

中学物理思维方法丛书

顾 问 周培源 于光远
序 言 阎金铎
主 编 王溢然 束炳如
编 委 (按姓氏笔划为序)
王明秋 王溢然 刘宗贤
束炳如 岳燕宁 谢 凯
本册作者 王溢然 张耀久
插 图 朱 然

每当理智缺乏可靠论证的思路时，类比这个方法往往指引我们前进。

——康德

序 言

在中学物理教学过程中,学生获取知识的同时,要重视从科学宝库中汲取思维营养,加强科学思维方法的训练。

思维方法是一个很大的范畴,有抽象思维、形象思维、直觉思维等。以抽象思维而言,又有众多的方法,在逻辑学中都有较严格的定义。对于以广大中学生为主的读者群,就思维科学意义上按照严格定义的方式去介绍这众多的思维方法,显然是没有必要的,也是不会收到成效的。由王溢然、束炳如同志主编的这套丛书,不追求思维科学意义上的完整,仅选取了在物理科学中最有影响、中学物理教学中最为常见的这些思维方法(包括研究方法)为对象,在较为宽泛的意义上去展开,立意新颖,构思巧妙。全套丛书共 13 册,各册彼此独立,都以某一二类思维方法为主线,在物理学史的恢宏长卷中,撷取若干生动典型的事例,先把读者引入到饶有兴趣的科学氛围中,向读者展示这种思维方法对人类在认识客观规律上的作用。然后,围绕这种思维方法,就其在中学物理教学中的

功能和表现、以及其在具体问题中的应用作了较为深入、全面的开掘,使读者能从物理学史和中学物理教学现实两方面较宽广的视野中,逐步领悟到众多思维方法的真谛。

这套丛书既不同于那些浩繁的物理学史典籍,也有别于那些艰深的科学研究方法论的专著,但却兼容了历史和方法、照顾了普及与提高、联系了中学教学实际、突出了对中学物理教学的指导作用和具体应用。文笔生动、图文并茂,称得上是一套融史料性、科学性、实用性、趣味性于一体的优秀课外读物。无论对广大中学生(包括中等文化程度的读者)还是中学物理教师、教学研究人员以及师范院校物理专业的大学生,都不无裨益。

科学研究是一项艰巨的创造性劳动。任何科学发现和科学理论都是在一定的背景下,经过科学家精心的实验观测、复杂的思维活动后的产物。在攀登道路上充满着坎坷和危机,并不是一帆风顺、一蹴而就的。科学家常常需及时地(有时甚至是痛苦地)调整自己的思维航向,才能顺利抵达成功的彼岸。因此,任何一项科学新发现、一种科学新理论的诞生,决不会仅是某种单一思维活动的结果。这也就决定了丛书各册在史料的选用上必然存在的某些重复和交叉。这是一个不足之处,但反过来却可转化为使读者的思维层次“多元化”的一个优点。不过,作为整套丛书来说,如果在史料的选用上搭配得更精细一些、思维活动的开掘上更为深刻一些,将会使全书更

臻完美。

我把这套丛书介绍给读者,一方面希望引起广大中学生的兴趣,能从前辈科学家思维活动轨迹中汲取智慧,活化自己的灵感,开发潜在的智能;另一方面希望中学物理教师在此基础上继续开展对学生思维方法训练的研究,致力于提高学生的素质,以适应新时期的需要。

我也真诚地希望这套丛书能成为图书百花园中一朵惹人喜爱的花朵。

阎金铎

1992年10月

引 言

在新事物面前,人们往往习惯于把它们与原有的、熟知的事物相比,这里蕴含的思想方法就是类比.如果从阿基米德智鉴金王冠的简单共存类比算起,人们应用类比方法已有两千余年的悠久历史,类比曾激起许多哲学家、科学家、发明家丰富多彩的想象,结出累累硕果.

在这本小册子中,我们先就类比的一般概念作简单介绍,接着摘取物理学发展史上精彩的实例和技术上有典型意义的成果,较详细地阐述类比在人们的科学认识中的作用及其依赖于实践检验的关系.然后,结合中学物理教学实际,介绍了教学中较常见的几种类比方法、类比的教學功能及其在分析、解决具体物理问题时的应用.

希望广大读者从阅读本书中,能进一步了解和掌握类比推理的方法,并能运用类比推理帮助自己理解和掌握物理知识,更希望能有助于启迪思维、拓宽思路,在探求未知世界奥秘的道路上迸发出创造发明的智慧火花.

作者

于1992年秋

目 录

序言

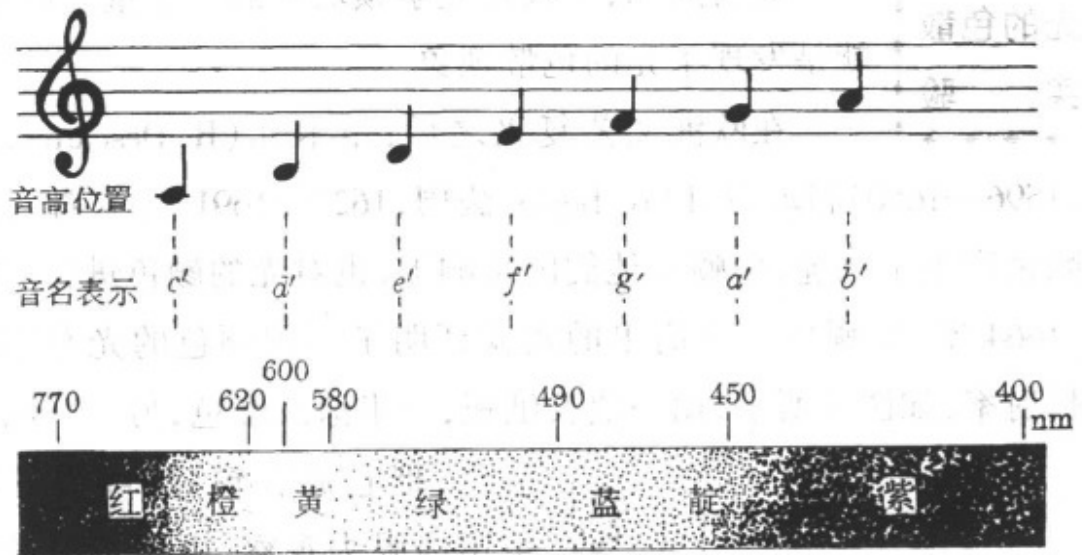
引言

一、关于类比的一般概念	(1)
1. 从乐音和颜色谈起	(1)
2. 类比的基本特征	(6)
3. 类比与比喻、比较	(11)
4. 类比与外推	(17)
二、类比在科学认识中的作用	(20)
1. 类比是提出假设的重要途径	(20)
2. 类比能有效地激发科学想象	(31)
3. 类比可导致技术上的发明创造	(43)
4. 类比为模拟实验提供逻辑基础	(54)
三、实践是检验类比结论的试金石	(59)
1. 库仑的扭秤实验和电摆实验	(60)
2. 欧姆的电流扭秤实验	(63)
3. 赫兹实验与发明家的迷离	(66)
4. 先找到儿子 再发现老子	(69)
5. 斯特恩—盖拉赫实验中的难题	(71)
6. 勒维烈的失误和汤波的成功	(77)
四、中学物理中常见的类比方法	(80)

1. 简单共存类比	(80)
2. 因果类比	(82)
3. 数学类比	(85)
4. 模型类比	(93)
五、类比对学习和运用物理知识的指导作用	(98)
1. 类比的发现功能	(98)
2. 类比的迁移功能	(104)
3. 类比的模拟功能	(111)
4. 类比的鉴别功能	(120)
六、类比在中学物理解题中的应用	(122)
1. 建立类比模型 多题归一	(122)
2. 展开类比联想 出奇制胜	(139)
结束语	(158)
主要参考资料	(159)

一、关于类比的一般概念

1. 从乐音和颜色谈起



(a) 乐音的七个音高

(b) 白光的七种色光

图 1

图 1(a)的五线谱表示的是乐音中的七个音高,图 1(b)是太阳光经过三棱镜后色散成的七种色光.这似乎完全是两码事,但在伟大的物理学家牛顿(I. Newton, 英国, 1642—1727)看来,它们却很相似.

乐 音	色 光
发声体振动而发声	发光体振动而发光
按音调不同划分为七个音高 (1,2,3,4,5,6,7)	按折射率不同划分为七种色光 (红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫)
每个音高都是一个纯音	每种色光都是单色光
不能认为两种不同的声音是一种 基本声音的不同程度	不能认为两种不同颜色是一种基 本颜色的不同程度
七个音高的组合为和声 (声音的谐和现象)	七种单色光的组合为白光 (颜色的谐和现象)

光的色散
实 验

众所周知,牛顿在光学领域中的一个重大成就,就是发现了光的色散现象。

在欧洲文艺复兴之后,笛卡儿(R. Descartes, 法国, 1596—1650)和玻意耳(R. Boyle, 法国, 1627—1691)等人都对光的颜色产生了兴趣,牛顿在他们的影响下,也对光的颜色进行了研究.1664年,牛顿用一个简单的实验证明了不同颜色的光有不同的折射率.如图2所示,用一块长纸板,一半涂成红色,另一半涂成

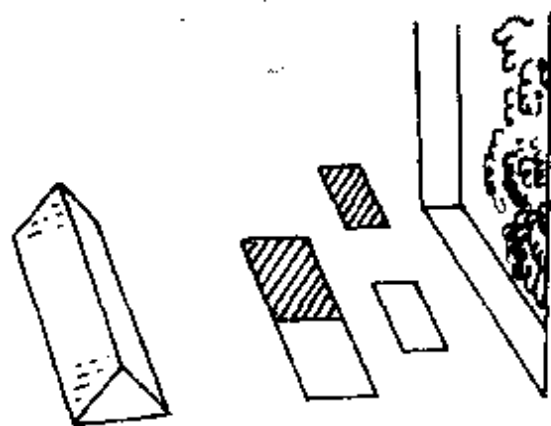


图2 不同的色光折射不同

蓝色,把它放在窗口,隔着三棱镜用肉眼去观察.由于折射的结果,通过三棱镜看到它们的像都向着顶角方向偏移,好像被抬高了一些.但蓝色半边比红色半边升高得更多一些.牛顿写道:“这个实验显示出,产生蓝色的光线比产生红色的光线折射得更多……”

后来,在1665—1666年间,牛顿正式做了著名的光的色散实

验.他在暗室的一扇窗上开了个小圆孔,让一束很窄的太阳光从这个小孔进入室内,射到三棱镜的一个侧面上,再在三棱镜后放一屏,如图3所示.结果在屏上观察到一个由各种颜色的圆斑组成的像.它们色序的排列,偏角最大的一端是紫光,偏角最小的一端是红光.

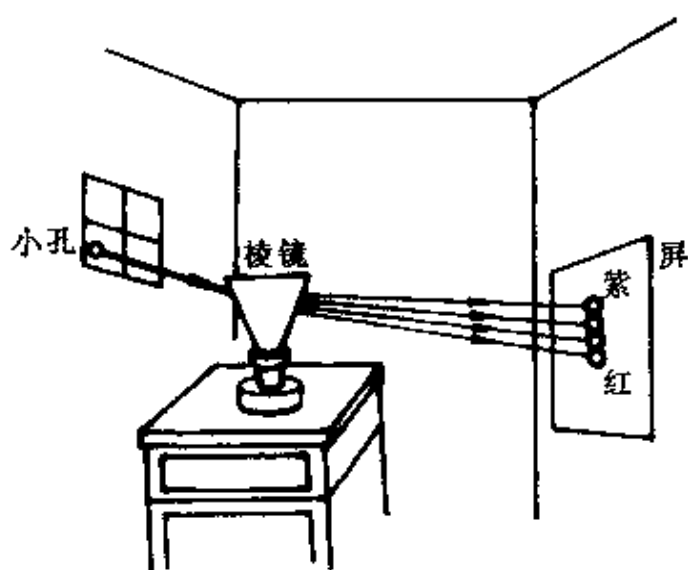


图3 白光的色散实验

不过,这一实验还不足令人信服白光(太阳光)是由这些色光组成的,因为当时有人认为,这是由于白光和棱镜发生了相互作用的结果.于是,牛顿又设计了另一个实验.如图4所示,在上述实验的屏上再开一个小孔,将其中的某种色光(如黄光)引出来再射到另一个三棱镜上.如果白光通过棱镜后变成各种颜色的光是由于白光与三棱镜发生了相互作用的结果,那么,引出的这种色光与棱镜相互作用也会改变颜色.结果,却只发现这种色光经过棱镜后仅发生了偏转,并不改变光的颜色.

为了进一步证明白光是由各种颜色的色光组成,牛顿还做了这样的一个实验:他用一个棱镜将白光分解所得到的各种色光,又让它们通过第二个顶角较大的倒置棱镜(图5),结果发现,不同的

色光又会聚起来在屏上某一区域内重现出白光。

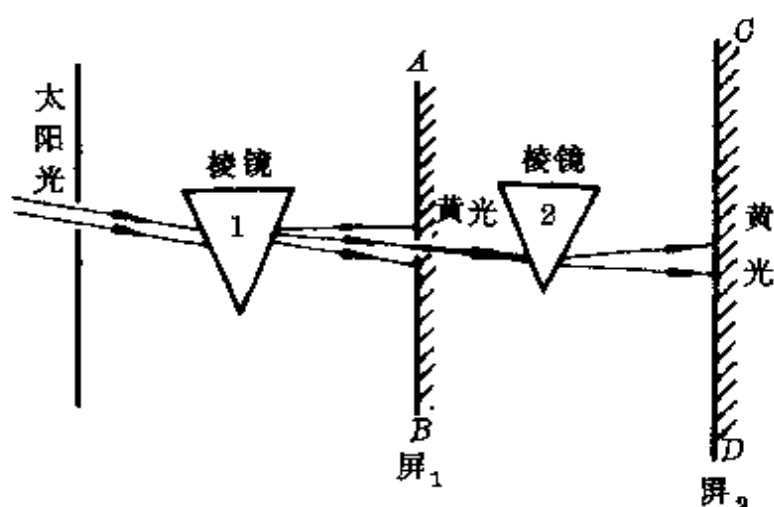


图 4 单色光通过棱镜不再色散

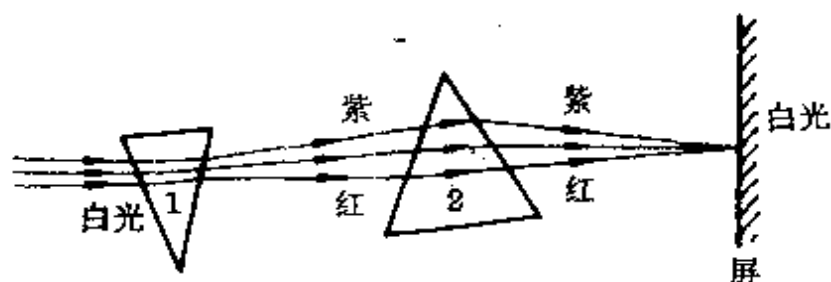


图 5 单色光的复合

牛顿的这些实验,充分证明了白光确实有着复杂的成分,它能分解成折射率不同的各种颜色的色光。

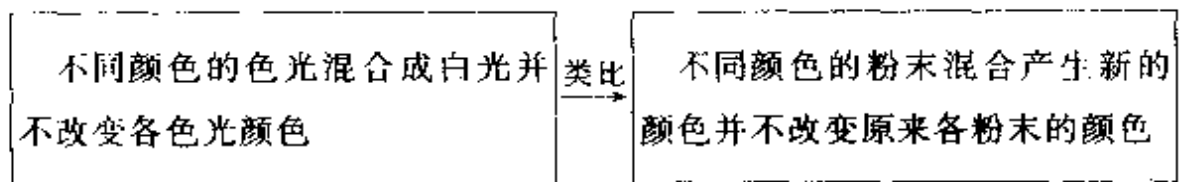
1672年2月8日,牛顿在英国皇家学会宣读的论文中介绍了这些实验,并把颜色分成简单色(或原色)和复合色两种.以后,我们就把白光分解出来的各种色光称为单色光,把白光称为复色光。

牛顿把光及其通过三棱镜后的色散现象和声音作了类比.本节开头的这张表,就是根据牛顿的意思列出来的。

牛顿与
类比法

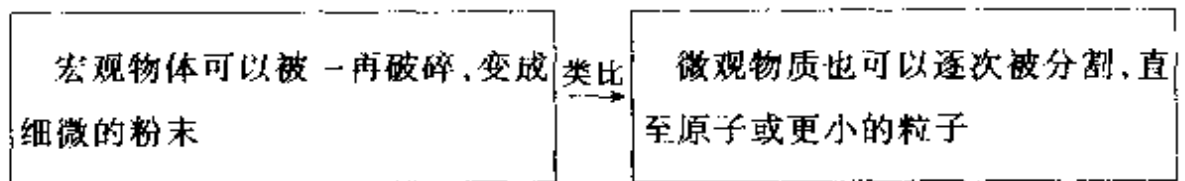
牛顿在1666年完成了光的色散实验后,为了说明颜色的机理,用不同颜色粉末的混合与色光的混合作了一次很成功的类比.他在1670年的光学讲义中写

道：“……通常观察到不同颜色的粉末混在一起时，一种新的颜色就出现了，而且，如果用显微镜观察这些粉末，可看到全都具有它们自己的颜色，因此，它们自己的颜色并未因这些粉末的混合而破坏，而却是因为混合只有一种新的颜色产生出来……”。这正像不同颜色的色光混合成白光而它们各自原来的颜色并未改变一样。牛顿的这个类比可表示为：



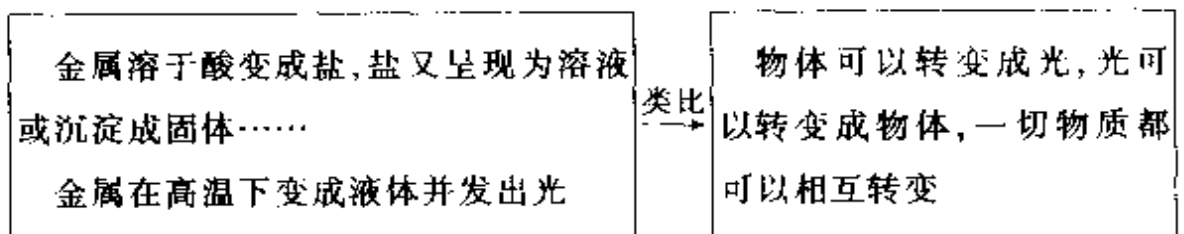
虽然牛顿也因这个成功的类比印证了他的微粒说，使它成为禁锢牛顿对光本性认识的桎梏，但它对正确阐释颜色的机理起了很重要的作用。

利用类比法，牛顿还提出了其他许多很有价值的看法，例如：



这个类比，对原子论的发展产生了很大影响。

牛顿的物质蜕变思想，也是通过对大量化学变化和物质状态变化的类比中产生的：



牛顿曾说过：“如果金子能够发酵，它就能转变成任一其他物质。”这句话既蕴含着哲学家式的幽默，也显示出作为物理学家的牛顿深刻的理性的思考，这种物质蜕变思想是十分可贵的。

牛顿还通过对“光的射线”的类比,进而推测出重力、电力、磁力也都来源于细微粒子的发射,并提出了“重力射线”、“磁射线”的概念,认为它们也会像光那样发生反射和折射,后来又演化出“磁流质”(magnetic effuvia)和“电流质”(electric effuvia)概念,对后人都是极为有益的启示。

类比法成为牛顿探索不可感知事物和了解最终原因的一种常用方法,使得牛顿的科学思想更加活跃、更加开阔。

2. 类比的基本特征

类比是一种逻辑推理,也是抽象思维中的一种基本形式,它通过联想,把异常的、未知的事物(研究对象)对比寻常的、熟悉的事物(类比对象),然后依据两个对象之间存在着的某种类似或相似的关系,从已知对象具有的某种性质推出未知对象具有相应的一种性质。

类比的 基本环节

类比推理有两个基本环节:

(1) 选择类比对象

类比推理是以两个对象的比较为基础的,因此必须根据研究目的,从研究方法、形成结构、功能特征、因果联系等方面的相似之处出发,选择熟悉的、生动直观的事物作为类比对象。

(2) 进行类比推理

即通过比较,展开联想,其一般图式为:

对象 X 有属性 a、b、c、d,

对象 X' 有属性 a、b、c,

推理:对象 X'可能也有属性 d(图 6)。

如果我们借用数学上的比例结构来表示这种类比推理的思维操作的话,可表示成这样的形式:

$$X(a):X'(a') \rightarrow X(b):X'(b')?$$

这就是说,如果对象 X 有属性 a,对象 X' 有属性 a',则对象 X 有属性 b 时,对象 X' 也可能有属性 b'. 例如:

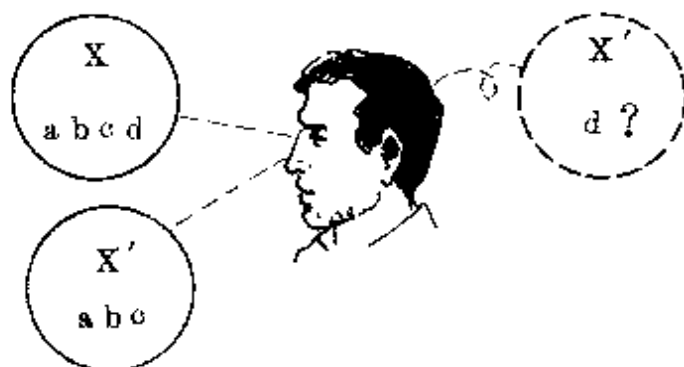


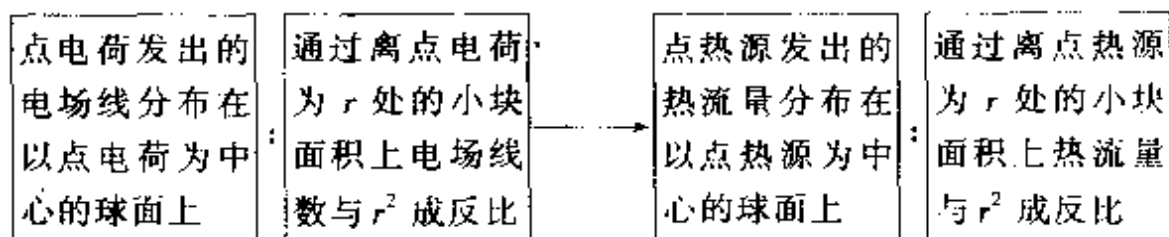
图 6 类比推理

**汤姆生的
热电类比**

英国著名物理学家威廉·汤姆生 (W·Thomson, 1824—1907) 在认识当时较陌生的静电现象时,选择了 了他熟知的热现象作为类比对象,于 1841 年作了一次很成功的类比推理。

热 现 象	静 电 现 象
导热物体	导电物质
热的良导体	电的良导体
热传导时而进入物体的表面	导体的带正电荷的表面
热传导时而逸出物体的表面	导体的带负电荷的表面
热源	带正电的物体
热传导时热从高温物体传递到低温物体	电驱动时使带正电的物体从高电势处移向低电势处
等温面	等势面

汤姆生还设想把一个点热源嵌在一个均匀导热介质中,热量将以点热源为中心向四周辐射(传导).由于一个球的表面积为 $4\pi r^2$,因此,通过离开点热源为 r 处的一小块面积元 ΔS 的热流量 $\Delta\phi$ 与距离平方成反比,即 $\Delta\phi \propto \frac{1}{r^2}$,这与库仑定律极为类似.我们可以表示为:



W·汤姆生对热现象和静电现象作了这样的类比后,根据对“热的感应”作用的联想,推出了静电的一个基本性质,即静电也有感应作用,并形象化地称为“感应线”.今天我们都知道,把一个不带电的导体靠近一个带正电或负电的带电体时,导体两端会出现感应电荷.被法拉第引进的电场线,就是W·汤姆生提到的“感应线”(图7).

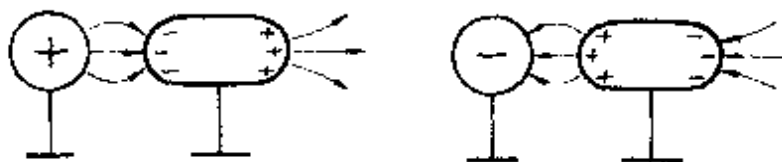


图7 电感应线

类比与归纳、演绎的关系

类比是一种从特殊到特殊的逻辑思维方法,它与从特殊到一般的归纳法和从一般到特殊的演绎法相比,类比法跳过了其中的过渡中介途径,选择了一条路径更为简捷的推理思路,如图8所示.

这种关系表明,类比有着比归纳法和演绎法更为简捷的特点,常能独辟蹊径,出奇制胜.因此,类比是科学研究中十分有用的一

这个方法.苏联著名学者巴托罗夫说:“我们可以断言,在现代科学认识获得的全部知识中,用类比方法得到的知识所占的比重日益增大.”

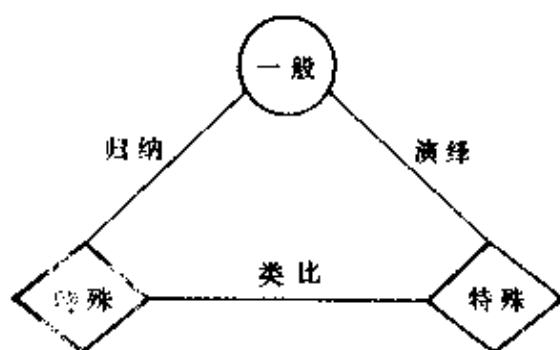


图 8 类比与归纳、演绎的关系

**惠更斯的
错误类比**

由于类比法把归纳和演绎简并为从特

殊到特殊的单一过程.它在任何时候都总是包含着某种猜测的成分.因此,由类比推理得来的认识并不总是可靠的.当年,惠更斯(C. Huygens, 荷兰, 1629—1695)与牛顿之间关于光的本性的一场著名论战中,没有能战胜牛顿的一个重要原因,就归咎于惠更斯从类比得出了一个错误的结论.

17世纪后半世纪,关于光的本性流传着两种对立的看法.

以牛顿为首的一方,提倡微粒说,认为光是从发光体发出的一种具有弹性的、直线前进的微粒子流.不同颜色的光是由不同颜色的微粒组成的,它们在介质中有不同的速度.牛顿主张微粒说有两方面的原因.一是他从科学生涯开始就接受原子论的观点;二是基于他所做的光学实验的证明.

与牛顿对峙的另一方的代表,就是被爱因斯坦(A. Einstein, 德国, 1879—1955)称为“第一个提出完全新的光的理论的人”——惠更斯.他根据声音和光的类比,认为光是一种波动.惠更斯说:“……像声音一样,它也一定是以球面波的形式传播的.我们把它称为波,是因为它们类似于我们把石块投入水中时所看到的水波……”

惠更斯还认为,不同颜色的光对应于不同的波长.

我们知道,波动有两种方式:振动方向与波的传播方向一致的叫纵波;振动方向与波的传播方向垂直的叫横波.于是,人们很自然地会向惠更斯提问:如果光是一种波动,那么到底是纵波还是横波呢?

惠更斯在对光波和声波作类比时,没有认识到光和声波的不同本质,错误地认为光和声波一样都是纵波.这个由类比得出的错误结论,使波动说无法解释只有横波才特有的偏振现象和双折射现象*,在这场关于光的本性的论战中显得被动.再加上牛顿在科学界的崇高威望,很长一段时期中微粒说处于统治地位.

正确对待
类比

尽管类比推理所得的结论是或然的,甚至有时还会把人引入歧途,但它仍不失为一个重要的方法,尤其是在形成和提出新概念、新原理的最初阶段,更具有特殊的作用.

歌德说得好:“如果过于相信类比,那么一切都会显得是相同,如果回避类比,那么一切就会无限分散,在这两种情况下,研究都会停步不前.”

上面惠更斯类比的失误还提醒我们,不应忽视类比对象间的差异.也许正是在这种差异中,隐藏着被类比对象的一种新的特性.

所以,我们对类比推理必须保持一种辩证的态度,从类比推理得到的结论,必须经受实践的检验.

* 偏振现象:只有某一方向的振动或某一方向的振动占优势的现象.

双折射现象:当一束光射入方解石晶体时,产生两束不同方向折射光的现象.这是丹麦物理学家巴尔托里奴斯(E. Bartholinus, 1625 - 1698)在 1670 年首先观察到的.

3. 类比与比喻、比较

“类比”这个术语,在希腊语中是比例的意思,后来也在类似、相似或具有同样的关系、形式、结构等较广泛的意义上使用.但在逻辑学中,类比主要作为推理思维的一种形式,我们所着重研究的也指这种类比推理,因此它与比喻、比较等不尽相同.

(1) 比喻

比喻是以甲事物说明与其相似而又有本质区别的乙事物的方法,常用于对所指事物作的一种浅显明了或形象生动的说明,它与类比的根本区别是,作为比喻的双方缺乏必然的逻辑推理性,但巧妙的比喻往往使人在幽默的笑声中顿开茅塞或受到启发.

狗身上的
跳蚤

1986年8月在日本东京举行的国际物理教学研究会(ICPE)上,一位代表对“微观过程是可逆的,然而宏观过程不可逆”的物理现象作了个比喻:好比有两只狗,一只黑狗身上生满了跳蚤,另一只黄狗则是干净的.两只狗站在一起,跳蚤可以从黑狗身上跳到黄狗身上,当然也可以再从黄狗身上跳回黑狗身上.跳蚤跳来跳去的过程相当于一个微观过程,是可逆的,但是最后无论是黑狗还是黄狗,都不可能成为干净的了.这就是说,从宏观上看,跳蚤从黄狗身上完全跳回黑狗身上,使黄狗重新成为干净的这一宏观过程是不可逆的.这一比喻形象、生动,受到与会代表的赞赏(图9).

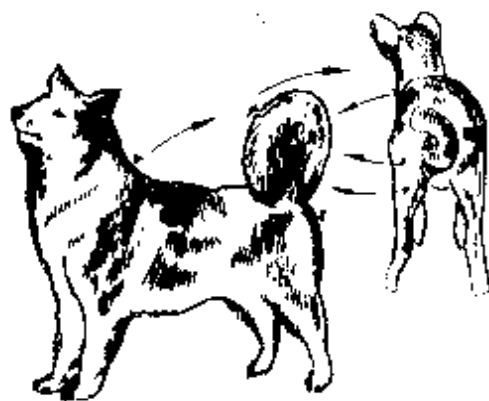


图9 宏观过程不可逆

波与潮

对于“光的波粒二象性”，初学者常感到很难理解。在美国物理学家保罗·F·布朗德威恩等著的《能量》一书中作了一个很精彩的比喻：“……设想你自己在海岸边，飘浮在一个木筏上，随着滚滚的细浪而轻轻地上下动荡，你说这是一些波，而且你每分钟都看到和感受到它们。再设想你置身在完全不同的尺度上，你小到和细菌一样大小，而且你只能在几毫米远处看到东西。此外你的时间感觉也变了，过去几分钟就好像许多小时了。你对波的印象是什么呢？除去周围的水，你不能看到任何东西，代替每分钟使你动荡好几次的波的感觉是每几个小时被上上下下举起。在这种情况下，你能不能用潮而不用波来描写水的情况呢？你关于水的印象决定于你的大小。”

光的情况也是这样，当光投射到水的表面，或棱镜、面镜，或薄油膜、透镜时，它的作用很像电磁波。当光投射到极小的东西，例如原子、原子核或电子时，光的作用就好像是一种飞跑着的微小粒子一样（称为光子）。但是，光实际上时时刻刻都是统一的。

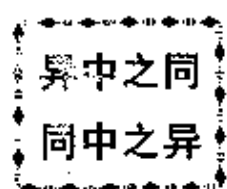
上面的这个比喻很容易说明“光的波粒二象性”的统一性。也就是说，“任何作用的效果都决定于被作用的东西”，在不同的尺度上，对同一个事物可以作出不同的描述。

萨克斯 智谏总统

历史上还有一段用比喻促成原子弹研制成功的佳话。1939年，铀核裂变被发现后，世界上许多科学家认识到核分裂所释放的巨大能量，担心被德国纳粹政府用以制造大规模的杀伤武器。两位流亡到美国的匈牙利物理学家西拉德（L. Szilard, 1898—1964）和维格纳（E. Wigner, 1902—）找到爱因斯坦，希望借助爱因斯坦崇高的国际威望写信给当时的美国总统罗斯福，提醒总统注意到纳粹政府将裂变理论用于军事目的危险，敦促美国赶在德国之前造出原子弹。爱因斯坦表示

完全赞同,并于1939年8月签发了给美国总统的信件.1939年10月,总统的私人顾问萨克斯向总统面呈了这封著名的万言书.开始的时候,罗斯福总统看不懂那艰深生涩的科学论述的内容,不能注意到问题的严重性,反应冷淡,想婉言推辞.这位知识渊博、机智超群的顾问就利用与总统共进早餐的机会,给罗斯福讲起了历史上拿破仑的一个故事:英法战争时,曾经在欧洲大陆上不可一世的拿破仑却在海战中屡屡失败.当时有一位年轻的美国发明家富尔顿(R. Fulton, 1765—1815),向拿破仑建议将法国的战船砍掉桅杆,撤去风帆,装上蒸汽机,将木船换成钢舰.可拿破仑却想,船没有风帆怎能前行,木板换成钢板,船哪能不沉没.拿破仑眉头一皱,把富尔顿一下轰了出去.史学家后来评论这一段历史时认为,如果当时拿破仑冷静下来稍微慎重考虑这一建议,那么19世纪的世界史也许就得重写……罗斯福听完了这则历史故事,猛然醒悟了,沉思了片刻,取出了拿破仑时代的法国白兰地酒,斟满杯子,敬重地递给萨克斯,高兴地说:“你胜利了.”后来,罗斯福总统就下令成立了铀顾问委员会,部署了代号为“曼哈顿工程”(Manhattan Engineer District)的制造原子弹的庞大的计划,并最终于1945年美国抢先制造了世界上第一颗原子弹.这里,萨克斯运用了拿破仑不听从富尔顿建议致使在海战中遭受重创的史实,旁敲侧击地比喻了研制原子弹的重要意义,使罗斯福总统深受教益.

(2) 比较



比较就是找出被比对象的同一性与差异性.俗话说:“不怕不识货,只怕货比货”,就是依靠比较来区分彼此间的真伪、优劣.从更普遍的意义上说,比较的作用就是确认和鉴别事物,对事物分类,对事物进行分析和归纳.它与类比一样,也是在归纳之前对实验结果和对现象进行研究

时常用的一种基本方法.比较与类比显著的不同之处是:对被比的对象,并不期望它们有相同(或相似)的推理结果.

由于研究对象的广泛性和多样性,可以说,比较没有一定的形式,有的是同时比较不同的物理现象;有的是比较研究对象随条件而变化的情况.但不论怎样的比较,都必须抓住本质,这是比较的重点,也是进行比较时最难把握的地方,尤其是当某些研究对象的同一性和差异性隐蔽得很深的时候.德国著名的哲学家黑格尔(G. W. F. Hegel, 1770—1831)说过:“假如一个人……能区别一支笔和一峰骆驼,则我们不会说这个人有了了不起的聪明.同样另一方面,一个人能比较两个近似的东西,如橡树与槐树,或者寺院与教堂,而知其相似,我们也不能说他有很高的比较能力.我们所要求的,是要能看出异中之同,或同中之异.”

例如,本世纪 20 年代初,海森伯(W. K. Heisenberg, 德国, 1901—1976)、泡里(W. Pauli, 奥地利, 1900—1958)、狄拉克(P. A. M. Dirac, 英国, 1902—)等一批杰出的年轻物理学家,从原子光谱线的分立性着手,强调其不连续性,创立了解释微观世界运动规律的矩阵力学.这是一种以前罕见的代数方法.而奥地利物理学家薛定谔(E. Schrödinger, 1887—1961)沿着德布罗意(L. de. Broglie, 法国, 1892—?)所开辟的道路,从推广古典的运动定律着手,强调连续性,依据人们所熟悉的微分方程,创立了解释微观世界运动规律的波动力学.开始时,他们都无法容忍对方(图 10).泡里说:“我越掂量薛定谔理论的物理部分,我越感到憎恶.”薛定谔回击说:“在我看到了一种蔑视任何形象化的、颇为困难的超越代数方法,我要不是感到厌恶,就感到沮丧.”问题在于双方都未看到这两种理论的“异中之同”.后来经过一段时间的考察和比较,对立的双方同时看到了波动力学和矩阵力学在数学上是完全等价的,本质上是相



图 10 矩阵力学与波动力学之争

同的,只是着眼点和处理方法上各不相同,找到了两者的“异中之同”,进而统一了量子力学的理论体系。

**比较与
物理研究**

比较方法在物理学的应用中十分普遍。伽利略做自由落体实验时,就用了炮弹、子弹、木材、大理石作比较,当伽利略在教堂按住自己的脉搏初步发现吊灯摆动的等时性后,回到家中立即用不同重量、不同长度的摆进行比较研究,进一步确认了摆的等时性。在牛顿的科学研究中,比较法也随处可见。例如,潮汐理论的建立中,牛顿曾比较了月球与太阳在不同方位的相对位置对潮汐的作用,然后才归纳出潮汐出现的规律和最大潮、最小潮的时间。牛顿提出的种种概念与定义(如质量、质点和惯性系等),总结和发现的一切原理与定律(如牛顿运动定律、万有引力定律等)都是对大量现象进行了比较和分析之后,在各种特性中揭示其共性,经过逻辑(数学的和形式逻辑的)推理才发现和提出的。

在物理学研究中应用比较法最典型的是光谱分析法。这是由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)共同创立的。1857年,他们在实验中让

白热的石英灯的光通过棱镜,得到明亮的黄线(即钠线或称 D 线).当在石英灯和分光器之间放上含盐的酒精火焰后,这时原来明亮的黄线立即变成黑线.这就是说,低温气体原子吸收的光,恰好是这种原子在高温时发出的光.他们通过反复的实验比较,都得到同样的结果.于是他们总结出一个重要的对应关系:各种原子的吸收光谱中的每一条暗线都跟该种原子的发射光谱中的一条明线相对应.由于每种原子都有自己的特征谱线,因此可以根据比较光谱来鉴别物质和确定它的化学组成.这种方法叫做光谱分析.

利用光谱分析法,基尔霍夫和本生成功地解释了夫琅和费(J. V. Frahofer, 德国, 1787—1826)发现的太阳光谱中的许多暗线的原因.他们在 1859 年发表的《夫琅和费线的意义》一文中说:“夫琅和费的黑线,不是来自地球的大气,而是产生于太阳自身的白热气雾,即这个白热气雾本身具有能够发出与黑线相当的辉线的性质,所以,当太阳自身所发出的强烈白光通过这个部分时,各种光线就被相应的辉线吸收而出现黑线.”根据这个道理,他们断定太阳的大气中存在有钠、镁、铜、锌、钡、镍等元素.

有好几种在地壳中含量既少又分散、用普通化学分析方法很难发现的元素,都是通过对光谱的比较发现的.例如:

1860 年,本生研究一种矿泉水时,先分出钙、锶、镁、锂等以后,将母液滴在火焰上,用分光镜观察,发现两条从来没有见过的鲜艳的蓝色明线,经过仔细比较,本生判断其中必然有一种新元素存在.他命名为铯,取“天空的蓝色”之意.

数月后,本生和基尔霍夫在研究一种鳞状云母时,通过对光谱的比较,发现位置在太阳光谱最红的一端有一条深红的明线,后来他们分离出一种新的元素,命名为铷,即“最深的红色”.

