意外。

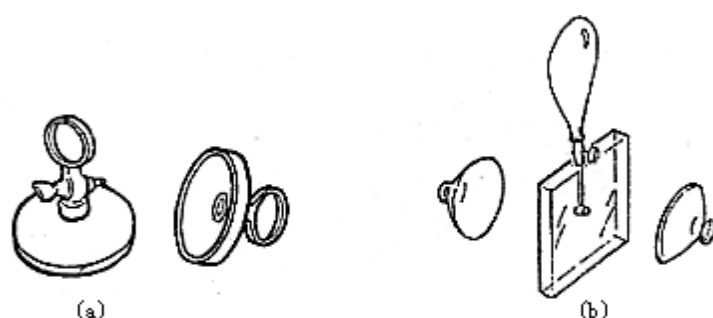


图 2

如图 2 (b) 所示，三通管用有机玻璃制成，板面两端的孔和板的一侧小孔相通，小孔内插一根装有阀门的塑料管，管端扎一个小气球，两个塑料皮碗作半球。实验时把两半球分别贴在板的两平面上，半球的中心对准板上的孔。打开阀门，用手轻压半球，气球鼓了起来，“显示”半球内空气的去路：闭合阀门后用力拉半球，很难使球与有机玻璃分开，显示了大气压的作用。打开阀门，气球变瘪，“显示”空气又进入半球，半球落下。这样把半球内空气的来龙去脉形象地显示出来。

图 3 所示的几种装置可替代马德堡半球进行演示。图 3 (a) 是用注射器，演示时把活塞推到底端用手指压紧注射口，在活塞上吊重物，重物不会掉下；图 3 (b) 是用两只吸盘式的衣钩，把它们“吸盘”对齐，用力压紧，然后提起，在钩下端挂重物，两个衣钩不会分开；图 3 (c) 是用装有木柄的橡皮吸盘（厨房洗菜池用的吸水器），先将凳面（比较光滑）弄湿，把橡皮吸盘直立在凳面上，握住木柄往下压，压出吸盘内的空气，提起木柄，凳子被一起提起。

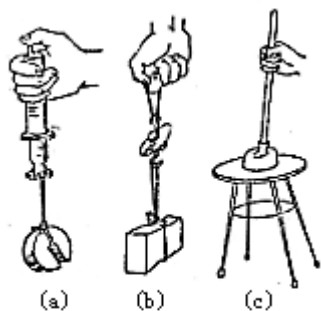


图 3

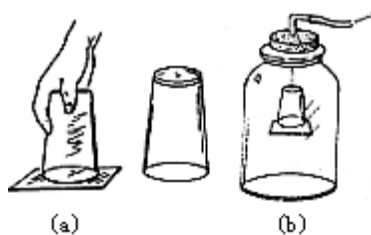


图 4

②如图 4 (a) 所示，当水杯侧过来或倒置时纸片都不会落下，水不会流出，由此证明大气压的存在。如在杯子底部开个小孔（采用塑料杯加工比较方便），演示时，先用手指堵住小孔，实验结果与前述相同，但当放开堵住小孔的手指时，纸片随即落下，进一步证实大气压的存在。图 4 (b) 是在大口瓶内做上述实验，抽走瓶内空气，纸片会落下，从“反面”说明大气压的存在。

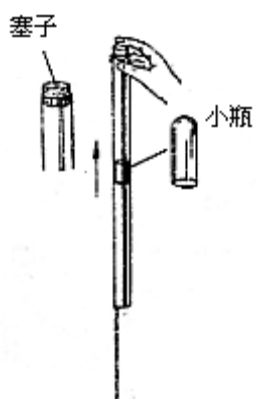


图 5

③如图 5 所示，取一根直径约 1.5cm 的长玻璃管，上端用塞子封闭，另找一个直径稍小于玻璃管的小瓶（以小瓶能在管内自由移动为宜）。实验时先在管内灌满水，将小瓶（瓶口朝下）插入玻璃管，管内水徐徐流下，小瓶不但不落下，反而在大气压作用下渐渐上升，一直到管的顶部为止。

为了证实小瓶确是因大气压的作用而上升的，可在玻璃管的木塞上开一个小孔。开始实验时，用手指堵住小孔，重复上述实验，小瓶徐徐上升；当小瓶升到一定高度时，放开堵孔手指，小瓶立即落下，这时因长管上端也有空气。

(3) 大气压的测定

①托里拆利实验（图 6）是验证和测量大气压的一个重要实验，由于实验中使用水银量较多，要注意安全。往托里拆利管内灌水银时，可用一根长丝线穿一枚大号缝衣针放入管底，小漏斗插入管口，然后一边灌水银（也可用注射器灌注），一边提着线将针拉起来，这样管内的残留空气将被排净（图 6（a））。



图 3

水银注满后，戴上乳胶指套，以右手食指抵住管口（因管内水银是灌满的，此时会有一些水银被排出，注意预先放好盛器），左手反握管子的闭端附近，小心地将管子竖直倒立在已盛有适量水银的水银槽内，并使管口连同食指一齐浸没在水银里（图 6（b））。在水银面下放开右手的食指，可观察到管内水银柱先是下降，然后稳定在某一高度。用演示米尺的零刻度线对准槽内水银面，测量管内水银柱的竖直高度 h （约 76cm）。当玻璃管倾斜时，水银柱的长度虽然增大，但它的竖直高度不变（图 6（c））。

水银蒸汽对人体非常有害，操作时切不可使水银溅落在教室里。可放在大的搪瓷盘里做实验，以盛接溅落的水银。在实验时，一定要带上乳胶手套（或指套），不能用手指直接接触及水银。若水银已溅落在地而无法收集时，可撒些硫磺粉末并打开窗户通风。

水银的密度很大，管子又长达 1m，故要选择管壁较厚的管。当管内灌满水银后，必须注意两手握管的位置，严防管子折断。



图 5

②图 7 装置可方便地演示托里拆利实验，并可模拟大气压变化时水银柱高度的变化。把长约 1m、两端开口的玻璃管，上端用橡皮管接一带有活栓的玻璃导管，下端插入厚壁玻璃瓶内的水银里。瓶塞上另插一 L 形短玻璃管，通过此管可向瓶内打气加压或抽气减压。演示时先打开玻璃管上的活栓，用打气筒向瓶内打气，这时瓶内水银沿玻璃管上升，升到活栓口时停止打气。要小心操作，以免水银从管口喷出。关闭活栓，并拿掉打气筒，这时管内水银面落下，并稳定在一定高度，用刻度尺量出瓶内水银面到管内水银面的高度，即为大气压的量值。向瓶内打气或抽气，可模拟大气压变化。

流体的压强

(1) 流体的流速和压强的关系

①如图 1 所示，向一张纸面上吹气，纸将向吹气一面飘起。向两张纸面中间吹气，两纸面相互靠拢。实验表明，气流速度增大时压强减小。

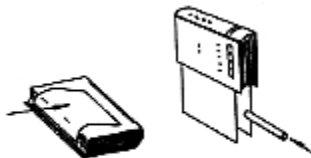


图 1

②如图 2 所示，一乒乓球放在玻璃漏斗内的管口附近，从管口向漏斗吹气，由于漏斗颈口流速增大，压强减小，乒乓球被压向漏斗，不会落下。

③如图 3 所示，瓶内装大半瓶水，用压气球（或气筒）向瓶内打气（为了防止瓶内压力增大而使瓶塞冲出，可用铁丝扎紧瓶塞），水即从尖口喷出。这时把一个乒乓球轻投在喷出的水流上，小球几乎停留在水流的上端翻动而不落下。实

验说明，水流中间流速大压强小，当球偏离中心位置时，压强差使球向中间靠拢并稳定在水流上端。

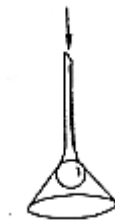


图 2



图 3

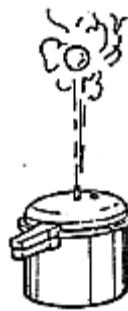


图 4

相 互 作 用	守恒量												
	能量	动量	角动量	电荷 Q	电子 轻子数 L_e	μ 子 轻 子	重 子 数 B	同 位 旋 I	同 位 旋 分 量 I_z	奇 异 数 S	宇 称 P	电 荷 共 轭 C	时 间 反 演 T

						数								
						L_v								
强	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
电磁	√	√	√	√	√	√	√	×	√	√	√	√	√	√
弱	√	√	√	√	√	√	√	×	×	×	×	×	×	√

如图 4 所示，在高压锅内放入 $1/4 \sim 1/3$ 水，将水烧开直到蒸汽急速喷出时停止加热，把一个乒乓球轻投在喷出的蒸汽流上，小球在蒸汽流上端悬浮翻滚。

④如图 5 所示，把两个粗细不同的 T 形管，用橡皮塞连接，当水从粗管向细管流动时，从竖管的水位，可显示压强的大小：粗管的流速小，压强大；细管的流速大，压强小。

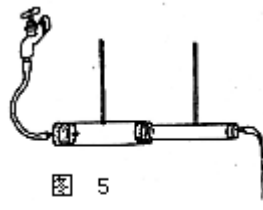


图 5

(2) 演示喷雾器的主要构造和它的工作原理如图 6 所示，用力向水平放置的尖嘴玻璃管吹气，因尖口处流速增大而形成低压区，水被压到竖直插在杯里的玻璃管管口，并被气流冲散成雾状。

(3) 水流抽水机

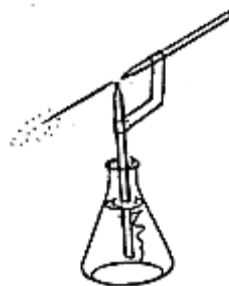


图 6

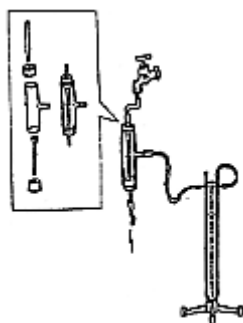


图 7

如图 7 所示，三通管上、下两端的软木塞均插有玻璃管，上端的玻璃管拉成尖嘴状，下端的玻璃管成喇叭口，尖嘴正对喇叭口，两管间形成的细窄部分正好位于抽气管处。抽气管通过橡皮管与微小压强计相连。演示时，从上端管口灌水（接自来水或抬高的水桶），水即从尖口流入喇叭口，并从下面流出，压强计出现压强差，说明水经过细窄部分时流速大大增加，压强变小。

(4) 机翼升力

如图 8 所示，用薄木片制作两块翼肋，并以吹塑纸作蒙皮做成机翼。在其重心的轴线上穿两根直径约 0.15mm 的漆包线，漆包线两端固定在支架上。电风扇位于机翼的前方，当风扇转动时，由于空气流动，机翼获得升力。

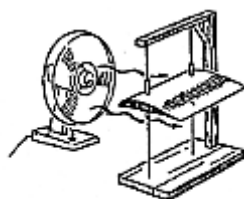


图 8

浮力产生原因

(1) 如图 1 (a) 所示，容器隔成上、下两层，隔板中间开有圆孔，另插长、短细玻璃管各一根。演示时在隔板上放蜡块，蜡块盖住隔层中间的圆孔，用手指堵住长管管口，同时缓缓地向容器内注水，蜡块被浸没后仍不浮起，这是因为蜡块下端没有水，没受到向上的压力，不产生浮力（图 1 (b)）。堵住管口的手指放开后，容器上层的水通过短管进入下层，当水升到蜡块下端面时，蜡块即刻浮起（图 1 (c)）。

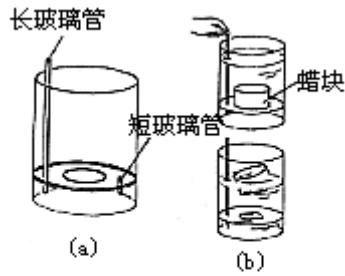


图 1

(2) 如图 2 所示，将可乐瓶剪去一截成一漏斗状容器，让一个乒乓球把瓶口堵住。向瓶内倒水，浸在水中的乒乓球虽然排开一定量的水，但并不浮起。用瓶盖（可用手）将瓶口堵住，让流出的水聚集在球的底部，这时球获得产生浮力的条件，即向上浮起。

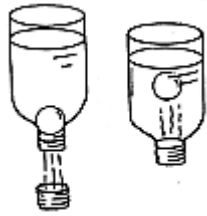


图 2

阿基米德原理

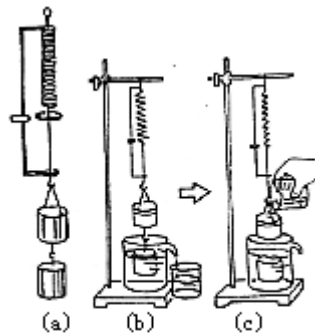


图 1

(1) 图 1 (a) 所示为阿基米德原理演示器，它实质上是一个附有圆形小桶和圆柱体的专用测力计（小桶的容积与圆柱体体积相同）。演示时将圆柱体浸入溢流杯中，直到浸没。此时，水从溢流杯流入烧杯，测力计弹簧缩短，圆形指标上移，它与活动指标之间形成差距（图 1 (b)），该差距指示着圆柱体所受水的浮力大小。

将烧杯中的水全部倒入小桶，小桶内的水正好被灌满，这表明被圆柱体排开的水的体积等于圆柱体的体积。同时测力计的弹簧又伸长到原来位置，圆形指标

又与活动指标对齐（图 1（c））。表明圆柱体浸入水中所受浮力的大小等于它所排开水所受的重力。如果换用其他液体，如盐水、酒精，可得相同结果。

由此可以得出这样一个结论：浮力的大小等于所排开的液体所受的重力。这就是著名的阿基米德原理。

（2）取一只小塑料袋，袋内装满水，用细线把袋口扎紧（要求袋内不留空气），再用弹簧秤将它吊起（图 2），称出它所受的重力。随后将这袋水逐渐浸入水中，弹簧秤读数逐渐变小。证明水袋受到水对它作用的浮力，方向向上，浮力的大小等于弹簧秤减小了的读数，而且浮力的大小还随排开水的体积的增大而增加。当水袋全部浸没时，弹簧秤读数恰好为零，说明浮力与排开的水所受的重力相等。

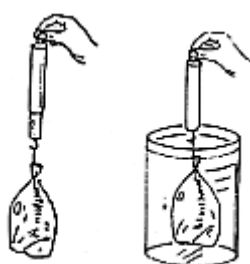


图 2

（3）如图 3 所示，杠杆一端挂有硬卡纸做的体积相同的杯状圆桶和封闭的空心筒。演示时将空心纸筒放入一较大容器内，调节重物在杠杆上的位置，使杠杆平衡。将已准备的二氧化碳气体注入容器，空心纸筒浮起，杠杆失去平衡。然后再把二氧化碳气体注入上面的纸杯，注满时，杠杆又恢复平衡。演示说明，阿基米德原理不仅适用液体，也完全适用气体。

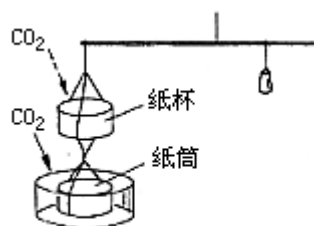


图 3

因为二氧化碳气体密度和空气密度相差不多，所以纸筒的体积要大些（如直径 10cm、高 10cm），实验效果才比较明显。为了检验二氧化碳是否已充满容器或纸杯，可用点燃的蚊香放在容器或纸杯的边沿，若蚊香熄灭，说明已充满二氧化碳气体。二氧化碳可用下述简单方法制取：在杯内放入小苏打（ NaHCO_3 ）和醋（含有乙酸 CH_3COOH 成分）即可。注意，在倾倒杯中二氧化碳气体时，不要将杯内液体倒出。为了实验需要，可多制几杯。

浮沉条件

(1) 如图 1 所示，把鸡蛋放在盐水中，使蛋有一小部分浮在水面，将清水慢慢注入盛有盐水的筒内，并用棒轻轻搅拌，鸡蛋会逐渐下沉、悬浮、沉到底部。上述现象是注入清水，盐水密度逐渐变小而致。演示所用的鸡蛋应选用新鲜的，因变质的鸡蛋的密度可能小于 1，即使在清水中也不会下沉。盐水的浓度要根据鸡蛋的新鲜程度而定，应使鸡蛋放入盐水中，只有很小一部分露出水面，否则注入清水后不易下沉。

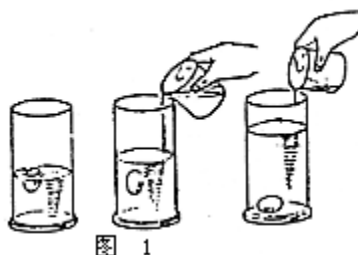


图 1

鸡蛋也可用蜡制小球（内含一小重物）替代，调节重物大小，使其密度略大于 1 即可。这样制成的蜡球比鸡蛋易于保存。

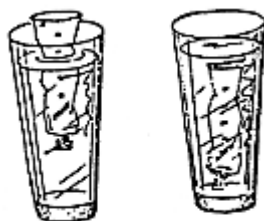


图 2

(2) 如图 2 所示，把牙膏管的尾端剪掉，管口用盖子旋紧，张开尾部将牙膏管扩张成空筒状。将牙膏管放入水中，它浮在水面上；将它稍为捏瘪一些，它沉入水中的部分就多一些；再捏瘪一些，再下沉一些；捏到一定程度，它就沉入水底。

(3) 潜水艇模型

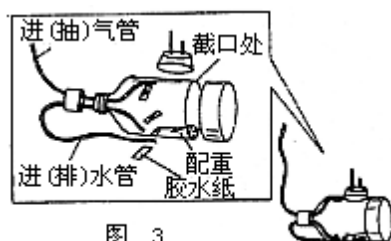


图 3

如图 3 所示，取一塑料瓶，将其底部切开，瓶内粘放适量橡皮泥，配重后当作船底。瓶塞插两根皮管，短管瓶内一端用胶固定在船的底部，瓶外一端用胶水

纸固定在瓶底部，作进（排）水管。长管瓶内一端用胶固定在船的顶部，另一端作气口。最后将瓶的截口和底的截口放在加热的铁板上，使两截口熔化，立即将两截口对齐紧压封闭。另取一塑料小瓶，剪成合适的形状加热后压到瓶的上部，这样，整个装置像潜水艇的形状。

实验前先在模型内滴几滴酚酞溶液，往水槽中加少量的碱溶液。将模型放进槽内水中，对气口抽气，水进入模型内，进入的水马上变红色，模型渐渐浸入水里；停止抽气，模型可以停留在水下的任意位置。由此演示了潜艇在水下的停留和下沉状况。再从气口打气，模型内红色的水逐渐从下面管被压出，模型渐渐上浮直至全部浮出水面，演示了潜艇的上浮状况。

(4) 浮沉子

如图 4 (a) 所示，瓶子里装大半瓶水，另在一个一端封闭的小玻璃管里装进适量的水，用手指按住管口倒放入瓶内水中，然后松手，小玻璃管刚能浮出水面，用橡皮膜将瓶口绷紧扎牢。用手指压橡皮膜，小玻璃管下沉一点；松开手指，小玻璃管上浮；压力适度，小玻璃管可悬浮在水中。为看清管内水面升降情况，可在小玻璃管内水面处放一颗有色的蜡制小圆球作水面指示。为使浮沉子比较灵敏，小玻璃管倒置在水中时，管底应刚好和筒内水面相平。

小玻璃管浮在水面时，它所受到的浮力等于管浸入水里的部分所排开的水的重力与管内气体所排开水体的重力之和。手指压橡皮膜，瓶内气体被压缩，水面上压缩空气加到密闭液体上的压强由水传递，将水压入玻璃管内，管内的气体被压缩，体积变小，因而管内空气所排开水的体积变小，管所受的浮力变小，当浮力小于玻璃管所受的重力时，玻璃管就下沉一点。放松手指，加到密闭水面上的压强减小，管内的压缩空气将管里的水压出一点，管内气体体积增大，压强减小，因而它所排开的水量增大，管所受浮力也增大，浮力大于玻璃管受到的重力，玻璃管就上浮一点。

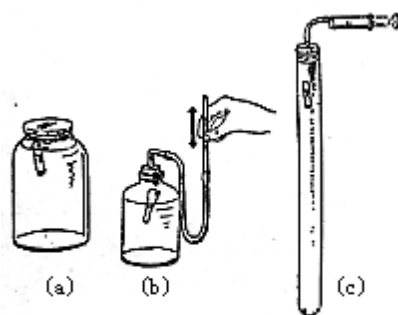


图 4

如图 4 (b) 所示，将插有玻璃管的瓶塞代替橡皮膜，再在玻璃管上接一根长胶皮管，管内充满水。若将管口升高或下降，浮沉子会下沉或上浮。置管口于适当高度，浮沉子可悬浮在某一位置。

如图 4 (c) 所示, 利用旧牛顿管代替玻璃瓶, 用注射器改变液面气体压强, 以此控制“浮沉子”的沉浮。

简单机械

(1) 杠杆

图 1 所示为自制演示杠杆。杆长取 1m, 杆上涂有红、白相间的有色线段作为刻度。为了演示作用力方向和杠杆成角度, 可用轻质吹塑纸做量角器, 用橡皮泥固定在杠杆上任一位置。

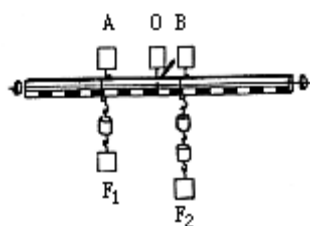


图 1 2

实验时可边讲边演示, 且在讲解演示过程中, 在杠杆上安插标有 O、A、B 等符号的轻质小纸旗, 在钩码下悬挂标有 F_1 、 F_2 等符号的小纸旗。这样比较形象直观, 有助于学生对支点、力、力的作用点和力臂等概念的理解。

演示时动力和阻力可根据教学要求任意设定, 各类杠杆的省力、费力演示方案可自行设计选择。

(2) 图 2 所示为杠杆原理多用轮, 它不仅能演示杠杆、滑轮、轮轴等简单机械的各自特点, 还能反映它们之间的内在联系。多用轮由杠杆、轴、轮 (直径约 20cm) 和框等组成, 通过不同组合可作下列演示。

① 杠杆原理演示:

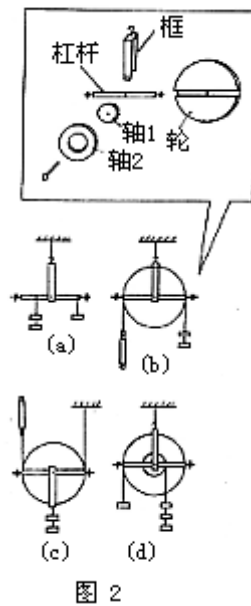


图 2

把多用轮按图 2 (a) 组合，改变力与力臂，可演示各类杠杆作用。

②定滑轮原理演示：

把多用轮按图 2 (b) 组合，使杠杆在水平位置，可以明显显示定滑轮是一个等臂杠杆。

滑轮转动时，任何时刻总可以认为滑轮的一条水平直径起到杠杆的作用，据此可以说明定滑轮是等臂杠杆的变形。

③动滑轮原理的演示：

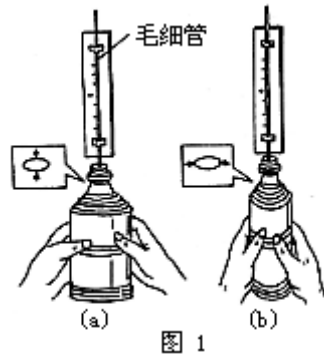
把多用轮按图 2 (c) 组合，使杠杆在水平位置，可以演示动滑轮是一个不等臂杠杆，据此可以说明动滑轮能省一半力。

④轮轴原理的演示：

把多用轮按图 2 (d) 组合，使杠杆在水平位置，可以演示由轮和轴组成的轮轴也是一种不等臂杠杆的变形。在轴上再套上圆环，增大轴半径，可演示不同轮半径和轴半径时的省力情况。

物体的形变

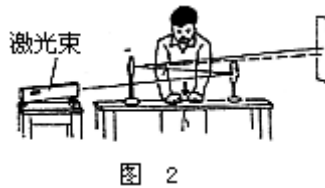
(1) 玻璃瓶的形变



如图 1 所示，在椭圆形的大墨水瓶瓶塞中插一根内径约 1~1.5mm 毛细管，瓶内装满染色水，管后衬白色纸屏。演示时，在瓶的截面短轴方向（图 1 (a) 所示方向）施加压力，水柱上升，说明瓶体微小形变使容积减小；撤去压力，水柱下降到原位。在瓶的长轴方向（图 1 (b) 所示方向）施加压力，水柱下降，说明瓶的容积变大；撤去压力，水柱升到原处。

演示长轴方向施力时水柱下降，可纠正学生错误认为这是瓶内水柱受热膨胀所致。玻璃管的长短、内径的大小要经实验选择，以液柱变化明显为宜。

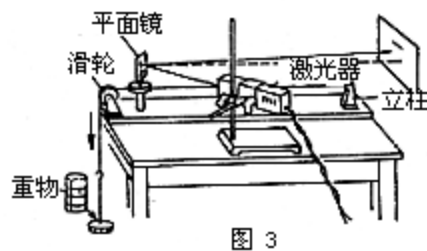
(2) 桌面的形变



如图 2 所示，用激光束照在桌面平面镜上，经两次反射后照在墙上。

演示时，用力压桌面，墙上的光点会发生明显偏移，说明桌面受外力而产生形变。若无激光器可用幻灯代替，用一块开有狭缝的黑纸片插在透镜前，利用墙上的狭光带偏移演示桌面的形变。

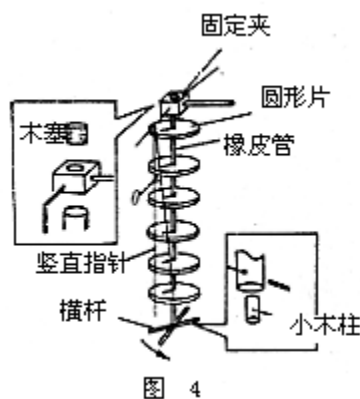
(3) 钢丝的形变



如图 3 所示，在长约 1m 的底板上，一端固定一个定滑轮，另一端装一立柱。在靠近滑轮一端处有一个带有小轮并可绕垂直轴转动的小平面镜。把钢丝的一端

固定在立柱上，另一端在小轮上环绕一周后跨过滑轮挂上重物。在平面镜前置一激光器（也可用幻灯或手电筒作光源，但需将小平面镜用墨纸掩住，只留一条垂直狭缝作反射用），让光线射向平面镜并反射投影至屏上或墙上。这样，钢丝受力伸长，带动平面镜转动，反射光线在屏上就有一较大位移。

(4) 扭转形变模拟演示器



如图 4 所示，在一根橡皮管上，固定若干个圆形泡沫塑料片，用以模拟金属丝上横截面，圆形片上画上表示半径的直线。橡皮管的末端塞上一段小木柱。一根横杆穿过橡皮管末端作扭转用。橡皮管的上端用木塞装在固定夹上，夹上还装有一根竖直指针。

演示时，用力扭横杆，橡皮管发生扭转，圆形片转过一定的角度，角度的大小可由圆形片上的半径线与竖直指针间的夹角 θ 看出。撤去外力，橡皮管恢复原状。

摩擦

(1) 图 1 所示为显示摩擦力方向和大小的演示器。在长方形木块上，各装一块长方形薄板作为木块的模拟接触层，薄板通过短橡皮筋与木块连在一起。要求木块和薄板间摩擦力很小（这可以通过它们之间的小轮或贴上摩擦力很小的聚四氟乙烯薄片等方法达到）。为了增大接触面的摩擦，上薄板的顶面和下薄板的底部都贴上表面粗糙的砂布。上、下层侧面各装一枚指针，木块上标有刻度，以指示上、下层滑动的方向和大小。

利用上述装置，可作多种演示，举例如下：

①如图 1 (a) 所示，把摩擦块放在桌面上，用测力计钩住摩擦块一端小钩。在未施力时，接触层上指针不动，当向右施力而木块发生滑动时，从指针指示说明木块受到桌面对它的静摩擦力和施力方向相反；随着测力计拉力加大，指针偏移增加，说明静摩擦力随拉力的增大而增加。

②如图 1 (b) 所示，把 A、B 两块摩擦块重叠在一起，放在桌面上，当向右拉 A 时，从指针指示说明桌面对 A 的静摩擦力方向向左；A、B 之间的接触层存在摩擦力。如果向右拉 B (图 1 (c))，从指针指示可分析各木块所受摩擦力的方向。

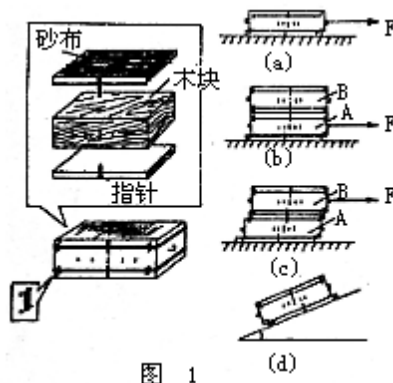


图 1

③如图 1 (d) 所示，把摩擦块放在斜面上，从指针指示可知斜面对它的静摩擦力方向为沿斜面向上。当斜面角度增加时，从指针指示可知静摩擦力随着增加。

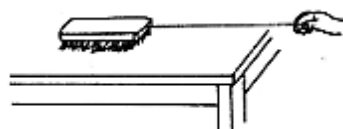


图 1

如图 2 所示，用长毛板刷的毛面模拟接触层，从毛的形变情况可判断摩擦力的方向，若效果不明显，可在刷上放一重物。

(2) 图 3 所示为一种摩擦力描绘器，底座上有轨道，装有两用测力计的木块可在轨道上滑动，秤钩处装一笔架。笔用固定在笔架上的细橡皮筋卡住。细绳系住秤钩绕过上、下两滑轮。当用力拉绳，屏上描绘出一条如图所示的曲线。

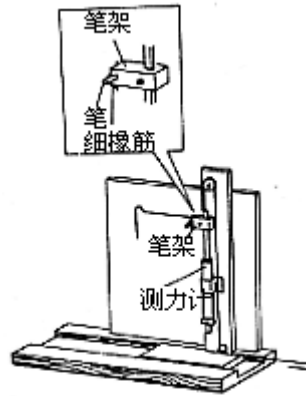


图 3

曲线的竖线部分表示静摩擦力随外力的增加而增大，曲线的最高点即为最大静摩擦力，曲线的水平部分即为滑动摩擦力。从图线可清楚看出静摩擦力、最大静摩擦力和滑动摩擦力间的关系。

若在木块上放不同的重物，在底座的轨道上铺粗糙程度不同的材料，还可描绘出不同压力、不同摩擦系数下的摩擦曲线。

(3) 滚动摩擦和滑动摩擦比较①图 4 所示为一木圆柱体滚子，其轴心处装有铁丝钩环，圆柱体一个端面上钻有小孔。

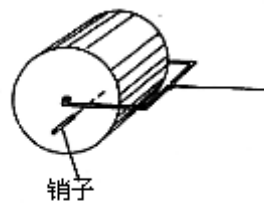


图 4

演示滑动摩擦时，把销子插进圆柱体小孔内，然后用测力计拉着钩环使圆柱体在桌面上作匀速运动，此时测力计的示数即为滑动摩擦力。拔出销子，仍用测力计拉滚子作匀速运动，此时测力计的示数便是滚动摩擦力。演示说明，滚动摩擦力比滑动摩擦力小得多。

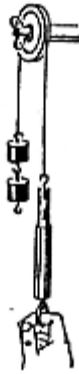


图 5

②如图 5 所示，选择直径 5cm 的大滑轮，滑轮可绕轴转动，但用螺母锁紧时滑轮可止动。

演示时，细绳一端挂砝码，另一端跨过滑轮后接测力计。

先放松滑轮，用测力计匀速拉砝码，滑轮随着转动，这时测力计示数和砝码的重力基本相同。

然后锁紧滑轮，匀速拉动测力计时，测力计示数比砝码的重力大，从而说明滚动摩擦力比滑动摩擦力小得多。

力的合成和分解

(1) 力的合成——平行四边形法则

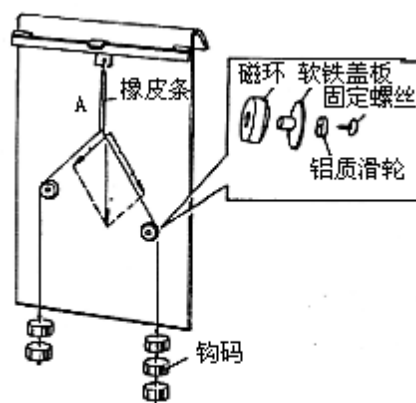


图 1

①图 1 所示的磁性力盘，可用来验证平行四边形法则。板上的滑轮可利用磁性定位在铁皮黑板上。磁定位滑轮由磁环、软铁盖板、铝质滑轮和固定螺丝组成。演示时按要求在板上把滑轮和橡皮条定位，先用两组钩码 F_1 、 F_2 把橡皮条下端拉

伸到 A 处，再用一组钩码 F 也使橡皮条拉伸到 A 处，两次实验橡皮条有同样的伸长，显示了合力和两个分力是等效的。再用粉笔在板上作力的图示，可以看出 F 是以 F_1 与 F_2 为邻边的平行四边形对角线。

改变分力大小和夹角，可得到同样结论，从而归纳出平行四边形法则。

本装置也可演示合力大小与分力间夹角的关系。以钩码代替测力计，可提高课堂演示的直观性。如果合力凑不成整数，也可改用可见度大、标度清晰的演示测力计。

②图 2 所示模型可演示合力随两分力间夹角改变而改变，以加深对平行四边形法则的认识。用木条制成平行四边形，C、D 两点用铆钉铆住作转轴，B 点用一蝶形螺丝夹住，A 点处用 5mm 的空心铆钉铆住。旋紧蝶形螺丝，就可固定平行四边形的形状。

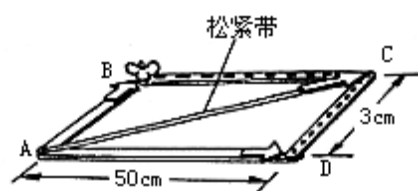


图 2

把一根比 AD 间距离稍长的松紧带，一端固定在 C 端，另一端穿过铆孔后固定在 D 点，AB 和 AD 边上画两个带箭头的线段表示两分力，松紧带 AC 就可作为这两个分力的合力。在 C 端画上一箭头，以代表合力方向。BC 与 DC 边可用颜料画上虚线，以显示完整的平行四边形。

调节蝶形螺丝，改变 AB、AD 间的夹角，可看到合力的大小变化的情况，并可粗略地显示出它们间的数量关系。由于合力由松紧带显示，当合力较小时（如 AB、AD 边反向），其多余部分可通过 A 孔收缩在 AD 背后。图示尺寸供自制时参考。

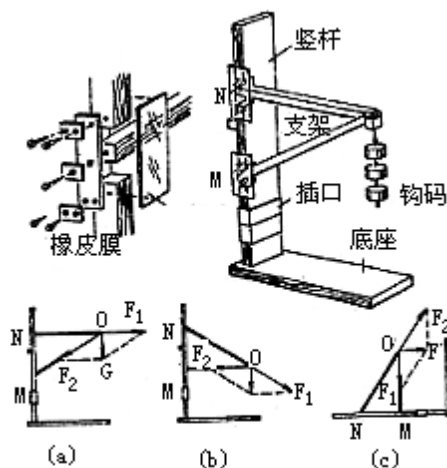


图 3

(2) 三角形支架的受力分解如图 3 所示，支架做成插入式，插口用铁皮制成，竖杆上开有两个缺口，两根杆分别和缺口上的橡皮膜固定，缺口处贴上透明有机玻璃。支架受力后，从橡皮膜的形变可显示出杆的受力情况。演示时可如图 3 (a) 所示把支架固定，在 O 点挂上钩码，这时 N 处的橡皮膜被拉伸，M 处的橡皮膜被压缩。横杆和斜杆的受力明显可见，即砝码对支架产生了两个效果：沿 NO 方向拉横杆（力 F_1 ），沿 OM 方向压斜杆（力 F_2 ）。也可如图 3 (b) 所示把木条插入插口，这时在 O 点挂上砝码后，橡皮膜显示横杆受压力，斜杆受拉力。如图 3 (c) 所示把演示器底座竖直放置，可模拟演示电线杆等装置的受力情况。

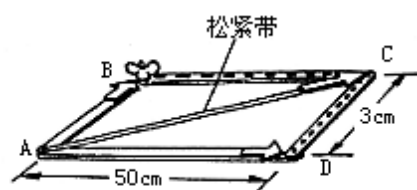


图 2

图 4 所示的实验装置可用直径 2~3mm 的铁丝做成。O、M、N 三个端点弯成小圈，在 M、N 两个小圈内分别穿一根橡皮圈，将橡皮圈对折后套进支架直杆里。在 O 点挂上适量钩码后，橡皮圈发生形变，从而形象地显示物体的受力情况，并可进行力的分解。

如图 5 所示，一适当粗细的铝管或竹管套在水平轴上，管内放一段弹簧，将横杆 AB 插进管内抵着弹簧，并在杆上作好刻度。绳子 BC 的中间连一段弹簧。将钩码挂在横杆 B 端，管内的弹簧被压缩，横杆上的刻度减小，BC 上弹簧被拉长。同前面一样可进行力的分解演示。图 6 装置也可供自制时参考。

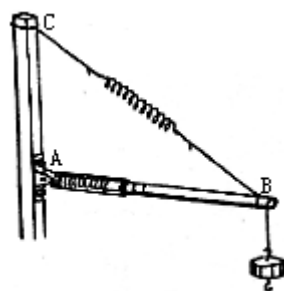


图 5

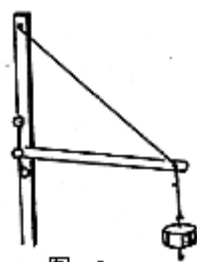


图 6

(3) 重力在斜面上的分解

①如图 7 所示，在竖直板上装有倾角可变的斜面，滑轮 A 和滑轮 B 分别可沿垂直槽上下移动和水平槽左右移动，并可固定在槽内的任一位置（旋紧板后螺丝）。小车的车顶和车后分别装上挂钩，以使用绳拉住，且使正交的两根细绳恰好穿过车子的重心。作为重物的桶内装入适量的铁砂。

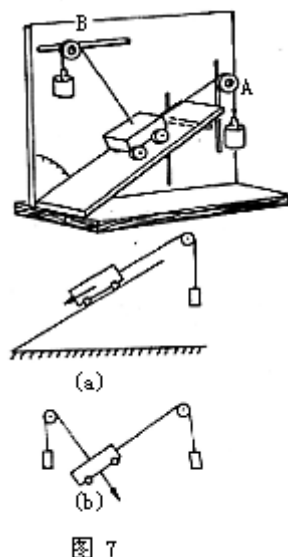


图 7

演示步骤如下：如图 7 (a) 所示，调节斜面为某一倾角，并调节滑轮 B 在槽内的位置，使细绳沿着斜面方向；增减桶内的铁砂，使小车静止在斜面上。此时，桶和铁砂所受的重力恰好等于小车所受重力沿斜面方向的分力 F_1 。调节滑轮 A 在槽内的位置，使悬挂小车细绳垂直于斜面；增减桶内铁砂，使小车不依靠斜面的支承仍静止在原来的位置上。此时，桶和铁砂所受的重力恰好等于小车所受重力垂直斜面方向的一个分力 F_2 。这时移去斜面，小车仍留在原位静止不动（图 7 (b)）。

演示说明，斜面上物体所受的重力可分解为沿斜面方向和垂直斜面方向的两个分力。其大小分别等于桶与桶内铁砂所受的重力沿斜面或垂直斜面方向的拉力的大小，其方向就是这两个拉力的反方向。用量角器测出斜面的倾角，可加以验证。

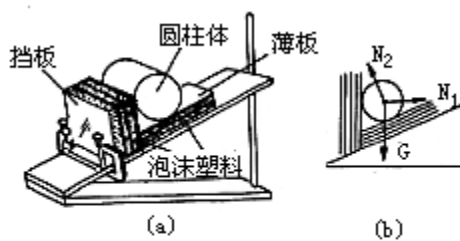


图 8

②如图 8 (a) 所示，在倾角可以改变的斜面上铺放两块软泡沫塑料（可用厚约 5mm 的泡沫塑料多层叠放），在泡沫塑料面上垫上光滑的薄板。演示时放上足够重的圆柱体，两块泡沫塑料都发生形变，从形变的大小可间接反映圆柱体在斜面上所受重力的两个分力的大小。如果把原来垂直于斜面的泡沫塑料改为在竖直方向固定，仍放上圆柱体，这时可看到如图 8 (b) 所示的现象：竖直挡板对圆柱体的弹力变为水平方向的 N_1 ，斜面对圆柱体的弹力为 N_2 。显然此时重力的两个分力与图 (a) 所示情况是不同的。这样可使学生认识到斜面上的物体所受重力的分解并非一成不变，而应根据具体情况而定。为使演示清晰，两块泡沫塑料的边缘可涂上鲜明的颜色，并画上规则的小方格，圆柱体可用装满砂子的圆罐代替。

力的平衡

(1) 共点力作用下物体的平衡

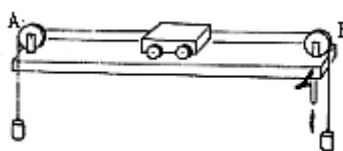


图 1

①如图 1 所示，木板两端装有滑轮 A 和滑轮 B，其中 B 可升高。演示时，先使两滑轮等高，小车在等量钩码作用下保持平衡。改变其中一个钩码所受的重力或把滑轮 B 升高，平衡都会破坏。演示说明两力平衡条件是作用在同一物体上两力，大小相等，方向相反，作用在同一条直线上。

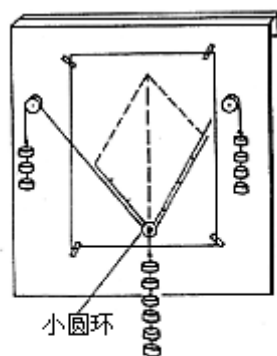


图 2

②如图 2 所示，将磁性滑轮在力盘（铁皮黑板）上定位，小圆环在三个力作用下平衡而保持静止，在纸上标出圆环中心位置，用力的图示法画出三个力，应用平行四边形法则可得此三力合力为零。实验表明物体在三个共点力作用下的平衡条件是合力为零。

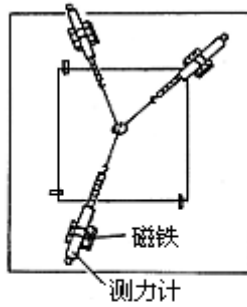


图 3

③如图 3 所示，三个测力计附有磁性较强的磁铁。这样，测力计就可在铁皮力盘上任一位置定位。演示时，让小圆环在三个测力计作用下处于平衡。根据测力计示数，用作图法能很方便验证共点力的平衡条件。

(2) 力矩的作用

如图 4 (a) 所示，用木条自制一个单臂梁，梁上画上相等的刻度，用硬纸片制成两量角器，其中一个量角器固定在梁的转轴上以指示梁的水平位置，另一量角器可在梁上移动，以指示施力方向。演示时按图 4 (b) 所示，梁一端悬挂钩码，用测力计在 A、B 点先后使梁保持水平平衡。计算两次力矩，可看出它们的力矩相等。说明相等的力矩产生效果相同。测力计仍在 A 点施力，但改变角度，计算其力矩，仍然得到上述结论。

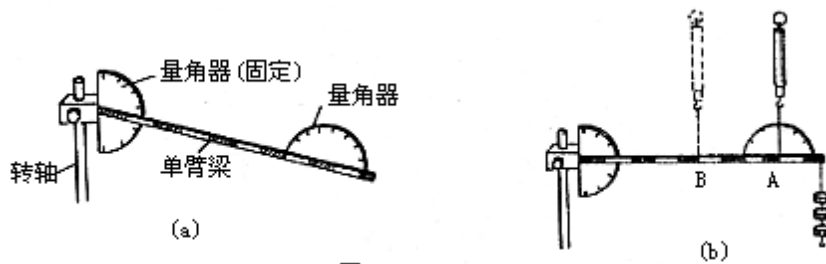


图 4

(3) 有固定转动轴物体的平衡

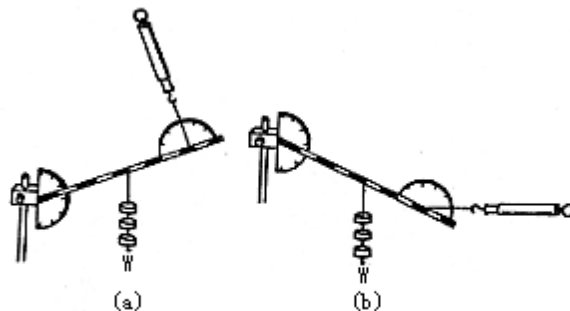


图 4

①仍用图 4 (a) 所示单臂梁，按图 5 (a) 所示保持钩码所受重力和悬点不变，测力计拉力始终垂直于梁，但使梁分别在水平成不同夹角的位置上平衡。读出各次测力计的不同示值，测量出各次钩码的不同力臂，可看到每一平衡状态下，两个力矩代数和总为零。

如图 5 (b) 所示，保持钩码所受重力和悬点不变，改变梁的倾斜角，但测力计始终水平拉梁使其平衡。读出拉力，测算出每次测力计和钩码的力臂，仍可得到以上的结论。

②图 6 所示为演示力矩盘（图盘要选用均匀板材（如铝板）制成，直径约 40cm），盘上钻有分布均匀的小孔。支架上装有可上下、左右移动并固定在任一位置的滑轮。演示前，根据教学要求，设计力矩平衡方案，如图 (a)、(b)、(c)、(d) 所示。根据设计方案，在力矩盘的相应孔中插放香蕉插头，悬挂砝码的细绳套在插头上。调节滑轮位置，使力的作用线的方向满足力矩平衡方程，此时力矩盘处于平衡状态。

