物理学史与物理学思想方法论

吴宗汉 周雨青 编著

清华大学出版社

ISBN 978-7-302-15908-7

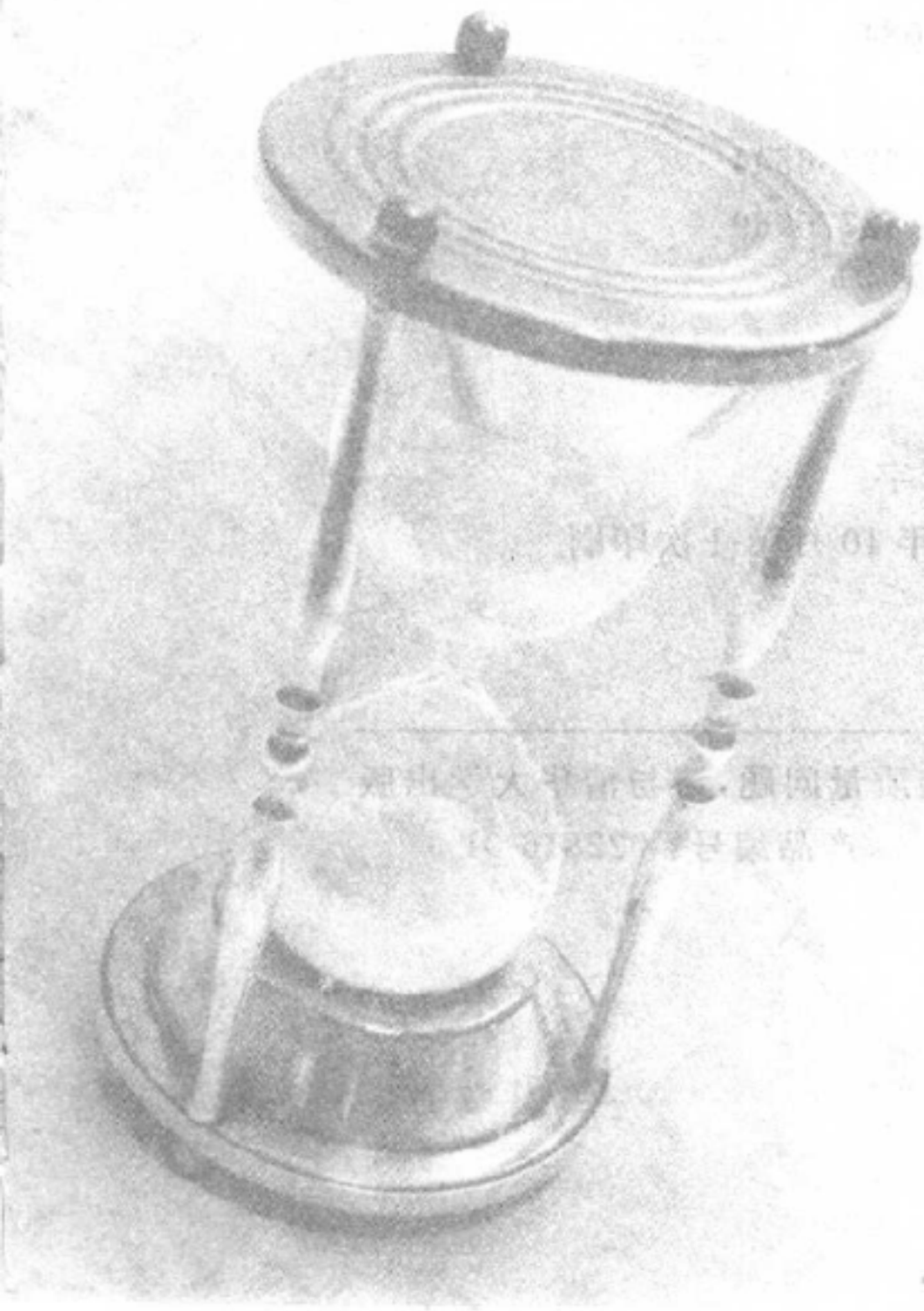


9 787302 159087 >

定价：20.00元

物理学史与物理学思想方法论

吴宗汉 周雨青 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书将物理学史与物理学思想方法论同时进行阐述，强调了物理学是科学也是文化，物理学史的教学不仅要以史为鉴，更要以史为器，使读者从中受益而能去发展、创新。

本书共分 6 章，分别介绍与牛顿力学、热学、电磁学相关的内容和相对论与量子论的产生、对微观物质世界认识的发展史、物理学研究中常用的思想方法等。

本书是大学本科生的教材，也可作为高中以上文化水平的读者的科普读物。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989　13501256678　13801310933

图书在版编目（CIP）数据

物理学史与物理学思想方法论 / 吴宗汉，周雨青编著. —北京：清华大学出版社，2007.10
ISBN 978-7-302-15908-7

Ⅰ. 物…　Ⅱ. ①吴… ②周…　Ⅲ. ①物理学史②物理学—思想方法—方法论　Ⅳ. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 123161 号

责任编辑：朱红莲　洪　英
责任校对：赵丽敏
责任印制：李红英

出版发行：清华大学出版社　　**地　　址**：北京清华大学学研大厦 A 座
http://www.tup.com.cn　　**邮　　编**：100084
c-service@tup.tsinghua.edu.cn
社 总 机：010-62770175　　**邮购热线**：010-62786544
投稿咨询：010-62772015　　**客户服务**：010-62776969
印 刷 者：北京市清华园胶印厂
装 订 者：三河市新茂装订有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：148×210　**印　张**：10.25　**字　数**：254 千字
版　　次：2007 年 10 月第 1 版　　**印　次**：2007 年 10 月第 1 次印刷
印　　数：1～3000
定　　价：20.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题，请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话：010-62770177 转 3103　　产品编号：022816-01

前　言

近年来，国内许多高校都在开设物理学史方面的课程，有的是作为公共选修课，有的是作为必选选修课，总之，对开设物理学史课都给予了很高的重视。但是，若作些深入调查，我们就会发现，无论是在为什么要开设这门课及怎样开设这门课等这些基本问题上，或者是从开设者的主观意图与接受者的响应及得出的效果等诸多方面，调查结果都相差很大。究其原因，我们认为是对开设这门课认识的理解上相差颇大而造成的。为此，我们想结合本书的编写谈几点看法。

一、物理学史是科学也是文化

作为科学，物理学史记录和传递了物理学过去所走过的道路和所取得的成就；而从文化的视角来看，物理学史则表示了物理学的思想渊源以及它的传递、发展和继承；同时也能看到作为文化，它在发展和前进道路上的分化、细化、歧化和泛化。实际上，从人类文明史发展来看，物理学的研究范围、研究内容，开始是从研究“事”、“物”之理，发展到只研究“物”之理的路线而前进、延伸的，它是从边界模糊不清、相互交织的领域，发展到逐渐清晰，形成独立体系的。在历史上，古希腊的亚里士多德曾著有《物理学》，其基本内容则多属于玄学。我国晋代的《物理论》以及明、清朝代的《物理小识》所阐述的“事”，“物”之理，也不是纯属现代定义的物理学范畴的内容和自然科学的内容。尤其是在我国古代，长期以来以人文为本，原来就没有什么独立的自然科学体系，在所谓“格物在致知，格物而后知今”的理念中，“格物致知”不过是为了修身、养性，其最高境界在“治国、平天下”，其人文色彩、人文思维的人文文化

特色则更为浓烈，而且它的内容也不能全部隶属于自然科学、物理的范畴，尽管在文明史上人文科学与自然科学在发展初期边界不清，使自然科学，尤其是物理学的研究总是交相渗透，边界模糊，但还不能仅仅以此就可定为它就是物理学的文化内涵，物理学的文化内涵应涵括它的思想性、连续性、传承性的丰富内容。

从文化的特殊视角来看，物理教育是实现物理文化传递的基本工具。文化是在人类代际之间进行传承的，老一代人创造的文化成果终将成为文化遗产，而且终将通过文化传承，被新一代有选择地接受。物理教育既能传承，又能促使物理学的发展。物理教师借助于教材，既系统地向学生讲述物理知识，介绍物理方法和历史，又让学生操作仪器、观察现象、进行测试分析，让他们从实践中学习物理，接受物理文化的熏陶，这些都隶属于有形的载体。而物理学表示的机械观、时空观、因果观、对称性、和谐性、永恒性以及绝对与相对、无序与有序的文化思想虽是无形的，却清楚地凸显了其丰富的文化内涵。但是，随着科学技术的进步和发展，物理学作为一门迅速发展起来的学科，它形成了自己的分类范畴，自己的研究方法，自己的思维特性等一整套完整的科学体系，并且还不断地向深度、广度进军，尽管近年来科学发展的相互渗透、交叉加剧，物理学的边界又变得模糊不清了，但它还仍然有其鲜明的文化特征，而区别于其他人文科学、人文文化，尤其是思维方式上更与它们大相径庭，形成了两种思维方式和文化——科学文化和人文文化。

在科学发展到了今天，它们的差异性则表现出了会对今后社会可持续发展产生影响，有些甚至可以说会产生危机。已故著名物理学家吴健雄曾指出过："为了避免出现社会可持续发展中的危机，当前一个刻不容缓的问题是消除现代文化中两种文化——科学文化和人文文化——之间的隔阂，而为加强这两方面的交流和联系，没有比大学更适合的场所了，只有当两种文化的隔阂在大学

校园里更加弥合之后，我们才能对世界给出连续而令人信服的描述。”因此应从这一高度来认识开设物理学史与物理学思想方法论课程的重要性。

二、要从“以史为鉴”发展到“不仅以史为鉴，更要以史为器”