就在他们宣布发现铷不久,1861 年,英国化学家和物理学家

克鲁克斯(W. Crookes, 1832—1919)用分光镜检视一种从硫酸厂送来的残渣的光谱时,发现它呈现出两条从未见过的美丽的绿线,他也断定这种残渣中必定含有一种新元素,被命名为铯,即“绿树枝”的意思。

1863年,德国化学家赖希(F. Reich, 1799—1882)和里希特(H. T. Richter, 1824—1898)通过对闪锌矿光谱的比较,又共同发现了新元素镉。

4. 类比与外推

外推(extrapolation)本来是数学上的一个概念,它是相对于内插(interpolation)而言的。在逻辑思维中,外推指的是利用现有知识扩大到该领域以外的未知领域去的一种思维活动,外推可以说是类比推理的一种特殊应用。

我国北宋哲学家程颐、程颢兄弟俩说过:“格物穷理,非是要尽天下之物,但于一事上穷尽,其他可以类推。”用今天的话来说,就是对事物的道理寻本溯源,并非一定要通过对许多事物的研究,只需对某一件事物彻底弄明白了它的道理,其他事物就可以类推了。我们常说的“触类旁通”,就包含有这个意思。

外推式的类比推理在科学发现中具有极为重要的意义,尤其是对于那些由于我们现有的实验条件和实验观测范围的限制,而无法直接观测的领域,往往成为这些领域中科学发现的必不可少的逻辑手段。

如在天体物理中,天文学家只能将在地球上实验室中很小的时—空范围内得到的结论,外推到宏观的时—空范围内的系统上去,然后再通过进一步的观测去检验外推的结论。例如,天文学上中子星概念的提出和发现,就是运用外推法的一个典型事例。

朗道预言与
巴德—茨维基外推

1932年,查德威克(J. Chadwick, 英国, 1891—1971)发现中子后不久,苏联著名物理学家朗道(L. D. Landau, 1908—1968)就作出预言:当物质压缩到原子核的密度后,其中99%的电子会同质子结合成中子,因此,宇宙间可能存在这种由中子组成的恒星——中子星。

1934年,美国的天文学家巴德(W. Baade, 1893—1960)和茨维基(F. Zwicky, 1898—1974)又独立地提出中子星概念。他们认为,中子星的基本特点是它的压力主要来自简并中子物态,并认为“超新星是表示从普通星向中子星的过渡,所谓中子星,就是星的最终阶段,它由全挤得极紧的中子构成”。

1939年,美国著名物理学家奥本海默(J. R. Oppenheimer, 1904—1967)用爱因斯坦的广义相对论,研究了中子星的性质,他指出:如果这种天体存在的话,它的半径只有20千米左右,密度比白矮星高1亿倍以上,可达到 $10^{14} \sim 10^{15}$ 克/厘米³(图11),它们的质量一般不超过两个太阳质量(这个值被称为奥本海默极根)*。

开始时,很多天文学家并不相信奥本海默的这个结论。直到约30年后,于1967年,英国剑桥大学的天文学家休伊士(A. Hewish, 1924—)和它的研究生贝尔(J. Bell)在研究行星际闪烁现象时,偶然观察到来自天空的射电脉冲信号,其周期非常稳定,他们把这些射电源称为“脉冲星”。不久就确认,脉冲星就是快速自转、有强磁场的中子星。到了1980年,已发现有330颗中子星。

* 恒星演化的末期,将出现三类天体:白矮星、中子星和黑洞。在恒星核能耗尽后,质量小于1.44个太阳质量的就成为白矮星;质量在1.44~2个太阳质量的,成为中子星;超过2个太阳质量的,则可能成为“黑洞”。

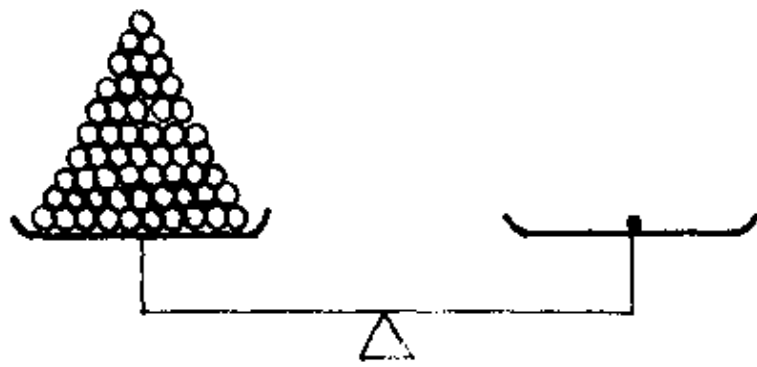


图 11 中子星惊人的密度

如果我们回到巴德和茨维基提出中子星概念时作的分析上去,那么可以看出,他们是在充分运用解释超新星爆炸机制理论模型所作的类比外推基础上,提出中子星概念来的.这个理论认为:超新星的爆炸源于引力塌缩,在塌缩过程中,中心的压力猛增,电子被挤压到原子核内,同质子结合成中子.这样,恒星外壳爆炸碎裂,被抛到宇宙空间,形成稀薄的星云.中间则留下爆炸的残骸,即一个裸露的中子核(中子星).这个类比外推可以用框图表示成如下形式:



二、类比在科学认识中的作用

类比推理对于科学的发展起着积极的推动作用。德国哲学家黑格尔(G. F. W. Hegel, 1770—1831)曾给类比方法以极高的评价：“类比的方法应在经验科学中占很高的地位，而且科学家也曾按照这种推论方法获得很重要的结果。”科学史清楚地表明，许多重大的发现和发明创造常常得益于这种思维方法的高度发挥。

类比推理也贯穿在物理学的全部发展过程中。经典力学的一代宗师牛顿与另外两位英国著名的物理学家威廉·汤姆生和麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)都堪称为应用类比方法的典范。麦克斯韦曾说过：“借助这类比，我试图以便利的形式提出研究电现象所必须的数学手段和公式。”近代科学巨匠爱因斯坦从引力场几何化的成功作类推，致力于电磁场的几何化，进而产生建立“统一场论”思想的壮举。爱因斯坦说：“在物理学上往往因为看出了表面上互不相关的现象之间相互一致之点而加以类推，结果竟得到很重要的进展。”

类比推理在科学认识中的作用，可以概括为以下几个方面。

1. 类比是提出假设的重要途径

物理学上有许多重要理论，都是先从类比法提出科学假设，然后经过实践检验发展成为科学理论的。如17世纪中叶，英国物理

学家胡克(R. Hooke, 1635—1703)通过将天体之间相互作用的引力与地球上物体所受重力的类比,提出了引力的平方反比猜想,后来经牛顿发展为万有引力理论. 1678年,惠更斯通过光和声音的类比创立光的波动说等.

根据类比推理提出假设有一定的主、客观因素. 主观上,人们总是习惯于用已知的图景去设想、解释未知的图景;客观上,物理世界中各种现象和过程之间的互相联系或多或少有些相似又为类比提供了事实基础. 因此,除上面这些熟知的成功类比外,在物理学发展史上还有许多著名的范例. 我们略举几例如下:

(1) 万有引力与静电力

普
利
斯
特
利
猜
测

18世纪中叶,人们在已知同种电荷相斥和异种电荷相吸的基础上,提出了测量相互作用力的问题. 当时有很多科学家开始了这方面的研究.

1766年,氧的发现者普里斯特利(Joseph priestley, 德国, 1733—1804)应他的朋友富兰克林(B. Franklin, 美国, 1706—1790)的要求,做了一个验证实验:把一小块软木悬挂在带电金属罐外的附近时,软木块受到强烈的吸引;把这个软木块悬挂在罐内时,无论在罐内何处,软木块都不会受到电力的作用. 普里斯特利想到牛顿在研究引力时证明过:如果引力是随着到引力中心的距离平方而减弱的话,中空的均匀球体对于空腔内部各处的物体就没有引力作用. 根据上面的实验结果,他把电荷的作用跟物体的引力作用作了类比,猜测电的作用力也遵守同一规律. 这个类比假设可表示如下:

均匀球壳对 腔内物体无 引力作用	:	物体间的万有 引力遵守距离 的平方反比律	:	带电空腔对腔 内物体无电力 作用	:	电荷间的相互作 用也遵守距离的 平方反比律
------------------------	---	----------------------------	---	------------------------	---	-----------------------------

库仑电摆
的依据

1784年,法国物理学家库仑(C. A. Coulomb, 1736—1806)在研究电荷间引力时遇到了困难,也是从与万有引力的类比假设中找到了解决的办法——

根据单摆的周期公式

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

把摆球受到的重力近似看成是地球对它的引力,即

$$mg = G \frac{Mm}{r^2},$$

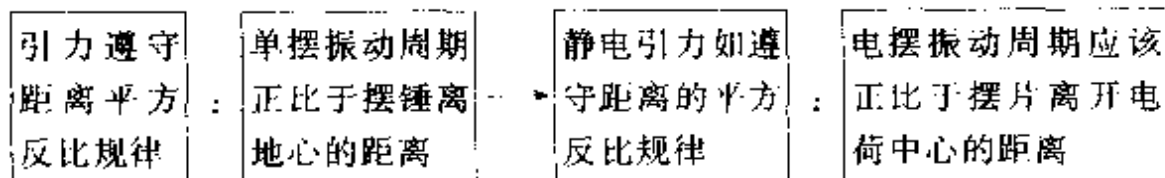
代入上式后得

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{Gl}{M}r}.$$

式中 M 是地球质量, l 是摆长, G 为引力恒量,因此上式可写成

$$T = kr. \left(k = 2\pi\sqrt{\frac{Gl}{M}} \right)$$

这就是说,当地球对物体的引力服从距离的平方反比律时,地面上的单摆的振动周期一定正比于摆锤离地心的距离.于是,库仑设想,如果电荷之间的引力也服从同一规律的话,只需设计一个电摆进行验证就可以了.库仑的这个类比假设可表示如下:



后来,库仑用实验验证了他的这一类比假设,得出了如今以他的名字命名的库仑定律.

(2) 热流与电流

**傅立叶
公式**

19世纪初,法国物理学家毕奥(J. B. Biot, 1774—1862)在温度概念和热量不灭概念的基础上建立了热传导的数学理论.后来,由傅立叶(J. Fourier, 法国, 1768—1830)最终完成.1932年,傅立叶在《热的分析理论》一书中,对热传导问题给出了一个经验定律:热量从高温处向低温处传播时,通过介质中厚度为 Δx 的一层每单位时间内传导的热量 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 正比于这一层界面两边的温度差 ΔT 和层的面积 S ,反比于层的厚度 Δx (图12).用公式表示为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \propto \frac{S \cdot \Delta T}{\Delta x}$$

$$(\Delta T = T_1 - T_2)$$

热电类比

如果我们把热现象与电现象作一类比,可以发现,两者对应得十分完美:

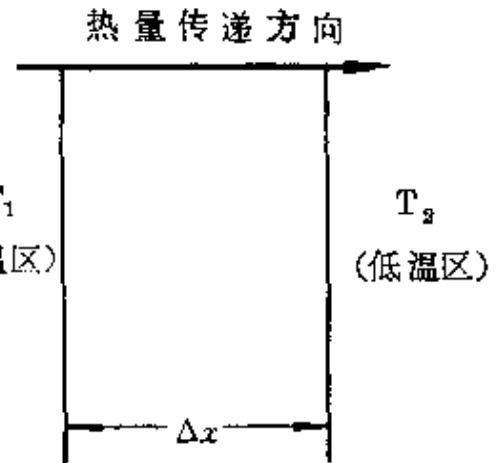


图 12 热传递规律

热 理 象	电 现 象
热量 Q	电量 q
热流 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$	电流 $\frac{\Delta q}{\Delta t}$
传热介质	导电介质
导热杆两端温度差 ΔT	导线两端电势差 ΔU
热流量 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$	电流 $\frac{\Delta q}{\Delta t}$
$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \propto S \frac{\Delta T}{\Delta x}$?

德国物理学家欧姆(Georg Simon Ohm, 1787—1854)受到傅立叶

的热流规律的启发,通过从热现象与电现象的类比中作出假设:导线中两点之间电流的大小也可能正比于这两点之间的某种驱动力.他把它称为“驱电力”(electroscopic force),用今天的话说,就是电势差.

随后,欧姆通过实验验证了他从类比推理得出的这个假设,得到了如今作为电路计算基础的欧姆定律.

(3)声音的多普勒效应与光的红移

**多普勒
效应**

1842年,奥地利物理学家多普勒(C. Doppler, 1803—1853)从波动理论得出结论:当声源和观察者互相接近时,观察者听到的声音频率增高;当声源远离观察者时,观察者听到的声音频率变低.后来,在1845年,布伊斯—巴洛特(C. H. D. Buys-Ballot, 1817—1890)在铁路旁验证了这个结论:当火车从远方驶来时,汽笛的声调变高;当火车向远方驶去时,汽笛的声调变低.这个现象称为多普勒效应.

由于光也是一种波动,因此把声音的多普勒效应类比于光就可以得到这样的假设:光源走向观察者时,光波振动的频率增大;光源远离观察者时,光波振动的频率减小.这样,就会使光谱线的位置偏离它原来的标准位置.

**宇宙膨胀与
收缩的判据**

1848年,法国物理学家斐索(Armand Hippolyte Fizeau, 1819—1896)根据从类比得到的光的多普勒效应指出,我们只要精确地测出光谱线的位置,看它是否朝光谱中波长较长的一端(即红端)或波长较短的一端(即紫端)发生移动,就可以判断光源是否在远离我们或向我们趋近(图13).

根据光的多普勒效应,我们就可以研究恒星或星系的运动了,从而也就可以间接地判知我们的宇宙是在膨胀中还是收缩中.

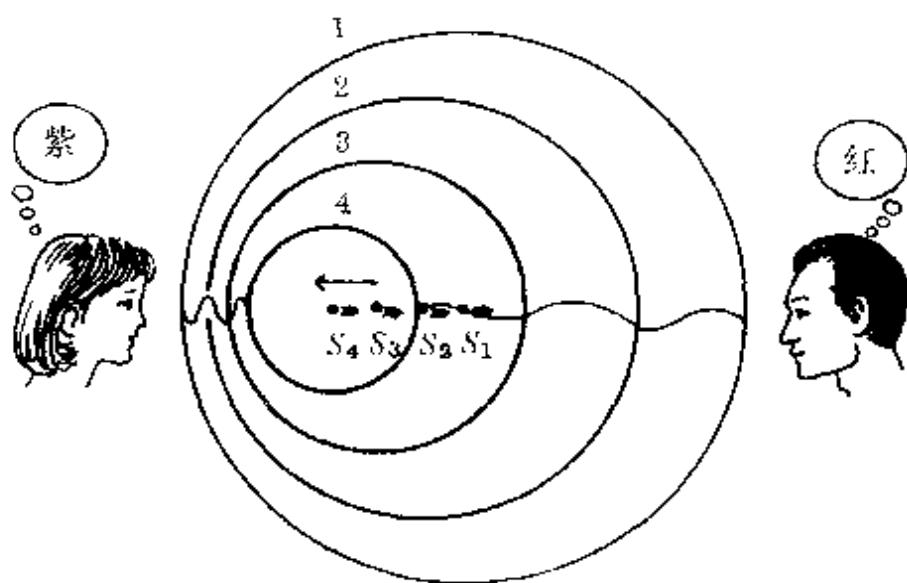


图 13 红移和紫移

因为光源(天体)的这种退离或趋近的运动,都在观察者的视线方向上,所以我们把光源的这种运动速度称为“视向速度”。

1868年,英国天文学家哈金斯(William Huggins, 1824—1910)首先根据这种光谱线的位移测出一颗恒星——天狼星的视向速度。

1890年,美国天文学家基勒(James Kdwava Keeler)又据此测得大角星正以6千米/秒的速度向我们靠拢(现在精确测定的数据是5千米/秒)。

1912年,美国天文学家斯里弗尔(Vesto Melvin Slipher, 1875—1969)测得仙女座大星云正以约200千米/秒的速度向我们奔来。到1914年,他已完成了对15个星系的分光测量,对其中的11个星系确定出了视向速度,用 v_r 表示。

如果将光谱中处于正常位置(即光源相对观察者静止时)的某一光谱线的波长记作 λ_0 ,将因存在视向速度而使该谱线位移所至的波长记作 λ ,用 $\Delta\lambda$ 表示波长位移量的大小,即

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0.$$

我们把 $\Delta\lambda$ 与 λ_0 的比值称为红移量,用 z 表示,则

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}.$$

从观测得知,红移量 z 的大小与视向速度 v_r 成正比,可表示为

$$z = \frac{v_r}{c}.$$

式中 c 为光在真空中的传播速度.

哈勃定律

1929年,美国天文学家哈勃(E. P. Hubble, 1889—1953)根据当时所知的测定星系距离的方法确定了24个星系的距离,并对22个尚未确定距离的星系,间接估算出了它们的平均距离,提出了著名的“哈勃定律”,即星系的红移和距离成正比,可以用公式简单表示为

$$z = H \frac{r}{c} \quad \text{或} \quad r = \frac{z}{H} cz.$$

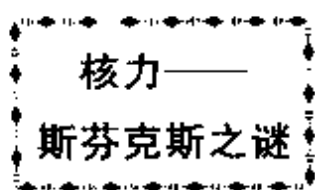
式中 c 是光速, r 是星系距离, z 是星系的红移, H 是比例常数(称为哈勃常数).

哈勃定律表明,河外星系正在不断地远离我们,而且越远的星系离开我们的速度越快,星系的普遍快速离去,仿佛宇宙正在膨胀.

以后的半个多世纪以来,尽管人们探测的空间范围与日俱增,而红移与距离的关系,始终严格地保持着哈勃定律指出的正比关系.这对于宇宙膨胀说是一个十分有力的支持.哈勃在天文学上的成绩是永垂史册的.难怪有人说,假如当年诺贝尔设置了天文学奖,那么首先应该赢得这份荣誉的便是哈勃.*

* 关于宇宙的形成和发展,尚有许多问题有待进一步研讨.其中哈勃定律指出的红移与星系退行速度以及星系离我们距离的关系,就是目前的一个争论问题.有人认为红移并不是多普勒效应引起的,而是由于别的原因.这些问题的研究解决,将使我们获得对宇宙结构和演化过程的新的认识.

(4) 电子间的作用与核子间的作用



我们知道,原子核的直径很小,其数量级一般是 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 米左右.在这么小的一个体积中却团聚着许多核子(质子和中子).以铀(${}_{92}^{235}\text{U}$)核为例,核内有 92 个质子,143 个中子.质子都带正电,它们会相互排斥,它们之间存在着很大的库仑斥力.可见,核子间必然存在着另一种力场(引力场),并且这种引力场不仅存在于质子与质子之间,也存在于中子与中子之间、中子与质子之间,从而使整个原子核内的许多核子维系在一起,构成非常稳定和十分坚固的结构.

原子核内的各核子间究竟存在着怎样的一种力场呢?许多物理学家积极开展实验探索 and 理论研究,逐渐对这种力场的特性开始有了认识.

例如,通过实验中观察中子束从质子旁边掠过时发生的偏转,发现核力是一种短程力,只有当中子和质子间距离在 10^{-15} 米以内时,这种力的作用才显著起来;而一旦两个核子之间的距离小于 0.4×10^{-15} 米时,又会变成强大的斥力(图 14).



图 14 核力取决于粒子间的距离.距离很近,彼此排斥(左).相距一定距离,彼此吸引(中).相距甚远,彼此间无力的作用

不过,对于核力的产生机理,依然像斯芬克斯像*一样,仍是个诱人之谜.

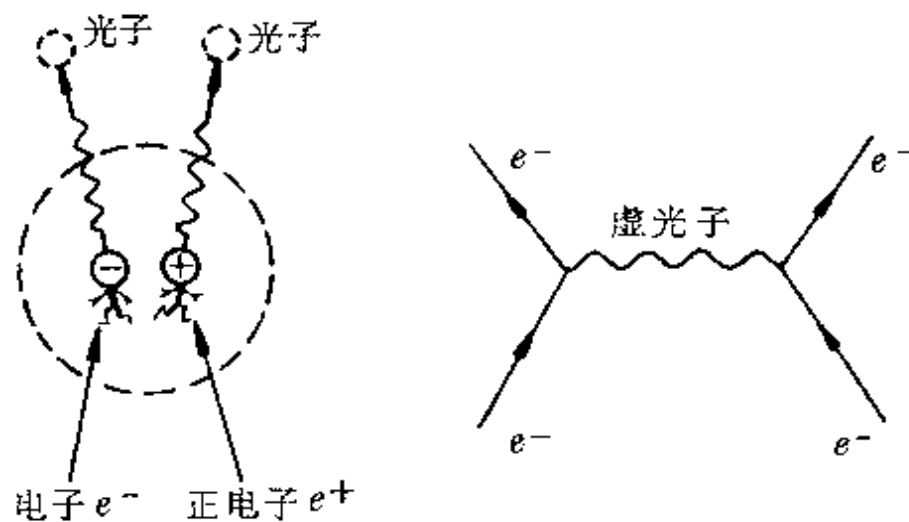
* 埃及金字塔旁的人面狮身像,距今已有约 4600 多年.它的建造至今仍是谜.

汤川类比

首先揭示核力奥秘的是日本的一位青年物理学家——汤川秀树(Hidiki Yukawa, 1907—1981)。他通过与电磁力的类比,于1935年勇敢地提出了核力的介子假设。

电磁学理论指出,带电粒子间的电磁作用力是以电磁场为媒介的,而电磁场又作为光波在空间传播着。通过对光的本性的研究,我们又了解到,光波具有粒子性,称为光子,对应着某个确定的电磁场,有确定频率的光子,每个光子携带确定的一份能量。因此,带电粒子之间的电磁作用,可以看成是由一方粒子放出光子,被另一方粒子吸收光子的过程。也就是说,电磁相互作用是彼此间交换光子而产生的。

例如,两个电子间的库仑力,可以认为是一个电子放出一个光子被另一个电子所吸收,因此这两个电子间便产生了相互作用力。由于这种光子最终并没有离开电子,仅是从一个电子转移到另一个电子,它与一对正负电子对撞湮灭所实实在在产生的光子不同[图15(a)],我们把它称为“虚光子”。因此,电子间的相互作用可以用图15(b)表示,这种图称为费曼图。



(a)正负电子对撞湮灭

(b)库仑力由交换虚光子产生

图 15

质子与电子都是带电粒子,电量相等仅电性相反.汤川把两个质子间的相互作用类比于电子间的相互作用,认为质子间的相互作用也是通过交换某种媒介粒子而间接地发生的.

汤川在论文中写道:“……基本粒子间的这种相互作用可以用力场来描述,就像带电粒子间的相互作用可以用电磁场来描述一样,从上面的讨论得出,重粒子与这个场的相互作用,要比轻粒子与这个场的相互作用强得多.在量子理论中这个场应当相应于一种新的量子(与电磁场相应的是光子).”

汤川根据核力的作用距离(力程)估算出这种粒子的质量约为电子质量的 200 多倍,介于电子质量与质子质量之间,后来被安德森(C. D. Anderson, 美国, 1905—)命名为介子.质子间相互作用所对应的费曼图如图 16 所示.

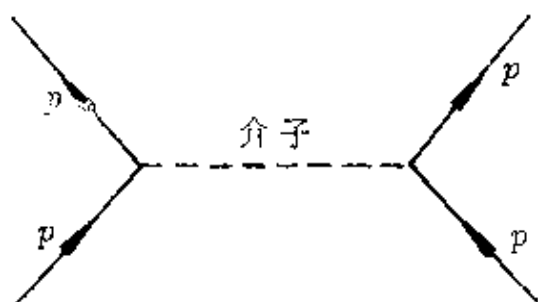


图 16 质子间相互作用的费曼图

因为核力不仅存在于质子与质子之间,也存在于质子—中子间、中子—中子间.汤川认为,不论是质子与质子之间、质子与中子之间、中子与中子之间,都是通过交换介子而产生相互作用的.只是交换的介子及所引起的变化不同.

在质子与质子间、中子与中子间交换的介子是不带电的(称为 π^0 介子),交换的结果,除了双方的能量发生变化外,核子其他的性质并没有变化(图 17).

在质子与中子间交换的介子是带电的,可以是 π^+ 介子,也可以是 π^- 介子.这时伴随着介子的交换,不仅交换双方的能量发生改变,而且核子的性质也在改变:原来的中子会变成质子,原来的

三种介子

质子会变成中子(图 18).

汤川还认为,介子是一种不稳定的粒子,它在从质子飞往中子,或从中子飞往质子的途中,将会发生衰变.一个带正电的介子,可以衰变为一个正电子和一个中微子(图 19);一个带负电的介子,可以衰变为一个电子和一个中微子.

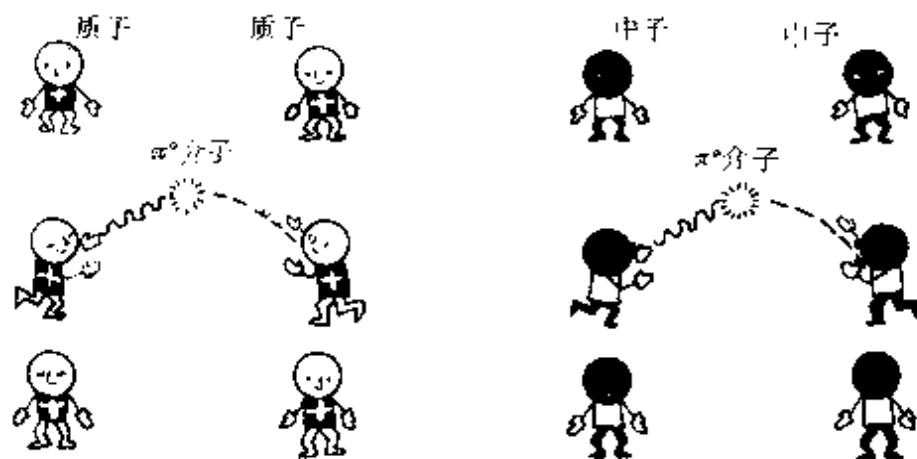


图 17 质子与质子、中子与中子间交换 π^0 介子

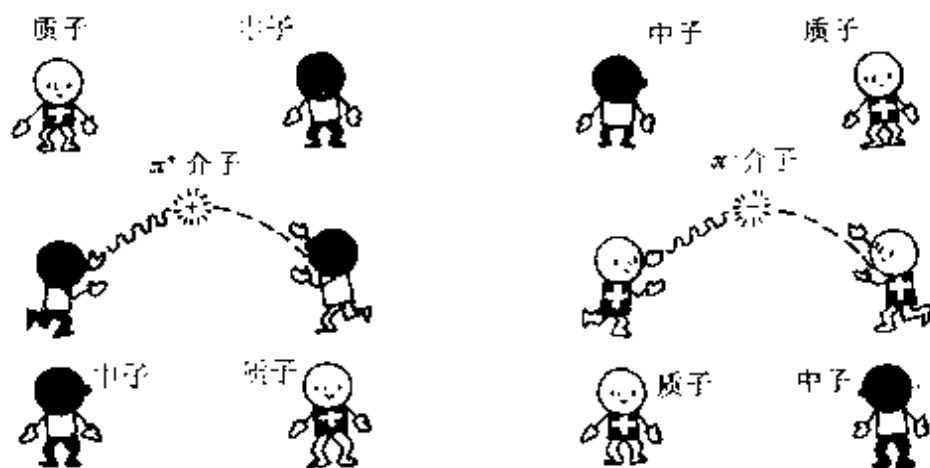


图 18 质子与中子、中子与质子间交换 π^+ 介子和 π^- 介子

汤川用介子假设圆满地解释了核力的发生和核力的部分性质以及 β 衰变现象.但是,汤川所假设的介子是否确实存在,还必须通过实践的检验.

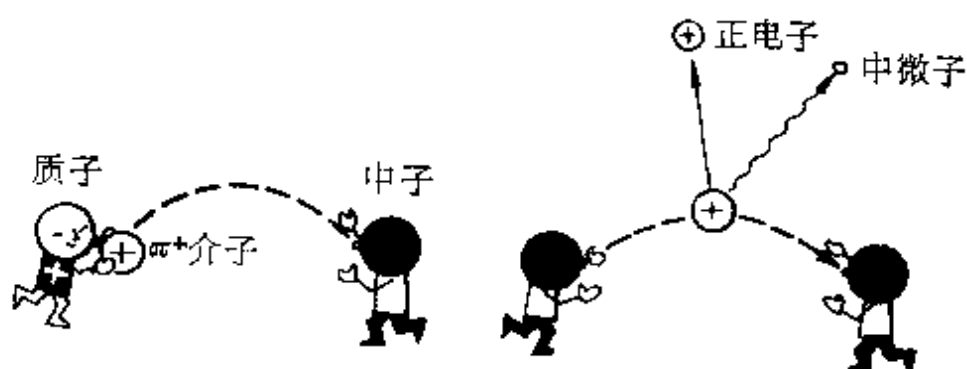


图 19 介子的衰变

2. 类比能有效地激发科学想象

类比推理的一大特点是不拘一格,它既可以近亲类比,也可以远缘类比,它允许在不知道两者之间是否有必然联系的前提下进行一种或然的推理,因此,利用类比常能十分有效地激发人们的科学想象力或启示我们去联想,能使人们从不同领域知识的交流和借鉴中,闯出原来思维囿圈的禁钢,开辟“柳暗花明又一村”的境界,从而使新思想、新理论能迅速诞生,这在科学史上是不乏生动的实例的。

(1) 开普勒观地测天

开普勒(J. Kepler, 德国, 1571—1630)十分钟情于类比,他曾说:“我特别喜欢这些类比——我的最可靠的老师,因为它们给我们揭开了自然界的各种秘密。”开普勒在发现行星运动三定律时,虽然主要依靠了对第谷测量数据的分析归纳,但类比确实给了他灵感和帮助。

“星学之王”
的遗愿

我们知道,哥白尼(W. Koppemigk, 波兰, 1473—1543)的太阳系模型的指导思想还是柏拉图(Plato, 古希腊, 前 417—前 347)的和谐运动,认为圆是最完美的曲线,因此在他的天体模型中,各个行星都沿着以

太阳为中心的同心圆绕太阳运动。

对哥白尼学说的实验,最早是由丹麦天文学家第谷·布拉赫(Tycho Brahe, 1546—1601)进行的。第谷有着惊人的机械操作能力和技巧,他对各行星位置的测定误差不大于0.067度,几乎达到了肉眼所能达到的极限,成为当时罕见的天文观察家,有“星学之王”的美称。第谷发现,哥白尼的圆周运动不符合对天体运动的实际观测。第谷死前,把他毕生的记录交给开普勒,希望开普勒继任他的工作,绘制一幅与他所记录的成千个数据相协调的行星运行表。

类比得
妙计

当时,开普勒面临的一大难题是用什么方法去测定行星(包括地球)运动的真实轨道,就如同观察者从“天外”看行星的运动一样?

开普勒经过苦心思索,后来从大地测量的类比中,思想豁然开朗,从地上“跃到”天上,终于想出了一条“动中取静”的妙计。

在大地测量中,常需要先确定连结两定点的一条基线,再分别测出目标与基线间的夹角就可测出目标的位置(图20)。

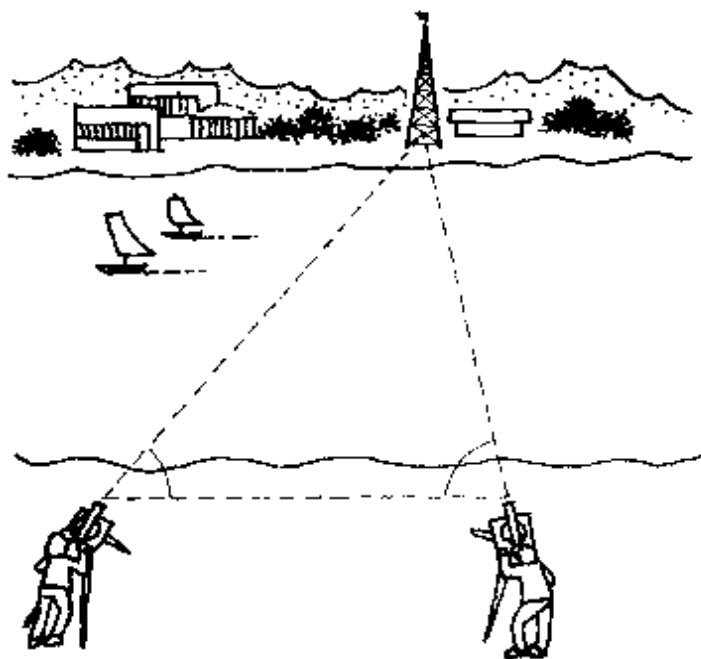
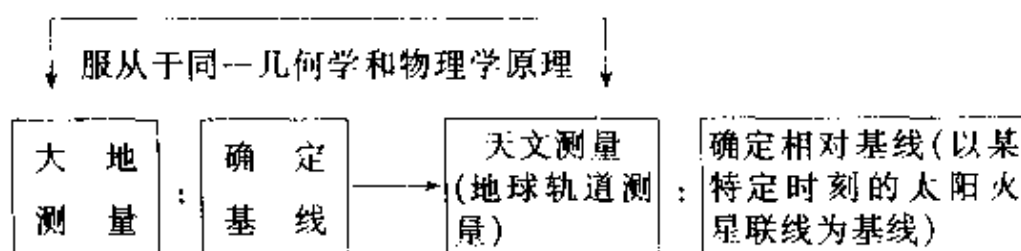


图 20 先确定基线就可测出目标距离

开普勒想到,要测定地球(在其轨道上)与太阳的距离,同样要以某一恒星作为定点,以便与太阳构成基线.不过开普勒并没有去找这样的恒星,他根据当时已精确测定的火星绕太阳运行的周期(一个“火星年”),利用同时对太阳和火星进行观测的办法来确定地球的位置.*这样,开普勒就构成了一个从大地测量到天文测量的类比推理:



开普勒通过对火星轨道的大量研究,发现日心体系预报的位置与观测位置相差8'之多.于是他就大胆摒弃束缚人们头脑两千年之久的天体做匀速圆周运动的旧观念,尝试着用别的几何曲线去表示所观测到的火星轨道.他曾经改用一种一头大一头小的卵形轨道计算,但还是不够理想.在卡约里所著《物理学史》中指出:开普勒“在尝试了19种想象的路径并由于或多或少跟观测不一致而又都否定了它们之后,……才发现真实的轨迹,它是一种椭圆”.

开普勒通过大量的计算分析,确认火星的轨道呈椭圆形,太阳位于椭圆的一个焦点上,而且火星在轨道上的运动速度也不是均匀的.于1609年,他发表了关于行星运动的两条定律(即轨道定律和面积定律).后来于1619年又发表了行星运动第三定律(即周期定律).

开普勒的成功是第谷的精确观察与开普勒的深入研究相结合

* 参见本丛书《模型》一册.

的结果.在这个发现过程中,几何图形的类比激发了他的想象力,起着十分重要的作用.

(2) 麦克斯韦智论力线*

法拉第力线 法拉第(M. Faraday, 英国, 1791—1867)在研究电磁现象的过程中,凭借他高超的实验技巧和丰富的想象力,提出了非常深刻的“力线”和“场”的物理思想.他设想,在带电体、磁体和电流周围的空间都存在着某种连续介质,起着传递电力和磁力的媒介作用.他把它们称为“电场”和“磁场”.这是物理学中第一次提出的“场”的概念.法拉第类比于流体场,对电场和磁场的物理图景作了直观的描述.他提出,场是由力线组成的,许多力线组成一个力管,就像流体中许多流线组成一个流管一样.力线将相反的电荷和磁极联系起来,力线上任一点的切线方向就是该点的场强方向,力线的疏密程度表示不同点场强的大小(图 21).

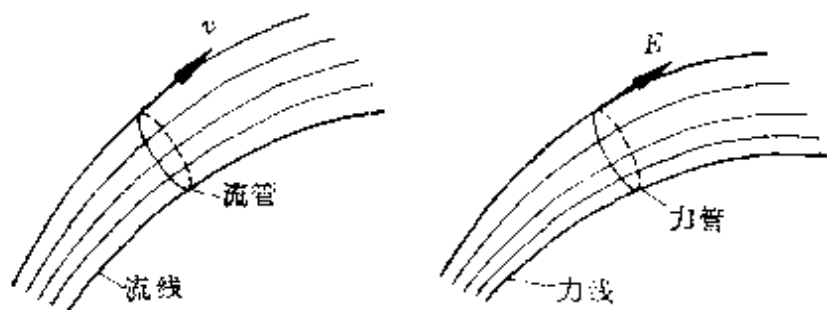


图 21 法拉第力线与力管

法拉第认为力线有物理实在的性质.他还在一张纸上撒上铁屑,用磁棒在其下面轻轻振动,铁屑形成规则的曲线表示力线的实在性(图 22).

但由于数学水平的限制,法拉第无法把他从类比引发的丰富的想象提高到定量理论.

* 电场和磁场中的力线现分别称电场线、磁感线.

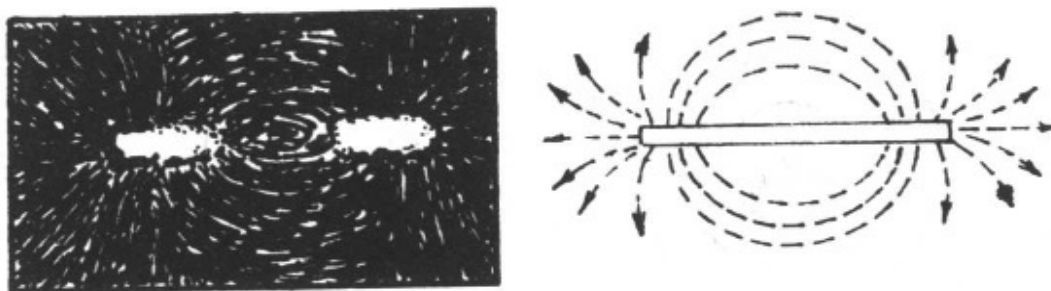


图 22 条形磁铁的磁感线分布

流体场的
类比

麦克斯韦深刻地洞察出法拉第的天才思想,以法拉第的力线作为研究的起点,借助他杰出的数学才能和得益于类比的丰富的想象,把法拉第的思想升华到新的高度,最终完成了电磁场理论.

1855—1856年,麦克斯韦提出了关于电磁学的第一篇重要论文——《论法拉第的力线》.他也以不可压缩流体稳定流动中的流线类比于电场和磁场中的力线,而把对流体场研究中的某些数学结果推广到电场和磁场中去.

均匀介质中离开一个流体源(可以是有质流体源或是无质流体的热源)为 r 处的压力(或温度)为

$$p(r) = \frac{kQ}{4\pi r},$$

式中 Q 表示单位时间内通过包围流体源的任意封闭曲面的总流量(或总热量), r 为某点到源的距离, k 是与介质有关的系数.麦克斯韦设想:在上述流体情况下,如果流体源是一点,以它为圆心作同心圆,那么在同一球面上各点的压力是相等的,这样的球面便为等压面.在静电的情况下,这些球面便是等势面(图 23).

麦克斯韦从这个类比中发现电场与流体力场的相似性,从而把有关流体力场的数学结论推广到电场中去.麦克斯韦说:“在电学中势对于电、在流体力学中压力对于流体和在热力学中温度对

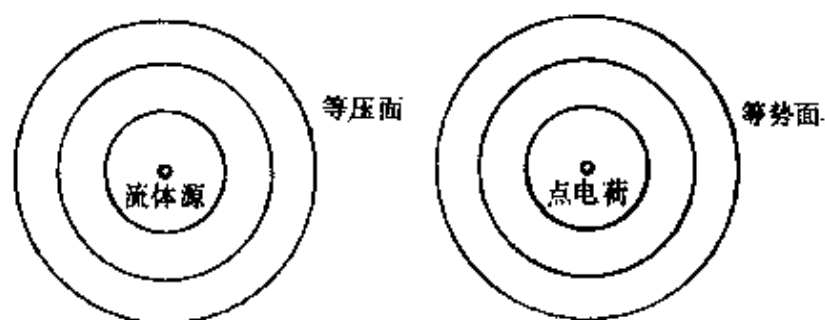


图 23 等压面与等势面

于热,有着共同的关系.电、液体和热全都趋向于由一个地方流到另一个地方,只要势、压力或温度在第一个地方高于第二个地方,这种情况就能发生。”

麦克斯韦的这个类比,我们可以把它表示如下表.

流 体 场	电 场
流体场中流体总是从压力高处流向压力低处	电场中正电荷总是从高电势处移向低电势处
流体场中的流线	电场中的电场线
流体场中的压强 P	电场中的电势 U
均匀无限大介质中,距流体源 r 处的任一点流体的压强	真空中距点电荷 r 处的任一点的电势
$P(r) = \frac{kQ}{4\pi r}$	$U(r) = \frac{kQ}{4\pi r}$
(Q 为单位时间通过包围流体源的任意曲面的总流量, k 为系数)	(Q 为点电荷源的电量,可以看成“电通量”,相当于电场线的总量, k 为系数)

对照这样的类比,根据场强和电势间的关系式,就可推出真空中点电荷场强的表达式

$$E = \frac{kQ}{4\pi r^2} *$$

* 现行中学物理课本中真空中点电荷场强公式为 $E = k \frac{Q}{r^2}$ (对应的点电荷电势公式为 $U = k \frac{Q}{r}$), 两者的系数 k 取值不同.

如果令 $D = \frac{Q}{4\pi r^2}$ 表示通过球面上单位面积的“电通量”，即相当于通过球面上单位面积的电场线条数(图 24)，于是就得到一个一般公式

$$E = kD.$$

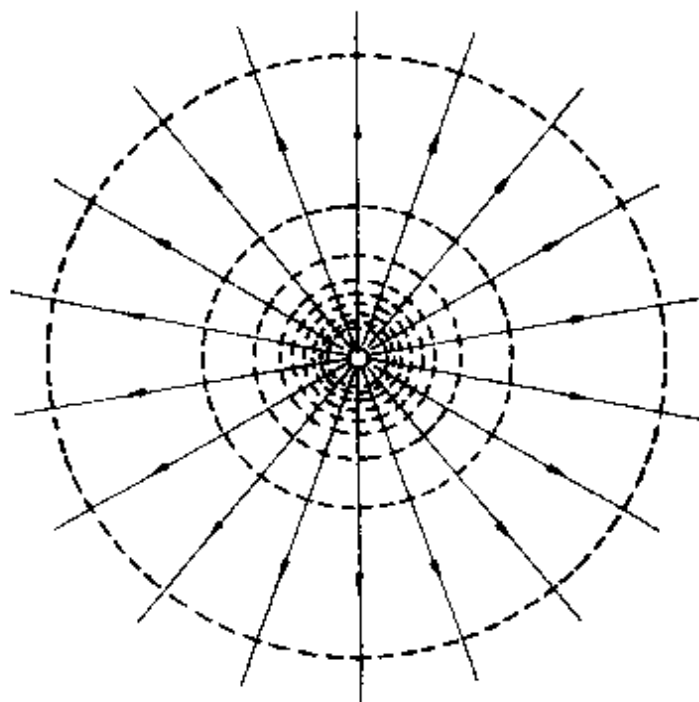


图 24 通过单位面积的电场线

这也就是说，在电场中各处的电场强度跟通过该处单位面积上的电场线条数成正比。这样，麦克斯韦通过与流体场的类比，就赋予法拉第的力线以实在的物理含义。麦克斯韦说：“我企图把一个空间画力线的清楚概念摆在一个几何画家的面前，并利用一个流体的流线概念，说明如何画出这些力线来。”

接着，麦克斯韦又根据法拉第的“力管收缩趋势”，电场中的导体处于一种特殊的“电紧张状态”的设想，定义一个新的矢量函数来描述电磁场，并重新概括了当时已经发现的电磁学中的六条基本定律。

麦克斯韦的这篇论文用数学形式精确地表示了法拉第的力线图象.1860年,他带着这篇论文拜访已年近七旬的法拉第时,法拉第大为赞赏地说:“我惊讶地看到,这个主题居然处理得如此之好!”并热情地鼓励麦克斯韦继续探索.

一次
大综合

以后,麦克斯韦进一步通过电磁现象和力学的类比,提出一个关于力线的机械模型(电磁以太模型),将电和磁的量联系起来,又用拉格朗日(J. L. Lagrange, 法国,1736—1813)和哈密尔顿(W. R. Hamilton, 英国,1805—1865)创立的数学方法,类比流体力学方程,导出电磁场的波动方程,预言了电磁波的存在,并建立了光的电磁理论.麦克斯韦说:“这一速度(指推算出的电磁波速)与光速如此接近,看来我们有强烈的理由推断,光本身(包括辐射热以及其他辐射,如果有的话)乃是以波的形式在电磁场中按电磁规律传播的一种电磁振动.”麦克斯韦以他杰出的数理才能,将电磁理论一度推到了顶峰,把原来互相独立的电学、磁学和光学三个部分结合起来,实现了19世纪中叶物理学上的一次重大综合.无怪乎人们评论麦克斯韦一生功绩时说:“他的名字将永远闪烁在经典电磁理论的大门之上.”