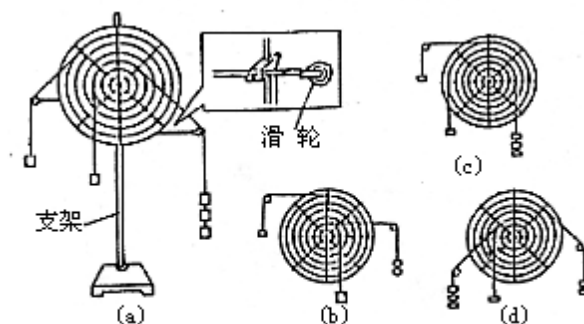


图 6

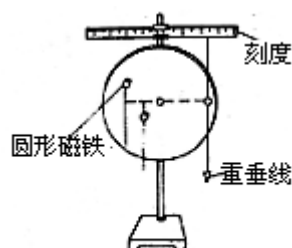


图 7

③图 7 所示的力矩盘用薄铁皮（或镀锌铁皮）制成。圆盘上部安放一把刻度明显的尺，尺上挂一条可水平移动的重垂线，以便于测量力臂。当用几块质量相同的磁铁同时吸在盘上不同位置时，圆盘会自动调节达到平衡。用重垂线从刻度尺上读出各力力臂，通过计算可演示具有固定转动轴的物体的平衡条件。

物体平衡和稳度

(1) 平衡的种类

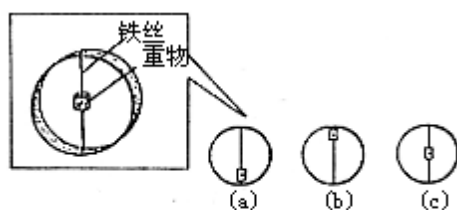


图 1

①如图 1 所示，圆环中央铁丝上有一块可上、下移动的重物。如图 (a)、(b)、(c) 所示将重物固定在铁丝的不同位置，可演示稳定平衡、随遇平衡和 unstable 平衡。

②如图 2 所示，细颈瓶内装满水，把瓶如图 (a)、(b)、(c) 所示放置，可演示三种平衡。

(2) 稳度

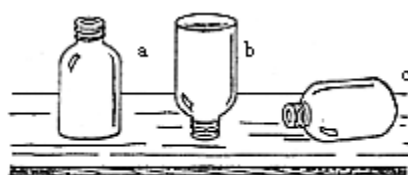


图 2



图 3

如图 3 所示，瓶塞上插一根细竹签，竹签上粘一团橡皮泥，改变竹签上橡皮泥位置，可改变瓶的稳度。实验中可发现，重心愈高，稳度愈差。如在瓶底部套一块圆板，瓶底面积增加，再重复上述实验，即使重心较高，也比较稳定。演示了物体稳度与重心位置及底面积的关系。

匀速直线运动

(1)如图 1 所示为一根长约 1.2m 的有槽轨道。轨道的支架可调整其倾斜度，指示钢球位置的小旗可用夹子夹在轨道边上。演示时先调节轨道，使起始端略高，以抵消钢球滚动时的摩擦阻力。用节拍器计时，轻推钢球，使球有一个初速，用旗子标出每个节拍时球在轨道上的位置。从测量结果可知：球在相等时间内通过的位移相等。

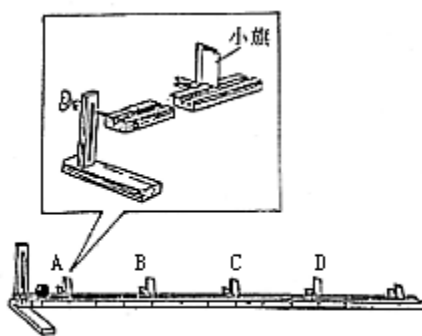


图 1

(2)如图 2 所示，一端封闭、长约 1.5m 的玻璃管，固定在贴有薄铁皮的长板一侧，用红色蜡做一个长约 3~4cm、直径稍小于管径的圆柱体，近底部处绕几圈细铁丝。蜡柱装入管中后注满清水，蜡柱能缓慢地在管中匀速上升。蜡柱与管子间隙大些，上浮的速度也大些。演示时，在管外用磁铁吸住蜡柱，并置蜡柱在管内底部位置。取掉磁铁释放蜡柱上浮，利用节拍器计时，在每个节拍时记下蜡柱位置（可用小磁块吸在管旁铁皮上作标记）。可以发现，蜡柱在相等时间内通过的位移相等。蜡柱刚释放时作加速运动，但随着速度增加，水的阻力也增大，当阻力等于浮力和重力之差时，即匀速上升。为便于测量，也可在木板上标好刻度，并事先调节节拍器的频率，使蜡柱每通过一格的时间与节拍器合拍。管内清水中加少量氢氧化钠，可以预防日久蜡使水混浊。管子上端装一光源，竖直向下照明，可增加演示清晰度。

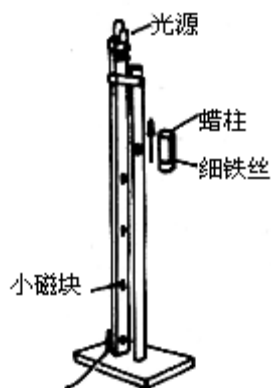


图 2

匀变速直线运动

(1) 匀变速直线运动规律

①应用匀速直线运动的有槽轨道，演示时把轨道调成适当倾斜位置，调整节拍器达 120 次/分，即两响间隔为 0.5s。观察球由静止滚下，节拍器每响一次球所在的位置，然后把旗子夹在各时刻的位置。可以看出，在相等时间内，球通过的位移不相等，并且速度愈来愈快。测出球在时间 t_1 、 t_2 、 t_3 ……内的位移 s_1 、 s_2 、 s_3 ……，可得 $s_1 : s_2 : s_3 : \dots = 1 : 2^2 : 3^2 : \dots$ ，可见小球在轨道上作匀变速运动（图 1）。



图 1

此演示也可这样进行：把球由起始点滚下，调节斜槽倾角，使球滚到下端时，节拍器刚好响 4 下（即 0, 1, 2, 3, 4）。然后把整个轨道分成 16 等分，并在 1 : 4 : 9 : 16 处作标记。球滚下时可发现节拍器响时，球正好处于标记处，使学生获得 $s_1 : s_2 : s_3 : \dots = 1 : 2^2 : 3^2 : \dots$ 的感性知识。

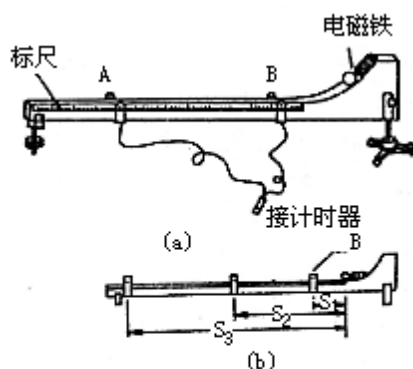


图 2

②图 2 (a) 所示为 J04227 型斜槽轨道，A、B 分别为启动光电门和停止光电门。其配合 J0202 型筒式计时器，可完成多项力学实验。用斜槽轨道研究匀变速直线运动的实验示意图如图 2 (b) 所示。调节轨道成倾斜状态（轨道标尺“0”位处比末端处高出约 2cm），电磁铁固定在轨道平直部分，吸住钢球时，球前缘应正好在标尺“0”位处。拆去启动光电门 A，把停止光电门 B 固定在轨道标尺 5cm 处。计时器使用同步计时法（即在电磁铁断电释放钢球瞬间，计时器即开始计时，到钢球经过停止光电门时即终止计时）。

释放小球，测出球运动 5cm (s_1) 的时间 t_1 （重复测三次，取平均值）。把停止光电门依次移至标尺 20cm (s_2)、45cm (s_3) 处，同样测得平均值 t_2 、 t_3 。从数据分析可见， $s_1 : s_2 : s_3 = 5 : 20 : 45 = 1 : 4 : 9 = 1 : 2^2 : 3^2$ 。

此实验中，轨道的倾角决定钢球的加速度，它们间的关系为 $a \propto \sin$

α (α 为轨道倾角)，但 $a \neq g \cdot \sin \alpha$ ，而且 $a < g \cdot \sin \alpha$ 。这是因为钢球除平动外还有转动，因此调节倾角可改变加速度。

如果演示 $v_0 \neq 0$ 的匀变速直线运动时，可以在轨道弧形部分释放钢球，也可在平直轨道上释放钢球，但要在离开释放点某一距离才开始计时，以给钢球获得初速度的时间。

为了减少误差，钢球的加速度应小些，以增加运动时间，减小计时的相对误差。

(2) 即时速度

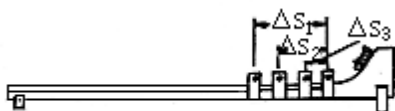


图 3

①图 3 所示为用斜槽轨道测即时速度示意图，调节轨道成倾斜状态，轨道标尺“0”位处比末端高出约 2cm。电磁铁固定在轨道弯曲处，其高度应使钢球吸住后，球下缘高出轨道的平直部分 2~3cm 为宜。把启动光电门 A 固定在轨道水平标尺 10cm 处，把停止光电门 B 固定在 30cm 处，两光电门距离作为 Δs_1 。计时选用“光控”计时。接通计时器电源，电磁铁吸住钢球。把计时器置零后，电磁铁开关拨向“放”，这时钢球开始在轨道上加速运动。记下计时器上示数，即为钢球通过 Δs_1 所需时间 Δt_1 ，重复三次，算出 Δt_1 的平均值，再算出平均速度。把停止光电门 B 分别移到和光电门 A 的距离为 10cm、5cm、2cm、1cm 处，重复上述步骤，分别求出它们的平均速度。

由实验所得的各次平均速度可见，当停止光电门 B 越靠近启动光电门 A 时，钢球在这段位移内快慢程度改变得越小，也越接近 A 点的真实速度，即 A 点的即时速度。

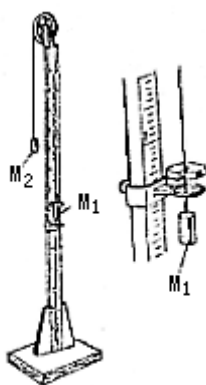


图 4

②用阿特武德机测即时速度的装置如图 4 所示。演示时，先使滑轮两边砝码之差等于运动中阻力，这样砝码作匀速直线运动。当在较重一边砝码上加附加砝码，砝码下落时就作匀变速直线运动。在砝码下落途中，安一圆环，使砝码本身可通过，而附加砝码被截住，砝码的运动就在通过环的那瞬间由匀变速直线运动变为匀速运动。用秒表测出由圆环到底座的距离 Δs 和所需的时间 Δt ，即可测出砝码通过圆环时的即时速度。上、下移动圆环位置，可以测出砝码在不同位置（或时刻）的即时速度。也可在圆环下安置启动光电门和停止光电门，从两光电门的间距和砝码通过两光电门的时间，测出它通过圆环时的即时速度。

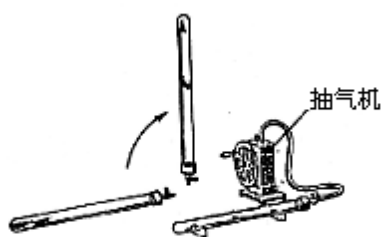


图 5

(3) 空气阻力小时物体自由下落图 5 所示是一种“毛钱管”，又叫牛顿管。管内装有金属片和羽毛。演示时，先、后让管内充满空气和抽出空气（气压约达 20mmHg），观察管内物体在不同空气密度时下落的速度。

牛顿管演示时，学生注意力往往集中在急速翻转的动作上，待观察下落物体时，物体已落到管底，因此较难看清不同物体的下落情况。为了克服上述缺点，可在羽毛上粘上小铁屑，再和铁片一起装入牛顿管，演示时先用磁铁将羽毛和铁皮吸到顶端，移开磁铁，就可观察不同物体同时下落的情况。

演示时应注意，因管的容积较大，若用手摇抽气机抽气，需要抽 4~5 分钟才能使管内气压降到 20mmHg。连接抽气机的橡皮管应选择管壁较厚的，不然抽气时会把橡皮管压扁。如果管中含有水气会使羽毛沾湿，不能自由下落。如果管子完好，而抽气达不到演示要求，这时就要检查管口是否漏气。检查方法是先向管内压入少量空气，然后关紧活栓，把管口部分浸入水里，有气泡冒出处，即为漏气地方，应修复后再演示。

(4) 自由落体运动

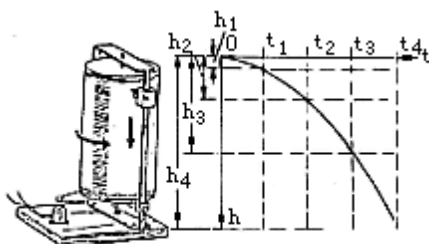


图 4

图 6 所示为自由落体位移—时间图线描绘器，落体上装有笔架，当其落下时可在转鼓的纸上描绘图线，带动转鼓的电动机用可变电阻调速。演示时，调节电动机转速（使转鼓转动一周所需时间和落体下落到底端时间相等），当转鼓转速均匀后，放手让落体下落。此时笔在纸上画出一条曲线，取下纸，画上位移（竖直）和时间（水平）坐标，将落体起始和终止的时间四等分，由每一等分作垂直时间轴的直线（图中虚线），直线和曲线交点所对应的位移就是自由落体在某一时间的位移。由测量可得此位移（ h ）和时间的平方（ t_2 ）成正

可得此位移（ h ）和时间的平方（ t_2 ）成正比，即 $h_1 : h_2 : h_3 : \dots = t_1^2 : t_2^2 : t_3^2 : \dots = 1 : 4 : 9 : \dots$ ，则各相等时间内发生的位移之比

依次为 $1 : 3 : 5 : \dots$ ，由此可证实自由落体运动是初速为零的匀变速直线运动。

(5) 重力加速度的测定

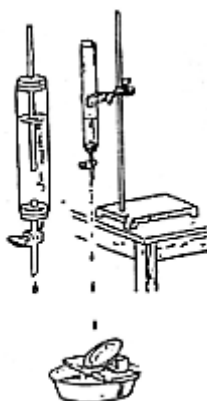


图 7

①图 7 所示装置是利用等时落下的水滴测重力加速度。演示时，调节滴液瓶阀门，倾听水滴碰到盘子时的响声，并注视阀门口的水滴，使一个水滴碰到盘子的瞬间其后一个水滴恰好从阀门处下落。计算两水滴下落的时间间隔 t （可测出 50 滴或 100 滴水落下的时间，算得其平均值），测出水滴下落通过的距离 h 。根据公式 $h = \frac{1}{2}gt^2$ ，可得 $g = \frac{2h}{t^2}$ 。

水滴了一定时间后，管中的压强将减少，水滴的间隔就变化，可采用图示的定压滴液瓶。

②图 8 所示装置可较精确测量重力加速度。电磁铁吸住钢球，启动光电门 A 和停止光电门 B 置于小球的下端。计时器选用光控计时。

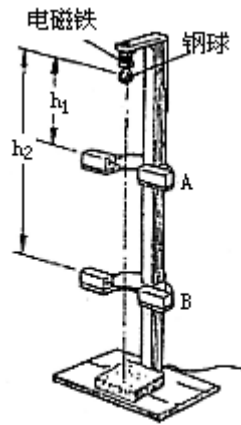


图 8

演示时，切断电磁铁电源，球落下。此时计时器显示的数字即为钢球通过光电门 A、B 所需时间 t ，分别测出球到 A 的距离 h_1 和球到 B 的

距离 h_2 ，由 $g = 2(\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1})^2 / t^2$ 即可求得 g 值。

此实验可用现成的阿特武德机或将斜槽轨道竖直装置后使用。

作用力和反作用力

(1) 图 1 所示装置可显示浮力和物体对液体的相互作用。两圆盘测力计 A、B 分别悬挂重物和放一盛水容器，把测力计所挂重物部分或全部浸入水中，这时测力计 A 的示数变小，测力计 B 的示数增加。重物浸入水中后，测力计示数变小是由于水对重物的浮力，托盘秤示数增加是由于重物对液体的作用力。这是一对作用力和反作用力，其大小相同，方向相反。

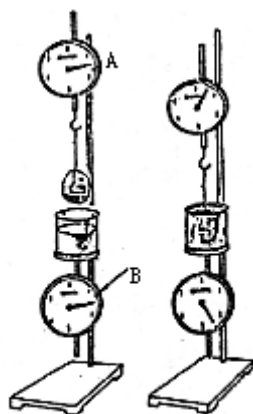


图 1

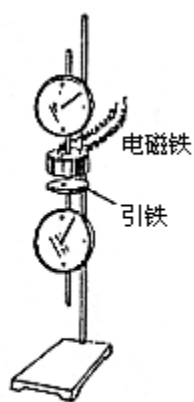


图 2

(2) 图 2 所示装置可显示磁力的相互作用。两个圆盘形测力计的拉杆上，分别固定演示用的圆形电磁铁和引铁，电磁铁与引铁间的距离约 5~8mm。演示时，先调整两圆盘测力计零点。接上电源，两测力计示数大小相同，方向相反。如把引铁改为非铁磁性物质，它们之间就没有磁相互作用。若演示斥力，只需将引铁换成相同的电磁铁。



图 3

(3) 如图 3 所示，两人分别站立在两磅秤上，竖直拉一根绳子，这时两秤示数发生变化，一磅秤上减少的示数和另一磅秤上增加的示数值相同。改变人的拉力大小，两秤增加示数和减少示数的数值总相等，可说明牛顿第三运动定律相互作用力的关系。



图 3

(4) 如图 4 所示，两测力计分别固定在小车 A、B 上，它们的秤钩互相连在一起。实验时牵引小车运动，可以看到，尽管两车上测力计显示忽大忽小，但两测力计示数总相等。显示了运动中物体的相互作用。

当小车作匀加速运动时，由实验证实牛顿第三定律仍然成立。实验中要求拖车质量较大。

物体的惯性

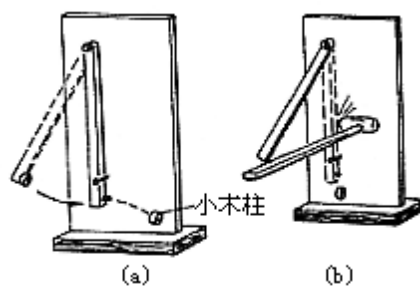


图 1

(1) 如图 1 所示，竖板上的木棒（长约 30cm）可绕轴转动。棒下端套一有孔小木柱。棒拉高后落下，碰到制动钉后即停止，而小木柱却因惯性脱离棒继续向前运动（图 1 (a)）。仍在棒下端套一小木柱，用锤击棒端部，当棒被击出时，小木柱却因要保持原来静止状态而在原位落下（图 1 (b)）。

(2) 如图 2 所示，导轨上小车

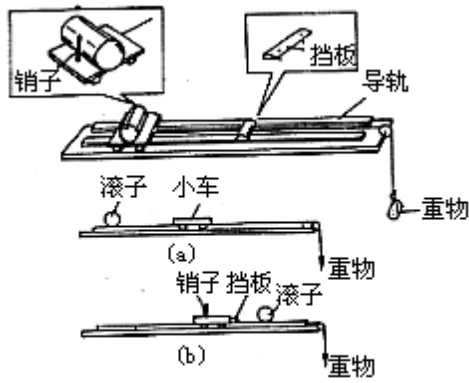


图 2

由重物牵引突然运动，车上滚子因惯性向后留在原处（图 2 (a)）；在车上插上销子（以防车子起动时滚子向后滚动），由重物牵引的小车因碰到挡板突然停止，车上滚子因惯性继续朝前滚动（图 2 (b)）。

(3) 如图 3 (a) 所示，小车上装有两根水平导轨，导轨上有两个质量不同的圆柱体。圆柱体两侧套有“记忆”纸标。

“拉”、“推”小车，可演示两圆柱体在起动、加速、停止时的惯性现象。从纸标移动的位置大小，还可比较惯性大小和质量的关系。图 3 (b) 所示的木板槽上置有两节大小不同的干电池，演示时，从两电池移动的位置同样可以显示物体的惯性和比较它们的大小。

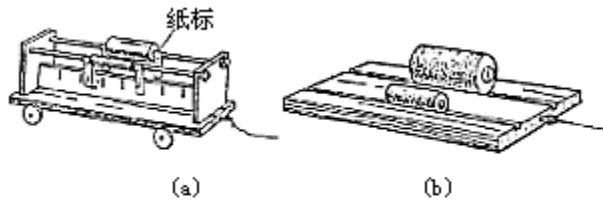


图 3

牛顿第二定律

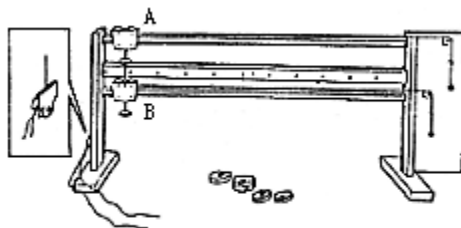


图 1

(1) 图 1 为牛顿第二定律演示器。运动小车 A、B 采用悬挂形式，用细长的玻璃框架在上、下两木条上作轨道。小车前端系有细线，以悬挂作为外力的钩码。

小车后的拖线，可用文件夹夹住，放松或夹紧拖线，可对两小车同时起动或制动。当研究加速度和作用力关系时，使两小车质量相同（200g），小车 A 的作用力（挂 20g 钩码）为小车 B 的作用力（挂 10g 钩码）的 2 倍，通过夹子使两小车同时起动和制动，可测得小车 A 通过的距离是小车 B 的 2 倍。反复实验多次可得相同结果。根据初速为零的匀变速直线运动规律，在相等时间内通过的距离和加速度成正比，即 $s_1 : s_2 = a_1 : a_2$ ，可得质量相同时加速度和作用力成正比。研究加速度和质量关系时，使作用在两小车上的外力相同（各挂 20g 钩码），并使小车 A 质量（400g）为小车 B 质量（200g）的 2 倍，仍按上法使两小车同时起动，同时停止。根据通过位移的比可知，作用力相同时（因为钩码的质量远小于小车的质量，可近似认为在匀变速运动中，两小车所受拉力相等），加速度和质量成反比。

这种演示器，用两个运动物体在相等时间内通过的位移作比较，可不经计算，直接由比较得出 a 、 F 和 m 的关系。这种方法，演示时间短，现象明显，直观性强。

(2) 利用阿特武德机可以直观地确定作用力与加速度和质量的关系。图 2 所示装置实际上是并列的两组阿特武德机。装置中两个滑轮可利用图中所示的控制器，以达到同时起动和制动的目的。A、B、C、D 为四个砝码。当研究加速度跟作用力的关系时，使 $m_A + m_B = m_C + m_D$ ，又使 $m_A - m_B = m_C - m_D$ 是简单的整数比，如 1 : 2、1 : 3、2 : 3；当研究加速度跟物体质量关系时：使 $m_A - m_B = m_C - m_D$ ，又使 $m_A + m_B$ 和 $m_C + m_D$ 是简单的整数比，如 4 : 5、3 : 4、2 : 3。

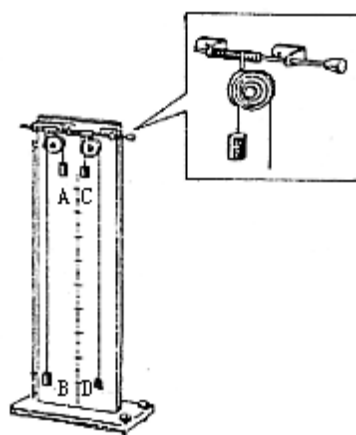


图 2

演示时，每次把砝码 A 和 C 并列处于同一高度，然后使制动器放松一段时间后，再压上，测出 s_A 和 s_C ，根据 $s_A : s_C = a_A : a_C$ ，可以验证牛顿第二定律。

实验装置中减小滑轮摩擦力是实验成功的重要因素。

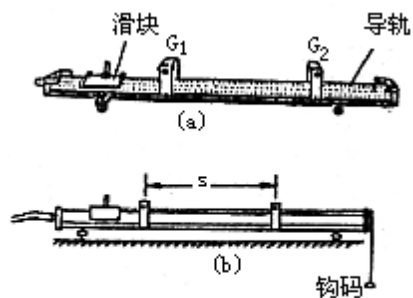


图 3

(3) 用气垫导轨演示牛顿第二定律。如图 3 (a) 所示为一种中学常用的气垫导轨。这是一种多用途的力学实验仪器，它通过导轨表面均匀分布的小孔喷出气流，在导轨表面和滑块之间形成一层很薄的“气膜”，滑块浮起，滑块在导轨上近似无摩擦运动。演示时先将导轨调成水平，再用天平称出滑块质量（滑块质量约取在 0.5kg（铝制）~2kg（钢制）范围内）。开启气源，把滑块和作为外力 F 的钩码（约 2g）用细线连接，挂在导轨顶端滑轮上。演示步骤如下：

①研究外力和加速度的关系：电路中的两个光电门 G_1 、 G_2 分别作为启动计时和停止计时用。调节两光电门距离 (s) 约在 0.5m 左右（图 3 (b)），将滑块移至导轨起始端，然后放手让其滑动，电子秒表显示的就是滑块经过位移 G_1G_2 所需时间。根据初速度为零的匀加速直线运动公式 $s=at^2/2$ ，求出 $a=2s/t^2$ 。把钩码质量增加一倍（4g），这时作用在滑块上的外力增加，重复上述实验，测出时间 t ，求出加速度 a 。重复多次实验可得结论：物体（滑块）在外力（钩码质量）作用下所得的加速度和所受外力成正比。

②研究加速度和质量的关系：保持钩码质量 2g 不变，改变 m （可在滑块上加砝码）。同①方法测出时间 t ，根据 G_1 、 G_2 间的位移 s 和时间 t ，计算 a 。改变质量重复实验可得结论：在相同外力作用下，加速度和物体的质量成反比。

上述演示，如滑块质量 $M=1\text{kg}$ ，钩码质量 $m=0.002\text{kg}$ ($M \gg m$)，则实验系统误差可小于 0.5%，满足演示实验要求。

如实验要求比较精确，可以按照隔离法根据 $T = \frac{Mmg}{M+m}$ 作修正。

利用气垫导轨演示牛顿第二定律，基本上消除了摩擦对运动的影响，但实验精确度还受计时精确度影响，所以要选用精度较高的电子毫秒计。

超重和失重

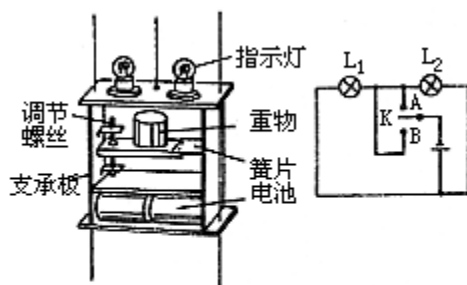


图 1

(1) 图 1 所示为超重、失重演示器，演示器箱体顶装有显示超重、失重指示灯 L_1 、 L_2 ，箱内底部装有电池，电键 K 用金属簧片制成，触头 A、B 可以上、下调节；重物粘在簧片中间。演示器电路按图连接。演示时，通过滑轮使箱体上、下运动。当运动物体的加速度向上时（向上加速或向下减速），物体处于超重状态，K 与 A 接触， L_1 点亮；反之，加速度向下时（向下加速或向上减速），重物处于失重状态，K 与 B 接触， L_2 点亮。

(2) 图 2 所示是细钢丝绕成的一个直径约 30mm、长约 100mm 的软弹簧。手拉弹簧上端，弹簧会因重力而伸展开来。因各部分所受重力不同，这种伸展是不均匀的（上面各圈的间距较大，下面间距较小）。演示时将弹簧向上突然一拉，弹簧各圈间距随着增加，出现“超重”；将手松开，弹簧自由下落，弹簧各圈间距变得均匀，这是因弹簧“失重”，各圈间因重力产生的拉力消失。

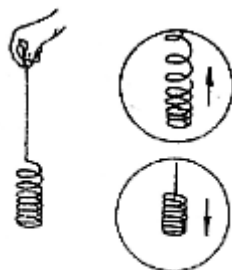


图 2

(3) 在弹性圆环下悬挂一重物，由于重物的作用，弹性圆环变形成椭圆状。用此装置，从圆环的形变情况同样可显示超重、失重现象。

弹性圆环可用薄金属片或薄竹片弯制而成。取易拉罐一截能成为实验效果良好的弹性圆环。

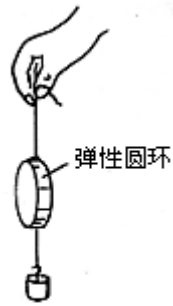


图 3

(4) 用手托住几本厚书，这时托力大小等于书的重力（人们习惯以手受到的压力来衡量书本受到的重力）。当手猛一抬起时，感到书对手的压力增大；当手迅速放下时，感到书对手的压力减小，实验说明了超重和失重现象。

(5) 人站在秤台上，秤上示数为人体受到的重力。如果突然下蹲，因加速度方向向下，秤上示数变小，出现失重现象；反之，蹲在秤上的人突然站起来，因加速度方向向上，出现超重现象。

机械能

(1) 重力势能

①如图 1 所示，直杆旁边的标尺分上、下两段，上段指示槽码落下的高度，下段指示木夹在槽码撞击后下移的距离。演示时，将槽码嵌入直杆上方，放手让槽码从某一高度落下，木夹在槽码作用下克服摩擦力向下移动一段距离，说明下落的重物具有做功本领，即具有势能。因木夹移动时摩擦力基本相同，从木夹移动的距离即可表征重物下落时势能的大小。改换不同质量的槽码，则可演示不同质量的物体从不同高度落下时所具有的势能。

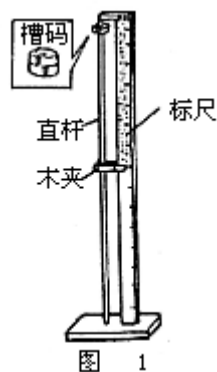


图 1

②塑料小瓶盛大半瓶水，由离水面十几厘米处自由落下，插入水中，下落到一定深度后便翻转上浮。瓶插入水中需克服浮力和阻力做功，由瓶插入水中的深

度，可定性判断瓶在水面上空处的势能。改变瓶的质量和下落高度，则可演示势能与质量和落下高度的关系。选用深色塑料小瓶可提高可见度。

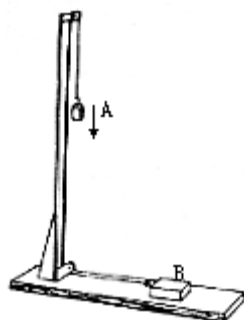


图 2

③图 2 所示装置，可演示举高的重锤下落时具有做功本领。演示时，先使重锤 A 升高，当它慢慢匀速下降时，拉动滑块 B 做功。

自制时重锤 A 和滑块 B 的质量要作适当选择，给重锤一个较小的速度，重锤大体上应能匀速下降，拉动滑块作功。

(2) 动能

①如图 3 所示，轨道上放一圆柱体（可用包有铁皮外壳的干电池），利用悬挂小球落到平衡位置时推动圆柱体做功，来比较小球落到平衡位置时动能的大小。改变小球落下高度，可演示动能和速度的关系；换用不同质量的小球，可演示相同速度（从同一高度落下）的小球具有的动能与质量有关。

②如图 4 所示装置，当球由斜面滚下时，克服木夹阻力推动挡板，由挡板移动距离的多少，可判断球到达挡板处动能的大小。演示时，将挡板放在标尺“0”位置。先后将质量不同的钢球和胶木球，从不同高度滚下，球推动挡板，从挡板在标尺上的不同位置，可演示不同质量、不同速度的物体所具有的不同动能。

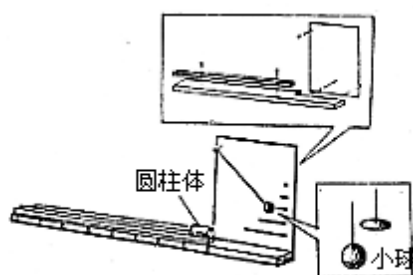
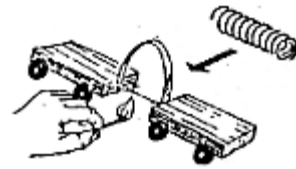
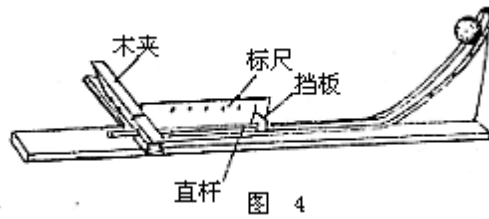


图 3

(3) 弹性势能



①如图 5 所示，两小车中间夹有弯成弓状的竹片（或弹簧），当把捆扎竹片的线烧断后，两小车反向运动一段路程，定性演示了发生弹性形变的物体具有弹性势能。

②如图 6 所示，直杆上套有弹簧，用力按轴套压缩弹簧，释放时，轴套被弹起一定高度。弹簧形变越大，释放后轴套被弹得越高。演示表明，发生弹性形变的物体具有弹性势能。同一物体的弹性形变越大，具有的弹性势能也越大。

(4) 动能和势能的相互转化

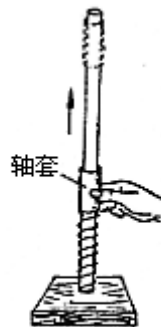


图 6

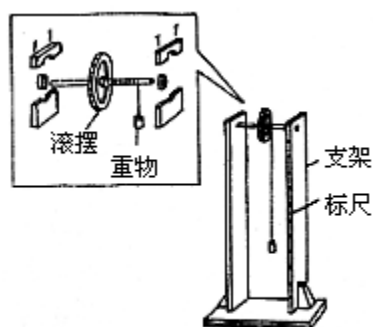


图 7

①如图 7 所示装置中套有滚珠轴承的滚摆固定在支架上。系有重物的细绳绕在滚摆一侧轴上。演示时，转动摆轮，将重物提升。重物落下时，带动摆轮转动。当重物到达最低点时，因摆轮的转动惯性又带动重物上升，且基本仍可升高到原来位置。演示说明动能和重力势能的相互转化和转换过程中机械能总量保持不变。演示时要把支架用桌边夹固定，以减小振动引起的能量损耗。重物质量远小于滚摆质量时效果较好。

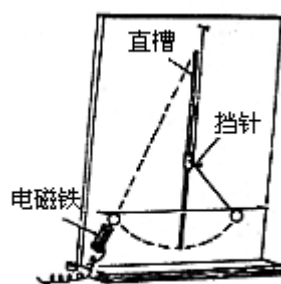


图 8

②图 8 所示装置中，摆球可由电磁铁吸住，沿直槽上、下移动的挡针可固定在某一位置。当电磁铁从图中的水平线位置释放摆球后，摆球便开始向挡针摆动，且仍达到水平线（原释放时的）高度。改变挡针上、下位置，重复实验，仍可得到相同结果。实验说明重力势能和动能的互相转换和在转换过程中总能量守恒。

③如图 9 所示为动能小车。演示时先使前轮转动，系线使重锤举高，重物下落时带动小车运动，当重物落到最低点时，运动的小车又会把重物举高。实验显示了机械能的相互转化。

动量定理

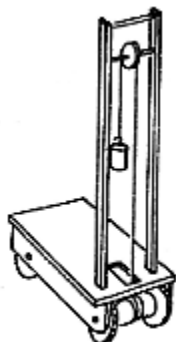


图 9

(1) 质量相同的两铁球 A、B (约 200g) 分别用细线 (一般缝纫用线) 悬挂起来, 在 B 球的细线上方接一段细软弹簧 (或橡皮筋), 使其总长度与 A 球的悬线相同 (图 1)。实验时将两球托到悬点处, 而后释放下落。当 A 球落到原位置时, 它的细线立即张断, 而 B 球落到原位置时, 拴它的细线不断。

(2) 在火柴盒内壳的下端装入铁块等重物, 再用橡皮泥封住, 使它的重心尽可能低些。内壳和外壳间要有适当摩擦力, 这样火柴盒静立桌上时, 内壳不会自行下降。实验时将内壳抽出一些 (图 2), 让盒从距水平桌面约 30cm 的高处下落, 可看到火柴盒与桌面碰撞后, 内壳继续向下移动并稳定地立在桌面上。重复实验时, 将内壳关闭, 使两底部相平, 可看到盒下落与桌面碰撞后发生明显向上反弹, 继而站不稳倾倒。

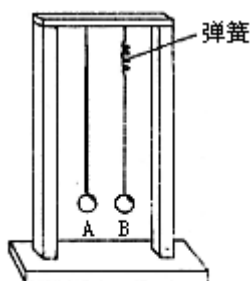


图 1

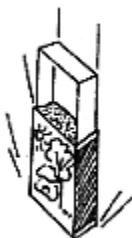


图 2

(3) 按图 3 所示, 把两用测力计 (两用测力计结构详见摩擦图 3) 固定在支架上。实验时让球从距秤盘约 30cm 的高度落到秤盘, 从“记忆”纸片示数可

得球和秤盘间的冲力；在秤盘上铺一层软泡沫塑料（也可用与球相同质量的橡皮泥），重复实验，从记忆“纸片”示数可知，此时冲力小得多。

由（1）、（2）、（3）实验表明，物体的动量变化一定时，所受力的作用时间越短，这个力越大；作用时间越长，这个力越小。

（4）在长约 40cm 的细木棒中间用线悬挂后成杠杆，其两侧分别挂上 500g 砝码，把一根长约 20cm 的细玻璃管轻轻地放在一侧的砝码上，可看到砝码向下运动，这表明，虽然玻璃管对砝码的作用力很小，但作用时间相当长，因而产生的冲量较大，所以使砝码的动量发生了较大的变化；取下玻璃管，杠杆恢复平衡，手持玻璃管迅速打击一侧砝码，可看到管的前端在很大的冲击力作用下粉碎，而砝码却几乎不动。这表明：玻璃管对砝码的作用力比前一次大得多，但作用时间极短，因而产生的冲量比前一次小，所以引起砝码的动量变化很小。

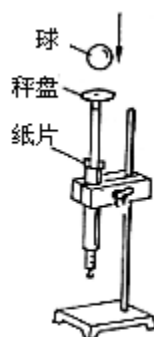


图 3

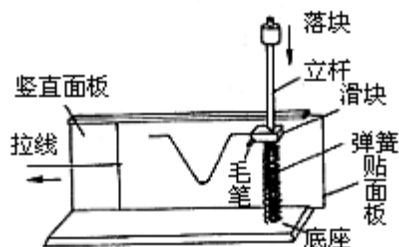


图 4

（5）如图 4 所示为一冲力描绘器，底座一侧的立杆上套有弹簧和滑块，弹簧上、下两端分别与滑块和底座相连，滑块上插有毛笔。作撞击用的落块（可用铜、铁等材料制成）的质量应与弹簧的弹性系数相配合，使其自杆顶下落，弹簧有显著的形变，在冲击后又能使弹簧恢复原状。底板上装置了滑槽，便于贴面板水平抽动。实验时，调整毛笔笔端位置，使与贴面板接触，在落块放下的同时抽动贴面板，板上描绘出一条冲力曲线；在滑块上填上软泡沫塑料，重复实验，因作用时间增加，曲线变得平缓，从两次所绘曲线的比较可定性说明动量定理。

（6）斜面板一端固定打点计时器。质量为 M 的小车系上纸带后由砝码 m 牵动（为减小误差应将斜面一端垫高以平衡小木块和板之间的摩擦阻力）。实验时，让小车在外力（当 $M \gg m$ 时， $F \approx mg$ ）作用下加速运动，纸带上打下一系列点迹（图

5)，取下纸带，在带上任取两个计数点。计算这两个计数点速度 v_0 、 v_t 。例如取 $n=2$ 和 $n=6$ 两计数点，测出位移 s_0 和 s_t ，它所对应的运动时间都是 $2T=0.2$ 秒（ T 为打点计时器每打 5 个点所用时间，作为时间单位，打点计时器接 50Hz 交流电时， $T=5 \times 0.02$ 秒），测得

$$v_0 = s_0 / (2T), \quad v_t = s_t / (2T)。$$

然后再确定所取两计数点时间间隔 t ，图中 $t=0.4$ 秒。根据实验数据计算出小车在所取两计数点间的运动过程中系统动量的增量 $(M+m) \Delta v$ ，再算出小车在上述这段时间内所受拉力的冲量 Ft 。结果表明 $(M+m) \Delta v$ 与 Ft 两个值接近，验证了动量定理。

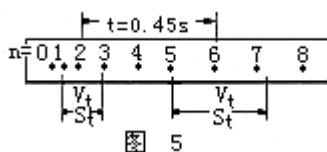


图 5

实验装置中运动系统包括小车和牵引砝码。动量计算若只考虑小车质量，则误差较大。

动量守恒定律

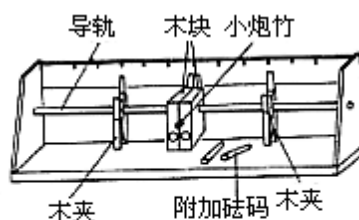


图 1

(1) 如图 1 所示，两质量相同的木块悬挂在导轨上，两木块的相对接触面上各挖一个半圆柱状的小槽，当它们合在一起时恰好能插入一个小炮竹。演示时，两木块置于导轨中间位置，其左右相同距离处夹上木衣夹，小槽内插入小爆竹。点燃爆竹，两木块分开，并同时碰到衣夹。说明在相同时间内两木块位移相同，由此可推导出它们的动量守恒。在其中一木块上插上圆柱状的附加砝码，使两木块质量相差一倍，同时将质量大的木块一侧的衣夹移近至原来的一半处，重复实验，两木块仍同时碰到衣夹，同样表明了两木块动量在爆竹爆炸前、后动量是守恒的。

(2) 如图 2 所示，小车 A 上装有钢卷尺，拉出卷尺端部固定在小车 B 上。在小车 B 上配重，使两小车质量相同（约 300g）。演示在平整桌面上进行，把两车拉开一段距离，这时两车静止，总动量为零；放手后两车在卷尺弹力作用下

做相向运动，碰撞后都静止，两车总动量仍为零，验证了动量守恒定律。使两车质量不相等，重复上述实验，碰撞后两车仍然静止，碰撞前、后动量保持不变。

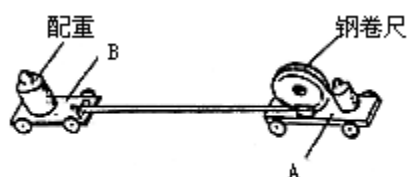


图 2

把两小车拉开一段距离，放手让车 A 运动一段路程，当具有一定动量后再放开车 B，此时两车的总动量不为零。碰撞后将沿车 A 运动方向运动，总动量也不为零。定性演示碰撞前、后总动量保持不变的现象。

反冲

(1) 如图 1 (a) 所示，用泡沫塑料削成船状，船身上捆一充满气的气球，当气冲出时，船就会在水中前进。上述装置也可如图 1 (b) 所示，用废空盒做成小车，在桌面上演示。

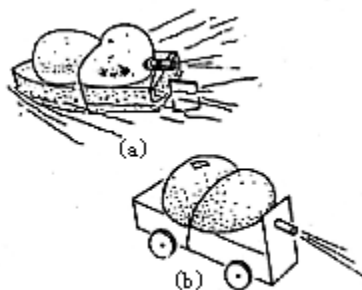


图 1

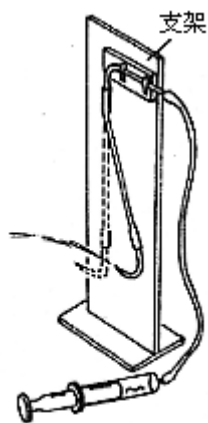


图 2

(2) 如图 2 所示，支架上固定一根带有直角喷管的橡皮管，推动注射器，水流从喷嘴喷出。因水流的反冲作用，喷嘴朝水流方向相反的方向移动。增加水流喷出速度，反冲现象明显。

曲线运动

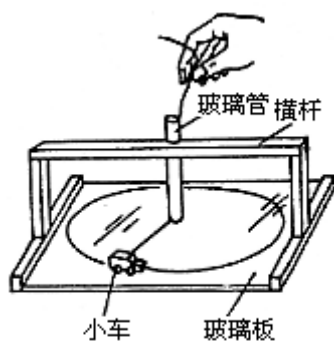


图 1

(1) 曲线运动即时速度方向的演示装置如图 1 所示，玻璃板的支架中央插一段玻璃管，穿过玻璃管的细线拴住小车（惯性或电动）。演示时，用手拉住细线，让小车在板上作圆周运动。小车所需要的向心力由牵住的细线提供。放手后，小车将沿圆周的切线方向运动。本装置可放在书写投影器上，在屏上显示。

(2) 作曲线运动的条件

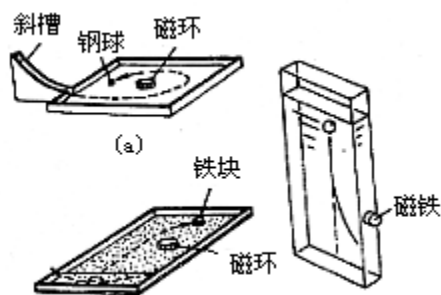


图 2

①如图 2 (a) 所示，当钢球自斜槽滚下，因环形磁铁的作用，球的运动轨迹将成一曲线，说明作曲线运动的条件，必须有与运动方向成一角度的持续力的作用。球从斜槽上滚下的位置应根据磁铁的位置和磁性强弱而定，否则会出现偏转不明显或球被磁铁吸住等现象，导致演示失败。若采用透明玻璃板，则可投影在屏上，在屏上显示其运动轨道。