学习物理学史就是为了了解物理学所走过的道路，它将有助于我们更深刻地认识物理学，更有效地应用和发展物理学。过去很多人总是在说“以史为鉴”，但我们认为对物理学史的学习仅仅“以史为鉴”还远不能满足时代的要求，更应该在“以史为鉴”的基础上“以史为器”去发展、去创新。物理学史和自然科学史告诉我们，历史上的一些发明、创造并不是前人研究内容的简单重复，而往往是前人研究方法、思维特征的重现，并且它更是螺旋形上升的。因此，我们在讲授物理学史时，就把这门课改成了“物理学史与物理学思想方法论”。因为，若仅仅讲“史”，而不落实、凸现思想方法论，就会在课程讲授中，或是讲科学家的传记、小故事，或是完全讲物理内容，成了课程搬家，使得听课者或是“听史兴叹”，在羡慕科学家伟大之余，并未得到更进一步的收获；或是听了那些尚未搞懂的理论，仍是不得其要领，从而失去了学习物理学史的激情。为此，我们认为，要达到“不仅以史为鉴，更要以史为器”的目的，就要把学习物理学史和学习物理学思想方法论结合起来，并突出思想方法论的重要性。

三、开设“物理学史与物理学思想方法论”是提高学生科学素质的一个重要内容

纵观科学发展史和物理学史可以发现，古今中外能成就大事业者，都有一个共同的特点，他们都有一个坚持真理、锲而不舍，为了事业献身的信念。意大利著名的天文学家布鲁诺大无畏地捍卫真理，坚持日心说，藐视反动的宗教法庭，直到生命的最后一刻，还庄严地向刽子手宣布：“你们对我宣读判词，比我听到判词还要畏惧！”尽管最终被活活烧死在鲜花广场，但他坚持真理的行动，一直

为人们广为赞颂。美国的富兰克林做风筝试验而被雷电击晕，待他醒来时，还风趣地说："好家伙，我本想电死一只火鸡，结果差点电死一个傻瓜！"而罗蒙诺索夫的老师利赫曼则在研究雷电中牺牲了性命。这些为科学试验而不屈不挠的高尚品质和不畏艰险，奋不顾身而又非常风趣、乐观的精神面貌，是在物理学史教学中让年轻的学子们铭记的。这是他们应该具备的作为一个科学家、科学工作者的基本品质，这也是科学素质教育中一个重要的组成部分。此外，还要在这门课程中教会学生们如何深入观察，不放过细节，注意观察异常等好习惯，书中这种例子是举不胜举的。在本书中，力图让学生通过本课程的学习在培养如何做人、做事、做学问这些基本素质方面得到一些收益，使这门课的教学，达到"以人为本"的目的。

基于上述思路，本书在内容上均作了相应的安排，力求做到削枝强干、突出重点，注意学科领域的交叉、互渗，并安排了能达到教学互动的内容，以便调动学生的思维积极性。此外，在本书中，我们对常见物理研究方法也专门作了介绍，例如，对物理学史上的悖论介绍，都提高到了认识论、方法论的高度，此外，对演绎、分析、综合、类比、模型建立的简化、纯化等都有介绍，并用实例来剖析佐证。本书分6章，分别是牛顿力学与机械观、从冷和热引出的话题、近代科学的重要基础——电磁学、物理学发展中的革命风暴——相对论与量子论的产生、对微观物质世界结构认识的发展史、物理学研究中常用的思想方法等。

本书曾作为大学生的公共选修课教材讲过多遍。该课程是东南大学在建设文化素质基地过程中由原教务处处长陈怡教授建议而开设的，由吴宗汉教授执教。本书编写过程中，江苏大学中文系吴宗海教授的释疑和交流使编者受益匪浅。本书最后统稿是由吴宗汉教授在深圳豪恩电声科技有限公司完成的，其间获得了该公

司董事长王丽、总经理李军以及诸位豪恩人的大力协助，清华大学出版社的编辑同志也为本书出版作出了很大努力，在此一并致谢。

由于编者水平所限，谬误之处，望不吝指正。

编者

于鹏城

2007 年 8 月

目　　录

前言 …… Ⅰ

第 1 章　牛顿力学与机械观 …… 1

1.1　物理学发展的几个阶段 …… 1

1.2　中世纪宗教势力的专横与亚里士多德经院主义哲学体系的禁锢 …… 6

1.3　物理学初始发展时期的几种思辨方法 …… 11

1.4　牛顿力学的建立与机械观的形成 …… 19

第 2 章　从冷和热引出的话题 …… 30

2.1　热质说盛行与“热”测量的问题 …… 30

2.2　工业发展要求新科学规律的诞生 …… 34

2.3　热学的微观解释和规律——分子运动论的发展和统计物理的建立 …… 39

2.4　热物理留给人们值得深思的问题 …… 51

第 3 章　近代科学的重要基础——电磁学 …… 59

3.1　电磁学发展的轨迹 …… 59

3.2　以太说的发展 …… 79

3.3 电磁学中值得推荐的几个物理研究的思想方法…… 82

第 4 章 物理学发展中的革命风暴——相对论与量子论的产生 …… 95

4.1 引言…… 95

4.2 相对论简介 …… 104

4.3 量子论的产生和量子力学的发展 …… 131

4.4 经典与近代观念的碰撞 …… 164

第 5 章 对微观物质世界结构认识的发展史…… 196

5.1 不同层次上的物质构造 …… 196

5.2 物质基本构造探秘 …… 207

5.3 基本粒子的对称性和统一场论 …… 227

5.4 描述微观物理世界的最基本观点是什么 …… 234

5.5 20 世纪物理学留下的未解疑难问题 …… 250

第 6 章 物理学研究中常用的思想方法…… 277

6.1 分析与综合 …… 277

6.2 归纳与演绎 …… 283

6.3 类比 …… 302

6.4 从原型到模型的方法 …… 312

参考文献…… 315

第 1 章　牛顿力学与机械观

1.1　物理学发展的几个阶段

物理学真正作为一门独立的自然科学，只有 400 年左右的历史，但是，在物理学创建之前，人类已积累了不少的物理知识，这为物理学的建立和发展打下了广泛的基础。

认识的发展既有继承性也有阶段性，物理学也不例外，我们可以将物理学的整个发展粗略地分为四大阶段。

1. 第 0 阶段（远古至 17 世纪初）

这一阶段是物理学的史前时期，故称为第 0 阶段。在这个阶段里，尽管经历了漫长的岁月，人类对大自然的了解还是很肤浅、很不全面的；所获得的物理知识也是定性多于定量，感性多于理性，零散而不系统。

例如关于电和磁的最早知识，约公元前 6 世纪古希腊已有所记述；我国战国时代成书的《管子》（约公元前 4 世纪）中也有关于天然磁体的记载；摩擦起电的发现则稍晚，大约到西汉末年（公元 20 年前后）才有明文记载。

由乐器的演奏、制作而总结出的音律，同样也是最古老的物理知识。公元前 6 世纪，我国就有了三分损益法（见《管子・地员篇》），西方的毕达哥拉斯则确立了乐音与弦长或管长的关系。

在这一时期，人类对简单机械、几何光学也逐步积累了丰富的知识。其中特别值得一提的有：我国《墨经》（公元前 4 世纪）中的有关论述；阿基米德（Archimedes，公元前 287—前 212）的浮力原

理及静力学的一些基本规律。此后，还有 N. 哥白尼的日心体系学说，它取代了 C. 托勒密的地心体系说。

总的说来，我国在这期间所取得的成就并不逊于欧洲，某些方面还居于领先地位。例如，北宋沈括(1031—1095)在所著的《梦溪笔谈》(1086)中就论述了地磁及人工磁化，这比 W. 吉伯的《论磁性、磁体和巨大地磁体》约早 500 多年。令人遗憾的是，一些原来具有优势的项目逐渐落后于人。举一个最明显的例子，针孔成像、反射成像在《墨经》中早有记述，远在 2000 多年之前，我国就有人以透镜取火，但望远镜、显微镜的最早发明(17 世纪初)及有效使用都出现在西方，光的折射定律后来也是在欧洲发现的。

2. 第 1 阶段(17 世纪初至 17 世纪末)

这是物理学的初创时期。它起始于 G. 伽利略(Galileo Galilei，1564—1642)时代持续到牛顿力学之前。在这不到 100 年的时间里，物理学逐渐形成为一门精密的学科。

这一阶段的特点是：大批的学者摆脱了亚里士多德经院式哲学的束缚及宗教的专横统治，不再满足于对自然现象的消极观察和对物理知识的简单归纳，而是走向更积极的实验研究及更细致的定量分析。于是，在物理学中开展了数学应用及实验工作，并且开始从感性认识向理性认识过渡。

这些科学风气的形成，主要是由于伽利略的创导。在他的周围，很快形成了以实验工作为主的伽利略学派。其中最著名的有 E. 托里拆利(Torricelli，1608—1647)，他研究过抛体运动及液体自容器小孔流出的速度，将伽利略的空气测温器改进为酒精温度计；发现了大气压力(1643)并制成水银气压计(1644)，这有力地打击了“自然惧怕真空”的传统偏见。亚里士多德是不承认真空的客观存在的，相应地，他也不认为空气具有重量、大气应有压力。

在这一时期内，除了伽利略、J. 开普勒和 R. 笛卡儿的主导工作，物理学方面的重大成就还有：万有引力与距离平方成反比

(I. 牛顿,1666;R. 胡克,1680);动量守恒(C. 惠更斯,1669);离心力及向心加速度(惠更斯,1673);光的微粒说(牛顿,1666);光的波动说(惠更斯,1678);气体体积与压强的反比关系(R. 玻意耳,1661;E. 马略特,1676)。

此外,物理学还初步具备了一些较精密的基本测量(时间测量、温度测量、压力测量……)仪器。以上这些成就为力学、光学、热学的建立及发展开辟了道路。

当欧洲致力于将物理知识定量化、理性化的时候,我国却停滞不前了。1600—1687 年,即明万历 28 年到清康熙 26 年,不仅战乱连绵,更由于长期封建统治、尊儒崇文、轻视工匠技艺,加之小农经济的不求进取,这就必然使得我国的科学技术落后于西方,并且逐渐拉大了差距。尽管其间有几位外国传教士顺便将伽利略学派的力学、透镜光学带进了中国,但几粒石子掷于一潭深沉的死水中,毕竟掀不起大浪。