当然,人们同样也不会忘记,类比曾怎样地拓宽了麦克斯韦的思路,使他从流体力学跃上电动力学的新台阶.麦克斯韦说:“我认为依靠物理的类比,一门科学的规律与另一门科学的规律之间的部分类似,将使我们能从这两门学科中的一门科学来说明另外的一门科学.”麦克斯韦类比的成功,充分说明了这个论断的正确.

(3) 弗利胥巧比液滴

费米的
超铀元素

1934年,意大利著名物理学家费米(E. Fermi, 1901—1954)领导他的实验小组,在短短几个月内,用中子轰击了63种元素,得到了37种放射性同位

素,轰击的结果都像他们所预料的一样:许多元素的原子核吸收一个中子后,失去稳定状态,放出 β 射线,变成周期中下一个位置的元素的原子核(即原子序数增加一个单位).但当他们用中子轰击当时地球上最重的第92号元素铀时,却出现了麻烦,它产生的放射性元素不是一种,其中有一种是半衰期为13分钟的产物.后来通过实验证明了这种半衰期为15分钟的放射性产物,不是铀的同位素,不是第90号元素钍和第91号元素镤,也不是第89号元素锕和第88号元素镭,又排除了铋(第83号元素)和铅(第82号元素)的可能性.虽然费米本人很谨慎,在实验报告中仅以“如果它是93号元素”的假设提出的,但当时罗马大学物理研究所所长柯比诺(O. M. Corbino)却认为费米太谨慎了.同年6月4日,柯比诺在意大利林赛科学院会议上当众宣称:“根据我天天都在注意着的这些研究的进展,我以为我可以作出结论说,这一元素的制成已经得到了确切的肯定.”其后,德国柏林大学化学研究所的著名核化学家哈恩(O. Hahn, 1879—1968)和他的亲密合作者、奥地利女物理学家梅特纳(L. Meitner, 1878—1968)也立即开展了研究,并得出了更精确的结果.到1937年,他俩已从铀的产物得到一个互相衔接的放射系.不过,他们也认为这些成分都是超铀元素(即原子序数大于92的元素).

诺达克夫人 的 质 疑

在这一片超铀元素的欢呼声中,一位德国女化学家依达·诺达克夫人(Ida Noddack, 1896—)提出了质疑.她认为超铀元素之说法不能成立,费米的证明方法不确切也不完善,特别是没有和周期表中其他的元素比较,只是限于铅以上的元素,不足以判定第93号元素的生成.并且首次提出了重核俘获中子后可能分裂成几个大的碎片的观点.遗憾的是她的论点不仅没有使包括费米在内的物理学家们认

真考虑,还遭到哈恩的反驳,认为“纯粹是谬误”。这里的主要原因是诺达克夫人只不过作了某种猜测,没有在实验上作进一步的探究.而这种核分裂的假设,似乎又违背常理——原子核是何等的坚固,一个小小的中子仅能提供 6MeV ($1\text{MeV} = 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}$ 焦) 的能量,怎么会有如此巨大的力量把核击碎? 正如一个飞进窗户的足球,居然把房子撞倒一样不可思议.由于条件不成熟,事实不充分,诺达克夫人的这一创见还无法解开物理学家头脑中旧观念的束缚.

一个霹雳
惊呆哈恩

1938年,居里夫人的女婿和女儿约里奥·居里(J. F. Joliot, 法国, 1900—1958)和伊丽芙·居里(I. Curie, 法国, 1897—1956)跟他们的合作者萨维奇(Savitch, 南斯拉夫)用慢中子照射铀盐时,分离出一种半衰期为3.5小时的成分,且总是伴随着原子序数只有57的镧在一起.于是他们改变了原来支持费米的“超铀元素”的观点,认为把这种放射性物质归于超铀元素或放置在铀附近的其他位置,“会导致化学性质相当奇特的不规律性”.但他们对这种半衰期为3.5小时的放射性物质究竟从何而来还没有考虑成熟,没有作出明确的结论.由于这一决断上的迟疑,使他们第三次失去了一个重大发现的机会*.

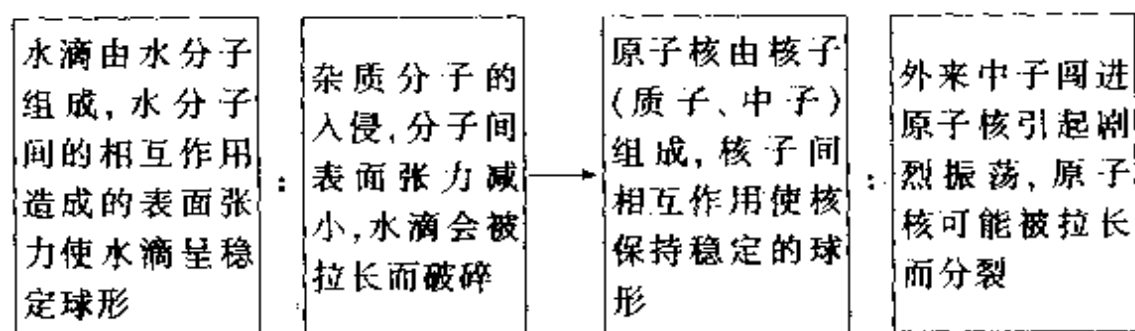
哈恩原来对约里奥·居里夫妇的论文并不重视,但这次发现却引起了哈恩后来的助手施特拉斯曼(F. Strassmann)的重视,他意识到居里的实验揭示了核反应的一个新问题,连忙去告诉哈恩.开始时哈恩还漫不经心地大声喊道:“这不可能,居里和萨维奇一定是搞混了.”但当他听完这一内容后,如同晴天霹雳,一下子把哈恩惊

* 约里奥·居里夫妇失去的前两次重大发现的机会,指的是中子的发现和正电子的发现.

呆了。据说哈恩竟连一支雪茄都顾不上吸完就跑到实验室中去了。紧接的几天，他紧张得连吃饭都不出实验室地干起来。在事实面前，哈恩终于放弃了自己的看法，立即按约里奥·居里夫妇的方法进行实验。经过几星期精细的化学分离实验，哈恩小组在铀的生成物中又找到一种化学性质与原子序数为 56 的钡相近的放射性物质。哈恩他们也感到难以理解。一方面，作为化学家，他们对核反应的分离物的性质深信不疑；但另一方面，从原来的物理观点来看，似乎又不可能，用中子轰击铀元素怎么会产生位于周期表中间位置上的某种元素呢？不过哈恩已开始放弃产生超铀元素的观点而倾向于诺达克夫人的看法。

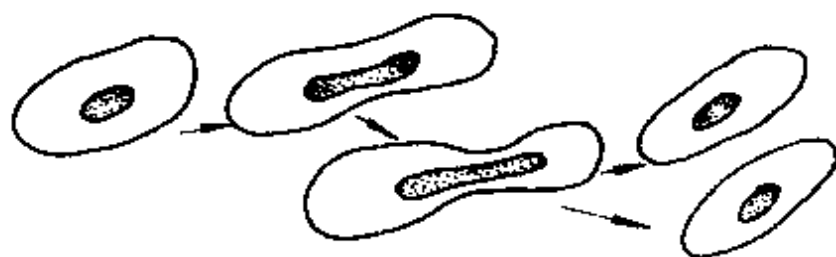
弗利胥的类比 出于对科学事业的共同信念，哈恩把他们的实验结果写信告诉迈特纳。此时她因躲避法西斯对犹太人的迫害而移居瑞典。迈特纳的外甥、物理学家弗利胥 (O. R. Frisch, 1904—) 正好也受迈特纳的邀请到瑞典度假。于是，在 1938 年底，他们两人展开了热烈的讨论。

在思考中，弗利胥受到两年前玻尔 (N. Bohr, 丹麦, 1885—1962) 在原子核研究中提出的“液滴模型”的启发，把原子核想象成水滴，并从水滴的破裂想象铀核的分裂。这个类比关系可表示如下：

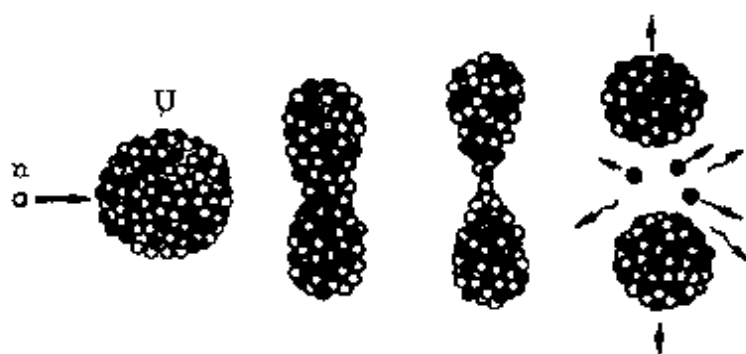


弗利胥把原子核受外来中子轰击可能会分裂的情况又类比于细胞的分裂——细胞的无丝分裂是细胞核先延长，从核的中部向内凹进，缢裂成两个细胞核，接着整个细胞从中部缢裂成两部分，

变成两个子细胞(图 25).



(a)细胞的无丝分裂



(b)原子核的分裂

图 25

迈特纳非常赞赏弗利胥的这一类比想法,他们立即对裂变时释放的能量作了初步计算.迈特纳根据铀核分裂前后的质量差和爱因斯坦质能方程算出释放的能量约为 200MeV,弗利胥根据液滴模型静电斥力计算的能量变化也等于 200MeV,两者符合得极好.

假期以后,弗利胥回到哥本哈根,把哈恩的化学结论和自己与迈特纳的看法告诉玻尔.玻尔听了以后,用手敲打自己的前额惊呼:“啊!我们好笨,我们以前就应该看到这一点的!”接着,弗利胥立即进行实验验证.他不仅用铀,而且用钍进行核反应,都得到相同的结果.

1939年1月16日,以迈特纳和弗利胥两人名义合写的论文《在中子轰击下重核分裂的物理证据》在英国《自然》杂志发表.他们

根据与细胞分裂的类比,把这一现象称为裂变.弗利胥说:“……原始的铀核逐渐变形,中间变窄,最后分成两半.这种情况与细菌繁殖的分裂过程非常相似,使我们有理由把这种现象在自己的第一篇公报中称为核分裂.”

同年1月26日,玻尔在华盛顿的第5届理论物理讨论会上宣布了重核裂变的消息,与会代表群情激奋,一下子把会议主题从原来对低温物理的讨论转到核物理上,好几位物理学家立即给自己的实验室打电话安排实验,当时,几个实验室和大学都得到了同样的结果.重核裂变的发现在几小时内就得到世界的公认.

**打开核能
大门的人** 重核裂变的发现是具有划时代意义的大事.因为它打开了原子核能量宝库的大门,为人类开辟了一种巨大的新的能源.哈恩也因这一重大发现荣获1944年度诺贝尔化学奖.

一年以后,1942年12月2日下午3时35分,在费米主持下的原子能反应堆开始正常运转,首次揭开了利用原子核能的篇章.至今在美丽的芝加哥大学的校园里,还可以看到挂着一块镂花金属牌子,上面写道:“1942年12月2日,人类在此实现了第一次自持链式反应,从而开始了受控的核能释放.”

值得一提的是,在重核裂变的研究中,早年在巴黎居里实验室工作的中国学者钱三强与何泽慧夫妇首先在实验中发现铀核三分裂和四分裂现象,对阐明铀核裂变机理有着极为重要的意义.

3. 类比可导致技术上的发明创造

据说,中国春秋战国时的工匠鲁班,有一次去山上伐木,被路边的茅草拉破了手指.鲁班从茅草边缘上长着的又密又锋利的细齿中得到启发,把铁也打成边缘上有细齿的铁条,从而发明了锯.

这个传说中所包含的思维方法就是类比：

茅草边缘的细齿 → 铁条边缘的细齿

从类比中得到启发导致技术上发明创造成功的，有许多脍炙人口的生动事例。

(1) 欧拉的眼睛类比

在望远镜的研制发展过程中，有一个很有趣的眼睛类比的故事。

偶然的发明 说起望远镜，似乎真是一个幸运的偶然事件引出的发明。1608年，荷兰米德堡的眼镜商汉斯·利佩希的学徒，有一次偶然地把一块近视镜片（凹透镜）和一块远视镜片（凸透镜）相隔一定距离重叠着观看眼前的景物，他惊喜地发现景物被大大地放大了。后来，利佩希就根据这个发现制成了望远镜，称为荷兰望远镜。次年，伽利略（G. Galilei，意大利，1564—1642）听到这个消息后，用一个半凸透镜和一个半凹透镜制成一架望远镜，并用它观测天象，发现了木星的卫星和月球表面的山和谷、观察到太阳的黑子等。把望远镜有效地应用于科学，应该归功于伽利略。人们常把荷兰望远镜称为伽利略望远镜。

伽利略用望远镜观测的成功，也促使许多科学家如开普勒、笛卡儿（R. Descartes，法国，1596—1650）、惠更斯、牛顿等都投入了研制工作。

避开缺陷 转向成功 当时的望远镜都是选用单个透镜，通过光的折射成像的，有不少缺陷。开普勒、笛卡儿和其他一些人都把其原因归咎于光通过透镜的球形表面折射。直到牛顿用三棱镜发现白光的色散现象后才作出正确的结论：折射望远镜的主要缺陷不是由于物镜的球面像差，而是物镜对光的色散造成的色差，使得形成的像带有彩色的边缘（称色像差）。牛顿认为，光的折射与色散是不可分割的，因此折射望远镜的这种缺陷

也是无法弥补的.于是他转向研制新型的望远镜.

1668年,牛顿制成了长约6英寸(1英寸=25.4毫米)、口径1英寸的第一架反射望远镜(图26).它由一块凹镜(抛物面镜)和一块全反射棱镜组成.从遥远物体发出的光经凹镜反射后,在聚焦前被棱镜反射,进入安装在望远镜筒旁边的目镜(图27).后来,他又制成了一架比较大的反射望远镜,献给英国皇家学会,至今还保存在皇家学会的



图 26 牛顿的小型反射望远镜

图书馆里.反射望远镜与折射望远镜相比具有制作容易、镜筒较短、能消除色差等许多优点.目前世界上最大的两台天文望远镜就是反射望远镜*.

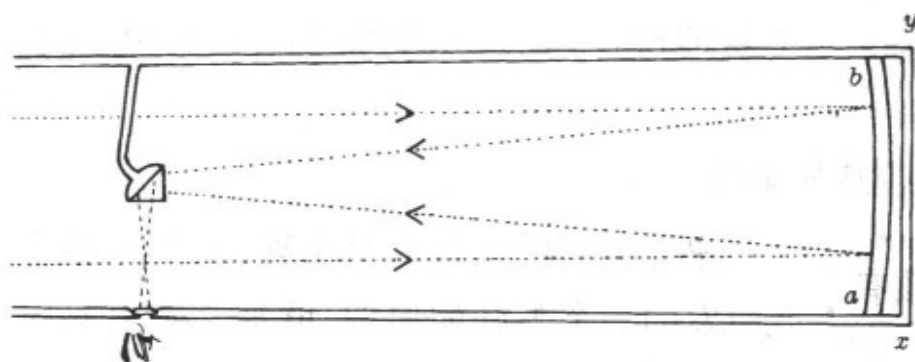
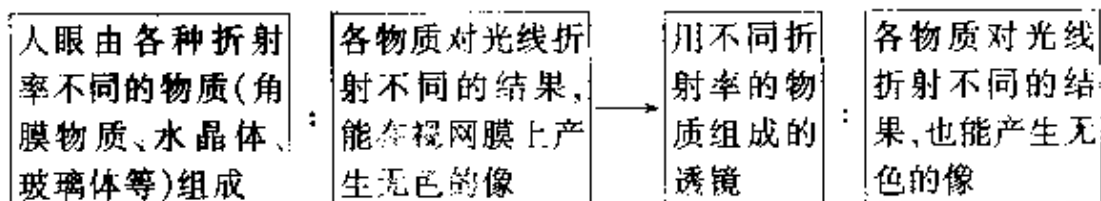


图 27 反射望远镜原理

* 即苏联高加索山上直径6米的反射望远镜和美国帕洛马山上直径5.08米的反射望远镜.

**克服缺陷
开辟新路**

牛顿的转向研究确实获得了成功.不过,牛顿关于折射望远镜的色像差不可救药的看法,未免过于武断和悲观.瑞士著名的数学家、力学家欧拉(L. Euler, 1707—1783)反对牛顿的观点,他根据人眼的视物功能,以眼睛作类比,认为可用不同材料组合起来制成无色差的透镜:



有趣的是,欧拉认为在人眼视网膜上产生的是无色的像,这个看法是错误的,但他从上述类比中推出的结论却十分幸运,是完全正确的,也是可以办到的.后来,英国光学家约翰·杜隆特沿着欧拉的方向进行了大量的研究,于1758年用一块冕牌玻璃制的凸透镜和一块燧石玻璃做的凹透镜组合起来,终于制成了消失差透镜,有效地避免了色散.

杜隆特从欧拉眼睛类比的启发中获得的成功,使得望远镜的研制进入了一个新的阶段,也为光学镜头的发展开辟了一条新路*.

(2) 赖特兄弟的飞鸟类比

**人应该有
翅膀**

像飞鸟一样在蓝天自由翱翔,是人类自古以来就萌发的一个美好的愿望.欧洲文艺复兴时期多才多艺的天才列奥那多·达·芬奇(L. da Vinci, 1452—1519)曾发出豪迈的喊声:“人应该有翅膀.假如我们这一代人不能

* 眼睛类比在现代光学技术中依然有很重要的意义.如根据眼睛依靠改变焦距看清远近不同物体的调节原理,制成变焦距镜头;根据鱼眼的视物原理制成鱼眼镜头等.

达到愿望,我们的后代是会达到它的。”

为了实现升空的愿望,人们曾经付出了巨大的劳动,设计过许多方案,都因一系列技术问题难以解决,升空依然是一个愿望,于是人们开始尝试“利用比空气还轻的运输工具”——气球.1783年10月15日,法国历史学家罗杰(P. de Rozier)乘坐热气球升空85英尺,成为第一个飞上天的人.

从19世纪初起,开始了“有翼飞行器”的设计制造.人们曾设计出装有推进器和旋转翼的“空中飞车”、“空中蒸汽车”等,但都没有飞行成功.从19世纪末起又开始了滑翔机的制造和试验.由于飞行中的稳定性问题解决不好,德国著名滑翔机专家李林塔耳(O. Lilienthal, 1848—1896)还因此于1896年的一次试验中献出了生命.

从达·芬奇明确提出目标到19世纪末,历时几百年,人们还是无法给自己插上翅膀.

人终于
有了翅膀

最先把达·芬奇的愿望变为现实的是美国的维尔伯·赖特(Wilbur Wright, 1867—1912)和奥维尔·赖特(Orville Wright, 1871—?)兄弟俩.

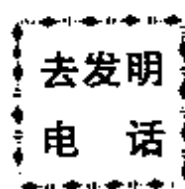
据说,赖特兄弟自幼对飞行就怀有浓厚兴趣,青少年时期仿制过“竹蜻蜓”*.后来他们深受李林塔耳滑翔机飞行中失事的影响,决心研制动力飞行器.兄弟俩刻苦钻研李林塔耳的著作,并牢记他的话:“谁要飞行,谁就得模仿鸟.”通过仔细观察各种鸟的起飞、升降、盘旋等各种动作,他们取得了重要的发现——鸟类每当转弯的时候,往往用翼尖、翼边转动和扭动,从而保持它们身体的平衡.赖特兄弟就把这一原理运用到飞机设计上:

* 竹蜻蜓是中国古代一种飞行器.大约18世纪时传入美国,被称为“中国陀螺”



从类比推理得来的这个设计思想,使赖特兄弟突破了保持飞行器与空气间适度平衡的秘密,解决了一个关键性的问题,终于制成了第一架飞机。这是一架双翼机,翼长 12.3 米、机翼面积 47.4 米²,机身长 6.5 米,安装两部螺旋桨,发动机功率为 12 马力。1903 年 12 月 17 日,赖特兄弟驾驶这架自己设计制造的飞机,在北卡罗莱纳州凯蒂·哈克的沙滩上进行了四次飞行。第一次由奥维尔驾驶,飞行 36 米,在空中停留 12 秒。最后一次由维尔伯驾驶,飞行 260 米,在空中停留 59 秒。尽管这几次飞行都没有超过 1 分钟,但却是航空史上一次划时代的飞行,它庄严地宣告了:人们已有办法为自己插上翅膀,可以像飞鸟一样在蓝天翱翔!

(3) 留声机、人耳、吉他——贝尔的三次类比



在美国波士顿法院路 109 号楼门上,钉着一块青铜牌子,上写一行醒目的金字:“1875 年 6 月 2 日,电话在这里诞生。”这就是发明家贝尔进行电话机试验并取得成功的地方。

自从 1837 年美国画家塞缪尔·莫尔斯(S. F. B. Morse, 1791—1872)用点、横同空白的组合表示字母和数字的编码(图 28),并据此编码发明了第一台实用电报机后,经过几年的坎坷奔走,终于在 1844 年 5 月 24 日,莫尔斯发出了人类历史上第一份电报:“上帝创造了何等的奇迹。”从而开创了通讯史上光辉的一页。以后,在不到 20 年的时间内,电报就在世界上流行起来,电报通讯技术也得到了迅速的发展,成为一种迅速有效的通讯工具。

不过,电报终究有着很大的局限性,它只能传送简单的信号,

还需要译码,不太方便.能否用电直接传送人的语言呢?从社会需要诞生的这样一个大胆而又美妙的思想火花,激励着一个勇敢的青年人,他毅然踏上了“去发明电话”的艰难征途.这位青年就是美籍苏格兰发明家亚历山大·格雷厄姆·贝尔(A. G. Bell, 1847—1922).

贝尔出生在一个语言世家.他的祖父具有演说家的才能,曾为无声电影配音解说.他的父亲从事聋哑人的语言教育,对人的发声机制、听觉特点有深入的研究.贝尔在爱丁堡大学读书时,也系统地学习过人的语言分析、发声机理和声振动等专门知识,后来迁居美国,在22岁时受聘为波士顿大学语言学教授.

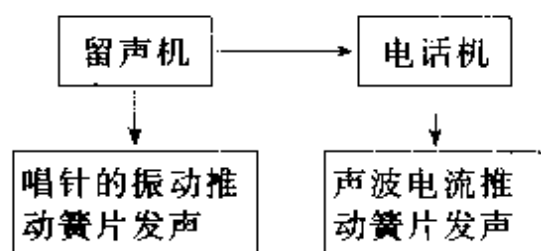
贝尔开始只是想为聋哑人研究一种“可视语言”.他设想,在纸上复制出人的语言声波的振动曲线,使聋哑人从波形曲线中看出“话”来.由于这种曲线不易识别,贝尔的这个设想失败了,不过在实验时他意外地发现了一个有趣的现象.当电路接通和切断时,螺旋纸圈会发出“咯、咯”声.因为贝尔也一直在思考着用电直接传递语言的问题,这个现象使他立即联想到:要传送人的声音,必须创造出一种能随语言的音调而振动的连续电流.换句话说,必须以电波来代替我们面对面谈话时传送声音的“空气波”.从此,这个念头一直萦绕在贝尔的脑海里.

莫尔斯电码	英文字母
·—	A
—··	B
—·—·	C
—···	D
·	E
··—·	F
—·—·	G
····	H
··	I
—·—·	J
—·—·	K
··—·	L
—·—·	M
—·	N
—·—·	O
··—·	P
—·—·	Q
·—·	R
···	S
—	T
··—·	U
····	V
·—·—	W
—·—·	X
—·—·	Y
—···	Z

图 28 莫尔斯电码

留声机
类比

一次,贝尔正在欣赏留声机播放的音乐时,突然意识到,这留声机不正是一种电声转换装置吗?于是,贝尔仔细地研究了留声机的构造原理.后来终于发现,各种声波所具有的力可以同时加到一个簧片上,由于簧片的振动,还原成各种声音重新播放出来,就像我们直接听到原来的各种声音一样.于是,贝尔根据留声机的发声原理,第一次运用类比方法,在他的脑海中形成了电话机的最初构思:



贝尔兴致勃勃地把自己的想法告诉电学界的几个人.不料,迎来的却是冷漠和讥笑.一位学者好心地劝他:“你所以产生这种幻想,是因为缺少电学常识,你只要多读两本《电学入门》,导线传送声波的妄想自然就会消失了.”有一位颇有名气的电报技师竟然恶语伤人:“电线怎能传送声音,岂非天大的笑话!正常人的胆囊是附在肝脏上的,而你贝尔的身体却长在胆囊里,实在少见!”

面对这些冷嘲热讽,贝尔并不退却,他专程到华盛顿,请教当时的大物理学家约瑟夫·亨利(Joseph Henry,美国,1799—1878).

亨利说:
掌握它

1873年3月的一天,73岁的老物理学家亨利很热情地接待这位远方来客.贝尔对亨利讲完自己的想法后,很紧张地问道:“先生,您看我该怎么办呢?是发表我的设想,让别人去干,还是我自己努力去实现呢?”亨利慈祥地回答说:“你有一个了不起的理想,贝尔,干吧!”

贝尔又忐忑不安地说:“可是,先生,我在制作方面还有很多困

难,而更困难的是我不懂电学。”

亨利斩钉截铁地回答说:“掌握它!”

这次见面,贝尔从亨利那里得到极大的鼓励.很多年以后,贝尔回忆道:“没有这三个令人鼓舞的大字,我肯定是发明不了电话的。”

贝尔回到波士顿,开始潜心攻读电学书籍.从1873年初夏起,他毅然辞去波士顿大学语言学教授的职务,以一个才18岁的青年电工技师托马斯·沃特森为助手,全身心地投入到电话的发明中去,他们一次次地试验了各种方案.

人耳类比 为了使簧片振动传播声音,贝尔想到了人的耳朵.于是,他从一个朋友那里弄来了一个完整的人耳标本(图29).

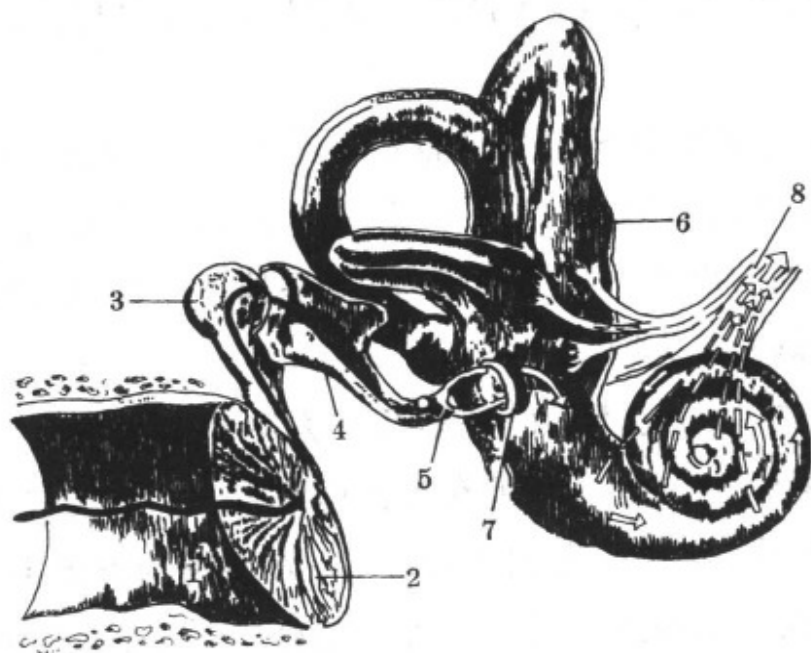
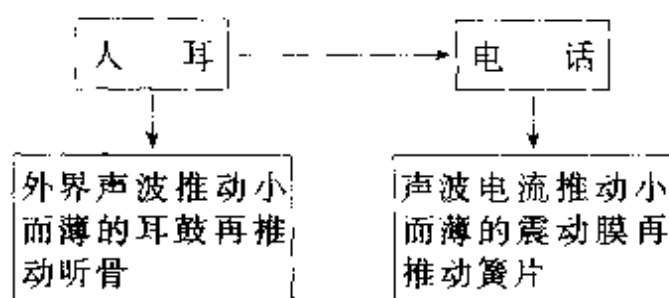


图 29 人耳的构造

通过研究,贝尔了解到:人耳所以能听到声音,首先是外界的声波使耳内小而薄的鼓膜(2)振动,然后鼓膜再推动比较大的耳朵听骨而产生听觉.这样,贝尔就第二次依靠类比打开了发明的思

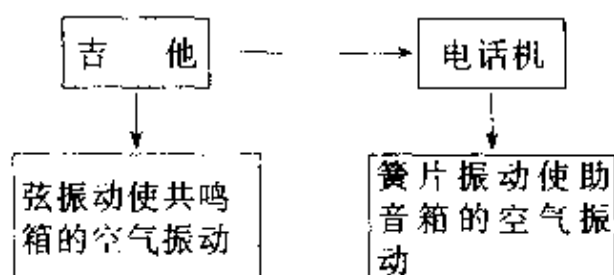
路：用一张小而薄的震动膜去推动簧片。



根据这个类比的构思，贝尔立即和助手沃特森一起做了两台粗糙的样机：他们在一个圆筒底部张一薄膜，薄膜中央垂直连接一碳杆，插入硫酸溶液里，人讲话时薄膜振动，碳杆与硫酸接触处的电阻发生变化，电流随之有强有弱。他们将送话器端的线圈与受话器端同一装置的线圈连接起来，这样，在受话器中电流的强弱变化引起磁场的变化，使受话器的簧片随之振动，发出与送话频率相同的声音。

贝尔把这两台样机分别放置在相距 20 多米的两个房间里，用 电线连起来进行通话试验。结果，尽管他们拼命叫喊，簧片也振动了，可是听到的声音不是穿墙而来，就是越顶而过，电话机里毫无反应。这次试验又失败了。

吉他类比 记不清已是第几个方案和多少次失败了，可贝尔仍未灰心。他在苦苦思索着。一天，天气十分闷热，已紧张工作了一天的贝尔打开窗子，一阵悠扬的吉他声从远方传了过来。正在冥思苦想中的贝尔豁然醒悟：单凭吉他弦的振动，只能发出微弱的声音，由于吉他有个共鸣箱，才使声音能传得很远很远。联想到他们的送话器和受话器，簧片的振动太微弱，难以把它的振动传播出去，也必须加装一个共鸣箱装置，贝尔第三次从类比中得到启发：



贝尔想到这里,神情振奋,他立即设计了一个助音箱,两人连夜赶制,同时又改装了机器。

第二天,他们在相隔百米的两个房间里进行新的试验。这时贝尔在把一部分器材放进硫酸里去的时候,不小心有一些硫酸溅到他的腿上,痛得他直叫喊:“沃特森先生,到这儿来,我需要你!”正在自己房间里等着试验的沃特森,突然听到从电话机中传来贝尔的呼叫声,惊喜万分,沃特森立即冲进贝尔的房间大声说:“听到了!听到了!”两个人热烈地拥抱在一起,此时贝尔完全忘记了腿部的疼痛。

历史记下了这难忘的时刻:1875年6月2日傍晚,世界上第一台电话机诞生了,它传递的第一句话竟是呼救声!

当天晚上,贝尔怀着激动的心情给妈妈写信:“今天对我来说,是个重大的日子,我们的理想终于实现了!我觉得,就像把自来水和煤气送到各家一样,把电话安到用户那里的日子就要来到,朋友们不用离开家就可以互相交谈啦!”

后来,贝尔对样机作了改进,经过半年的努力,制造了世界上第一台实用的电话机。

1876年2月14日,贝尔获得了电话机的发明专利。随后,电话业有了飞速的发展,电话新技术不断涌现,无线电话、数字电话、记录电话、可视电话等新颖电话机琳琅满目,电子计算技术的发展,还将为电话事业的发展开辟更广阔的前景。

如今,当年贝尔电话机的原型仍珍藏在华盛顿历史与技术博物馆里.人们将永远记住贝尔发明电话的伟大功绩,也将继续从贝尔发明电话的三次类比中得到启发.

4. 类比为模拟实验提供逻辑基础

风洞试验 在飞机的设计制造中,人们常先按比例制作一个飞机模型,把它放在一种能产生可控气流的特殊装置——风洞中,根据运动的相对性原理,当风洞产生的高速气流吹向静止的飞机时,就像空气不动、飞机在高速飞行时一样.利用风洞就可以在地面上研究飞机或其他飞行器在空气中运动时的各种效应及所受的阻力等.

图 30 是高速风洞中用来产生超声速气流的“超声速管”(称为拉瓦尔管)示意图.从前级送来的稳定的亚声速气流在喷管的收缩段被加速而在喉管处达到声速,在扩散管处气流因压强骤降、流速猛增而达到超声速.目前高速风洞的气流速度可达到声速的 5 倍.

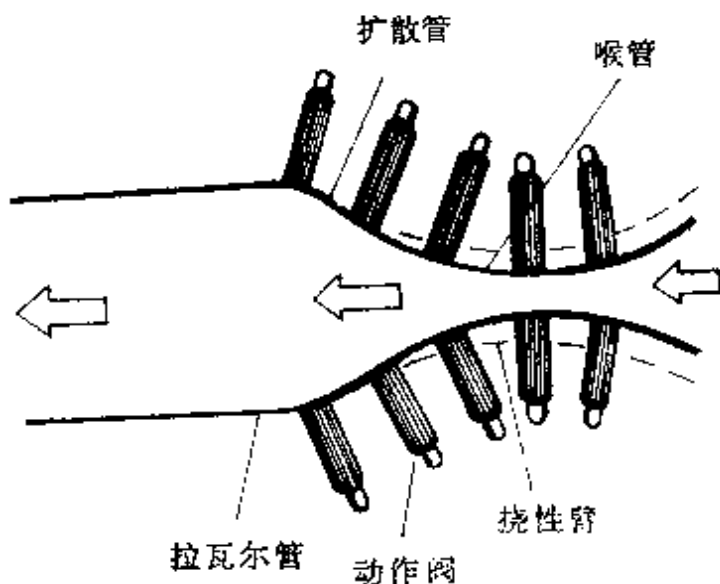


图 30 拉瓦尔管示意图

悬置于风洞中的飞机通常做 3 种力和 3 种力矩的试验,即机翼升力、气流阻力、水平侧向力及沿垂直轴转动的偏航力矩、沿横向轴转动的仰俯力矩及沿纵向轴转动的滚转力矩(图 31)。

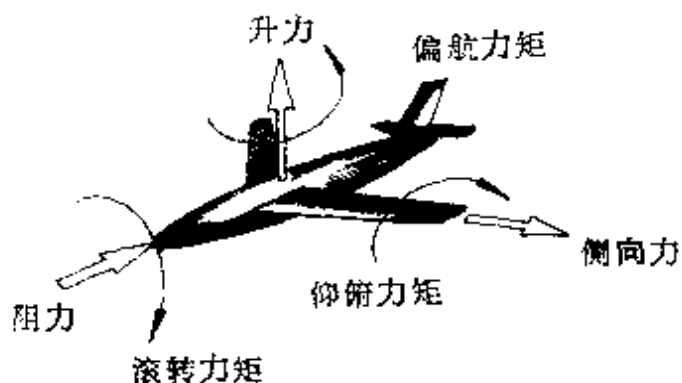
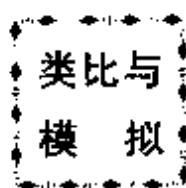


图 31 风洞试验的测试目标

风洞试验在飞机、导弹、宇宙飞船、航天飞机等设计制造中,起着极为重要的作用.例如阿波罗登月飞船在制造中就曾做过低速、跨声速、超声速和高声速等各种风洞试验 6500 小时以上.70 年代以来的大型超声速客机需进行 4 万小时的风洞试验,航天飞机则需进行 10 万小时以上的风洞试验。

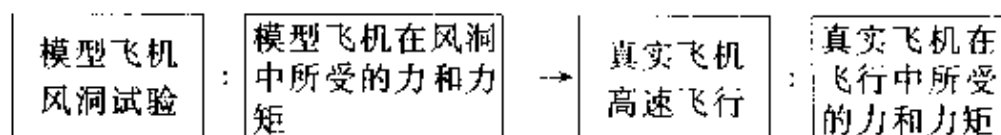
其他如高速赛车、高层房屋、大型水库的拦河坝建筑等,也常在设计制造中先按比例制作一个模型,然后在相似的条件下进行试验。

这种实验研究的方法称为模拟方法,其试验模型与原型之间只有大小比例上的不同,物理过程都是一样的,模型只不过是原型的精巧的放大或缩小,就像放、缩一张照片一样。



从表面来看,模拟是一种实验方法,类比是一种理论思维和推理方法,它们是不同的,但从类比和模拟的实质来看,这两种研究方法有着共同之处:类比是通过

两个或两类研究对象的属性、数学形式的比较,作出它们之间的相同或相似之点的结论;模拟则是以模型和原型之间的相似性,通过对模型和原型的类比,从而得出它们具有相同或相似的性质和规律的结论.如:



这就是说,模拟实验是以类比推理这种逻辑思维方法为理论根据的,而模拟方法则是类比方法的具体运用.

在模拟方法中,除了用实物模型做试验外,还有数学模拟.它是以模型和原型之间的数学形式的相似性为基础的实验方法.在任何两个物理过程中,只要它们所遵循的规律在数学方程上具有相同的形式,就可能用数学模拟的方法进行研究,这种数学模拟与模型类比已无明显界限.以力学中的弹簧振子和电学中的 LC 回路为例.

弹簧振子	LC 回路
振子偏离平衡位置具有一定弹性势能	电容经充电后具有一定电场能
$\left(E_p = \frac{1}{2} kx^2 \right)$	$\left(E_c = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \right)$
振动过程中弹性势能与动能不断转化	振荡过程中电场能与磁场能不断转化
振动周期	振荡周期
$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$	$T = 2\pi \sqrt{LC}$

如果我们把 LC 回路类比于弹簧振子,这样就可以用一个电磁系统(LC 回路)模拟一个力学系统(弹簧振子)进行研究.这种电模型(不是实物的放大或缩小)方法在技术上应用得也十分普遍.

例如,根据流体场与电流场数学方程上的相似,可以将所要研究的渗流场用一个与之相应的电流场代替.在实验室内用一套电路装置就可以模拟地下水的运动.它不仅作用显著,并可缩短研究时间.