如图 2 (b) 所示，木盘上洒满玻璃微珠（减小摩擦力），当圆铁块弹出后，在磁环作用下，作曲线运动。如图 2 (c) 所示，扁平容器盛满水，让中空的铁

球在水中自由下落，球作直线运动。在容器一侧放一块磁铁，则球就偏离原来运动方向，做曲线运动。小球落下的位置要根据磁性强弱事先在实验准备时确定。

②如图 3 所示，滴定管中注满水，打开活栓让水慢慢流成线状，用带电棒（可用丝绸摩擦后的有机玻璃棒）接近水流，在静电力（因水是极性分子）作用下，水流发生明显偏斜。



图 3

(3) 平抛运动

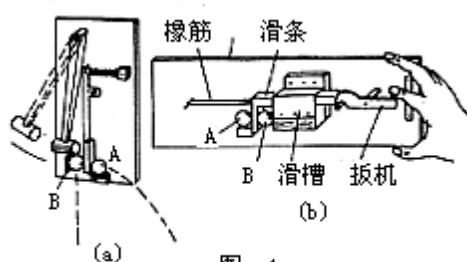


图 4

①如图 4 (a) 所示，当锤落下打击 T 形木条时，球 A 水平抛出，球 B 被释放竖直下落。从两球只有一个落地声，可知它们是同时到达地面的。改变演示器高度或锤子打击力的大小（即改变球 A 抛出时的初速度），仍可显示两球同时落地现象。实验表明从同一高度落下物体，下落时间相同。图 4 (b) 所示演示器，可手持底板按在墙上某一水平位置（底座上有指示水平位置的重锤），拨动扳机，滑条在橡筋作用下在槽内滑动，球 A、B 分别作平抛和竖直下落运动。改变橡筋形变长度，可改变球 A 水平抛出速度。

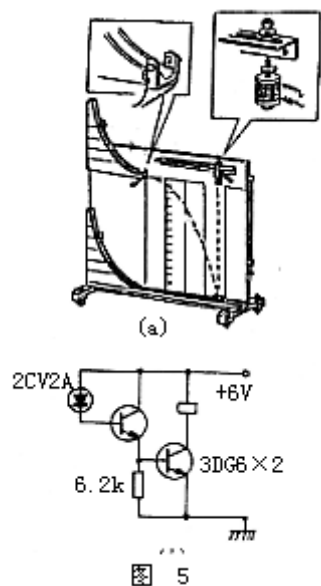


图 5

②图 5 (a) 所示为 J04254 型平抛运动实验器。图 5 (b) 为控制电路，可使球 B 通过光电门时光电开关动作，被电磁铁吸住的球 A 因断电而落下。演示时，把球 B、球 C 从两个轨道同时放手，两球相对于轨道出口的高度相同，因而出口时有相同速度。球 B 作平抛运动，球 C 作匀速直线运动，最后它们在水平轨道某处相碰。改变两球在轨道上的高度，重复实验，可得到相同结果。演示说明平抛运动水平方向的分运动是匀速直线运动，把电磁铁移至上述实验中两球相碰的正上方，即可演示三个球在水平轨道某位置的相碰现象。演示形象地说明了平抛运动可分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动。

调节水平轨道水平和支架竖直是实验成功的关键。

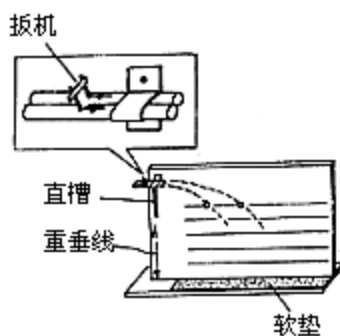


图 6

③图 6 所示装置，可作平抛运动落地时间仅与高度有关，而与初速无关的演示，以消除学生对此结论的怀疑。演示时将支架调成水平，两枪管内装入作平抛运动的弹丸，拨动扳机，因枪内弹簧的弹性系数不同，所以两弹丸以不同速度水平射出，并在不同射程内同时落地。

演示说明：从同一高度平抛的物体，其水平射程决定于初速度，其落地时间仅与抛出物体的高度有关，而与初速度无关。装置中枪管可在直槽内上下移动，以改变水平高度。

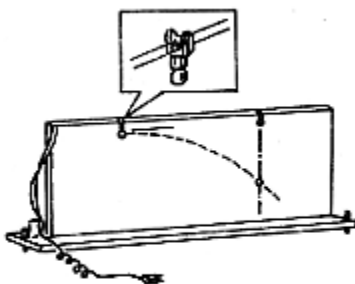


图 7

④图 7 所示装置，可演示从水平作匀速运动的物体上落下的小球，具有和运动体相同的水平速度，因而其作平抛运动（模拟飞机投弹等实验）。

演示时，先调节底板稍有倾斜，以使带有电磁铁的悬挂小车，能在导电轨道上匀速滑行。然后让电磁铁吸住小球，在小车滑行到轨道中途（约轨道全长 1/3）时断开电源，可发现落下的铁球和滑行的小车始终在同一条竖直线上。当球落地时，小车恰好在其竖直上方。如把上述过程拍摄成闪光照片，从照片可清晰呈现上述现象。

(4) 圆周运动

①如图 8 所示为向心力演示器，当演示器装在转台上旋转时，由两测力计（由弹簧和圆片指针组成）的示数，可比较旋转体 A、B 的向心力大小。

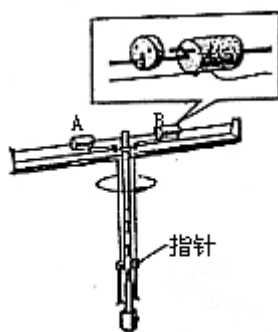


图 8

(a) 演示向心力与质量关系 (R 、 ω 一定)：把附加砝码插在滑块 A 上，使 $m_A=2m_B$ ，调节细线长度，使半径 $R_A=R_B$ 。旋转稳定时从测力计示数可知向心力 $F_A=2F_B$ 。

(b) 演示向心力与半径关系 (m 、 ω 一定)：使 $m_A=m_B$ ，调节细线长度，使半径 $R_A=2R_B$ 。由实验结果可知 $F_A=2F_B$ 。

(c) 演示向心力与角速度的关系 (m 、 R 一定)：保持 m 和 R 一定，改变转速可以看到角速度增大，向心力迅速增大。

此装置在演示向心力和半径关系时，因旋转时弹簧伸长，就不能保持转动半径不变，误差较大。制作时转架的横框长度可适当增加，使未转动时滑块到转轴距离尽可能大些，则滑块转动时因弹簧伸长引起的半径变化相对小些。

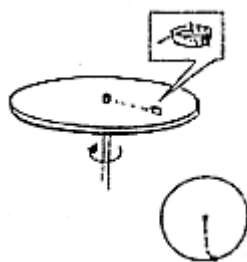


图 9

②当静摩擦力作为向心力时，静摩擦力的方向指向圆心，而不是指向切线方向，对此一些学生不易理解。如图 9 所示，一块扁圆木块放在转盘靠近圆心处，圆块上沾有墨水的线端指向圆心。当转速达到一定值时，圆块开始滑动，这时线在纸上留下轨迹。由轨迹是一条沿半径方向的直线，可证实上述分析。

声波

(1) 声的传播

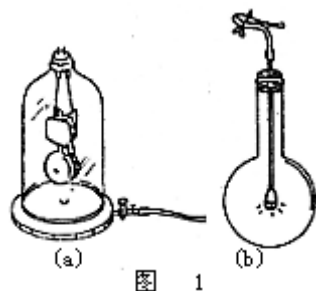


图 1

①图 1 (a) 所示为“真空铃”实验装置，玻璃罩内悬挂一电铃（悬挂线兼作电源输入线）。用抽气机抽罩内空气，随着罩内空气逐渐稀薄，尽管铃锤仍在振动，但铃声却越来越弱，直至完全消失。若再把空气放入，则声音逐渐加强，回复到原来状况。图 1 (b) 为“真空铃”的简易演示法。烧瓶内加入少量水，加热使水沸腾几分钟后塞上带有小铃的塞子。当水和烧瓶冷却以后，摇动烧瓶，瓶内的铃声几乎听不见，放入空气，声音增强。实验表明空气是传播声音的媒质。

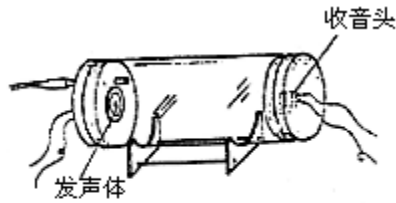


图 2

②图 2 所示的玻璃管两端软木塞上分别装有发声体和收音头。

抽去管内空气或往管内注水（注意不要留空气），可作上述空气和水是声音传播媒质的演示。

装置中发声体是一片音乐集成电路驱动的压电陶瓷片，压电陶瓷片用橡皮泥粘在软木塞上。收音头是一个灵敏度较高的驻极体话筒（可直接插入录音机外接话筒插口作放大），话筒用塑料薄膜包紧后嵌入软木塞。

③如图 3（a）所示，将金属棒（或木棒）插在共鸣箱上。将振动的音叉下端放在棒上端，在共鸣箱可听到音叉的声音。图 3（b）所示是用线作媒质传播声音的实验。演示说明振动通过棒、线（固体）也能传声。

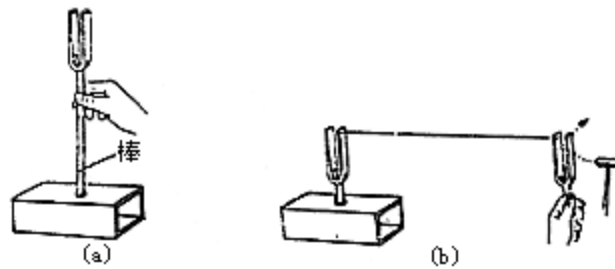


图 3

（2）声的反射

①如图 4 所示，大玻璃圆筒底部泡沫塑料上放一发声体（可用马表或如图 2 所示发声体）。用平板玻璃作反射板，转动平板角度，可听到声音强弱变化。实验表明当 $\alpha = \beta$ 时，声音最强，可知声音反射有和光线类似的性质。如实验中把玻璃平板改为多空纤维板（隔音板）或泡沫塑料板，不管如何改变角度都不会出现上述反射现象（或很不明显），说明这种材料反射性能差并有吸音特性。

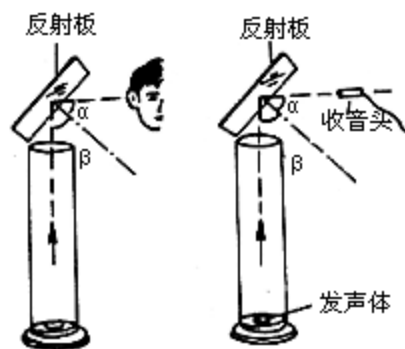


图 4

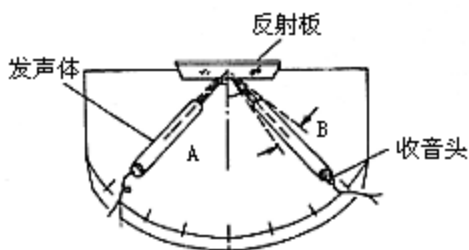


图 5

②如图 5 所示，圆筒 A、B 分别装有如图 2 所示的发声体和收音头，两筒的连杆可绕同一轴转动。

演示时让声音由筒 A 传出，通过筒 B 收音头几乎听不到声音。将反射板（玻璃平板）插入底座，从放大器扬声器发出较强声音，收音头可接收到较强信号。

实验中当 $\alpha = \beta$ 时，反射声音最强，但因衍射，在 α 角左右偏差某一角度，都可听到较强声音。

(3) 声的干涉

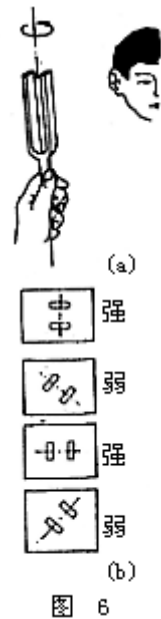


图 6

①如图 6 (a) 所示，持音叉于手中，用橡皮锤敲击，使音叉在耳边转动，可觉察在转一周时声音呈周期性强弱变化（图 6 (b) ），表明音叉两股发出的声波在空间发生干涉。如果在音量最弱位置使音叉停止不转，用纸筒套住其中一个叉股，就立刻会听到声音增强。抽去纸筒，声音又变弱。这进一步表明声波的干涉效应。如果用收音头（接有放大器）代替人耳，则演示效果更好。实验使用 500~1000Hz 的音叉，尤可得明显的变化。

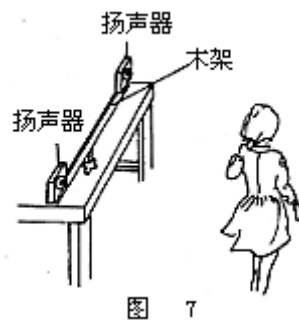


图 7

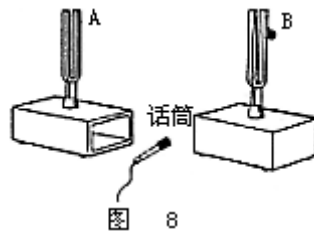
②如图 7 所示，两个扬声器相距 60cm，对称地固定在可旋转的水平木架上，两个扬声器的音圈同名端并联后接音频信号（2000Hz）。学生侧身站在木架前约 3m 处，与两扬声器连线平行慢步行走，会明显感到在空间的不同位置声音周期性的强弱变化。或者学生坐在位子上不动，缓缓地水平转动木架，使每个学生一只耳朵与两个扬声器的距离之差不断改变，也可听到声音强弱的周期性变化。

用无线话筒代替人耳时，将收录机拨到“FM”调频波波段。调节接收频率，使其与无线话筒的发射频率相同。此时在两扬声器前移动无线话筒，收音机发出的声音就会发生强弱的变化，同时收音机上作电平显示的发光二极管也有相应的变化。当话筒移到声音最强处时，发光二极管发光的个数最多；移到声音最弱处时，发光二极管发光的个数最少，甚至都不发光。

为使干涉效果更明显，两个声源应尽量近似为“点”波源，所以扬声器的口径宜小些，扬声器固定在助音板上或小型音箱内。

可用下述方法来判别两个扬声器音圈的同名端：将灵敏电流计与一个音圈引出端接成闭合电路，用手迅速将扬声器纸盆向里按一下，观察电流计指针偏转方向。用同样方法测试另一扬声器。如两次指针偏转方向相同，则两个扬声器接到电流计上相同符号接线柱的引出端，即为同名端。音频信号可从 J14465 型学生信号源取出，通过 J14468 音频功率放大器输出。

(4) 声的共鸣



①如图 8 所示，两支固有频率均为 440Hz 的相同音叉 A 和 B 相距约 20cm，两共鸣箱的开口端相对，无线话筒置于两共鸣箱间，较远处放调频收音机。

用橡皮槌敲击音叉 A，A 振动发声，然后，用手捏住音叉 A 的叉股，使它停止振动。这时，音叉 A 停止发声，但可听到音叉 B 通过无线话筒和调频收音机发出较强的声音。这表明音叉 B 跟音叉 A 发生了共鸣。在听到音叉 B 发声后，立即换手握住 B 的叉股，使 B 停止发声，则又可听到 A 重新发声，这表明音叉 A 又跟音叉 B 发生了共鸣。

将共振音叉所附带的一个金属卡子，固定在音叉 A（或 B）的一个叉股上。改变 A（或 B）的固有频率，再敲击使其发声，音叉 B 就不发生共鸣。这也表明，发生共鸣的条件是两个音叉的固有频率相同。

②如图 9 所示，把扬声器（直径约 5cm）接到低频信号发生器的输出端，并把扬声器的纸盆口对准竖放的玻璃管的上口，玻璃管的下口浸入盛水的玻璃筒中。使输出正弦波信号的频率为 $f=500\text{Hz}$ （这一频率的声音在常温下的波长为 0.68m），调节信号发生器，使扬声器发出全班学生勉强能听到的较弱声音。然后调节玻璃管浸入水中的深度，从而改变管内空气柱的长度。当空气柱的长度到达某一数值（本例中的最短共鸣空气柱长约为 17cm）时，发生共鸣，这时突然听到很强的声音，表明长度为 $1/4$ 波长的空气柱在外来声波的策动下发生了共鸣。把玻璃管上提，以增加管内空气柱的长度。当它约等于 $3\lambda/4$ （51cm）时，可再一次发生共鸣，又听到最强声音。改变信号发生器的频率，重做以上实验，仍可以发生共鸣现象。但共鸣时管内空气柱的长度数值不同。

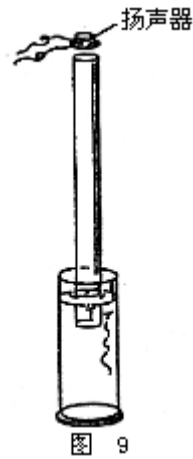


图 9

如采用 J14465 型学生信号源，则扬声器要通过晶体管收音机用的输出变压器接到信号源的输出端。也可用音叉代替扬声器和信号源，但音叉宜选用频率较高的，如 512Hz，这样用较短的玻璃管就可以发生共鸣。使用时，音叉一股的侧面应正对玻璃管的上口。图 10 所示是改变空气柱长度的几种方法：(a) 以虹吸管原理，上、下移动烧杯，管内水位发生变化。(b) 利用 Y 管连接自来水和排水管，启、闭自来水和排水管阀门，管内水位发生变化。(c) 左、右移动管内活塞位置。

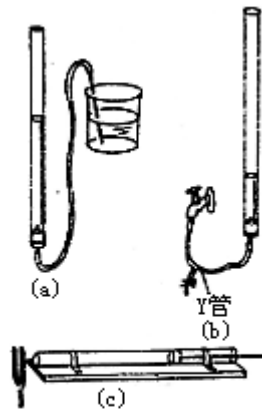


图 10

振动

(1) 简谐振动

①用水平方向振动的弹簧振子来演示振动的回复力 F 与位移 x 成正比、方向与位移相反（即 $F=-Kx$ ）的关系是最简明的。

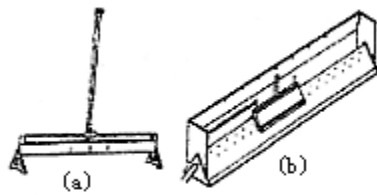


图 1

如图 1 (a) 所示，细线悬挂圆柱状振子，以平衡振子重力。当把振子向一边拉开后放手，振子作往复运动。由于两边弹簧一根拉伸，一根压缩。总的恢复力为一根弹簧弹力的两倍，方向指向平衡位置，大小和位移成正比。所以振子作简谐振动。改变振子质量，可演示振动周期和振子质量成正比。

如图 1 (b) 所示，是用自制简易气垫导轨的滑块作振子，一边用弹簧系着。因气垫导轨通气后滑块运动摩擦极小，所以用此装置演示弹簧振子效果良好。实验时振幅应尽量大些，以便明显看到振子振动过程中，其位移和速度的变化情况。

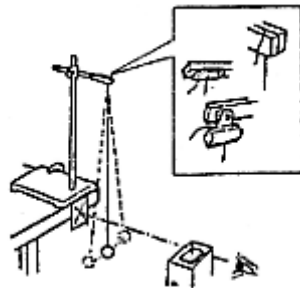


图 2

②单摆（图 2）是简谐振动的重要特例，它的演示比较简单，下述几个方面可供演示时参考：（a）摆长一般取 0.5~1.5m。

摆长太短，摆锤只要偏离平衡位置很小的距离，其偏角就很大，因而不能看作是简谐振动；摆长太长，不但演示不方便，而且摆线的质量不能忽略，整个系统的质心就不能看作在摆球球心上。（b）摆线悬挂处，应使摆线长度容易测量；摆动时摆线长度不发生变化。图中所示几种悬挂方法，不但能达到上述目的，而且改变摆长也比较方便。（c）单摆必须固定在牢固的支架上，以免悬线处发生摆动，损耗能量。（d）用铁球作摆锤，在平衡位置下端放磁铁（可用电磁铁），通过演示有无磁场时单摆的周期变化，说明重力加速度对单摆周期的影响。（e）测量单摆周期时，必须从平衡位置开始计时，因此时摆锤速度最大，能比较精确地确定通过平衡位置的时刻。按图示方法在单摆平衡前、后设置标志，以确定单摆通过平衡位置时的时刻。

（2）振动图线

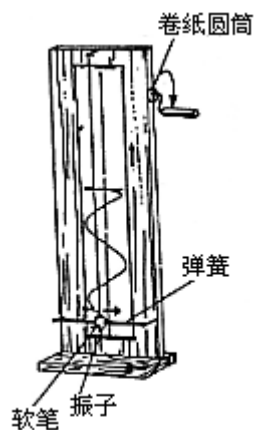


图 3

①如图 3 所示，振子中央插一支软笔。当振子振动时，匀速摇动卷纸圆筒，则笔就在纸上绘出一条振动图线。

装置中振子质量应大些（如 2kg），弹簧的倔强系数要选择适当，使振子振动周期大于 1s。

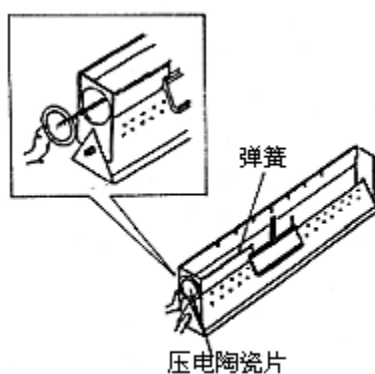


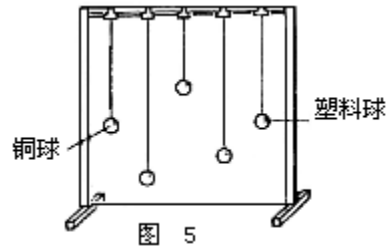
图 4

②图 4 所示装置仍使用图 1 (b) 所示的气垫导轨，只是将粘有压电陶瓷片的塑料板固定在气垫导轨一端，振子弹簧一端焊在陶瓷片铜基片的中心，陶瓷片两根电极的引线接到示波器的 y 输入端。

调节示波器，使滑块在弹簧弹力作用下，作简谐振动，荧光屏上就呈现稳定的、幅度适当的正弦曲线。因压电效应产生的电动势正比于陶瓷片所受外力（弹簧对它的弹力），而弹力又正比于滑块对于平衡位置的位移，所以示波器显示的可认为是振子的位移-时间图线。

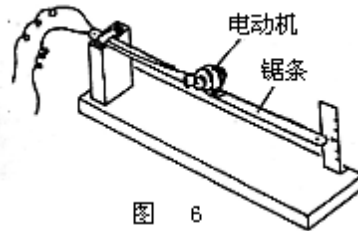
演示时示波器的输入耦合开关置“DC”档，“Y 衰减”置“10”或“1”，频率范围置于“10~100”。

(3) 共振



①如图 5 所示，支架的小夹子上分别拴上铜球和塑料球成为 5 个摆。当铜球摆动时，通过横梁对其他摆施加周期性策动力，其他摆随之振动起来，作受迫振动。经过一段时间只有和铜球有相同摆长的塑料球摆动幅度最大，这就是共振现象。

受迫振动的摆球选用硬泡沫塑料球，是因为其密度小，振动时空气阻力大，可使振幅较快达到稳定。



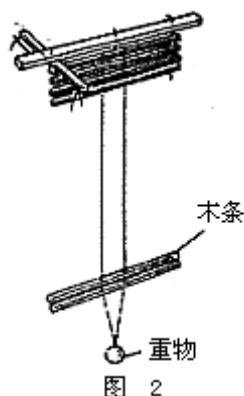
②如图 6 所示，装有玩具小电动机的钢锯条一端固定在支架上，电动机轴上装有偏心轮。接通电源，电动机和锯条发生振动。改变电动机转速（可改变电源与电动机中间串联的电阻器的电阻），当它达到某一值时，可看到锯条振幅特别大。改变电动机在锯条上的位置，可改变固有频率。

横波和纵波



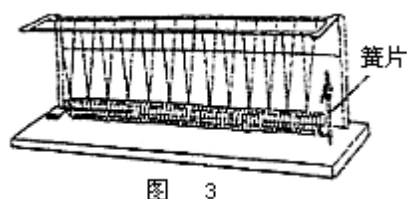
(1) 如图 1 所示，手持橡皮管（管长约 5m，直径约 1cm，管内用细砂灌满，两端扎住封闭）一端，另一端放在地面上，迅速抖动 1~2 下，可观察到图示形状的横波自上向下传播。

橡皮管一端放在地面上和在管内灌细砂（或者水），都是为了使波速慢些，以看清橡皮管的横波形成和传播情况。



(2) 图 2 所示为一种帘式横波演示器。它用细绳将 40~60 根木条（ $50 \times 1 \times 1 \text{cm}^3$ ），连接起来（细绳间距 5cm，木条间距 3~4cm），用木梢使其位置固定，最下面悬挂一重物（200g）。棒端涂白色，以便观察。演示器悬挂在支架上。

演示时，拨动上面的木条在水平面内振动，随后就可观察到振动向下传播。从木条前端的运动情况，可以清楚地看到，每一质点离开平衡位置后又回到平衡位置，振动方向和波的传播方向垂直，而且可以看到它们是依次开始振动的。木条根数多些能减少反射波的干扰。

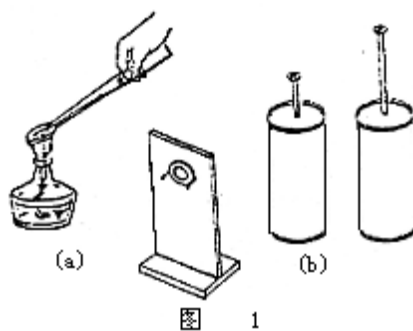


(3) 图 3 为纵波演示器，主要是一根悬挂在支架下的长螺旋弹簧。调整振子在簧片上的位置，使簧片振动频率为 1.5~3Hz。拨动弹簧一端簧片，就可看到弹簧疏密周期变化的纵波传播过程。每拨动一次弹簧，就有一密集部分出现，并向另一端传播开去，这样就在弹簧中形成一前进的纵波。演示纵波中某一“质点”的振动情况，只要在一匝上贴上一张小纸条即可。

螺线管末端的吸收能量装置主要是利用摩擦来消除反射波。

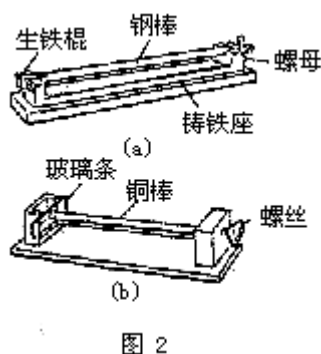
热膨胀

(1) 固体的热膨胀



①如图 1 (a) 所示，木板上两枚小钉使圆铜片刚好通过。对铜片加热，铜片被钉卡住；冷却后，铜片从两钉间滑下。

如图 1 (b) 所示，在废食品罐底部用钉打一孔。对钉加热，钉就穿不过此孔；冷却后，钉自动落下。



②图 2 (a) 为固体缩力演示器，钢棒一端的圆孔里插有生铁棍（可用铸铁电焊条折断后代用）。把钢棒加温至红热时，立即把钢棒放在铸铁座上支架的卡口上，转动蝶形螺母，把钢棒拉紧。钢棒冷却后，即可把生铁棍拉断。实验证明钢棒冷缩时对生铁棍产生很大的剪切力。如用湿布蒙在钢棒上可加速冷却，缩短演示时间。生铁棍拉断时有时会飞出，应注意安全。

图 2 (b) 所示为固体胀力演示器，利用螺丝使铜棒（直径 1cm、长 20cm）顶紧玻璃条（厚 5mm）。对铜棒加热，玻璃条被挤断。演示了金属热膨胀受阻时产生的破坏作用。

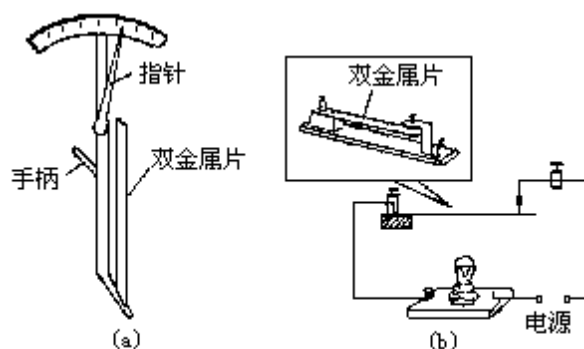


图3

③图3(a)为双金属片演示器，由长、宽均相同的两块金属片（黄铜片和铁片）铆合在一起组成。它的一端固定在附有手柄的金属架上，另一端弯曲时可拨动指针偏转。在常温下，指针在标度盘中央；当温度变化时，双金属片由于两种材料的线胀系数不同而发生弯曲，指针指示弯曲程度。

演示加热时应进行两次，一次加热铜片一面，另一次加热铁片一面，结果双金属片两次都弯向铁片一方。由此可说明：双金属片受热弯曲的方向与加热哪一面无关，只取决于双金属片由哪两种金属组成。如果用比室温低的水或其他致冷物质（如喷上丁烷气体）使双金属片冷却，则双金属片弯向铜片方向。

图3(b)所示装置可研究双金属片原理及简单的应用。当箱内温度低于所需温度时，双金属片使电路接通，加热灯泡对箱内空气加热；当达到所需温度时，双金属片弯曲，电路切断，停止加热……。这样循环往复，就把温度控制在一定范围内，这就是恒温箱的原理。

(2) 液体的热膨胀

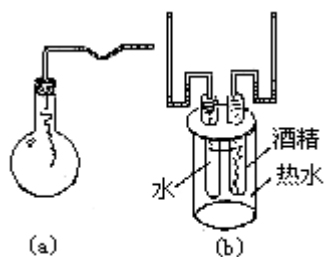


图4

①如图4(a)所示，瓶内放入染色的酒精（酒精的体胀系数约是水的5倍，随温度变化明显），将其浸入热水中。液柱移动，说明瓶内液体体积膨胀。如图4(b)所示的装置中，一试管装染色水，另一试管装酒精，并使两U形管的液面相平。

将两管浸入热水中，从U形管两液面变化，说明液体受热膨胀；从变化的快慢不同，说明两种液体受热膨胀程度不同。

②水的反常膨胀演示装置如图5所示，瓶内装满 10°C 干净的水（可用冷开水），瓶塞插有细管和温度计。盖上塞子后，水受到挤压，沿着玻璃管升到一定高度（做好记号）。把瓶埋在拌有盐的碎冰里，瓶内水从 10°C 逐渐下降到 4°C ，同时观察到玻璃管里的水柱逐渐下降。这说明在 4°C 以上的时候，水和其他物质一样，也是受冷收缩的。当温度继续下降到 3°C 、 2°C 、 1°C 、 0°C 的时候，可以看到玻璃管里的水柱反而逐渐上升，不仅升高到原来高度，甚至会从管口溢出。这说明水在 4°C 以下具有冷胀热缩的特性。如果在冰和盐里加上点冷水，可以使温度下降得更快些。

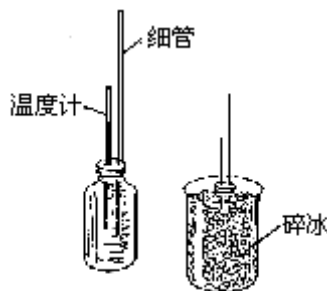


图5

(3) 气体的热膨胀

①如图6(a)所示，用酒精灯给烧瓶加热，瓶内空气因受热膨胀，试管内水沿直管从细嘴喷出。演示时一定要把直管插到水底，瓶内空气要保持持续升温状态。

如图6(b)所示，烧瓶的瓶塞插有L形玻璃管，将玻璃管前端浸在染色水内。用热水洒在烧瓶上，气泡从管口冒出，说明瓶内空气膨胀；当冷却后，瓶中空气收缩，则水被压入瓶内。

②如图7所示，在烧瓶内倒扣一气球。用酒精灯对瓶均匀加热，烧瓶内空气受热膨胀，气球被吹鼓竖起来。

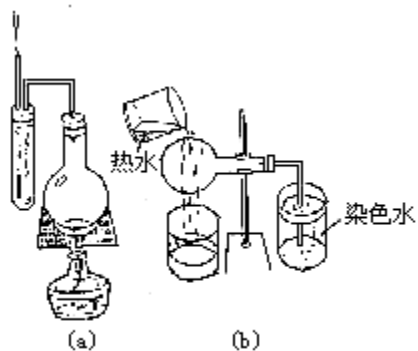


图 6

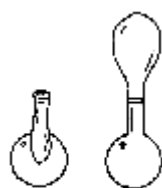


图 7

热传递

(1) 热传导

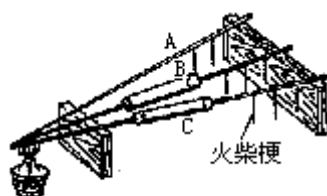


图 1

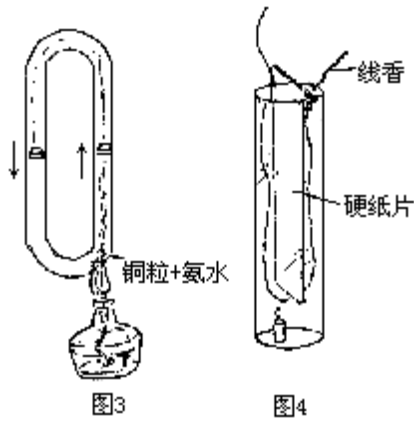
①图 1 所示装置可演示不同材料的导热本领。A 为金属棒，B、C 是玻璃管，管内分别注入水和充入空气，两端通过软木塞连接金属棒。如图加热时，从火柴梗（用牛油或蜡粘上）落下的先后，可显示金属导热本领比空气和水强得多。



②图 2 所示，贴有纸条的铜皮和铁皮固定在 T 形支架上，纸上涂有感温涂料（将氯化汞（ HgCl_2 ）10 份、碘化钾（ KI ）25 份、硝酸银（ AgNO_3 ）13 份依次溶解在水中，将沉淀物清洗后取出，最后将沉淀物跟浆糊拌和即成）。演示时，用酒精灯缓缓加热 T 形支架，可观察到随着温度变化，铜皮和铁皮上的感温涂料色彩先后由黄橙色变为赤橙色（约 45°C ），冷却后又回复原色。

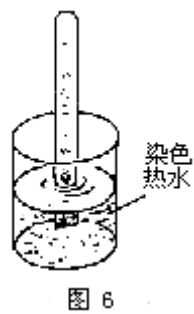
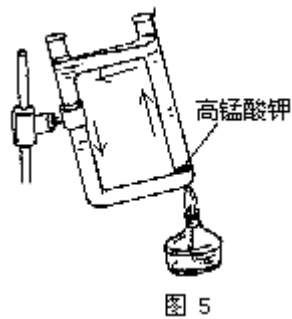
(2) 对流

①图 3 所示，把氨水（ NH_4OH ）滴在 U 形管管内铜粒上后，把另一 U 形管对合覆上，这时会产生棕红色气体（ NO_2 ）。加热 U 形管，会看到气体向上升起，并沿着管子产生对流。



②如图 4 所示，长玻璃筒（或煤油灯罩）的中间插一块硬纸片（不插到底），将点燃的短蜡烛放在筒的底部侧壁处，在没有蜡烛的另一侧上端放一支点燃的线香，从烟的运动路径，显示了空气的对流现象。如抽出纸片，筒内空气不对流，过一会儿蜡烛就熄灭。

③如图 5 所示，框形玻璃管内装满冷水，盛有高锰酸钾颗粒的小匙插入框形玻璃管一侧。对管的右下角加热，则紫色的高锰酸钾溶液显示冷、热水的对流情况。



④如图 6 所示，将装有冷水的试管倒插在染色热水中，会观察到染色热水上升到试管里去的对流现象。

(3) 热辐射

①如图 7 所示，废食品罐剪去底盖后成为对称的 A、B 两半，A 的内表面用蜡烟熏黑，B 的内表面保持光亮，外表面用凡士林各粘一根火柴，A、B 间放一杯热水，从两火柴掉落的先后说明黑色表面吸收辐射热本领比白色表面强。

②如图 8 (a) 所示，把外表面一半熏黑、一半光亮的废食品罐套在灯泡上（可选用 220V，40W 柱形灯泡）作为辐射热源，从左、右两支空气温度计水柱的移动，说明黑色表面辐射热量的本领比浅色（光亮）表面强。

也可直接用铝箔包裹灯泡，将一半涂以黑色，一半保持光亮表面，作为辐射源（图 8 (b)）。

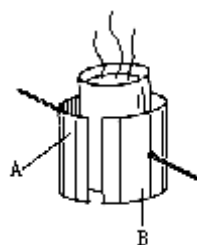


图 7

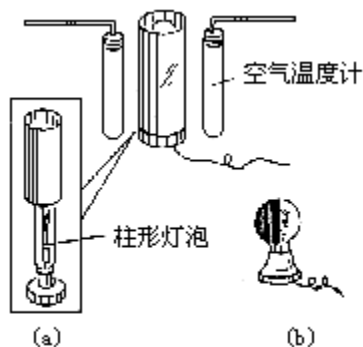


图 8

比热

如图 1 所示，两试管内分别倒入质量相等的二甲苯和醋酸，且将它们均放在同一烧杯内用水加热（这两种液体导热系数相近，可认为两试管吸热情况基本相

同)。温度计显示二甲苯比醋酸温度升高得快，说明质量不同的物质，吸收相等热量时，二甲苯的比热 ($1.76\text{J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$) 较小，而醋酸的比热 ($2.63\text{J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$) 较大。二甲苯和醋酸加热时有异味，要求加热时间短，并做好通风工作。

如果在两试管中装等质量的水和煤油进行演示，试管内液体的吸热主要通过传导方式进行，由于水的导热系数 ($0.00543\text{J}/(\text{cm}^2\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{s})$) 约是煤油的导热系数 ($0.001275\text{J}/(\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{s})$) 的 4 倍；而水的比热仅为煤油比热的 2 倍，所以在实验中比热大的水的温度，反而比比热小的煤油升得快。只有在加热过程中随时搅拌，让试管内液体吸收的热量，除传导外，主要通过对流迅速传到液体各部分，使水和煤油吸热情况大致相同，才可得到比较正确的结果。



图 1

有些教材中介绍图 2 所示的演示装置，由于直接加热，热传递的主要方式是对流，但要控制吸热情况相等比较困难；加上传热情况不完全是对流，致使煤油和水上升的温差很小，偶尔还出现反常现象。只有在加热过程中不断对两液体搅拌，煤油的温度才上升得比水快。

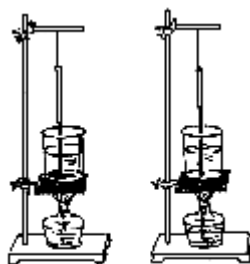


图 2

分子热运动

(1) 扩散

①如图 1 (a) 所示，一条用酚酞溶液浸湿的试纸竖直贴在广口瓶内壁，瓶口盖一玻璃片，另取一只盛有氨气的广口瓶倒放在玻璃片上。演示时抽去玻璃片，由于气体扩散很快，可以观察到原来白色的试纸自上而下地呈现红色。

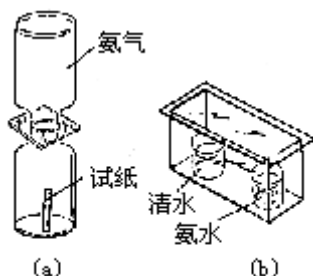


图 1

氨是无色气体，为了判定氨气是否充满，可用玻璃棒沾浓盐酸少许接近瓶口，如有白色烟雾发生，则瓶内氨气已充满，这时可用玻璃片盖住瓶口备用。

如图 1 (b) 所示，两烧杯内分别倒入浓氨水和清水，同时各滴入几滴酚酞试剂，盛氨水的一杯显红色，而盛清水的一杯不显色。将两个烧杯用玻璃缸罩上，可以观察到盛清水的烧杯的液面逐渐呈现红色。这说明氨分子从一个烧杯运动到另一个烧杯中去了。

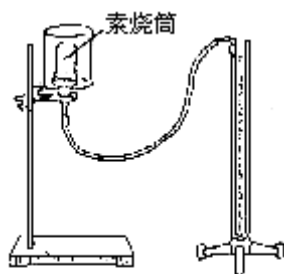


图 2

②图 2 所示，是一种多孔素烧筒（没上釉的陶瓷），筒口套有底座，管嘴用橡皮管和微小压强计连接（刚接上压强计时，两边的液面会发生一些变化，但由于仪器多孔透气，几秒钟后即回复到同一水平面）。把充满氢气的烧杯罩住素烧筒，这时可观察到压强计液面发生变化，表明素烧筒内气体压强增大。这是因为氢分子的质量比空气分子的质量小，因而在相同温度下，氢分子的平均速率比空气的平均速率大，进入素烧筒里的氢分子就比从素烧筒里出来的空气分子多。在同一积内，由于气体分子数增多，压强就增大。取走烧杯，压强计两支管的液面向相反方向变动，甚至连接素烧筒支管的液面反而高出另一支管的液面，表明

素烧筒内气体压强反而减小了，而且低于大气压。这是由于素烧筒里氢气分子向外扩散的数目，比窗外空气分子向素烧筒内扩散的数目大。

演示说明了氢气的扩散。实验中所用氢气可以用启普发生器产生。

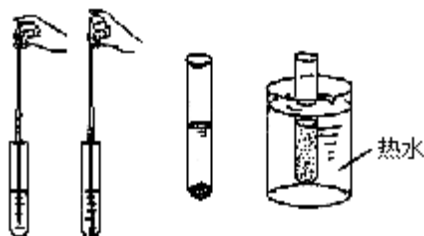


图 3

③如图 3 所示，两支试管内注入清水。用移液管吸入少量红墨水（品红），擦去管外有色溶液，再吸入一些空气。将移液管分别插入两试管底部注射溶液。注射完毕后，将移液管慢慢从清水中提起，当管嘴到达分界面时再吸入一点清水后取出，这样试管中清水和溶液间就有明显界面。将其中一试管放入盛有热水的烧杯中，可看到下层的有色溶液很快扩散到清水中去，而另一管的界面仍比较明显，由此可说明液体分子的扩散现象和扩散随温度的升高而加快。

实验时试管浸入热水的深度要高于管内水面，不然学生会误认是下层有色液体受热，产生对流而向上运动。

此实验也可在两烧杯中分别倒入冷水和热水，用滴管分别向两杯水中滴几滴红墨水，少时可看到扩散现象，而热水中扩散更为明显。

一般液体的扩散实验经常用水和硫酸铜来进行，但实际上观察到的溶液呈蓝色并不是硫酸铜分子的颜色，而是正价铜离子的颜色。尽管从铜离子的扩散可以推知硫酸铜分子的扩散，但用它来证明分子的扩散运动不太合适。另外要静置几天，才能看到两液体的分界面逐渐模糊，最后达到均匀混合。

(2) 分子引力

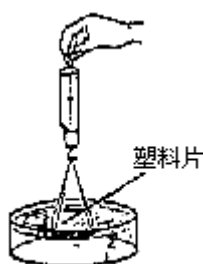


图 4

①如图 4 所示，用弹簧秤（选用称量小的）悬挂方形塑料片，此时弹簧秤读数即为塑料片所受重力。将塑料片水平地接触水面，塑料片就贴附在水面上（不要浸没水中）。向上提弹簧秤，使塑料片逐渐离开水面，从弹簧秤读数可知，在脱离水面的瞬间，拉力超过塑料片所受重力，而且塑料片朝下一面是湿的，这说明塑料片离开水面时两层水间发生分裂。把塑料片拉离水面而增加的力显然是用来克服水分子间引力的。

②如图 5 (a) 所示，两个装有挂钩的相同的铅圆柱体。演示时应先将两铅圆柱体的接触表面的氧化层用锉刀除去（锉时要向一个方向），然后按图示的箭头方向，沿锉纹水平推压，只要压力大些而不扭转圆柱。压紧后小心地把它挂在支架上，并轻轻挂上重物。在一般情况下可挂 2~3kg 重物。为防止重物突然落下，可在重物下放一砂箱。

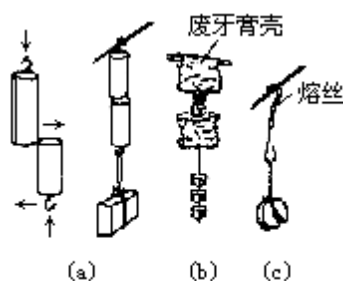


图 5

用两废铅质牙膏壳，管口锉平后压紧（图 5 (b)）；或用两段大电流（如 20A）熔丝，接触处用刀刮光后压紧（可用钳子夹紧）（图 5 (c)），也可演示固体间分子引力。

(3) 分子间有空隙如图 6 (a) 所示，在长约 1m、一端开口的玻璃管（可用托里拆利管）里装上一半水，再沿管壁慢慢地把染色的酒精注满，这时可清楚看到水和酒精的分界面。把管口封闭，上下颠倒几次，使水和酒精混合在一起，这时发现混合后液体体积变小（酒精和水体积之比取 1:1，混合后体积约减少 3.5%），由此证明分子间有空隙。为了增强演示效果，可选用如图 6 (b) 所示的中间粗、两端细的管子。