3. 第 2 阶段(17 世纪末至 19 世纪末)

这是物理学的成熟时期。在此期间,物理学成长为一门完整的自然科学,它既是精密的实验科学,又是严谨的理论科学。这一阶段的特点,在于物理学的逻辑化、系统化及统一化。

它以牛顿建成力学体系为起点,其标志为《自然哲学的数学原理》一书的出版(1687)。半个世纪以后,相继发展出流体力学(1738)、刚体力学(1752—1760)、天体力学(1790—1825)、弹性力学(1821—1828),后来又建立了完整的声学理论(1877)。另一方面,为了力学在广泛应用中的求解方便,不断更新了基本定律的表达形式,由此产生了分析力学(1743—1788),为力学通往其他的物理领域提供了桥梁。总之,在这 200 年里,牛顿力学经过完善、壮大,大有发展到登峰造极的气势。

在牛顿力学的带动下,物理学其他分支的理论探讨也活跃了起来。在此期间,热动说取代了热质说,光波说战胜了光粒说。蒸

汽机的发明(1765)促进了热力学的产生，而以分子的机械运动解释热现象的思想，导致 J. C. 麦克斯韦、L. 玻耳兹曼提出经典统计理论(1859—1872)。电磁现象的研究由分散逐步趋于统一。电流磁效应(1820)和电磁感应现象(1831)的发现，不仅使人们对磁、电之间的关系有了崭新的认识，而且迅速转化为生产力。由此诞生了电力工业，使生产面貌为之一新。1860—1865 年，麦克斯韦创立了统一的电磁场理论，预言了电磁波的存在，还将光波从弹性波纳入电磁波，电磁波的应用使通信事业大为改观。

到 19 世纪末，有关宏观世界的理论已经完整地树立了起来，从早先以力为中心的物理学，最后发展成为力、能、场三足鼎立的物理学。显然，牛顿和麦克斯韦的业绩是巨大的，人们常称 20 世纪以前的物理学为牛顿-麦克斯韦物理学，又称为经典物理学。还应该指出的是，生活在这一历史时期的一些著名的数学家，如 L. 欧拉、J. L. 拉格朗日、P. S. M. 拉普拉斯、J. B. J. 傅里叶、C. F. 高斯、W. R. 哈密顿等人，他们对经典物理学的发展有着不可磨灭的贡献。

在我国这一时期自康熙 26 年至光绪 25 年，正值大清帝国由盛而衰。康熙晚年即执行闭关锁国政策，短命的戊戌变法则发生于光绪 24 年(1898)；其间，国外先进的科学技术既未受到统治者的重视，当然更谈不上及时引进；在物理学方面，只是在 19 世纪 50 年代翻译过几本外版书，影响有限，这就更加拉大了与西方的差距。顺便说一下，从 1840 年起，洋枪洋炮的多次入侵我国，使国门再也封闭不住了。

4. 第 3 阶段(20 世纪初至今)

这是物理学的革新时期。在 20 世纪的前 30 年里，物理学就经受了激烈的动荡，经典观念受到严重的冲击，物理概念发生了深刻的变化；总之，物理理论多次兴起了根本性的变革。

A. 爱因斯坦的相对论对传统的时空观进行的革命，使时空、

物质、运动在物理上紧密地联系起来，将运动规律从低速扩展到高速，从弱相互作用扩展到强相互作用。特别是20世纪60年代以来，相对论天体物理学及宇宙学不仅成为物理学和天文学的一个研究热点，还是相对论、量子场论、粒子物理学等分支学科的结合点。

量子理论起源于能量子（M. 普朗克，1900）和光量子（爱因斯坦，1905）。1913年，N. 玻尔将量子化条件成功地引入氢原子的核模型；1923年，L. V. 德布罗意提出物质普遍具有波粒二象性。由此产生了量子统计、量子力学及量子场论。1967—1968年，又建立了电磁相互作用与弱相互作用的统一场论。

于是，物理学从力、能、场三足鼎立的经典格局演变为以场为中心的现代物理学。同时，物理学也进入到既研究物质运动也研究物质结构的新阶段。

从N. 玻尔的原子学说到M. 盖尔曼的夸克模型，只花费了50年的时光。其间，迅速建立了原子物理学、核物理学及粒子物理学。另一方面，固体理论及等离子体理论也得到飞快的发展。

物理学的新发展必然给科学技术、社会生产带来新面貌。确实，相对论和量子论为人类发现和利用新能源、新材料及新技术提供了理论基础。核能的巨大威力不仅用于军事武器，也大规模地在工业上得到和平利用，1988年全世界发电总量的1/6是由核电站供应的，其中以法国居首位，它的核电为法国总发电量的70%。半导体的研究导致晶体管的发明及集成电路的出现，第一只单片集成电路制成于1958年；电路集成度的惊人发展使电子工业日新月异，这又促使计算机迅速地更新换代，为计算机在各个领域中的广泛应用奠定了物质基础。又如，自1960年第一台激光器在美国问世以来，不到30年，激光就得到多方面的使用，使测量、加工、通信、医疗、信息记录等技术都有了较大的进展。此外，非晶材料及高温超导的发现，也展现出广泛的应用前景。

1.2 中世纪宗教势力的专横与亚里士多德经院主义哲学体系的禁锢

在古代，自然科学并没有从哲学中分离，古希腊、古罗马时代自然科学家也就是哲学家。宇宙的本源是物理还是精神，这是宇宙观的基本问题。以苏格拉底和柏拉图为首的唯心主义学派认为，宇宙的创立出于有目的的安排，给人眼睛是为了看东西，给人耳朵是为了听声音。如果不给我们鼻子，那么香味有什么用处？如果不是用舌头来品尝甜、酸和可口的滋味，那么人们对这些滋味会有什么知觉呢？而这些安排都是神的作用。柏拉图是苏格拉底的弟子，他认为真实的知识源泉是灵魂对理念世界的回忆，这是绝对荒谬的理念神秘主义。

公元前 9 世纪，古希腊诗人荷马的著名诗篇《伊利亚特》和《奥德赛》中就记载着丰富的传说与神话。公元前 8 世纪，希腊诗人肖特的《神谱》一诗记载了关于宇宙创生的传说：第一个出现的是一张张开的大嘴，接着是宽博胸膛的大地，而后是爱神爱罗丝；大嘴生出阴间和黑夜，黑夜怀胎，产生明亮的天空和白昼；大地诞生出有星星的天空，天穹笼罩大地使之永恒不动摇；大地还生出高山和大海，山上居住着喜爱山林的半神半人的女神们……从公元前 6 世纪到公元 1 世纪，宇宙学曾有过不少学派论争，中世纪后则陷入神学深渊，地心说主宰一切。

罗马帝国（公元前 753 年）成立后，基督教成为国教。由于政教合一，亚里士多德的宇宙观很自然地与之融合而产生了经院主义的哲学体系，亚里士多德的宇宙观认为天上分为许多等级构造，各有尊卑优劣；地上也有以法老、主教、皇帝等尊贵的至高无上的权威，他们统治了天上人间（图 1-1）。当然，意识形态也就以此为标准了。经院哲学和神学占据了统治地位，人们稍有不逊，或有对