控制论的创建者之一的阿希贝(Ashby)曾提出过两个系统.一个是机械式的系统,结构如图 32(上),输入是一根轴,它可以转到刻度盘上所指示的任何位置,输出是跟随旋转的另一根轴,其转动的度数可由刻度盘测得.另一个是电气系统,其结构如图 32(下),输入是电位计,它所产生的电压由刻度盘指针指示出来,输出是电流,其值表示在电流表的刻度盘上.如果调节第二个系统中的电感、电阻和电容的值,使其大小分别与第一系统中的弹簧刚度、飞轮惯性和液体阻力相对应,由于这两个系统有相似的数学形式,它们的功能相似,所以,可以用其中的一个系统去模拟另一个系统的

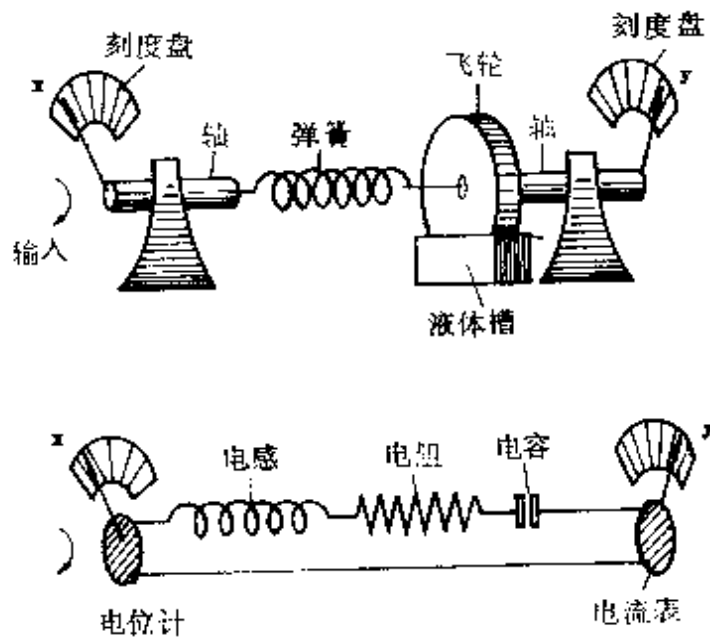


图 32 电学系统与力学系统

功能,用较容易控制和试验的电学系统替代力学系统,从而实现力学系统与电学系统间的转换。

现在,随着电子计算机技术的迅猛发展,人们通过类比推理的逻辑手段,可以将不同领域的问题所涉及的条件、因素抽象成数学语言,给出数学模型,数学模拟的发展已进入了一个崭新的阶段。

近年来,人们又把寻找新技术原理和方法的注意力转向生物界,人们应用生物系统的原理去研究技术系统,模仿生物的各种功能,设计出各种控制装置。

这种以机器和生物机体的功能和行为的相似性为基础,通过类比,建立模型来模拟原理的方法,称为功能模拟法。仿生学就是在功能模拟法上发展起来的,如目前已制成模拟动物嗅觉器官的“嗅觉仪”,它能嗅出氯仿等四十多种气体,还能发现鼻嗅无味的CO(煤气的主要含量),已开始用于煤气管、氢气管和冷冻机检漏;“人造鼻”还可帮助医生诊断病因,检验化学药品、预告食物的腐败、测定空气的污染、分析潜水艇和航天飞机里的气体;模拟蝙蝠的超声波定位器仿制成盲人用的“探路仪”;模拟鸡蛋设计出一种抗震房屋等。

功能模拟法对机器、动物或人等系统,都不考虑其内部物质、能量、元件、结构、效率等情况,而只考虑整个系统在功能上的等效性,这种方法打破了动物和机器的界线,把各种不同的系统沟通了起来。美国著名数学家、控制论的主要创立者维纳(N. Wiener, 1894—1964)称颂道:“把生命机体和机器作类比工作,可能是当代最伟大的贡献。”

三、实践是检验类比结论的试金石

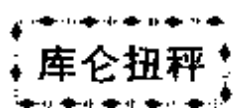
类比推理的客观条件是事物之间的同一性和差异性。同一性提供了类比的根据，而差异性则限制了类比的结论。类比推理的逻辑性是不充分的。第一，类比推理不是以对象属性之间的必然联系为前提的，而是以对象之间的某些相似属性为根据的，但是相似属性和推出属性之间不一定有必然的联系；第二，根据对象的相似属性推出的属性可能是它们的同一性，也可能是它们的差异性。

因此，从类比推理得来的结论都带有“或然性”的缺陷，即有的可能是对的，有的可能是错的，有的可靠程度大一些，有的可靠程度小一些。一般来说，相似属性与推出属性之间的相关程度高，结论的可靠性大，不相关，结论就错误。但不论类比结论的可靠程度如何，它们仅是指事物的某种关系或特性，并不是指事物本身。正如贝弗里奇(W. I. B. Beveridge, 澳大利亚 1908—)在《科学研究的艺术》一书中指出的：“类比是指事物关系之间的相似，而不是事物本身之间的相似。”日本物理学家汤川秀树以牛顿发现万有引力定律的过程所作的类比为例时也强调：“牛顿并没有将一个物体与另一个物体看作相同，而是认为在某一种情况下物体之间的关系与另一种情况下物体之间的关系是相同的。”

由于类比推理结论的这种先天性缺陷的限制，所以，类比结论的正确与否以及可靠程度如何，都不是由它自身来确定的，必须经

受实践的检验。

1. 库仑的扭秤实验和电摆实验



普利斯特利从与万有引力的类比中,得出电荷间的相互作用力服从距离的平方反比的假设,并没有作出实验证明.完成这个实验证明的是库仑。

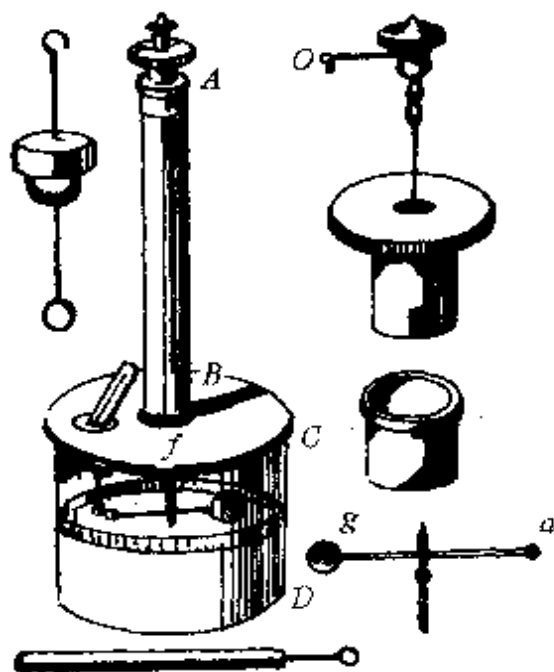


图 33 库仑扭秤

1785年,库仑用他自己所设计制作的一台精巧的扭秤,首先得出同种电荷间相斥的规律.实验装置如图 33 所示,在一个直径和高均为 12 英寸(1 英寸 = 25.4 毫米)的玻璃圆筒(C)上,盖一块直径为 13 英寸的玻璃板,板上有两个孔,其中一个孔在正中央,安有一根高 24 英寸的玻璃管,管的上端有一个扭转测微计,包括带指针的端部,边上分成 360° 的圆环和铜管等.端部中间有只夹子,

夹持一根细银丝,下挂一根浸过蜡的麦秆,秆的一端为小木球 a ,另一端贴一平衡纸片 g ,秆 ag 呈水平位置.在玻璃圆筒四周刻有 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的一圈分度.悬丝自由放松时,横杆上的小木球指零点.然后在旁边的孔中插入另一根杆,杆的下端固定着与 a 球同样的另一个带电小球,并使带电小球和小木球 a 接触再分开,这样使两个小球均带同种等量的电荷而相互排斥.库仑在实验中发现,当两球间的角距离为 36° 、 18° 、 9° 时悬丝对应的扭转角是 36° 、 144° 和约 575° .这就是说,电斥力的大小与距离(这里用角度即弧长代替距

离)的平方成反比。

库仑电摆 对于异种电荷相吸的规律,库仑根据与万有引力的类比巧妙地设计了一个电摆。如图 34 所示,用一个直径为 1 英尺的铜球模拟地球,铜球用四根浸过蜡的玻璃棒支撑以绝缘。用一根长 7~8 英寸的单根蚕丝悬挂一根用虫胶制成的细杆,杆端垂直地贴上一张极轻的圆形金箔纸。调节铜球高度,使球与杆在同一水平线上,相距几英寸。用莱顿瓶向铜球充电后,用一导体与金箔纸接触,金箔纸通过感应带上与铜球异号的电荷。然后使杆绕悬丝摆动,这个摆动可以认为完全是由铜球对箔片的引力所产生的。库仑的实验记录如下:

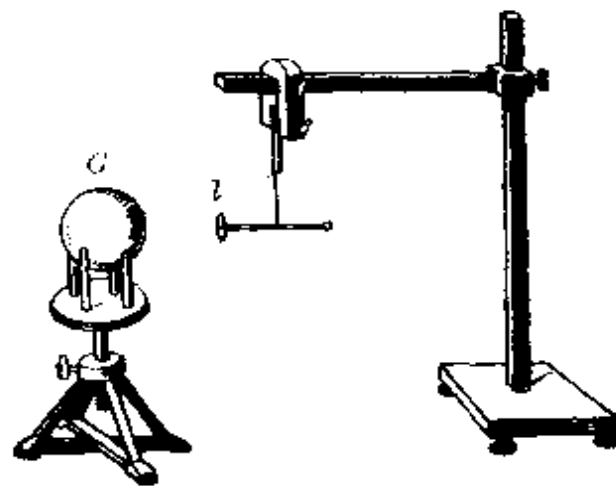


图 34 库仑电摆

实验序号	箔片与铜球球心的距离(英寸)	振动 15 次所需的时间(秒)
1	9	20
2	18	41
3	24	60

由前面的分析知,如果引力符合平方反比关系,周期之比应为20:40:54.库仑通过多次实验确定实验与理论值之间的差异是由于漏电所致,经过对漏电的修正,实验值与理论值很接近了.

库仑通过扭秤实验和电摆实验,最终得出结论:无论是同号电荷的静电斥力,还是异号电荷的静电引力,均符合与距离平方成反比的规律.这就是库仑定律,它是电磁学的一条基本规律.库仑定律的建立使电磁学进入了定量的研究,为以后的继续发展奠定了基础.

无独有偶 值得一提的是,早在1785年发现库仑定律前12年,被物理学家毕奥(J. B. Biot, 法国, 1774—1862)称为“最富有的学者,最有学问的富翁”卡文迪许(Henry Cavendish, 英国, 1731—1810)就已确定静电力与距离平方成反比的关系,并认为其指数如果与2有偏离,其偏离不超过 $\frac{1}{50}$.即

$$f(r) = \frac{k}{r^n}, \text{ 式中 } n = 2 \pm \frac{1}{50}.$$

卡文迪许也是通过静电力与万有引力的相似性(类比)得出平方反比假设的.他设想一个薄球壳,在它的表面上有均匀分布的电荷,在这个球壳内放入一个电荷,若电荷之间的相互作用力反比于它们之间的距离,则根据对引力的讨论可知,整个球壳上均匀分布的电荷对这个电荷的总的作用力等于零.如果再在这个球壳内放进另一个同种电荷,这两个电荷必将排斥往相反方向运动.

卡文迪许根据这个设想于1773年左右完成了验证实验,由于卡文迪许一生把财产和荣誉看得很轻,他的许多重大成果都没有及时发表,上述对于电荷间相互作用力反比于它们之间距离平方的规律,直到1879年才由麦克斯韦从他的手稿中发现.

从普利斯特利、卡文迪许到库仑,无独有偶,都是通过与万有引力的类比对静电力所遵循的规律作出假设,并获得了成功.这对于后人无疑是一个极好的启发.至于电荷间相互作用力 $\left(F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}\right)$ 与万有引力 $\left(F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}\right)$ 为什么会有如此相似的关系,同样得留给后人去研究了.

2. 欧姆的电流扭秤实验

欧姆从热现象的类比中形成了“导线中两点间的电流大小可能正比于这两点间的某种驱动力”的假设后,便设法用实验进行验证.这一目前中学生都会做的实验,在电学发展初级阶段有着许多困难,为此欧姆做了大量的准备工作,逐一扫清了实验和理论上的障碍.

欧姆面前
的困难

欧姆首先遇到的问题是如何测量电流强度.开始欧姆曾想用电流的热效应,即用通电导体会产生热胀冷缩现象来测量电流强度,结果失败了.后来,欧姆从施威格(J. S. C. Schweigger, 1779—1857)的定性测量有无电流的检流计得到启发,认识到电流强度与其产生的磁场的强弱成正比(电流的磁效应),只需设法将电流强度这一物理量变换成力学量来测定,就有希望获得成功.欧姆根据磁场对通电线圈的磁力矩与金属丝的扭转角成正比的道理,建立了可以直接观测的扭转角与待测电流的正比关系.就这样,欧姆将电流的磁效应与库仑扭秤法巧妙结合,创造性地设计了一个“电流扭力秤”:用一根扭丝悬挂一磁针,让通电导线与该磁针平行放置.用它可以精确地测量电流强度,从而奠定了发现欧姆定律的实验基础.

其次,欧姆定律的建立需要电阻的概念.当时虽然还没有人明

确提出“电阻”这个物理概念,但是,已有科学家研究了金属的导电率问题.例如,英国化学家戴维(H. Davy, 1778—1829)发现了同种材料做成的导体的导电率与其单位长度的质量成正比;法国物理学家贝克勒尔(H. Becquerel, 1852—1908)证明了同种金属的导线的长度之比等于其横截面积之比时,其“导电率”即电阻相等.欧姆也研究了金属的相对导电率的问题.其实验是这样进行的:他用不同种金属制成了直径相同的导线来进行测试,依次将它们插入水银中,调节导线的长度,使电流扭力秤的磁针保持转过相等的角度,于是从实验中测得了各种金属的导电率的相对比值.

最后,实验中的动力源即稳定电源的获得.开始实验时,欧姆用的是电动势极不稳定的伏打电堆,这给研究工作带来了极大的困难和麻烦.后来,他根据由德国物理学家塞贝克(T. J. Seebeck, 1770—1831)于1822年发现的温差电现象的原理,用铜和铋制成了一个温差电偶作电源以后,才获得了较大的稳定电流.

**实验装置
与结果**

解决了电流的测量、形成了电阻的概念和获得了稳定电源等之后,1826年欧姆用如图35所示的实验装置得出了著名的欧姆定律.图中 $aba'b'$ 是用金属铋铸成的一个U形框架,将 ab 和 $a'b'$ 分别铆接在铜片 $abcd$ 和 $a'b'c'd'$ 上,然后把这个由铋—铜组成的温差电池的一端放入 100°C 的沸水中(热端),另一端放入冰水混合物中保持 0°C (冷端).它的两个自由端 cd 和 $c'd'$ 放进盛有水银的槽 m 和 m' 中,这两个水银

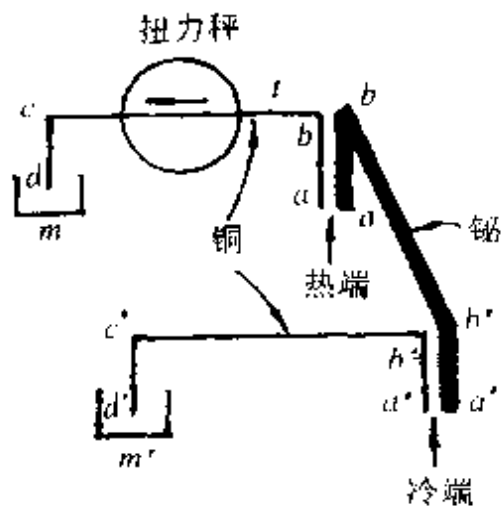


图 35 欧姆的实验装置

槽就是温差电池的电极,外电路就接在这两个水银槽中。

实验时,欧姆将截面相同但长度不同的一组铜导体依次接入电路中,观察并测定扭力秤偏转角的大小.关于实验过程,他在自己的论文中叙述:“我预备了8根不同的导体,以后我们称它们为1、2、3、4、5、6、7、8号,它们的长度分别是2、4、6、10、18、34、66、134英寸(1英寸=25.4毫米).厚度为 $\frac{7}{8}$ 勒恩,并都是从一根扁铜线上切下来的.当水沸腾半小时后,先后依序将这些导线接入电路.每组实验要持续3~4小时,在两组实验之间暂停1小时左右,把预热的水灌入,它很快就沸腾了.然后把导线接入电路,使顺序跟前一次相反.我得到如下的结果.”下表就是他实验中测定并记录的数据。

实验 时间 1826年	每组 实验 次序	不同导线接入时的偏转角 X							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1月8日	I	$326\frac{1}{2}$	$300\frac{3}{4}$	$277\frac{3}{4}$	$238\frac{1}{4}$	$190\frac{3}{4}$	$134\frac{1}{2}$	$83\frac{1}{4}$	$48\frac{1}{2}$
1月11日	II	$311\frac{1}{4}$	287	267	$230\frac{1}{4}$	$183\frac{1}{2}$	$129\frac{1}{4}$	80	46
	III	307	284	$263\frac{3}{4}$	$226\frac{1}{4}$	181	$128\frac{3}{4}$	79	$44\frac{1}{2}$
1月15日	IV	$305\frac{1}{4}$	$281\frac{1}{2}$	259	224	$178\frac{1}{2}$	$124\frac{3}{4}$	79	$44\frac{1}{2}$
	V	305	281	$258\frac{1}{4}$	$223\frac{1}{2}$	178	$124\frac{3}{4}$	78	44

欧姆通过对精密测定的数据的细致分析,发现磁针偏转角 X 与导线中的电流强度成正比.当导线长度为 x ,电路参数 a 和 b 为某定值时,他得到了如下关系式:

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

其中电路参数 a 由温度差即相当于电源的电动势决定, b 由电路不变部分的导体即相当于电源的内阻所决定. 实际上, 在欧姆得到的公式中, a 对应于电动势, $b + x$ 对应于电路的总电阻, X 对应于电流扭力秤的偏转角即电流强度, 上式就是闭合电路的欧姆定律.

欧姆又改用不同尺寸的黄铜线, 并把温差电池两端的温度加以改变, 多次重复上述实验, 都得出了与上述公式一致的结果.

这样, 欧姆终于用实验方法验证了他从热流的类比得来的假设.

被掩埋
了10年

1827年, 欧姆出版了著名的《伽伐尼电路的数学研究》一书. 他根据傅立叶的热传导理论, 用类比法从理论上作出了论证. 并明确表述说: 在伽伐尼电路中, 电流的大小与总电压成正比, 与电路的总电阻成反比. 写成现在常用的公式即

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

遗憾的是, 欧姆的研究成果开始并没有引起科学界的重视, 甚至有人还攻击欧姆的著作是一种“不可置信的欺骗”, “亵渎了自然尊严”等. 直到10年以后, 这颗铮亮的珍珠才终于发出了耀眼的光辉. 人们为了表彰他的功绩, 以他的名字命名电阻的单位.

3. 赫兹实验与发明家的迷离

法拉第的
类比设想

早在1832年, 法拉第就根据类比推理, 提出过电磁波的大胆假设, 并打算用实验来证实他的观点. 他在一封信中说: “我倾向于把磁力的从磁极向外散布, 比作受扰动的水面的振动, 或者比作声音现象中空气的振动; 也就是说, 我倾向于认为, 振动理论将适用于电和磁现象, 正像它

适用于声音,同时又很可能适用于光那样.这些想法我希望能用实验实现……”只是法拉第当时并未公开这一大胆假设,这封信在档案馆里存放了一百多年,直到1938年才发现.

法拉第根据类比得来的电磁波的设想最终由麦克斯韦完成,并被赫兹用实验加以验证.

赫兹实验 1878年,柏林大学物理教授亥姆霍兹(H. Helmholtz,德国,1821—1894)以“用实验建立电磁力和绝缘介质极化的关系”为题,设置了柏林科学院奖.其用意是希望通过悬奖,推动麦克斯韦电磁波理论预言的验证.赫兹(H. R. Hertz,德国,1857—1894)是亥姆霍兹的学生,开始时他认为这个题目困难太多,没有接受亥姆霍兹交给他的攻关任务,以致白白地耽搁了几年的时间.

1886年10月,赫兹做了一个放电实验,在放电过程中,偶然发现近旁有一个线圈也放出火花.赫兹敏锐地想到这可能是电磁共振.赫兹设计了一个电磁波发生器,如图36所示.他用两块边长16英寸的正方形锌板A,每片连接一根长12英寸一端带铜球的导体棒,两导体棒接到感应圈上.通电后,这组发生器的铜球之间能产生高频振

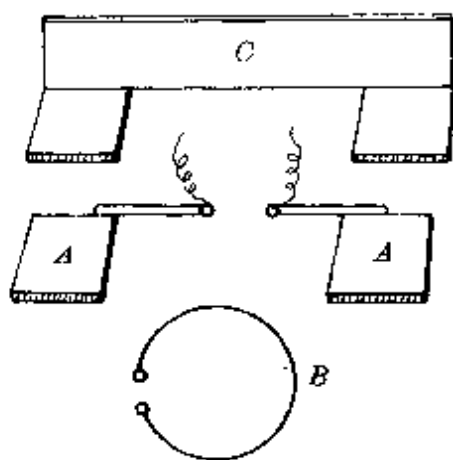


图36 赫兹的电磁波发生器

荡火花.他还将一根粗导线弯成环状,当作检波器B,环的两端装有铜球和螺旋,可调节两球的间距.C是用以反射电磁波用的金属板.赫兹坐在暗室里,检波器B离发生器A10米.当给A输入高压脉动电流时,B的两球之间明显地产生电火花.1887年11月,赫兹向德国科学院提出报告,声称用这一“感应平衡器”证实了电磁波

的存在.赫兹在寄给老师亥姆霍兹的一篇题为《论在绝缘体中电过程引起的感应现象》一文中,总结了这一重要的发现.

接着,赫兹又用类似的方法证明由感应圈放出的电磁波具有与光类似的特性.赫兹在暗室的墙上覆盖一块锌板,大小为 4×2 米²,用来反射电磁波.当入射波和反射波迭加后产生驻波,他先用30厘米的金属环检波器测出了驻波的波长 λ ,再计算了发生器的振荡火花频率 f ,两者相乘就得到了电磁波的速率 $v = \lambda f$.计算结果与麦克斯韦的预见完全相同,即电磁波的速率等于光速.从而证实了麦克斯韦的光的电磁理论的正确性.赫兹在实验中还证明了电磁波具有反射、折射、衍射、干涉等光波的一切性质.

赫兹的实验不仅证实了麦克斯韦理论的正确性,而且也为人
类利用无线电奠定了重大的实验基础.

发明家的
迷离

应该指出,在赫兹以前,曾经有过一些发明家偶然接触到电磁波的产生.

例如,1871年,E.汤姆生(E. Thomson)曾发现当一个具有初、次级的线圈通有脉冲电流时,可以用一把小刀从附近铁桌的边角、水管,甚至30英尺(约9.14米)外的蒸汽机上引出电火花来.后来,他又把这个振荡线圈放在一个房间里,把一个由一对磁极做成的“接收器”放在隔壁房里、地下室里甚至那座六层楼的顶楼,都能发现接收器间隙中产生电火花.然而,E.汤姆生却不能由此形成电磁波的概念,也无法解释这些现象.

1875年,发明大王爱迪生(T. A. Edison, 美国, 1847—1931)也发现过类似的现象,他曾观察到继电器工作时衔铁之间会产生电火花,当时新闻界的报道说:“爱迪生发现了至今还埋藏在人类无知深渊里的新原理.”不过,爱迪生当时也不知其所以然.等到赫兹在1888年以实验证明电磁波存在的消息公布后,爱迪生悔之莫及地

感叹：“使我感到迷离的是，为什么我没有想到利用这些成果。”

这些偶然发现者，或者由于发现者缺乏必要的思想准备，或者由于不能从理论的高度去预言它们的未来，因此往往无法深入研究下去，结果很快被遗忘。只好等待另外一些人从新的高度把它们重新挖掘出来。

由此可见，电磁波的发现不可能属于技术方面的发明，对电磁波实验证明，也必然历史地落到深刻理解麦克斯韦理论的赫兹身上。

4. 先找到儿子 再发现老子

日本物理学家汤川秀树从与电荷间相互作用的类比中提出的介子假设(介子理论)，开始时，除日本的一些物理学家外，并没有受到重视。在没有充分的实验事实之前，当时大多数物理学家的反应都较为冷淡。

究竟是否存在这种传递核力的媒介粒子？只有实验才能作出裁决。为此，物理学家进行了艰苦的实验搜索，不料在寻找这种粒子的过程中却引出了一段有趣的小插曲——先发现了汤川介子的后代。

μ 介子与
 π 介子

在汤川提出介子理论的同一年，安德逊等人在宇宙射线的云室实验中，发现一种质量为电子质量 207 倍的粒子。一时大家喜出望外，以为是找到了汤川的粒子。后来通过对这种粒子进行了长达 10 年的实验研究，发现它与核子间的相互作用很弱，差不多比电磁作用还弱 10^{11} 倍。显然不可能是汤川所说的传递核力的粒子。以后，把安德逊发现的这

种粒子称为 μ 子*。

人们在空欢喜一阵后并不灰心,继续进行实验搜索.直到第二次世界大战后,由于用照相乳胶探测带电粒子技术获得很大的进展**,1947年英国的鲍威尔(C. F. Powell, 1903—1969)和他的同事在高空气球上放了乳胶,让它在宇宙线作用下感光,通过分析发现了一种新的粒子,取名为 π . 它的平均寿命为 2.6×10^{-8} 秒,有带正电荷和负电荷两种.进一步研究查明,它的质量为电子质量的 273 倍.其中 π^+ 与核子间有非常强的作用.这正是汤川所预言的粒子,以后称为 π 介子.而安德逊于 1935 年找到的 μ 子(μ 介子)却是它的后代—— π 介子衰变后的产物.

也许有人感到奇怪,既然 π 和 μ 都是在宇宙线中找到的,为什么竟会“先找到儿子 μ ,再发现老子 π ”呢?这是由于 π 介子的寿命很短,它在宇宙中以接近光速的速度运动,平均经过几米的距离就几乎 100% 地衰变为 μ 介子并放出一个中微子.而 μ 介子的寿命较长(约比 π 介子长 100 倍),使它有机会到达海平面,因此实验中先在地面附近的宇宙线中找到 μ ,再在高空乳胶照片中发现 π .

汤川通过从电磁相互作用的类比中提出的介子假设,终于被实验所验证,得到了公认.由于汤川理论绘出了核子间相互作用的一种重要的物理机理,对于粒子物理学的发展具有重大的意义,尤其是在粒子物理学的初期,它起了重要的推动作用,因此汤川荣获了 1949 年度诺贝尔物理学奖.

* μ 子分带正、负电荷两种,它们都是不稳定的,平均寿命为 2.2×10^{-6} 秒,分别衰变为正电子与负电子,并放出两种中微子.

** 照相乳胶是鲍威尔于 1945 年发明的一种探测带电粒子的方法.

汤川的 启示

在今天看来,汤川的介子理论对核力的认识还不够深入,实际核力的机制要复杂得多.但是,他的方法论的意义却是十分深远的.60年代以后,许多高能物理实验揭示了中子、质子也有自己的结构,是由被称为“夸克”的粒子所组成的,那么“夸克”之间是如何实现相互作用的呢?物理学家还是像汤川那样,设想一种称为“胶子”的更小的粒子,通过吸收和放出胶子,使“夸克”之间产生强大的相互作用.胶子是否实际存在同样还需要实验证明.1979年,美籍华裔物理学家丁肇中领导的实验小组已首次追踪到胶子的径迹,意味着验证胶子的工作已前进了一步.如果今后的实验证实了胶子的存在,那么,类比方法将在现代物理学的前沿阵地又一次展示出它的光辉.

汤川自己在1964年的一次演讲会上曾说过:“跟创造性工作有着密切联系的是类推作用.……类推说来简单,实际上很复杂.与物理学等有关的、最容易理解的例子是用模型所进行的类推.……类推或模型作为飞跃的跳跃台也起了很大的作用.我自己提出介子理论的最初阶段,也是因为把当时熟知的电磁力作了类推,而抓住了当时还不十分清楚的核力的本质.在那时候,开始就预想到两者具有类似点的同时,也应该具有不同点.像这样类推的思考过程,若能把过去熟知的东西作为线索,对于发现和理解与其性质类似而性质不同的新事物是很起作用的.”

5. 斯特恩—盖拉赫实验中的难题

原子与 太阳系

英国物理学家卢瑟福(E. Rutherford, 1871—1937)在 α 粒子散射实验基础上,提出的原子结构模型与太阳系模型是一个很好的类比.如下页表所示.

卢瑟福刚提出他的原子模型时,认为核外电子绕核做匀速圆

周运动. 后来玻尔 (N. Bohr, 丹麦, 1885—1962) 在研究氢光谱规律时提出轨道量子化的概念, 认为氢原子核外电子只能在一系列有确定半径的分立轨道上运动. 德国著名物理学家索末非 (A. Sommerfeld, 1868—1951) 又把原子核外电子轨道推广到椭圆轨道. 这么一来, 原子系统与太阳系形成了更协调的类比. 不过, 索末非从理论得出的结果认为: 在外磁场作用下, 电子绕核运动的轨道平面只能在空间取某些分立的方向, 这就是所谓“空间量子化”(图 37).

对象 特性	太阳系(A)	原子模型(B)
a	太阳质量占整个太阳系质量的 99.87%	原子核的质量占原子质量的 99.97%
b	太阳占太阳系体积的 $1/10^5$	原子核占原子体积的 $1/10^8$
c	太阳与各行星间存在着万有引力, 其大小服从距离的平方反比规律, 即 $F = G \frac{Mm}{r^2}$	原子核与核外电子间存在着库仑力, 其大小服从距离的平方反比规律, 即 $F = k \frac{Qq}{r^2}$
d	各行星绕着太阳旋转(公转)	各核外电子绕着原子核旋转(公转)
e	各行星绕太阳公转时同时发生自转	?

根据原子系统与太阳系的类比, 人们自然想到: 行星绕太阳公转的同时还发生自转, 那么电子在绕核运动时似乎也应该有自转(称为自旋).

1925年, 于伦贝克(Uhlenbeck)和高斯米特(Goudsmit)根据斯特恩(O. Stern, 美国, 1888—1969)和盖拉赫(W. Gerlach, 1889—1979)在1921年做的实验提出了电子自旋的假设, 它正好完善了原子系统与太阳系的类比结构.

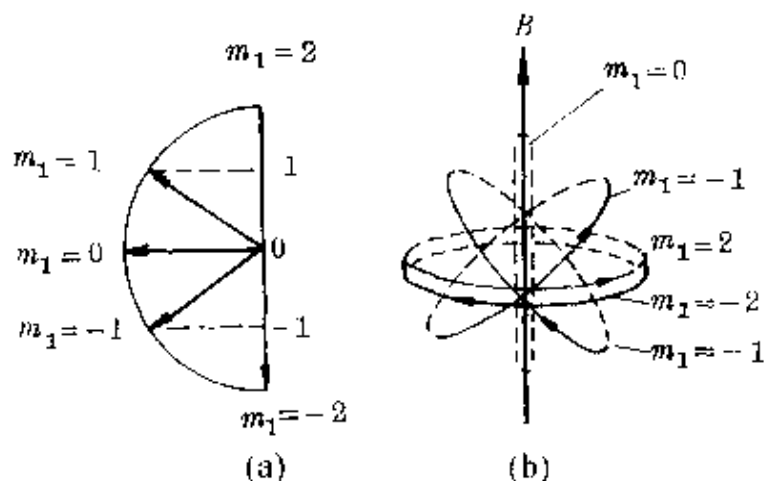


图 37 空间量子化

**电子自旋
的确认**

为了理解斯特恩实验,我们先研究一下电子自旋是怎样被确认的.

在电磁学中早已知道,一个通以电流强度为 i 、面积为 A 的闭合线圈,在磁感强度为 B 的均匀磁场中受到的磁力矩大小为

$$M = iAB \sin \alpha .$$

式中 α 为线圈平面与中性面间的夹角(图 38).

如果把电流强度 i 与线圈面积 A 的乘积称为磁矩,用 μ 表示,即 $\mu = iA$,于是上式可写成

$$M = \mu B \sin \alpha .$$

磁矩 μ 也是一个矢量,它的方向与电流方向间构成右手螺旋法则(图 39).

原子核外电子绕核运动时,等效于一个环形电流.这个环形电流的电流强度为

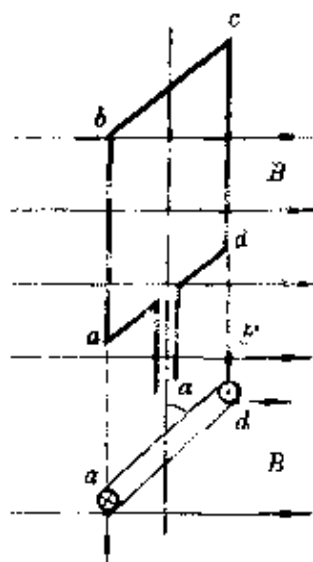
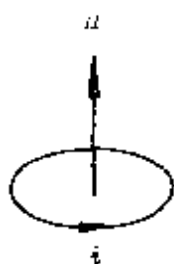


图 38 通电线圈在磁场中的磁力矩



$$i = \frac{e}{\tau}$$

式中 e 为电子电量, τ 为转动周期. 如果设电子运动的轨道半径为 r , 则其轨道所包围的圆面积为

$$A = \pi r^2.$$

图 39 μ 与 i 成右手螺旋法则

因此, 电子绕核运动时的轨道磁矩为

$$\mu = iA = \frac{e}{\tau} \cdot \pi r^2 = \frac{e}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{1}{2} evr.$$

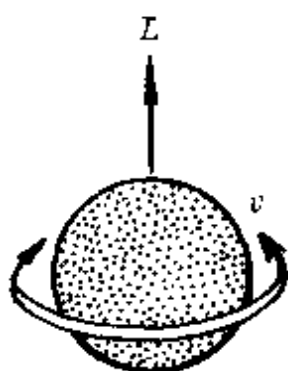


图 40 L 与 v 成右手螺旋关系

对它进行变形, 分子分母同乘以电子质量 m , 则

$$\mu = \frac{m}{2m} \cdot evr = \frac{e}{2m} L.$$

式中 $L = mvr$, 称为电子轨道运动的角动量, 它也是一个矢量, 它的方向与电子绕行速度方向间构成右手螺旋法则(图 40).

由于实际的电流方向正好与电子运动方向相反, 因此, 磁矩方向与角动量方向相反. 于是, 电子轨道磁矩的矢量形式可写为

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m} \vec{L}.$$

在氢原子情况下, 核外只有一个电子, 电子的角动量就是原子的角动量, 这时电子的磁矩也就是原子的磁矩. 如果是多电子原子, 那么原子的角动量就等于所有价电子角动量的矢量和, 原子的磁矩也等于价电子磁矩的矢量和.

现在我们已经知道, 原子也有磁矩, 一个原子相当于一个小的条形磁铁. 因此, 倘若将某种原子置于外磁场中, 它将会受到磁场

的作用而发生旋转,力图使自身磁矩方向指向该处的外磁场方向.在非均匀磁场中时,除了受到这种磁力矩作用外,还会受到磁场力的作用.

斯特恩—盖拉赫实验

斯特恩—盖拉赫正是基于这样的考虑去设计实验的.

他们的实验装置如图 41 所示. K 为原子射线源, B 为具有狭缝的隔板, N 和 S 为产生很强的不均匀磁场的电磁铁, P 为照相板. 所有仪器都装在高真空的容器中.

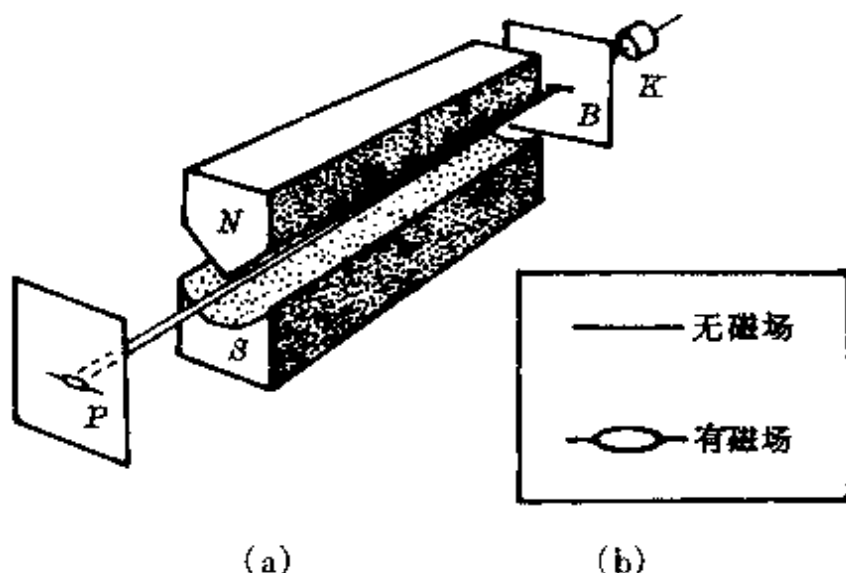


图 41 斯特恩—盖拉赫实验

实验时,先将原子射线源 K 加热,使其发射电子,通过隔板 B 的狭缝后,形成很细的一束原子.没有外磁场时,照相板 P 上会沉积一条正对狭缝的痕迹.当有非均匀磁场作用时,倘若原子射线束中的原子不具有磁矩,射线束也就不会发生偏转;倘若原子具有磁矩,但其方向不作任何限制,则各个原子的偏转有各种不同的取向,在照相底板 P 上将得到一条连续分布的痕迹;倘若原子具有磁矩,但仅限于取某些方向,那么原子的偏转也只能取某几个确定的方向,通过磁场后的原子束将被分成几部分,照相板 P 上只能得到分裂为几条的不连续分布的线状痕迹.

实验的原理虽然很简单明了,但具体工作中的难度极大.从1921年夏到1922年3月,他们连续工作数月,终于得到了满意的结果——银原子在非均匀磁场中沿着非均匀方向分成两束,一束吸向刃形磁极,另一束斥离刃形磁极,即分裂成分立的两束,找不到不受偏转的原子.实验结果如图42所示.

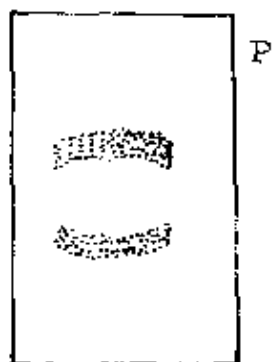


图 42 斯特恩 - 盖拉赫
实验结果

根据对照相板上条纹的对称性分析可知,银原子的磁矩只可能有大小相等、符号相反的两个值,这也就是说,原子磁矩在磁场中的取向,不是任意的,而是量子化的.

斯特恩和盖拉赫在论文中写道:“从这些实验结果中,我们看到在磁场中方向的量子化得到了直接的实验证明.”他们的实验对玻尔和索末菲的工作是一个极大的支持.正如盖拉赫的老师帕邢(F. Paschen)在祝贺盖拉赫的信中所说的:“您们的实验第一次证明了玻尔稳态的真实性.”

突破难题 不过,斯特恩—盖拉赫实验也给量子物理学家们带来了难题.因为根据索末菲的角动量空间量子化的理论,表征轨道动量矩的量子数(称副量子数或角量子数) l ,只能取 $(n-1)$ 的一系列整数,对实验中所用的基态银原子 $n=1$,则 $l=1-1=0$,意味着这束银原子本身并没有轨道角动量,也即没有磁矩,那么实验中测得的原子所具有的磁矩,且取向又是量子化的,该如何解释呢?

1925年,于伦贝克和高斯米特通过研究后认为,电子除了做绕核的轨道运动外,还存在着某种自旋运动,并且与自旋运动相联系也存在着自旋角动量.斯特恩—盖拉赫实验中测得的磁矩正是

电子的自旋磁矩。

电子自旋的假设终于圆满地解释了斯特恩—盖拉赫实验提出的难题,从而也恰好使原子系统与太阳系构成更协调的类比,使人们从行星运动类比中猜测的电子自旋得到证实。

6. 勒维烈的失误和汤波的成功

笔尖下的行星 万有引力定律的一个辉煌成果,就是靠计算发现了海王星.法国青年天文学家勒维烈(U. J. J. Leverier, 1811—1877)和英国青年天文学家亚当斯(J. C. Adams, 1819—1892)注意到天王星的“出轨”现象,认为可能是由于天王星轨道外面还有一颗新的行星所产生的摄动作用引起的.于是,这两个年轻人各自独立地根据牛顿的万有引力定律,从摄动作用去计算未知的这颗行星的位置,最终在笔尖下精确预言出了海王星的位置,并为天文观察所证实,成为震惊世界的一件大事*。

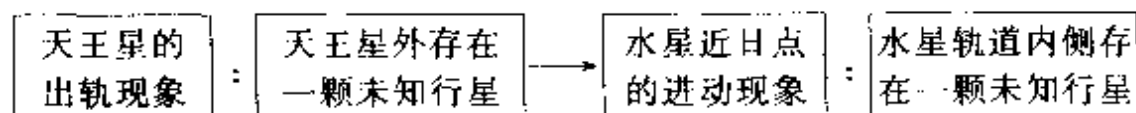
海王星的发现,固然是牛顿力学的一大胜利.不过对于某些行星运动的长期微小变化,牛顿力学仍不能作出很好的解释.水星近日点的进动现象就是其中一例。

天文观察证实,水星近日点相对于空间某固定方位不断缓慢地变化,它每绕太阳运动一周,其轨道长轴方向要转过一个角度 φ .这种现象称为进动.与牛顿力学的计算相比,每百年相差约40秒。

勒维烈的失误 1859年,勒维烈又注意起水星近日点进动的这种超差现象.他把所有的摄动影响都考虑进去,仍无法解释这约40秒的偏移.勒维烈因受到海王星发现的鼓

* 有关发现海王星的详细情况,读者可参阅本丛书《猜想与假设》一册。

舞,他根据过去曾经从天王星轨道的摄动现象预言并发现了海王星的成功经验,将水星轨道的进动现象与天王星运动的出轨现象作了类比,猜测可能又是有一颗未知行星的摄动力作用的结果.这个类比关系可表示为



勒维烈及其他许多天文学家都热衷于寻找这颗新的行星.有人还热情地将这颗新行星命名为“火神星”(Vulcan).后来,经过了几十年的认真搜索,最后大家都不得不承认,这颗“火神星”并不存在.勒维烈从上述类比得来的这个假设被实践证明是错误的.直到1915年,爱因斯坦发表了《用广义相对论解释水星近日点运动》的重要论文后,人们才认识到原来水星轨道的进动是一种广义相对论效应,怪不得用经典的牛顿力学难以解释.*

与勒维烈这次失误的类比相映成趣的是汤波
汤波的成功 (C. W. Tombaugh, 美国, 1906—)根据类比结论对冥王星发现的成功.

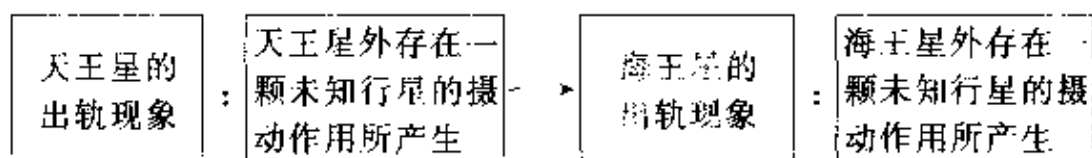
自从海王星发现后,它一直是天文观察的一个热点.天文学家测量到了海王星轨道的半径是地球绕日轨道半径的30倍,根据开普勒行星运动第三定律,海王星绕日运动的周期应该是

$$T_{海} = \left(\frac{R_{海}}{R_{地}} \right)^{3/2} T_{地} = 30^{3/2} \text{年} = 164.3 \text{年}.$$

可是经过了一段时间的实际观测,发现这颗行星竟重蹈其前师天王星的复辙,也不“循规蹈矩”,产生了越轨现象.天文学家们

* 本世纪70年代,早已否定的火神星又一次引起人们关注.1970年3月和1973年6月,在墨西哥和非洲发生日全食时,有人报道发现了这颗位于水星内的行星.结果究竟如何,还有待进一步研究.

用已知行星对它的摄动作用来解释,都得不到满意的结果.鉴于勒维烈和亚当斯发现海王星的成功经验,人们很自然地将海王星与天王星作了类比:



循着这条思路,天文学家又进行了一番旷日持久的巡天大搜索.1909年,美国天文学家皮克林(E. C. Pickering, 1846—1919)曾预言了这颗新星的位置,可是没有找到.直到20多年以后,即1930年3月,美国天文学家汤波才荣幸地发现了这颗新的行星,取名为冥王星.后来人们在整理旧日的观测资料时,发现早在1919年,天文学家的望远镜就曾对准过这颗星,可惜星的影像恰好落入照相乳胶的一块小裂缝中,就是这样一个小小的疵点竟使一个大行星的发现推迟了10余年.

同一性
与差异性

火星与冥王星,都是从海王星发现的类比中先作出了预言(假设),两者的命运却绝然不同.其原因正如本章引言中所说的“根据对象的相似属性推出的属性可能是它们的同一性,也可能是它们的差异性”.海王星的出轨与天王星的出轨是同一性的反映——都是由于轨道外侧一个未知行星的摄动作用所产生的;水星的出轨(近日点的进动)与天王星的出轨,却是它们差异性的反映.因此,勒维烈预言的火神星失败了,而汤波却获得了成功.

由此可见,从类比得出的假设,只有通过实践的检验,才能成为真理.