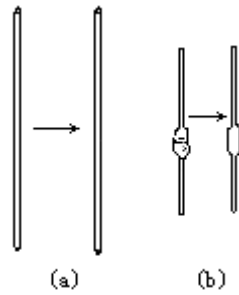


图 6

(4) 布朗运动

①用显微镜观察液体分子的布朗运动。经常用来观察布朗运动的材料有花粉，烟墨，藤黄配制的悬浊液。

花粉是植物雄蕊花药里的小颗粒，取自各种瓜类、玉米等。花粉肉眼能看清，由于它的质量较大，布朗运动现象就不明显。把花粉浸在水里，搅拌后细胞壁破裂，形成许多原生质组成的微粒。这些肉眼看不见的微粒，由于质量很小，很易在外力作用下运动，它是观察布朗运动的好材料。

墨即普通书写用的松烟墨，优点是取材容易，缺点是颗粒不够均匀，色泽较差。必须采用上等松烟墨，劣质墨颗粒过大，不易观察到布朗运动。配制时只要在清洁的载玻片上放点水，用松烟墨轻擦几下，再用玻璃棒搅拌一下即成悬浊液。

藤黄是热带产的一种黄色树胶，可作为中药或颜料，有剧毒，可在中药店或国画社买到。把藤黄少许，先溶于酒精中，再将它滴入蒸馏水中调稀，或直接将藤黄放在有水的玻璃片上轻擦几下，即成悬浊液。

市售的碳素墨水质量相差很多，选用质高的碳素墨水，其碳素粒子较细。将蒸馏水（或冷开水）盛在小号烧杯中，滴入 2~3 滴碳素墨水，用玻璃棒稍加搅拌即成悬浊液。

上述几种悬浊液配制时浓度应适宜，判断悬浊液浓度是否合适的方法是将“夹”有少量悬浊液的载玻片对着亮处观察，若看到略有颜色，则说明浓度适中；如看到颜色太深或几乎没有颜色，则应重新配制。

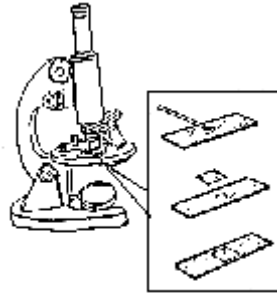


图 7

用洁净的玻璃棒，取已配制好的悬浊液，滴入洗净揩干的载玻片凹坑内，用盖玻片盖好，注意勿使凹坑中残留空气泡，所用盖玻片必须采用薄的（一般约 0.12mm 厚），越薄越容易观察到现象。取石蜡碎末放在盖玻片四周，用小功率电烙铁将蜡熔化，即可将悬浊液封于载玻片凹坑中（图 7）。一般这样处理后可保存 1 周左右。

观察时显微镜镜头、载玻片、盖玻片必须擦净。任何一点污迹都会给观察带来不良后果。

观察花粉、墨等悬浊液时，显微镜的倍数必须在 600 倍以上。倍数大些像比较清楚，但显微镜倍数越大，物距越短，因此调节时必须先转动升降手轮，使镜筒下降直到物镜下端和盖玻片接近但不接触为止。再调节微动螺旋，使像清晰。

观察藤黄悬浊液时，因藤黄颗粒较小，应用 1500 倍的高倍显微镜。若大量颗粒向某一方移动，可能是载玻片没放置水平，应仔细调平；若颗粒运动缓慢，可能是气温偏低，可用红外线灯微烘烤。从显微镜里观察布朗运动，因各人眼球的曲率各有差异，要经过调节后才能看得清晰。

②用显微镜观察气体分子的布朗运动。悬浮在静止气体中的烟雾微粒也可显示布朗运动。如图 8 所示为烟雾观察盒，将吸液玻璃管吸满烟，然后慢慢将烟压入观察盒内。当盒内积满烟时，用盖玻片盖严。观察盒放在显微镜（倍率 100~150）的载物台上，其观察窗（即盖玻片）中央部分对准物镜的正下方，且使物镜尽量靠近观察窗。聚光小灯泡通过短焦距透镜作观察盒照明，调节镜筒高度直到清楚地看见烟的颗粒为止。在视野中，若颗粒向同方向流动，这是空气的对流。短焦距透镜可用注满清水的小圆柱状（直径约 1.5cm）药片瓶密封后代用。

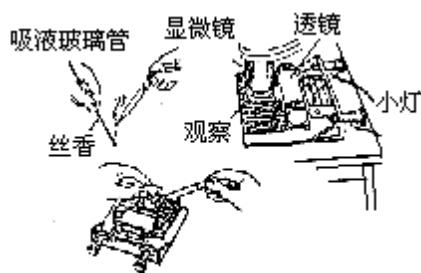


图 8

③模拟布朗运动

如图 9 (a) 所示为布朗运动模拟器，摇动手柄时，凸轮带动小锤敲击弹簧圈，环内滚珠无规则运动（模拟分子），撞击电木块（模拟小颗粒），使它作无规则运动。

演示时把它放在书写投影器上投影使用。

如图 9 (b) 所示，用气体分子运动演示仪模拟布朗运动。透明圆管的振动板上放一些直径约 2mm 的硬塑料小球，用来模拟分子；再放入几块小球状的硬泡沫塑料（体积约 1cm^3 ），用来模拟小颗粒；然后放上浮动板。当电动机转动时，偏心连杆机构使振动板上下振动，管内硬塑料小球做无规则运动，撞击泡沫塑料小球也做无规则运动。利用点光源（汽车灯）在屏幕上获得仪器放大阴影的像。实验时调节电动机的转速和振动板与浮动板间的距离，以得到较好的效果。

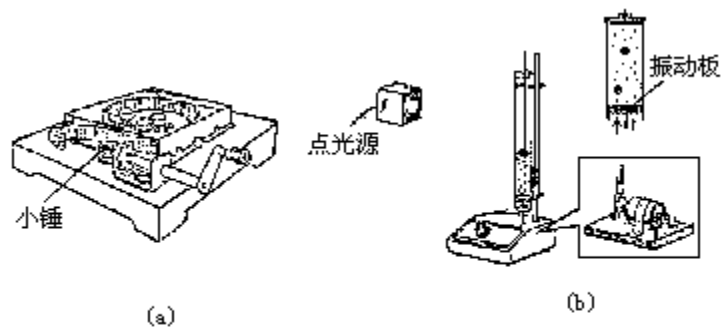


图 9

晶体的熔解和凝固

(1) 晶体熔解和凝固是物态变化的重要实验，教学中常用萘的熔解和凝固过程中温度保持不变的现象来说明晶体的性质。若按图 1 (a) 所示装置进行实

验，在熔解过程中温度保持不变的时间很短，有时甚至看不到这一现象。这是因为萘在熔解之前热传递的主要方式是热传导，而萘又是热的不良导体，所以在实验中可能出现烧杯中水的温度超过了萘的熔点，靠近管壁的萘已开始熔解，而试管中心的萘的温度还低于萘的熔点，此处萘的温度仍继续上升，这样就得不到萘在熔解和凝固过程中温度不变的结论。

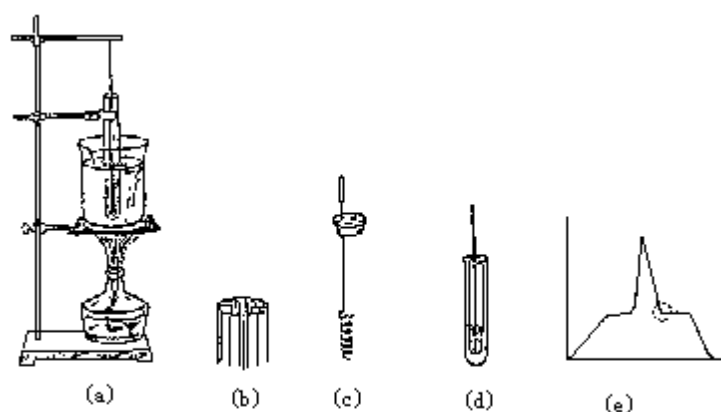


图 1

下述措施可提高演示效果：

①实验所用的萘选用纯萘或卫生球（樟脑丸），后者熔点、凝固点略低。实验前把萘研成粉末，颗粒均匀，并且以细为好（粉状导热性比块状好）。或在萘粉内拌入金属粉末、金属细丝或插入导热铜片（图 1（b）），以改善导热性能。萘粉的量应根据容器大小而定，要求萘熔解再凝固后能够浸没温度计的泡。

②实验过程中不断搅拌试管里的萘，使各部分萘的温度一致，直到萘全部熔解为止。搅拌器可做成螺旋状（图 1（c）），这样除搅拌外，还可起导热作用。

③温度计宜安置在靠近试管壁处，但不要碰到试管（因为这里的萘最早熔解）。

④用容量较大的烧杯装水，酒精灯的火焰不要过大，并隔着石棉网进行间接加热，以保持水温稳定上升。为了减少演示时间，可在烧杯里注入 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ 的热水，然后对温水加热（萘易燃，不能用火焰直接加热）。

⑤如图 1（d）所示，把试管做成夹层，这样水浴时使封闭空气受热，通过热辐射对萘粉加热。也可利用远红外线作热源，远红外线穿透本领大，加热性能好，能满足萘熔解实验中对热源的要求。

（2）用海波（硫代硫酸钠晶体，分子式为 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ）代替萘粉。常用的海波导热性能好，熔点低，熔解后流动性能好，可不用搅拌器，而且无气味，溶于水，清洗方便。但海波在冷却过程中会出现过冷现象，即温度低于凝固点仍不

开始凝固（图 1（e）中虚线所围处），故只能用来演示晶体在熔解时温度不变。另外海波在实验过程中有结晶水损失，不能重复使用。

沸腾

（1）如图 1 所示，玻璃筒装一半水，软木塞上插有温度计 A、B 和弯成直角的玻璃管，玻璃管要粗些以便排出蒸汽。演示时用电热器加热，可见到温度升高时溶解在水中的空气析出，形成小气泡。水温到达沸点，则生成大量气泡，并在上升过程中迅速变大，到达水面，气泡破裂放出大量蒸汽，同时玻璃管有大量蒸汽喷出。这表明沸腾时发生剧烈的汽化。在沸腾过程中温度计 A 的示值保持恒定，并且与温度计 B 的示值相等。这表明液体有一定的沸点，在沸腾过程中液体的温度不变，汽化成同温度的蒸汽。停止加热，过一会沸腾停止，则温度计 A 示值仍与沸腾时相同。这表明发生沸腾的条件不仅要液体温度到达沸点，而且要继续吸收热量。

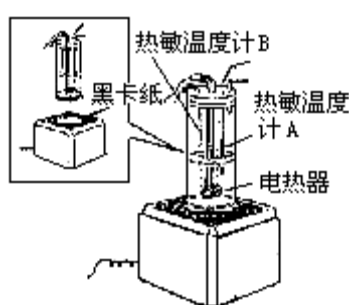


图 1

整个装置用投影器光源从底部向上照明以获得沸腾过程的清晰呈现。筒内的水经过多次沸腾，气泡会减少。在水里放一些碎瓦片或微孔轻混凝土块，它们能吸附空气，沸腾就容易形成，现象便更为明显。

（2）沸点跟压强有关

①如图 2 所示，将一杯热水（不低于 80°C ）放在抽气盘上，扣上玻璃罩，对罩内抽气，罩内气压降低，热水沸腾起来。水里投入少量碎瓦粒，沸腾时气泡就增多。为防止水气进入抽气机，可在抽气机与抽气盘连接的管子上，加用氯化钙干燥瓶，以保护抽气机。

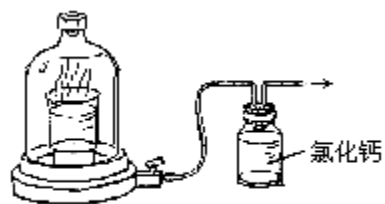


图 2

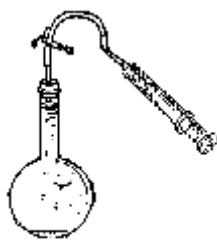


图 3

②如图 3 所示，烧瓶内注入烧开的水至离瓶口几厘米处，把带有玻璃管的橡皮塞塞紧。用注射器抽瓶内气体，瓶内压强减小，水又开始沸腾。为了保证演示效果，瓶内装水后剩余的空气体积应尽量小些。室温较低时，应先在瓶内装满热水保温，演示时换上开水。水染上颜色，现象更明显。

液体蒸发时温度下降

(1) 如图 1 所示，将浸有酒精的纱布盖在烧瓶上，水槽内有色水在玻璃管中逐渐上升。如果对纱布扇风，酒精蒸发快一些，有色水在玻璃管内上升便高一些。这说明，酒精蒸发时吸收热量，烧瓶内空气温度下降，压强变小。

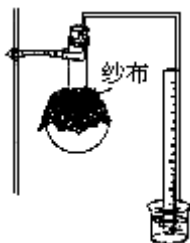


图 1

(2) 晶体管的穿透电流一般随温度降低而减小。选用穿透电流大的锗管，按图 2 所示用 $R \times 1K$ 万用表测其电阻值，管壳用酒精沾湿，当酒精蒸发时，因温度降低，致使晶体管穿透电流减小，万用表上指针偏转发生明显的变化。



图 2

碘的升华 凝华



图 1

(1) 如图 1 所示，将少量碘放在燃烧皿里，上面罩一玻璃漏斗（漏斗嘴封闭），将燃烧皿放在砂盘上。加热砂盘，紫黑色的碘晶体直接升华为紫红色碘蒸汽（碘蒸汽应为深蓝色，因这里夹杂着空气所以成紫红色），蒸汽遇到盖在上面的漏斗即冷却变成固态的碘。停止加热，能在漏斗内壁上看到针状的碘晶体。做此实验时，漏斗必须洁净透明，并配以适当灯光照明。注意碘蒸汽有毒，不要吸入。



图 2

(2) 取注射后废弃的安瓿（5~10ml）一只，洗净、烘干后放进一粒针头大小的碘，用酒精灯均匀加热管口的玻璃，直至烧软，同时将一根玻璃棒的头部烧熔，使棒上的玻璃溶液滴在安瓿口上，直至管口封闭（图 2）。封口时应让管

口朝上，把空气驱赶出去。将此管放在温水中略微加热，无色透明的安瓿就变成紫红色。温度降低时，碘又凝结成粉末状的固态微粒，安瓿重又变为无色透明。选用废碘钨灯也可替代上述安瓿演示。

饱和汽压

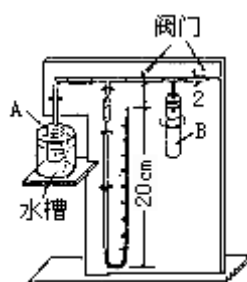


图 1

(1) 图 1 所示为饱和汽压示教板。演示时，开启阀门 1、2 慢慢抽气，当 U 形压强计两管水银面相平（标度“0”）时，关闭阀门 1、2，压强计中的水银柱高度不变，说明装置不漏气，此时可以进行实验。用注射器把少量水通过橡皮塞注入 A 内，这时试管 A 内压强极小，水立即蒸发，水蒸气产生的压强使气压计开管端水银柱下降，闭管中水银柱上升。如果试管 A 内还有水没有蒸发，则压强计的水银柱高度差就表示水的饱和汽压（在室温 20℃ 时，这个高度差应在 17.5cm 左右）。在水槽内倒入热水，压强计高度差增加，说明饱和汽压随温度增加而增高。打开连接试管 B 的阀门，这时水的饱和汽体积增加（一部分进入试管 B），但从气压计的液体柱高度差可以看出饱和汽的压强不变，只是原来试管 A 内水量减少。

为了比较不同液体的饱和汽压，可取下原试管 A 换上清洁试管，注入几滴酒精或汽油（不能用乙醚，因乙醚在 20℃ 时，饱和汽压达 440mmHg，小型压强计无法指示）。

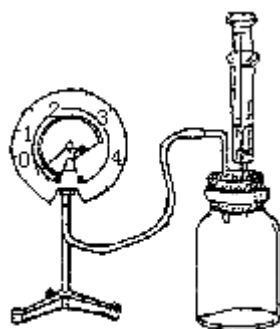


图 2

(2) 如图 2 所示, 瓶内空气的压强约为 1 个大气压, 压强计的示数为零 (压强计的示数是所测气体的压强和大气压差值)。用注射器注入几滴乙醚, 乙醚在瓶中很快全部蒸发, 变成乙醚蒸汽。压强计的示数即乙醚的未饱和蒸汽压强。继续注入几滴乙醚, 可看到, 注入的乙醚又都全部蒸发变成乙醚蒸汽, 压强计的示值逐渐增大。这表明, 乙醚的未饱和蒸汽压随未饱和汽的密度增加而增大。继续注入乙醚, 直到滴入的乙醚不再蒸发, 瓶底出现残留的液态乙醚, 这时压强计的示数趋于某一定值。再继续注入乙醚, 压强计示数也不再增大。此时压强计的示数, 为该温度下的乙醚的饱和蒸汽压。这表明, 在某一温度下, 未饱和汽的压强小于饱和汽的压强。

露点的测定

(1) 如图 1 所示, 用软布把金属盒和环形金属片的抛光面擦光亮, 金属盒内注入水和硝酸铵, 并插入温度计 (可采用 $-10\sim 50^{\circ}\text{C}$ 煤油温度计), 轻轻搅拌, 使硝酸铵在水中加快溶解, 温度逐渐降低。密切注视金属盒的抛光面, 水气在它上面凝结的瞬间, 从温度计读出温度 (这时环形金属片的光亮面没有水气凝结, 保持光亮, 而金属盒的光亮面有水气凝结, 两者相比, 就较容易观察)。然后停止搅拌, 注意水气完全消失瞬间的温度, 两次温度示数的平均值就是露点。

实验时不使用乙醚致冷是避免乙醚蒸汽污染环境。

实验时, 凉水和硝酸铵的用量要适当, 否则吸热过程太快, 来不及观察, 反而耽误了时间。实验证明, 在 10ml 的水内加入 2g 的硝酸铵即可。硝酸铵加多了, 盒上会出现较大的水珠, 水珠消失时间增加, 这时读出的温度偏高, 造成较大的误差。在 15ml 的凉水中加入 3g 的硝酸铵, 水的温度可下降 9°C 左右, 这个用量也是比较适宜的。

实验证明, 用氯化铵、尿素、固体硫酸钠等加入水中致冷, 也能达到实验目的。

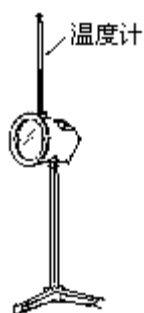


图 1

(2) 如图 2 所示，找一个有光亮外壁的金属筒，筒内装一半水，并插入一温度计。向筒内逐渐投入碎冰块，并用棒不断搅拌，使水温降低。细心观察金属筒外壁，当筒壁出现水气的瞬间记下这时的温度。停止投入碎冰块，仍不断搅拌水，待水中冰块完全溶解后，水温开始回升，细心观察金属筒外壁，当筒壁的水气完全消失时，记下温度计的示数，即可求得露点。

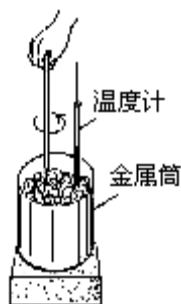


图 2

气体定律

(1) 图 1 所示为气体定律演示器 (J07457 型)，形如一个带有压力表的注射器，背后装有定容装置可固定管塞。玻璃管内密封的空气是研究对象，其体积由管旁的标尺读出，其压强用压力表读出，推动管塞可改变气体的体积与压强。需改变气体温度时，可用大烧杯盛水套在玻璃管外，改变水温即可间接改变空气柱的温度。

①验证玻意耳-马略特定律（等温过程）

移动管塞使玻璃管内气体体积 V_0 在 2 的位置（“2”处刻度为红色），套上橡皮帽，这时被测气体的压强 $p_0 = 1 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

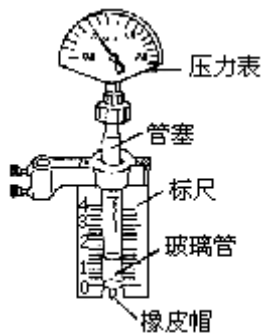


图 1

上提或下压管塞使气体体积分别为 V_1, V_2, \dots ，压力表上读出相对应的压强为 p_1, p_2, \dots 。实验结果表明 p 与 V 之积在误差允许范围内是一恒量，从而验证了玻意耳-马略特定律。②验证盖·吕萨克定律（等压过程）此实验的初始状态为 $V_0=2$ ， $p_0=1 \times 10^5 \text{Pa}$ 。将玻璃管浸入热水中，插入温度计。待气体温度和水温平衡时，记下温度 t_1 。上提管塞，使压力表保持 $1 \times 10^5 \text{Pa}$ ，随即记下体积 V_1 。改变热水温度数次，重复上述实验。实验结果表明：在压强不变时，一定质量气体的体积与温度的比值在误差允许范围内是一恒量，从而验证了盖·吕萨克定律。

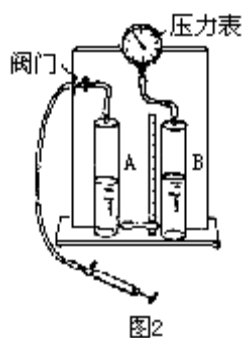
③验证查理定律（等容过程）

在玻璃管内封闭 $V_0=2$ 的气体，固定管塞，记下初始状态的室温 T_0 ($T_0=273+t_0$) 和压强 $p_0=1 \times 10^5 \text{Pa}$ 。将玻璃管浸入盛有热水的烧杯中（水面高于刻度“4”），温度计也插入水中。气体温度不断升高，压力示值也逐渐增大。2~3 分钟后，气体温度与水温相平衡，记下这时的压强 p_1 和温度 T_1 ($T_1=273+t_1$)。改变热水的温度数次，重复上述实验。结果表明在体积不变时，一定质量气体的压强与温度的比值在误差允许范围内是一恒量，从而验证了查理定律。

④验证理想气体状态方程

在玻璃管内封闭 $V_0=2$ 的气体，温度为 T_0 ，压强为 P_0 。将玻璃管浸入热水中，待气体温度和水温平衡后，记下温度 T_1 。移动管塞，使气柱体积为 V_1 时，记下相应的压强 p_1 。再改变热水的温度，重复上述实验，又得到一组 T_2, V_2, p_2 值。实验结果表明在误差允许范围内 $p \cdot V/T$ 值是一恒量，从而验证了理想气体状态方程。

(2) 几种气体定律演示器



①图 2 为玻意耳-马略特定律演示器。演示时打开阀门，用气筒向圆筒 A 打气，水排入圆筒 B，密闭空气柱的体积和压强也随之改变。从标尺读出气柱体积，从压力表读出压强，记下密闭气柱在不同体积时的压强，可得到：在温度不变情况下（在实验过程中，气温可看作稳定的），一定量的气体的体积跟压强成反比。

实验前应检查玻璃圆筒是否完好，防止高压下圆筒爆炸。

②图 3 所示装置可定性演示盖·吕萨克定律。演示时关闭阀门，瓶内保持一定量气体，手贴在瓶上对气体加热，水银柱即向右移动，说明空气体积增大。

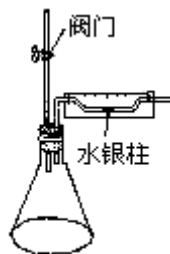


图 3

上述装置一般只用于定性演示，温度变化不大时即有明显的演示效果。但在温度变化较大时，水银柱易超出玻璃管水平部分，故不适用。

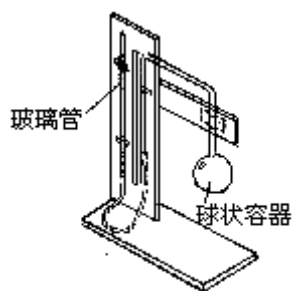


图 4

③图 4 所示装置为定容式气体温度计，可用来演示查理定理。球状玻璃容器通过橡皮管和一根细长玻璃管连接，组成一 U 形压强计。细长玻璃管的上端灌入适量水银，使一定量的空气封闭在球状容器里，记下 U 形管短管处水银面位置。演示时将球状容器全部浸没在冰水混合液里，几分钟后容器内的空气温度即降至零度。调节长玻璃管的位置，使 U 形管短管处水银面恢复到原来位置，即保持容器里的空气体积不变。读出 U 形管水银面高度差，此高度差加上大气压即为容器内空气在零度时的压强。换上不同温度的水，重复上述步骤，测出容器内的空气在不同温度时的压强。比较和研究各次实验结果，即可得到一定量气体，在体积不变情况下，它的压强随温度的升高而增大的关系。

此实验在把容器浸入冰水混合液前，应先降低细长玻璃管位置，以防止容器内空气冷缩时短管内水银流入容器。球形玻璃容器也可用其他薄壁玻璃容器代替。

(3) 气体定律模拟演示

气体分子模拟演示器的结构如分子热运动图 9 (b) 所示。

①模拟气体的等温变化。保持电动机转速恒定，则振动板频率不变，模拟了气体温度恒定。筒中装入一定数目的小球，用以代表一定质量的气体。浮动板在筒壁上指示的刻度数，表示气体体积。在浮动板上加配重，模拟增大气体压强，演示时浮动板下降到另一刻度处悬住，这表明压强增大时气体的体积缩小。图 5 所示为利用点光源获得的阴影投影图。

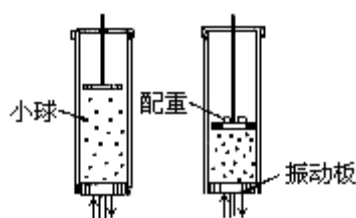


图 5

②模拟气体的等压变化。保持浮动板上所加配重不变，调节变阻器加快电动机的转速，振动板频率加快，模拟了气体的温度升高。这时可看到浮动板上升到一个较高的刻度处悬住，表明气体的体积变大。

③模拟气体的等容变化。电动机保持较快的转速，向盖板上再加一些配重，就可以使盖板下降，又回到原来的刻度处。这表明气体体积不变时，温度升高压强增大。

晶体导热的各向异性

取单层云母片（可从厚云母片剥取）和薄玻璃片（可选用盖玻片）各一片，在其一面涂上薄而均匀的石蜡（可用四氯化碳溶液将石蜡溶解后，用脱脂棉球，将溶液分别涂在云母片和玻璃片的一面，干后备用）。选用电烙铁作热源，烙铁头锉平。锉平端与标本没有涂蜡的一面接触（不要晃动）。云母片上被熔化的石蜡呈椭圆形，说明云母片（晶体）在各个方向的导热性能不相同。而玻璃片上被熔化的石蜡呈圆形（图 1），说明非晶体在各个方向上的导热性能是相同的。

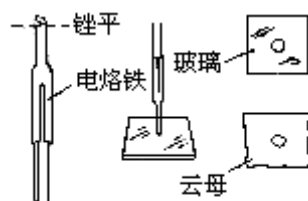


图 1

选用电烙铁作热源是因其热容量大，产生的熔蜡面积较大，现象较显著。热源放在没有涂蜡的一面，因为这时石蜡的熔解是云母或玻璃导热所致。如果把热源放在涂蜡的一面，因石蜡本身也参予导热，影响演示效果。

云母片沿各个方向的热传导性略有差异，熔化后形成的椭圆长轴和短轴差较小，为了得到明显的演示效果，应把云母片和玻璃片放在投影机上放大投影进行比较。

石蜡涂层可用下述涂层代替：

①将市售乳白胶薄薄地、均匀地涂在标本上，待胶干后，再在胶面上涂一层碘酒。初涂时为淡黄色，当酒精蒸发后即变为红棕色（若颜色不够深可再涂一次碘酒）。热源接触标本时，碘受热升华后标本上便留下清晰的淡黄色的斑痕，和周围的红棕色对比差异明显。将此标本置投影仪上进行投影，则全班学生都可清楚地看到。

②把感温涂料（配方参见实验编热传递）涂在标本上，将热源与它们接触，能清楚地看到接触点周围的感温涂料由浅黄橙色变成深赤橙色的斑痕。

液体表面的收缩趋势

（1）将“0”号柴油（或鱼肝油、食用植物油等）滴入与它密度相同的水和酒精混合液里（可调节水和酒精比例），可以看到油滴呈球状。实验表明液体表面有收缩到最小表面积趋势。为了增强演示效果，可将配制好的水和酒精混合液倒入球形烧瓶中，用滴管吸满菜油，管口插入混合液中，将油缓缓挤出，就可看到一个表面呈球形的大油滴。由于球形烧瓶中透明的水和酒精混合液具有放大作用，透过烧瓶看到的“油球”显得更大。

实验时也可选用其他液体，只要滴入的液体所受重力被容器中液体的浮力所平衡，就能看出其表面有收缩趋势。这两种液体不但需密度相同，而且要求彼此不发生化学反应，不互溶。要使两液体具有相同密度，可以设法使其中一种液体的密度用某种方法慢慢改变，最后总能使滴入液体呈球状。

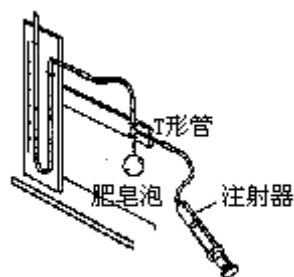


图 1

(2) 如图 1 所示，T 形管侧端接注射器，上端接微小压强计，下端沾一些肥皂液。利用注射器吹成一个肥皂泡（直径约 3cm），并立即用夹子夹住通向注射器的橡皮管。从压强计液柱差可显示由于肥皂液膜收缩产生的压强。

实验前按肥皂和洁净的水（不能用硬水）的体积比为 1：150 左右制备肥皂液。肥皂液的温度要低于室温或接近室温。温度高，皂液的表面张力相对减小，对实验不利。肥皂液的表面张力比水小，这里主要是利用其粘滞性较大的特点。为增加其粘滞性，还可在皂液中加入些食糖或几滴甘油。

(3) 图 2 所示的多种金属框都可用来演示液体表面收缩的实验。演示时把棉线的两端系在圆环上，棉线不要张紧。把圆环浸入皂液，取出后环上就布满了肥皂水的薄膜，薄膜上棉线是松弛的。如果用烧热的铁丝刺破棉线的一侧，由于另一侧表面的收缩，棉线就向另一侧弯成弧形（图 2（a））。

如果把一个棉线圈系在金属环上，然后使环布满肥皂水的薄膜，这时薄膜上的棉线圈是松弛的。同样用烧热的铁丝刺破棉线圈里的薄膜，由于棉线圈外缘皂膜表面的收缩，棉线圈就紧张成圆形（图 2（b））。

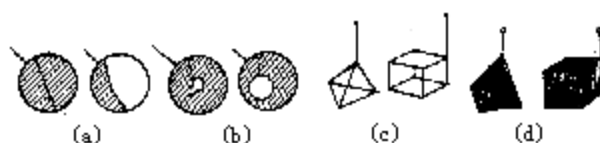


图 2

肥皂膜收缩时表面有收缩到最小表面积的趋势的演示还可用图 2（c）中六面体格子和正三角形四面体格子做实验，形成的皂膜形状如图 2（d）所示。某一个框上的薄膜只能有一种确定形状，这时薄膜的表面积是最小的。因为在表面张力的作用下，薄膜都要收缩，使表面积尽可能小。

实验时，尽可能使室内空气不作快速流动，因强烈的气流容易使皂膜破裂。配制后的皂液有气泡，容易出现畸形皂膜，因此要在演示前一、二小时将皂液准备好，经较长时间的静置，气泡可完全消失。实验中产生较大的气泡时，应刺破后再演示。

(4) 如图 3 所示，用两根细铁丝、两根细棉线扎成一矩形框架。演示时用手捏住框架上、下两边系线，轻轻地将框架平放在皂液中，提起时框架上就蒙上一层皂膜，框架两边的棉线因表面张力向内弯曲（图 3（a））。如用手轻拉框架上、下两边系线，可以拉直两侧的棉线（图 3（b））。再放松，感到有一股力使它收缩，说明液体有表面张力作用。

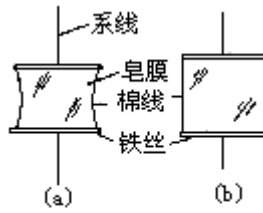


图 3



图 4

(5) 如图 4 所示，培养皿（或透明水槽）的水面上撒一层粉笔灰，将一根烧热的铁丝接触水面，粉末便从铁丝接触处向四周散开。如果在水面上滴一滴肥皂液（或酒精），也会出现上述现象。实验表明，温度升高或不洁净的水会使其表面张力变小。如果在水面上放一些樟脑碎屑，这些碎屑便在水面上作紊乱的复杂运动。这是因为樟脑溶入水中，水的表面张力变小。由于溶解的快慢，各个侧面表面张力出现差异，并不断变化，碎屑的运动就杂乱无章。

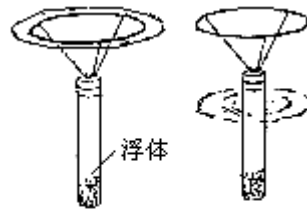


图 5

(6) 如图 5 所示，将带有圆环的浮体，用手向下压，使它全部浸没在水中，然后轻轻释放，圆环被水表面阻挡而不能浮出水面。将浓肥皂水或酒精等滴入水中，改变了水的表面张力，浮体又浮出水面。

毛细现象

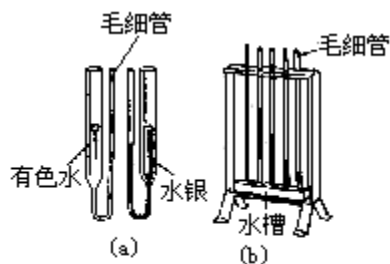


图 1

(1) 如图 1 所示为毛细现象演示器，它包括 2 个玻璃连通器（图 1 (a)）和 5 根玻璃毛细管（图 1 (b)）。每个连通器都有一个支管是毛细管。5 根毛细管的内径大小各不相同，并列插在一个铁制水槽内。演示时，在一个连通器的粗管里注入约 1/4 的有色水，可以看到毛细管里的水面比粗管里的水面高。将水银注入另一个连通器里，可以看到毛细管里的水银面比粗管里的水银面低。在 5 根毛细管下面的水槽内注入有色水，可以看到有色水沿着毛细管上升，而且毛细管的内径越小，有色水上升得愈高。实验前要将各个毛细管清洗干净，以使孔径畅通。

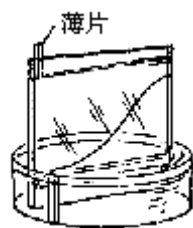


图 2

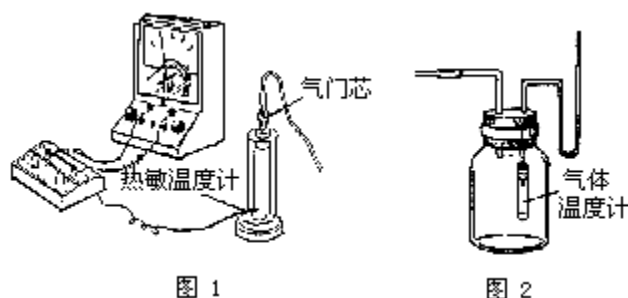
(2) 如图 2 所示，透明楔形容器由两块透明玻璃一边衬薄片而成。把它放在盛有染色水的培养皿里，有色水沿狭缝上升，缝愈狭窄，有色水上升越高。

热和功

(1) 气体绝热压缩和膨胀时温度的变化

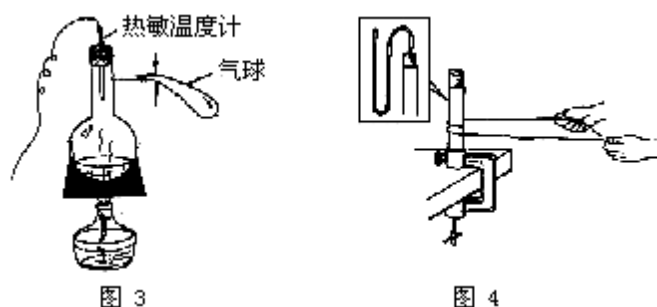
①如图 1 所示，打气筒通过气门芯向圆筒内打气，这时热敏温度计指针发生偏转，说明对气体做功，气体的热能增加，表现为气体的温度升高。停止充气，取下打气筒，放松气门芯，给圆筒放气，这时热敏温度计指针迅速回转，说明气体膨胀对外做功，气体的热能减少，表现为气体的温度降低。

②把一气体温度计如图 2 所示插在厚壁玻璃瓶内。演示时通过瓶塞上玻璃管用打气筒迅速向瓶内打气，气体温度计的 U 形管开口处液柱升高；闭口处液柱下降。说明瓶内气体压缩时温度升高。



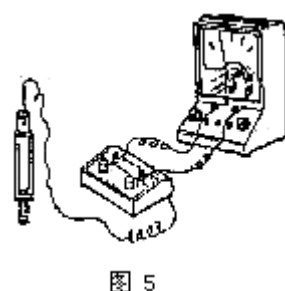
③如图 3 所示，先用手捏住气球嘴，加热使水沸腾，当手指感到有压力时即放手，气球胀大，热敏温度计指示温度下降。

(2) 功热转换



①如图 4 所示，在紫铜管内滴入乙醚（约 3cm^3 ），盖紧管塞，防止漏气。用手拉住绳子两端迅速往复拉动，管内乙醚沸腾，产生的乙醚蒸汽冲开塞子喷出。说明做功可产生热；消耗热可做功。

在绳上涂些松香，增加摩擦，效果更好。管塞上涂些牛油，不但可堵漏而且实验容易成功。



也可用酒精代替乙醚，但酒精沸点高，演示时间较长。

此实验也可不加乙醚，塞子上开孔和U形压强计相连，这样拉动绳子，可从压强计液面的变化观察温度上升。

②如图 5 所示，细玻璃管内装有铅粒，软木塞中间插入热敏温度计，细玻璃管外套有粗管，粗管和细管间隔有一层空气。演示时手持粗管，迅速振动管子，温度计显示温度升高。

实验中选用热敏温度计，这样可在示教表上随时观察到温度的变化。管中装铅粒是取其比热小，容易升温。



图 6

③图 6 所示为 J07653 型空气压缩引火仪。演示时拔出活塞，把一小块脱脂棉挂在活塞下端的钩子上，然后将活塞插入玻璃筒中深约 1/3 处，再用手掌鱼际用力迅速拍下，脱脂棉即起火燃烧。重复演示时，要驱尽管内废气。

若将脱脂棉放入饱和氯酸钾溶液中浸一下，取出后晾干使用，效果更好。旧式引火仪需要用硝化棉作引火物，用时宜取少量（火柴头大小即可），切忌放多以免爆炸。

热机

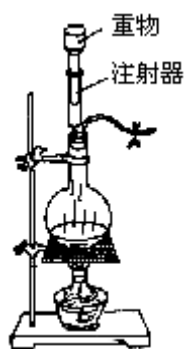


图 1

(1) 图 1 所示装置可演示蒸汽机工作原理。为防止蒸汽水量过大，注射器活塞脱出，在活塞和外筒之间系一细绳。演示时先用夹子把橡皮管堵住，对烧瓶（内加 1/4 水）加热。当瓶内水沸腾时，蒸汽把载有重物的注射器活塞向上推，到达一定高度时，打开夹子，蒸汽就从橡皮管导出，这时活塞又落下。再堵住橡皮管，活塞又上升……。这样重复操作，可观察到活塞的往复运动，演示了蒸汽的推动力量和蒸汽机的简单工作原理。

(2) 图 2 (a) 所示装置可演示蒸汽轮机工作原理。当试管内水被加热沸腾时，从喷嘴冲出的蒸汽就吹动叶轮转动。叶轮用薄铝片如图制作后用支架支起。

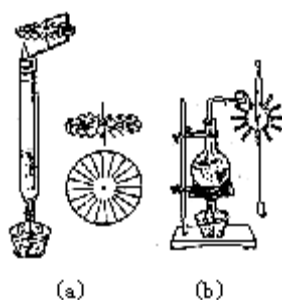


图 2

图 2 (b) 所示是另一形式的演示器。叶轮是用插有小铝片（也可用火柴盒的薄木片）的扁平软木塞装在铁丝支架上制成。当叶轮转动时还可带动小物体上升。

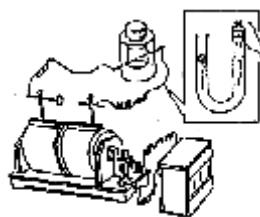


图 3

(3) 图 3 所示为内燃机工作原理演示器。一个上端开口的有机玻璃圆筒，底端插有两根具有尖端的放电针（尖端距离约 2~3mm），放电针用导线和感应圈相连。演示时，将少量汽油喷入圆筒内，然后塞紧木塞。启动感应圈，尖端即有火花产生，筒内汽油被点燃，塞子顶开，表示爆发做功。

为安全起见，上端塞子不宜过紧，可在塞子周围抹一层植物油。

如在 U 形管一端管塞上装有放电针，当在管内喷少量汽油后盖上管塞，当尖针放电时，U 形管内水从另一端喷出，显示爆发做功。

静电的相互作用

(1) 如图 1 (a) 所示，当带有同种电荷的两棒相互靠近时，则悬挂在支架上的带电棒，就被推斥而转动。若使带上异种电荷的两棒相互靠近时，则悬挂在支架上的带电棒，就被吸引而转动。

在玻璃瓶塞上插一根尖端向上的长缝衣针作轴，在软木塞上锉槽并将玻璃管制成的轴承支在轴上，也可作为旋转支架（图 1 (b)）。玻璃轴承的制作是用内径 2mm 的玻璃管用钳子夹持后垂直放在酒精灯头火焰上加热，熔融时在其自重的作用下，管口垂下成尖锥形，这时停止加热，截取适当长度即成。

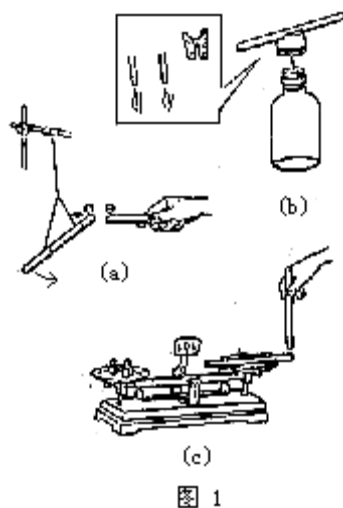


图 1

图 1 (c) 所示是在天平右盘上垫上塑料布后放上带电棒，调节天平平衡，用另一带电棒靠近盘上带电棒，同样可演示电荷的相互作用。

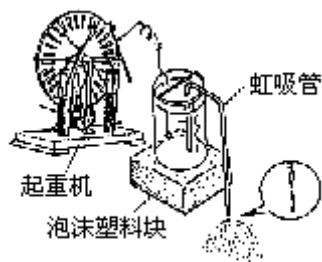


图 2

(2) 如图 2 所示，盛水容器放在泡沫塑料块上，虹吸管使水流出。用导线将容器内的水与起电机的一个放电球相连。演示时摇动起电机，则见细水流散成无数小水滴，像喷泉似地从管口洒下来。这是因水流带电后同种电荷互相排斥而致。

(3) 图 3 的装置，可定量演示库仑力和距离的关系。此装置由两个相互作用球和微量天平组成。演示时先使球 B 带电，并使它和球 A 接触，这时两球带等量异号电荷。把球 B 放在球 A 的正上方，使两球相距一定距离，这时天平失去平衡，调节游码使天平平衡，此时天平的示数即为两球的斥力。改变两球距离，重复上述步骤，就可演示不同距离时两球的相互作用力，从而验证了库仑力和距离平方成反比的关系。

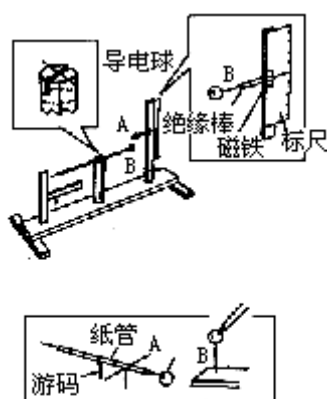


图 3

此实验关键在于两球带电量在演示过程中保持不变（即不漏电）。为防止气流对天平的影响，可在实验装置后面装挡风屏。

自制时，带电球可由硬泡沫塑料制成，球直径约 2cm，并用墨汁涂在球表面成导电球，绝缘棒（可用吹塑纸卷成）的一端插入球 B 后用白胶水胶合固定，另一端插在一根圆棒上，圆棒固定在一块小磁铁上。

这样磁铁吸合在铁皮上，可停留在任一位置，标尺上的刻度指示出球 B 的位置。另一带电球 A 也固定在绝缘细棒上，绝缘细棒再插入一根纸管中，纸管另一端接细棒作指针，在重心处的水平方向插一根缝衣针作转轴，在和转轴垂直处插一根竹丝作摆动的阻尼条。把转轴放在圆形支座的支点凹坑上，用大头针弯曲成钩状作游码，即组成微量天平。在圆形支座内灌入轻质油，并使阻尼条浸入一部分，可增加天平摆动阻尼。微量天平可这样刻度：先把游码放在某一位置，使天平平衡，这时游码位置即为零刻度。把精密天平的微量砝码置于球 A 上，天平失去平衡，调节游码位置使天平恢复平衡，记下刻度。据此可定出不同的刻度。

电场线

(1) 图 1 (a) 所示的仪器称为验电羽。演示时先把一验电羽的导线和感应起电机相连，转动起电机可看到验电羽丝线成辐射状散开，模拟了点电荷电场线（图 1 (b)）。

演示同种电荷电场线时，应将两验电羽靠近，间距约 1~2cm。把两验电羽用导线连接，接起电机的同一电极。这时验电羽带电后会显示出如图 1 (c) 所示形状的电场线。