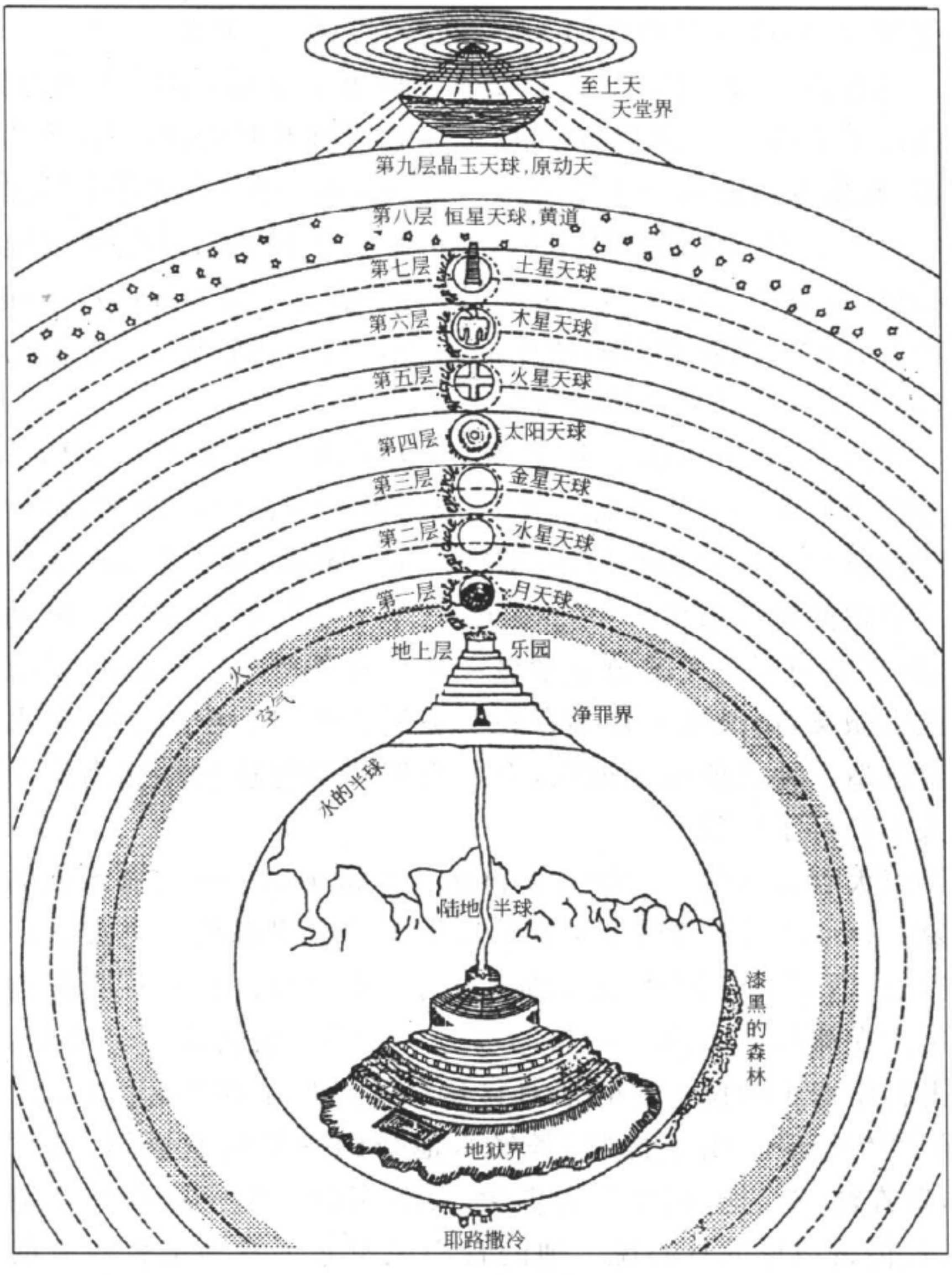


图 1-1　中世纪的位阶构造图

抗宗教的言行都被视为大逆不道、异端邪说，有的要被送往宗教法庭受审，布鲁诺就是典型的一例，这将在后面再详述。

远在古希腊时代，亚里士多德就提出二界说，即以月亮为界，月亮以上为神界，凡神界天体均做圆运动而不下坠；月亮以下为世俗界，凡俗界物体均做下落运动。直到牛顿指出，月球不下坠是因为它有较大的横向速度的原因，但牛顿不能回答月球的横向速度从哪里来，他把它归于第一推动，即上帝给的。康德提出星云演化论和万有斥力来解释横向速度的来历，拉普拉斯指出了康德的错误，提出横向运动来自角动量守恒。

实际上，人类认识宇宙自然有两大领域，一是科学，二是神学。凡是科学不能或暂不能证实的领域就被神学占领。例如，标准宇宙学涉及到宇宙的初始条件，即宇宙第一推动，谁是万能的主宰给出了宇宙的初始条件？自古以来，科学无法回答这个第一推动的问题（当然中国古代的道家学者庄周应该例外）。于是，神学家们对此大做文章，鼓吹上帝的存在。他们在《圣经》中说："某些人对上帝创造天地之前说三道四，上帝为那些胆敢追究如此高深命题的人准备好了地狱。"

意大利著名的天文学家布鲁诺就是被神学宗教迫害致死的科学家。1548 年，布鲁诺生于意大利那不勒斯诺那城一个没落小贵族家庭，由于家境贫困，他未能上大学。15 岁时，他在一所修道院做工。在那里他阅读了大量的书。1572 年，他成为一名牧师，并获得哲学博士学位。这时他对自然科学产生了兴趣，从而对宗教神学产生怀疑。由于批判《圣经》，他受到宗教法庭通缉，流亡异乡，曾在法、英、德、捷克等国讲学，反对宗教哲学及托勒密的地心说，宣传哥白尼的日心说。他的日心说引起了罗马宗教裁所的恐惧和仇恨。1592 年，罗马教徒采用欺骗手段把他骗回意大利，并立即逮捕。刽子手使尽了种种威胁利诱手段，但布鲁诺坚贞不屈，遭受了 8 年的折磨，最后被宗教法庭处以火刑。1600 年 2 月 17

日，布鲁诺被烧死在罗马的鲜花广场。布鲁诺大无畏地捍卫了真理，藐视反动的宗教法庭，在生命的最后时刻，庄严地向刽子手宣布："你们对我宣读判词，比我听到判词还要畏惧！"在布鲁诺遇害289年之后，人们在他殉难的鲜花广场上，树立起他的铜像，永志纪念。

布鲁诺以生命捍卫并发展了哥白尼的日心说，他认为宇宙是无限的，在太阳以外还有类似的天体系统；太阳只是其中一个天体系统的中心，而不是整个宇宙的中心；太阳不是不动的，它对于其他恒星的位置也是变动的。

宗教神学对科学家的迫害一直延续到17世纪。哥白尼的不朽著作《天体运行论》直到他临逝前才出版。滑稽的是一位署名"无名氏"的奥西杰神父为这部书写了个序，序言中说："此书所提出的不是一桩科学事实，而只是一套闹着玩儿的幻想。"但不知此序言是妄图贬低巨著的伟大意义，还是为了愚弄出版当局的检查。1632年，另一位天才的意大利天文学家、哲学家、数学家和物理学家伽利略出版了他的《关于托勒密和哥白尼的两大世界体系的对话》。这本书才出版了几个月，伽利略就被召到罗马受审，主教团判决：①这本书是禁书；②三年里，他必须每周背诵七篇忏悔书；③他被无限期监禁在家中。当时伽利略已年逾70，当他被迫在判决书上签字时，心里默念着："可是，地球还在转动着啊……"伽利略在监禁中完成了另一部书《关于两种新科学的对话》，1637年此书在荷兰秘密出版。爱因斯坦评论说："伽利略的发现以及他所用的科学推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。"1979年11月10日，罗马教皇在公共集会上承认伽利略在17世纪30年代受到的审判是不公正的。1980年10月，教皇又在梵蒂冈举行的世界主教会议上提出重新审理这个冤案。伽利略的沉冤昭雪说明了真理是不可抗拒的。

尽管亚里士多德被奉为圣贤，他的学说在中世纪还是不断有

人批驳，逐渐被新的见解所代替。

6世纪希腊有一位学者对亚里士多德的运动学说持批判态度，他叫菲洛彭诺斯(J. Philoponus)。他认为抛体本身具有某种动力，推动物体前进，直到耗尽才趋于停止，这种看法后来发展为“冲力理论”，其代表人物是英国牛津大学的威廉(William of Ockham，1300—1350)。他认为，运动并不需要外来推力，一旦运动起来就要永远运动下去。他写道：“运动并不能完全与永恒的物质区分开，因为当可以用较少的实体时，就无需用更多的实体……没有这一额外的东西，就可以对各种运动给予澄清。”例如，关于抛射体运动，他解释为：“当运动物体离开投掷者后，是物体靠自己运动，而不是被任何在它里面或与之有关的动力所推动，因为无法区分运动者和被推动者。”他举磁针吸铁为例，说明要使铁运动并不一定直接接触，并且还进一步设想，这种情况在真空中也能实现，可见亚里士多德认为真空不存在的说法是可疑的。

当然，威廉的说法并不等于惯性原理，但这却是走向惯性原理的重要步骤。因为，如果运动不需要原因，一旦发生就要永远持续，亚里士多德的推动说就要从根本上受到动摇。

巴黎大学校长布里丹(F. Buridan，1300—1358)也是批判亚里士多德运动学说的先行者。他反对空气是抛射体运动的推动者，亚里士多德对抛射体的解释是：在抛射体的后面形成了虚空区域，由于自然界惧怕虚空，于是就有空气立即填补了这一虚空区域，因而形成了推力。布里丹反问道：“空气又是受什么东西的推动呢？显然还有别的物体在起作用，这样一连串的推动根源何在呢？”他又举出磨盘和陀螺的例子，它们推动时无前后之分。两支标枪：一支两头尖，另一支一头尖一头钝，然而投掷时并不见得前者慢后者快。水手在船上，只感觉到迎面吹来的风，而感觉不到背后推动的风。这些都说明：“空气持续推动抛射体”的说法不符合事实。于是他提出“冲力理论”，认为：“推动者在推动一物体运动时，便对它

施加某种冲力或某种动力。”

布里丹的工作被两个人继承而继续进行，一位是 Saxony 的阿尔伯特（Albert，1316—1390）；另一位是奥里斯姆（Nicholas Oresme，1320—1382），他是布里丹的学生。他们发现了冲力理论，阿尔伯特运用冲力来说明落体的加速运动，认为速度越大，冲力也越大，他写道：

“根据这个（理论）可以这样说，如果把地球钻通，一重物落入洞里，直趋地心，当落体的重心正处于地心时，物体将继续向前运动（越过地心），因为冲力并未耗尽。而当冲力耗尽后，物体将回落。于是将围绕地心振荡，直到冲力不再存在，才重又静止下来。”

阿尔伯特这个例子在后来伽利略的著作中也有讨论，可见布里丹、阿尔伯特、奥里斯姆等人的早期工作为伽利略和牛顿开辟了道路。不论是伽利略还是牛顿，都在自己的著作中留下了冲力理论的烙印。

1.3 物理学初始发展时期的几种思辨方法

16 世纪以后，由于航海、战争、工业生产的需要，力学的研究得到了真正的发展，但是，要批驳亚里士多德关于落体运动等的错误理论，要真正从经院主义哲学体系中挣脱出来，从亚里士多德精神枷锁下解脱出来是非常困难的。这是一场思想革命。这里，我们就不得不花一些笔墨来介绍物理学初始时期值得提出的几个问题。

1. 悖论的思辨方法

首先，我们介绍关于运动的悖论（paradox），这就是芝诺悖论。

芝诺（Zenon Eleates，约公元前 490 年—约公元前 436 年）出生于意大利南部的埃利亚城，是古希腊埃利亚学派的主要代表人物之一。他是古希腊著名哲学家巴门尼德（Parmenides）的学生。

芝诺极端信奉巴门尼德关于世界上真实的东西只能是“唯一不动的存在”这个信条，否定现实世界的运动，认为运动或变动是不可能的，并断言承认运动就会导致矛盾。芝诺以诡辩的方式阐述他这一学派的观点，其中芝诺的关于运动的四个悖论最为闻名。这四个关于运动的悖论引起了学术界极大的骚动，其余波至今尚未完全平息。下面介绍芝诺关于运动的四个悖论。