四、中学物理中常见的类比方法

自然界的事物形形色色,大千世界的现象纷繁多样.在各种事物的复杂现象的演变过程中,常常存在着多种多样、相关相约的许多对应关系,类比推理的方法也显得精彩纷呈.类比的分类也可以根据研究对象从不同角度考虑.譬如从类比对象来说,可以是物理现象之间的类比、物理现象同其他事物的类比;从系统论来说,可以分为局部类比、整体类比和体系类比;从方法论和教学论来说,又可以有不同的分类方法.不过,在我们看来,分类仅是一种方便学习和理解的手段,重要的并不在于抠住分类的名词,而是在于把握类比的精髓——掌握类比推理方法,进一步认识事物的同一性和差异性.

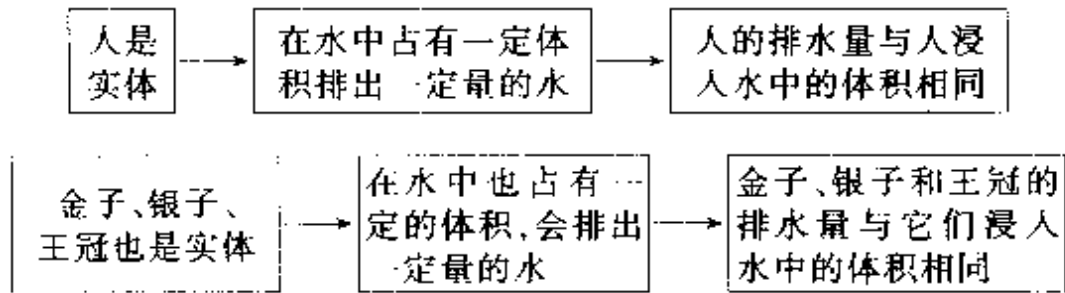
下面,我们结合中学物理实际,选择一些与物理学发现逻辑关系较大的、类比推理性较为显著、中学物理教学中常见的类比方法进行分类说明.

1. 简单共存类比

这是以简单共存关系作为推理中介的一种类比.这种简单共存关系,就是类比对象的各个属性,仅仅因为它们都是对象的属性而已,至于它们之间有无联系,人们并不关心.

人与王冠

最早成功地运用这种简单共存类比作出科学发现的,要算是古希腊的阿基米德(Archimedes,约前287—前213)。面对叙拉古希罗大帝(King Hiero,前269—前216在位)提出的判断金王冠中是否掺假的难题,一直冥思苦想的阿基米德在一次洗澡时突然来了灵感,形成了一个简单共存类比:



阿基米德从这种共存关系中找到了测量不规则形状体积的方法,从而解决了“王冠问题”。

海王星—冥王星 红外线—紫外线

简单共存类比,在物理学中是很常见的。当亚当斯(J. C. Adams, 英国, 1819—1892)和勒维烈(U. J. J. Leverier, 法国, 1811—1877)从天王星的出轨现象发现海王星后,美国天文学家皮克林又从海王星的出轨现象预言海王星外存在一颗未知行星,后来发现了冥王星(见第79页)。从类比分类而言,也可属于简单共存类比。同样,1800年英国物理学家赫谢耳(F. W. Herschel, 1738—1822)偶然在太阳光谱的红光外放上温度计,发现红外线后,1801年德国物理学家里特(J. W. Ritter, 1776—1810)在紫光区域外放上照相底片被感光而发现紫外线。里特试验时的思维方式也可称为简单共存类比。

简单共存类比,在其他领域中也很有见。如地震工作者在一次地震之前观察到天空出现奇特的云,井水突然上涨,一些动物产生焦躁不安的异样神情等现象。以后,他又在另一种场合下看到了这

种云、井水、动物的类似现象,于是他就会预言那里也会发生地震. 过后,可能真的被说中了. 这也是简单共存类比推理的结果. 虽然这种奇特的云、上涨的井水和焦躁的动物等异常现象的发生原因及其与地震之间的联系,他可能并不太清楚.

由于简单共存类比与对象属性之间的逻辑性联系较薄弱,因此其不可靠性也较大.

2. 因果类比

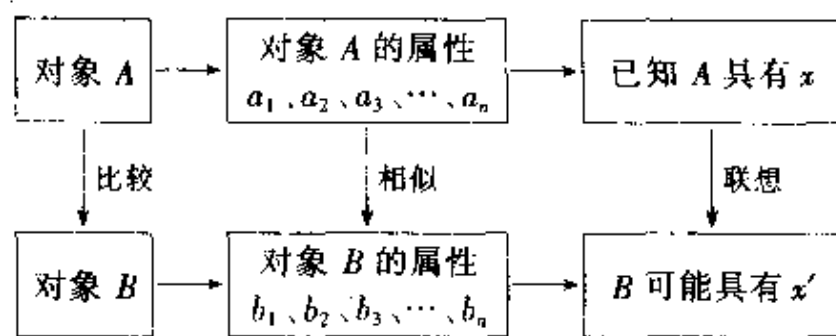
惠更斯提出光的波动说时,借助光的传播现象与声的传播现象作了因果类比:



一般地说,依据两个研究对象各自属性之间可能存在的类似的因果联系而进行的一种逻辑推理,我们称为因果类比. 它比较直观、易懂,说明类比含义时,通常从因果类比为例.

如果我们用 A 和 B 分别表示两个(类)对象,用 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 表示对象 A 所具有的属性,用 $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ 表示对象 B 所具有的属性,那么借助对象 A 的因果关系概括出的事实,可类推推出与它相似的对象 B 的因果关系.

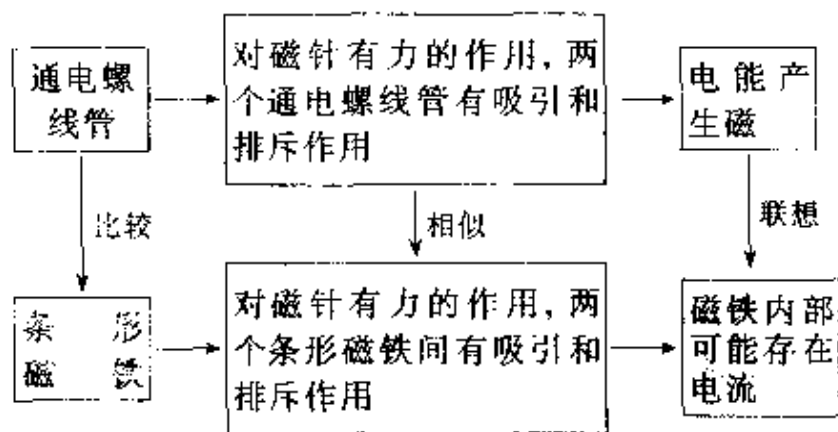
因果类比可以统一地用下面的图式表示:



研究磁现象本质时,安培分子电流的假设,就是通过因果类比提出来的。

**螺线管与
条形磁铁**

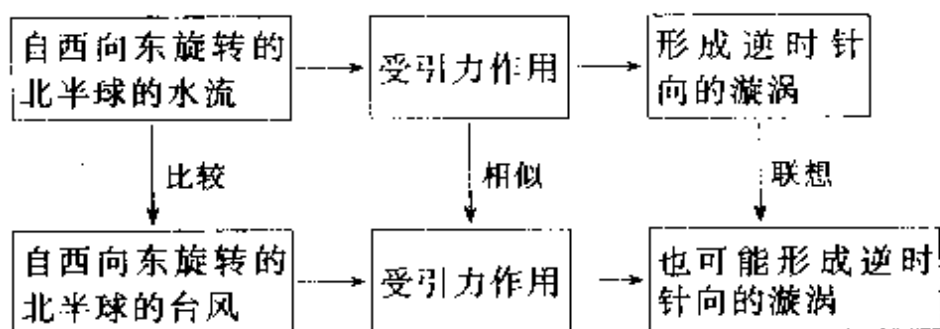
1820年丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted, 1771—1851)发现了电流的磁效应,同年,法国物理学家安培(A. M. Ampe're, 1775—1836)又用实验证明了两个通电螺线管之间的吸引和排斥作用,就像永久磁铁一样,这个现象给予安培极好的启示,从类比推理很容易得出结果:如果磁确实是由电的运动产生的,那么磁棒中必须有电流。



后来安培在菲涅耳(A. J. Fresnel, 法国, 1788—1827)建议下,于1821年1月提出了著名的分子电流假设.安培认为,磁体的每一个分子中都存在着一种环绕分子的圆电流,使它形成一个小磁体,这种小磁体的取向一致时,整个物体就对外显示磁性.安培的分子电流假设,初步揭示了磁现象的电本质。

水流与
台风

1962年,美国麻省理工学院机械工程系主任谢皮罗教授,发现放洗澡水时水流出浴池总是形成逆时针方向的漩涡.他认为这种现象与地球自转有关.由于地球是自西向东旋转的,因此北半球的洗澡水总是逆时针向流出浴池.他根据因果类比推理得出结论:北半球的台风也是逆时针方向旋转的.把谢皮罗教授的推理按因果类比的图式可表示为:



谢皮罗教授还断言,如果在南半球,情况恰好相反(图 43).

谢皮罗教授的论文发表后,引起了世界各国科学家的莫大兴趣,纷纷进行观察实验,结果与谢皮罗的论断完全相符.

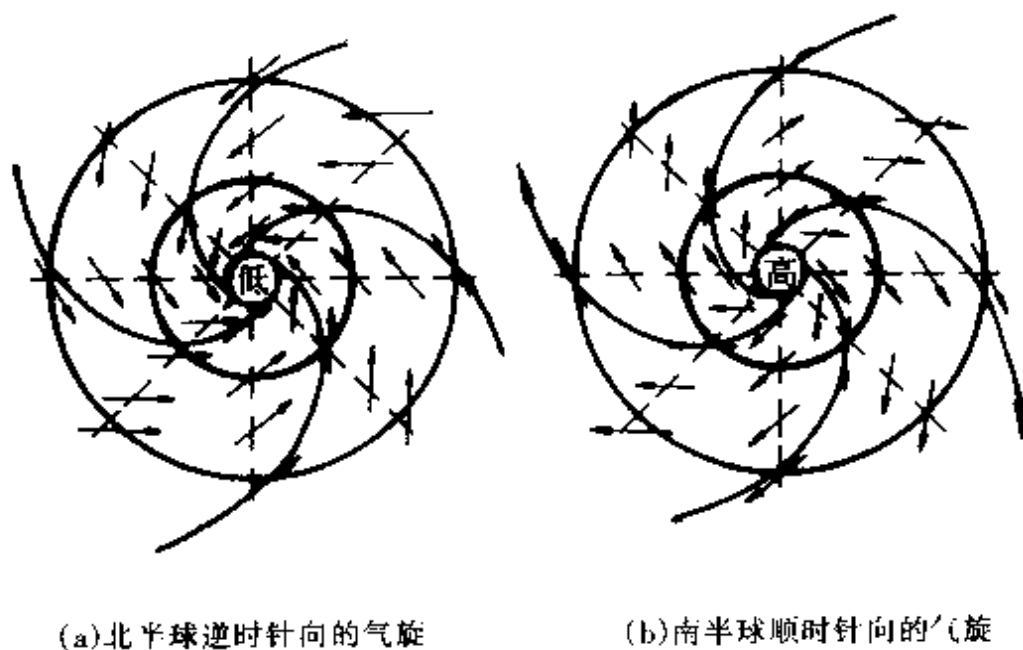
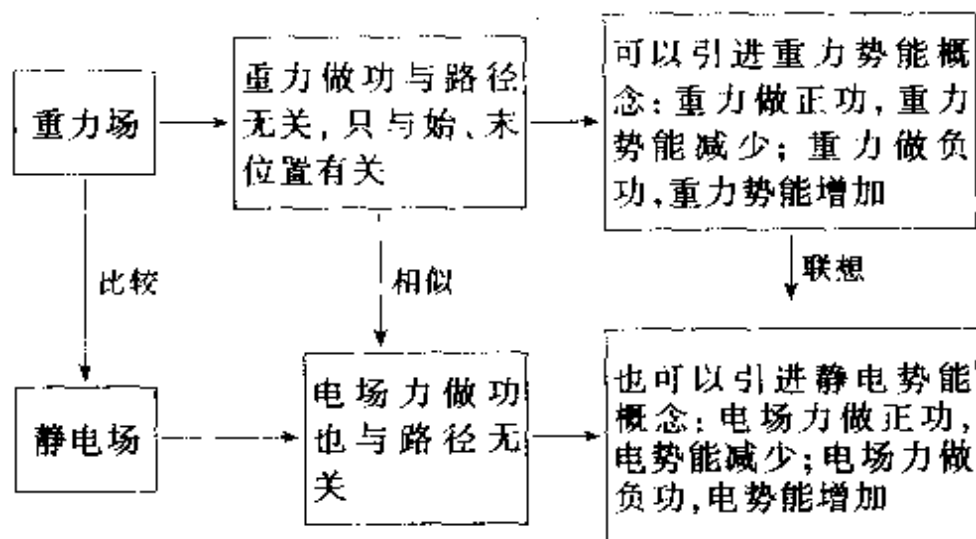


图 43

重力场与静电场

在中学物理教学中,我们借助重力场中某些特性之间的因果关系的类比,根据静电场与重力场的相似性,可以用因果类比推出静电场的一些性质.按类比的图式可表示为:



建立这样的因果类比关系,可以帮助我们研究和认识静电场的特性.

应该注意,由于客观事物之间的因果链条是错综复杂的,不仅存在一因多果、多因一果的现象,而且往往因为具体条件和环境的变化,因果链条的顺序和组合也可能发生变化或变形,因此,在应用因果类比时,必须十分注意这些具体条件.

3. 数学类比

实验证明:库仑定律的数学表达式 $\left(F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}\right)$ 与万有引力定律的数学表达式 $\left(F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}\right)$ 十分相似,因此,如果把库仑力类比于万有引力,我们就有可能把对引力的知识结构、研究方法移

植到对电场的研究中,得出相应的结论.这种类比推理方法称为数学类比.

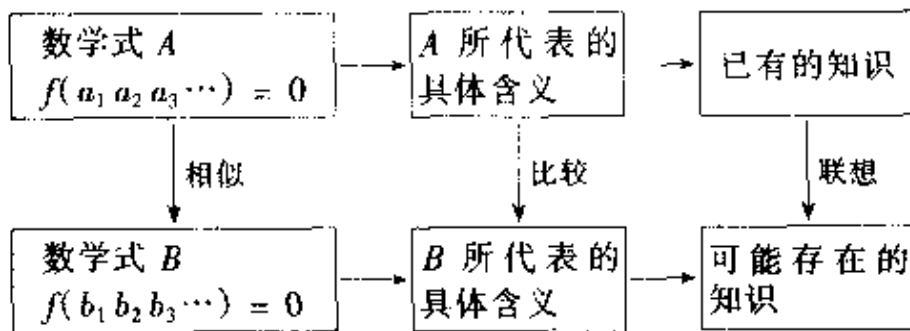
数学类比(或数学相似类比)又叫协变类比,其实质是两个数学式(或数学模型)之间,借助其他理论知识和条件的分析,从一个数学式(或数学模型)推导出另一数学式(或数学模型)及其相关的知识结论的一种类比推理方法.

列宁曾说过:“自然界的统一性显示在关于各种现象领域的微分方程式的‘惊人的类似’中(《唯物主义和经验批判主义》).”这里的微分方程式就是泛指数学方程的意义.

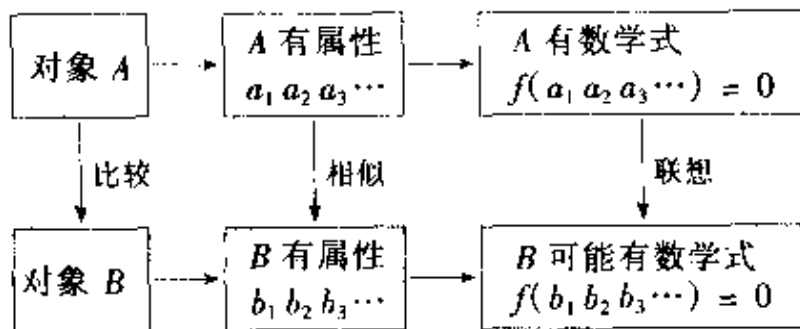
两种数
学类比

数学类比可以区分为两种情况:

(1)在两个研究对象之间,有若干相似的属性或对
应量之间有相似的数学关系,借助类比,可推出它们在
其他主要属性方面是相同的或相似的结论.这种数学类比可用下
面的图式表示:



(2)根据两个研究对象的主要属性相似,运用类比,推出它们的数学方程式在形式上也相同或相似的结论.这种类比的图式为

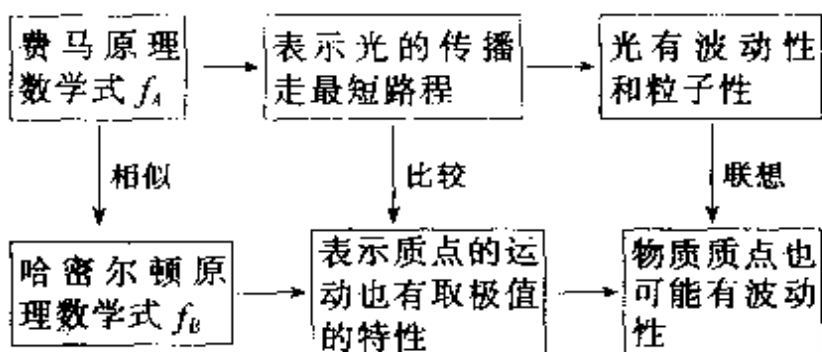


王子的
物质波

许多时候,这两种数学类比常会综合起来应用,法国王子德布罗意(L. de Broglie, 1892—)物质波的假设,就是一个典型事例.

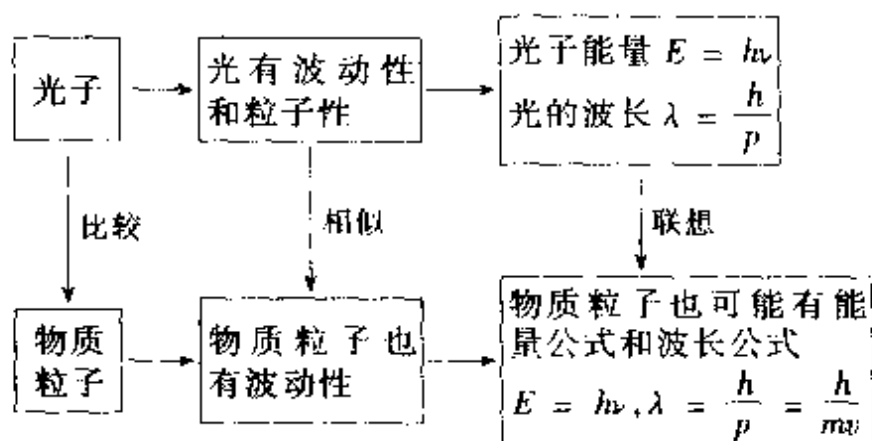
本世纪初,以玻尔(N. Bohr, 丹麦, 1885—1962)为代表的旧量子论已经否定了电子绕核运动的轨道概念,如果电子绕核运动没有轨道的话,那么在原子内部的电子的运动究竟是怎样的呢?

1923年,法国一个老贵族世家的王子路易·德布罗意把光学现象与力学现象作类比,他根据光从一点到另一点一定走最短路程的费马原理的方程式与力学中质点运动服从最小作用原理的哈密顿原理的方程有完全相同的形式*,运用第一种数学类比,从光的粒子性和波动性推知物质质点也可能有波动性.



接着,德布罗意根据物质质点与光有相似的属性(即粒子性和波动性),运用第二种数学类比,从光子能量公式($E = h\nu$)和波长公式($\lambda = \frac{h}{p}$, 式中 p 为动量),推知物质粒子也可能有对应的方程式:

* 费马原理方程式 $\delta \int_R^A n dl = 0$, 哈密顿原理方程式 $\delta \int_{t_1}^{t_2} L dt = 0$.



这里的 $\lambda = \frac{h}{mv}$ 即物质波的波长公式, 又叫德布罗意公式. 根据德布罗意公式, 很容易算出一个中等速度的电子(取 $v = 10^7$ 米/秒)的波长为

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 10^7} \text{米} \\ &= 0.7285 \times 10^{-10} \text{米}. \end{aligned}$$

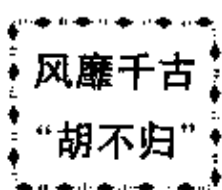
它相当于 X 射线的波长.

德布罗意的物质波概念, 后来被德国物理学家玻恩 (M. Born, 1882—1970) 作了被大家公认的统计解释: 物质波是一种几率波. 物质波在某一地方的强度跟在该处找到它所代表的粒子的几率成正比. 因此, 运用德布罗意



图 44 氢原子基态的电子云

物质波的概念, 就可以摒弃电子绕核运动的轨道模型——所谓电子运动轨道, 只不过是电子出现几率最大的地方. 电子在原子核外的运动情况, 可用“电子云”来形象化地描述. 图 44 表示了氢原子基态的电子云, 原子核好像被一层云雾笼罩着, 云雾浓度大的地方, 电子出现的几率大; 云雾浓度小的地方, 电子出现的几率小.



风靡千古

“胡不归”

运用数学类比,不仅可以从相似的数学式所包含的物理意义作出假设,也便于对问题的求解.风靡千年的“胡不归”问题的解答就是一个生动的实例.

据说,从前有一个在外地当学徒的小伙子,获悉家乡的老父病重的消息后,便立即向掌柜告了假启程赶路.回家的路要先经过一片平整的硬地,可以走得较快,还有一片坑坑洼洼的沙砾地,只能走得较慢.小伙子思家心切,想尽早见到老父,认为路径越短越省时,于是他沿着从店铺到家乡的直线路径赶路.可是当他气喘吁吁地来到老父跟前时,老人刚刚咽了气,小伙子不觉失声痛哭.邻舍闻声纷纷前来劝慰.有人告诉小伙子:老人在弥留之际,还不断喃喃地念叨:“胡不归?胡不归?……”邻舍埋怨小伙子,为啥不早到一步!

这一古老的传说,不禁引起人们思索,这个小伙子能否提前走到家?倘若有可能,那么应该选择一条怎样的路径?

这个问题的直接求解比较困难,如果借助数学类比,就很容易找到答案.

把小伙子所在店铺和他的家乡抽象为 A 、 B 两处,他在硬地上和沙砾地上的行走速度分别设为 v_1 、 v_2 ($v_1 > v_2$). 把小伙子从 A 到 B 的运动与光的传播相类比(图 45). 因为光子像一名最佳运动员,它总是选择最节省时间的路径传播. 当光从空气中的 A 点传到介质中的 B 点时,沿着符合折射定律的路径传播的时间最短,因此,若这个小伙子从 A 点走到 B 点要最省时,也应当选择一条像光的折射一样的路径前进,而不是沿 AB 直线方向. 设从硬地到沙砾地的转折点在界面 MN 处的 O 点,根据数学类比,可得“入射角 i ”和“折射角 r ”应满足的关系为

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

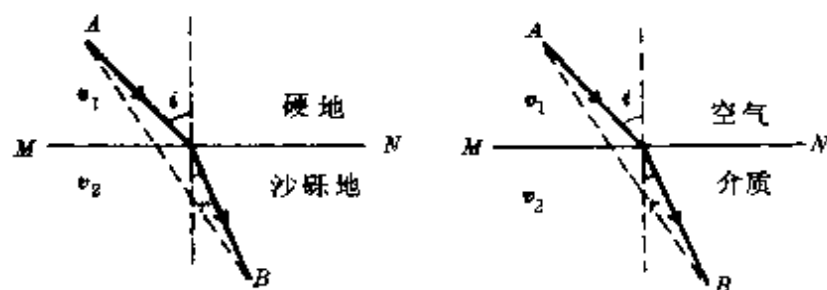
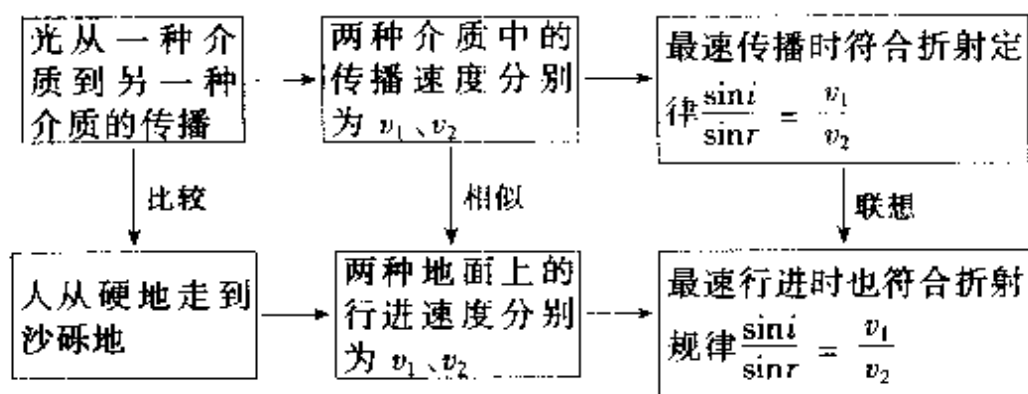


图 45 光折射的类比

把这个类比用图式表示如下：



**非弹性碰撞
与电容放电**

利用两球的完全非弹性碰撞与电容器并联放电的类比,寻找放电过程中能量的损耗是又一个简便而有趣的实例。

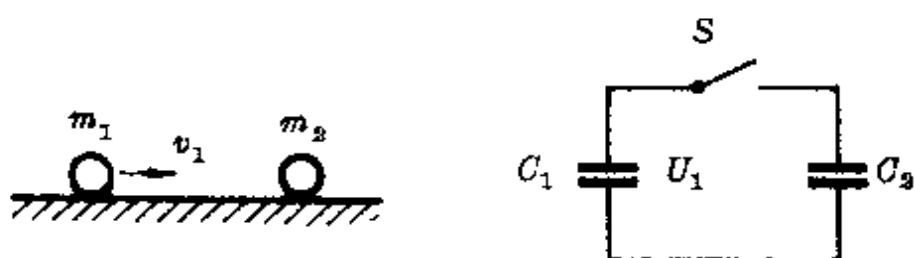
如图 46(a), 设质量 m_1 的小球以速度 v_1 与静放在光滑水平面上质量 m_2 的球做完全非弹性碰撞, 碰后两球粘合在一起运动的共同速度为

$$u = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}$$

碰撞中损失的机械能为

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \left(\frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2} \right)^2$$

$$= \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_1.$$



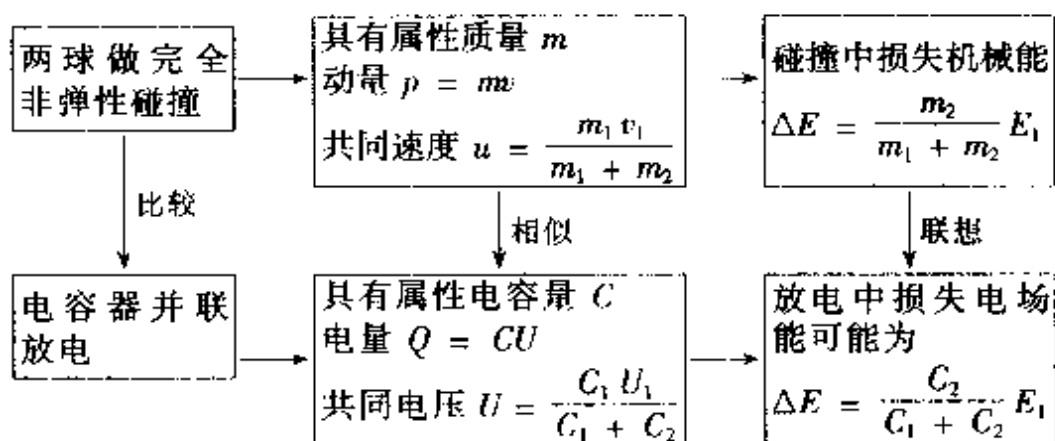
(a) (b)

图 46 非弹性碰撞的类比

图 46(b)中,设电容器 C_1 充电后电压为 U_1 ,合上开关后对不带电的电容器 C_2 放电,达稳定状态后两者的电压均为

$$U = \frac{C_1 U_1}{C_1 + C_2}.$$

因此我们建立下面的类比:



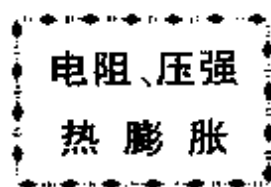
上面我们从类比联想得出的 $\Delta E = \frac{C_2}{C_1 + C_2} E_1$ 很容易被实际计算所验证. 因为一个电容量为 C 、充电电压为 U 的电容器具有的电场能为

$$E = \frac{1}{2} CU^2.$$

因此,放电前后电容器储藏的电场能之差为

$$\begin{aligned}\Delta E &= \frac{1}{2} C_1 U_1^2 - \frac{1}{2} (C_1 + C_2) U^2 \\ &= \frac{1}{2} C_1 U_1^2 - \frac{1}{2} \frac{C_1^2 U_1^2}{C_1 + C_2} \\ &= \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{1}{2} C_1 U_1^2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} E_1.\end{aligned}$$

说明由类比得到的关系式完全正确. 这项能量主要损失在迁移电荷时导线上的焦耳热, 还有部分转化为电磁波发射出去.



数学类比在中学物理中有很多反映, 例如大多数金属导体的电阻(或电阻率)随温度的升高而变大, 在温度 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻(或电阻率)与 0°C 时的电阻(或电阻率)的关系为

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \text{ 或 } \rho_t = \rho_0(1 + \alpha t).$$

式中 α 称为电阻的温度系数.

上述关系跟理想气体做等容变化时压强与温度间的关系、理想气体做等压变化时体积与温度间的关系十分相似, 即

$$p_t = p_0(1 + \gamma t), V_t = V_0(1 + \beta t).$$

式中 γ 、 β 分别称为气体的压强系数和体胀系数.

通过类比, 不仅可以统一对这些现象(还包括固体的线膨胀、面膨胀和体膨胀)的认识, 还可根据气体的压强系数和体胀系数, 推出电阻温度系数的含义, 即

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t} \text{ 或 } \alpha = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 t}$$

表示温度每升高 1°C , 导体电阻(或电阻率)的增加与 0°C 时电阻(或电阻率)的比值.

又如, LC 回路振荡周期公式与简谐运动周期公式十分相似:

$$T = 2\pi \sqrt{LC} \longleftrightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

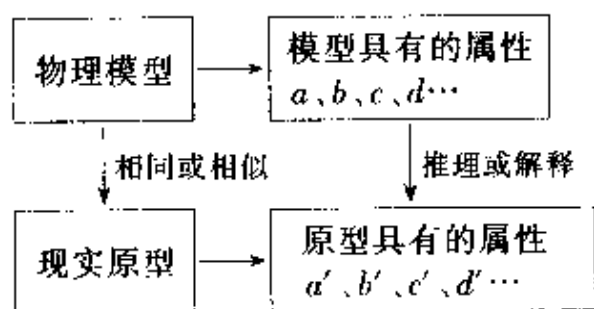
通过类比,我们可以从能的转化上方便地理解电磁振荡过程.

由于数学类比不仅是定性类比,也是定量类比,一般说来,由此得到的关于事物规律性的知识其可靠程度较高,它注重从事物的相互联系中去研究事物的各种属性之间的关系,因此,它比因果类比要更进一步.

4. 模型类比

根据模型和原型客体之间具有相同或相似的关系而进行的一种类比推理,称为模型类比.

物理模型(物质模型和理想模型)是按照科学研究的需要用物质形式或思维形式对原型客体本质关系的再现,通过对模型的研究获得关于原型客体的知识,是现代科学中常用的一种思想方法.因此,这种类比推理可表示为



◆◆◆◆◆
◆ 吉尔伯特的
◆ 微地球模型
◆◆◆◆◆

近代磁学和电学科学的先驱、英国实验家威廉·吉尔伯特(W. Gilbert, 1540—1603)曾制作一个微地球模型类比地球,从而推出地球是一个大磁体的结论.吉尔伯特用一块强天然磁石制成球状(微地球),另用一根放在支架上的细小罗盘针构成指向针.把这根指向针放在球形磁石的表面,它所指示的方向用笔画在磁石上面,这样就画出了一

个大圆圈.把指向针放在另一点上,又可以画出一个大圆圈,如此等等.吉尔伯特发现所有这些圆圈都近似地通过磁石上两个正好相对的点,它们就是两个磁极,如图 47 中 A 和 B 所示.

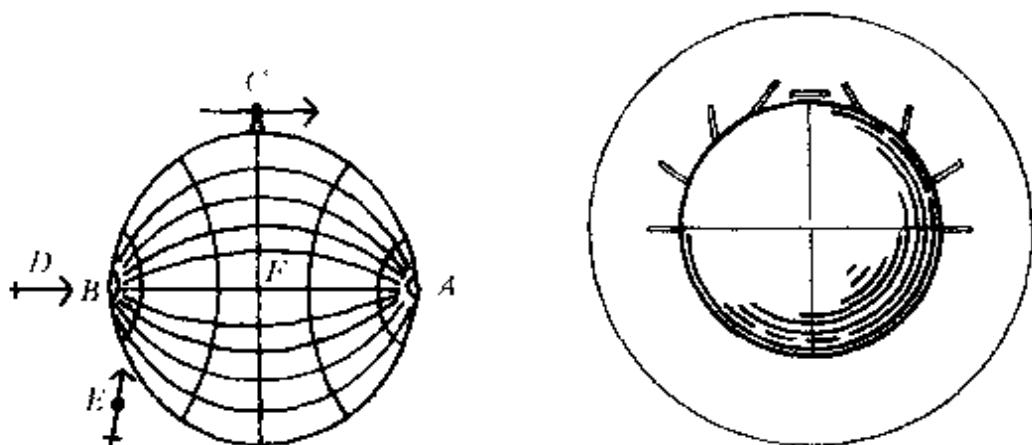
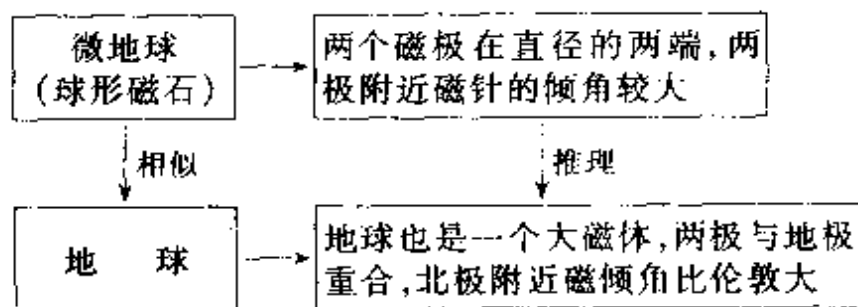


图 47 带指向针的微地球

图 48 小磁石对微地球的反应

吉尔伯特同时发现,当指向针位于和天然球形磁石(微地球)两极等距离的一个大圆圈(磁赤道)上任何一点时,指向针与磁石表面平行,而当位于两极时,它与表面垂直.当相对于球形磁石移动这根指向针时,它对表面的倾角随其离两极的距离而变化(图 48).于是,吉尔伯特把他的微地球模型与地球作了类比,猜测地球也是一个大磁体,它的两极与地极是重合的,并根据指向针在微地球的磁极附近的行为,猜测出地球北端的磁倾角比伦敦大.吉尔伯特的这个类比可表示为:



虽然吉尔伯特认为地磁两极与地理两极重合的推论并不正确(实际上地磁极的位置还经常缓慢移动),但他用这个模型类比方法早在1600年就首先指出地球是一个大磁体,是完全正确和十分可贵的.他对磁倾角的猜测后来也被赫德森在美洲北极地区探险航行中得到了证实.

帕斯卡的水压虹吸管

17世纪时,人们对大气压还缺乏明确的认识,对一些与大气压的作用有关的现象,往往用从亚里士多德(Aristotle,古希腊,前384—前322)流传下来的“自然界憎恶真空”的说法去解释.法国科学家帕斯卡(B. Pascal, 1623—1662)用实验作了一次很出色的模型类比,用以说明大气压所产生的现象和液体的压力所引起的现象之间的对应关系,反对所谓恐真空性.

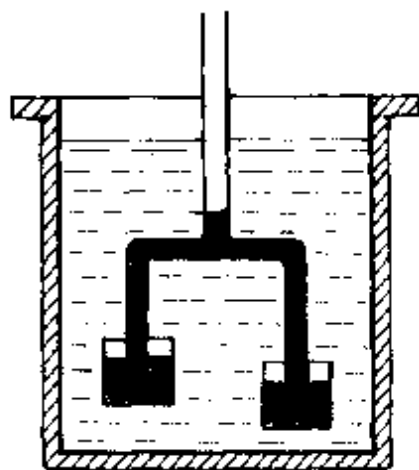
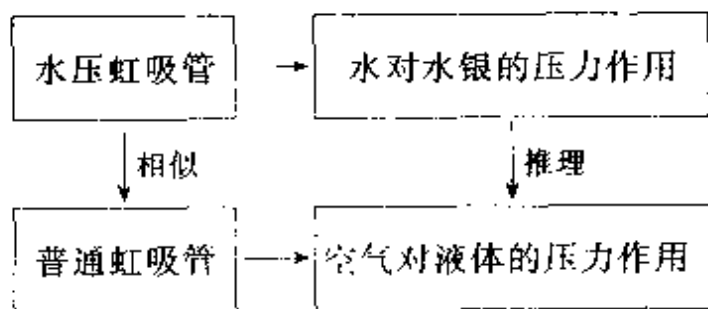


图 49 水的压力操纵的虹吸管

实验装置如图49所示.取一个三端开口的分支管,其中一个分支比另一分支长.把这两个分支插入两个处于不同高度的水银杯中.这个装置再浸在一个盛有水的容器里,当它下沉到足够深度时,水银就在两个分支中上升,直到这两个水银柱流到一起,这样,水银就从高杯流到低杯中.把这个装置与普通虹吸管作一类比:

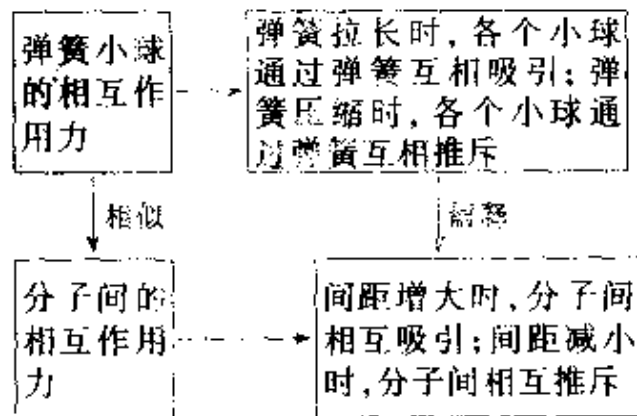


从而使帕斯卡认识到,用普通虹吸管把水(或其他液体)从高容器中吸到低容器中,是由于大气压的作用,并不是“自然界憎恶真空”的结果。

教学中的模型类比 在中学物理教学中,模型类比也很常见。譬如,用弹簧小球模型类比分子力随距离的关系(图 50)。这个类比关系可表示为:



图 50 弹簧小球



虽然实际分子间没有任何弹簧,而且它们的相互作用力比弹簧小球模型中的力复杂得多,但通过这个模型作类比,可使我们对分子间同时存在着引力和斥力及其与分子间距的变化形成直观的认识。

此外,如用弹性小球模型类比理想气体分子,解释气体压强的产生,导出压强公式^{*};用机械共振模型类比电谐振,说明谐振条件和揭示收音机、电视机中选台的奥秘;用太阳系模型类比原子模型,认识微观世界的运动等。

* 参见本丛书《模型》一册。

除了上面这四种类比外,中学物理教学中还有根据两个研究对象某方面的等效性进行类比推理(称等效类比),或根据两个研究对象存在的对称关系进行类比推理(称对称类比)以及根据两个研究对象多方面的属性综合着进行类比(称综合类比)等方法.

五、类比对学习和运用物理知识的指导作用

类比方法曾激起科学家儿多思维灵感,迸发多少科学想象.在中学物理教学中,类比方法同样能使中学生产生丰富的联想.苏联教育家瓦赫捷罗夫曾高度评价类比推理在教学中的重大作用——“类比像闪电一样,可以照亮学生所学学科의 黑暗角落”.

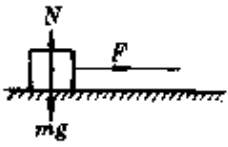



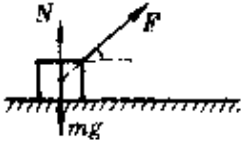
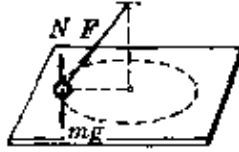
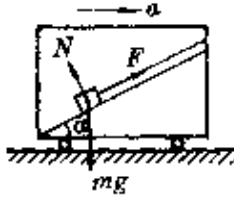
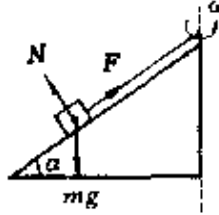
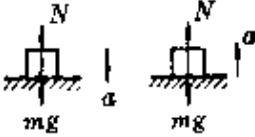
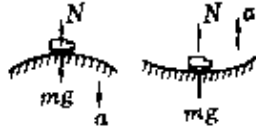
类比对学习和运用物理知识的指导作用,主要表现在它的发现(知识的)功能、迁移(知识的)功能、鉴别(知识的)功能和模拟(实验的)功能等方面.

1. 类比的发现功能

在科学研究中,类比是萌发科学猜想和假设的一个重要方法.科学家常借助类比提出新的观点,建立新的理论.在中学物理教学中,所谓类比的发现功能,主要是指通过类比去引导我们“发现”(或去“寻找”)新旧知识间的联系,从而更好地理解 and 掌握新的知识,获取新的知识.现列举数例如下.