演示异种电荷电场线时，应将两验电羽拉开，间距以验电丝线张开后不接触为宜，把起电机两极分别和两验电羽连接，起电后显示出如图 1 (d) 所示形状的电场线。

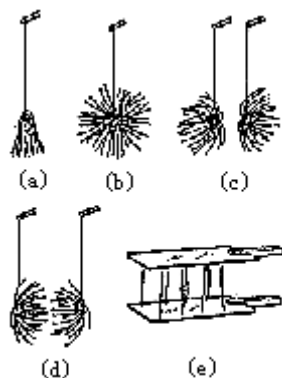


图 1

自制验电羽可在乒乓球面上涂导电胶（或贴上铝箔），用白胶水把长约 10~12cm 的丝线（或电容器纸条）均匀地贴在球面上可做两只，然后用导线把两球悬挂在绝缘支架上即成。为显示平行板带电板间的电场线，可在其中一极板上均匀贴上丝线，丝线长度应稍短于两极板距离，当极板带电后，丝线就模拟出匀强电场的电场线（图 1 (e)）。

(2) 图 2 为投影法显示电场线实验装置。演示时把容器放在书写投影器上，接线柱上插入所需形状的电极，电极间的距离调节到 2~3cm。

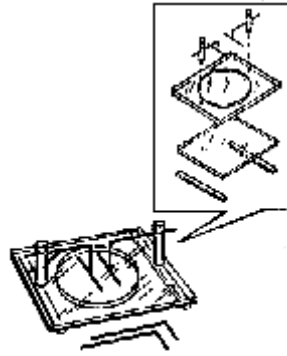


图 2

把四氯化碳倒入容器深度约 1/3 处，在液面上均匀撒上长约 0.2mm 的头发丝（也可用草籽、奎宁粉、石棉屑或锯木屑等），再倒入液态石蜡到容器深的 2/3 处。把两电极和起电机相连，起电后会看到头发丝在电场作用下运动，片刻后即按电场线分布情况排列起来。改换不同电极，在屏上能清楚显示不同形状的电场线。使用四氯化碳和液态石蜡是因为四氯化碳密度较大（约 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ），而液态石蜡密度小于 1，这样头发丝可悬浮在两液体之间，演示效果较好。如果没有上述液体，也可只用蓖麻油（或其他植物油），预先把头发丝在油内搅匀，演示时倒入容器。头发丝的分布不宜太密， 1mm^2 有 1~2 根即可。自制时取两块厚约 3mm、长为 20cm、宽为 15cm 的有机玻璃，其中一块中间开一直径 10cm 的圆孔，用氯仿将其胶合，制成一个扁平容器。在孔上装两接线柱以便插换不同形状的电极。电极可用直径 3mm 的铜棒制成。

上述演示也可用草酸晶体。在干燥的容器内均匀地撒上一层草酸晶体，加电场后轻轻敲击容器，针状晶体在电场作用下也会按电场线分布状况排列起来。用草酸晶体是因其形状细长、轻重合适，在电场中极化后转动灵活，容易按电场线排列。

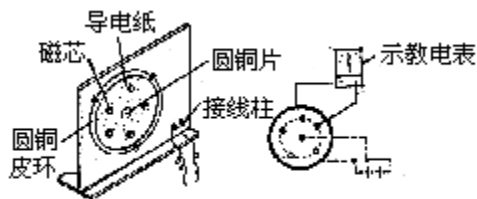


图 1

等势线

(1) 图 1 所示装置可模拟点电荷的等势线。将导电纸贴在磁性黑板上，圆心处钉上一个圆铜片作为一电极。另有一直径为 35cm 的圆铜皮环作为另一电极，两电极用导线和接线柱相连。用几片固定片将环和导电纸压紧在磁性黑板上。电极和纸面接触处应紧密均匀，以免等势线显示时发生畸变。两电极加上 gV 直流电模拟静电场。将小圆磁芯包上铝箔成导电磁芯。演示时在导电纸上任意放上多个磁芯，用示教电表两测试棒，分别与其中一电极和磁芯接触，示教表上即有读数。依次移动磁芯，使表上读数相等。这时可发现磁芯的位置离中心的距离基本相等，从而说明点电荷电场的等势线为一簇同心圆。

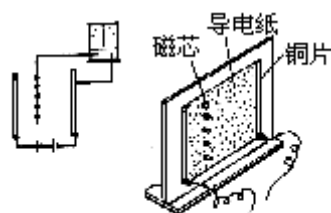


图 2

(2) 图 2 所示装置可模拟平行电场的等势线。将导电纸固定在磁性黑板上，取两条长 35cm、宽约 1cm 的铜片，把它的两端压紧固定在磁性黑板上作为电极。两电极上加 gV 直流电，形成一均匀电场。演示时，将导电小磁芯放在两电极之间，用示教电表两测试棒分别与其中一电极和磁芯接触，示教表即有读数。依次移动磁芯，使表上读数相等。这时可发现磁芯排列成与电极平行的直线。从而说明平行电场的等势线是与电极平行的直线。

若无现成导电纸，可将碳素墨水均匀喷涂在白纸上晾干代用。

带电粒子在电场中的偏转

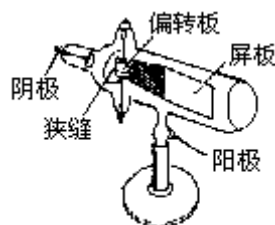


图 1

(1) 图 1 所示为静电偏转阴极射线管，可用来演示电子束（带负电粒子流）在静电场中偏向正电极。演示时用感应圈作为产生阴极射线的电源装置。另用 $0\sim 300V$ 可调直流高压作偏转电压。先使偏转板电压为零，启动感应圈，使管

内产生阴极射线。调节直流电源，增加偏转电压，这时绿色亮线向正极方向偏转。电压愈高，偏转愈大。改变偏转电压极性，偏转方向随着改变。

演示时，如发现只是一片绿光而无亮线，这是感应圈的输出极接反的缘故。

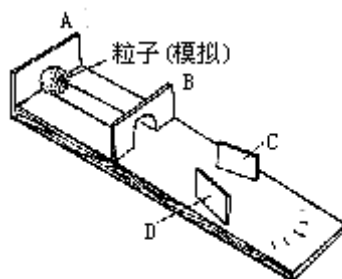


图 2

(2) 如图 2 所示仪器能模拟电场中带电粒子的加速和偏转现象。泡沫块上竖有用铜箔板制成的加速板 A、B 和偏转板 C、D，用泡沫塑料球外涂导电墨（或包铝箔）模拟粒子。

①演示带电粒子在磁场中加速

起电机的两放电球用导线连到 A、B，用金属板封住 B 上的圆孔。摇动起电机，粒子带电后会在 A、B 中来回加速运动。若去掉 B 圆孔上的金属板，带电粒子加速后能冲出圆孔从斜面滚下。

②演示带电粒子在电场中偏转使偏转板带电，射出的带电球向一板偏转；更换两偏转板极性，则球偏转方向改变。底板上中间标尺可用来判断粒子是否偏转。

为了防止导电球滚到 B 处发生电中和，洞口应比球直径大，并将洞口边缘的铜片清除一部分。

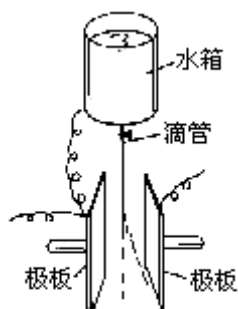


图 3

(3) 如图 3 所示，有绝缘柄的两铝板固定在支架上，且平行正对。调节滴管下落的水滴（每秒 1~2 滴），使它正好由板的正中通过。将两铝板用导线接到感应起电机的两个放电球上。摇动起电机，水滴的运动轨迹就发生偏转，演示了电场对带电粒子的作用。若将两极板的接线对调，则水滴就向另一方向偏转。

静电应用

(1) 静电除尘

如图 1 所示，在玻璃圆筒外，绕几圈铜线作为正极，筒上端和底端绷紧的金属丝作为负极。演示时，将玻璃筒内、外电极分别与起电机的负、正两放电球（预先判断其极性）连接好，将点燃的木屑放入盒内，可看到浓烟从筒内上升后冒出。摇动起电机，筒内即刻停止冒烟，这说明筒内空气电离，起到除尘作用。

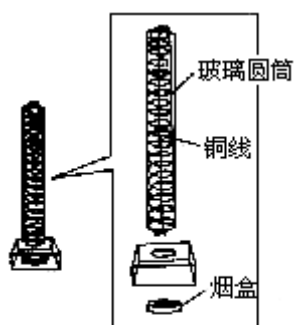


图 1

如将正、负两极反接，也能起除尘作用，但效果较差。演示完毕后，筒壁上烟粒可用汽油擦去。

(2) 静电植绒

如图 2 所示，硬泡沫塑料块上 A、B 为两相互绝缘的金属极板，两极间夹有透明有机玻璃圆筒。演示时，B 上放绒絮、A 下放纸，纸上用胶水画上需植绒的图案。A、B 两极用导线分别接到感应起电机的两个放电球上。转动起电机，则看到筒内绒絮向 A 飞升。撤去高压，纸上涂有胶水处就植满了浓密的绒絮。



图 2

感应起电机也可用感应圈代替。

(3) 静电显影

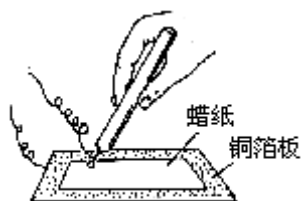


图 3

如图 3 所示，誊写蜡纸平铺在铜箔板上。手持球形电极的绝缘柄，球离蜡纸约 3~4mm，摇动起电机，两极间立即形成火花，在纸上临空绘图。取走电极，将蜡纸平放在桌面上，在纸上撒色粉，提起蜡纸，抖落多余的未被吸附的色粉，则显示出所绘图形，这是色粉被吸附在潜像区域所致。

色粉应保持干燥，否则也能粘在无潜像的区域。

极板上高压的极性，不影响实验效果。切忌电极固定在一点连续对蜡纸放电，将蜡纸烧焦。

电容

(1) 图 1 所示装置可演示孤立导体的电容。一张宽约 10cm、长约 60cm 的铝箔折叠后，装在静电计上端。铝箔一端装有绝缘手柄。演示时使静电计带电，手（或其他接地导体）靠近金属板，静电计指针偏角变小；当手离开后，指针偏转角度又恢复原状（图 1 (a)）。如图 1 (b) 所示，提起绝缘柄，铝箔被拉开，静电计指针偏转变小，这是带电体（铝箔）表面积增大后电容变大之故。重新使铝箔合拢，静电计指针偏角又会增大到原来角度，演示说明导体的形状和大小对孤立导体电容有影响。

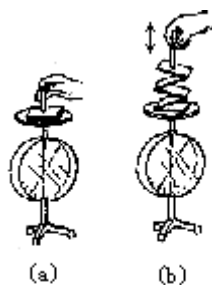


图 1

(2) 如图 2 所示装置可演示平板电容跟一些因素的关系。

①演示平板电容器的电容量与两极间距离的关系。调节两块金属板的相对位置，使它们相距 8~12cm。给静电计上的金属板充电，静电计指针偏转一角度。将两板逐渐靠近（不能相碰），可以看到静电计指针张开的角度随两板间距离的减少而变小。反之，指针偏转角增大（图 2 (a)）。由此可说明平板电容器的电容量与板间距离有关，距离越小，电容量越大。

②演示平板电容器的电容量跟两板相对面积的关系。保持两金属板距离不变，把其中一板上下移动，以改变两板相对面积。这时会发现静电计指针张开的角度随着两板相对面积的减少而增大（图 2 (b)）。由此说明平板电容器的电容量随相对面积的增大而增大。

③演示平板电容器的电容量跟两板间电介质的关系。保持两金属板距离和相对面积不变，在两板间插入或抽出玻璃板，可以看到静电计指针偏转角度随着玻璃板的插入或抽出而减小或增大（图 2 (c)）。如插入其他电介质（如吹塑纸、有机玻璃、胶木板）时也有同样情况。但插入的介质不同，偏转角变化也不同。由此可以说明平板电容量跟两板间电介质有关。

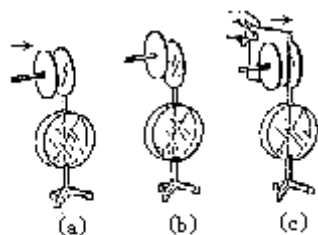


图 2

实验中所用的电介质在插入前，应先在火焰上熏一下，以消除残存电荷，否则演示时会出现相反结果。

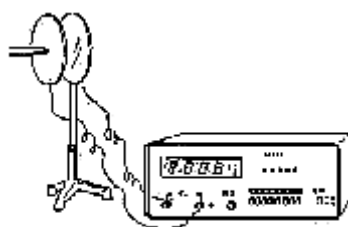


图 3

图 3 所示是采用数字电容表（J01417 型）作上述演示。演示前先接通电容表电源，在“C”输入端的“+”、“-”接线柱上接好测量用导线，按下“量程选择”开关中的“200p”按钮，然后缓缓转动“调零”旋钮。使数字显示为“00.0pF”后，再把接线柱上的连线分别接在两极板上。然后根据上述①、②、③内容进行实验，其电容量都会发生变化。

J01417 型数字电容表是用于直接测量各种电容器容量的数字式仪表，是专为中学演示实验和实验室测量设计的，其量程分为 8 档，由 1pF~2000F，测量误差不大于 1%±末 1 个字。因其重复显示时间约为 5 秒/次，演示上述内容时，应待取样显示稳定后，再作下一内容的演示。

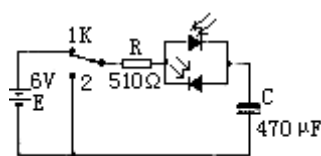


图 4

(3) 图 4 所示电路可演示电容充、放电实验，把电键 K 拨向 1 时，电源 E 对电容 C 充电，发光二极管发光，放完电后两管均熄灭。

若有容量较大的电容，可用与其耐压相接近的直流电源进行充电（电解质电容器有极性，要分清后再充电，不可接错）。然后令其短路放电，观察火花和听声音。耐压 6~12V 的大容量电容器，充电后，可直接点亮一下小灯泡。如串联一个合适电阻，可使发光二极管较长时间发光。容量较小的电容器，可用演示电表的欧姆档 R×10 或 R×100 档，观察充、放电时指针的变化。

图 5 所示电路可比较电容器电容的大小，演示电容器串、并联后容量的变化等。L₁、L₂ 为“6V 0.25A”的小灯泡，1-2、3-4 为接线柱，以便外接电容器。

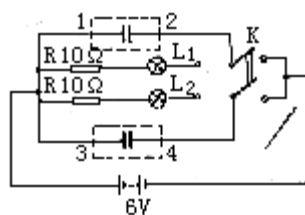


图 5

①比较电容大小。在接线柱 1-2 和 3-4 之间分别接入容量大小不等的电解质电容器（如 1000F 和 500F）。演示时将 K 投向右端，使电容器和电源连接，电容器充电；然后将 K 拨向左端，电容器通过电阻和小灯泡放电。可发现与容量较

大的电容器并联的小灯泡亮的时间长一些。由此可说明在同一电压下，电容量大的电容器所贮藏的电荷多。

②演示电容器串、并联后电容量的变化。容量为 1000F 电解质电容器 4~5 只，其中一只接在接线柱 1-2 端，余下的几只串联后接到接线柱 3-4 端，步骤和①相同，使两组电容先充电后再放电，可明显观察到串联后电容的放电时间比一只电容器的短，说明电容器串联后的等效电容量比单只的小。

电池

(1) 伏打电池

如图 1 所示，剪取锌皮（可取废干电池外壳）和铜皮各一片，将铜片和锌片用螺钉固定在本条两边当电极，把电极插入电解液（10%的硫酸溶液）中，用导线把小灯泡跟两个电极相连，灯泡发光，表明电池提供能量。但过一会，小灯泡慢慢地暗下来，表明流过灯丝的电流也逐渐减弱。为了适当延长演示时间，可采取以下措施。

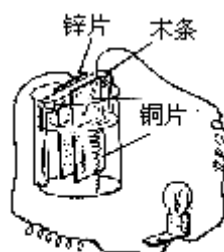


图 1

①从电解液里取出极板，抹去铜片上的气泡，重新放入电解液中，电池又可维持一段时间。

②在电解液里加少许高锰酸钾晶体（电解液变成淡紫红色即可）或注入少量双氧水（过氧化氢，一种消毒防腐用药剂），这时再插入电极，小灯泡的发光时间会大大延长。这是高锰酸钾或双氧水与铜片上的氢气发生了化学反应，消去了附在铜片上的氢气泡。这两种药品称为去极剂。

③把铜片在酒精灯上反复灼烧，直至表面生成黑色氧化铜，再插入电解液。这时由于聚集在铜片上的氢气泡和铜片表面氧化铜反应消除了极化现象，延长了灯泡发光时间。

在实验中会发现不但铜片上有气泡出现，在锌片上也有大量气泡产生，这些气泡同样会缩短灯泡发光时间。这是因为一般锌片内常含铁、碳等杂质，杂质与

锌自成电池，这样产生的氢气泡就聚集在锌片上了。如果换用纯度较高的锌做电极，如镀锌的铁皮（俗称白铁皮）、铁丝（电镀的锌纯度较高），实验效果较好。

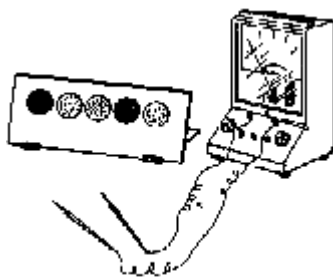


图 2

如果按照图 2 所示，在一坡形板上（便于学生观察）垫上滤纸，用稀硫酸湿润滤纸后放上几块不同金属片（注意不要使金属片相互接触）。演示时用电表测量任意两金属片间的电压，可发现不同金属间的电压不同。如果选用两块相同金属，电流表不会偏转。

(2) 干电池

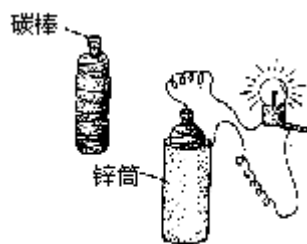


图 3

如图 3 所示取大号废电池碳棒一根，把几块废电池的锌片焊成圆筒。

演示时，将氯化锌（6g）、氯化铵（30g）和稀浆糊（100g）调成电液糊，灌进作为电池负极的锌筒。把二氧化锰（30g）和碳粉（30g）拌和后铺在纱布上，接着放上碳棒，用纱布把它缠裹起来作电池正极，插入盛有电液糊的锌筒中，即可点燃小灯泡。此电池碳棒为正极，锌片为负极。

如果找不到完整锌皮，也可以把锌皮和碳棒安放在盛有电液糊的容器里。

(3) 蓄电池

取废蓄电池的灰白色负极板（一般废蓄电池的正极板已变成硫酸铅不能使用）两块，分别作蓄电池的正负极板。

演示时将两极板放入容器，相距约 2cm，容器内盛有 10% 硫酸溶液。

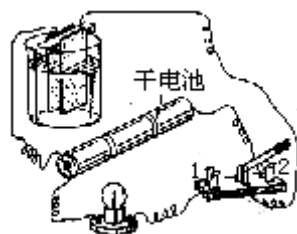


图 4

按图 4 接线。先使单刀双掷开关 K 置于 2 的位置，这时干电池（也可用其他直流电源）对其充电，两极板上有气泡冒出，说明充电时发生化学反应（如用扁平的透明容器，可用幻灯投影，显示气泡）。充电 3~5 分钟后，一极变成棕褐色的二氧化铅（正极），另一极仍为铅板。此时再把 K 置于 1 的位置，小灯泡发光，说明蓄电池放电。

(4) 电池的串联和并联

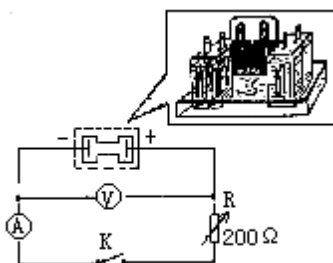


图 5

按图 5 所示连接线路，图中电池为 J10365 型可调内阻电池，这种电池是专为中学物理实验需要设计的单体铅蓄电池。特点是内阻大，并可连续调节，有一定容量，电动势比较稳定。上下移动电池通道闸板，改变通道内电解液横截面的大小，电池的内阻可在 $5\sim 30\ \Omega$ 范围内连续变化。V、A 分别为演示电压表和电流表。

演示时断开 K（切断外电路），测出电源的电动势 \mathcal{E}_1 （无负载时的端电压近似等于电动势）；闭合 K 接通电路，测出路端电压 $U_{\text{端}}$ 和干路电

流 I ，则电源的内电阻 $r_1 = (\mathcal{E}_1 - U_{\text{端}}) / I$ 。然后，再用 2~3 只可调内阻电

池，分别按串联方式和并联方式组成电池组，替代上面的一只电池。重

复上述步骤，可以得到串联电池组 $\mathcal{E} = n\mathcal{E}_1$ ， $r = nr_1$ 以及并联电池组 $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1$ ， $r = \frac{r_1}{n}$ 的结论。

演示电池组的内电阻，不宜用一般的蓄电池或干电池，因它们内阻小，效果不明显。接通电路后，应待电表示数稳定后再读数，一般测量电动势误差较小，测量内阻时误差较大。实际上电池的内阻并不是常量，既与电极的极化程度有关，也与放电电流强弱有关，故测量时不能要求很精确。如选用内阻可调电池，可将多个电池内阻调成相同的值。

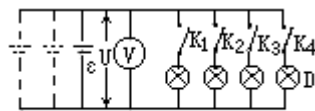


图 6

利用图 6 的电路可演示并联电池组电源，内阻减少，电源的输出特性改善（即使负载变化对路端电压的影响小）。图中 \mathcal{E} 为一节干电池，小灯泡的额定电压都是 1.5V，依次接通 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 ，增加并联的灯数以减小外电阻，由电压表可看到 U 逐渐变小，小灯泡亮度变暗（不要使外电路短路，否则会损坏干电池）。再用一、两只干电池和原来的并联，重复上述步骤，可观察到负载变化时路端电压的变化要比用单只电池时小。由此可说明：多个电池并联后，除可供较强电流外，尚可在负载较大时，路端电压基本不变，即改善了电池的输出特性。

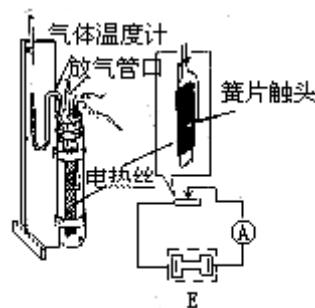


图 7

(5) 图 7 所示装置可演示电池的输出功率和负载电阻的关系，以纠正一些学生认为外负载变化时，电池的输出电流越大，输出功率也就越大的错误观点。装置中的气体温度计由 U 形管和试管组成。从 U 形管液面差可显示试管内温度变

化，以反映电流做功放出热量多少，试管塞下的胶木板上固定一段阻值约为 $20\ \Omega$ 的电热丝（电炉丝），电热丝上压一只可以移动簧片触头，制成可变电阻。

演示时先调节电热丝上的触头位置，使它的阻值远大于可变内阻电池的内阻，并用小橡皮帽堵住塞上的放气管口。然后将可变内阻电池与电热丝接通，观察一分钟，可发现 U 形管内液面变化很小，几乎察觉不出。再重调电热丝的阻值，使它与电源的内阻大约相等，重复上述过程，可观察到 U 形管液面差变化十分显著。最后把电热丝的阻值调得远小于电池的内阻，接通电路后的电流比前两种情况都大，但同样接通电路一分钟，U 形管液面变化与电流很小时一样，几乎觉察不出来。实验说明，内阻不为零的电源，输出功率与外负载的关系并不是随电流增大而增大（单调上升），在外负载电阻等于电池内阻时，输出功率最大。

实验中要求电热丝阻值与电池内阻值相同，可采用调节闭路路端电压约等于开路路端电压的一半，此时这两个电阻值基本相等。

导体的电阻

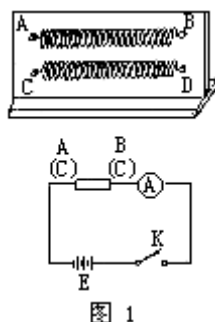


图 1

(1) 图 1 所示为研究导体的电阻实验装置，用 $\phi 0.35\text{mm}$ 新康铜丝，分别截取一定长度，使 AB 的电阻值约为 $4\ \Omega$ （长约 0.5m ），CD 的电阻值约 $8\ \Omega$ （长约 1m ）。将它们在细棒上绕成螺旋状后用接线柱固定在板上。按图示电路连接。电源 E 用三只铅蓄电池串联，电流表用量程为 1.5A 的演示电表。演示时先将 AB 接入电路，改变串联电池的数目来改变电压 U ，记下每次电流表上相应的示数。

用 CD 替代 AB 重复实验，记下对应的电流。实验表明，对同一导体来说，它两端的电压 U 跟流过它的电流 I 的比值 U/I 是不变的，但对不同导体来说，比值 U/I 是不同的。由此可见， U/I 反映了导体本身的一种性质，即导体对电流的阻碍作用，叫做电阻。

为了读取导体（AB 或 CD）两端的电压，演示时也可在导体两端并联一电压表。

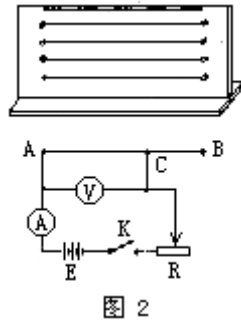


图 2

(2) 图 2 所示为电阻定律演示板。把长度都为 1m 的四根不同电阻线 ($\phi 0.31\text{mm}$ 康铜丝、 $\phi 0.50\text{mm}$ 康铜丝、 $\phi 0.31\text{mm}$ 铜丝、 $\phi 0.50\text{mm}$ 铜丝各一根)，用接线柱平行固定在板上，板的上端画上演示米尺刻度。把蓄电池 E (6V)、电键 K、变阻器 R ($10\ \Omega$)、电流表、电压表和电阻线组成图示电路。AB 为板上 一根电阻线，C 是可滑动接头 (可将鳄鱼夹接在导线上)。

演示时，改变滑动接头 C 在 AB 间的接触位置，可得出同一材料制成的导线，截面积相同时，它们的电阻值跟它们的长度成正比。把板上 $\phi 0.31\text{mm}$ 康铜丝和 $\phi 0.50\text{mm}$ 康铜丝的全长，先后接入电路。

用螺旋测微器测出两根电阻线的直径，实验表明对同一种材料，长度相同时，它们的电阻值和它们的截面积成反比。

用上述方法，分别测出 4 根电阻线全长的电阻，根据直径算出它们的截面积。

然后根据电阻定律的公式算出电阻率 ρ 。可以看出，相同材料的电阻率相同，不同材料的电阻率不同。

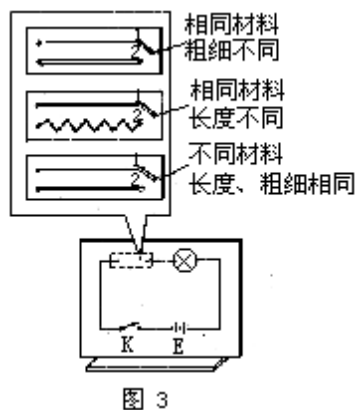


图 3

如图 3 所示，取长方形木板 3 块，分别装上材料、长短、粗细不同的导线。为了增加演示可见度，在每块板上都用颜色线条表示材料性质、长度、粗细的不同情况。演示时，把上述木板先后插入图示的示教板上，拨动 K 置 1、2，从灯泡的亮度不同，可定性演示电阻定律。

(3) 电阻随温度变化而改变

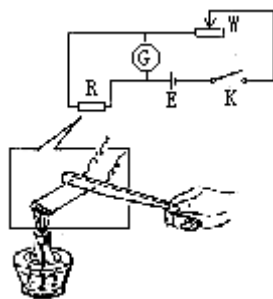


图 4

①如图 4 所示电路接线，R 为绕成螺旋管的电阻，其阻值约为 $0.1 \sim 0.2 \Omega$ ，可用 $\phi 1\text{mm}$ 、长 20cm 的铁丝绕成（用镍铬丝效果更好），绕成后固定在木架上。W 为 $0 \sim 100 \Omega$ 的可变电阻，电源 E 用 2V 蓄电池或一节干电池，G 为演示灵敏电流计。演示时，调节 W，使 G 稍有偏转。增加 R 值（可在电路里串联一只和 R 阻值相同的电阻），这时因并联在 G 两端的电阻 R 值增加，分流减少，通过 G 的电流增加，G 的偏转则增大。恢复原电阻 R，用酒精灯对 R 加热，G 的指针偏转增大，停止加热，又回复原状，说明导体电阻随温度升高而增大。

②取功率为 30W 或 40W 废日光灯灯丝 R' ，用支架上的鳄鱼夹夹住，把它和小灯泡、电池、 $0 \sim 10$ 欧姆变阻器、电键组成串联电路（图 5）。接通电源后，调节变阻器阻值，使小灯泡发光较为明亮。点燃火柴，对灯丝加热，可以看到小灯泡灯丝变成暗红色；火柴熄灭后，小灯泡又慢慢恢复明亮。

这就证实了，灯丝的电阻是与温度有关的，温度高时灯丝的电阻变大。如移开火柴，立即在灯丝上滴上一滴冷水，小灯泡亮度会瞬间增强。用其他金属代替灯丝，也有同样结果，但效果没有钨丝那样显著。

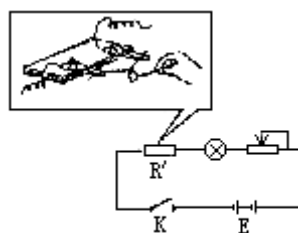


图 5

③如图 6 所示，去掉灯泡的玻璃外壳和泡内灯丝，将支持灯丝的两根金属丝和固定这两根金属丝的玻璃芯装在支架上，玻璃芯上两根金属丝与白炽灯（220V25W）相连。接通 220V 电源，白炽灯并不发光，说明此时玻璃芯不导电；点燃酒精灯均匀加热玻璃芯到呈黄色透明时，白炽灯的灯丝由微红逐渐变亮。熄灭酒精灯，玻璃芯回复到无色透明状态，白炽灯又逐渐变暗。

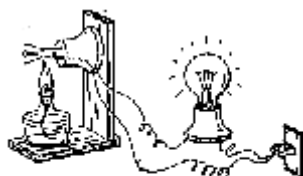


图 6

如果选用功率较大的白炽灯做这个实验，当玻璃芯加热熔化导电后，即使熄灭酒精灯，玻璃芯也继续保持熔融，这是电流通过玻璃芯时也要放出热量，玻璃就始终处于炽热状态的缘故。暂时断开电路，待玻璃芯冷却后再接通，这样可重新看到由于玻璃芯电阻变大而使白炽灯变暗的现象。

由于使用的是 220V 交流电，实验时必须注意人体不能接触任何带电部分。

上述实验中，只有当玻璃处于熔化时才显示出玻璃的导电现象。如果把白炽灯改用灵敏度较高的微安表（如 $50\ \mu\text{A}$ 电流表），就可改用低压电源（电源电压为 12V），这样既安全，又能从微安表上清楚地看到玻璃随温度变化的导电情况：常温下玻璃不导电，电流表指针不偏转；点燃酒精灯加热玻璃芯，随着玻璃芯温度升高，电流表的示数也逐渐增大（注意，不要超过电流表量程）；停止加热，玻璃芯温度下降，电流表示数也由大回复到零。由此说明玻璃的电阻随温度升高而变小的规律。

欧姆定律

（1）部分电路欧姆定律

如图 1 所示，用长约 1m、 $\phi 0.50\text{mm}$ 的康铜丝（电阻值约 $2.5\ \Omega$ ）4 根，绕成螺旋状，固定在板上。将电源、电流表、电压表、电键按图连接。演示时先连接板上 DE 两端，增减串联电池个数（改变电压），记下不同电压时的电流强度值；再选择某一电压值，使电阻 R 变化（可分别接 EC、EB、EA 两端），观察电流变化；最后演示电压和电阻同时变化时，电路中电流强度的变化。综合上述演示结果可得到电流强度和电压、电阻的关系。

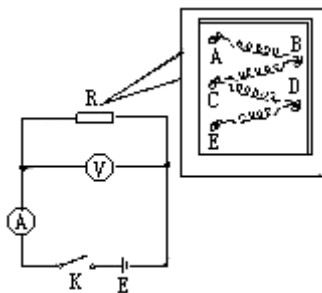


图 1

(2) 闭合电路欧姆定律

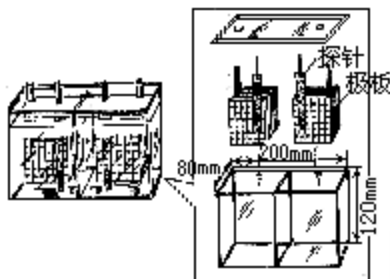


图 2

①内阻可调电池可自制,按图 2 所示尺寸,用厚约 3mm 透明有机玻璃做容器,中间有一隔板,隔板中心钻一个 $\phi 1\text{mm}$ 小孔。容器胶合时接缝处要求平整密合,不渗水。取废蓄电池中正、负极板各一组(一般废蓄电池中涂红色的正极板已损坏,可取两块灰白色的负极板代替)。截取 $20 \times 110 (\text{mm}^2)$ 的铜箔板两块,在有铜箔一面的上端焊一根导线,就成为测量内电路电压的探针。容器里装有普通蓄电池的稀硫酸(密度为 1.1 左右)。演示前,将两组极板放在原来的蓄电池内充电,为了防止正、负极板相碰,可用原绝缘隔板隔开。一般用 1A 左右的电流,充电 12 小时至电压达 2V 时即成。把充好电的极板放进容器里,插入探针即可演示。探针的位置对内电路电压的影响不大,内阻的大小主要由容器中间隔板小孔的孔径和稀硫酸的密度决定,蓄电池内阻一般较大(可达 $40 \sim 100 \Omega$)。如图 3 所示连接电路, R 是用来改变外电路负载的可变电阻,阻值选择在 300Ω 左右。 V_1 、 V_2 为测量外、内电路电压降的示教电压表,为减小因电压表内阻小而带来的误差,可在示数电表上串 $10\text{K} \Omega$ 左右的电阻(不同电表串联的阻值不同),使电表的量程为 2.5V。应注意 V_2 的正极要接在靠近负极板的探针上。灯泡 L 可显示流过外电路的电流强度,也可用电流表代替。演示时, K_1 、 K_2 、 K_3 都断开,此时 V_1 、 V_2 指示的数值都是零,表示整个电路无电流。

闭合 K_3 , V_2 示数仍为零,表示外电路断开时,内电路无电压降落(跟 V_2 并联的两探针处于蓄电池正、负极所形成的电场中,所以 V_2 会有极小的示数); 闭

合 K_1 、 K_2 ， V_1 、 V_2 都有示数，逐渐减小 R 值，直至短路，记下在不同电阻时，内、外电路的 V_1 、 V_2 值。内、外电压值相加是个常量（误差范围内）。用此装置还可演示路端电压随外电路电阻变化的情况。

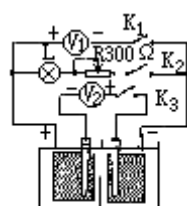


图 3

在演示时，应先观察断路时外电压和内电压，然后接通电路，依次逐渐减小外电阻，最后才观察短路时情况。当外电路断路时，如果 V_2 较大，可在演示前把铜箔擦洗干净后再插入电池。

此蓄电池由于增加了电池容量，电源电动势比较稳定；又加大了内阻，内电路电压降显著，即使在短路时，电流也仅几十毫安，不易损坏蓄电池。

探针插入电池内部测定电路的电势降落，当电池工作后，探针极化，产生极化电动势，影响实验结果。实验前给两探针（探针仍插在电池内）接上 4V 交流电通电半分钟，即可消除或减小极化电动势对实验的影响。实验时探针应避免接触电池极板，若碰到极板，极化电动势就会增加。

②增大内阻的方法还有下述几种：

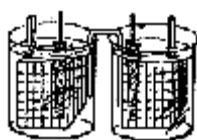


图 4

(a) 用两个容器，中间用玻璃管或塑料管连接（图 4），管内充满硫酸液，这时电池的内阻由管子的内径和硫酸液的浓度而定。但因演示过程中有气泡进入管顶，内阻增大，影响演示。为解决这个问题可用滤纸条搭在两个容器硫酸液之间，利用滤纸的毛细现象，不需要灌硫酸液就可把两容器连接起来。改变滤纸条层数，可改变电源内阻。

此方法用两个容器，外形上失去了单一电池的本来面目，则可用下述方法解决：在一个容器内装满硫酸液，放入一个电池极板和探针，将电池的另一个电极和探针彼此绝缘后一起套在塑料袋里，然后将塑料袋浸没在容器的硫酸液中，该

装置中离子是由塑料薄膜渗透进去的，因此内阻较大。内阻值与选用的薄膜厚度、质料有关。

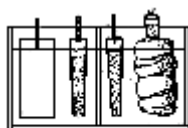


图 5

(b) 如图 5 所示，剥去干电池（1 号电池）锌皮外壳，在清水里洗净电解糊（此溶液可作电解液），把它和锌皮电极一起放入上述隔板上钻有小孔的有机玻璃盒内，插入探针，倒入电解液，即成一高内阻电池。新制成的电池要先在电解液中浸 10 分钟左右，这样电动势可稳定在 1.5V 左右。旧锌板上如果有盐垢，应刮光清除，以免影响电源电动势。此电池内阻可达 50~100。内阻值主要由电解液的浓度和容器中间隔板小孔孔径的大小决定。电解液也可用浓度为 4% 的食盐水或 10% 的氯化铵溶液。

(c) 如图 6 所示，在 U 形管内塞一团脱脂棉花，左、右管内分别注入稀硫酸铜和稀硫酸锌溶液（硫酸锌饱和溶液：水=1：2（体积比）），电极铜棒、锌棒和探针（铜丝）用软木塞固定。演示时插入管内即可。此电池内阻高，电动势稳定，演示效果较好。

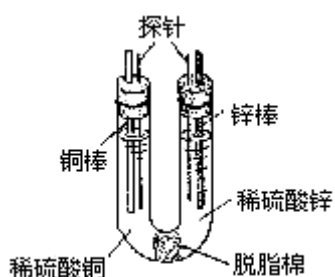


图 6

串、并联电路中的功率分配

(1) 如图 1 (a) 所示，把两只小灯泡（2.5V 和 4.8V 各一只）组成串联电路。闭合电键 K，适当调节变阻器的阻值，能明显地看到 4.8V 的小灯泡比 2.5V 的亮。

分别测出两灯泡两端的电压，可以说明，在电流强度相同的情况下，电压越高，电功率也就越大。

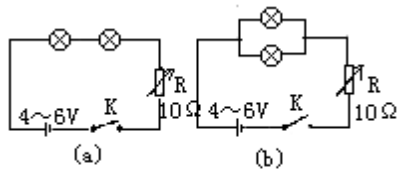


图 1

如图 1 (b) 所示, 把上述小灯泡组成并联电路。闭合 K, 可以明显地看到 2.5V 的小灯泡比 4.8V 的小灯泡亮。分别测出通过两灯泡的电流强度, 就可以说明电压相同时, 电流强度越大, 电功率也就越大。

从上面的现象还可以进一步说明, 串联电路中, 电阻大的, 消耗的功率大; 并联电路中, 电阻小的支路, 消耗的功率大。

由于小灯泡产品性能不一致, 要选择 4.8V 灯泡的电阻比 2.5V 灯泡的电阻大, 也可以用 2.5V 和 6.3V 规格的小灯泡来代替。

演示中应适当调节串联在电路中的变阻器的阻值, 使在串、并联两种情况下, 两灯泡的亮度对比达到视觉分辨最明显的程度。

用交流电进行上述演示, 可用 220V、25W 的灯泡和 220V、100W 的灯泡并联后接入 220V 的电路中, 会发现 100W 的灯泡比 25W 的灯泡亮; 把上述两灯泡串联在 220V 的电路中, 却是 25W 的灯泡亮。

(2) 在两个相同的量热器小筒中各装入约 80g 煤油, 将 2Ω 和 6Ω 的电热丝各一根分别放入两个筒内的煤油中, 再插入一支温度计 (测温泡要浸在煤油中部)。将这两根电热丝串联后接到低压电源的 24V 直流或交流输出, 通电约 1 分钟, 可以看到放入 6Ω 电热丝的煤油温度升高得多。

将两个量热器内电热丝改为并联后接到低压电源的 6V 输出, 通电约 2 分钟, 可由温度计看出放入 2Ω 电热丝的煤油温度升高得多。

上述实验定性说明串、并联电路的功率分配规律。

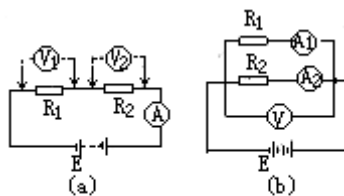


图 2

(3) 如图 2 (a) 所示。图中 R_1 、 R_2 分别为 5Ω 、 10Ω 电阻，E 为低压电源的 9V 稳压输出，电流表、电压表分别用 J01401 型示教电表的 1A 档和 10V 档。

演示时，先后测出 R_1 、 R_2 两端的电压降和通过 R_1 、 R_2 的电流，算出每个电阻的功率，即可得到串联电路中，功率与电阻的大小成正比。

如图 2 (b) 所示， R_1 、 R_2 分别为 10Ω 、 15Ω 电阻，E 为低压电源 6V 稳压输出，由测量结果算出每个电阻的功率，可得到并联电路中，功率与电阻的大小成反比。

(4) 如图 3 (a) 所示， R_1 、 R_2 分别为 10Ω 、 15Ω 电阻，E 为低压电源 24V 直流输出。瓦特表用 J01404 型，它有 4 个接线柱，电流线圈要串联在电路中，并使电流由标有“ I ”的流入、标有“ I^* ”的流出；电压线圈要和所测的电路并联，并使“ U ”接电势较高端、“ U^* ”接电势较低端。

将标有“25V1A”的插头表盘插入电表上，把电压线圈先与 R_1 并联，再与 R_2 并联，就直接显示出 P_1 、 P_2 。如与 AB 间的电路并联，则显示出总功率 P 的值。实验结果表明，功率与电阻的大小成正比。

如图 3 (b) 所示， R_1 、 R_2 分别为 10Ω 、 15Ω 电阻圈，E 为低压电源 8V 或 10V 直流输出，瓦特表插入“25V1A”插头表盘，如图示接法测出 R_1 的功率。再将电流线圈串联于 R_2 的支路中，测出 R_2 的功率。结果表明功率与电阻的大小成反比，且总功率等于各部分功率之和。

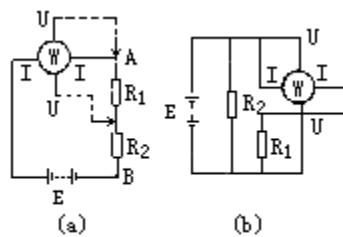


图 3

(5) 为了说明灯泡的额定功率和实际功率的区别，可按图 4 所示的电路演示。L 为“220V100W”白炽灯泡，T 为自耦调压变压器（额定功率 0.5kw 即可），电压表和电流表分别用 J01401 型大型示教电表的交流 250V 和交流 1A 档。旋转调压器手柄，使输出电压依次取 110V、170V、220V、240V，由测出的 U、I 值计算灯泡在不同电压下的实际功率和额定电压下的额定功率，并比较发光强度的不同。实验说明：同一个灯泡的实际功率随所加电压而变化，功率越大，发光越强；只有在额定电压时的功率才等于额定功率。

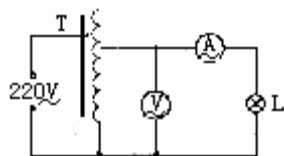


图 4

实验中发现灯泡在 110V 时的功率并不等于 220V 时功率的 1/4, 而是偏大些, 这是因为钨丝的电阻在 110V 和 220V 时并不保持恒定, 在 110V 时钨丝的温度低, 电阻较小。

电流计的改装

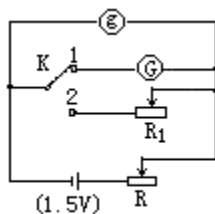


图 1

(1) 电流表量程的扩大取两只相同的演示电流计, 按图 1 电路分别测出内阻, 电路中 g 为标准电流计, R_1 可用电阻箱, R_2 是阻值为 $1750\ \Omega$ 的可变电阻 (先调在最大阻值位置), G 为待测内阻的电流计。测试时先将 K 拨向 1, 调节 R_2 , 使 g 的示数和 K 拨向 1 时一样, 此时电阻箱上的阻值即为待测电流计的内阻。如果内阻不是整数, 可以串上电阻凑成整数 (如 $100\ \Omega$ 或 $500\ \Omega$), 以便于计算。

把两内阻已凑成整数的电流计的表重新改绘, 绘制方法如下: 抽出原表面, 以表面上原来的那根标度线的曲率半径和起迄位置为依据, 在白色卡纸上用圆规画一条相同的弧线, 六等分后贴在原来表面上 (图 2)。

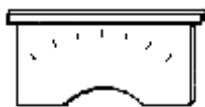


图 2

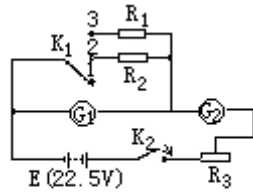


图 3

如图 3 所示，演示时， K_1 拨向 1， K_2 闭合，这时电流计 G_1 、 G_2 串联，两电流计示数相同，表示流过的电流相同。调节 R_3 ($3k\Omega$)，使两指针指在中间（标度 3 格处），再把 K_1 拨向 2， G_1 示数变小（只偏转 1.5 格），但 G_2 示数不变；调节 R_3 ，使 G_2 达满刻度（标度 6 格处），此时， G_1 才偏转 3 格。