二分法 “运动不存在。理由是：位移事物在达到目的地之前必须先抵达一半处。”意思是：要通过 AB，必先要从 A 出发到达 AB 一半的 C；要到达 C，必先要到达 AC 一半的 D；要到达 D，必先要到达 AD 一半的 E。如此进行下去，永无止境，所以得出结论：运动不可能(图 1-2)。

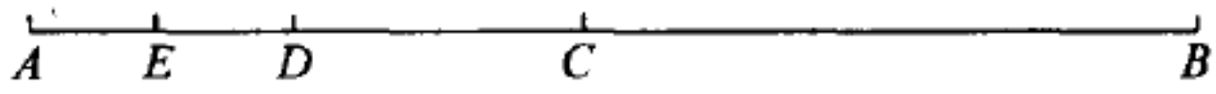


图 1-2　二分法示意图

阿克琉斯论证 “一个跑得最快的人永远追不上一个跑得最慢的人。因为追赶的人必须首先跑到被追的人跑的出发点，因此跑得慢的人始终永远领先。”意思是：甲的速度虽远大于乙，但乙先行于甲。甲要超乙，必先要赶上乙先达到的 B 点，当甲达到 B 点时，乙已进到 C 点，当甲达到 C 点时，乙又进入了 D 点。如此下去，结论是甲永远赶不上乙(图 1-3)。

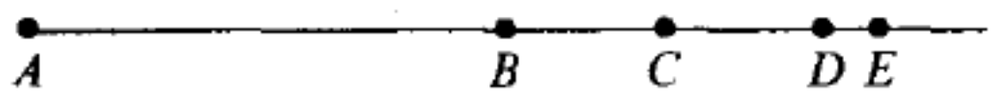


图 1-3　阿克琉斯论证图

飞矢不动 “飞着的箭静止着。”飞箭在任一瞬间必静止在一确定的位置上。所以，运动就是许多静止的总和。

运动场问题 “跑道上有两排物体，大小相同，数目相同，一排从终点排到中间点，另一排从中间点排到起点，它们以相同的速度做相反的运动，芝诺认为这里可以说明，一半时间和整个时间相

等。”原来的排列如图 1-4(a)所示；做相反方向的运动后，排列如图 1-4(b)所示。第一个 B 到达最末一个 L 的同时第一个 L 也到达了最末一个 B 处。这时第一个 L 已经经过了所有的 B，而第一个 B 只经过了 A 的一半。因此，一半时间和全部时间相等（这里引述的是亚里士多德《物理学》中介绍的）。

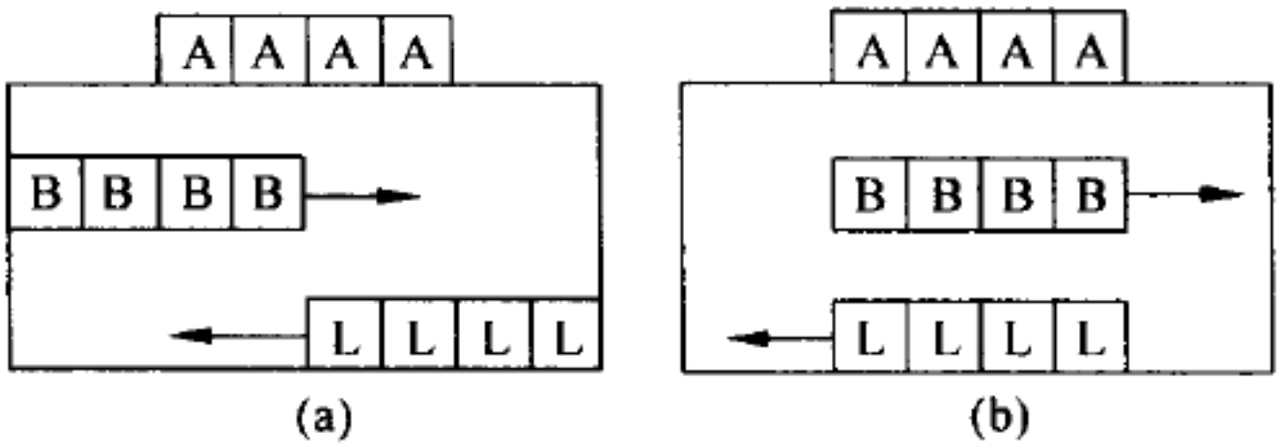


图 1-4　运动场问题

芝诺是揭示静止与运动、时间与空间的相互矛盾的第一批人之一。芝诺发现并注意到了运动的矛盾性，这个事实给以后的逻辑学、数学和哲学的发展带来了极大的影响。

在新旧学说激烈冲突并最终导致新学说代替旧学说的“科学革命”时期，从旧理论中引申出来的重要的“科学佯谬”，往往成为旧学说的送葬曲和新学说的催生婆。伽利略为了驳斥亚里士多德的运动理论而十分机智地从亚里士多德的理论结论中导出的“落体佯谬”，不仅对亚里士多德的理论进行了有力的“证伪”和否定，而且提出了“物体的下落运动到底是如何进行的”这个重要问题。对这个问题的实验和理论的探讨，使伽利略得到了著名的自由落体定律，进而接触到了力与运动的真实关系，最终把力学研究引上了正确的方向，导致了近代物理学中第一个完整的理论体系——牛顿力学理论的创立，成为近代物理学的真正开端。

在力学上，亚里士多德主要着眼于对“运动的原因”的探讨。他从神学目的论出发，将原因分为四种，即质料、形式、动力和目的，但是“后三者常常可以合而为一，因为形式和目的是同一的，而

运动变化的根源又和这两者是同种的。……”因而实际上亚里士多德是将世界划分成两个方面，即质料和形式。他指出，要解答运动“为什么”发生，就必须根究到“质料”和“形式”。亚里士多德认为，物质性的“质料”只是“潜在的”一种“可能性”，是僵死的和被动的；非物质性的“形式”不仅可以独立于质料而存在，是“现实的”，而且是主动的，具有活动性的，它联系于目的和运动变化的根源，是推动者，形式高于质料。任何运动着的事物，必然都有推动者在推动着它运动，但推动者也被推动着，如此追索下去，必然存在一个不带任何物质形式、不需要任何质料的最高的推动者，即“第一推动者”，“它是永恒的，先于其他而自身不动的推动者，可以作所有其他事物运动的根源。第一推动者必然是一个并且是永恒的。”亚里士多德根据这个观点考察机械运动，形成了他的运动理论。

亚里士多德认为，组成地面上物体的四种元素的本质差别，主要不在于它们的物质特性，而在于它们的自然运动的特性和在空间占据其特定位置的趋势。它们都有其本质上的轻或重，他写道：“我把那些在没有其他干扰的条件下总是向上运动的东西称做轻物体，总是向下运动的物体称做重物体。”各种元素都有回归到其静止的“天然位置”的趋势。土元素是绝对的重，它的天然位置在最低层；水元素是相对的重，它处在土的上面；气元素是相对的轻，它处在水的上面；火则是绝对的轻，它处在最高层。亚里士多德由此形成了他的“自然归宿”说：在不受外力的情况下，各种物体都会由于组成它的元素的本性而做回归到它的天然位置的运动，这种运动称为“自然运动”。重的物体竖直下落和轻的物体竖直上升的运动就是这种“自然运动”。地面上任何物体的实际运动，取决于组成它的最大数量的元素的倾向。含土元素最多的石头必然向宇宙的中心坠落，主要由火元素组成的烟焰必然会腾空升起；水受热而形成的水汽，由于吸收了大量的火元素而向上空升起；水汽在冷却中由于释放出火元素而恢复了水的优势特性，转而凝结降落到

下面的位置。

根据这种“自然归宿”说，必然会得出这样的推论：某一物体返回其“天然位置”的速率，完全取决于组成物体的各元素所占的比例，同占优势地位的元素的数量成正比。比如，大的石块由于比小的石块含有更多的土元素，所以当这两块石头自由下落时，大石块比小石块快得多，或者说经过相等的空间，重的东西比轻的东西落的时间要短一些。在《论天》这部著作中，亚里士多德明确写道：

“一定的重量在一定的时间内运动一定的距离；一较重的重量在较短的时间内走过同样的距离，即时间同重量成反比。比如，如果一物体的重量为另一物体重量的二倍，则它走过一给定距离只需一半的时间。”

在伽利略之前，亚里士多德的运动理论，特别是他的落体定律，已经受到不少人的怀疑，他们通过对运动情况的一般观察而得出了基本正确的结论。这些人的工作使长期被压抑的理智终于从对古代权威的屈从转化成一股不可抗拒的力量，发起了对亚里士多德的物理学的冲击，促使人们逐渐改变了对运动的观点。其中特别应该指出的是，比利时著名的力学家斯蒂文(Simon Stevin，1548—1620)于 1568 年出版的《静力学原理》的附录中所记载的落体实验。他写道：

“反对亚里士多德的实验是这样的：让我们拿两只铅球，其中一只比另一只重十倍，把它们从三十英尺的高度同时丢下来，落在一块木板或者什么可以发出清晰响声的东西上面，那么它们发出的声音听上去就像是一个声音一样。”

用直接实验证明亚里士多德的理论，这是十分有意义的，不过这个实验在很长时期内鲜为人知。后来流传很广的关于伽利略以“比萨斜塔实验”使经院哲学家们目瞪口呆的故事，很可能是张冠李戴地把斯蒂文的实验加于声名卓著的伽利略名下的误传了。人们只知伽利略而不知斯蒂文，这是可以理解的，因为正是伽利略的

工作才使物理学的研究发生了根本性的变化。

伽利略在《关于两种新科学的对话》中，以三人对话的形式，生动活泼地讨论了物体运动和新力学问题。这三个人是代表亚里士多德观点的辛普利邱，代表伽利略观点的萨尔维阿蒂和善于思考、不偏不倚的沙格列陀。关于自由落体的讨论，是构成这本巨著的最精彩的中心内容，但它并不是直接从实验入手，而是首先从一个理想实验提出的“佯谬”对亚里士多德的落体定律提出诘难，逐步展示出他的研究的丰富内容。让我们来欣赏一下这场机智风趣的对话：