**圆周运动与
直线运动**

不少初学者对匀速圆周运动中的向心力往往缺乏认识,常把它们特殊化,认为是额外的一个力,以至在受力分析和涉及匀速圆周运动中向心力与向心加速度的关系时模糊不清.为此,可以把匀速圆周运动在某一瞬间的运动与质点的匀加速直线运动作类比,如下页表所示:

匀加速直线运动	匀速圆周运动
 <p>图 51(a) 物体沿光滑水平面做匀加速直线运动</p>	 <p>图 51(b) 小球沿光滑桌面做匀速圆周运动</p>
 <p>图 52(a) 两物体一起做匀加速直线运动</p>	 <p>图 52(b) 两小球一起做匀速圆周运动</p>
 <p>图 53(a) 受斜向拉力沿光滑水平面做匀加速直线运动</p>	 <p>图 53(b) 在光滑水平面上做圆锥摆式的运动</p>
 <p>图 54(a) 系在车厢中光滑斜面上的物体与车厢一起做匀加速直线运动</p>	 <p>图 54(b) 系在光滑斜面上的物体与斜面一起绕轴做匀速圆周运动</p>
 <p>图 55(a) 放在木块上的物体竖直向下或向上加速运动</p>	 <p>图 55(b) 汽车通过凸形桥顶或凹形桥底时的运动</p>

通过上面的类比,可以看到,匀速圆周运动中的向心力实际上就是作用在物体上沿半径方向指向中心的合力.它可以由重力、弹

力、摩擦力等单独提供或由它们的合力(或分力)提供,不是一个特殊的、额外的力,在匀速圆周运动过程中的每一瞬间,可与一个平动相对应,同样遵循牛顿第二定律。

静电场与重力场

把静电场与重力场作类比,将会非常有助于认识电场的性质,如下表所示。

通过类比,可以使我们对电场中两个十分抽象的概念——场强和电势是表征场的客观特性以及电场力的功与路径无关的特性有一个直观的对照。

重力场	静电场
地球周围空间存在着重力场	电荷周围空间存在着电场
在重力场中的物体会受到重力作用	在电场中的电荷会受到电场力作用
同一位置上不同质量的物体的重力不同 同一物体在不同位置受到的重力不同	同一位置上不同电荷的电场力不同 同一电荷在不同位置受到的电场力不同
同一位置上不同质量的物体受到的重力与其质量的比值恒定 $\frac{G_1}{m_1} = \frac{G_2}{m_2} = \dots = \frac{G_n}{m_n} = g$	同一位置上不同电量的电荷受到的电场力与其电量的比值恒定 $\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \dots = \frac{F_n}{q_n} = E$
重力场中的物体具有势能——重力势能 同一位置上不同质量的物体重力势能不同 同一位置上不同质量的物体的重力势能与其质量的比值恒定 $\frac{E_{p1}}{m_1} = \frac{E_{p2}}{m_2} = \dots = \frac{E_{pn}}{m_n} = gh$	电场中的电荷具有势能——电势能 同一位置上不同电量的电荷电势能不同 同一位置上不同电量的电荷的电势能与其电量的比值恒定 $\frac{\epsilon_1}{q_1} = \frac{\epsilon_2}{q_2} = \dots = \frac{\epsilon_n}{q_n} = U$

续表

重力场	静电场
在重力场中移动物体时做的功只与质量及始、末位置有关,重力的功等于始末两位置重力势能之差	在电场中移动电荷时电场力的功只与电量及始、末位置有关,电场力的功等于始末两位置电势能之差
$W_{AB} = E_{PA} - E_{PB}$	$W_{AB} = \epsilon_A - \epsilon_B$

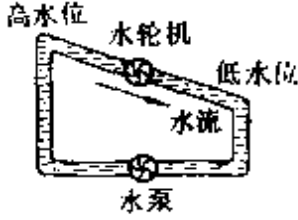
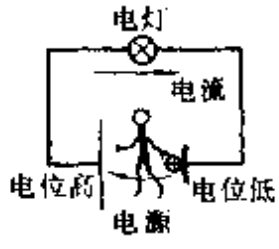
电流与水流

把电流与水流相类比,同样会帮助我们较透彻理解电动势这一新的概念.

通过下表的类比可知,所谓“电源”并不是产生电的源泉,它只是像一个忙碌的“运输工”,不断把低电位处的正电荷送到高电位处,从而保持电流中有稳定的电流.在搬运电荷的过程中,消耗其他形式的能(如机械能、化学能等)转变为电能,因此,电源是一种能量转换装置.

类比对象	水 流	电 流
系统结构	水泵 水轮机 阀门 水管	电源 电动机(用电器) 电键 导线
形成原因	存在水位差(水压)	存在电位差(电压)
流动方向	从高水压处流向低水压处	正电荷从高电位处流向低电位处
强 度	单位时间内通过任一截面的水量称为流量,稳定流动时,流量处处相等	单位时间内通过任一截面的电量称为电流强度,稳定电路中,电流强度处处相等
能源作用	依靠水泵对水做功,使低水位变成高水位	依靠电源对电荷做功,把正电荷从低电位送到高电位处

续表

类比对象	水 流	电 流
负载作用	通过水轮机对外做功, 水压降低	通过电动机(或其他用电器)对外做功, 电位降低
示 图	 <p>图 56(a)</p>	 <p>图 56(b)</p>

不同电源搬运同样电量(如 1 库)的电荷做的功不同,即消耗其他形式的能转变成电能的多少不同,用来反映电源这个特性的物理量便是电动势.所以,电动势定义为:依靠其他形式的力(非静电力)把正电荷从低电位移到高电位时所做的功跟搬运电荷的电量的比值,即

$$\mathcal{E} = \frac{W_{\text{非静电力}}}{q}$$

数值上就等于搬运 1 库电量时非静电力做的功.

通过类比,还可“发现”(或得到)一些新的知识.如:

电子绕核运动的
开普勒第三定律

把原子核外电子的绕核运动与卫星绕地球的运动相类比,可以得到一个有趣的结果:

卫星绕地球运动	电子绕原子核运动
地球(M)—卫星(m)系统	原子核(Q)—电子(e)系统
卫星轨道半径(r)	电子绕核轨道半径(r)
卫星受万有引力作为向心力	电子受库仑力作为向心力
$F = G \frac{Mm}{r^2}$	$F = k \frac{Qe}{r^2}$

续表

卫星绕地球运动	电子绕原子核运动
卫星运动的动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{2r}$	电子运动的动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{kQe}{2r}$
卫星离地心越远,势能越大	电子离核越远,势能越大
卫星运动的周期平方与半径立方的比值恒定 $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$ 或 $T^2 \propto r^3$ 符合开普勒第三定律	电子运动的周期平方与半径立方的比值恒定 $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2 m}{kQe}$ 或 $T^2 \propto r^3$ 得到电子绕核运动的开普勒第三定律

刚体转动的运动学和动力学规律

根据描述质点运动的物理量位移、速度、加速度和匀变速运动的规律,运用类比推理,可以对绕固定转动轴的刚体的转动引入对应的物理量角位移、角速度、角加速度,并从类比关系上“发现”相应的运动学规律和动力学规律。

	质点的平动	刚体的转动
运动学的概念	位移 x 速度 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ 加速度 $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	角位移 θ 角速度 $\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ 角加速度 $\beta = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$
运动学的规律	速度公式 $v = v_0 + at$ 位移公式 $x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$	角速度公式 $\omega = \omega_0 + \beta t$ 角位移公式 $\theta = \theta_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2$
动力学的概念	惯性大小的量度——质量 m	刚体转动惯性大小的量度——转动惯量 I
动力学的规律	$a = \frac{F(\text{力})}{m(\text{质量})}$	$\beta = \frac{M(\text{力矩})}{I(\text{转动惯量})}$

当然,上述这种发现,说不上壮观,对于学过大学物理的读者,仅是建立一种平动与转动的对照联系,不过,如果一个中学生能够从类比中引发出这种猜测,就十分难能可贵了*.也许正是这些今天作出并不起眼的发现的年轻人,明天会有震惊世界的重大突破.

2. 类比的迁移功能

类比的迁移功能主要表现在通过类比活化人们头脑中贮存的知识信息,从一些表面上不相关联的对象之间找出共性的方面,建立知识的横向联系.所谓“触类旁通”就是这个意思.这种迁移,同样借助于类比所特有的“以熟比生”的手法,因此,从这个意义上说,它与类比的发现功能并无明显区别.

在中学物理教学中,运用类比的迁移功能建立知识横向联系的实例很多.

粒子流 简单处理时,常把空气看成是由一群除碰撞外没有相互作用、在一定状态下以某一平均速度运动的弹性小球组成的.因此在某段时间内通过某一横截面的空气量与小球运动的平均速度间有确定的关系.

设每个空气分子质量为 m , 平均速度为 \bar{v} , 垂直气流速度方向的截面为 S , 气流分子密度为 n ($1/\text{米}^3$), 则在时间 t 内能通过截面 S 的气流质量, 就等于包含在以 S 为底、长 $l = \bar{v}t$ 这样一个直圆柱体内的空气总质量(图 57), 即

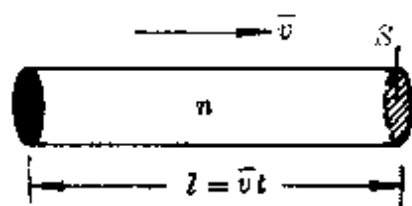


图 57

$$M = nmlS = nm\bar{v}tS.$$

* 目前中学课本中不讲刚体转动规律.

则单位时间内通过该截面的空气量(流量)为

$$Q = \frac{M}{t} = nm \bar{v} S = \rho \bar{v} S.$$

式中 $\rho = nm$ 为空气密度(千克/米³).

当空气做稳定流动时,由于每单位时间内通过某截面的空气量(流量)一定,由上式可知,气流在不同截面处的流速大小与其截面积成反比,即截面小的地方流速大,截面大的地方流速小.前面介绍的风洞中拉瓦尔管在收缩段被加速就是这个道理.

如果把气流与水流、电流、宇宙空间的微陨石流等相类比,由于它们都具有粒子流的属性,因此可以把对气流的这种研究方法迁移过去,解决相关的实际问题.

例 1 水力采煤是用高压水枪喷出的强力水流冲击煤层,如图 58 所示.设水柱直径 $D = 30$ 毫米,车速 $v = 56$ 米/秒,水柱垂直射在煤层表面上,冲击煤层后的速度为零,求水柱对煤的平均冲力.

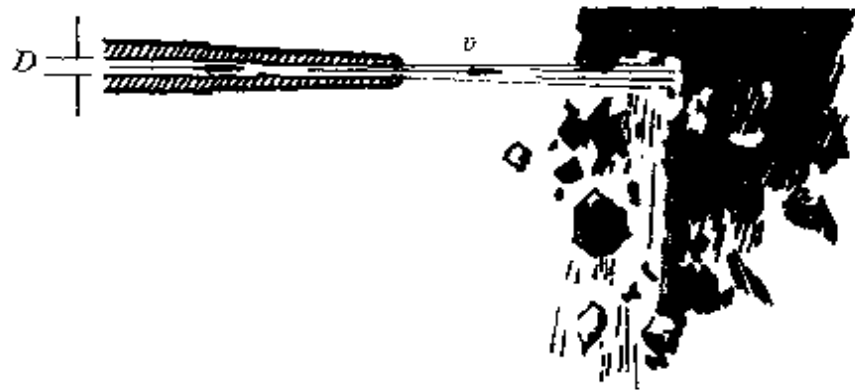


图 58 水力采煤

解答 水流是由水质点组成的连续体.把它与气流作类比,则 t 秒内射出的水量(即喷向煤层的水量)等于包含在以 D 为直径、长 $l = vt$ 的直圆柱内的水量,即

$$m = \rho v t S = \frac{\pi}{4} D^2 \rho v t .$$

这些水射到煤层上受阻后速度降为零,发生的动量变化

$$\Delta p = m \Delta v = \frac{\pi}{4} D^2 \rho v^2 t .$$

由动量定理得它对煤层的平均冲力(数值上等于煤层对水的冲力)为

$$\begin{aligned} \bar{F} &= \frac{\Delta p}{t} = \frac{\pi}{4} D^2 \rho v^2 \\ &= \frac{\pi}{4} \times (30 \times 10^{-3})^2 \times 1 \times 10^3 \times 56 \times 56 \text{ 牛} \\ &= 2.216 \times 10^3 \text{ 牛} . \end{aligned}$$

例 2 试由安培力导出洛仑兹力的公式.

解答 安培力就是磁场对通电导线的作用力. 设一根直导线长 l , 截面积为 S , 通以电流强度 I . 为不失一般起见, 设它与磁场方向成 α 角放置在磁感强度为 B 的匀强磁场中, 如图 59 所示. 这根通电导线所受的安培力

$$F = I B l \sin \alpha .$$

假设这根导线中的自由电子密度为 n , 自由电子定向移动的平均速度为 v , 则在时间 t 内通过导线横截面 S 的电量等于包含在以 S 为底, 长为 vt 的一个圆柱内的电子的电量, 其数值为

$$Q = Svtne .$$

$$\text{则 } I = \frac{Q}{t} = Svtne .$$

因为磁场对整个通电导线的安培力可以看成是磁场对这根导

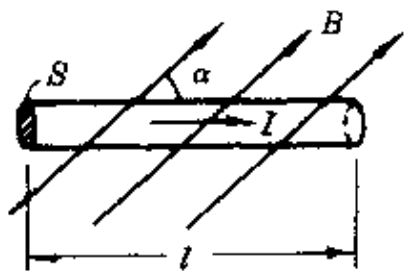


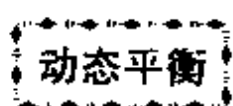
图 59

线中所有自由电子的作用力(即洛仑兹力)的总和.因此洛仑兹力为

$$f = \frac{F(\text{安培力})}{N(\text{电子总数})} = \frac{IlB\sin\alpha}{Sl_n} = \frac{Snev \cdot lB}{Sl_n} \sin\alpha$$

$$= evB\sin\alpha.$$

这就是洛仑兹力的公式.



动态平衡是研究饱和汽时引入的一个概念.设在密闭容器内盛有一些液体,由于分子的无规则运动,处于液面上的某些动能较大的液体分子有可能克服液内分子的



图 60 动态平衡

的束缚飞出液面成为汽分子.随着飞出液面的分子数的增多,液面上方汽的密度逐渐增加,相互碰撞返回液内的分子数增加.最后达到这样的状态:一定温度下,单位时间内从单位液面飞出的液体分子数正好等于同一时间内从单位液面上落回液体的汽分子数(图 60).于是,液

体的量不会再减少,汽的量也不会再增加.这种状态称为动态平衡状态.这里动态的含义就是:从微观上说,液面的蒸发和汽分子的回落始终不停地在进行;而在宏观上,一定温度下汽的密度(或压强)已不会再发生变化了,即达到了暂时的平衡.与液体处于动态平衡的汽就称为饱和汽.

从研究饱和汽引入的这个概念,可以迁移到其他许多场合.

例 1 静电平衡.

把一块不带电的导体板放入电场中[图 61(a)],导体中的自由电子在电场力作用下逆着场强方向发生定向移动,使 AA' 侧因多余电子呈现负电, BB' 侧因缺少电子呈现正电.这些感应电荷在

导体内建立一个与外电场方向相反的电场 E' [图 61(b)], 并将阻碍自由电子的定向移动。

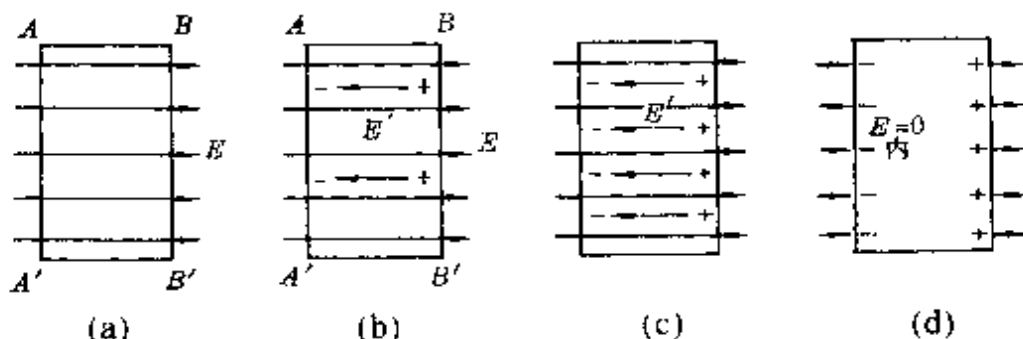


图 61 静电平衡过程

开始时, 由于两侧积累的感应电荷较少, 感应电荷的电场较弱, 在外电场作用下, 自由电子继续定向迁移。

随着两侧感应电荷的增多, 感应电荷的电场也越来越强, 对自由电子定向移动的阻碍作用也越来越大[图 61(c)]。

最后, 必然达到这样的状态: 感应电荷电场 E' 与外电场 E 恰等值反向, 整个导体内部合场强等于零[图 61(d)], 即 $E_{\text{内}} = 0$ 的状态, 我们就称为达到了静电平衡状态。从微观上说, 外电场对自由电子的定向移动的活动和感应电场阻碍自由电子定向移动的活动并没有停止; 但在宏观上, 导体两侧的感应电荷电量已不再发生变化——如果一个自由电子被外电场从 BB' 侧迁移到 AA' 侧, 同时必有一个自由电子被感应电荷电场从 AA' 侧拉到 BB' 侧。可见, 在静电场中处于静电平衡的导体, 实质上也是一种动态平衡状态。

例 2 PN 结。

把一块 P 型半导体和一块 N 型半导体做在一起, 在它们的交界面上会出现一个带电薄层, 称为 PN 结。它的形成也是一个动态平衡的结果。

因为 P 型半导体是依靠空穴导电的(空穴是多数载流子), 但

也有少量电子(电子是少数载流子);N型半导体是依靠电子导电的(电子是多数载流子),也有少量空穴(空穴是少数载流子).把它们做在一起时,空穴和电子都会自发地从浓度大的地方向浓度小的地方扩散——即P区的空穴向N区扩散、N区的电子向P区扩散.结果使交界面N区一侧呈现正电,P区一侧呈现负电,形成一个从N区指向P区的内电场[图62(a)],它对两侧多数载流子的扩散运动起阻碍作用.

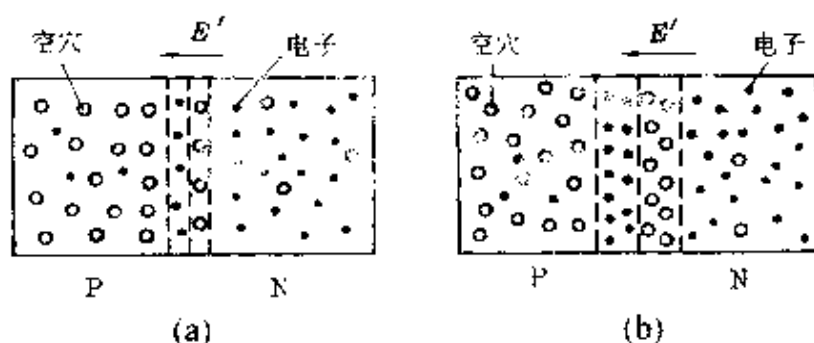


图 62 PN 结

开始时,由于交界面两侧呈现的电荷较少,内电场较弱,对扩散的阻碍作用较弱,因此P区的空穴和N区的电子继续越过分界面向对方扩散.随着扩散的进行,交界面两侧的电荷越积越多,带电层越来越厚,内电场也越来越强,对扩散的阻碍作用也越来越强,最后必然达到这样的状态:P区和N区中多数载流子向对方的扩散作用与内电场的阻碍作用相等.于是,交界面两侧的电荷层不再增厚,内电场达到一定的强度[图62(b)].

PN结所产生的电场称为PN结电场.显然,这时从宏观上说,阻碍层厚度已不再发生变化,仿佛扩散作用已停止一般.实际上,只是扩散作用与PN结电场的阻碍作用暂时地相互平衡而已——即每从P区或N区有一个空穴或电子向对方扩散,必然同时有一个空穴或电子被送回原P区或N区,微观的运动依然进行着.因

此,这也是一个动态平衡.

例3 霍耳效应.

在一个导体中通以纵向电流,同时加上垂直于导体的横向磁场,在导体的两侧(图63中 aa' 与 bb')会产生电势差的现象,称为霍耳效应.这是美国物理学家霍耳(Hall, 1855—1938)于1879年首先发现的.

假设导体中的电流是由正电荷运动形成的.当正电荷从左向右通过垂直纸面的匀强磁场时,因受到洛伦兹力作用向上偏移,因而使 aa' 侧呈现正电, bb' 侧呈现负电,同时建立一个静电场[图64(a)],它将阻碍正电荷的向上偏移,经历一定时间后必然达到这样的状态:洛伦兹力对电荷的迁移作用跟导体内形成的静电场(称霍耳电场)的阻碍作用相平衡.于是,在导体的上、下两侧间形成稳定的电势差(称霍耳电势).显然这也是一个动态平衡状态.

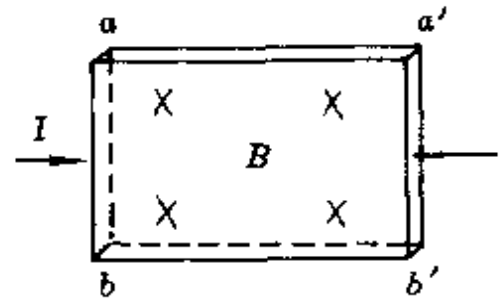


图63 霍耳效应

如果该导体中的电流是由负电荷运动形成的,上、下两侧同样会产生电势差,只是极性不同而已[图64(b)].

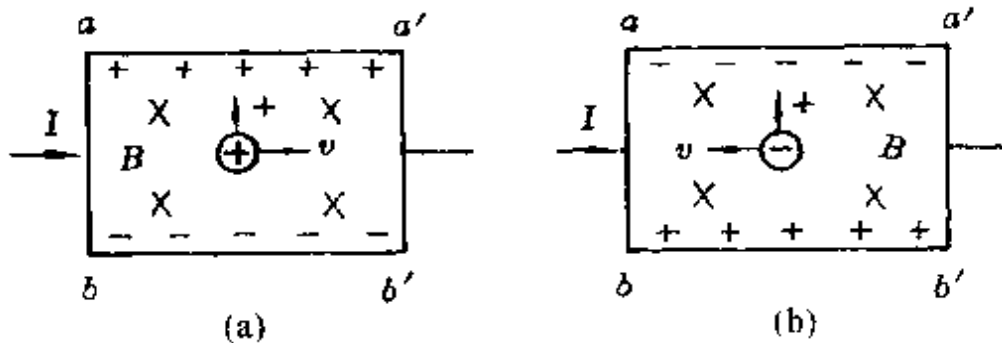


图64 霍耳电势的极性

如果该导体中的电流是由负电荷运动形成的,上、下两侧同样会产生电势差,只是极性不同而已[图64(b)].

3. 类比的模拟功能

物理模拟,不仅具有形象直观、能把一些难以表现的现象显现出来的特点,还能通过模拟启发我们敲开新的应用领域的大门.类比的模拟功能,正是指运用类比方法为物理模拟实验提供理论依据,为开拓新的模拟应用领域提供思维路线.

伽尔顿板 我们知道,一定状态下,气体中所有分子实际上是以各种大小不同的速度沿各个不同方向运动的,而且由于相互间的频繁碰撞,每一分子的速度都在不断变化.但是从整体上说,在确定的状态下,气体分子的速度都遵从着一定的统计规律.如在 0℃ 时,氧气分子中分布在各个速度区间内的分子数占总分子数的百分率如下表所示.

按速度大小分的区间(m/s)	分子数的百分率($\frac{\Delta N}{N}$)%
100 以下	1.4
100 ~ 200	8.1
200 ~ 300	16.5
300 ~ 400	21.4
400 ~ 500	20.6
500 ~ 600	15.1
600 ~ 700	9.2
700 ~ 800	4.8
800 ~ 900	2.0
900 以上	0.9

1859 年,麦克斯韦首先应用统计概念,找到了一个速度的分布规律,称为麦克斯韦速度分布,其速度分布曲线如图 65 所示.式中 $f(v) = \frac{1}{N} \frac{\Delta N}{\Delta v}$,就是在速度区间 Δv 内的分子数 ΔN 与总分子数

N 之比,称为麦克斯韦速度分布函数.从曲线可以看出,在某确定的温度下,大多数分子的速度在某个确定值附近,速度很小和很大的分子占的比例很小.

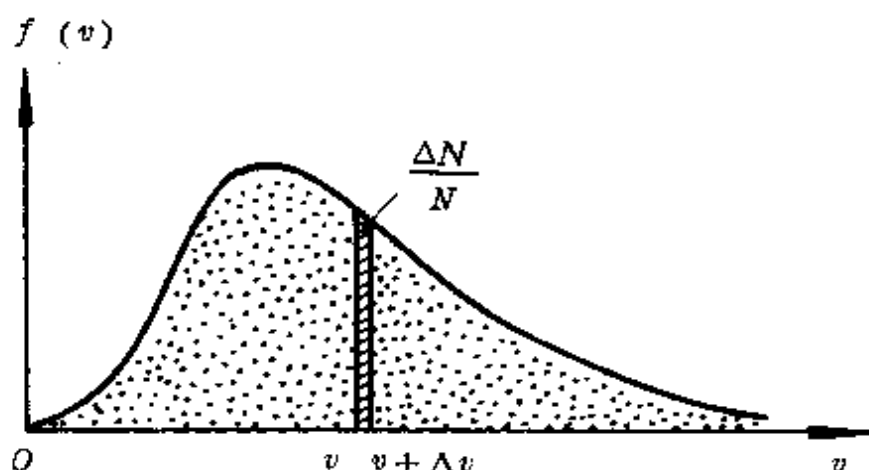


图 65 某温度下速度分布曲线

为了直观地显示分子速度的这种“两头少、中间多”的分布规律,可用伽尔顿板做模拟表现.

如图 66 所示,在钉有很多钉子的板下方用隔板分成许多狭槽,然后从上面的入口处投入许多相同的小钢珠.每一个小钢珠由于与钉子以及钢珠间的相互碰撞,它在下落过程中的路径完全是无规则的,哪一个小钢珠落入哪一条狭槽也完全是偶然的.因此,小钢珠的运动可以与气体分子的运动相类比,如下表所示.

小 钢 珠	气 体 分 子
钢珠与钉子、钢珠与钢珠间的相互碰撞	分子与器壁、分子与分子间的相互碰撞
钢珠下落的路径是无规则的	分子的运动是无规则的
某个钢珠最终落入哪条狭槽是偶然的	某个分子以多大速度运动是偶然的
全体钢珠在狭槽中的分布有一定的规律	所有气体分子的速度大小有一定的分布规律

如果我们重复多次实验,可以发现,当小钢珠总数足够多时,连结每次落入各狭槽中堆叠起来的钢珠的顶端的曲线,基本上是一致的.这个模拟实验可以很直观地告诉我们:大数量个体的无规则运动的统计效果,仍会显示出一定的规律性.

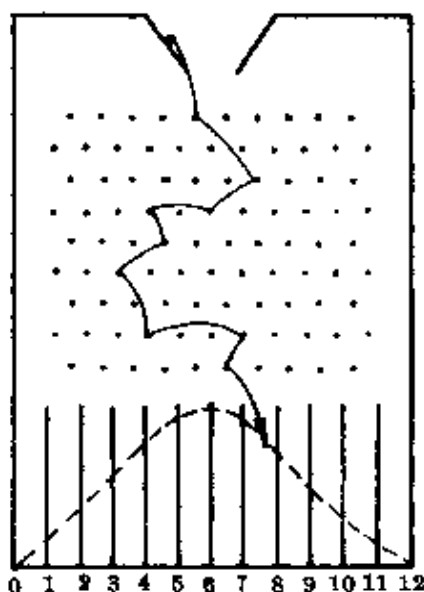


图 66 伽尔顿板

砂摆与扫描

初学者对用示波器显示交流电的波形要加扫描电压往往迷惑不解.如果用砂摆实验作模拟类比,会顿时豁然开朗.

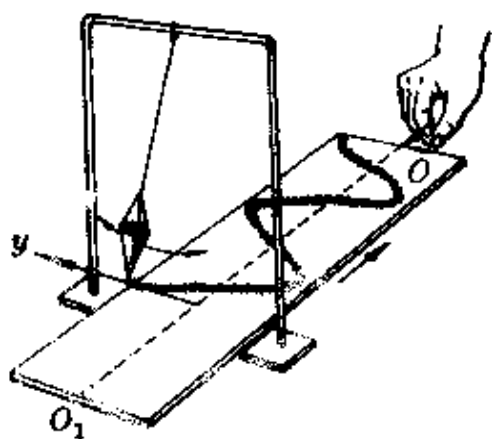


图 67 砂摆实验

图 67 为砂摆实验装置.小砂桶摆动时,由它下方漏出的砂指示出砂摆在该时刻对平衡位置的位移.若不抽动木板,从砂桶漏出的砂将洒落在 y 轴上不同的地方,形成一条直线.匀速抽动木板时,就把原来始终落在 y 轴上的砂沿 OO_1 轴“展开”,板的运动相当一个均匀流逝的时间,这样就能把摆随时间变化的

位移反映出来,得到一条正弦(或余弦)曲线.

示波器中扫描电压的作用也起着均匀流逝的时间的作用.

如图 68 为示波器的电偏转原理图.当入射电子以初速 v_0 沿着平行于板面的方向从偏转板中央射入后,在偏转电压 u_y 作用下发生偏转.电子束离开偏转板后在真空中做匀速直线运动,好像是

从两板中央直接射出来一样.因此在荧光屏上的偏距

$$Y = \left(L + \frac{l}{2} \right) \operatorname{tg} \varphi = \left(L + \frac{l}{2} \right) \frac{el}{dmv_0^2} u_y = k_1 u_y .$$

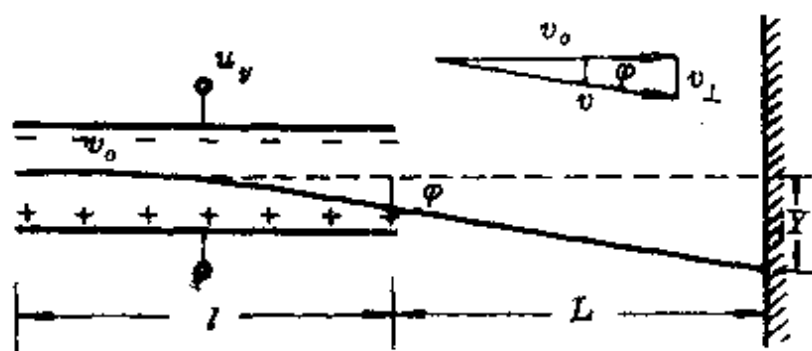


图 68 静电偏转原理

表示电子束在 y 轴上的偏距与偏转电压 u_y 成正比.

实际示波器中有两对偏转板,同理可知在 x 轴上的偏距也与偏转电压 u_x 成正比.即

$$X = k_2 u_x .$$

如果只在 y 轴上加以正弦交变电压 $u_y = U_0 \sin \omega t$, 对应于每一时刻不同的电压,电子束有不同的偏转,即在 y 轴上不同的地方形成一系列亮点.由于人眼的视觉暂留和荧光屏的余辉,看到的是一条沿 y 轴的亮线(图 69).

为了显示正弦电压,必须设法把始终落在 y 轴上的光点沿 x 轴“展开”.为此,可在 x 轴上加上一种随时间均匀变化的电压(通常是锯齿波形电压),即扫描电压.这里的类比关系如下表:

砂摆中匀速运动的木板	示波器 x 轴上的扫描电压
木板的匀速运动能使落在 y 轴上的砂粒沿 x 轴展开	扫描电压随时间均匀变化能使落在 y 轴上的电子沿 x 轴展开
木板的匀速运动相当于均匀流逝的时间	扫描电压的均匀变化相当于均匀流逝的时间

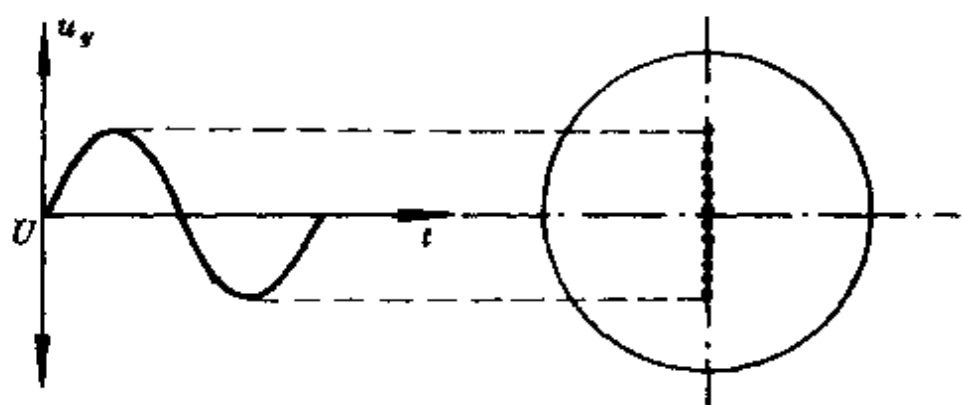


图 69 无扫描电压时显示亮线

所以,只有同时在 x 轴上加上锯齿形电压才能显示出正弦波形(图 70).

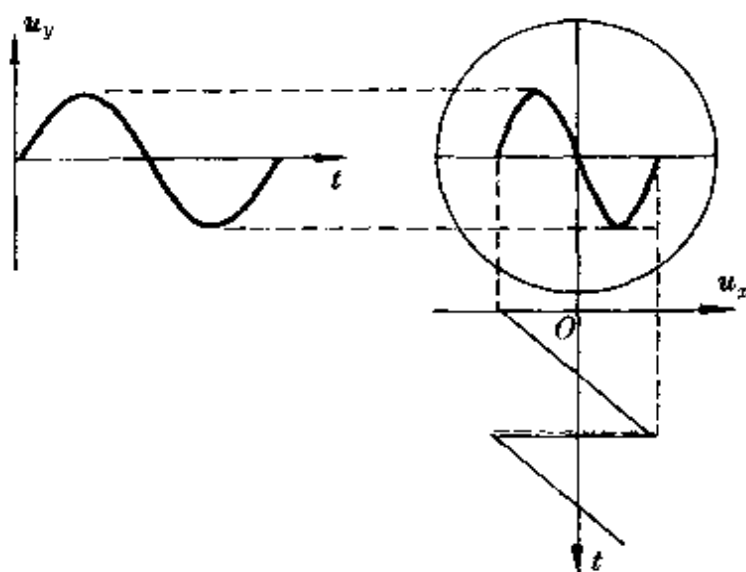


图 70 扫描电压的作用

**光学显微镜与
电子显微镜**

电子显微镜是现代科学技术中一种重要的设备,它就是通过对光学显微镜的模拟而诞生的,它的基本结构和工作原理跟光学显微镜可以形成非常完美的类比,如图 71 所示.

在了解电子显微镜的结构、原理前,我们先简单介绍一下光学显微镜的发展,它的局限性及电子显微镜的构想.

光学显微镜具有悠久的历史,1590年,荷兰米德尔堡的一个眼镜制造商扎哈里耶斯·詹森(Zacharias Janssen)在一个偶然的机
 会里,首先用一个双凸透镜和一个凹凸透镜分别作物镜和目镜,制
 成了第一架显微镜,镜筒长约18英寸,直径约2英寸(1英寸=
 25.4毫米),米德尔堡科学协会至今仍保存着一架这种显微镜,据
 说就是詹森制造的。

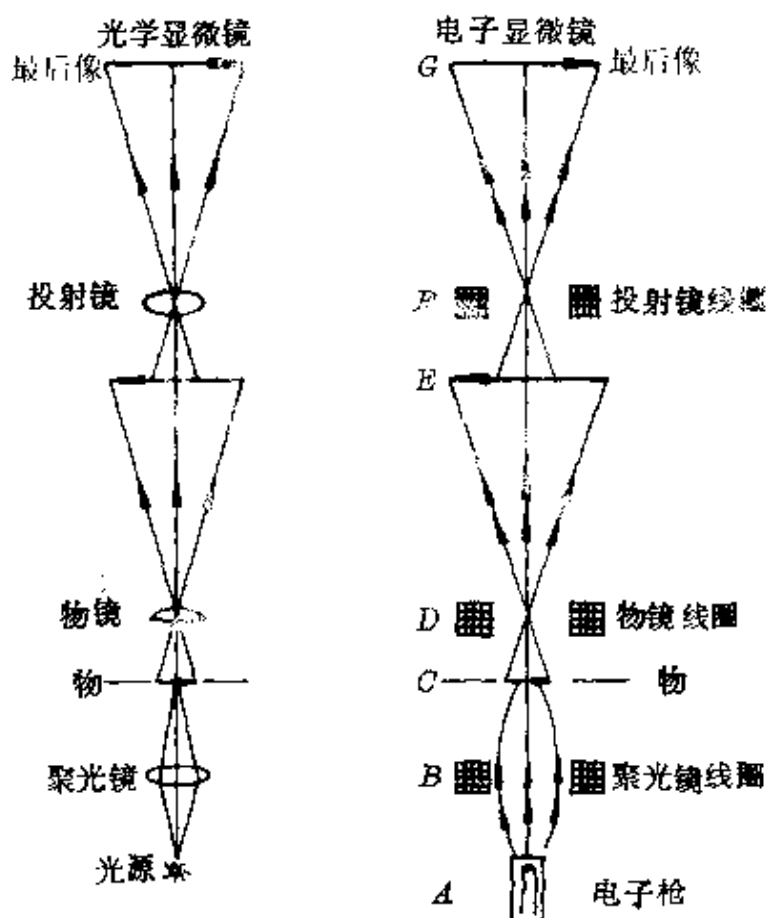


图 71 电子显微镜的光学模拟

17世纪20年代,有人改制成用两块凸透镜分别作物镜和目
 镜的显微镜,以后,随着它在科学研究中的应用日益扩大,显微镜
 的制造在提高和改善透镜的性能、扩大放大倍数等方面都有了很
 大的发展,到19世纪中叶,光学显微镜的像差几乎已减小到极限

值,放大率达到 1000 ~ 1500 倍.

1878 年,德国著名的蔡司光学工厂的创立者埃贝第一个认识到了光学显微镜的极限——即不管再如何改良透镜,光学显微镜的放大率已不可能进一步提高了.这是由作为成像媒介的光本身的特性所决定的.

因为光是具有一定波长的电磁波,为了从光学显微镜中通过光的成像看到物体,物体的尺寸必须大于光的波长.光的波长所给予光学显微镜的这种无法克服的限制,就是光学显微镜发展局限的外部原因.

如果我们用“分辨本领”(即显微镜能分辨得清的两点的最近距离)作定量表示,光学显微镜的分辨本领不超过 200 毫微米(200×10^{-9} 米).由于人眼的分辨本领约为 0.1 毫米,所以折合成有效放大率(人眼分辨本领与显微镜分辨本领之比)为

$$\frac{0.1 \times 10^{-3}}{200 \times 10^{-9}} = 500(\text{倍}).$$

实际使用中以提高 1 ~ 2 倍计算,即放大率为 1000 ~ 1500 倍*.

埃贝非常敏锐地看到光学显微镜这一无法避免的局限性,对未来的显微镜作出了科学的预言:“在今天的科学视野中,我们的视觉所能达到的观察范围,由于受到光的本性的制约而具有某种界限……我相信,将来在追究物质世界的本质时,必然会出现远比今天的显微镜更强有力的有效观察器械.但是这种器械除了它的名称以外,将与显微镜没有共同之处.”埃贝的意思是,未来的显微

* 直径 200 毫微米的粒子放大 500 倍后成为 0.1 毫米大小的像,恰达人眼分辨极限.如放大 1000 倍 ~ 1500 倍成为 0.2 毫米 ~ 0.3 毫米的像,观察起来就显得毫不费力了.

镜不是依靠光线成像的方法。

本世纪 20 年代,法国物理学家德布罗意(L. de. Broglie, 1892—)提出物质波概念,并被美国物理学家戴维森(G. J. Davisson, 1881—1958)和英国物理学家汤姆生(G. P. Thomson, 1892—1975)用实验证实了电子的波动性后,启发人们想到可以用电子束代替光波。

根据德布罗意物质波的波长公式 $\lambda = \frac{h}{mv}$,电子束的波长与其运动速度成反比。采用静电场加速的电子枪时,由

$$eU = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{得} \quad v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

因此,电子束的波长与加速电压的平方根成反比。不同加速电压的电子束的波长与可见光的比较如下:

可见光波长范围		7600 ~ 3900 埃(10^{-10} 米)
不同加速	100 伏	1.23 埃
电压下电	10 000 伏	0.122 埃
子束波长	100 000 伏	0.0387 埃

由于电子束的波长比可见光短得多,因此它的分辨本领将大大提高。

1926 年,德国物理学家布希(H. Busch, 1884—?)根据电子在磁场中的运动首先指出:“具有轴对称性的磁场对电子束说来起着透镜的作用。”布希从理论上设想了利用磁场作为电子透镜(称为磁透镜)*。其原理如图 72 所示。

* 电场也可起透镜作用,称为静电透镜。由于透镜电极只要产生极微小的“污染”,电子像的质量便显著下降,所以已极少采用。

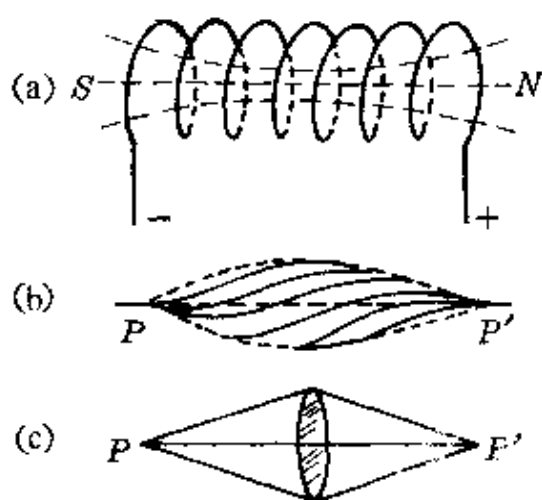


图 72 磁透镜原理

当在线圈中通以直流电流后,线圈中产生磁场.电子束从图 72(a)中 S 方向进入磁场中,在洛仑兹力作用下,电子束沿螺旋线运动,然后汇交于轴上的一点[图 72(b)].类似于一束从点光源 P 点发出的光经凸透镜后会聚于 P' 点一样[图 72(c)].因此,这样一个线圈相当于一个凸透镜,称为磁透镜.