从而说明， G_1 并联了一只跟电表内阻相等的电阻 R_2 (100Ω) 时，测量电流的量程范围比原来扩大了 1 倍。把 K_1 拨向 3，这时 G_2 指针偏转仍不变（标度 6 格处），但 G_1 指针只偏转了 1 格，此时 G_1 和 R_1 (20Ω) 并联，说明量程扩大了 6 倍，从而验证了当 $n=100/20=5$ （倍），量程扩大了 $5+1=6$ （倍）。

(2) 电压表量程的扩大

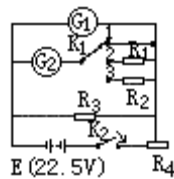


图 4

如图 4 所示， G_1 、 G_2 是与上述实验相同的电流计，只是把它们的内阻凑成 500Ω 后当电压表使用， R_3 为 1Ω 的绕线电阻。

演示时，把 K_1 拨向 1， K_2 闭合，这时 G_1 、 G_2 都并联在 R_3 两端，它们的示数是相同的。调节 R_1 ，使两电表指针指在中间（标度 3 格处），再把 K_1 拨向 2， G_2 的指针偏转 1.5 格，而 G_1 的指针几乎不变。若使 G_2 偏转 3 格， G_1 就偏转 6 格。这说明， G_2 串联一只跟内阻相同的电阻 R_1 (500Ω) 后，电压表的量程比原来扩大了 1 倍。

将 K_1 拨向 3， G_2 的指针只偏转了 1 格，而 G_1 仍偏转 6 格，这说明串联电阻 R_2 ($3K\Omega$) 是电表内阻的 5 倍时，量程扩大了 6 倍。

(3) 多用表的原理和使用方法

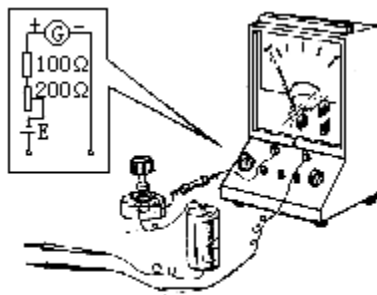


图 5

如图 5 所示，用一节干电池和一电位器串联接到示教电流计上，作为欧姆表内部结构，外部接红、黑两根表棒。将表笔短路，调节电位器，使电流计达到最大值，这时表上的读数应为 0Ω 。再将表笔断开，无电流，指针不动，此时电阻读数应为 ∞ 。再将可变电阻箱接入，记下在各种电阻时指针的位置，重新画一张刻度盘即为多用表。刻度从 ∞ 到 0Ω ，是不等格的。

电流的热效应和化学效应

(1) 电流的热效应

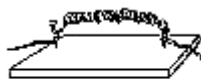


图 1

①如图 1 所示，把电热丝（阻值 $4\sim 5\Omega$ ）绕成螺旋状（尽可能密些，这样发热集中，可得到较高的温度），用铁钉将它固定在木板上。当其两端接蓄电池（ $6V$ ）时，电热丝呈暗红色，用火柴头接触它就会点燃。因电流较大（ $1.2\sim 1.5A$ ），通电时间要短，以保护蓄电池。也可用 J02401 型低压电源来代替蓄电池。若用干电池做电源，因它允许的放电电流较小（ $0.3\sim 0.5A$ ），电热丝的电阻值应取大些。这时电热丝的温度较低，不能点燃火柴，可把牛油抹在电热丝上，会看到冒烟，用以说明电流产生热量。

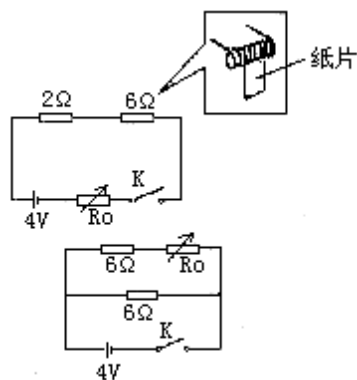


图 2

②如图 2 所示装置，利用对比方法，可对焦耳定律作定性的演示。3 个电阻用电炉丝做成（ 2Ω 一个， 6Ω 两个，其中 6Ω 的绕得密一些）。演示时，用两条硬纸沾上牛油，粘在电阻圈上，按图 2 (a) 串联。通电时可以发现，电阻大的纸片先掉下来，说明电流强度一样，在相同时间里，电阻越大的导体放出的热量越多。如果把 2 个 6Ω 的电阻按图 2 (b) 所示接成并联电路，调节变阻器 R_0 ，使两支路电流强度不同，演示中可看到电流强度强的电阻上的纸片先落下来，从而说明导体放出的热量和电流强度的关系。

这个实验，也可以用直径均为 0.2mm 左右、长度均为 20cm 的铁丝和铜丝，分别组成串、并联电路来进行。在铜丝和铁丝上用牛油粘上一些火柴棒，通电以后，观察哪根金属丝上的火柴棒先掉下来，并用焦耳定律来解释发生的现象。

金属丝的直径不宜选得太大，否则在并联时，电源几乎处于短路状态，这是不允许的。

如图 3 所示装置，可对焦耳定律做定量研究。用一个 250mL 的烧瓶，里面装满酒精，酒精里滴入红墨水染色，瓶塞插有细玻璃管（内径为 $1\sim 2\text{mm}$ ）。瓶内装有电阻丝 $R_1=2\Omega$ ， $R_2=2\Omega$ ，电源 E 为 $4\sim 6\text{V}$ ，变阻器 $R_0=10\Omega$ 。由此构成了一个液体温度计（电阻丝通电后放出热量使液体温度升高，而液柱的升高与温度的升高成正比，所以可以用液柱升高的多少来反映电流做功放出热量的大小）。通过电阻丝的电流用演示电流表来显示。

演示时先将电阻丝的 1、2 端接入电路，对 R_1 通电，调节 R_0 ，使 $I=1\text{A}$ ，在标度板上分别标出 1 分钟和 2 分钟时液柱的位置，由此说明放出的热量 Q 与时间 t 成正比。改用 1、3 端接入电路，对 R_1+R_2 通电，仍取 $I=1\text{A}$ ，同样测出 1 分钟和 2 分钟时液柱升高的数据，由此说明 Q 与导体的电阻 R 成正比。最后取 $I=2\text{A}$ ，重复上述实验，可以得到 Q 与 I^2 成正比的结论。烧瓶中的酒精溶液必须装满而不留空气，否则会影响实验效果。

(2) 电流的化学效应

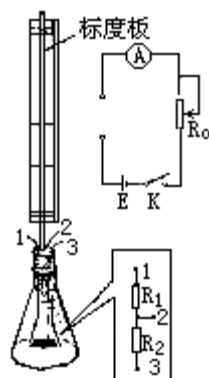


图 3

①图 4 装置为液体中的离子导电演示器。U 形管的中下部装入高锰酸钾溶液（ 1dm^3 水中加高锰酸钾 0.5g ），两支管的上部装入无色的硝酸钾溶液（ 1dm^3 水中加硝酸钾 0.3g ）。用碳棒作电极，按图连接电路，电表指针发生偏转，紫红色的液面（锰酸根离子）向阳极缓慢移动， $5\sim 8$ 分钟后，紫红色液面可到达阳极，而原来充有高锰酸钾溶液的地方变成无色透明。

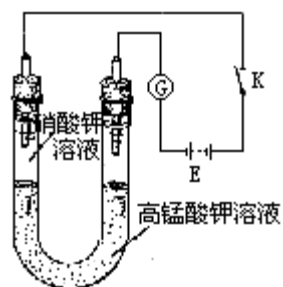


图 4

实验可用可调直流电源。电压选择应根据两电极的电阻而定，如果 U 形管内径较大，溶液的电阻就较小，电压可低些（ $50\sim 100\text{V}$ ）。如果 U 形管内径小于 1cm ，溶液的电阻就较大，电压要高些（ 200V 左右）。若电压太低，电流太小，离子运动太慢，不易观察。

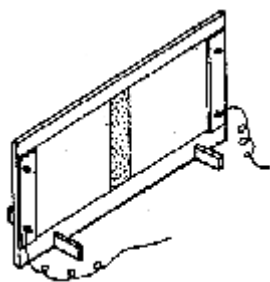


图 5

图 5 所示为液体离子导电示教板。将浸有硝酸钾溶液的滤纸贴在装有木支架的玻璃板（要求滤纸很湿，但又不淌液）上，两端压上铜片作电极。

截取宽约 1cm 的滤纸条，浸润高锰酸钾溶液后，垂直贴在板的中间。

演示时，将 45~100V 直流电压接到两端铜片极上，即可看到紫红色的锰酸根离子向阳极移动。如改变电压极性，可见反向移动。

②图 6 (a) 所示装置可演示碳棒的电镀。在容器内装 20~30% 的硫酸铜溶液作电解液，以铜棒为阳极，碳棒作阴极，用于电池或蓄电池（6V）作电源。通电 3~4 分钟后，碳棒上逐渐附上一层铜膜，铜板逐渐腐蚀，而硫酸铜溶液没有变化。为了提高电镀质量，在接通电路约 1~2 分钟后，可把碳棒原来背向铜棒一面转向铜棒，否则碳棒上镀的铜层不均匀。如按图 6 (b) 所示方法，用两块阳极板，即可获得均匀的镀层。

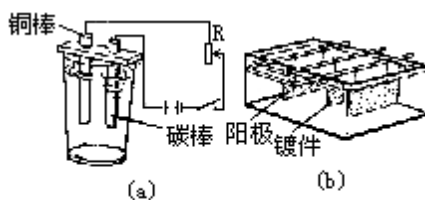


图 6

电镀时，电流不宜太大，否则镀层易脱落。

电镀某物体，必须以该物体作阴极，以不同的金属板作阳极，并以阳极金属板的盐类溶液作电解质，则可得到不同的金属镀层。

③电解

取碘化钾（5%）、淀粉（1.5%）和蒸馏水配成溶液，将滤纸在溶液里浸透，贴在铜箔板（或其他导电金属板）上。取一支电表棒（或一段铜丝），用导线将6V 直流电源分别和铜箔板、电表棒连接，电表棒接正极，铜箔板接负极（图7）。先不接电源，把表棒在纸上划动，无字迹出现。然后接上电源，用表棒在纸上书写，纸上便显示出鲜明的蓝字。如不显著，可适当升高电压。实验说明了碘化钾的电解作用，碘离子 I^- 趋向正极，并在那里失去电中和，析出单质碘，碘与淀粉作用而显出蓝色。

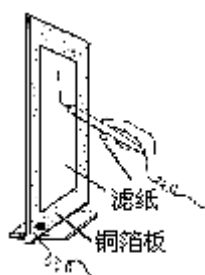


图 7

用吸有硫酸钾和酚酞溶液的滤纸，可观察到同样的现象。做一个两测脚，两测脚用导线分别接到电源正、负极，当测脚在纸上划动时，接电源正极的测脚在纸上留下蓝色痕迹。

电流的磁场

(1) 直流电流磁场

如图 1 所示，用有机玻璃按图示尺寸胶一平台，平台一角开一槽，固定矩形线圈的一边，线圈可用 $\phi 0.31\text{mm}$ 的漆包线在有机玻璃做的框架上绕 50 匝，其中 ab 长约 25cm。在透明量角器的圆心处插一段针尖作为磁针转轴，电流表可取投影直流电流表固定在平台右上角。演示时按图示线路连接，电源可用 6V 蓄电池。实验可分两段进行，先定性观察，后定量测定。研究 B 和 I 关系时，可把小磁针放在某处（设为 r ）。调节可变电阻，使电流为 I 、 $2I$ 和 $3I$ ，分别记下磁针偏转角度 θ 。研究 B 和 r 关系时，取 I 为某一值不变，移动小磁针，改变 r ，可取 r 、 $2r$ 和 $3r$ ，分别记录 θ 值。综合以上实验，可得磁感应强度 B 与电流强度 I 和离开导线的距离 r 之间的关系。

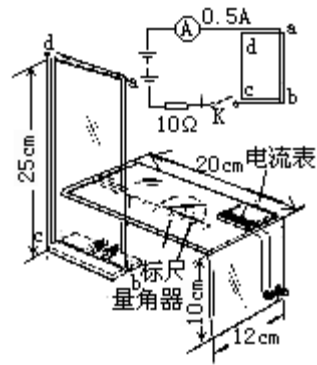


图 1

演示时把平台放在投影器上，转动平台，使小磁针指向和 r 方向重合。注意电流的方向和线围绕向有关，此装置中电流的方向应使电流由 a 流向 b 。

(2) 通电螺线管磁场

①用 $\phi 2\sim 3\text{mm}$ 铜线，在线圈直径约为 3cm 的瓶上密绕 5 匝，松开后线圈直径约 4cm 。拉松线圈，使每匝间距为 1cm 。根据绕成的线圈直径和间距，在有机玻璃板上打孔，然后把线圈逐匝穿入孔中固定（图 2）。演示时，把细铁屑均匀地撒在板上，通电并轻轻敲板，铁屑便显示出磁感线。



图 2

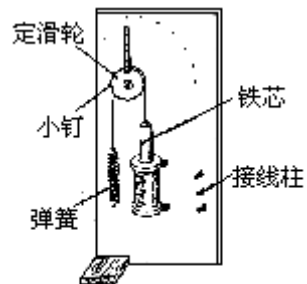


图 3

②图 3 所示为通电螺线管磁场演示器。定滑轮固定在竖直板面上，铁芯是用铁片卷成的一个直径约 2cm、长约 10cm 的圆筒，用锡焊接封口，筒的顶部通过细线和弹簧相连，并在定滑轮小钉处固定。螺线管用 $\phi 0.51\text{mm}$ 漆包线绕上 1000 匝，在 700 匝处抽头，线圈的首端、抽头和末端分别连接在接线柱上。演示时电源串接滑动变阻器和示教电流计后与螺线管连接。调节滑动变阻器，螺线管中的电流强度由小变大，指针偏转角也逐渐变大；固定滑动变阻器阻值，减少螺线管匝数，指针偏转角变小；保持电流不变，将铁芯从螺线管底端插入，指针偏转角明显增大。实验说明螺线管的磁性强弱与电流强弱、螺线管匝数和有无铁芯有关。

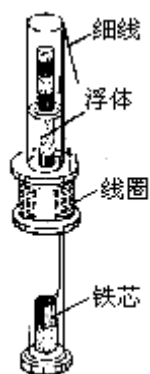


图 4

③如图 4 所示，量筒外套一个螺线管（用 $\phi 0.3\text{mm}$ 漆包线绕 350 匝，在 200 匝处抽头）。另用泡沫塑料削一圆柱体作浮体，浮体下端粘厚约 3mm 圆形铁块作铁磁物质。铁芯用细线悬挂，放在量筒底部。为了使铁芯容易拉动，铁芯底部粘一块泡沫塑料以增加浮力。

演示时，量筒内放水，再放入浮体，调整水量，使浮体最下面刻度线与水平。再调整螺线管在量筒上的高度，使浮体下端铁块与螺线管管口相平。接通电源后，浮体被吸入水里一定深度。改变电流强度或线圈匝数，吸入深度随着改变。用细线拉起量筒底部的铁芯，可明显发现在同样电流强度下浮体吸入更深，说明通电螺线管磁性强弱还与有无铁芯有关。

气体导电

(1) 空气导电

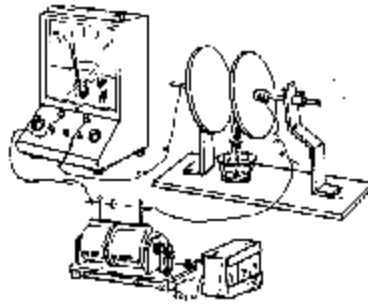


图 1

如图 1 所示，把两块相互绝缘的金属板平行放置，间距约 4~6cm。把感应圈的输出端和两金属板连接，在电路里接一演示用灵敏电流计。演示时启动感应圈，极板间无放电现象（如果放电，可断开感应圈电源，使两板距离增加），电流计不偏转。把酒精灯放在两极板间，对空气加热，这时气体分子电离，电离后的离子和电子在电场作用下定向运动，形成电流，电流计指针偏转，指示出空气导电时的电流。

如果在演示电流表上加接直流放大器，用数百伏的电压即可演示，比用感应圈演示安全、灵敏。

(2) 稀薄气体放电

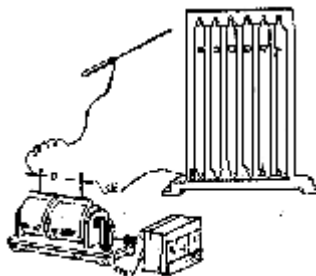


图 2

图 2 所示为演示稀薄气体放电现象的稀薄气体放电管组。放电现象随着放电管内不同气压而发生变化，反过来由放电现象也可判定管内真空程度，这组放电管又叫做克鲁克斯真空管。这种放电现象被用于检验真空度。

放电管共有 6 个，抽空后密封，封闭时管内的残余气体压强分别为：40mmHg、10mmHg、3mmHg、1mmHg、0.1mmHg 和 0.02mmHg，各有标签注明。管子两端有铝制电极，圆盘状是阴极，棒状为阳极。

不同真空度的放电现象见下表所示：

真空度 (mmHg)	40	10	3	1	0.1	0.02
放电现象	出现紫 光带	紫带 扩大,几乎 充满全管, 颜色比 40mmHg 的 稍浅,两极 周围出现 红蓝色的 光亮	从阳 极发出粉 红色的光 亮,充满 全管,并 开始出现 克鲁克斯 暗区	出现 鳞片状光 亮,并有明 显的克鲁 克斯暗区 和法拉第 暗区	法 拉第暗 区伸 长,并 出现棉 球状的 光亮	发 出阴极 射线, 玻璃管 内全部 呈现荧 光

实验时应注意,移动金属导杆时要远离放电管的封口,防止封口击穿漏气。放电时间不宜太长,以免影响管子寿命。真空度为 0.02mmHg 的放电管,因采用的玻璃材料不同,管内发出的荧光颜色也不同。

如果没有稀薄气体放电管,也可按图 3 所示自制。取一长约 50cm、直径为 2cm 的玻璃管,两端各用装有电极的橡皮塞封住。在其中一个塞子上,装一根细玻璃管作抽气口。电极可用横截面直径为 1mm 的铜丝制成,其中一个电极上焊一直径约 1cm 的圆金属片作为阴极。为防止漏气,可先用针在橡皮塞上钻一个直径略小于 1mm 的孔,然后再把电极插入。

演示时,抽气管连接抽气机,把感应圈输出端接到玻璃管两端电极上,在正常大气压下,管内气体不导电,抽到一定程度时,气体电离放电,管内出现鲜艳夺目的光柱。随着管内气压的变化,光柱的形状和颜色也发生变化,可清楚显示出克鲁克斯暗区和法拉第暗区。

如果不出现上述现象,可检查玻璃管是否漏气,或变换感应圈输出极性,演示最好在暗室进行。

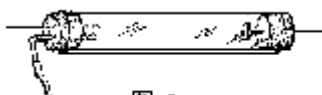


图 3

热电子发射

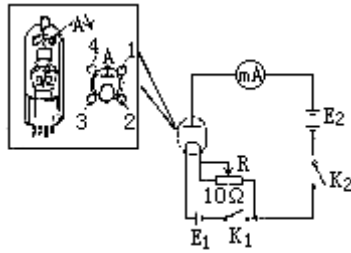


图 1

图 1 所示 J14457 型真空二极管，可演示热电子发射和单向导电性。它采用直热式氧化物阴极（灯丝），自然冷却阳极（屏极），通过玻璃外壳，管内灯丝和屏极 A 明显可见。其结构及管脚连接见图所示，管脚 1、4 为灯丝，2、3 为空脚。主要技术参数见下表。

	电压	电流
灯丝	6.3V	0.8~1.5A
屏极	24V	2.5~4mA
屏极功耗 $\leq 1.5W$		
寿命 > 500 小时		

演示时按图示电路连接，指示屏流值用演示电表的 5mA 档，把变阻器 R 在电路里的阻值调到最小，断开电键 K_1 ，闭合 K_2 ，电流计指针不偏转。说明二极管内没有自由移动电荷，因此电路中无电流。同时闭合 K_1 、 K_2 ，二极管内灯丝被加热发红，电流计指针偏转。加大变阻器的阻值，灯丝的温度下降，电流随之减小。这表明屏极电压一定，灯丝温度高，发射的热电子多，电流就大，从而清楚地演示了热电子发射。如果把屏极电压 E_2 （24V）极性反接，则电流立即变零。这表明真空二极管只有在屏极接电源的正极、灯丝接电源的负极时，才有屏极电流，从而说明了真空二极管的单向导电性。

实验中所用真空二极管也可选用 5Y3、12F、2C2U 等体积较大的整流用电子管，其灯丝电压和屏极电压应根据管型选用，也可用一般电子管收音机的小功率整流管（如 5Z2P、6Z4 等），把它们两个屏极并联起来当作一个管子使用，只是其内部结构不易观察。

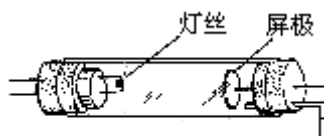


图 2

如果没有真空二极管，可按图 2 所示自制。取长约 10cm、内径约 2cm 的玻璃管，其两端装有密封用橡皮塞。一个塞上装有从 6~8W 日光灯管上拆下的连有灯座的灯丝（拆时应小心不要把灯丝弄断），在灯座插脚上焊两根铜丝，穿过橡皮塞作灯丝引线。另一个橡皮塞装一根焊有直径约 1cm 的圆金属片作屏极，再插入一根玻璃管作抽气口。灯丝和屏极间距离约 2cm。自制二极管的灯丝电压取 6~8V，屏极电压 50~100V。如因灯丝衰老，发射电子能力差，可适当提高灯丝电压（不要超过 12V）和屏极电压。

演示时，要先开启抽气机，待连接的 U 形水银气压计指示接近真空时，才能开启电源。演示过程中，抽气机不能关闭，防止漏气烧毁灯丝。

阴极射线管

（1）直进阴极射线管

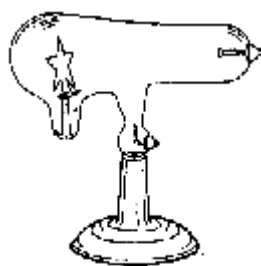


图 1

如图 1 所示，管内阴极射线行进路上，装有一可绕轴转动的铝制五星形板，此板可呈垂直或水平状态。

演示时用感应圈作电源。其管座处引线为阳极，另一极为阴极。启动感应圈后，管壁上出现微弱的荧光，当五星形板垂直放置时，出现明显的五星暗影（若无上述现象，可改换感应圈极性）。

演示最好在暗室进行，不要长久把电压加于射线管，因玻璃受阴极射线照射过久会强烈地吸收气体，影响发光能力。

（2）机械效应阴极射线管

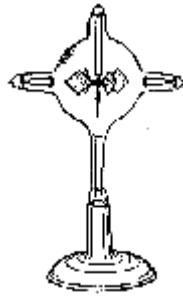


图 2

如图 2 所示，在球形玻璃管中心支出两个水平玻璃管，管内各装一个铝制电极。两个电极的轴线正好通过叶轮面的中心。叶轮的两面涂有荧光粉。

演示时用感应圈作电源，将高压加在两电极上。启动感应圈，叶轮立即转动，并发出不同颜色的明亮荧光。改换极性，叶轮向相反方向旋转。

晶体二极管和三极管

(1) 温度对晶体管导电特性的影响

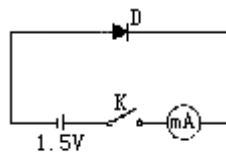


图 1

找一个锗晶体制的晶体二极管（如 2AP 型），按图 1 连接电路。由于二极管反向连接，在常温下电流计（用演示电表 5mA 档）示数很小。用手捏住管壳，或点燃火柴接近管壳，可以看到电流计读数明显增大，说明半导体的电阻随温度升高而减小。

(2) 光照对晶体管导电特性的影响

取一个玻璃壳的三极管（如 3AX81、3AX71），把外壳上的漆刮去。

演示时用演示电流计的电阻档测量其 e、c 极的电阻值（黑表棒接 e 极，红表棒接 c 极）。用手电筒照射管内锗片（PN 结上），电阻为几百欧，而没有光照时，阻值可达到几十千欧。

把电表的两表棒接到 c、b 极或 e、b 极演示，也能观察到这一现象。

如果不用欧姆表，也可用演示电流计 5mA 档，按电路（图 2）演示。从电流的变化，说明光照对半导体导电性的影响。

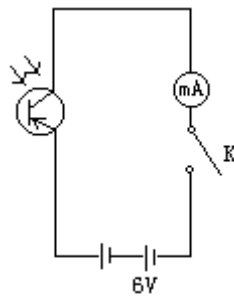


图 2

(3) 晶体二极管的单向导电性

按图 3 连接电路，二极管 D_1 、 D_2 选用 2CZ 型，小灯泡 L、 L_1 、 L_2 取 6~8V。选择电阻 R，使 L 和 L_1 、 L_2 发光亮度相同。

演示时使 A 端接电源正极、B 端接电源负极时， D_1 导通，灯 L_1 亮； D_2 不导通，灯 L_2 不亮。电流方向改变时， D_2 导通，灯 L_2 亮； D_1 不导通，灯 L_1 不亮。但两次通电，灯 L 都会发亮，说明电阻可双向导通。这种演示方法对比强烈，效果较好。

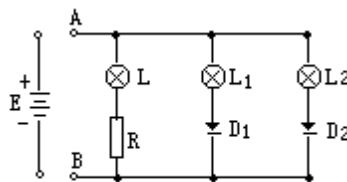


图 3

(4) 晶体二极管的整流作用

按图 4 连接电路。二极管 D 选用 2CP 或 2AP 型。图中与电阻 R ($1k\Omega$) 并联的一为演示用交流电压表，另一为演示用直流电压表。

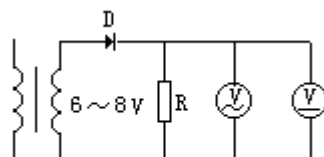


图 4

演示时先将二极管短路，直流电压表没有示数；接入二极管，则直流电压表有示数，从而说明二极管的整流作用，负载电阻 R 上的电流变为直流。

(5) 晶体三极管的放大作用

① 晶体三极管放大感生电压

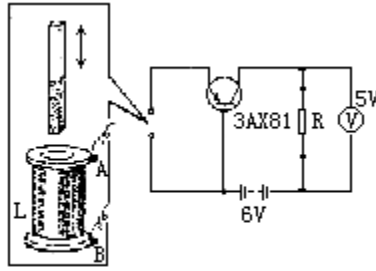


图 5

演示电路如图 5 所示，晶体三极管可选用 3AX81，线圈 L 可用演示楞次定律的副线圈。L 自制时可用 $\phi 0.18\text{mm}$ 漆包线在直径约 3cm 的圆筒上绕 300 匝左右。演示时，先取掉三极管和电源 E (6V)，使线圈 L 两端 A、B 直接和电阻 R 并联，条形磁铁在线圈内上、下运动时，电压表几乎不动。接上三极管和电源，再演示，电压表指针就有明显摆动，说明三极管的放大作用。

演示中，前、后两次磁铁运动频率应接近相等，并且不宜太快，以免电压表的指针因惯性跟不上摆动。

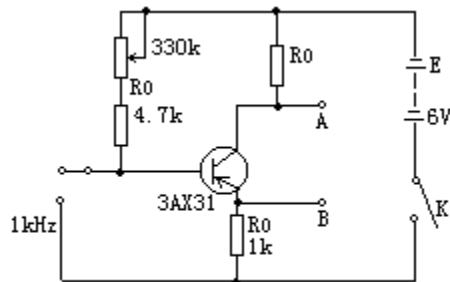


图 6

② 用示波器观察晶体三极管的放大作用演示电路如图 6 所示，三极管可选用 3AX31 或 3AX81 (宜选用 ICBO 较大的锗管，演示效果较好)。

演示前先调节 R_b ，使集电极电流在 $0.5\sim 1\text{mA}$ 左右。在 A、B 端分别接上示波器 Y 输入端和接地端。观察输出波形，尽量增加信号源的输入幅度，直到波形刚好不失真为止。然后保持输入信号不变，调节示波器的 Y 衰减，使屏上波形为满幅度。

演示时，把示波器的“Y 输入”端接“C”处，可观察到未经放大的信号波形；仍接回“A”处，可观察到放大后的波形。

如果三极管放大信号太大，放大前、后波形幅度差别悬殊，无法观察，可在三极管的发射极上串联一个 $1\text{k}\Omega$ 的电阻 R_e 作负反馈，以减少放大倍数。

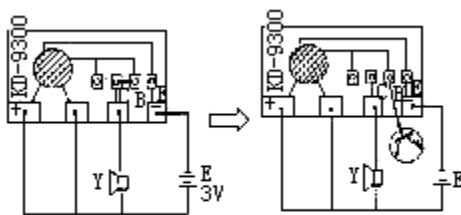


图 7

③图 7 所示装置可演示晶体管对声音的放大作用，图中 KD9300 是一块 CMOS 集成电路，激发一次，内存的乐曲演奏一次。

演示时先取掉三极管，将电路 C、B 用金属丝连接好，这时扬声器放出乐曲，但声音较轻。断开 C、B，将三极管插入集成电路对应孔中，立即可听到响亮的乐曲声。

(6) 晶体三极管自动控制电路

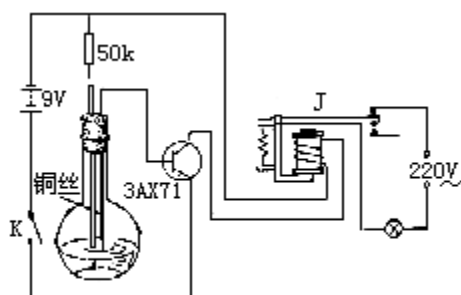


图 8

①图 8 所示装置为恒温自动控制电路，烧瓶内放一些染色水，瓶塞上插有玻璃管和铜丝，玻璃管内另有一根可上下移动的铜丝。

演示时接通电源，用手捂烧瓶，瓶内温度上升，当液面与玻璃管内铜丝接触时，基极回路接通，三极管开始工作，继电器就吸动衔铁，被控制电路断开，灯熄灭。手离开烧瓶后，瓶内温度下降，管内液面下降，液面与铜丝分离，断开基极回路，三极管停止工作，继电器释放，被控制电路接通，灯又亮，由此可控制烧瓶内液体的温度。电路中 3AX71 为低频三极管， I_{ECO} 要小， β 要大；J 为高灵敏继电器，电阻在 $1000\ \Omega$ 以上。

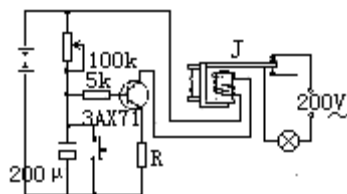


图 9

②图 9 所示电路可说明晶体管延时自动控制作用。

演示时，按一下电键 K，继电器释放，接通电源，灯亮。待一定时间后（对电容器充电），继电器吸动，切断电源，灯暗。调节电位器阻值可控制延时长短（10 秒内）。BC 系低频小功率管， I_{ECO} 要小， β 要大，J 为 $1K\ \Omega$ 以上的高灵敏继电器。

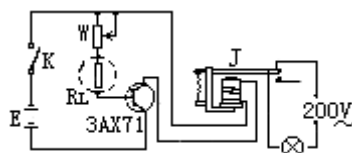


图 10

③图 10 所示电路为光敏自动控制电路。调节 W，到继电器刚起动时，把 W 的阻值固定下来。若遮住光线，继电器立即释放，工作电路被切断，说明光电自动控制器的基本作用原理。BG 选用 3AX 型， $\beta > 100$ 。这个电路的工作原理如下：光线没有照射 R_L 时，其阻值很大（约为数 $M\ \Omega$ ），基极电流很小，集电极电流也很小，因而继电器释放。光线照射 R_L 时，它的阻值变小（约为几 $k\ \Omega$ ），基极电流增大，集电极电流随之增大，因而继电器吸合，工作电路被接通。

磁场对电流的作用

(1) 磁场对电流的作用

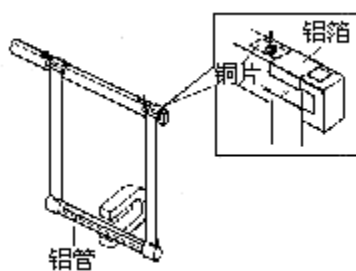


图 1

①如图 1 所示,从大电解电容器中拆取铝箔,把它抹平后在圆棒上卷成管状。接缝处用胶水纸粘合,抽掉圆棒即成轻、薄铝管。截取两条宽 1.5cm、长约 20cm 的铝箔,把两条铝箔各在铝管两端卷几层后用胶水纸固定,这样就成了一个有导线(铝箔带)的铝管。把两铝箔贴紧在木条的铜片上,使铝箔和铜片接触良好,并用胶水纸固定。

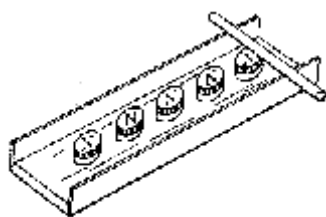


图 2

演示时如图放置磁铁,在两铜片上接上电源,即可演示磁场对电流的作用。改变电流方向或磁极方向,导线受力方向就发生改变。因偏转部分铝管质量小,直径比较大,演示效果就好。该装置只要用一般的磁铁和一节 1 号电池就可以观察到明显的偏转。因为电路接通时几乎处于短路状态,所以必须瞬时通电。

②如图 2 所示,木板两侧各固定铜片作轨道,铜片高出木板平面。磁铁用胶固定在木板上,其高度稍低于铜片 1~2mm,且同一磁极向上。用铝箔卷成的铝管作导线。

演示时两铜片接电源,即可显示磁场对电流的作用。此实验也可如图 3 所示用蹄形磁铁进行演示。

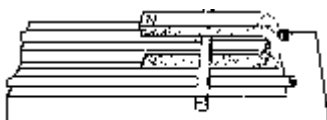


图 3

③如图 4 所示，取宽 1cm、长 30~40cm 的铝箔条，两端折成锯齿状后固定在支架上。演示时如图所示把磁铁放在铝箔中段，当铝箔通电时，铝箔即凸向一边。

(2) 通电直导线的相互作用

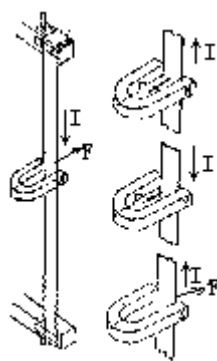


图 4

如图 5 (a) 所示装置可用两平行的铝箔管作导线演示电流相互作用，其控制电路如图 5 (b) 所示。

双刀双掷开关置于“1”时，通过两铝管上的电流方向相同，两铝管相互靠近；开关置于“2”时，通过两铝管上的电流反向，两铝管相互推斥。

两铝管间的距离对实验效果有很大影响，“相吸”时以 3~5mm 为宜；“相斥”时以 2~3mm 为宜。

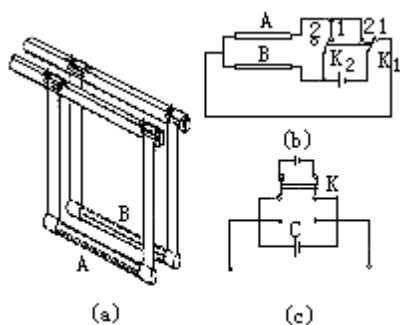


图 5

电源可用 6V 蓄电池，操作时只能瞬时接通，否则因电流太大会损坏电源。如果电源部分采用图 5 (c) 所示线路，以 12V 蓄电池先对大容量电解电容器

(10000~20000 μF 、耐压 25V) 充电，然后再通过导线作大电流放电，演示效果明显而又不会损坏电源。

(3) 电流天平

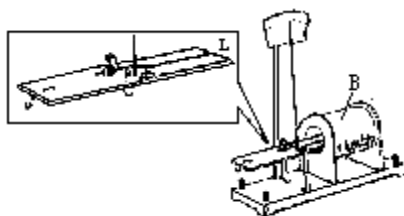


图 6

图 6 所示为 J11208 型电流天平。固定在底座上的线圈 B 可用来产生磁场。黄铜制的立柱上有刀槽，用来架起天平臂并导入电流。天平臂一端为铜箔形成的 U 形导线，实验中受磁场作用力。顶端长度为 L，并设有中心分界线；另一端装有砝码挂钩，中央两侧装有刀口，起支持和导电作用。砝码用细金属铝丝制成 S 形，可串挂使用，分 20mg、40mg、60mg 三种。

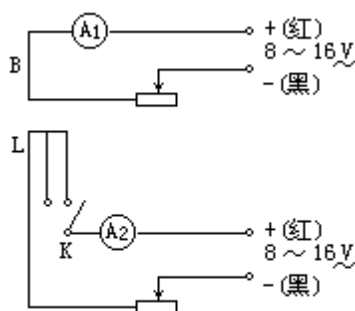
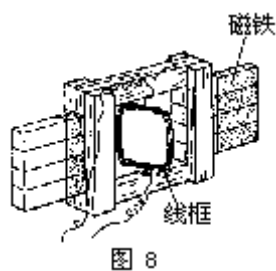


图 7

演示时，把天平放在水平桌上，调节平衡螺丝使天平平衡，按图 7 所示连接电路。调节 R_1 ($10\ \Omega$)，使 A_1 中通过的 I_1 为 1A；调节 R_2 ($10\ \Omega$)，使 A_2 中通过的 I_2 为 1A，这时天平失去平衡，加砝码使天平平衡，由此可得线圈受力为 F。当通入线圈电流为 2A、3A 时，测得受力为 2F、3F。可得到 F 和 I_1 成正比关系的结论。仍用同样方法，改变 L 上的电流，可得出受力 F 和 I_2 成正比。保持 I_1 、 I_2 不变，拨动天平臂上转换开关 K，使导线长度为 $L/2$ (即 2cm)，可测出受力为 $F/2$ ，得 F 与 L 成正比关系。综合上述结果，可得 $F \propto BIL$ 。

仪器使用前，应将刀口用酒精棉花擦拭，不用时将天平臂卸下放好，防止刀口损坏。

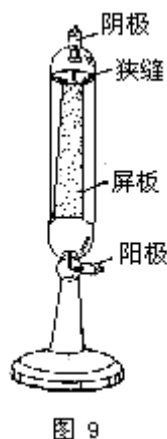
(4) 矩形线圈在磁场中受力



用直径为 0.53mm 漆包线按图 8 所示绕一矩形线框，共 40~50 匝。线圈上、下两边的中点各穿一枚钢针，然后用线扎牢在线框上、下边上。让针尖朝外，并把线圈引出的两端分别焊在针孔内。这样两根针既作引出端又作转动轴。根据线圈和条形磁铁尺寸，按图作木框架，在木架上、下各固定一个阴揷钮作为轴承。把线圈框轴支承在阴揷钮孔内。用多根条形磁铁，把相同极性作一组分别插入木支架两边缝内。

演示时从两阴揷钮处给线框通以电流，通电线框在磁场作用下发生转动。改变电流方向或磁场方向，线圈的转向也随着改变。

(5) 磁场对运动电荷的作用



①如图 9 所示，抽成真空的玻璃管竖直插在底座上（也有卧式），管的顶端为阴极，下端为阳极，两极之间斜着安装一个带有狭缝并涂有硫化锌的屏板。

演示时用感应圈作电源。启动感应圈，管内产生阴极射线，射线通过管内狭缝在屏上可描出绿色光迹。用蹄形（或条形）磁铁作磁场，射线束偏转。磁极方向改变，射线束偏转方向随着改变，演示了电荷运动方向、磁场方向及运动电荷在磁场中受力方向之间的关系。

也可以利用“稀薄气体放电管组”中真空度为 0.02mmHg 的放电管一支，加上高压，此管发出阴极射线，然后将磁铁接近管子演示。由于没有荧光屏，呈现的荧光较弱，实验宜在暗室进行。

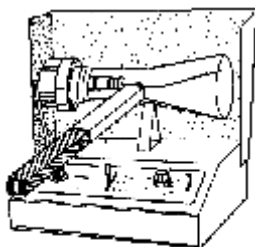


图 10

②图 10 所示为电子束演示器（J14476 型）。演示时将演示器的加速极电压及偏转极电压的控制旋钮都逆时针转到底，偏转极电压开关置“断路”位置。接通电源，预热 5 分钟。然后慢慢提高加速极电压，电子束管内出现一条绿色光迹，继续升高加速极电压，光迹就越亮，表明电子运动速度加快。用条形磁铁靠近管的中部，看到光迹偏转，磁铁离管越近，光迹偏转角度越大，从而证明运动电子受到的作用与磁感应强度成正比。如果保持磁铁与电子束管的距离不变，当加速极电压增大时，光迹偏转角度减小；当加速极电压减小时，光迹偏转角度增加。这证明电子束偏转角度与加速极电压成反比，也就是与电子运动速度成反比。

此实验也可利用一般示波器，在磁场作用下，电子束在荧光屏上的光点（或扫描线）位置变化进行演示。开启示波器，屏上出现光点，把磁铁置于荧光屏平面，光点移动（图 11）。

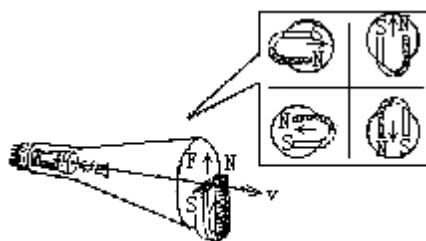


图 11

为防止屏上长时期出现较亮光点而损坏光屏，演示时也可把光点调成扫描线进行。

③图 12 是演示电子束在匀强磁场中作圆周运动的“洛仑兹力演示仪”。此仪器可以在三维空间观察到电子在磁场作用下的运动轨迹。仪器由演示电子管（威尔尼特电子管）、线圈（亥姆霍兹线圈）和电源三部分组成。演示电子管是

一个带颈大玻璃泡，内装一个由阴极、调制极、加速极及一对偏转板组成的电子枪。管内充有一定量的混合惰性气体。当各电极加上工作电压后，枪内发出一束经加速和聚焦的电子束，管内气体发光，显示电子运动轨迹。线圈由两个串联而成，两线圈同轴平行放置，通电后线圈轴线中点附近可得到一个均匀磁场。



图 12

演示时，将演示电子管插入仪器盖板中央的管座内，使管子位于线圈中间，将面板所有旋钮逆时针旋到底。接通电源预热，按下“加速”开关，旋动“加速电压”旋钮，当加速电压达 150V 时即有电子束射出。旋动“激磁电流”旋钮，给线圈加上电压，随着激磁电流增加，电子束开始偏转，并构成一个圆形或螺旋形轨道。旋动“调制电压”旋钮，使电子束处于最佳聚焦状态。拨动演示电子管，改变电子速度方向和磁场方向间的夹角，即得各种交角下电子运动的螺旋轨迹。

此仪器还可观察电子在电场作用下的运动轨迹：将仪器面板后面的“偏转 1”和“电压”用导线连接，“偏转 2”和“偏转”连接，按下“加速”开关，调节“偏转电压”旋钮，即得电子束在一对偏转板电场作用下的偏转。

仪器使用时应注意，加速电压不能大于 300V，否则电子束散焦严重。

观察电子螺旋轨迹时，为了能观察到较多的螺旋圈数，可适当增加激磁电流，但演示时间不宜太大。



图 13

④如图 13 所示装置可演示洛仑兹力，在玻璃皿中放入硫酸铜溶液，中心放一圆柱形电极，边缘为环形电极，玻璃皿放在磁铁中间，再在溶液上撒些小纸屑。

演示时两电极分别接电池正、负极，液体便旋转起来。改变磁极方向或电源正负，都可改变液体旋转方向。说明了磁场对电流的作用。

蹄形磁铁也可用磁环放在培养皿底部代替。若需放在投影器上投影，磁铁可用环形线圈（采用 $\phi 0.41\text{mm}$ 漆包线在环上绕 500 匝）套在培养皿上代替。通电（6V 直流）后产生磁场。两极电压不宜过大，否则电极腐蚀很快，纸屑也容易吸附在电极上。如果纸屑运动速度不够大，可适当增加磁场强度或增加绕圈两端的电压。

硫酸铜溶液的转动并不是正、负离子的运动。正、负离子的运动情况比较复杂，它们首先受到径（圆形电极的径）向电场力的作用（正、负离子受力方向相反），产生径向运动。由于运动中离子还受洛仑兹力的作用（对正、负离子方向都一样），偏离径向变为较复杂的运动。运动虽然复杂，但总有沿切线方向（与圆形电极的径向垂直的方向）的分运动，这个分运动的动量作用于溶液，使溶液产生了环形的流动。实验从宏观上用“安培力”来解释溶液旋转的现象，与微观解释并不矛盾，但使问题变得简单易懂。

电磁感应

（1）电磁感应现象

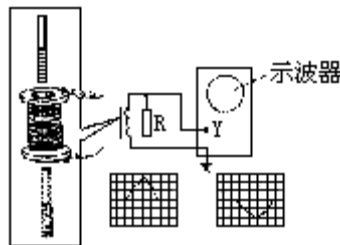


图 1

如图 1 所示，在线圈管用 $\phi 0.51\text{mm}$ 漆包线密绕 500 匝，头、尾分别与示波器“Y 输入”和“地”接线柱相接。

演示时，将示波器扫描频率调到 50Hz 左右。当磁铁插入线圈或从线圈内拔出时，荧光屏上出现线圈所感应的电压波形，且波形方向相反。说明磁铁插入线圈和拔出线圈产生的感生电动势方向相反。

演示前应先先将干电池的正、负极分别接示波器“Y 输入”和“地”接线柱，扫描线将向上移动一段距离；电池反接，扫描线将向下移动一段距离。说明示波器能检验感生电流的方向。