萨：“我十分怀疑亚里士多德确实曾经用实验检验过下面这个论断：如果让两块石块（其中之一的重量10倍于另一块的重量）同时从高处，比如说100腕尺（1腕尺＝20英寸）高处落下，那么这两块石头下落的速率便会不同，那较重的石块落到地上时，另一块石头只不过落下10腕尺。”

辛：“他的话似乎表明，他已经做过这个实验。”

沙：“辛普利邱，可是我进行过检验，我可以肯定地对你说，重量为200磅以上的一枚炮弹到达地面时，重量仅为半磅的与之同时下落的步枪子弹并不会落后一柞（1柞＝9英寸），倘若二者都是从高度为200腕尺的地方落下来的话。”

萨：“我们取天然速率不同的两个物体，显而易见，如果把那两个物体连接在一起，速率较大的那个物体将会因受到速率较慢物体的影响其速率要减慢一些，而速率较小的物体因受到速率大的物体的影响其速率要加快一些，你同意我的这个想法吗？”

辛：“毫无疑问，你的这种看法是对的。”

萨：“但是，如果这是对的话，并假定一块大石头以（比如说）8的速率运动，而一块较小的石头以4的速率运动，那么把两者连在一起，这两块石头将以小于8的速率运动；两块连在一起的石头应当比先前以8的速率运动时要大。但按照先前的说法，较重物体

反而比较轻的物体运动得慢；而这个效应同你的设想相反。由此可以看出，我是如何从你认为较重物体比较轻物体运动得快的假设推出了较重物体运动较慢的结论来了。”

辛：“我简直不知怎么说好了……这就是说，这简直超出了我的理解力。”

这就是著名的“落体佯谬”，地地道道的一个科学“悖论”，它一下子就揭示出了亚里士多德落体理论的破绽和逻辑混乱；它同时也表明了，运用理想实验的推理法，比起永远可以被人挑剔指责的大量真实的实验来，会更容易、更有说服力地推翻一个包含着错误的理论。

“落体佯谬”的提出，以极其尖锐的形式揭示了亚里士多德落体定律的谬误。那么，落体到底是做什么样的运动呢？伽利略卓越地运用了一套理性思维和实验检验相结合的方法对自由落体运动的具体形态作了正确的描述，并把它纳入到一个更为普遍的运动理论体系之中，为新力学的建立奠定了基础。

2. 理想实验——理性思维与实验检验相结合的方法

在伽利略的落体运动定律的形成过程中，斜面实验起过重要作用。他在书中对这个实验描述得十分具体，写道：

“取长约 12 库比(1 库比＝45.7 厘米)、宽约半库比、厚约三指的木板，在边缘上刻一条一指多宽的槽，槽非常平直，经过打磨，在直槽上贴羊皮纸，尽可能使之平滑，然后让一个非常圆的、硬的光滑黄铜球沿槽滚下，我们将木板的一头抬高一、二库比，使之略倾斜，再让铜球滚下，用下述方法记录滚下所需时间。我们不止一次重复这一实验，使两次观测的时间相差不致超过脉搏的十分之一。在完成这一步骤并确证其可靠性之后，就让铜球滚下全程的 1/4，并测出下降时间，我们发现它刚好是滚下全程所需时间的一半。接着我们对其他距离进行实验，用滚下全程所用时间同滚下一半距离、三分之二距离、四分之三距离或任何部分距离所用时间进行

比较。这样的实验重复了整整一百次，我们发现，经过的空间距离恒与所用时间的平方成比例。这对于平面（也即铜球下滚的槽）的各种斜度都成立。我们也观测到，对于不同的斜度，下降时间的关系与作者预计并证明过的比例一样。”

“为了测量时间，我们把一只盛水的大容器置于高处，在容器底部焊上一根口径很细的管子，用小杯子收集每次下降时由细管流出的水，不管是全程还是全程的一部分，都可收集到。然后用极精密的天平称水的重量，这些水重之差和比值就给出时间之差和比值。精确度如此之高，以至于重复许多遍，结果都没有明显的差别。”

这个实验设计安排得非常巧妙，许多年来，人们都确信伽利略当年就是按他所述的方案做的。在历史博物馆中甚至还陈列着据说是伽利略当年用过的斜槽和铜球。

在这本书中，他再次表述了惯性定律，他用图 1-5 中小球的运动来说明他的见解。假设沿斜面 AB 落下的物体，以 B 点得到的速度沿另一斜面 BC 向上运动，则物体不受 BC 倾斜的影响仍将达到和 A 点同样的高度，只是需要的时间不同而已。

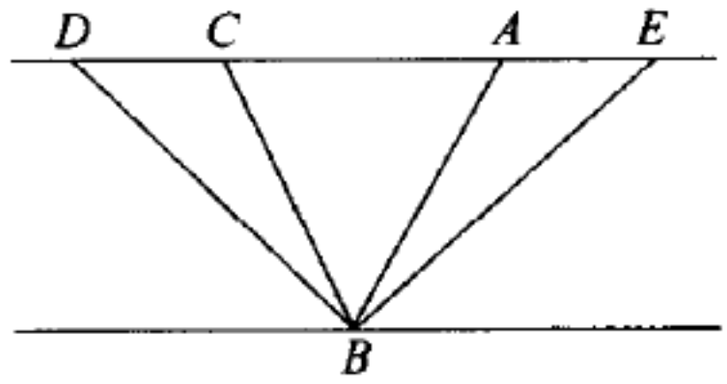


图 1-5　伽利略关于斜面运动的插图

若斜面坡度降低，则小球会不断延伸运动下去。

请再读他的作品中的另一段对话：

“萨：……如果没有引起球体减速的原因……你认为球体会继续运动到多远呢？

辛：只要平面不上升也不下降，平面多长，球体就运动多远。

萨：只要这样一个平面是无限的，那么，在这个平面上的运动同样是无限的了，也就是说，是永恒的了。……”

这就为惯性定律的建立奠定了基础。

惯性定律是牛顿力学的重要基石之一，从亚里士多德的自然哲学转变成牛顿的经典力学，最深刻的变化就在于建立了惯性定律。前者认为“一切物体的运动都是由于其他物体的作用”；而后者认为“每一个物体都会继续保持其静止或沿一直线做等速运动的状态，除非有力加于其上，迫使它改变这种状态。”这就是牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中，作为第一条公理提出的基本原理。

1.4 牛顿力学的建立与机械观的形成

若要介绍牛顿力学的建立，这里先要介绍一段脍炙人口的名言。牛顿在一封给胡克的信中写道：“如果我看得更远，那是因为站在巨人的肩上。”在这里“巨人”指的是笛卡儿等人，当然不言而喻也包括了牛顿多次提到的伽利略、开普勒和哥白尼。其实牛顿完成的综合工作是基于中世纪以来世世代代从事科学研究的前人所积累的成果，牛顿和前人的关系如图 1-6 所示。下面我们介绍一下几位的重要贡献。

欧几里得(Euclid，约公元前 300 年)，古希腊数学家。他的代表作《几何原本》从一些定义、公理出发，通过演绎方法，建立了严谨的逻辑体系。这本书早先以手抄本流传，他死后约 700 年才正式出版发行，到 19 世纪末已有一千多种版本，仅次于《圣经》。A. 爱因斯坦曾经作出这样的评价：“如果欧几里得未能激起你少年时代的热情，那么你就不是一个天生的科学思想家。”牛顿的《自然哲学的数学原理》既用到它的几何知识，也仿效了它的体系和风格。