在光学透镜中,焦距由透镜决定.在磁透镜中是通过改变线圈中的电流强度,使其磁感应强度变化,从而使焦距发生变化.在光学透镜中,物距、像距与焦距之间有关系式

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}.$$

在磁透镜中同样适用.这是由布希最先证明的.

这样,利用磁透镜,用电子束代替光线,透过被检物的电子束打到荧光屏上,就可以成为人眼能观察到的物体的映像.

布希提出了著名的电子透镜理论以后,许多科学家竞相进行研究.有趣的是,开始全然没有想到利用电子束来放大物体.

直到 1931 年,柏林工业大学高压实验室中年轻的研究者拉斯卡(E. Ruska, 德国, 1906—?)通过对阴极射线示波器作了一些改进,在首次得到了由电子束形成的铜网的放大像的启发下,才成功地制成了第一台放大 400 倍的粗糙的电子显微镜.

以后,电子显微镜的研制发展很快.到 1939 年,德国西门子公司制造的分辨本领达到 30 埃的世界上最早的实用电子显微镜开

始进入了市场.40年代后,由于电子显微镜的各种应用技术不断发展,电子显微镜的使用跃入多方面研究的时代.通过对光学显微镜的模拟而发明的电子显微镜,展现出—个十分广阔的天地.

4. 类比的鉴别功能

在物理学习中,我们常常对一些相似或相近而本质上迥然有别的概念、公式、定律等加以比较对照,从而有利于分清其差异,认识其特征.这是比较的一种功能.通常在这种比较对照中,并没有类比的推理特征.由于类比是以比较为基础的,在较为宽泛的意义上,我们把它称为类比的鉴别功能.在中学物理中应用得很普遍.

平衡力和作用力与反作用力

这是初学者极容易混淆的两个概念.现比较如下:

	平衡力	作用力与反作用力
同一性	大小相等,方向相反,	两个力作用在同一条直线上
差异性	作用在同一物体上	作用在两个不同物体上
	力的性质不一定相同	力的性质一定相同
	物体一定处于平衡状态	物体可以处于任何运动状态
	不以对方的存在为前提	同时产生同时消失

动量和动能

这是描述机械运动的两个不同的物理量,对应着两种不同的量度机械运动的方式.它们也是初学者不容易认识清楚的两个概念.现比较如下:

	动 量	动 能
定义式	$p = mv$ (千克米/秒)	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$ (焦耳)
方向性	动量的方向与速度方向相同是矢量	无方向,是标量
物理含义	描述物体机械运动状态的物理量 反映物体反抗阻力能运动多久	描述物体机械运动状态的物理量 反映物体反抗阻力能运动多远
相关物理规律	动量的变化等于力在时间过程中的积累作用 $Ft = \Delta mv$	动能的变化等于力在位移过程中的积累作用 $Fs = \Delta E_k$

干涉与衍射 这是波的两个基本特征,现以光的双缝干涉与单缝衍射为例比较如下:

	双缝干涉	单缝衍射
产生条件	两束光频率相同位相差恒定(称相干光)	缝的尺寸与波长相比拟
叠加光束	两束光的叠加	无数束光的叠加
显示图样	中央亮条,两边等间距分布着等宽度的明暗相间条纹	中央最宽最亮的亮条,两边不等间距分布着不等宽的明暗相间条纹

六、类比在中学物理解题中的应用

一位物理学家说过,物理学之所以伟大,在于她可以用为数不多的几个概念、几条规律概括着从宏观天体到微观粒子基本的运动变化规律.此话是否言过其实,姑且不论.不过,就浩如烟海的中学物理习题而言,它们确实只是用不多的概念和规律从不同角度、不同层次上描述着从宏观天体到微观粒子所发生的各种现象.它们之间的共性正为类比思维提供了自由驰骋的时空.

概括起来,类比方法在中学物理解题中的应用,大体可以分为以下两个方面.

1. 建立类比模型 多题归一

根据具体问题中研究对象所处的物理状态和发生的物理过程,通过类比方法,可以把表面上不同的一些问题归并到同一个类比模型中.这样,不仅可以更深刻地认识问题的物理内涵,便于找到解题的入口,还可以从对一些问题的“多题归一”中取得“以少胜多”的效果.

例 1 气球以速度 $v_0 = 10$ 米/秒匀速竖直上升,从气球上掉下一物体,经时间 $t = 17$ 秒落到地面,试求:物体离开气球时气球的高度. $g = 10$ 米/秒².

分析 物体离开气球后,保持跟气球同样的速度,先做竖直上

抛,至最高点后再做自由落体运动.

类比 这个物体离开气体后的运动,可以与水平面上或斜面上的运动相类比(图 73),如下表所示.

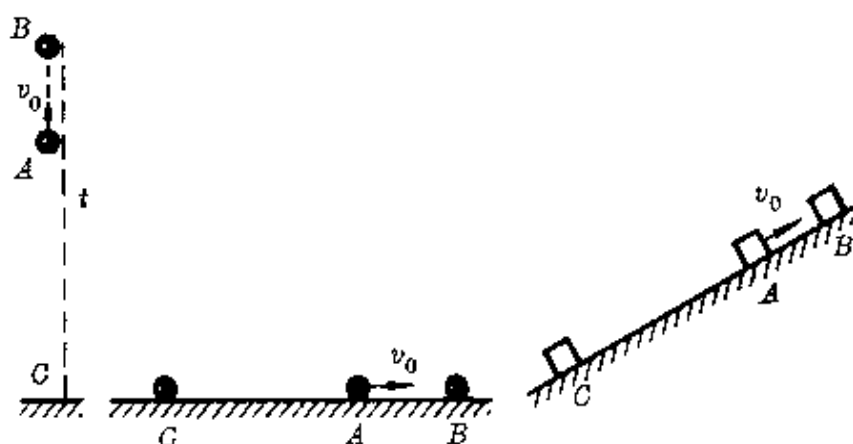


图 73

物体以速度 v_0 竖直上抛,至最高点 B 速度为零	物体以速度 v_0 向右做匀减速运动(或沿光滑斜面向上做匀减速运动),至最右处 B (或斜面上最高处 B)速度为零
物体从最高点自由下落至地面 C	物体从 B 向左做匀加速运动(或沿斜面向下做匀加速运动)至某点 C
从 A 经 B 到 C 的时间为 t	从 A 经 B 到 C 的时间为 t
物体离开气球时气球离地高度 AC	物体开始运动时离开某点 C 的距离 AC

解答 以开始运动的 A 点为坐标原点, v_0 方向为位移正方向,则经时间 t 后的位移 $AC = s$. 由运动学公式,

$$\begin{aligned}
 s &= v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \\
 &= 10 \times 17 \text{ 米} - \frac{1}{2} \times 10 \times 17^2 \text{ 米} \\
 &= -1275 \text{ 米}.
 \end{aligned}$$

式中负号表示物体在抛出点下方. 因此, 物体离开气球时气球离地的高度为 1275 米.

例 2 如图 74 所示, 细绳绕过相距 $2l$ 的两个定滑轮 A 和 B , 两端各挂一个质量为 m 的物体, 在 AB 的中点 C 处挂一个质量为 M 的球, $M < 2m$. 轻轻释放后, 这个球可能达到的最大距离 h 为多少?

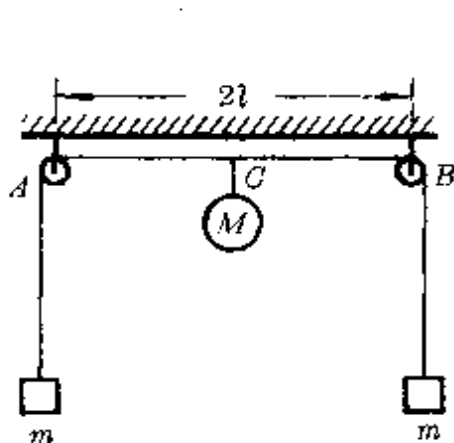


图 74

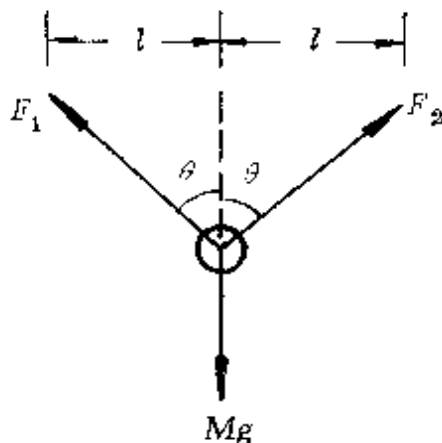


图 75

分析 如果认为小球释放后, 在重力 Mg 、两根细绳的张力 $F_1 = F_2 = mg$ 作用下处于力平衡状态, 由图 75 列出

$$Mg = 2mg \cos \theta,$$

得

$$h = l \operatorname{ctg} \theta.$$

这是不正确的. 因为这不是一个静力学问题.

小球释放后, 开始时球的重力大于 AC 、 BC 两绳中张力的合力, 球向下做加速运动. 随着球的下落, AC 、 BC 两绳中的合力增大, 球下落的加速度减小, 但速度却不断增大. 当小球下落到 $Mg = 2mg \cos \theta$ 的位置 (即静力平衡位置) 时, 小球所受的合力为零, 加速度为零, 速度达到最大值 v_m . 小球继续下落时, AC 、 BC 两绳中张力的合力大于小球重力 Mg , 小球向下做减速运动 (加速度方向向上). 随着球的下落, 小球向上的加速度越来越大, 下落速度越来越

越小,至速度等于零时,小球下降到最低点.以后,小球重又向上做加速运动.

类比 根据对小球运动过程的分析,可以把它跟一个小球从高处落到一个弹簧上的情况相类比(图 76).

小球释放后,在重力 Mg 大于两绳中张力的合力时,球向下做加速运动	小球接触弹簧后,在重力大于弹簧弹力时,球向下做加速运动
当 $Mg = 2mg \cos\theta$ 时,小球加速度等于零,速度达到最大	当 $mg = kx_0$ 时,小球下降的加速度等于零,速度达到最大
小球越过平衡位置后向下做减速运动,至速度为零时达最低点	小球越过平衡位置后向下做减速运动,至速度为零时达最低点

解答 在小球下降过程中,对球和两个重物的系统(在图 76 中即球与弹簧系统),没有其他外力做功,只有重力做功,系统的机械能守恒.于是由

$$Mgh = 2mg(\sqrt{h^2 + l^2} - l),$$

得小球下降最大高度

$$h = \frac{4Mml}{4m^2 - M^2}.$$

例 3 在水平地面上平卧着一根长 l 、质量为 m 的均质杆 AB ,当把它绕 B 端缓缓竖直的过程中做功多少(图 77)?

分析 竖立过程中是变力做功,缓缓竖立,可以不考虑动能的变化.

解答 外力做的功等于杆在两位置时重力势能的变化(增加),即

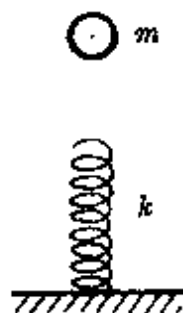


图 76

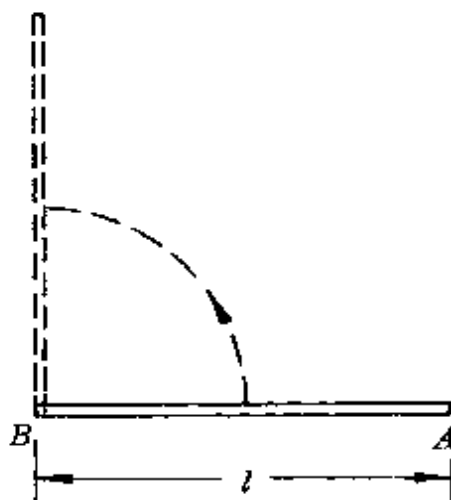


图 77

$$W = \Delta E_p = mg \cdot \frac{l}{2} = \frac{1}{2} mgl.$$

类比 与这个问题相类比,可以扩展变换成几个问题.

题(1) 如图 78(a)所示,把一个边长为 l 、质量 m 的均质立方体绕一条棱边缓缓翻倒,需做功多少?

题(2) 如图 78(b)所示,把一条长 l 、质量 m 的均质链,从盘在地上的位置拉起一端缓缓向上,恰使它刚好全部拉直需做功多少?

题(3) 一根质量为 $m = 0.5$ 千克,长 $l = 1$ 米的均质米尺,一端伸出水平桌面 $d = 20$ 厘米,用一个竖直力缓缓下压,使在桌面上的一端抬高 $H = 24$ 厘米需做功多少[图 78(c)]? 取 $g = 10$ 米/秒².

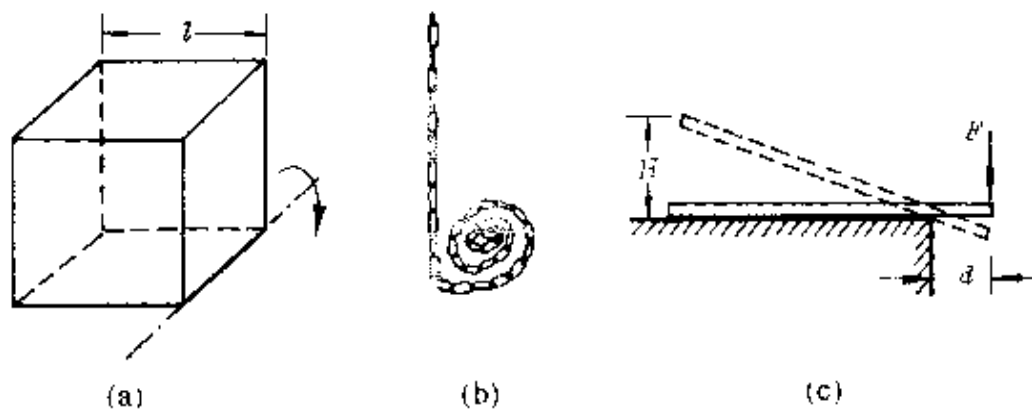


图 78

解答 这三个题目都属于变力做功,做功大小都等于物体重力势能的增加.

题(1) 绕右边的棱边转到对角面竖直时,立方体重心的升高为

$$\Delta h = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} l - \frac{1}{2} l \right) = \frac{1}{2} (\sqrt{2} - 1) l.$$

外力做功

$$W_1 = mg\Delta h = \frac{1}{2}(\sqrt{2} - 1)mgl.$$

题(2) 拉到刚好伸直时均质链重心升高 $\Delta h = \frac{l}{2}$, 外力做功

$$W_2 = mg\Delta h = \frac{1}{2}mgl.$$

题(3) 由相似三角形对应边成比例

$$(l - d) : H = \left(\frac{l}{2} - d \right) : \Delta h,$$

得重心升高

$$\begin{aligned} \Delta h &= \frac{\frac{l}{2} - d}{l - d} H = \frac{50 - 20}{100 - 20} \times 24 \text{ 厘米} = 9 \text{ 厘米} \\ &= 0.09 \text{ 米}. \end{aligned}$$

外力做功

$$W_3 = mg\Delta h = 0.5 \times 10 \times 0.09 \text{ 焦} = 0.45 \text{ 焦}.$$

例 4 如图 79(a)所示,在岸边通过滑轮用恒定的收绳速度 v 拉船靠岸,当绳与水平方向夹角为 α 时,则船运动的速度为

- A. 等于 v ; B. 等于 $v \cos \alpha$;
C. 等于 $v / \cos \alpha$; D. 等于 $v \tan \alpha$.

分析 收绳的速度 v 可分解为水平分速度 $v_x = v \cos \alpha$, 竖直分速度 $v_y = v \sin \alpha$. 其中 v_x 起着使船靠岸的作用, 而 v_y 则有使船跳出水面的作用. 因为实际上船并未跳离水面, 可见船在竖直方向的合速度必应为零, 即 v_y 应被一个等值反向的速度 v_y' 所抵消. 这个 v_y' 就是由于收绳时 α 角的不断变化, 绳子有着绕滑轮顺时针向转动的效果而形成的切向速度 v' 所分解出来的, 它的另一个水平分量 v_x' 也起着使船靠岸的作用[图 79(b)].

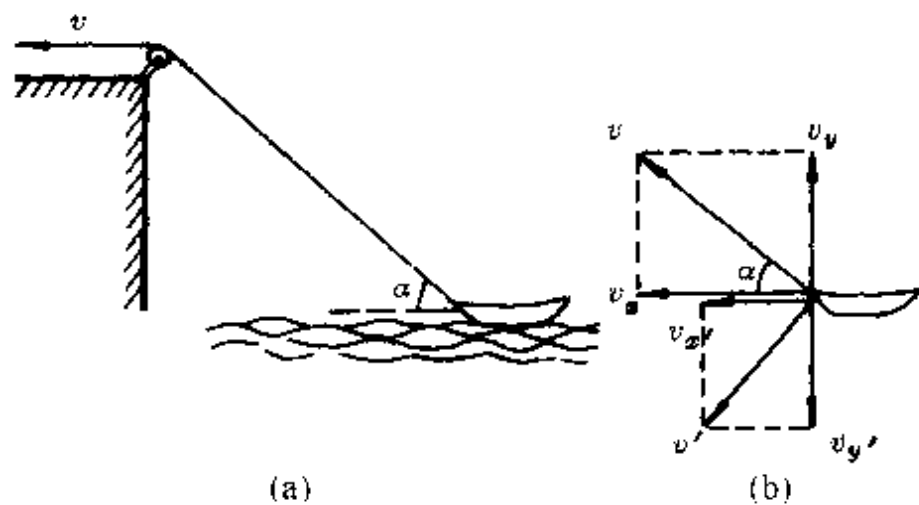


图 79

解答 根据上面的分析

$$v_x' = v_y,$$

即 $v' \cos \alpha = v \sin \alpha.$

得 $v' = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} v.$

船靠岸的速度

$$V = v_x + v_x' = v \cos \alpha + v' \sin \alpha$$

$$= v \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} v \sin \alpha$$

$$= \frac{v}{\cos \alpha} > v.$$

所以正确答案为 C.

说明 这个例题很容易错选成 A, 尤其是 B. 后者是采用常规的沿水平、竖直两方向分解的结果, 但却疏忽了 v_y 的影响.

由题解结果可知, 实际收绳的速度为船速的一个分量, 即应按图 80 的方式

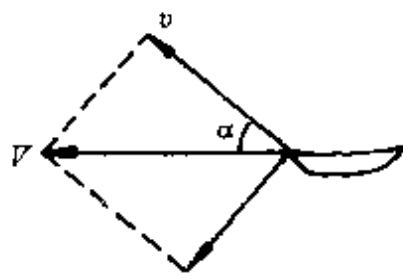


图 80

进行分解.

类比 有许多题目中运动速度的效果,可与例 4 相类比.

题(1) 如图 81(a)所示,在一个光滑平台上有一个质量为 m 的物体,用绳子跨过滑轮后由地面上的人所牵引,绳端离平台高度为 h . 设人以速度 v_0 匀速右行,则当人从平台边缘向右前进了 s 的距离时,人对物体做的功为多少?

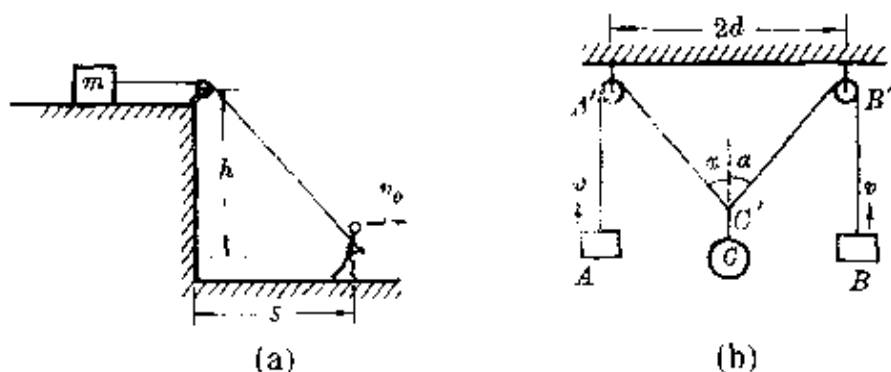


图 81

题(2) 如图 81(b)所示,两定滑轮相距 $2d$,通过细绳悬挂质量相等的两个物体 A 和 B . 当在绳上两滑轮中点悬挂一个小球 C 时, A 、 B 两物体被带动而上升. 试问:当连接 C 球的两绳与竖直方向夹角为 α 、 A 和 B 两物上升速度为 v 时,小球 C 在该瞬间的下落速度多大?

题(3) 一辆车通过一根跨过定滑轮的绳 PQ 提升井中质量为 m 的物体,如图 82 所示. 绳的 P 端拴在车后的挂钩上, Q 端拴在物体上. 设绳的总长不变,绳的质量、定滑轮的质量和尺寸、滑轮上的摩擦都忽略不计. 开始时,车在 A 点,左右两侧绳都已绷紧并且是竖直的,左侧绳长为 H . 提升时,车加速向左运动,沿水平方向从 A 经过 B 驶向 C . 设 A 到 B 的距离也为 H . 车过 B 点时速度为 v_B . 求在车由 A 移到 B 的过程中,绳 Q 端的拉力对物体做的功.

题(4) 质量分别为 $m = 1$ 千克、 $M = 5$ 千克的两物体用细绳

通过定滑轮相连. m 放在倾角 $\theta = 37^\circ$ 的斜面上, 其与斜面间的动摩擦系数 $\mu = 0.5$. M 套在光滑直杆上, 杆与滑轮相距 $l = 4$ 米, 开始时系住 M 的细绳处于水平状态(图 83). 当 M 由静止开始下滑 $h = 3$ 米时的速度多大?

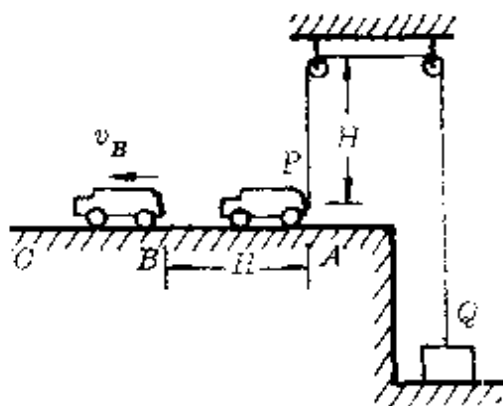


图 82

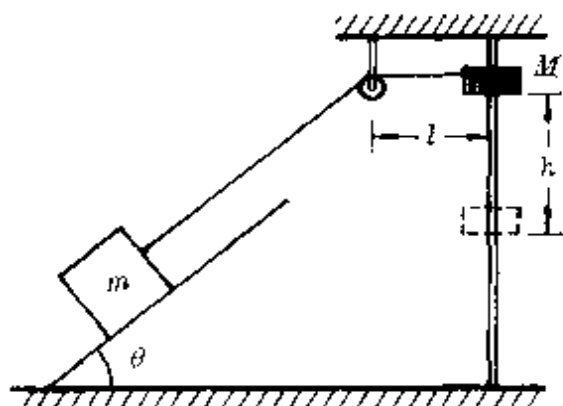


图 83

解答 这几个题目中对有关速度的正确分解是求解的一个关键. 为此, 可与例 4 相类比.

题(1) 物体滑行速度应为人前行速度 v_0 沿绳子方向的分速度(图 84). 即

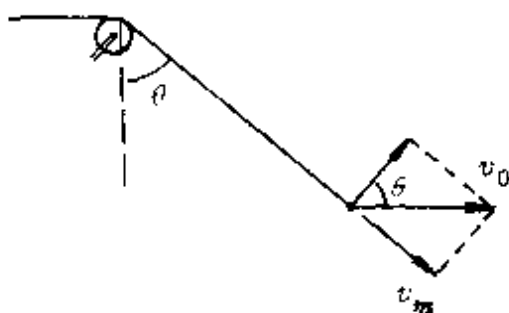


图 84

$$v_m = v_0 \sin \theta = v_0 \frac{s}{\sqrt{s^2 + h^2}}$$

式中 θ 为绳与竖直方向间的夹角. 所以人对物体做的功为

$$W = \frac{1}{2} m v_m^2 = \frac{m s^2 v_0^2}{2(s^2 + h^2)}$$

题(2) 这里很容易认为 $v_c = 2v \cos \alpha$, 这是不对的. 因为 C 球的下降速率决定于斜向细绳 $A'C'$ 或 $B'C'$ 的“增长率”, 因此只需从

一根细绳的速度效果考虑. 根据与例 4 中收船的运动相类比(图 85), 可得 C 球的下降速率

$$v_c = \frac{v}{\cos \alpha}.$$

题(3) 提升重物的速度等于收绳的速度, 与例 4 相类比可知, 它应等于车速沿绳子方向的分速度(图 86), 即

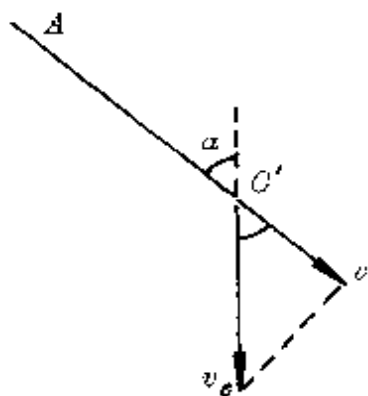


图 85

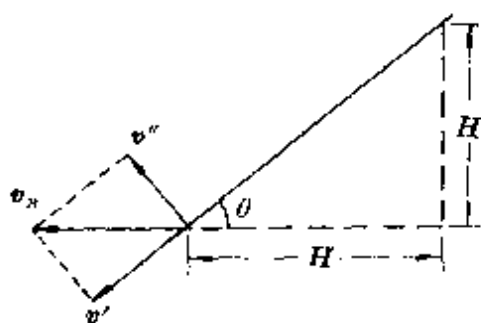


图 86

$$v' = v_B \cos \theta = \frac{\sqrt{2}}{2} v_B.$$

拉力对重物做的功等于重物机械能的增加, 即

$$\begin{aligned} W &= \Delta E_K + \Delta E_P = \frac{1}{2} m v'^2 + mg \Delta h \\ &= \frac{1}{4} m v_B^2 + mg(\sqrt{2} - 1) H. \end{aligned}$$

题(4) M 下落 h 时, m、M 两者速度的关系根据与例 4 类比可知(图 87)

$$v_m = v_M \cos \alpha = v_M \frac{h}{\sqrt{h^2 + l^2}}.$$

对 m、M 系统用动能定理

$$\sum W = \Delta E_K,$$

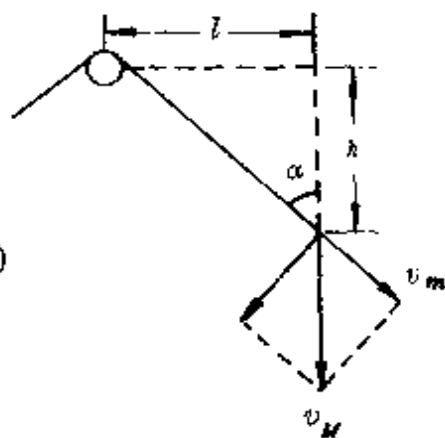


图 87

$$\begin{aligned}
 \text{即} \quad & Mgh - (mgs\sin\theta + \mu mg\cos\theta)(\sqrt{h^2 + l^2} - l) \\
 & = \frac{1}{2} Mv_M^2 + \frac{1}{2} mv_m^2 = \frac{1}{2} \left(M + \frac{mh^2}{h^2 + l^2} \right) v_M^2.
 \end{aligned}$$

代入数据得

$$v_M = 7.2 \text{ 米/秒.}$$

例 5 在光滑水平桌面上放有质量分别为 M 和 m 的两个均质球, 中间嵌入一个用线缚住处于压缩状态的轻弹簧, 弹簧与两球并不连结(图 88). 试分析: 当按住质量为 M 的大球或两球都自由可动时, 烧断缚住弹簧的细线后, 质量为 m 的小球在两种情况下弹出的速度之比.

分析 处于压缩状态的弹簧贮有一定的弹性势能, 设为 E_0 .

当按住大球时, 烧断细线弹簧恢复形变所释放的弹性势能全部转变为小球的动能; 当两球可自由运动时, 弹簧的弹性势能转变为两球的动能.

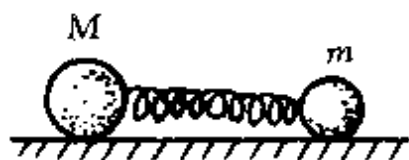


图 88

解答 大球固定时, 由

$$E_0 = \frac{1}{2} mv_1^2, \quad (1)$$

得小球弹出速度

$$v_1 = \sqrt{\frac{2E_0}{m}}. \quad (2)$$

当两球都可自由运动时, 由总能量守恒

$$E_0 = \frac{1}{2} mv_2^2 + \frac{1}{2} MV^2, \quad (3)$$

和两球及弹簧系统水平方向动量守恒, 得

$$0 = mv_2 + MV. \quad (4)$$

联立两式得两球可动时小球弹出速度

$$v_2 = \sqrt{\frac{M}{M+m} \cdot \frac{2E_0}{m}}. \quad (5)$$

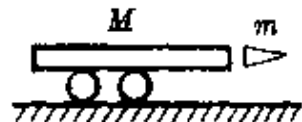
所以,两情况中小球弹出速度之比

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{M+m}{M}} > 1. \quad (6)$$

即大球被固定时,小球被弹出的速度较大.

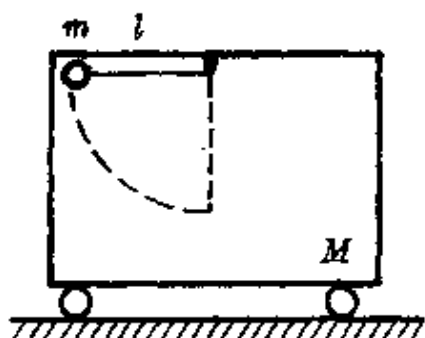
类比 从上面的例题通过类比可以扩展变换成下面几个问题.

题(1) 在光滑水平导轨上,有一辆质量为 M 的平射炮车,所发射炮弹的质量为 m . 在炮车固定和可以自由反冲两情况下,炮弹发射的初速度之比为多少[图 89(a)]?



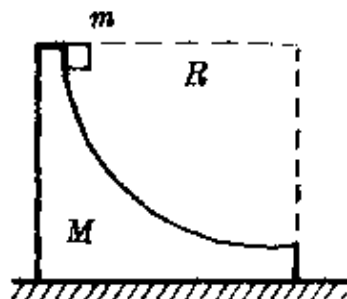
(a)

题(2) 在光滑水平面上有一辆小车,车上有一个支架,总质量为 M ,支架上用一根长 l 的细线悬挂一个质量为 m 的小球,现把细线拉至水平位置后轻轻释放,在小车固定和可自由运动时,小球摆至最低位置时的速度分别多大[图 89(b)]?



(b)

题(3) 在光滑水平面上有一个质量为 M 、半径为 R 的 $1/4$ 光滑圆弧槽,一个质量为 m 的小滑块从槽顶端由静止下滑,求在槽固定和可自由滑动时,小滑块脱离槽口的速度分别多大[图 89(c)]?



(c)

题(4) 如图 90 所示,在水平光滑桌面

图 89

上放一质量为 M 的玩具小车,在小车的平台(小车的一部分)上有一质量可忽略的弹簧,一端固定在平台上,另一端用质量为 m 的小球将弹簧压缩一定距离后用细线缚住.用手将小球固定在桌面上,然后烧断细线,小球就被弹出,落在车上 A 点, $OA = s$.如果小车不固定而烧断细线,球将落在车上何处? 设小车足够长,球不致落在车外.

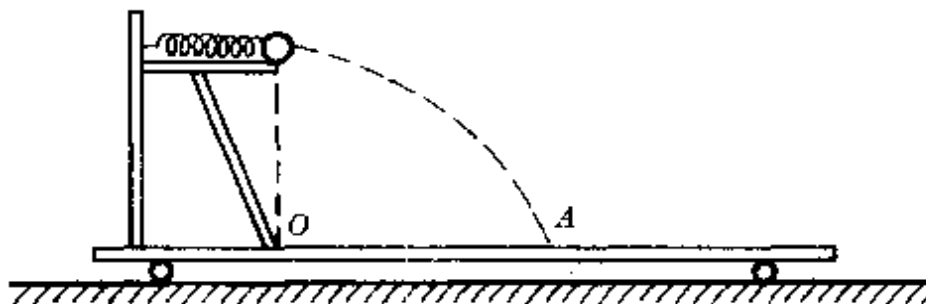


图 90

解答 这几个题目表面上各不相同,难易也有差异,实质上可以与例 5 的情况构成很完美的类比:

例 5 中弹簧贮存的弹性势能 E_0 、题(1)中火药引爆释放的能量 E 、题(2)中小球相对最低点的重力势能 E_p 、题(3)中小滑块相对槽口的重力势能 E_p ,也就是题(4)中车固定时小球获得的总动能.

对题(1),炮车固定和可动时炮弹发射初速度之比与例 5 相同,即

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{M+m}{M}} > 1.$$

对题(2)、题(3),只需把例 5 算式②、⑤中的 E_0 分别用 $E_0 = mgl$ 、 $E_0 = mgR$ 代入即得车与半圆槽固定和可动时,小球和滑块至最低点时的速度.

对题(4),例5中算式①、③、④同样成立.又据题意,当车不动时,由平抛运动知

$$v_1 = \frac{s}{t} = s\sqrt{\frac{g}{2h}}, \text{ 或 } v_1^2 = \frac{s^2 g}{2h}.$$

因此原弹簧中贮存的弹性势能

$$E_0 = \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{ms^2 g}{4h}.$$

将它代入例5中算式⑤,得小车可动时小球弹出速度

$$v_2 = \sqrt{\frac{M}{M+m} \cdot \frac{2E_0}{m}} = \sqrt{\frac{M}{M+m} s^2 \cdot \frac{g}{2h}}.$$

再结合例5中④式得小车反冲速度大小

$$V = \frac{m}{M}v_2.$$

则小车可动时,球相对于车的平抛速度大小为

$$u = v_2 + V = \left(1 + \frac{m}{M}\right)v_2 = \sqrt{\frac{M+m}{M} s^2 \cdot \frac{g}{2h}}.$$

由平抛运动规律得小球落在车上的 A' 处离 O 点的距离

$$s' = OA' = ut = u\sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{M+m}{M}} s.$$

例6 一艘小船长 $l = 3$ 米,质量 $M = 120$ 千克,停在静水中.船上有一人,质量 $m = 60$ 千克,当他从船头走到船尾的时候,船的位置发生怎样的变化? 水的阻力不计.

分析 人在船上走动时,人与船发生相互作用.由于不计水的阻力,水平方向无其他外力作用.因此,人与船这一系统相互作用前后系统的总动量守恒.由

$$0 = mv_m + Mv_M = m \frac{l+x}{t} + M \frac{x}{t},$$

即可求出人从船头走到船尾的时间(t)内船的位移 x . 也可以根据从动量守恒定律得出的“在内力作用下不会改变系统质心的运动状态”的推论求解.

解答 如图 91 所示, 当人在船头 H 时, 人船系统的质心位置在通过 A 的竖直线上. 由力矩平衡原理

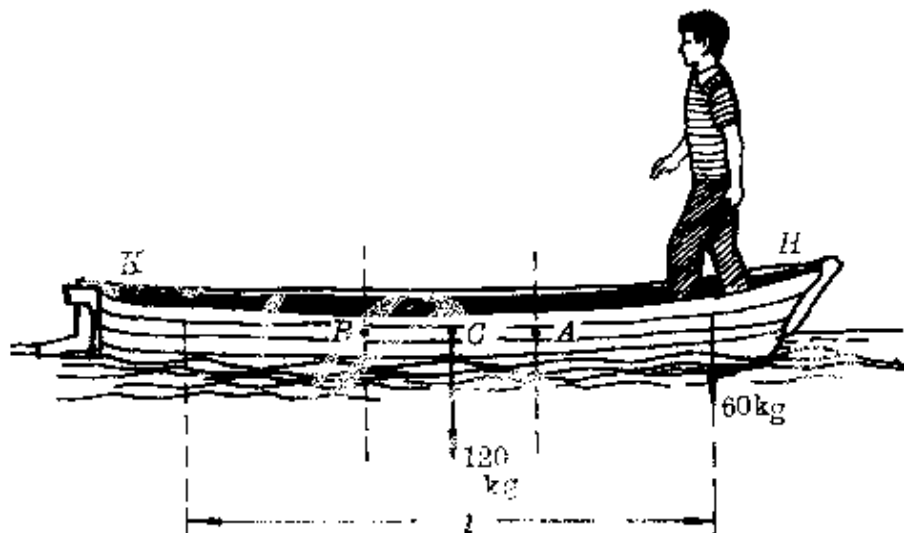


图 91

$$Mgx_1 = mg\left(\frac{l}{2} - x_1\right),$$

得
$$x_1 = AC = \frac{m}{2(m+M)}l = \frac{60}{2(60+120)} \times 3 \text{ 米}$$

$$= 0.5 \text{ 米}.$$

当人走到船尾 K 时, 人船系统的质心位置则移到通过 B 的竖直线上, 同理得

$$x_2 = BC = \frac{m}{2(m+M)}l = 0.5 \text{ 米}.$$

由于人船系统水平方向不受外力, 作用前后系统的质心位置应不变. 因此当人从船头走到船尾时, 船必后退, 使原来通过 B 的竖直线与通过 A 的竖直线重合, 所以船后退距离

$$x = x_1 + x_2 = 1 \text{ 米.}$$

类比 与这个问题相类比,还有许多不同形式的问题.

题(1) 如图 92(a)所示,一艘小船静止在平静的水面上.船分前舱和后舱,前舱有一台抽水机,不计刚开始抽水和将停止抽水的过程,也不计船所受到的阻力,试研究下列两种情况时船的运动:

- ①抽水机把水从前舱抽往后舱;
- ②前、后舱互相连接,抽水机把水从前舱抽往后舱.

题(2) 一艘小船长 l , 质量为 M , 船头和船尾分别坐着质量为 m_1 、 m_2 的两捕鱼人, 当两人互换位置后, 船的位移是多少? 水的阻力不计.

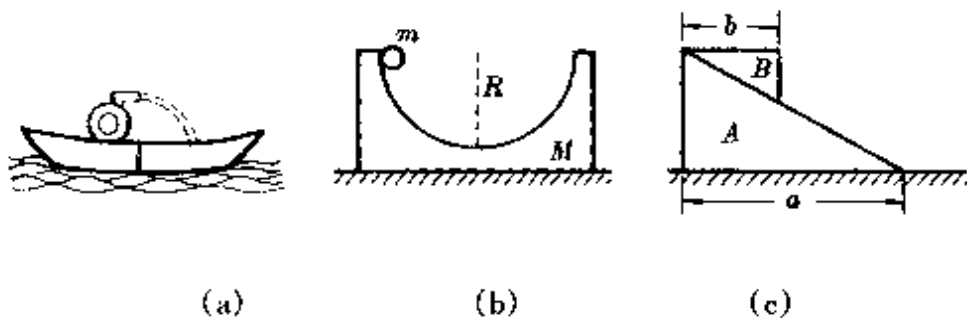


图 92

题(3) 在光滑水平面上放有一块带有半径为 R 的光滑半圆槽, 一个质量为 m 的小球从槽口静止下滑, 当它滑至半圆槽另一端时, 槽的位移多大[图 92(b)]?

题(4) 在光滑的水平面上叠放着两个均质斜面体 A 、 B , 已知 A 的质量是 B 的 3 倍, 水平底边长分别为 a 和 b , 如图 92(c)所示. 当斜面体 B 从 A 的顶端滑到底端时, 斜面体 A 移动的距离是多少?

解答 这几个题目与例 6 有异曲同工之妙, 仅是计算难易略有不同.

题(1) 水从前舱抽到后舱,相当于人从前舱走到后舱,船将匀速向前.前后舱互相连贯时,水从前舱抽到后舱,整个系统质心位置不变,船仍保持静止.

题(2) 未交换位置时,设系统质心位于 C (图 93),它离右边的人为 x_1 ,由

$$m_1 g x_1 = m_2 g (l - x_1) + Mg \left(\frac{l}{2} - x_1 \right),$$

得
$$x_1 = \frac{m_2 + \frac{M}{2}}{m_2 + m_2 + M} l.$$

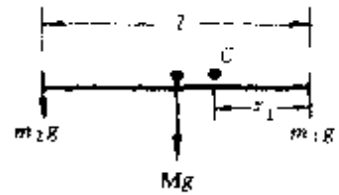


图 93

两人交换位置后,系统质心偏在离船的左端 x_1 处.根据质心位置不变的道理,易位后船的位移

$$x = 2 \left(\frac{l}{2} - x_1 \right) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2 + M} l.$$

题(3) 球在左端时,系统质心离中央竖直线的距离为 $x_1 = \frac{m}{m+M} R$,所以,球滚到右端时,半圆槽的位移

$$x = 2x_1 = \frac{2m}{m+M} R.$$

题(4) 建立坐标系如图 94 所示.设斜面体 A 、 B 的质心 C_A 、 C_B 的初始横坐标分别为 x_A 、 x_B , B 滑到底端时 C_A 、 C_B 的横坐标为 x_A' 、 x_B' .

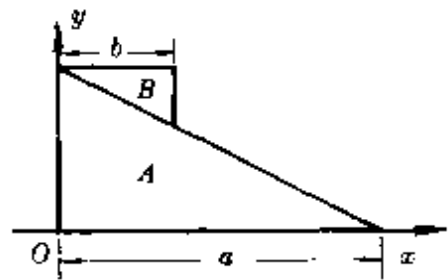


图 94

由几何知识知 A 、 B 的初始坐标分别为

$$x_A = \frac{1}{3} a, x_B = \frac{2}{3} b.$$

设 B 滑到底端时, A 移动距离为 l , 则 A 、 B 质心的横坐标为

$$x_A' = \frac{a}{3} + l, x_B' = a - \frac{b}{3} + l.$$

由力矩平衡得 A 、 B 两斜面体滑动前后的公共质心位置坐标分别为

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{3mg \cdot \frac{a}{3} + mg \cdot \frac{2}{3} b}{4mg} = \frac{3a + 2b}{12}, \\ x_c' &= \frac{3mg \left(\frac{a}{3} + l \right) + mg \left(a - \frac{b}{3} + l \right)}{4mg} \\ &= \frac{6a - b + 12l}{12}. \end{aligned}$$

系统不受水平外力时, 质心位置横坐标不变, 即 $x_c = x_c'$, 于是得

$$l = -\frac{a-b}{4}.$$

负号表示斜面体 A 左移, 移动距离为 $\frac{a-b}{4}$.