(2) 自感

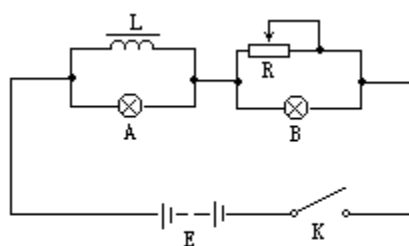


图 2

①按图 2 所示，L 为铁芯线圈，用 $\phi 0.51\text{mm}$ 漆包线在截面积为 $6\sim 8\text{cm}^2$ 的铁芯上绕 1000 匝，R 为 10Ω 可变电阻，两小灯泡 A、B 均为 6.3V ，电源 E 为 10V 蓄电池，K 为电键。

演示时，先闭合电键，调节 R 使两小灯泡亮度相等，再断开电路。在迅速接通电路瞬间，L 产生一个自感电动势，叠加在小灯泡 A 上，所以 A 灯泡较 B 灯泡亮。随着电流稳定，两灯泡亮度变为相同。

迅速切断电源，L 又产生一个自感电动势附加在小灯泡 A 上，A 突然闪亮后才熄灭，而 B 随着电源的接通和切断正常发光和熄灭。

如果在接通电路时，能使通过铁芯线圈的电流方向跟上次实验时的电流方向相反，则由于铁芯在反向磁化时呈现较大的自感量，实验现象更为明显。为了演示方便，可用一双刀双掷开关代替电键。

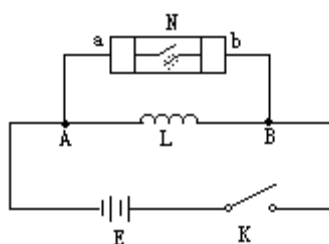


图 3

②如图 3 所示，L 为日光灯镇流器（或采用变压器原理说明器中 400 匝的线圈，不套铁芯），N 是氖管（起辉电压约为 70V ），电池组电压为 4V 。演示时，闭合 K，氖管不亮。在迅速断开 K 的瞬间，氖管发出红色辉光，此辉光只产生在氖管电极 b 的周围。因为直流电使氖管中氖气发生辉光放电时只发生在负极附近，由此断定，线圈 L 断电时的自感电动势，B 端低于 A 端。

线圈自制时,在直径约 40mm 的线圈管上用 $\phi 0.51\text{mm}$ 的漆包线密绕 400~600 匝。

(3) 楞次定律

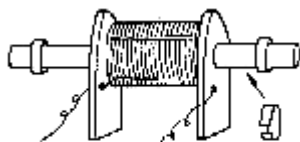


图 4

如图 4 所示,在软铁棒(直径 10~15mm,长约 15cm)的线圈架上,用直径约 0.7mm 漆包线密绕 1000 匝。将日光灯启动器铝质外壳剪成 3 个宽约 10mm 的铝环,其中一个环是开口的。

演示时,线圈接 8~12V 蓄电池,接通电源瞬间,套在铁芯两端的闭合铝环分别向外移动甚至从端部跳出,而开口铝环却原位不动。保持线圈中通过恒定的电流,再将闭合铝环套在铁芯上,释放后都停在原位不动。这表明恒定的磁通量不能在闭合铝环中产生感生电流,因而环不受磁场力。

再迅速切断电源,在断开的瞬间,开口铝环仍然不动,而闭合铝环却在铁芯上向内移动。

实验时,线圈持续通电时间不宜太长,以防线圈过热或损坏电池。

(4) 涡流

①涡流的热效应,用硅钢片叠成如图 5 所示铁芯,另准备一块和铁芯相同形状、相同大小的铁块。在它们外面都绕以相同的线圈(用 $\phi 0.47\text{mm}$ 漆包线绕 1000 匝)。

演示时在铁芯和铁块上各用蜡固定一面小旗,两线圈并联接入 50V 左右交流电。通电后不久,铁块上的小旗因蜡熔化先倒下。这说明铁块产生的涡流比铁芯强,铁块易发热,而铁芯涡流电阻大,电流强度减弱。如果线圈接直流电,两个线圈都不易发热。

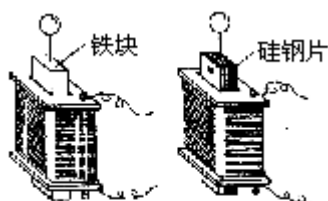


图 5

②阻尼盘，用厚 0.6~1mm 的平整铝片，做两个直径约 15cm 的铝盘，其中一个铝盘沿径向开有直缝。

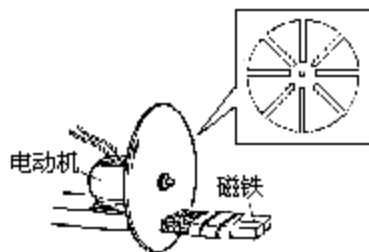


图 6

演示时先将无缝铝盘插在玩具电动机的转轴上，调节 R，玩具马达以一定转速转动。当用强磁铁（几根条形磁铁同极同向用绳缚住）靠近转动圆盘时（图 6），由于涡流作用转速显著变慢。换用有缝铝盘重复上述实验，当磁铁靠近圆盘时，其转速无明显变化。

交流电和直流电的比较

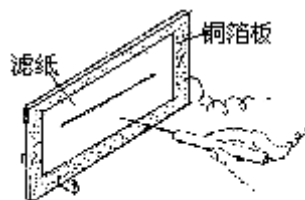


图 1

(1)图 1 所示为交、直流特性显示板。把吸有碘化钾(5%)和淀粉液(1.5%)的滤纸（宣纸、毛边纸均可）铺在铜箔板上。

演示时接 6V 直流电，其负极接铜箔板，正极接表棒，用表棒在纸上划动，留下蓝色的线条。交换电源正、负极，表棒再在纸上划动，纸无蓝色点迹出现。说明表棒只有接正极时，纸上才出现蓝色。换接 6V 交流电，表棒在纸上划出的是些断续的蓝色线段，而不是连续的线条。说明电流方向周期变化，表棒的正、负极交替变化。如果不用铜箔纸，直接将纸铺在板上，两根表棒在滤纸上划动（图 2）：接直流电时，仅在表棒正极有蓝色划痕；若接交流电，纸面上同时出现两条断续相间的线段。

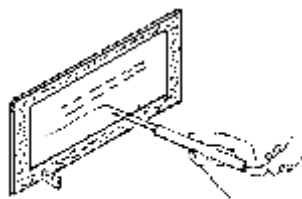


图 2

通电后产生电解，碘离子在正极失去电子，析出单质碘，使淀粉变蓝。由于交流电极性周期变换，纸条正、反面都出现间隔的蓝色痕迹。

(2) 如图 3 所示，把发光二极管 D_1 、 D_2 和限流电阻 R 固定在木棒上。

演示时先接直流电 (6V)，因仅一管发光，所以左、右挥动木棒时，观察到一条亮线 (图 3 (a))。然后接交流电 (6V)，因两管均发光，所以当挥动木棒时，可以看到两条相互平行的断续亮线 (图 3 (b))。

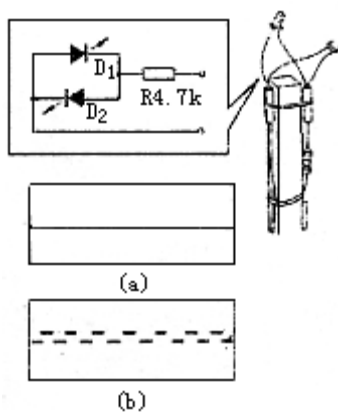


图 3

上述实验也可用氖管演示。按图 4 所示方法，分别将氖管接入交流和直流电路中。当接直流电时，氖管导电，仅在负极出现辉光；接交流电时，因两个电极没有恒定的极性，任何一个极片，每隔半个周期轮流变成正极，所以两个极片都出现辉光。

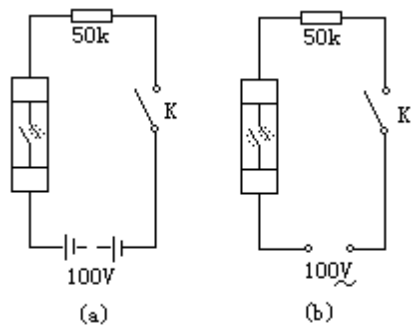


图 4

如果将此氖管固定在棒上，接直流电挥动时，可观察到一条连续的光，而接交流电时，是频闪的光点。

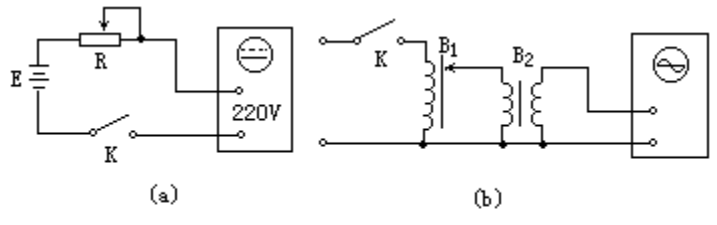


图 5

(3) 图 5 所示为用示波器观察交流电和直流电波形电路实验选用的示波器，频响必须从直流 (DC) 开始。

演示时，把示波器的交流、直流选择开关 (AC-DC) 拨向 DC 档，开启示波器，调节有关旋钮，出现扫描线。然后按图 5 (a) 把直流电压输入到示波器，扫描线在竖直方向移动，直流电压越高，移动幅度就越大。改变直流电压极性，移动方向改变。按图 5 (b) 接线， B_1 为调压变压器， B_2 为 220V/6V 灯丝变压器。调节 B_1 ，示波器屏上即得幅度可变的交流波形。

交流电的产生

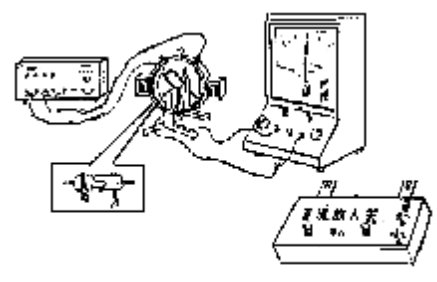


图 1

(1) 如图 1 所示连接电路，图中演示电流计拨在“C”档，并调成中心零位式（量程为 $100\ \mu\text{A}\sim 0\ \mu\text{A}\sim 100\ \mu\text{A}$ ）。电机原理说明器（J11216 型）的定子激励线圈接低压直流电源 6V 输出，两个电刷分别与两个完整集流环接触。

演示时，匀速旋转线圈，电流表指针以零位为中心左、右对称摆动。表明电枢线圈中产生的电流（电动势）的大小和方向都随时间作周期性变化，因而显示的是交流电。缓慢地转动线圈，还可清楚观察到线圈转动半周，感生电流方向改变一次，以及线圈在磁场中的位置与交流电瞬时值的关系。

线圈匀速旋转时，其周期与电流计指针的振动周期（约 2 秒）应接近。如转速过大，指针因惯性，摆动的幅度减小。

实验中若发现指针偏转角度较小，可加大激励电压（12~16V），但因电流过大，演示时间要短。也可给电流计加接“微电流放大器”放大电流。

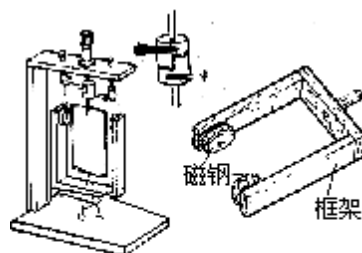


图 2

(2) 图 2 所示装置可演示旋转磁场或旋转线圈产生交流电。

演示时，两个电刷分别与两个完整集流环相连，线圈输出接线柱和演示电流计相连。当转动磁铁框架或旋转线圈时，电流计显示有交流电产生。

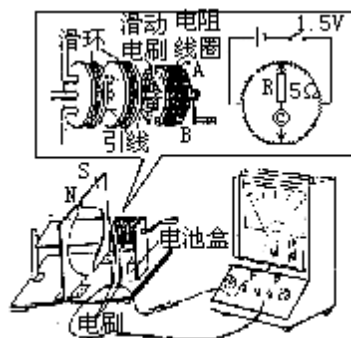


图 3

(3) 图 3 所示装置，是在原交流发电机模型基础上增加一个模拟交流信号源，并用演示电流计显示。电阻线圈是用 $\phi 0.5\sim 1\text{mm}$ 的漆包电阻丝均匀穿绕在长 30mm、直径 40mm 的塑料管上首尾相接而成（总电阻约 $10\sim 20\ \Omega$ ），且固定在作为电池盒的支架上。它的首尾端接点（A）和它正对面的一点（B）各引出导线接电池正、负极。转轴上装有两相互绝缘的滑动电刷，紧压在电阻线圈一端面上，用砂纸把此端面的漆层砂去，使电刷和电阻丝保持良好接触。沿环是两个有槽轮子，槽内绕有的裸铜丝分别和滑动电刷相连。滑环上电压通过底座上电刷输出。

演示时，底座上电刷接演示电流计（调成中点零位式）。转动滑动电刷，从电流计摆动情况可观察到，当“转子”在“磁场”里转动时，就输出了“交流电”。

模型演示时，旋转速度可以很慢，必要时甚至可停下来，但电流计仍能指示出“转子”在该位置上切割磁力线运动时所产生的感生电流（感生电动势）。实际上转子在静止时是不会产生感生电动势的，这种类似电影里的“停格”可用来讲解交流电的产生，判别感生电流的方向，研究交流电相位与转子切割磁力线受力方向之间的关系。

交流电的最大值和有效值

(1) 用氖管演示交流电的最大值和有效值关系

如图 1 所示，示教板上装有氖管（串一 $3\text{k}\ \Omega$ 限流电阻），电压表为具有交流 250V 和直流 250V 两种量程的。交流电源用调压变压器，直流电源用 J02405 型直流高压电源（为使此电源直流高压输出可调，可把电源的电源线接调压器的输出端）。

演示时，将 K 拨向交流，电压表接交流档，调节交流输出至氖管刚起辉，此电压是使氖管起辉时的交流电压有效值 U 。

将 K 拨向直流，电压表接直流档，调节直流输出至氖管刚起辉，此

电压即为氖管起辉的最大值 U_m 。比较两次的电压示数，可以得到 $U_m = \sqrt{2} \cdot U$ 的关系。

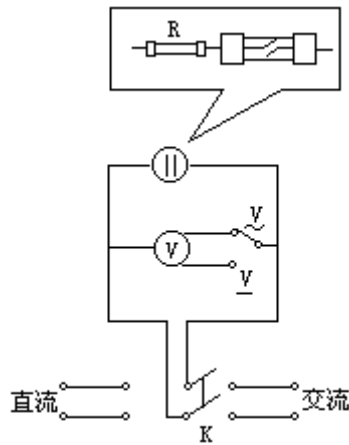


图 1

同一型号的氖管，其起辉电压不相同，两个电极相距较近者，起辉电压较低。同一氖管的起辉电压随环境温度不同而变化，温度升高，起辉电压降低。

实验时，当氖管起辉后，应立即读取电压值，然后把电压降下来，以免氖管发光时间过长，温度升高。每次实验后，要有适当的间歇时间，让氖管冷却后再用。

本实验原理简述如下：

氖管的起辉电压是一定的，当交流电压加至氖管两极时，如果该电压刚能使氖管起辉，这是交流电压的最大值作用结果，此时若用交流电压表，测出的仅是电压有效值 U 。

氖管的起辉电压，可以这样来测定：将一直流电压加至氖管的两极，逐渐升高所加的电压，直至氖管刚起辉为止，这时电压即为氖管的起辉电压，其值可用直流电压表读出，此值等于交流电压最大值 U_m 。

氖管也可用日光灯启动器内的氖泡代替。

(2) 用电容器测交流电的最大值和有效值。

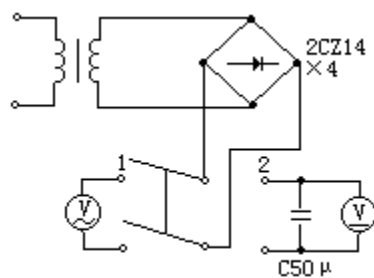


图 2

实验装置如图 2 所示，交流电压表插上“2.5”标度盘，直流电压表插上“2.5V”标度盘。

演示时，将 K 拨向 1，交流电压表显示的是全波整流后单向脉动电压的有效值，即交流电的有效值 U 。K 拨向 2，这时单向脉动电流向 C 充电，直流电压表显示的是单向脉动电流向电容器充电后的最大值，即交流电的最大值 U_m 。比较 U 和 U_m 值，可得两者关系。

交流电的电压和电流的相位差

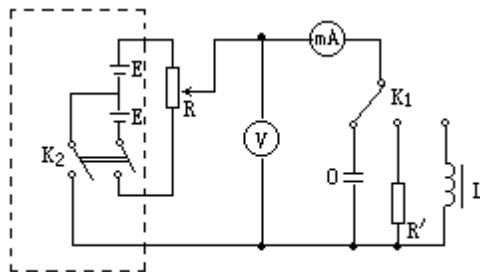


图 1

(1) 如图 1 所示， L 为调压变压器的全部线圈（也可用电感量为几百亨利，绕组电阻较小的扼流圈），虚线框内是模拟的低频信号源，其中 R 为电位器，考虑到负载电阻对输出电压的影响，应选择阻值远小于负载电阻的电位器（数百欧姆）。两节电池串联，中间抽头，作为交流输出一端。信号频率由来回旋动电位器的速度来定，要和演示电表指针的摆动固有频率配合，这个频率因表而异，一般周期在 1.5~2 秒左右。为比较电压表和电流表指针的相对位置，可把指针涂成不同颜色，并把演示电表的标度盘抽去，将它们叠放在一起。

演示时，将选择开关 K_1 依次接在电阻 R' （10k）、电容 C （100 μ ）、电感 L 上，以演示纯电阻电路、电容性电路、电感性电路中电流、电压的相位关系。

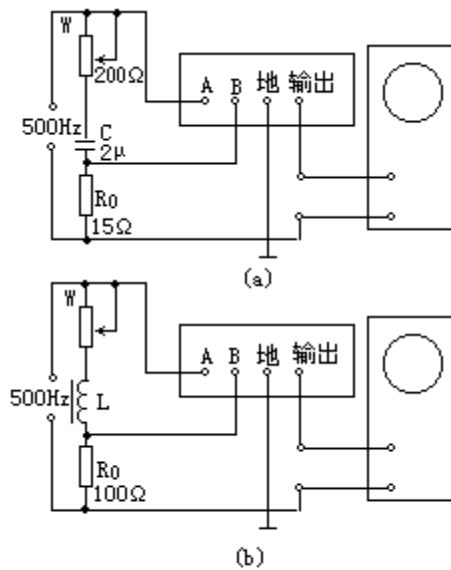


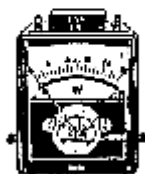
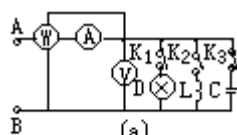
图 2

(2) 图 2 (a) 所示电路可演示 R、C 交流电路的电压和电流的相位差。图中 500Hz 交流信号可取教学信号源或学生信号源。

演示时，将电子开关的“频率范围”置于“5~50k”赫兹档，示波器的“扫描范围”置于“100~1k”赫兹，“Y 衰减”置于“1”档，W 的阻值调到最大。输入交流信号，调节有关旋钮，示波器的屏上就显示出标志电流和电压的波形。演示中可分别调节 A 增幅和 B 增幅旋钮，使学生分清哪条曲线是表示电流，哪条曲线是表示电压。再观察它们的相位差，发现在 W 阻值很大时，电流和电压的相位差几乎为零。然后逐渐减小 W 阻值，可见电流的波形曲线向左错开，说明电流超前，相位差加大。到 W 阻值调到零时，电流超前电压近 90° 。图中 W、C、 R_0 所取数据能使相位差接近于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化。

电子开关的频率范围选择，是从示波器屏上的图线连续的要求考虑的。通常信号频率高时，电子开关的频率取低段，反之取高段。

当变阻器 W 阻值减小时，电流波形的幅度增大，因此在演示过程中，要适当调整相应的电子开关增幅旋钮，使示波器屏上的两条曲线的幅度不致相差过大。



(b)
图 1

图 2 (b) 所示电路可演示 R、L 交流电路中电流和总电压的相位差。图中 L 用可拆变压器的 200 伏线圈（带铁芯）。演示时，电子开关的“频率范围”置于“5~50k”赫兹档，示波器的“Y 衰减”置于“1”档，“扫描范围”置于“100~1k”赫兹档，增益旋钮右旋到底，W 的阻值调到最大。输入交流信号后，适当调节有关旋钮，示波器屏上就显示出标志电流和电压的波形，它们的相位差大于 0° 而小于 90° 。将 W 阻值调小时，相位差就逐渐增大；当 W 阻值为零时，相位差接近 90° 。

交流电的功率

(1) 图 1 (a) 所示电路是用瓦特表测有功功率和视在功率。图中 C 为 4 个 $200 \mu\text{F}$ 并联，L 取变压器原理说明器的红色线圈，线圈套在 U 形铁芯的一个臂上（条形铁芯不用），从“0”、“2”端引出导线，瓦特表插上注有“25V1A”标度盘，量程为 $0\sim 25\text{W}$ 。电压表和电流表的量程分别为交流 $0\sim 10\text{V}$ 和交流 $0\sim 1\text{A}$ 。电路的 A、B 端接交流 8V。

演示时，闭合 K_1 ，组成纯电阻电路。此时灯泡发光，瓦特表指示的有功功率为 P，电压表和电流表的示数分别为 u 和 I，则 $S=uI$ 为视在功率。由实验可知，在纯电阻电路中，有功功率 P 等于视在功率 S，功率因数 $\cos \psi = P/S = 1$ 。断开 K_1 ，接通 K_2 ，接入 L，组成纯电感电路。由实验可知 $P < S$ ，功率因数 $\cos \psi < 1$ 。只接通 K_3 ，组成纯电容电路，此时电压表和电流表仍有指示，但瓦特表指示的有功功率 P 却等于零。说明电容器可储存电场能量，它和电源之间进行着可逆的能量转换，而不消耗电功率。同时接通 K_2 、 K_3 ，瓦特表的示数几乎为零，但电流表的示数却明显减小。说明由于电容的接入，功率因数提高了。

演示瓦特表（J01404 型），其外形如图 1 (b) 所示。其上 CZ_1 、 CZ_2 接线柱为电流接线柱，连接时与负载串联； CZ_3 、 CZ_4 为测量电压用，连接时与负载并联，演示前应向学生说明四个接线柱的用法。

图 2 (a) 所示 J01401-W 功率变换器是 J01401 型演示电表的专用附件。使用时，演示电表拨在“AV”位置，同时更换 25W 表牌，其电路按图 2 (b) 所示连接。

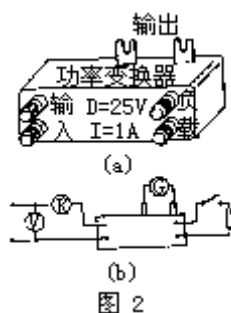


图 2

(2) 如图 3 (a) 所示：示教板上，并联有电容器、日光灯和白炽灯，并分别可用 K_1 、 K_2 、 K_3 接入电路。演示时，先后闭合 K_1 、 K_2 、 K_3 ，可得在纯电阻电路中，电感性负载的功率因数的变化以及电容器接入后功率因数的提高。

上述实验中，日光灯的亮度及瓦特表的示数在电容器接入前后几乎不变，因此在演示时可省去瓦特表，仅从日光灯的亮度不变来说明消耗的功率相同，还可用 6~8V、1w 的小灯泡代替电流表指示电路中的电流强度（图 3 (b)）。

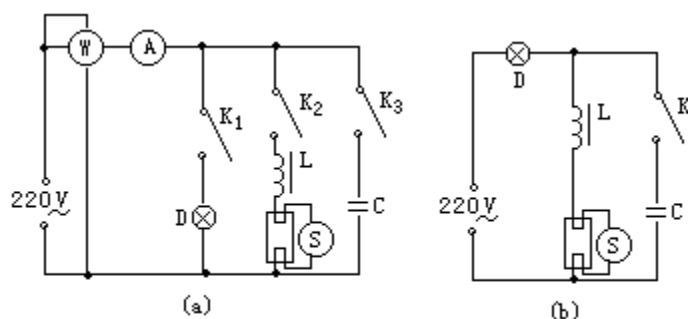


图 3

演示中当日光灯起辉后，小灯泡正常发光。当电容器并入电路后，日光灯亮度不变，但小灯泡亮度明显变暗，说明电路中电流强度变弱，功率因数提高。

(3) 如图 4 所示，L 是用 $\phi 0.5\text{mm}$ 漆包线在收音机磁棒的管上密绕 200~600 匝而成，A、B 端接有功率输出的低频信号源。

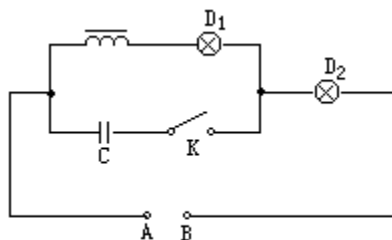


图 4

演示时，将音频信号源调至适当频率，逐渐增大音频输出，使两小灯泡(2.5V)正常发光，接通K，电容器C与L、D₁并联，小灯泡D₂明显变暗，但D₁亮度不变。说明在电感电路上并联电容能提高电路的功率因数。

当电容器并入电路后，电容支路中电流的相位正好与电感支路中电流的相位相反，当容抗和感抗差不多时，总电流明显减小。此实验因电感和电容已经确定，为了达到感抗和容抗基本相同，实验前应认真选择信号源频率。

变压器

(1) 演示变压器原理

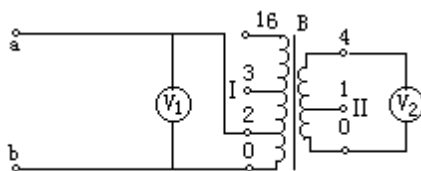


图 1

①按图 1 连接电路，变压器原理说明器(J11225 型)红色线圈 I 的“0”、“2”端作为初级线圈，绿色线圈 II 的“0”、“4”端作为次级线圈。电压表都接上直流“0~10V”通路板，并调成中心零位式。a、b 接图 3 装置中的模拟交流信号源。

演示时转动“信号源”，即在变压器的初级电路上加交流电压，接在次级的V₂表的指针以零位为中心作左右对称的周期性的摆动，如信号源停在某一位置不动，V₁表上仍有指示，但次级线圈上V₂指针停在零位不动。表明稳恒直流电不能用变压器来改变电压。

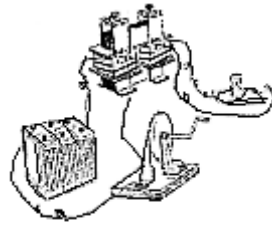


图 2

②如图 2 所示，变压器次级接小灯泡，初级线圈串接电键和蓄电池。接通初级线圈电路后，次级线圈上的小灯泡并不发光；只有在接通和断开电键的瞬间，小灯泡才会发光。如果将电流断续器代替电键，转动电流断续器时，次级线圈上的小灯泡闪闪发光。说明断续器使直流电流变成脉冲电流，因而在次级电路中产生感生电动势。

(2) 图 3 (a) 所示装置可演示变压器中铁芯的作用。线圈 I 套在铁芯里，“0”、“8”端接低压电源交流输出(18V)，构成变压器初级电路。演示时电压表(插上“0~10V”)标度盘与小灯泡并联，用来观察次级线圈的输出电压。

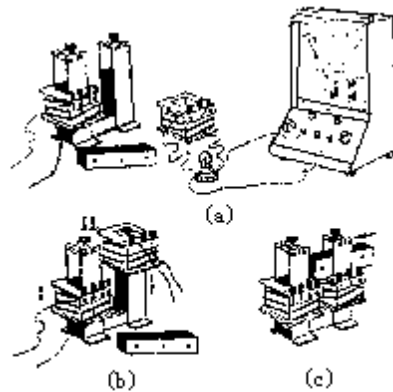


图 3

演示时，先把线圈 II 放在线圈 I 周围任一位置，电压表无指示，小灯泡也不发光。线圈 II 逐渐进入铁芯的过程中(图 3 (b))，电压表指针开始偏转，小灯泡的灯丝由暗红变亮。表明有铁芯比没铁芯次级线圈中产生的感生电动势大。再插入条形铁芯(图 3 (c))，直到铁芯闭合，可见电压表的示数、小灯泡的亮度都随铁芯开口的减小而增大。

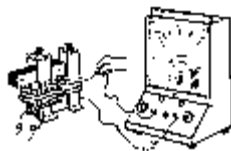


图 4

(3) 演示变压器的变压比和匝数比的关系如图 4 所示，初级线圈 I 同上述 (2) 中的线圈 I，次级线圈 II 用长约 2m 的绝缘导线绕在铁芯另一边替代。

演示时，拉开条形铁芯，把次级绕组在 1~20 匝间改变，记录次级电压示数，可以发现，次级电压随匝数的增减而增减。显示了次级电压比和匝数比的关系。每次都必须把条形铁芯闭合后再记录次级电压数。

(4) 演示变压器传递能量

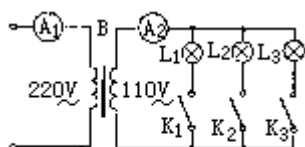


图 5

按图 5 所示电路制一块示教板。B 为自绕 220V/110V 变压器，其铁芯选用 GB22×35mm²，初级绕组用 $\phi 0.27\text{mm}$ 漆包线绕 1100 匝，次级绕组用中 $\phi 0.47\text{mm}$ 漆包线绕 560 匝。

演示时，顺次闭合 K_1 、 K_2 、 K_3 ，记录电流表 A_1 、 A_2 上各次对应的读数 I_1 、 I_2 。实验表明次级电压是初级电压的 1/2 时 (220V/110V)，次级电流 (I_2) 近似为初级电流 (I_1) 的 2 倍，所以次级功率差不多和输入功率相等。说明变压器能传递能量和改变电压，但不能增加能量。B 不能用可拆变压器，因这种变压器损耗达 50% 以上，无法满足演示要求。

三相交流电

(1) 用示波器观察三相交流电波形

①利用三相变压器，将电压降到 4V 左右，然后按图 1 分别接在两个电子开关 (J14460 型) a、b 上。两电子开关的开关频率应不同。电子开关 a 的频率应

高于 b。当开关 a 跟示波器（J14458 型）接通时，由于 a 的开关转换速度高，可以交替输入两个信号，当开关 b 的输入 Y_2 导通后，又将第三个信号输入示波器，这样在荧光屏上就可以同时看到相位相差 120° 的三条正弦曲线。

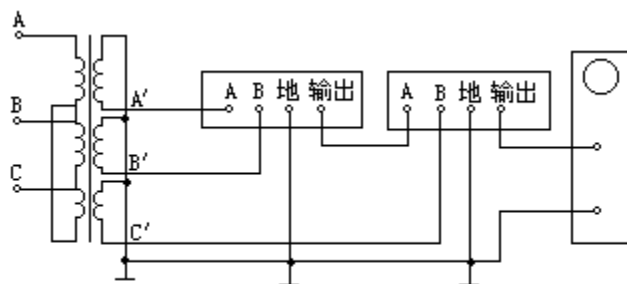


图 1

演示时，可分别用一个电子开关进行调整，然后把两个电子开关串联起来，屏上就会有 3 个波形出现。

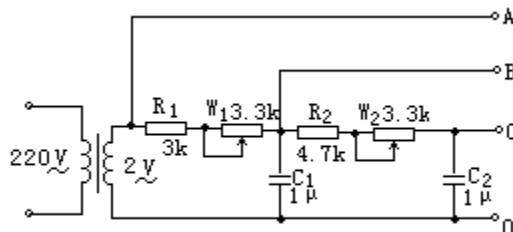


图 2

②图 2 所示的移相电路，可代替三相电源。演示时，调节 W_1 、 W_2 ，使 U_A 、 U_C 相差 120° ， U_B 居于 U_A 、 U_C 之间，即 U_B 落后 $U_A 60^\circ$ 而超前 $U_C 60^\circ$ 。再利用电子开关，将 U_B 反相，这样，便得到了互成 120° 角，但幅值不等的三相电压。接线时（图 3），让 A、C 两相经过 2 次电子开关，B 相经过 1 次电子开关，以保证 A、B、C 三相互成 120° 。为使三个电压的幅值相等，可调节电子开关的“增幅”旋钮。

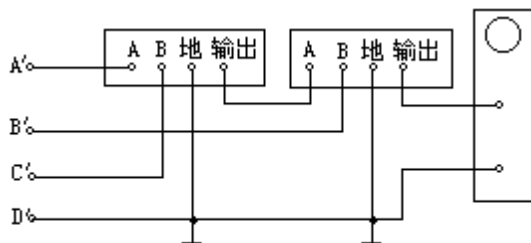


图 3

(2) 旋转磁场

①旋转磁铁产生磁场。如图 4 所示，在转台的转轴上固定一木条，木条两端胶两块磁铁（或条形磁铁，或蹄形磁铁），其向上磁极极性相反。用细线悬挂一磁针，当磁铁旋转时，磁针也跟着转动。在磁极和磁针间放一硬纸片的挡板，可使演示更信服。

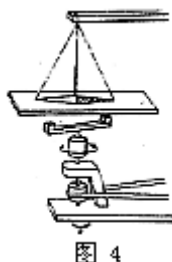
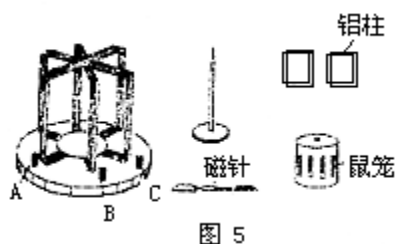


图 4

②三相旋转磁场。如图 5 所示，3 个线圈都用 $\phi 0.31\text{mm}$ 漆包线绕 200 匝而成。线圈尺寸约为 $120 \times 150 (\text{mm}^2)$ 。绕后用线扎紧。3 个线圈平面相交成 120° 角。把 3 个线圈按星形连接后，3 个引出端 A、B、C 分别接在底座的接线柱上。旋转磁针可用现成的演示磁针。铝框最好用封闭的薄铝环制成，鼠笼可用铝制水杯或热水瓶铝盖改制，铝框和鼠笼的转轴可用磁针上的轴承或直接在上端中心位置冲一凹点而成。演示所需三相电源，可用移相方法取得。电路如图 6 所示。电容器 C 采用耐压大于 300V 的 $8 \sim 10 \mu\text{F}$ 油浸纸介电容器（注意不要使用电解电容器）。



演示时将移相电源 A、B、C 三个输出端，分别接到三个线圈对应的 A、B、C 上，就可获得近似相差为 120° 的三相交流电。将置于转轴上的磁针、铝框或鼠笼先后放入线圈内，它们都会转动起来。把移相电源和线圈连接线的任意两根位置对换，就改变了旋转磁场的方向，磁针的转动方向也随着改变。

旋转磁场也可采取蹄形磁铁旋转而成（图 7）。

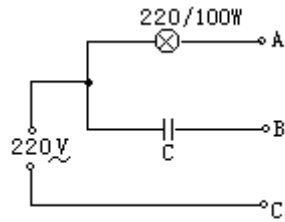


图 6



图 7

电力输送

(1) 如图 1 所示， B_1 、 B_2 取可拆变压器（J11223 型），灯泡 D_1 接低压输电线的末端， D_2 接降压变压器 B_2 的输出端， B_1 为升压变压器，电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 、 R_4 模拟长输电线路电阻。

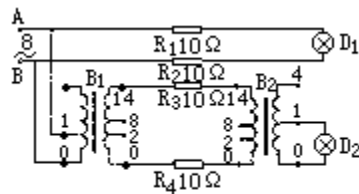


图 1

演示时，A、B 接通电源，这时 D_1 发光很弱，而 D_2 发光很亮，然后将接变压器的 B_1 、 B_2 “1”、“4”与“1”、“4”端的高压输电线，依次改接在“8”与“8”端、“2”与“2”端，即逐渐降低高压输电线的端电压，则 D_2 逐渐变暗。表明在电源电压和输电线路电阻相同情况下，高压输电比低压输电损失的能量要少得多，此即高压输电的基本原理。

实验中所用可拆变压器因效率较低只能作定性演示。若换用市售的内阻较小、额定功率较大的低压变压器（ $2 \times 110V/6V$ ）代替，则串联在高压输电电路上

的小灯泡的亮度要比串联在低压输电线路的小灯泡暗得多，更形象显示了高、低压输电线路能量损耗的差别。

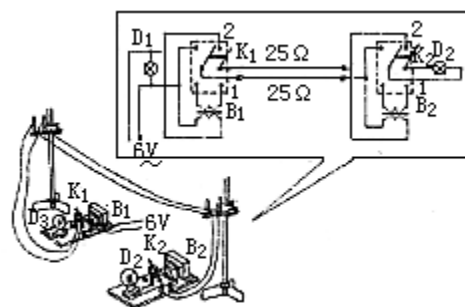


图 2

(2) 如图 2 所示，两根电阻线平行地固定在绝缘支架上。电阻线上抹上牛油（或机油）。将 K_1 、 K_2 倒向 2，则见小灯泡 D_1 亮度正常，而经过“远距离”输电的小灯泡 D_2 几乎不发光。这时“输电线”上冒出青烟。将 K_1 、 K_2 倒向 1，利用变压器 B_1 将电压升高后输至用电处，然后由变压器 B_2 降压后再行使用。在此情形下，输电线上的电压损失大大减小，这可由“输电线”上不冒烟和小灯泡 D_2 亮度与 D_1 相差不多来加以说明。

用牛油冒烟显示“输电线路上的电能转变为热能损耗”，形象直观，效果较好。变压器 B_1 、 B_2 宜采用内阻小、额定功率较大的。

电磁振荡和电磁波

(1) 电磁振荡

①用电流计观察衰减振荡，因需要电感量大、电阻小的电感器和容量大、损耗小的电容器，一般不易办到。

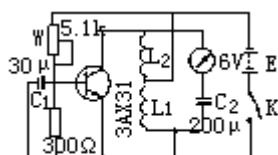


图 1

图 1 所示电路是利用线圈互感和适当正反馈使振荡频率降低达到用演示电流计观察衰减振荡过程的装置。 L_1 、 L_2 绕在铁芯上，铁芯用 GB22 硅钢片叠厚 30mm 即成。用 $\phi 0.15\text{mm}$ 漆包线绕 3100 匝作 L_1 ，再绕 1600 匝作 L_2 。

演示时接通电源，适当调节 W，可观察到电流计指针摆动幅度随时间而减少。改变 C 容量，振荡频率变化。

调节 W，减少反馈量，还可演示等幅振荡。

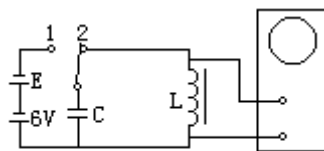


图 2

②如图 2 所示，示波器的“Y 输入”、“地”分别接电路的 1、2 端。电容器 C 先用 $0.1 \mu\text{F}$ 。电感线圈 L 用 J11223 型可拆变压器的 1400 匝的线圈，或 J11225 型变压器原理说明器的 800 匝的线圈，插入闭合铁芯（也可用电子管收音机输出变压器的初级线圈和电源变压器的初级线圈等）。一般要求电感 L 大些，直流电阻 R 小些，效果较好。

演示时，把示波器的“Y 轴衰减”和“扫描范围”分别置于“10Hz”和“10~100Hz”档。K 先拨向 1，给 C 充电；然后拨向 2，接通振荡电路 LC，同时适当调节示波器有关旋钮，在荧光屏上就显出阻尼振荡的波形（图 3）。每拨动 K 一次，振荡波形就出现一次。如果将 C 的容量

换为 $0.2 \mu\text{F}$ ，阻尼振荡的周期也跟着变大。实验定性说明，阻尼电磁振荡以及 $T = 2\pi \sqrt{LC}$ 的关系。

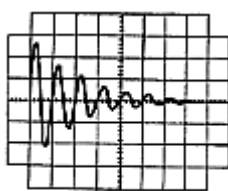


图 3

为了提高 K 拨动速度，可采用图 4 所示的电路。其中 D 为 2CP 型或 2CZ 型整流二极管，J 为继电器。U 用 50Hz 交流电，其数值视继电器的工作电压大小而定，可用低压电源供给。继电器的常开和常闭触点的连接，应使继电器吸合期间给电容器充电，释放期间接通 LC 振荡电路，这样在示波器荧光屏上会显示一个稳定的波形。

(2) 电磁波

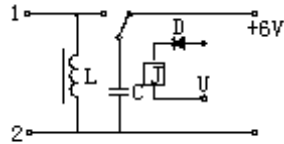


图 4

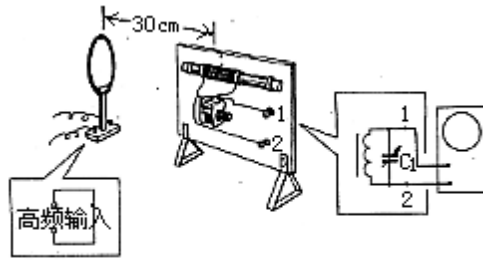


图 5

①图 5 所示装置可演示电磁波的发射和接收。图中 L_1C_1 为振荡电路，线圈 L_1 用 7 股纱包线平绕 70~75 匝制成，并套在磁性天线上。把电容器 C_1 和 L_1 一起装在示教板上作为接收和调谐电路使用。教学信号源（J14464 型）的“高频输出”端，接一个用粗铜线绕 2~3 匝而成的直径为 30cm 的圆环，然后将它固定在绝缘支架上，作为发射天线。

演示时，把示波器的“Y 输入”、“地”分别接 L_1C_1 振荡电路的 1、2 端。教学信号源的调幅、等幅开关置于“等幅”档，频率开关扳扩频率 I”位置，把“高频增幅”旋钮顺时针方向转到底，并转动“频率调节”电容器，使其发射频率在 530~1600kHz 之间的高频等幅信号。再缓慢地转动振荡电路的电容器 C_1 ，并适当调节示波器的有关各旋钮，使荧光屏上显示出最大幅度的正弦波形。此时无论将 C_1 再向那边转动，波形的幅度都迅速减小。这说明信号源中振荡器所产生的高频振荡电流通过环形天线发射的电磁波，已被 L_1C_1 振荡电路所接收，并且只有当 L_1C_1 振荡电路的固有频率跟外来信号的频率相同时，产生的感应电压才能达到最大值，即发生电谐振。

若把教学信号源的“频率调节”电容器转过一个角度，即调到另一个频率上，则示波器屏上所呈现的波形立即消失。只有把 L_1C_1 振荡电路中的电容器 C_1 也重新调节一下，波形才能重新出现。表明若电磁波的频率改变，就必须改变 L_1C_1 振荡电路的固有频率，才能再次发生电谐振，即说明了“调谐”的作用。

示波器的“Y 输入”和“地”要用屏蔽线分别接电容器 C_1 的定片和动片，不可接反，否则屏上显示波形失真，影响实验效果。

②取长 80~120cm 的收音机拉杆天线（可用金属圆管代替）4 根，将 2 根安装在绝缘架上作发射天线，这 2 根天线的间隙约 8mm，用导线将此 2 根天线分别

与感应圈输出相连。启动感应圈，天线间隙处产生火花放电。这时感应圈的电感和拉杆天线的电容组成一个振荡电路，产生高频振荡电流。再将另外 2 根天线安装在绝缘架上作接收天线，并在间隙处焊一个氖管（也可用 1.5V 小灯泡）（图 6）。

演示时先使接收天线的长度和发射天线相同，当两天线相互平行时（应使氖管在发射天线中点的水平线上），氖管发光，说明电磁波的存在。逐渐增加两天线距离，氖管发光变暗，说明电磁波减弱。转动接收天线直到与发射天线相互垂直，氖管由亮转暗至熄灭，演示了天线方向性。改变接收天线长度（缩进或拉出），氖管发光强度随着变化，接收频率和发射频率谐振时发光最强。

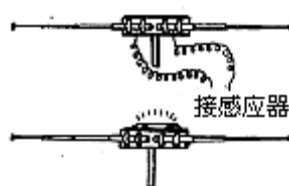


图 6

演示时，应注意发射天线上电压很高，不能触及。改变发射天线长度时，必须切断电源后进行。

③缓缓摇动感应起电机，使其放电针（或放电球）之间产生火花放电。转动收音机调谐旋钮，收音机中就发出“咔嚓”、“咔嚓”的声音。让收音机靠近感应起电机，“咔嚓”声增强；反之，则减弱。加快摇动感应起电机的速度，收音机中的“咔嚓”声频率升高；反之，则降低。停止摇动，则收音机中的“咔嚓”声停止。

感应起电机可用感应圈代替，当其放电针之间产生火花放电时，同样能听到收音机的扬声器中发出的声响，而且传播的距离更远。

光的反射和折射

(1) 光的反射

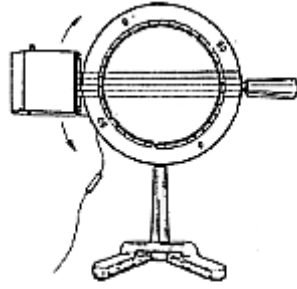


图 1

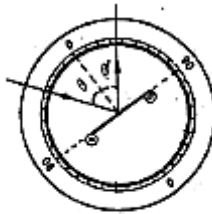


图 2

①图 1 所示为圆形光盘，其圆盘固定在底座上，平行光源可沿盘轴心转动。演示光的反射时，把平面镜按图 2 所示固定好。底边跟 90° 刻线重合， 0° 刻线通过中心。平行光源的光阑只留中间一条缝，并调整入射光线跟法线、平面镜底边中点相交。