G. 伽利略(Galileo Galilei，1564—1642)，意大利科学家。他原本学医，却对欧几里得的几何学和阿基米德的力学极有兴趣，从

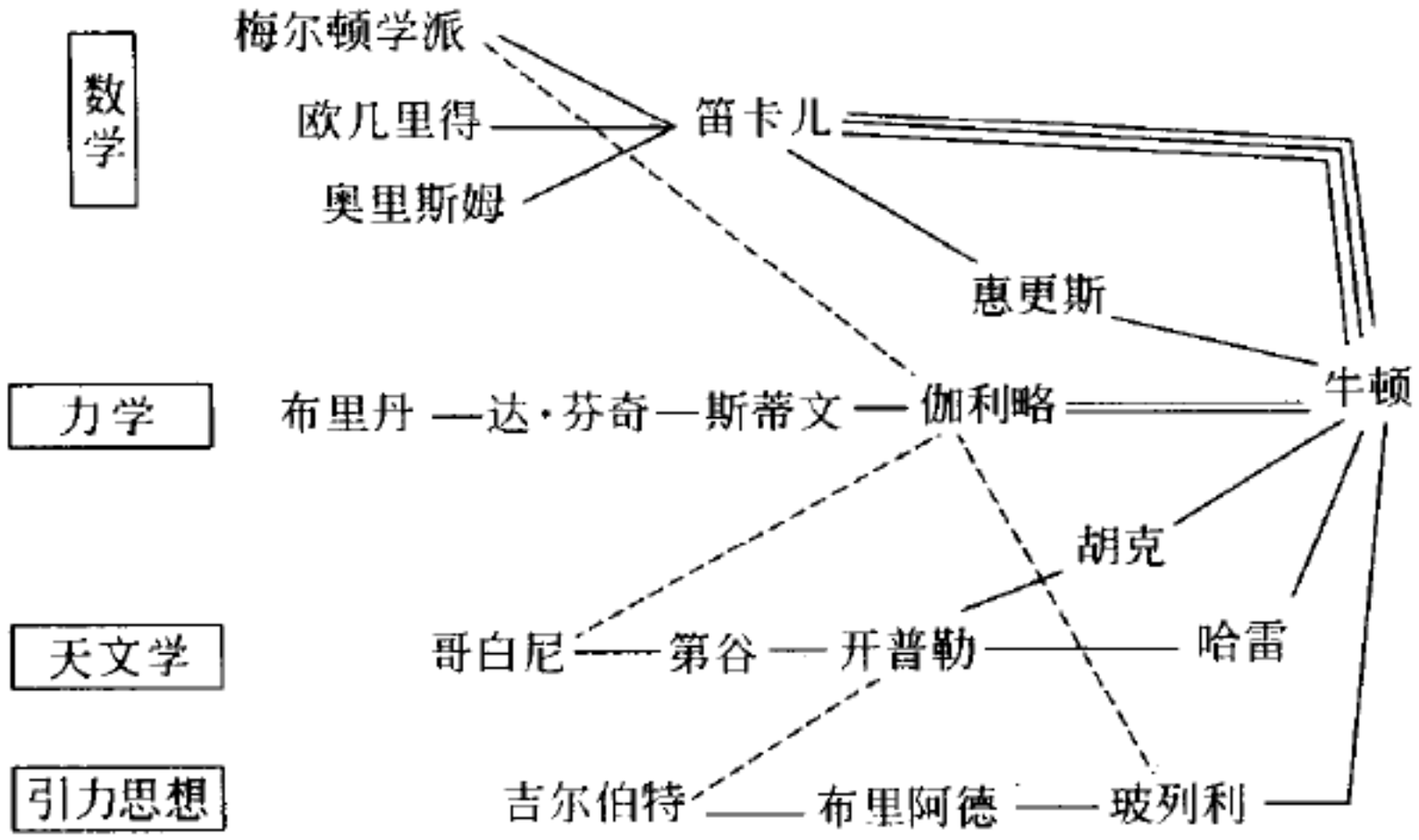


图 1-6　牛顿与前人的关系

而转向数学和物理学。有关他的工作，前面已作了不少叙述，这里再简要地说几点。他发现摆的周期性、运动的叠加性及惯性、重力加速度是恒定的等重要规律，并提出著名的力学相对性原理，常称为伽利略相对性原理。这些工作奠定了动力学的基础，使力学走向精密科学。不过，伽利略并没有进行传说中的比萨斜塔实验（重物与轻物同时下落）；他所说的惯性运动，指的也不是匀速直线运动，而是圆周运动。由于伽利略积极宣传 N. 哥白尼的日心说，受教会迫害被判处终身监禁。直到 20 世纪 80 年代，梵蒂冈的教皇才为伽利略平反昭雪。

J. 开普勒（Kepler，1571—1630），德国天文学家。他信奉哥白尼学说，利用 B. 第谷（Tycho Brahe，1546—1601）积累的二十多年的天象资料及自己的观察结果，发现了行星运动的三定律（1609—1619）。牛顿的万有引力公式正是在开普勒定律的基础上提出来的。有关他的工作下面还将再作介绍。

R. 笛卡儿（Descartes，1569—1650），法国学者。他的工作前面已经作过介绍，这里再介绍一些有关天体研究方面的工作。他

致力于以机械来描绘自然界的普遍图像。为了说明天体运动，提出旋涡以太；正确地表述了惯性定律(1644)，并且将它作为一条基本定律，确认物体的重量是外力；首次提出动量守恒定律(1644)，但他没有考虑到动量的方向性。笛卡儿对牛顿的影响是多方面的。他的《哲学原理》中也有自然界的三条基本定律，可以说，牛顿的运动三定律是对笛卡儿的修正。

另一方面，牛顿也注意从同辈学者中吸取滋养，其中有物理学家 C. 惠更斯、R. 胡克，天文学家 E. 哈雷、J. 弗兰斯蒂德(flamsteed，1646—1719)等。不过应指出，牛顿心胸狭窄，难以与之交往，他与胡克、弗兰斯蒂德、G. W. 莱布尼兹都发生过重大的争吵；在待人接物上，牛顿的名声是很不好的。

I. 牛顿(Newton，1643—1727)出生于英国一个不富裕的农民家庭，那一年正好伽利略去世。牛顿是遗腹子，童年并不幸福，靠祖母抚养成人，这也许对他后来怪僻的性格有所影响。早先牛顿对占星术颇为爱好，1660 年他进入剑桥大学学数学，就是“打算去试验合法的占星术”，他一生都很重视天文观测数据。牛顿从小就对宗教有深厚的感情，其行为接近于清教徒，常有犯罪感，终身未娶。学生时代，牛顿广泛阅读了各类书籍，涉及天文学、数学、力学、光学、化学、神学以及炼金术等领域。他对《圣经》有很深造诣，甚至比许多神学家的理解更透彻；在牛顿的遗物中，有大量关于宗教的手稿。

牛顿的成就是多方面的，特别是《自然哲学的数学原理》对人类作出了巨大贡献。此书于 1678 年出版，标志着力学作为一门严谨科学的诞生。它以若干公理和定义为基础，仿效欧几里得的风格，并且只使用了当时人们比较熟悉的几何方法，其中最主要的内容有关于运动的三条定律、万有引力的论述及应用。

大家知道，有这样一个美好的传说：牛顿在果园中散步，偶然见到一个苹果落地，从而触发了他的灵感并导致万有引力的发现。

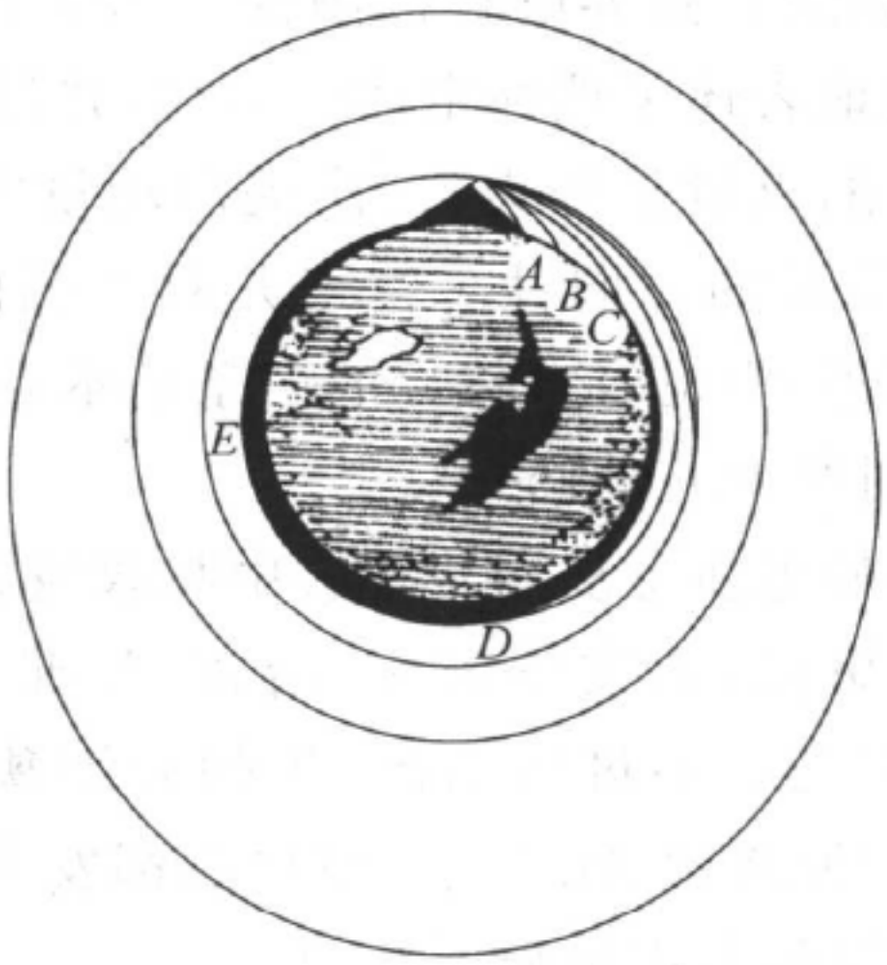


图 1-7　牛顿的抛物体运动图

无论这个故事的真实性如何，牛顿确实有过类似的思考，从抛体的下落联想到月球的不落。图1-7是《自然哲学的数学原理》中的一幅插图，图中表示了抛物体的轨道由近而远，然后过渡到圆形轨道、椭圆轨道。牛顿在晚年回忆过去时，曾写道：

同年（指 1666 年），我开始想到将重力延伸到月球的轨道，并且知道如何估算一个圆形物在球体内旋转时压于球面的力，根据开普勒定律，行星公转周期的平方运行的力必然与它们离旋转中心距离的平方成反比的结论，从而将月球沿轨道运转所需之力与地球表面的重力相比较，发现它们几乎协调得很好。所有这些都是我在 1665 年和 1666 年瘟疫年内完成的，因为那时我正处于创造发明的旺盛时期，对数学和哲学的热情，甚于此后任何时候。此后，惠更斯发表了对离心力的看法，猜想应在我之前。……

接着，牛顿记述了在 1676 年与 1677 年之间的冬天，他利用与距离平方成反比的力，得出行星的椭圆轨道及开普勒第二定律（等面积定律）。

以万有引力来说明行星的运动，不可避免地要触及动力学的一些基本概念，如质量、重量、力与运动的关系。尽管牛顿将质量定义为“物质的度量”，经常遭到后人的指责，但他竟不含糊地表明：“每一物体的质量由重量得知，因为根据我非常精确地做过的摆实验，我发现质量与重量成正比。”关于运动定律，牛顿这样叙述了第二定律：“运动的改变与外加动力成正比，并沿着外力作用的直线方向。”并且用作用和反作用的概念，即第三定律，取代了笛卡儿的动量守恒定律。

牛顿所总结出的三条运动定律，是机械运动最根本的规律，它们是经典力学的逻辑起点，由此可演绎出一系列的力学定理。第一定律是总纲，它涉及到惯性和力这两个最基本的概念。从整体上看，运动定律仍然是以“力”为中心；可以认为，惯性无非是从反面来说明力的效应。