2. 展开类比联想 出奇制胜

下棋、打仗, 往往一个妙着、一支奇兵, 能使己方化险为夷, 反败为胜. 解题中也相仿, 有时面对难题困扰, 百思不得其解之时, 从类比思考中闪过的一缕光辉, 也许能使你茅塞顿开或化难为易, 同样感受到如下棋、打仗中出奇制胜的莫大喜悦. 现举数例共同体会一下.

例 1 巡航快艇 A 从港口 P 出发去拦截正以速度 v_B 沿直线 MN 航行的船 B . 港口 P 与 B 船航线 MN 的垂直距离为 a , A 艇启

航时, B 船与港口相距为 b ($b > a$), 如图 95 所示. 如果略去 A 艇启动时的加速过程, 认为它始终做匀速运动, 试求 A 艇能拦到 B 船所需的最小速率.

分析 A 艇拦截到 B 船, 表示两船能相遇. 若以 B 船为参照物, A 艇相对 B 船的速度方向只要沿着图 95 中 PB 方向, 就可确保 A 艇拦截成功.

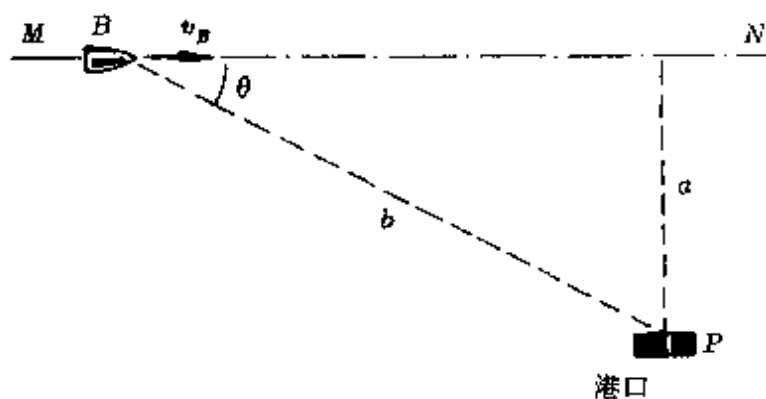


图 95

因为 A 相对 B 的速度

$$\vec{v}_{AB} = \vec{v}_A - \vec{v}_B = \vec{v}_A + (-\vec{v}_B).$$

其速度矢量图如图 96 所示, \vec{v}_{AB} 恰与两被加矢量构成一个封闭三角形.

类比 因图 96 中矢量 $(-\vec{v}_B)$ 的大小、方向一定, \vec{v}_{AB} 与 $(-\vec{v}_B)$ 间的方向角 θ 也一定 $(\sin\theta = \frac{a}{b})$, 为求完成封闭三角形时 \vec{v}_A 的最小值, 可以把它与悬挂在细线上小球的静力平衡作一类比.

如图 97 所示, 质量为 m 的小球悬挂在细线上, 保持悬线与竖直方向间夹角 θ 一定, 要求使小球平衡的最小拉力 F .

因为小球受到三个共点力作用: 重力 mg 、细线张力 T 、未知拉力 F , 平衡时这三个力也构成一封闭三角形, 因此悬挂小球的受力

与拦截快艇的速度间形成的类比关系如下表：

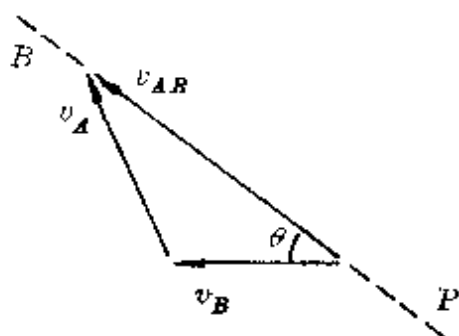


图 96

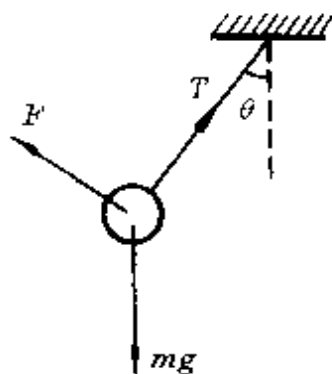


图 97

悬挂小球	拦截快艇
恒定的重力 mg	恒定的船速 $(-\vec{v}_B)$
悬线与竖直方向间恒定的夹角 θ	相对速度 \vec{v}_{AB} 与 $(-\vec{v}_B)$ 间恒定的夹角 θ
平衡时所受三力构成封闭三角形	三个速度矢量构成封闭三角形

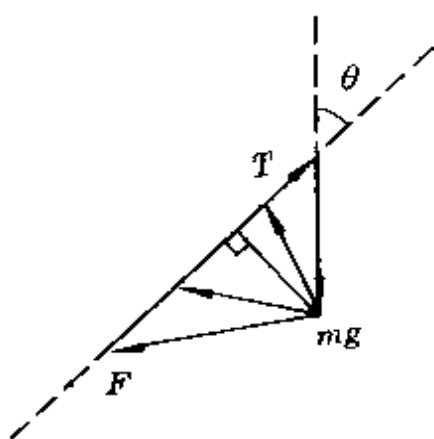


图 98(a)

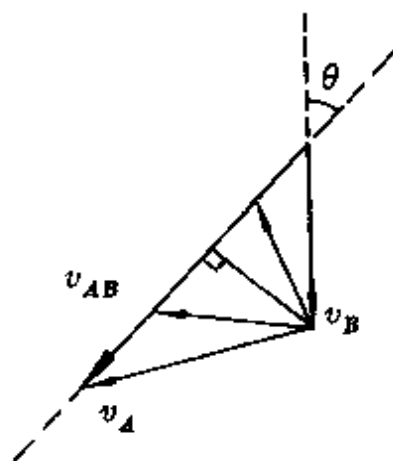


图 98(b)

解答 根据上述类比关系可知,快艇 A 能拦截 B 船的最小速度的方向应垂直 PB 连线,所以最小速率为

$$v_{\min} = v_B \sin\theta = \frac{a}{b} v_B.$$

说明 本题如用其他解法都较繁复,结合参照物的选取,展开类比联想,可说是最为简捷巧妙的方法了.

例 2 在光滑水平面上静放着一辆质量为 m_2 的小车,车上装有光滑的弧形轨道.一个质量为 m_1 的铁球以速度 v_1 沿弧形轨道水平部分射入(图 99),并沿弧形轨道上升至高 h 处后再沿轨道下降脱离小车.若 $m_1 = m_2$,则铁球脱离小车时

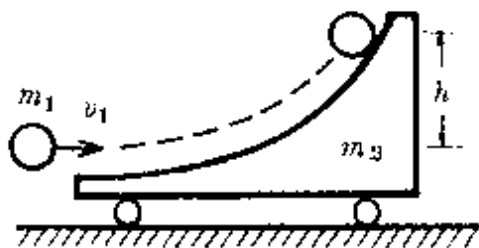
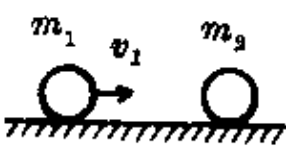


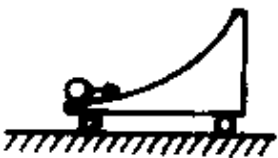

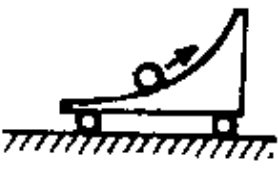

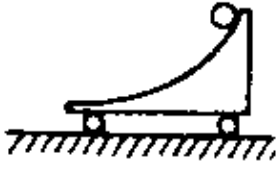


图 99


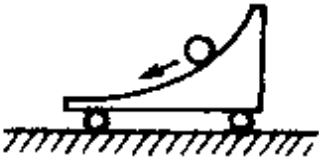
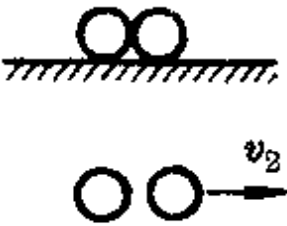
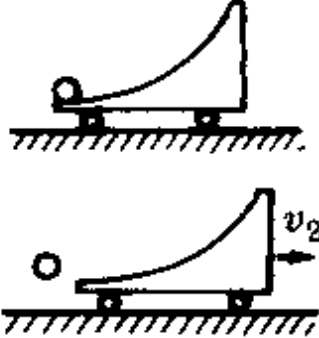
- A. 速度大小为 v_1 , 方向水平向左;
- B. 速度大小为 $\sqrt{2gh}$, 方向水平向左;
- C. 速度大小为 $\frac{\sqrt{2}}{2}v_1$, 方向水平向左;
- D. 速度为零, 做自由落体运动.

分析 铁球射入弧形槽后与小车发生相互作用.如把铁球 + 小车作为一个系统,由于水平方向无外力作用,水平方向动量守恒.又由于弧形槽光滑,铁球与小车相互作用过程中无机械能损失,作用前后总能量守恒.

类比 根据铁球与小车相互作用过程的特点,可把它类比于两弹性球相碰,如下页表所示.

类比对象	两弹性球相碰	球与车作用
作用前	 <p style="text-align: center;">图 100(a)</p>	 <p style="text-align: center;">图 100(b)</p>
开始发生作用	 <p style="text-align: center;">两球接触 图 101(a)</p>	 <p style="text-align: center;">球射进槽口 图 101(b)</p>
相互作用过程	 <p style="text-align: center;">互相挤压，一部分动能 转化为弹性势能 图 102(a)</p>	 <p style="text-align: center;">球沿槽上升，一部分动 能转化为重力势能 图 102(b)</p>
	 <p style="text-align: center;">形变达最大弹性势能 最大 图 103(a)</p>	 <p style="text-align: center;">小球升得最高重力势 能最大 图 103(b)</p>

续表

类比对象	两弹性球相碰	球与车作用
两物体继续发生相互作用	 <p>形变恢复阶段 图 104(a)</p>	 <p>小球沿槽下滑 图 104(b)</p>
相互作用过程	 <p>$m_1 \ m_2 \rightarrow v_2$ 图 105(a)</p>	 <p>图 105(b)</p>

解答 根据质量相等的两球发生弹性碰撞时互换速度的结果可知,小球脱离小车时速度为零,做自由落体运动.正确答案为 D.

说明 如根据球与车相互作用时动量守恒、总动能守恒,由

$$m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2',$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2,$$

又 $m_1 = m_2,$

联立解得结果 $v_1' = 0, v_2' = v_1,$ 再作出选择就比较繁复了.

例 3 在光滑的水平轨道上有两个半径都是 r 的小球 A 和 B,

质量分别为 m 和 $2m$, 当两球心间的距离大于 l (l 比 $2r$ 大得多) 时, 两球之间无相互作用力; 当两球心间的距离等于或小于 l 时, 两球间存在相互作用的恒定斥力 F . 设 A 球从远离 B 球处以速度 v_0 沿两球连心线向原来静止的 B 球运动, 如图 106 所示. 欲使两球不发生接触, v_0 必须满足什么条件?

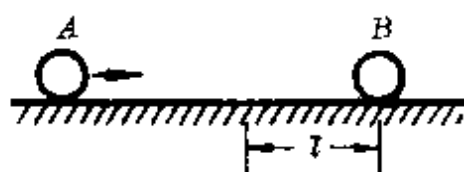


图 106

分析 A 球向 B 球运动接近至 A 、 B 间的距离小于 l 以后, A 球因受恒定斥力 F 的作用, 做匀减速运动, A 球的速度逐渐减小, B 球受恒定斥力 F 作用, 做匀加速运动, B 球的速度逐渐增大, 两球间的距离逐渐减小. 当 A 、 B 两球的速度相等时, 两球间的距离最小. 若此距离大于 $2r$, 两球就不会接触.

类比 这个试题构思新颖, 确曾使许多学生感到难以下手. 如果我们根据两球相互作用的物理过程的分析, 联想到木块滑上小车的运动, 双方作一类比, 就可以揭开原来陌生的面具, 露出似曾相识的原形.

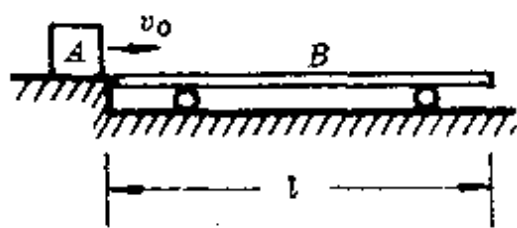


图 107

如图 107 所示, 在光滑水平面上停着一辆质量 $M = 2m$ 、长为 l 的小车 B , 一块质量为 m 的木块 A 以水平速度 v_0 滑上小车. 假设木块与车面间的摩擦力恒为 f , 那么木块滑上小车后不滑出小车的运动与上

述两球相互作用形成很好的类比:

类比对象	木块滑上小车	两球相互作用
相互作用力	木块滑上小车后产生恒定摩擦力 f	两球接近至 l 后产生恒定斥力 F
物理过程	木块做匀减速运动 小车做匀加速运动	A 球做匀减速运动 B 球做匀加速运动
终态	木块与小车相对静止共速前进	A 球与 B 球相对静止共速前进

A 、 B 两球相互作用中,要求不接触,最后两球间距应大于 $2r$,相当于木块滑上小车后最终离小车右端距离不得小于 $2r$.两者运动过程如图 108 所示.

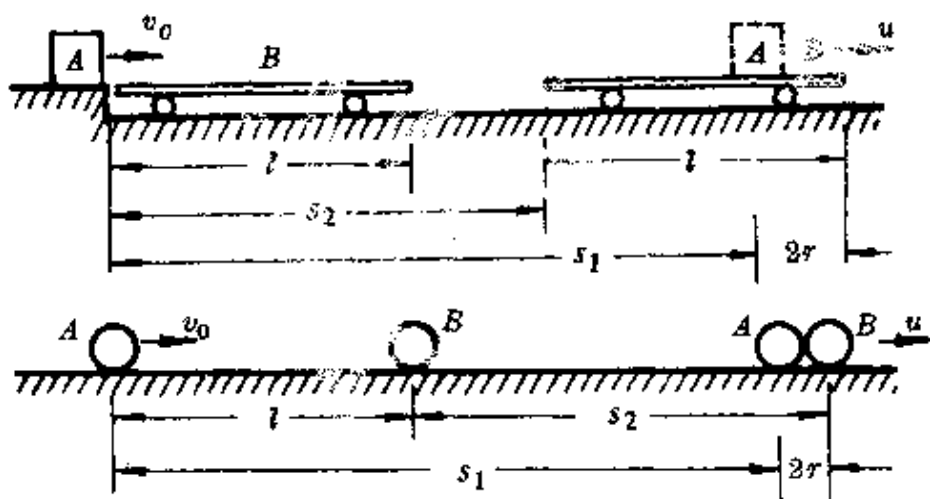


图 108

也可以把题中两球的运动与我们熟悉的子弹打木块的问题相类比.

如图 109 所示,在光滑水平面上放一块质量 $M = 2m$ 、长 l 的木块,一颗质量为 m 的子弹以水平速度飞来击中木块,若子弹进入木块后的阻力恒定,要求子弹最终相对静止于离木块另一端 $2r$ 处(不穿出),显然对子弹的初速 v_0 有一定的限制.

通过这样的类比,就把一个原来陌生的问题转化为一个较熟

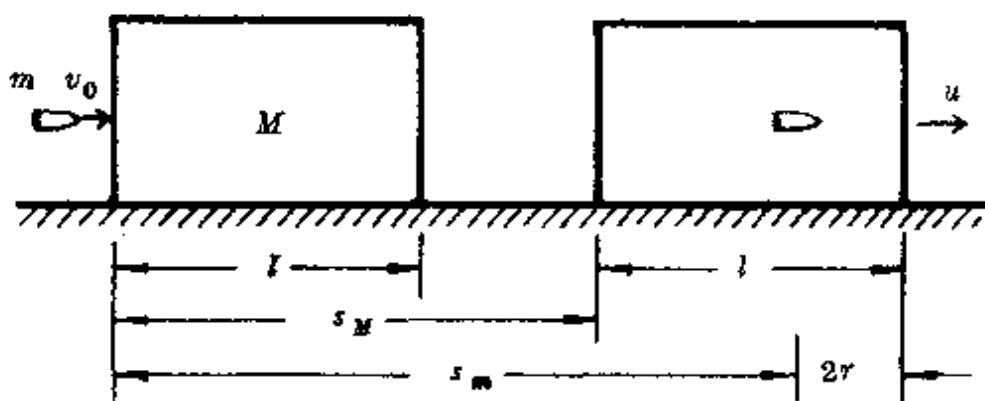


图 109

悉的问题,就很容易用动量守恒定律、动能定理(或用牛顿第二定律结合运动学公式)解出结果.

解答 设两球距离最小时, A 、 B 两球的速度分别为 v_1 、 v_2 . 两球间距从 l 变化至最小的过程中, A 、 B 两球通过的路程分别为 s_1 、 s_2 . 由发生相互作用时动量守恒和对每球用动能定理得

$$mv_0 = mv_1 + 2mv_2, \quad (1)$$

$$-Fs_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2, \quad (2)$$

$$Fs_2 = \frac{1}{2}(2m)v_2^2 - 0, \quad (3)$$

又由两球不相接触的条件

$$v_1 = v_2, \quad (4)$$

$$l + s_2 - s_1 > 2r, \quad (5)$$

联立①—⑤式后即可解出

$$v_0 < \sqrt{\frac{3F(l-2r)}{m}}.$$

例 4 一个质量为 m 、带有电荷 $-q$ 的小物体,可在水平轨道 Ox 上运动, O 端有一与轨道垂直的固定墙. 轨道处于匀强电场

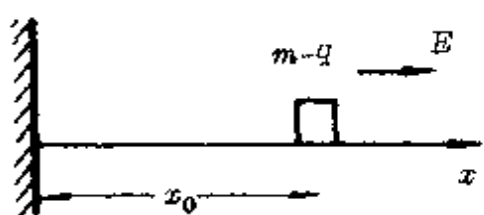


图 110

中,场强大小为 E ,方向沿 Ox 轴方向,如图 110 所示.小物体以初速度 v_0 从 x_0 点沿轨道运动,运动时受到大小不变的摩擦力 f 作用,且 $f < qE$. 设小物体与墙碰撞时不损失机械能,且电量保持不变,求它在停止运动前

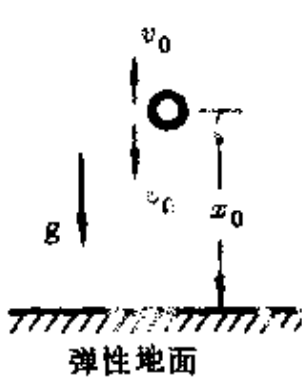
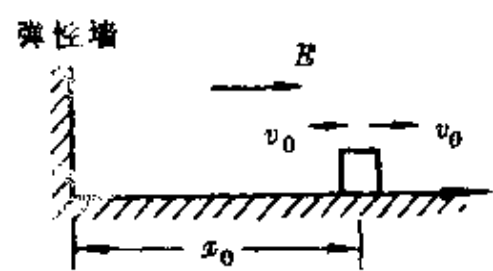
所通过的总路程.

分析 小物体运动时,水平方向受到恒定的电场力 F_E 和摩擦力 f 的作用.小物体右行时,电场力和摩擦力向左,小物体做匀减速运动.至速度等于零时,由于 $f < F_E$,重又向左做加速运动.因此小物体沿 x 轴右行和左行时,交替着做匀减速运动和匀加速运动.由于小物体运动过程中需不断克服摩擦力做功,能量越来越小,最后停止于 O 处.

类比 如果从小物体的受力情况用牛顿第二定律结合运动学公式,逐步推算出它至停止运动前的总路程,涉及到数列求和的问题,运算相当复杂,在短时间内是难以完成的.倘若我们根据小物体在电场中受到的电场力和摩擦力恒定的特点,把它在电场中的左、右往返运动,跟物体在受到恒定阻力的重力场中的上、下运动相类比,问题的求解就会变得非常容易.见下表.

类比对象	重力场中的小球	电场中的小物体
受到的力	恒定的重力 mg 与运动方向反向的 恒定阻力 f (设 $mg > f$)	恒定的电场力 qE 与运动方向反向的摩擦力 f ($qE > f$)

续表

类比对象	重力场中的小球	电场中的小物体
运动过程	<p>向上时受合力($mg + f$)做匀减速运动, 向下时受合力($mg - f$)做匀加速运动</p>  <p>弹性地面</p> <p>图 111(a)</p>	<p>右行时受合力($qE + f$)做匀减速运动. 左行时受合力($qE - f$)做匀加速运动</p>  <p>弹性墙</p> <p>图 111(b)</p>
最终位置	静止于地面	静止于原点 O
物理规律	$\frac{1}{2}mv_0^2 + mgx_0 = fs$?
总路程	$s = \frac{mv_0^2 + 2mgx_0}{2f}$?

解答 小物体初始时具有的总能量完全消耗于克服阻力所做的功,即

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + qEx_0 = fs.$$

所以停止前的总路程为

$$s = \frac{mv_0^2 + 2qEx_0}{2f}.$$

它与小物体开始运动时的速度方向无关.

说明 下面我们分步推算算法算出小物体至停止前的总路程,以作比较.

小物体右行时的合力向左,大小为

$$F_{\text{右}} = qE + f;$$

小物体左行时的合力也向左,大小为

$$F_{\text{左}} = qE - f.$$

若开始时小物体沿 Ox 轴正向运动(右行),由

$$0 - \frac{1}{2}mv_0^2 = -(qE + f)x,$$

得右行匀减速停止时离起点距离

$$x = \frac{mv_0^2}{2(qE + f)}.$$

然后匀加速左行,与墙碰前具有动能

$$E_{k_1} = \frac{1}{2}mv_1^2 = (qE - f)(x_0 + x).$$

小物体与墙碰后保持同样大小的速度 v_1 反弹,匀减速右行,由

$$0 - \frac{1}{2}mv_1^2 = -(qE + f)x_1,$$

得右行至停止通过的路程(即离原点 O 的距离)

$$x_1 = \frac{mv_1^2}{2(qE + f)} = \frac{qE - f}{qE + f}x_0 + x.$$

接着,小物体又向左做匀加速运动,与墙弹性碰撞反弹,向右做匀减速运动,由

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = (qE - f)x_1,$$

$$0 - \frac{1}{2}mv_2^2 = -(qE + f)x_2,$$

得右行至停止时离原点 O 的距离

$$x_2 = \frac{qE - f}{qE + f}x_1 = \left(\frac{qE - f}{qE + f}\right)^2 x_0 + \frac{qE - f}{qE + f}x.$$

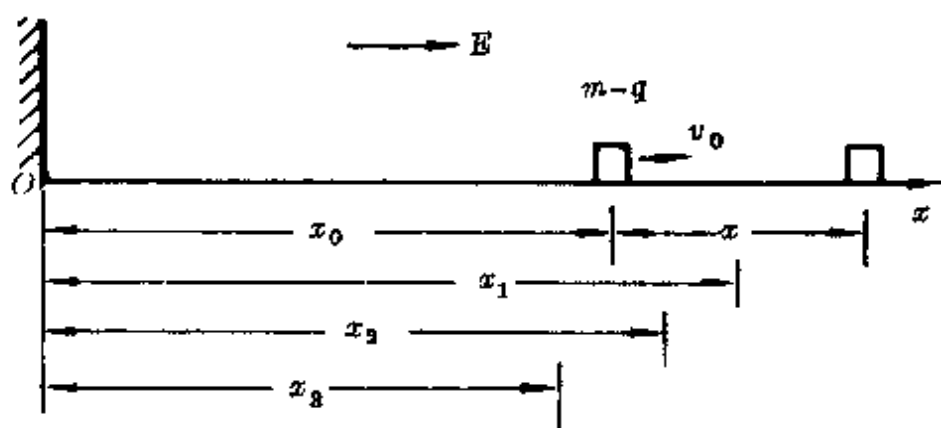


图 112

以后,小物体又匀加速左行、碰撞反弹、匀减速右行停止,可同理依次算出每次停止时离原点的距离

$$x_3 = \frac{qE - f}{qE + f}x_2; x_4 = \frac{qE - f}{qE + f}x_3; \dots$$

小物体每次停止处离原点 O 越来越近,如图 112 所示,最终必停止于 O 点.

因此,小物体从运动开始至停止共通过的路程为

$$\begin{aligned} s &= x + (x_0 + x) + 2x_1 + 2x_2 + 2x_3 + \dots \\ &= x + (x_0 + x) + 2x_1 \left[1 + \frac{qE - f}{qE + f} + \left(\frac{qE - f}{qE + f} \right)^2 + \dots \right]. \end{aligned}$$

式中方括号内为一个无穷递减等比数列,由求和公式得

$$s = x + (x_0 + x) + \frac{2x_1}{[1 - (qE - f)/(qE + f)]}.$$

化简后最后得小物体至停止通过的路程

$$s = \frac{2qEx_0 + mv_0^2}{2f}.$$

若开始时小物体沿 Ox 轴负向运动(左行),用类似的方法可得到同样的结果.

例 5 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中,垂直磁场放置一根长 l 的金属棒 OA ,使它绕一端 O 为轴,在垂直于磁场的平面内以角速度 ω 顺时针方向匀角速转动,试求在洛仑兹力作用下把负电荷从棒端 A 移到转轴 O 做的功(图 113).

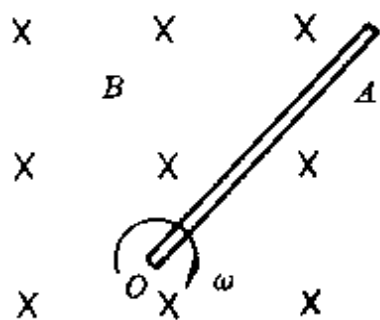


图 113

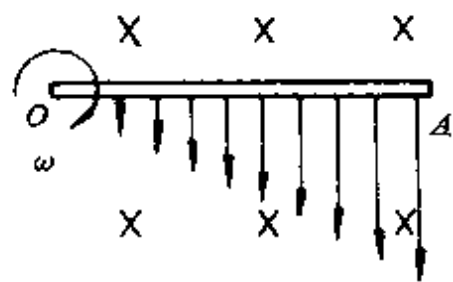


图 114

分析 棒转动时,棒上各处具有不同的线速度(图 114),棒内对应部分的电子也具有不同的垂直于棒的速度,因此使它们受到一个沿着棒指向转轴的洛仑兹力.由于各处电子随棒转动的速度大小与离轴 O 的距离 x 成正比,即

$$v_x = \omega x,$$

因此,它所受的洛仑兹力也与离轴 O 的距离 x 成正比,即

$$f_B = qv_x B = q\omega Bx = kx.$$

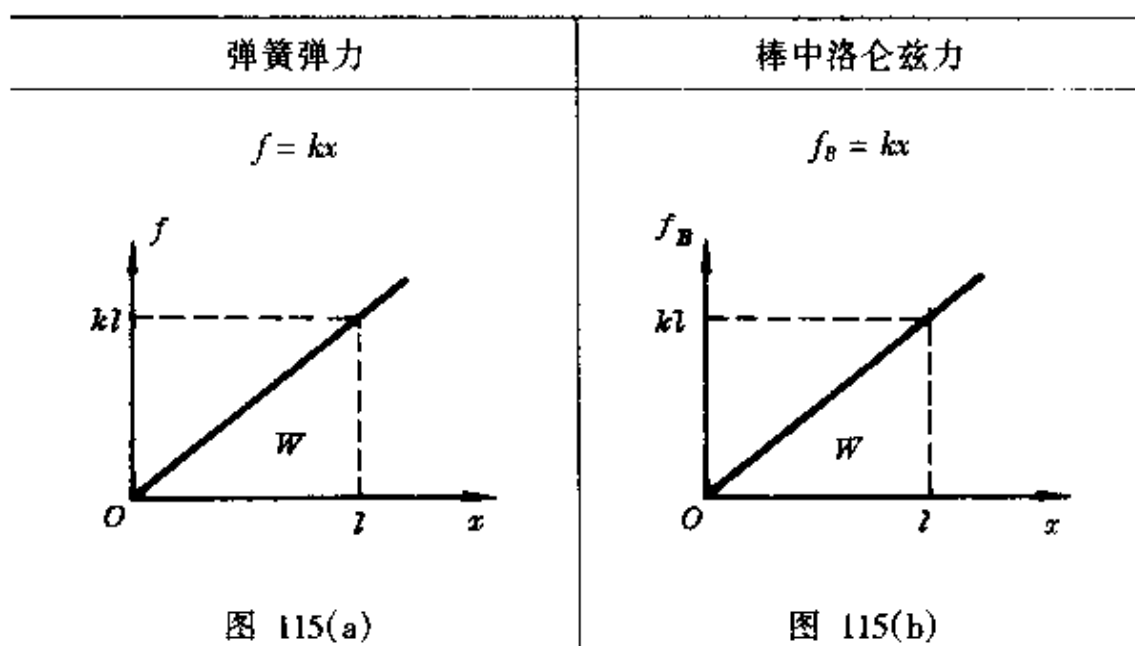
式中 $k = q\omega B$ 为比例系数.

可见,使电子从棒端 A 移到转轴 O 处时属于变力做功问题.

类比 上面的洛仑兹力可以与弹簧形变时的弹力相类比(见下页表).

解答 根据与弹力的类比可知,把电子从棒端 A 移到转轴 O 时洛仑兹力的功等于图 115 中对应的三角形面积,所以

$$W = \frac{1}{2} kl \cdot l = \frac{1}{2} kl^2 = \frac{1}{2} q\omega B \cdot l^2.$$



说明 棒转动时产生的感应电动势

$$\mathcal{E} = Bl\bar{v} = \frac{1}{2} Bl^2 \omega,$$

它在数值上等于非静电力在电源内部迁移单位电荷时所做的功，即

$$\mathcal{E} = \left| \frac{W_{\#}}{q} \right|.$$

因为棒转动时使电荷发生迁移的非静电力就是洛仑兹力，所以洛仑兹力做功

$$W = \mathcal{E}q = \frac{1}{2} q\omega Bl^2.$$

这样，也得到同样的结果。

例 6 如图 116 所示，在一圆形区域内有一垂直纸面向里的匀强电场，当电场强度 E 增大时，电场区域外 P 点的磁场方向为

- A. 在纸面内向上；
- B. 在纸面内向下；
- C. 垂直纸面向里；

D. 垂直纸面向外.

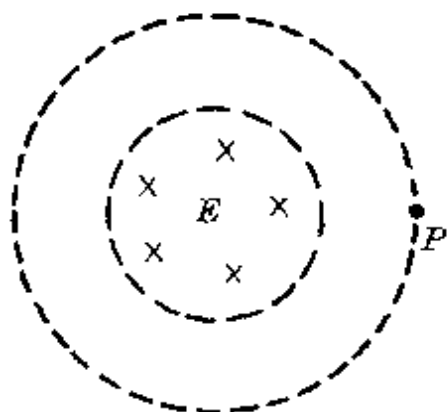
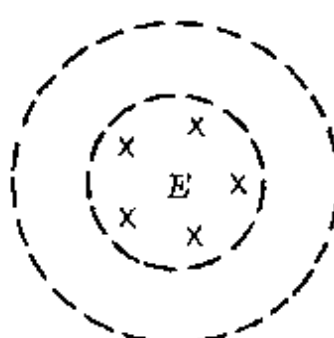
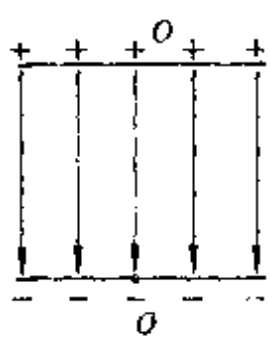
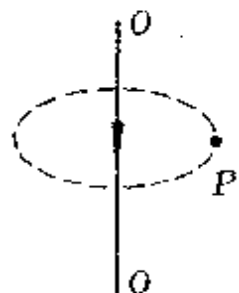


图 116

分析 根据麦克斯韦电磁场理论,变化的电场会产生磁场,所以电场区域外的 P 点存在磁场.

类比 为确定 P 点的磁场方向,可把圆形区域内增强的电场类比于平行板电容器的充电过程;而平行板电容器充电过程中所产生的磁场又可类比于沿着两板中央的导线通以充电电流时所产生的磁场,如下表所示:

 <p>垂直纸面向里的电场 增强 图 117(a)</p>	 <p>充电时板间场强 增强 图 117(b)</p>	 <p>沿两板中央的导线通以充电电流 图 117(c)</p>
---	---	--

解答 根据最后用图 117(c) 中电流所产生的磁场相类比,纸面内的导线在 P 点的磁场垂直纸面向上,把沿 OO' 方向的电流(电场线)转到垂直纸面向内时[如图 117(a)所示],则 P 点的磁场方向在纸面内向下,所以正确答案为 B.

例 7 在光滑的水平桌面上侧立着两光滑长木板 AO 、 BO , 夹角 $\alpha = 1^\circ$. 从 AO 板上与 O 相距 $OP = 10$ 米的 P 点, 以初速 $v_0 = 5$

米/秒、与板面夹角 $\theta = 60^\circ$ 方向射出一个小球(图 118). 设小球与 OB 板及 OA 的碰撞都是弹性碰撞, 且每次碰撞时间极短. 试求:

(1) 经过多少次碰撞后, 小球又回到 P 处与 OA 板相碰?

(2) 在这个过程中, 小球共经历多少时间?

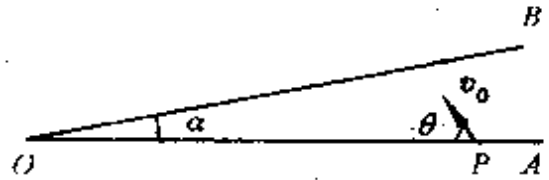


图 118

分析 小球从 P 点射至 BO 板时的人射角 $\theta_{1B} = 180^\circ - 90^\circ - \theta - \alpha = 29^\circ$, 由于 OB 板光滑, 球与板作弹性碰撞, 因此保持原来速度的大小反弹, 反射角 $\theta'_{1B} = \theta_1 = 29^\circ$. 射至 AO 板时的人射角 $\theta_{1A} = 180^\circ - (90^\circ + \alpha) - (90^\circ - \theta_{1B}) = \theta_{1B} - \alpha = 28^\circ$, 并且也以原速大小反弹. 第二次射至 BO 板时的人射角 $\theta_{2B} = \theta_{1A} = 28^\circ$, 然后又反弹(图 119). 如此继续下去.

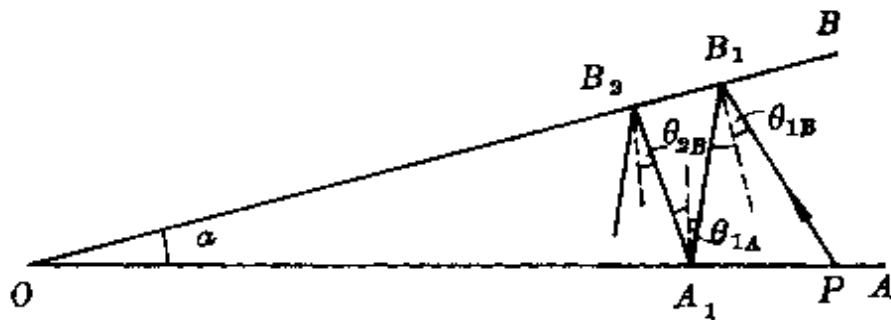


图 119

类比 上述小球从 P 点出发, 在 AO 、 BO 两板间来回反弹的运动, 可以与一个位于 P 点的点光源发出的光在 AO 、 BO 两平面镜间的来回反射相类比.

如图 120 所示, 从 BO 板上第一次反射至 AO 板的人射点 A_1 , 必与以 BO 为镜面对称的 PB_1 的延长线上 A_1' 点对称. 从 A_1 第二次反射至 BO 板的人射点 B_2 , 必与以 AO 为镜面对称的 B_1A_1 的延

长线上 B_2' 点对称, 而 B_2' 点仍像在以 BO 为镜面对称的 PB_1 的延长线上. 由于每经一次反射入射角减小一些, 当最后入射角减小至 0° 时, 即沿着镜面的法线入射, 光线将沿原路返回出发点 P . 在镜面上的最后的入射点必然也在 PB_1 的延长线上. 过 O 点作 PB_1 延长线的垂线 OQ , 则 Q 点就是在镜上的最后入射点的对称点, PQ 的长度就等于光线在两镜间通过的路程.

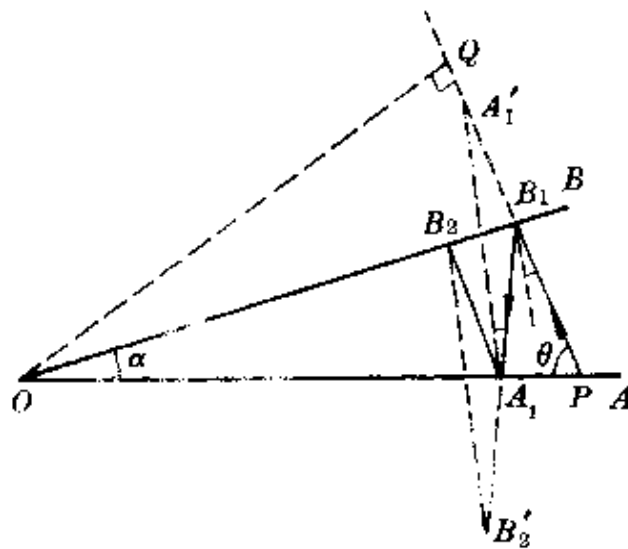


图 120

解答 (1)由上述分析知, 每经过一次反射入射角减小 1° , 经 29 次反射后入射角减为 0° , 小球(光线)将沿原路返回, 即需经过 30 次碰撞, 所以返回 P 点共需 60 次碰撞.

(2)根据与光的反射类比可知, 小球在这个往返碰撞过程中经过的路程

$$s = 2 \overline{PQ} = 2 \overline{OP} \cos \theta,$$

所以一共经历的时间为

$$t = \frac{s}{v} = \frac{2 \overline{OP}}{v} \cos \theta = \frac{2 \times 10}{5} \times \frac{1}{2} \text{秒} = 2 \text{秒}.$$

上面我们按类比在解题中应用的两方面选讲了一些例题,实际上,这种区分是不严格的,类比本身就是一种很灵活的思维方法,它既可以在同类事物中进行,也可以在不同类事物中进行;既可以从局部性质考虑,也可以从整个系统或体系上考虑;既可以从形式上的相似出发,也可以从本质上的共性出发.在实际应用中,重要的是找到合适的类比对象,作出合理的类比,而不在于作这样、那样的划分.

如果我们在学习中,能经常注意将一些蕴含着相似之处的物理现象或物理过程进行类比,突出其物理本质,扬弃其非本质的、次要的枝节,由此及彼,化抽象为具体,把复杂分解为简单,将会十分有利于培养自己系统地概括知识、掌握知识、应用知识的能力,也会迅速提高物理解题的水平.

结 束 语

当瑞典皇家学会把 1991 年度诺贝尔物理学奖的殊荣,授予有“当代牛顿”美誉的法国物理学家德然纳(Pierre Gilles de Gennes, 1932—),以表彰他把研究简单系统中有序现象的方法推广到更复杂的物质态时,人们又一次领略到类比这一古老的思维方法的神采.类比方法在今天的科学研究中仍然发挥着十分重要的作用.这也正是我们向广大读者,尤其是未来科学世界的主宰——中学生朋友们,较详细介绍类比思想的动机.

通过本书的阅读,也许已使你惊叹,类比思维确实常能使人开窍,对一些具体问题的处理也显得非常轻松、奇妙.不过,应该认识到,类比终究是一种带有猜测性的方法,科学史上失败的类比也许更多于成功的类比.因此,我们不能苛求类比一定成功,而只能是努力提高类比的成功率.

学习本是一种攀登,攀登路上要不断探索和借鉴前辈巨人的各种方法,让类比作为辅助你开发智能、攀登成功的一种方法吧!

吴保让先生、倪汉彬教授审阅了本书初稿,在此表示感谢。

作者

1993 年冬二稿

于苏州九百居

主要参考资料

[1]周昌忠著《科学思维学》，上海人民出版社，1987年7月第1版。

[2]章士嵘著《科学发现的逻辑》，人民出版社，1986年12月第1版。

[3]奕玉广编著《自然科学研究方法》，中国科学技术大学出版社，1986年9月第1版。

[4]张涛光著《物理学方法论》，山东科学技术出版社，1983年7月第1版。

[5]查有梁著《控制论、信息论、系统论与教育科学》，四川省社会科学院出版社，1986年4月第1版。

[6]潘菽主编《教育心理学》，人民教育出版社，1980年2月第1版。

[7][英]亚·沃尔夫著《十六、十七世纪科学、技术和哲学史》，商务印书馆，1985年1月第1版。

[8]关士续编著《科学技术史简编》，黑龙江科技出版社，1984年4月第1版。

[9]陈毓芳等编《物理学史简明教程》，北京师范大学出版社，1986年7月第1版。

[10][日]大森实著、林子元译《物理学史话》，河北人民出版社，1985年11月第1版。

[11]知识出版社编辑出版《科技史上的今天》，1989年3月第1版。

[12]阎康年著《牛顿的科学发现与科学思想》，湖南教育出版社，1989年12月第1版。

[13]钱时惕主编《重大科学发现个例研究》，科学出版社，1987年8月第1版。

[14]《化学发展简史》，科学出版社，1980年4月第1版。

[15]程守洙、江之永主编《普通物理学》，人民教育出版社，1978年9月第3版。

[16][日]东昇著《电子显微镜的世界》，科学出版社，1977年2月第1版。

[17]《中学物理教师手册》，上海教育出版社，1982年3月第1版。

[18]李启斌著《天体是怎样演化的》，中国青年出版社，1979年4月第1版。