演示时，转动光源，改变入射角，则反射线也跟着相应改变，但反射角 θ' 总等于入射角 θ ，反射线和入射线分居在法线的两侧。

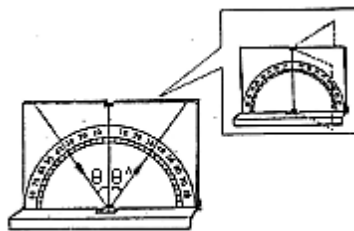


图 3

②图 3 所示为光的反射演示器。演示时把平行光束射到镜面上，并把入射点调整到零点。

这时，在屏上就会看到有光线从平面镜反射并沿屏面射出。把可转动的屏向前（或向后）转，就看不到反射光线。表明光在反射时，反射光线是在入射光线和法线所决定的平面内，入射光线和反射光线位于法线两侧。让入射光线沿光屏面以不同的角度射向平面镜，从屏的刻度上可看到，不管入射光线怎样变化，反射角总是等于入射角。

如将入射光线调到某一入射角 θ ，并将 θ 标在分度盘上；同时，标记下反射光线所示的反射角 θ' 。让光线逆反射光的光路以 θ' 角入射，可看到反射光线沿着原来入射光线的方向以 θ 角射出。表明光在反射时，光路是可逆的。

(2) 光的折射

①将半圆柱透镜如图 4 (a) 所示固定在圆形光盘上，使其直边与光盘上“ 90° ”刻线重合，圆心与光盘圆心重合。

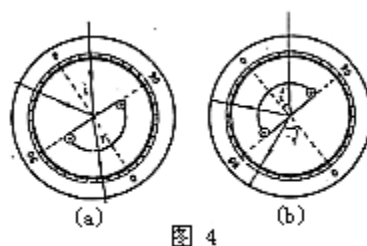


图 4

光栏只留中间一条缝，让光束射向圆心，当光源转到某一角度时，呈现出光由空气进入玻璃在界面上发生的折射现象（同时也有反射现象，但本实验不予研究）。可看出折射光线在入射光线和法线决定的平面内，折射光线与入射光线分居法线的两侧。使入射角 i 分别为 30° 、 50° 、 70° ，读出相应的折射角 r 值，求出各角的正弦函数值，再计算各组的 $\sin i / \sin r$ 比值 n 。看出在误差范围内 n 为常数。

旋转光源，使光线垂直圆柱面射入（图 4 (b)），则在玻璃与空气交界的平面上射出时发生折射。使入射角 i' 在 0° 到 40° 之间变化，测出几组对应的折射角 r' 值，算出 $\sin i' / \sin r'$ 比值 n' ，它也是常数，且 $n' = 1/n$ （表示空气对玻璃的折射率）。再逐渐增大入射角，可观察到全反射现象。

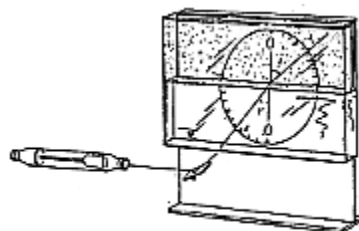


图 5

②如图 5 所示，长方体水箱是用玻璃或有机玻璃做成。在缸内的水中加入少量肥皂水或几滴红药水（溴化汞溶液），再在水箱中喷些烟雾，就能显示射入水中中和空气中的光路。

演示时，使水面与白色背景板上 0 标度相平，激光束通过可旋转平面镜反射后射入水箱，可以明显地观察到水中的反射光线和空气中的折射光线，根据所测入射角和折射角数值可以算出其折射率。慢慢转动平面镜，逐渐增大入射角，一直到临界状态和产生全反射现象。

透镜成像

(1) 图 1 为 J20207 型光具座。将光源、1 字屏、 $f=10\text{cm}$ 的凸透镜和光屏分别装在光具座上，并使它们共轴等高。

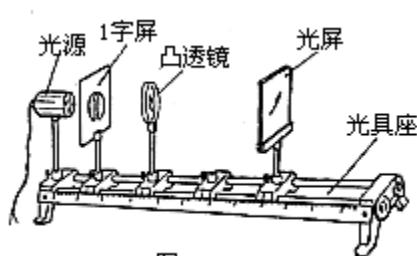


图 1

实验时接通光源，照亮“1”字屏，将凸透镜位置固定在导轨中央。移动“1”字屏（同时移动光源使两者总保持原来的距离），改变物距，使物体由 2 倍焦距以外逐渐移到焦点以内，可定性观察到成像的性质（实像或虚像、正立或倒立、放大或缩小）和变化（实像用屏观察，虚像用眼对着透镜从不放发光体的一侧观察）。

再使物距 u 分别为 15cm、20cm、30cm 等值，测出各次所成实像的像距 v 值，通过计算验证成像公式：

$$1/u+1/v=1/f。$$

改用 f 为 5cm 的凸透镜，仿上述方法成实像，再验证成像公式。并和使用较长焦距的凸透镜对比，可看出在物距 u 相同时，短焦距透镜成的实像较小，像距 v 也比较小。

将点燃的蜡烛及凹透镜分别安装在光具座上，并使它们共轴等高。

任意改变它们的距离，用光屏在透镜两侧都得不到蜡烛的实像。只有通过透镜观看，才可见到蜡烛正立、缩小的虚像。蜡烛离透镜越远，虚像越小。

验证成像公式时，不要用蜡烛，因为它是体发光，沿主轴方向有一定线度，物距就不是唯一的值，不易确定像的位置。

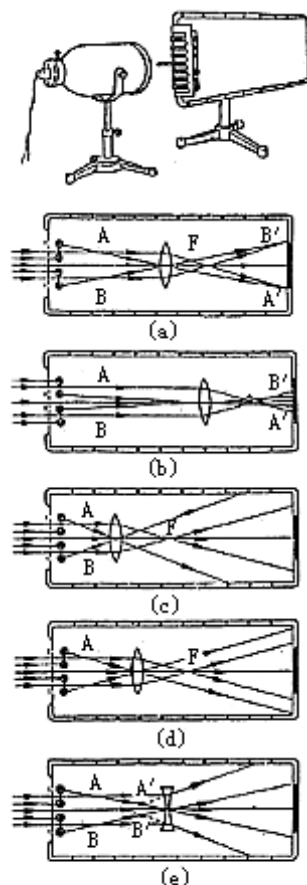


图 2

(2) 图 2 为 J20201 光具盘。

演示时，装好平行光源，打开光盘左侧相应的光阑狭缝，加上滤色片，根据不同成像要求，调节光阑后小平面镜的位置和方向，可作下述演示：

将 $f=16\text{cm}$ 的大双凸柱透镜挂在光盘中间，按图 2 (a) 调节好仪器，显示出物 (AB) 位于 2 倍焦距和焦点之间 (即 $f < u \leq 2f$) 时，成倒立、放大实像的光路。图 2 (b) 为物位于 2 倍焦距外时 (即 $u > 2f$)，成倒立、缩小实像的光路。图 2 (c) 为物位于焦平面内 ($u < f$) 时，成放大虚像的光路。图 2 (d) 显示物在焦平面上 ($u=f$) 不能成像的光路。

将 $f=-8\text{cm}$ 的小双凹柱透镜挂在光盘中间，按图 2 (e) 调节好仪器，A、B 为物点，每个物点射出的光，经凹透镜折射后，都为发散的光束，所以成虚像于 A' 、 B' 处。

人眼模型

(1) 如图 1 所示，眼睛的晶体状用盛水的塑料袋，两侧用弧形有机玻璃夹住后，装在板上，调节上、下螺帽，即可使“晶状体”焦距变化。

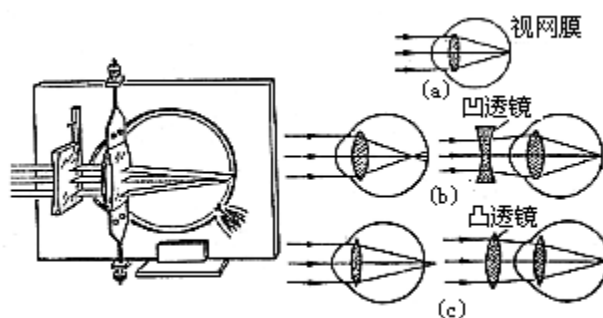


图 1

演示时，调节光源箱内的灯泡位置，使光源发出一束发散光束，光束进入眼睛后，会聚点在视网膜后面（图 1 (a)）。放松螺帽，使晶状体变凸，物体所成的像就移到视网膜上，显示了眼睛的调节作用。让光源发出平行光束（表示物体在无限远处），开始时晶状体处于较凸的状态，像成在视网膜前；旋紧螺帽，像的位置就向视网膜移动，但仍到达不了视网膜。这表示近视眼虽经调节仍不能清晰成像。用凹透镜来矫正，像的位置就移到视网膜上了，演示了近视眼及其矫正方法（图 1 (b)）。

让光源发出发散程度较大的光束（表示物体在近处），开始时晶体状处于较平的状态，像成在视网膜后，放松螺帽，像的位置就向视网膜移动，但仍到达不了视网膜。这表示远视眼虽经调节还不能清晰成像。用凸透镜来矫正，像的位置就移到视网膜上了，演示了远视眼及其矫正方法（图 1 (c)）。

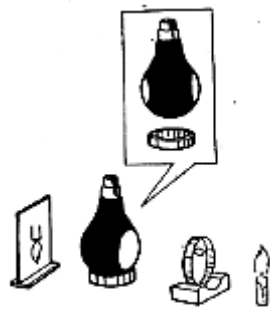


图 2

(2) 如图 2 所示，用装水灯泡（灯泡透镜）和毛玻璃片分别代表眼睛的晶体和视网膜；蜡烛作为被观察的物体。

演示时，首先调节“眼睛”（毛玻璃、装水灯泡）和蜡烛的距离，直至点燃的蜡烛在毛玻璃上成像最清晰时为止，用以表示正常眼睛看物体情形。

移动毛玻璃（或蜡烛），使其与灯泡间的距离远一些，这时，蜡烛的像落在了毛玻璃的前边，毛玻璃上的像模糊不清。当把凹透镜放在灯泡透镜前面，毛玻璃上的像立刻变得清晰了，说明用凹透镜能够矫正近视眼。

移动毛玻璃或蜡烛，使其与灯泡间的距离近一些，这时成像在毛玻璃的后边，毛玻璃上的像也模糊不清。再把一凸透镜放到灯泡透镜的前边，毛玻璃上的像就又变得清晰了，说明用凸透镜可以矫正远视眼。

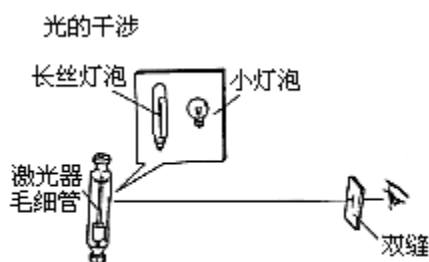


图 1

(1) 双缝干涉

直接观察法。在讲台上放置激光器，让学生通过双缝去观察激光器毛细管（观察时缝和线光源平行）（图 1），则可清晰观察到明暗相间的干涉条纹。也可用长丝灯泡（线光源）或小灯泡（点光源）来代替。

灯丝与双缝愈接近平行，干涉条纹就愈宽、愈清晰；反之，则较模糊。

为了便于观察，也可把制成的单缝和双缝装在圆筒的两端，使单缝和双缝保持互相平行（图 2）。这样，光线从单缝射入后形成一束柱面光，再通过双缝后，互相干涉，观察者能直接看到干涉条纹。

观察圆筒的长度，跟单缝、双缝的缝宽和缝间的距离有关，一般为 0.5m 左右，如制成两个套叠的圆筒，调节更为方便。

投影法。实验装置如图 3 所示。演示前先作调整，使单缝靠近光源（可用示教用平行光源），并与光源的灯丝平行。放宽单缝，调节凸透镜，在光屏（可用毛玻璃）上得到单缝的像。将双缝置于透镜后，移动透镜，使狭缝射出的光束会聚后照亮双缝。调小单缝宽度，并和双缝平行，即可在屏上观察到干涉条纹。进一步调节双缝和屏间的距离以及单缝的宽度，使干涉条纹最清晰。双缝和光屏之间的光路要用不透明的筒遮蔽起来，以免散射光落在屏上。

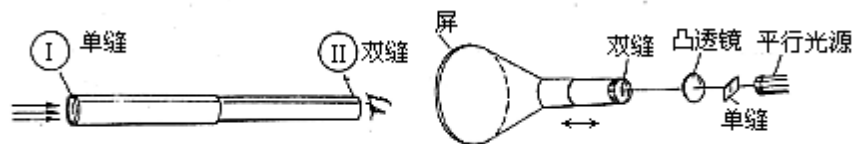


图 2

图 3

如图 4 所示，用激光作光源投影显示干涉图样。演示时，激光管发出激光束，调节凸透镜和双缝的位置，使激光经透镜扩展后的光束均匀地照在双缝上，适当调节光屏位置，在屏上就可呈现明（红色）、暗相间的干涉条纹。凸透镜（焦距 50~80mm）是为了扩展光束使用的，一般叫做扩束镜。若不用扩束镜，因光束太细，呈现的双缝干涉条纹很短，好像一排红点。

双缝制作：可在薄玻璃片上涂以墨汁，表面干后即两片紧捏在一起的刀片在玻璃墨层上用力刻出双缝（图 5）。为了防止观察时损坏双缝，可在墨层上再复一块玻璃。上述双缝的间距即为刀片的厚度，可用螺旋测微计测得（一般双面刀片厚度约 0.1mm）。也可如图 6 所示，在玻璃片上，用胶水把 $\phi 0.08\text{mm}$ 漆包线（注意平直）粘在两片刀片中央，要求刀刃平行并相距 0.4mm 左右。

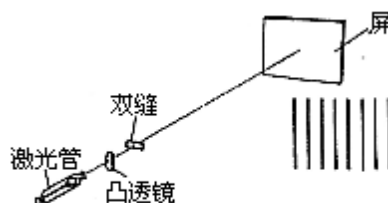


图 4

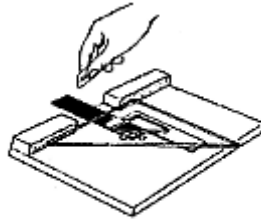


图 5

(2) 薄膜干涉

①肥皂膜的干涉

直接观察法。如图 7 所示，用 $\phi 2\text{mm}$ 的铜丝弯成直径约 60cm 的圆环，下部是三角底座。

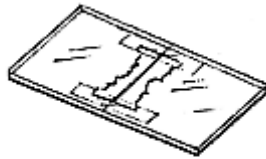


图 6

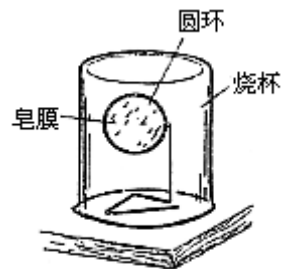


图 7

演示时把圆环竖直地插入肥皂溶液中，慢慢向上提起，在圆环上就张紧一层薄膜。将圆环立在桌上，薄膜反射由窗口射入的光线。当皂液逐渐向下流动的过程中，就可看到干涉出现的彩色条纹。

将内部沾湿的大烧杯（ 1000ml ）罩住圆环，因减小了蒸发，延长了演示时间。

如图 8 所示，点燃酒精灯（灯内酒精和灯芯上都洒有食盐），它发出黄色的火焰（钠的光色），酒精灯旁放一个张有皂膜的圆环，在膜上就能看到灯焰的像。

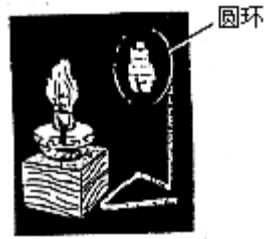


图 8

当液膜由于重力形成上薄下厚楔形时，灯焰的像上出现明暗相间的干涉条纹，实验在暗室内进行效果更好。

实验中，皂液太稀或温度较高，薄膜容易破裂。但皂液太稠，流动性差，不易出现干涉条纹。在皂液中加适量的食糖或甘油，能延长皂膜存留时间。也可用洗衣粉液代替肥皂液。

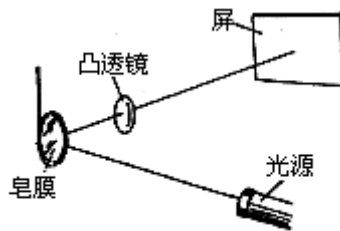


图 9

投影法。实验装置如图 9 所示，光源为除去成像透镜的幻灯机，让光源射出的光束照射沾有皂膜的圆环。调节环的位置，使光束的直径和环的直径接近凸透镜（直径约 10cm，焦距约 20cm）。当反射光穿过透镜时，屏上即出现干涉条纹。进一步调节透镜和环的距离，使成像清晰。重新在环上形成肥皂膜时，就可以看到幕上干涉条纹是自下而上、先紫后红的一条条彩色条纹。

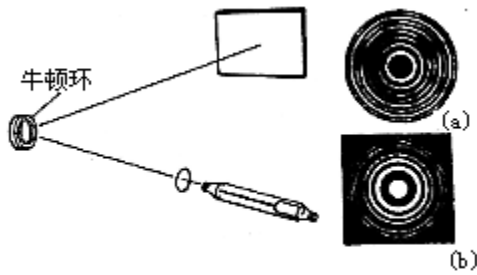


图 10

②牛顿环。实验光路如图 10 所示。调节透镜位置，使扩展后激光束正好照射在“牛顿环”上，这时反射的干涉条纹是中心为暗点的明暗相间的一组同心圆，且条纹间距不等（图 10 (a)）。如果将屏移至“牛顿环”左侧，则在屏上出现的干涉条纹是中心为亮点的明暗相间的一组同心圆，且条纹间距不等。这是由透射光产生的干涉条纹，它和反射干涉条纹正好互补（图 10 (b)）。调节牛顿环各螺丝，使薄膜厚度变小，圆形干涉条纹向外扩展，中心的亮暗不变。

用普通光照射时，得一组彩色同心圆；当薄膜厚度变小时，彩色干涉条纹也向外扩展，中心的亮暗不变。

光的衍射

(1) 单缝衍射

直接观察法。两笔杆（或竹筷）两端用橡皮筋扎住，其中一端夹有硬纸片。笔杆间的缝隙就是单缝，而且，笔杆的部位不同，单缝的宽度也不同。通过单缝去观察点光源、长丝灯泡光源或激光器的毛细管（使单缝和线光源平行），能观察到清晰的衍射条纹。将单缝上、下移动，由于缝的宽度不同，衍射条纹相应发生变化。当缝由宽变窄时，衍射条纹就从未到有，并逐渐变宽。

为了观察方便，取长约 0.4m 的不透明圆筒，一端装一个狭缝，缝宽约 0.5mm，这个缝的作用是获得缝光源（对光狭缝）。在筒的另一端装衍射单缝，调节两缝平行。对光狭缝对着窗口，则可利用自然光。通过单缝去观察对光狭缝，在对光狭缝附近，呈现出彩色的衍射条纹（图 1）。

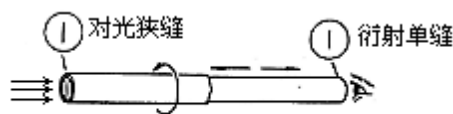


图 1

投影法。实验装置如图 2 所示。演示前，将可调单缝靠近光源（可用示教用平行光源），并将缝宽调大。移动凸透镜，使光屏上呈现缝的像。将衍射单缝置于透镜和光屏中间，并让光线穿过单缝，投射到屏上。将可调单缝的宽度调小，并和衍射单缝平行，即出现衍射图样。进一步调节衍射单缝的宽度，使图样清晰。取透镜焦距约 25cm，可调单缝和透镜间距离 30cm，衍射单缝和透镜间距离约 60cm，衍射单缝和光屏间距离约 25cm，可调单缝宽约 1mm，衍射单缝宽 0.2mm，即可呈现 5~7 条衍射条纹，中央亮纹的宽度约为 1cm。实验时也可省去凸透镜，但条纹亮度较弱。

如用激光器做光源，实验装置比较简单，只要使激光束穿过衍射单缝，光屏上就出现衍射条纹。单缝衍射除中央亮纹外，其余各级亮度均很弱。若用白色光源，观察到的条纹数不多，需要在暗室内遮去杂散光线，才能把投影做好。

(2) 圆孔衍射



图 2

直接观察法。通过圆孔观察点光源，可见到圆孔衍射环纹。圆孔的孔径越小，亮盘越大。小灯泡，距离较远的白炽灯，通过反射或折射的太阳的缩小虚像或实像，都是很好的点光源。图 3 为通过小圆孔去观察凸面镜中太阳的虚像，衍射图样非常清晰，为了观察方便，可在不透明圆筒的一端安装圆孔，另一端安一个凹透镜。观察时凹透镜朝着发光面较大的光源（图 4）。如近距离的白炽灯或太阳，通过凹透镜造成的虚像，可作点光源，因而可观察到衍射环纹。

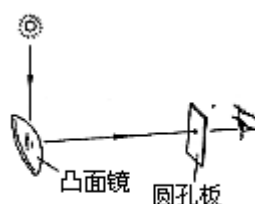


图 3

投影法。图 5 所示为光束通过圆孔后，在光屏上呈现的衍射图样。

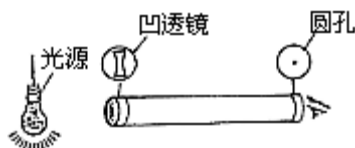


图 4

当圆孔 $\phi 0.35\text{mm}$ ，激光器和圆孔板距离为 60cm ，圆孔板和光屏间距离为 2m 时，可见到 9 圈亮纹，中央亮盘直径约 1cm ，整个衍射环纹轮廓清晰。

圆孔的制作：剪一小块牙膏皮，整理平整，用一根缝被针尖凿一个小孔，捻转针柄，使小孔变得既圆又光滑。按此法制作几个孔径不同的圆孔备用。如要长期使用，可剪一块 0.5mm 厚的薄铁皮，用钢冲头在铁皮上冲一个将穿而未穿的小孔，用缝被针刺穿铁皮，捻转针柄，使小孔圆而光滑。

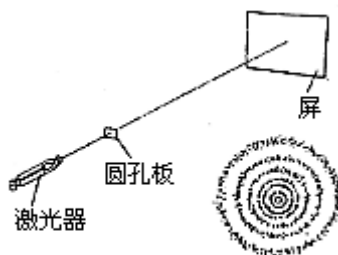


图 5

(3) 光栅衍射

直接观察法。通过光栅观察点光源或线状光源时，可以看到明亮的光栅衍射图样，如观察的光源是氩-氦激光管的毛细管，则会看到若干氩、氦的光谱线。观察时，光栅的狭缝要和线状光源保持平行。

为观察方便可在不透明圆筒的一端安装一个狭缝，另一端安装光栅。将狭缝端对着窗口，即可利用自然光。通过光栅观察狭缝时，可看到以狭缝处为中央亮纹的各级光谱。圆筒长度约 0.5m ，狭缝宽度约 0.5mm ，如选用每厘米 1000 条以上狭缝的光栅，在观察自然光时，可见到彩色光谱带中有许多暗线，这些暗线是太阳光谱中的吸收谱线；在观察日光灯时，可见到彩色光谱带中有数条明线，这些明线是低压汞蒸汽所发出的光谱线。

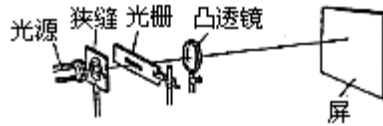


图 6

投影法。仪器装置如图 6 所示，狭缝宽度调节在 3~5mm 左右。将狭缝靠近光源，让光束穿过狭缝投射到光屏上。移动凸透镜，调节透镜和狭缝间距离，使屏上呈现放大的狭缝像。将光栅插在狭缝和透镜之间，使光线通过光栅，屏上即呈现光栅光谱。一般的暗室条件下，可看清 2~3 级光谱。

光栅一般都用现成产品，自制光栅可按下述方法进行：在一张 60×85 (cm^2) 的白纸上用墨笔画 150~160 条平行线，线宽 3mm，间距 2mm（可用鸭嘴笔画 2 条黑线，再用毛笔把中间涂黑）。让阳光均匀地照亮全图，再用照相机从正面取景拍摄。在光线较强时，光圈可选择在 11~16 之间，21 定胶卷的曝光时间取 1/100 秒，这样摄成的底片可获得每厘米 100~400 条。若图在底片上的宽度为 a ，则光栅常数 $d = a/150\text{cm}$ 。如 a 为 1cm，则 $d = 1/150\text{cm}$ 。

鸡毛可作光栅，其光栅常数约 $1/30\text{cm}$ 。密纹唱片也可作反射光栅，其光栅常数约为 $1/150\text{cm}$ 。

(4) 泊松亮斑

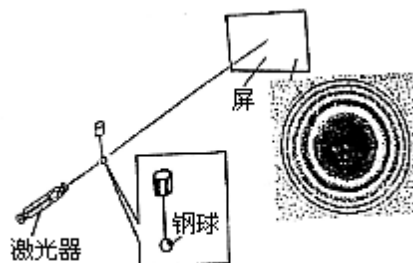
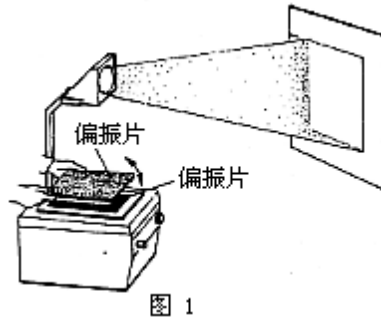


图 7

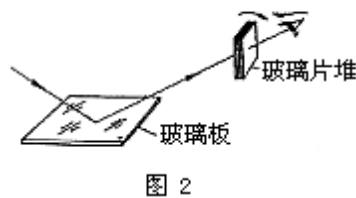
如图 7 所示，被磁化的钢针吸一粒钢珠（自行车轴承中用，直径约为 5mm）。使激光束与钢珠球心在同一直线上，就能在屏上观察到钢珠暗影中心有一亮斑，即泊松亮斑。

光的偏振



(1) 用人造偏振片演示光的偏振装置如图 1 所示。演示时，两片人造偏振片置于书写投影器的聚光镜上，使两偏振片的偏振方向相平行，慢慢旋转一偏振片，屏幕上光的亮度逐渐减弱，当此偏振片转到 90° 时光亮度最弱；继续转到 180° 时光由最弱变为最强。如此每转 90° ，交替变化一次。

(2) 用叠在一起的 3~5 片玻璃，去观察靠近窗口的油漆桌面或是玻璃板上反射的自然光。选择适当的观察角度，按图 2 箭头所指方向旋转玻璃片堆，增大入射角，射入眼中的光线明显减弱，这因为反射光是部分偏振光，振动方向垂直于入射面，如果光线的入射角都接近布儒斯特角（玻璃约 56° ）时，透过玻璃片堆的光线将很少。此时如将叠成不同厚度的涤纶胶带纸插入由台面玻璃反射的光路中，能观察到色偏振现象。



(3) 图 3 所示装置可演示反射引起的光的偏振。支架上的起偏镜和检偏镜都是背面涂有黑漆的玻璃片。起偏镜和光源装在一个可绕竖直方向旋转的轴上。

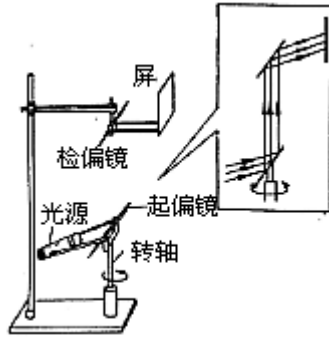


图 3

演示时，用光照射起偏镜，使入射角约 56° 。当检偏镜的位置和起偏镜平行时，毛玻璃屏上的光斑最亮；慢慢旋转起偏镜，屏上的光斑渐渐变暗，转过 90° 时变为最暗；再转过 90° 时又变为最亮。

光谱

(1) 分光镜

分光镜是观察光谱的基本仪器，外形如图 1 所示，它由平行光管（前端装有可调狭缝，另一端装有消色差透镜）、三棱镜、望远镜（装有物镜和目镜）、标度管（前端装有透明标尺，另一端装有透镜）组成。用分光镜观察光谱时，由狭缝进入的光线，经过平行光管后成为平行光线，投射到三棱镜上。通过三棱镜的折射，不同波长的光线具有不同的偏向角，它在望远镜物镜的焦平面上造成明亮的狭缝的实像（即线状光谱）。

观察时用目镜加以放大，以扩大光谱的视界。当透明标尺被照亮后，光线经过标度管成为平行光，经棱镜侧面反射后，也在望远镜的焦平面上造成标尺的实像。

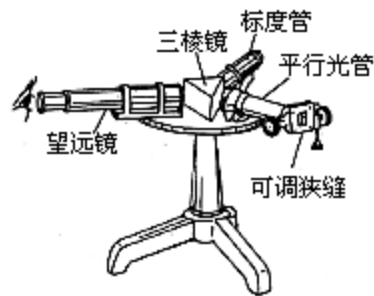


图 1

调整分光镜的方法：

取下三棱镜，将望远镜朝向远处景物，移动目镜使景物呈现清晰的像，用小灯泡照亮狭缝，适当调大缝宽，望远镜镜筒对准平行光管，调节平行光管的长度，使望远镜中能清楚看到狭缝的像，此时由平行光管中射出的光线为平行光线；为了减小像差和谱线的弯曲度，先把三棱镜放置在平台的弹簧片夹下（毛面靠夹柱），用小灯泡照亮狭缝，用眼找到由三棱镜折射的光线，然后把望远镜镜筒转到眼睛观察的位置，在镜筒中即能看到连续光谱。转动三棱镜（转动方向应使光谱图向三棱镜顶角方向移动），同时转动镜筒，追随光谱图进行观察。当光谱图到达某一位置，不再向棱镜顶角方向偏移，而是向相反方向移动时，即是最小偏向角的位置，可将棱镜固定于这个位置上。

最后用小灯泡照亮标度管的标尺，转动标度管，使标尺像反射到镜筒中。调节标度管的标尺，使标尺像清楚，并水平横放于镜筒中。此时可清楚地看到标有4000~8000格读数的标尺像。分光镜调节好后，用罩壳罩好三棱镜，避免杂散光线的干扰。

(2) 用分光镜观察光谱

①观察连续光谱。用白炽灯（选用色温较高的灯泡，如汽车灯泡）直接照亮狭缝，在目镜中就可以看到连续光谱。稍稍转动望远镜镜筒的位置，自左向右可得红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫等各种颜色的连续光谱。

②观察明线光谱。用光谱管作光源，用感应圈使光谱管内低压气体电离产生辉光放电，把分光镜的狭缝对准光谱管的狭窄管道部分。于暗室，在目镜中可以看到暗淡的背景上出现几条不连续的明线光谱。光谱管每组有6个，分别充以氢、氮、氧、二氧化碳、氖和氩等气体。演示时，重点观察氢原子光谱。一般能看到可见光范围内氢的强度较强的三条谱线， $H\alpha$ ：0.6562微米； $H\beta$ ：0.4861微米； $H\gamma$ ：0.4340微米。实验时应尽量缩短通电时间，以延长光谱管的寿命。

容易找到的其他光源还有：

钠蒸汽火焰。在大号酒精灯的火焰上置一金属网，网上撒一些精盐。随着温度的升高，金属网上会升起一道黄色钠焰，用分光镜可观察到钠的明线光谱。在可见光区，钠光谱是两条靠得极近的黄线，波长为0.5890微米及0.5896微米。一般只能看出一条黄线，只有用分辨本领较高的分光镜，把狭缝宽度调节到很小时，方能辨出两条明线。

氖管。把试电笔中的小氖管取出，串接一个电阻（1~3M Ω ）后，接到交流220V电源上，产生鲜红色的辉光。它也可观察氖的明线光谱。

③吸收光谱的观察

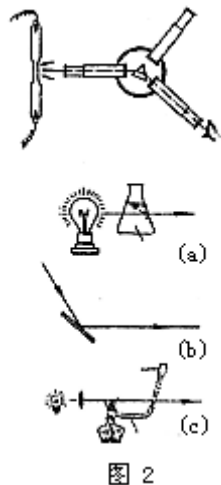


图 2

溶液的吸收光谱：用一个锥形烧瓶，把它放置在分光镜的平行光管和小灯泡之间（图 2（a））。瓶内盛高锰酸钾溶液时，在连续光谱的背景上出现 5 条吸收暗带；瓶内盛叶绿素溶液时，则在红光区出现吸收带。叶绿素溶液可用绿色植物叶浸泡在酒精中制取。实验中应控制溶液的浓度及适当的透光厚度，用锥形烧瓶就是为了便于调节白光透过溶液的厚度。

太阳的吸收光谱：将分光镜的平行管狭缝朝向窗口，或是用平面镜把太阳光反射后照亮分光镜上平行光管的狭缝（图 2（b）），在连续光谱的背景上，能见到相当多的吸收暗线。太阳光谱中的吸收线叫做夫琅和费线，我们观察到的，仅是一些较强的夫琅和费线。

钠蒸汽的吸收光谱：如图 2（c）所示，把一根细玻璃管，加工成 U 字形状，管内盛放硝酸钠的稀释水溶液，一端插入石棉（或玻璃纤维）灯芯。把灯芯放在大号酒精灯的火焰上，就能产生明亮的黄色钠盐。用滴管从 U 形管的另一端滴入硝酸钠溶液，使消耗了的溶液不断获得补给。调整方法如下：

小灯泡、凸透镜（焦距约 10cm）、平行光管应调到接近同一轴线上。移动透镜，到小灯泡灯丝的像落在狭缝上，并在分光镜内能观察到明亮的连续光谱时为止。关灭小灯泡，点燃酒精灯，待钠焰升起后，调整位置的高低，直到在分光镜中看到明亮的钠光谱为止。开亮小灯泡，钠光谱的明线立刻变为暗线，表明仪器已调节好。空气流动会影响钠焰，钠焰部分应用罩壳罩住。

（3）连续光谱的投影法

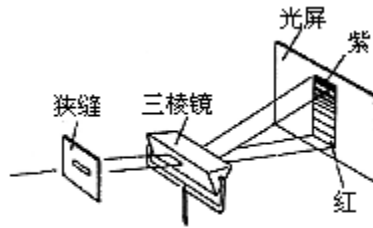


图 3

如图 3 所示，使平行光源通过狭缝，缝宽约 3~5mm。让光束射入三棱镜，在光屏上即呈现由红到紫的连续光谱。转动三棱镜，可找到最小偏向角的位置。

光电效应

(1) 用紫外线照射锌板的现象

用紫外线照射锌板时，锌板将逸出光电子而带上正电荷，如锌板和静电计相连接，静电计指针便张开一个角度，表示锌板带电。但在有空气的条件下，这个实验很难成功，这是由于紫外线对空气有较强的电离作用。如果能及时将空气的带电离子和自由电子清除干净，同时清除从锌板中逸出的光电子，负电荷区，那么，在非真空条件下，实验还是可以成功的。

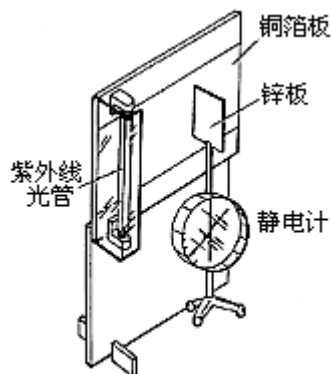


图 1

图 1 为附加有静电清除器的实验装置。面板左侧竖装一支紫外线光管，另复有一块铜箔板，实验时铜箔板带正电荷，空间分布电场，就能起到清除带电离子的作用，因而这个“清除器”是实验成功的关键性装置。为了电场的稳定和便于调节，用导线把铜箔板连接在激光电源正极上，在空载时激光电源的输出电压能起到良好的清除作用。

静电计上竖直放置面积约为 10×15 (cm^2) 的锌板。锌的红限波长为 0.3720 微米，紫外线波长为 0.2537 微米，显然是合适的。

演示时，静电计置于铜箔板前，开启高压电源，使铜箔板带上正电，此时静电计张角为零（如有微微张角，这是静电感应引起的，应将静电计离铜箔板稍远些）。打开紫外线灯，静电计指针慢慢张开一个角度，说明锌板已有电子逸出而带上正电荷。用毛皮摩擦橡胶棒，使静电计带上负电，然后再打开紫外线灯，静电计张角先慢慢闭合而后又张开，由此证明锌板逸出电子。如将锌板的氧化层面对着紫外线灯，静电计指针不张开，说明有氧化层的锌板不能逸出电子。用一块普通玻璃板置于紫外线灯和锌板之间，再做实验时，因玻璃吸收了紫外线，静电计不带电。如用有机玻璃板时，静电计指针张角不大，表明有机玻璃板尚能透过部分紫外线。

(2) 用光电管显示光电流图 2 为 GD-28 型光电管，A 为阳极，C 是光阴极。光电管的灵敏度大于 $10 \mu\text{A}$ 流明，工作电压为 24V。它有 4 个管脚，2 个连阳极，2 个连阴极。

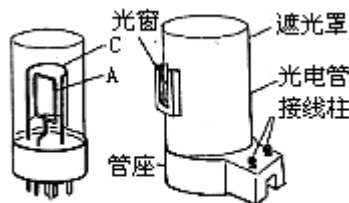


图 2

管座上的接线柱已用导线与光电管插座上的管脚相连接，滤色片有 4 块，分别为红、橙、绿、蓝色。光电流放大器的电路如图 3，实验电路如图 4 所示，电流表采用“G”档，其量程为 $200 \mu\text{A}$ 。电压表“0~25V”直流。

演示时，先将 K 拨向 1 端，光电管加正向电压，然后闭合 K_1 ，并调节 R_0 ，使加在光电管 A、C 极之间的正向电压为 15V。

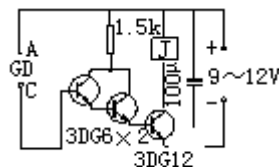
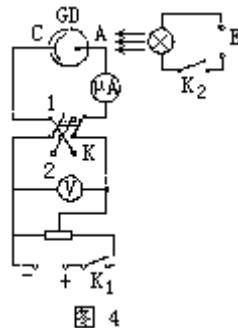


图 3

此时，电流表指针仍在零位，表明电路中没有光电流通过，即光阴极上没有发射光电子。接通 K_2 ，点亮灯泡，打开光电管罩壳上的入射光窗，让光照到光阴

极上，电流表指针随即发生偏转。表明光阴极有光电子发射，在外加正向电场的作用下形成了光电流。关上光电管罩壳上的入射光窗，光电流消失，电流表指针又回到零位。



将K扳到2端，在光电管A、C极上加反向电压。重复上述实验，没有光电流，表明光阴极发射出来的光电子在反向电场作用下不能形成光电流，证明光阴极受照后发射的确是带负电的电子。

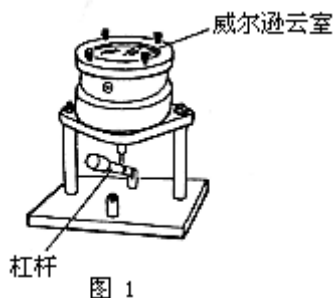
把开关K扳回1端，移动光电管位置（或改变灯泡的供电电压），光电管离光源越远（或供电电压越低），光电流也越小，表明光电管在正向电压相同时，光电流随入射光强度的增强而变大。调节 R_0 ，使电压指针指15V左右。光源灯泡供电电压用6V。在光电管入射光窗上分别插上蓝色、绿色滤色片，电流表指针指某一值。改变光源灯泡供电电压至4V、8V、10V，光电流随光强的变化而变化，当供电电压为4V时，入射光很弱，但电路中还有光电流通过。然后在入射光窗上换上红色滤色片，则光电流为零。即使入射光很强（灯泡电压升高至12V），电流表指针仍指零位。这表明用红光照射光阴极时，不发射电子。从而说明，欲使光阴极发射光电子，入射光的频率 ν 必须超过光电管的光阴极材料的红限频率 ν_0 ，否则，就不能发生光电效应。

光电管不工作时，应关闭入射光窗，以防光阴极老化，降低寿命。

GD-28型光电管的光阴极的材料是铯、铷，其红限频率为 $4.62 \times 10^{14} \text{Hz}$ 。红色滤色片的峰值波长为0.6600微米，即频率为 $4.55 \times 10^{14} \text{Hz}$ ，小于光电管的红限频率，故用这种红光照射光阴极时，不能产生光电效应。

粒子探测

(1) 图1所示是威尔逊云室，可用来观察 α 粒子径迹。它是用杠杆机构牵动云室底上、下运动，使云室内饱和汽因绝热膨胀而达到过饱和。



实验前，用移液管，从云室壁上的孔中将酒精（约 1ml）均匀地滴洒在云室内的呢子上，把放射源插入云室，拧紧螺丝不使漏气，然后把 200~450V 左右的直流电源接在云室的“+”、“-”接线柱上。演示时可轻快迅速地向下按压杠杆，使云室骤然膨胀，在膨胀的一瞬间可看到很清楚的 α 粒子的径迹。这时不要松手，径迹可保留一小段时间。只要一松手，径迹立即消失。必须间隔 30 秒至 1 分钟，才可进行下一次膨胀与观察。

云室的灵敏时间为 0.1~2 秒，在此时间内出现的径迹是笔直的，超过 2 秒以后径迹就变成弯曲，所以要求动作迅速，并及时观察。

观察时要用日光灯或其他较强的光源，从云室透明窗投光把径迹照亮，但光源不可离云室太近，以免云室内气体因受热不均而产生对流。如供多数人同时观察时，可在云室上方置倾斜度为 45° 角的平面镜，从镜中观察。云室膨胀前、后的容积比在 1.23~1.26 之间，这个膨胀比是通过限制器柱头的升降来调节的。

演示时如发现径迹弯曲、模糊不清时，可从以下几方面加以检查和调整：

云室如封闭不严密而漏气时，会引起室内气体运动不均匀，出现湍流，致使径迹发生畸变。此时应拧紧上压圈上的螺丝，同时检查一下云室壁上的金属结合套和放射源塞子的结合是否严密可靠。

未加上电场，没有清洁作用时，云室膨胀后充满一片白雾，径迹不清。应检查电路是否良好。

在无漏气和加上电场的情况下，云室膨胀后却不出现迷雾，应稍加大膨胀比，即把限制器柱头向下拧。反之，如充满白雾而径迹不清，则应降低膨胀比，即把限制器柱头往上拧，然后再试验，直到径迹清楚为止。



图 2

(2) 图 2 为自制威尔逊云室。选一容积为 100ml 的玻璃瓶，在瓶的底部和上端各放一块金属板作电极，用两根细导线连结电极，导线从橡皮塞中穿出，以便给电极加上直流高压。在瓶塞的中央紧插一根玻璃管，并用橡皮管把它跟一个橡皮球或实验用的小打气筒连接起来，这样就制成了一个简单的云室。可用夜光钟表或夜光罗盘上的荧光粉（含有微量的镭化物）作放射源。用烧过的汽灯灯罩（内含 99% 的放射性二氧化钍），研成粉末，滴些胶水，粘成直径为 2~3mm 的小球，插在金属丝上也可作放射源。演示时先在橡皮管内注入少量酒精，把橡皮管套在玻璃上，加上直流电压，用较强光线照亮瓶子，缓缓压下打气筒的活塞杆，然后突然放开，使活塞杆自动弹起（绝热膨胀），即可看到 α 粒子的运动径迹。密闭不严时，径迹不够清楚，可在橡皮塞上涂一层凡士林油膏，在打气筒的皮活塞上加一些机油。

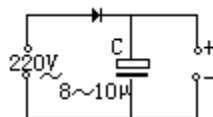


图 3

云室用的高压电源的制作：用一个 2CP 型晶体二极管和 8~10 μ F 油浸（或电解）电容器（耐压都在 400V 以上），组成一个半波整流器，如图 3 所示。整流器工作状态近于空载，输出直流电压约 300V。断开电源后，电容器由于充电仍有高压，应用导线使电容器放电。需注意防止手触及电容器时触电。

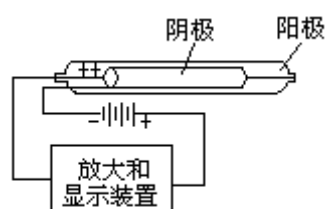


图 4

(3) 图 4 为探测粒子的盖革计数器，它是利用放射线的电离作用制成的粒子探测仪器，由盖革计数管、放大和显示装置组成。

当一个放射性粒子进入计数管时，就使计数管发生一次短暂的放电，从而得到一个脉冲电流。把这个脉冲电流用电子电路加以放大，送入显示装置就可以显示出来。显示的方法可以用扬声器发声、氖泡发光和数字显示等。把计数管用开有窗口的金属套筒保护起来，加上手柄，再用电线跟放大显示装置连接起来就成为盖革计数器。

图 5 所示是一个盖革计数器的电路图。BG₁ 等组成的间歇振荡器转换为高频电压，再经倍压整流获得 400 伏高压作为计数管的工作电压。BG₂—BG₅ 组成三级直流放大器，使输入的脉冲电压放大后推动扬声器发声。

演示时，打开计数器的电源，把计数管探头放在周围空间没有放射源的环境中，可以听到扬声器发出每分钟 25 次左右的响声，这就是宇宙射线的信号。把一放射源放在一个火柴盒内，与其他空火柴盒放在一起，用盖革计数管的探头分别靠近各火柴盒，可以发现，在接近有放射源的火柴盒时，扬声器中的“喀嚓”声次数比宇宙线产生的声响次数显著增多，声音也响。说明了探测的原理。将一定厚度的铅皮，放在放射源与计数管之间，扬声器的“喀嚓”声显著减少，表明铅皮对放射线具有屏蔽作用。用其他的金属板（铁、铝、铜等）代替铅皮时，响声次数没有明显变化，说明它们不能屏蔽放射线。