牛顿对万有引力的物理机制未加任何说明，而且，平方反比的定律形式，又显示了这种引力的超距作用特征，即星体之间某一时刻的距离决定了同一瞬间星体所受的引力，这意味着万有引力的传递既不需要时间，也不需要传递媒介。于是，万有引力定律就受到一些学者的批评及笛卡儿学派的非难。笛卡儿认为，星体的运动是旋涡以太作用的结果。牛顿在这里明智地采用了务实的科学方法论，他将自己的理论谨慎地建立在对外在世界可靠观察的基础上，牛顿说：“到现在为止，我还不能从现象上发现引力性质的原因，而且我不创造假设；……对我们来说，引力真正存在，并按照我们已解释过的规律发生作用，而且足以说明天体和海洋的所有运动，这就够了。”

牛顿所谓的“不创造假设”，其实质是反对回避检验的空谈和无法证实的假说，这与唯理主义是针锋相对的。当然，科学理论并不能完全排除假说，爱因斯坦曾以牛顿的绝对空间概念为例，指出经验中并没有与之对应的东西，它就不是从经验中培植出来的

"假说"。

从亚里士多德到笛卡儿，他们都急于回答"为何"，而牛顿则紧紧抓住"如何"，再一层一层地探索下去。牛顿所遵循的正是"由表及里"的研究方法，他认为："真理由现象传达到我们……而原理是隐藏起来的。"尽管牛顿自己也不认为超距作用是合理的，甚至在他的《光学》书中还提出了引力与以太联系的思考，但他无法在理论中反映出这些看法，因为星体的运动现象只能导致平方反比的引力形式。牛顿将他的研究模式明确地写在《自然哲学的数学原理》的序言内："从运动的现象去考察自然界的力，再以这些力去验证其他现象"。一个没有任何机理说明的万有引力理论，终于战胜了物理图像具体的旋涡以太学说，这是令人深思的。牛顿敢于提出有超距色彩的万有引力，正表明了牛顿的超人胆识；对一般人，它是不可逾越的障碍，而对牛顿，则仅仅是带来一种遗憾，"让别人去发现它们的原因"。

P. S. M. 拉普拉斯(Laplace，1749—1827)在谈到牛顿的成就时，着重说明了时代如何造就这位伟大的天才：

大自然产生伟大的天才时，还须为他先预备好最适宜的环境。笛卡儿将代数学应用于曲线及变函数上，……惠更斯则发现运动的传递定律，伽利略对于落体，惠更斯对于渐屈线与离心力的研究导致曲线上运动的理论。开普勒已经确定行星所走的曲线，而且窥见了万有引力。最后胡克已经了解行星的运动是抛出它的原始力与太阳的引力组合而成的结果。因此天体力学这朵花的开放，只等待一个有才智的人来完成，他将把以上所说的这些发现联系起来，更加以普遍化，由此导出引力定律。这便是牛顿在其巨著《自然哲学的数学原理》内所作出的成就。

牛顿力学的发展，主要包括两大方面：一是研究对象的扩展；二是探讨形式的更新。力学研究对象的发展，表现在两个方面：其一，它的研究对象由单个质点扩展到越来越复杂的力学系统，以至

弹性波、气体分子运动；其二，力学定律的表达形式不断地更新，越来越抽象，其含义也越来越深远，使机械运动的特有规律与物质运动的其他规律逐渐接轨。

这主要体现在天体力学、流体力学和刚体力学、弹性力学的深入发展方面，在力学定律的形式更新方面，力学的基本定律是牛顿的第二运动定律，而《自然哲学的数学原理》中并未给出它的精确形式。我们今天所使用的公式

$$\boldsymbol{F} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m\boldsymbol{v})$$

是欧拉于 1750 年给出的。

牛顿力学得以迅速发展，在很大程度上归于欧洲大陆的一些优秀数学家。由于他们的努力，力学定律的表达形式一次又一次地推陈出新。在解析方法的基础上，矢量表达式发展为标量表达式，定律的常微分方程发展为偏微分方程，定律的微分形式演变到积分形式，从直角坐标系扩展到任意坐标系，从惯性参照系过渡到一般参照系。

在力学理论的演变中，以势函数来代替保守力，这是一个关键性的进展。力学定律表达形式的演变，原来是为了扩大应用的需要及使用上的方便，其结果却使力学基本规律显示出极为对称的形式。拉格朗日-哈密顿的分析力学不仅对经典力学是重要的，而且很容易推广到物理学的其他领域。下面再谈谈机械观的问题。

所谓机械观，即以机械运动的特点和规律来说明物质世界的所有其他运动，或者反过来说，将各种物质形态的运动都归结为机械运动。显然，机械观的物理基础就是牛顿力学。要了解机械观及其兴衰，不能不追溯到牛顿力学的建立、发展，以及它对物理学其他领域的影响、渗透；当然，最后还得涉及牛顿力学所遭遇的困难。

在牛顿力学创建之前，机械观就出现在西方各国，机械钟表的

发明及广泛使用，助长了机械观的流行。可以说，笛卡儿是机械观的鼻祖，他甚至认为人体也是一种机械；“给我广延和运动，我就能创造出一个世界来。”这是笛卡儿的名言。T. 霍布士（Hobbes，1558—1679）是机械哲学的鼓吹者，虽然他并不了解力学的数学方法，却认为伽利略的这种方法无处不可以应用。

牛顿在《自然哲学的数学原理》中即宣称：“自然界的其他一切现象，全可以根据力学的原理，用相似的推理，一一演绎出来。”这不只是牛顿一个人特有的看法，而是代表了那个时代的共同信念。又如 1690 年惠更斯也说过：“在真正的哲学里，所有的自然现象的原因都用力学的术语来陈述。”

牛顿力学的迅速发展及其对经典物理学其他领域的成功渗透，有力地助长了机械观的发展。自《自然哲学的数学原理》问世以来，差不多一直到 19 世纪末，很少有物理学家对机械观持批判态度；相反，人们对到处开花结果的牛顿力学无不顶礼膜拜。从康德、拉普拉斯，到因为电磁波实验而著名的 H. R. 赫兹（Hertz，1857—1894），都是机械观的忠实信徒。

康德在《宇宙发展史概论》中写道：“唯独力学的解释方式才颂扬了宇宙之美，同样也颂扬了神的启示的万能。”赫兹在《力学原理》中则认为：“所有物理学家都同意：物理学的问题在于将自然现象回溯到力学的简单定律。”（见该书的前言）

赫兹不仅是一位杰出的实验物理学家，而且对麦克斯韦的电磁场理论有深入的研究；正是他，重新论证了麦克斯韦的学说，将电磁场的基本方程进行了合理的清理。赫兹持机械观，可以认为从侧面说明了，当时的电磁场理论的基础仍然带有力学的色彩。显然，赫兹的观点是受到他的恩师 H. von. 亥姆霍兹（Helmholtz，1821—1894）的影响。亥姆霍兹是医学博士，但对物理学、生理学、数学以及哲学的研究都有重大成就；特别是，他为论证各种物质运动中的能量守恒作出了卓越的贡献。尽管他熟知各种运动形态，

却认为一切物质运动都应该归结为机械运动，一切自然科学都可以归结为力学。

在20世纪之前，机械观至少流传了200多年。因此，机械观的内涵不可能不有所变化，即使在同一时代，不同的学者也会有不同的看法。这里，我们只是依据20世纪以前物理学界流行的机械观，概括出几个主要特点：

物质的粒子性 持机械观的人往往都是原子论者。牛顿在《光学》里这样谈到原子："我以为上帝造就的一切东西，其颗粒大概都是有质量的实体，坚硬而不可穿透，但可以移动。……它们是磨不碎敲不破的。"牛顿的原子模型长期影响着人们的看法，即认为原子具有不可分性、不可入性、不可变性。

运动的决定性 经典物理学认为，任何物质粒子的运动都具有确定的轨道，可以同时决定粒子的位置和速度；如果已知粒子运动的初始条件和动力条件，就可以精确地预言粒子今后的运动。这种决定论常称为机械决定论。

时空的绝对性 按照传统的时空观，时间和空间的测量彼此无关，也与观测者的运动状态无关；甚至认为，宇宙中存在着绝对静止的空间背景。物质的粒子性和时空的绝对性，导致经典物理学中出现了很多绝对的物理量。

作用的泛力性 在牛顿的创导及影响下，除了万有引力、电力、磁力，还有什么聚合力、发酵力等，几乎在物质之间的所有作用中都有广义的、延伸的"力"的概念。19世纪初，拉普拉斯就认为所有的物理现象都可以用粒子之间的吸引力和排斥力来说明。学者们对力的具体理解是很不统一的：笛卡儿反对力的超距作用；而牛顿则容忍了力的超距表述；安培派的连线力与毕奥派的横向力曾经互争高下；力从单纯的位置函数发展到还可以依赖粒子的运动；赫兹则走向另一极端，致力于建立一个没有力的力学。

通常根据机械观的上述特点，认为机械观必须导致外因论，而

物质运动的变化只有量变、没有质变；这种论点，实际上排除了机械运动具有内因，并且全然无视宏观世界中物质运动形态有着“质”的多样性，从而将这些“质”的变化统统称为量变，这些似乎都是缺乏说服力的。

19 世纪，正当机械观鼎盛时期，奥地利的 E. 马赫（Mach，1838—1916）却勇敢地站出来对牛顿力学进行了一系列的批判。马赫在物理学、空气动力学、生理学、心理学诸方面都有出色的研究成果，又是一位有独立见解的思想家。他首先指责牛顿对质量的定义（1868），然后在他的《力学史评》（1883）中批评了牛顿的绝对时空及绝对运动概念，认为物体的惯性应由宇宙中所有的物质决定；此外，马赫从自己的经验论哲学思想出发，强调了可观察量的重要性。所有这些，都深深影响了 20 世纪近代物理学的进展，爱因斯坦曾称颂《力学史评》为“真正伟大的著作之一”。

马赫认为力的概念有拟人特点，可以用能量的概念来取代它；在这一点上，马赫对赫兹是有影响的。不同的是，马赫猛烈地抨击了机械观，他说：“把力学看做是物理学其他分支的基础是没有根据的，由力学来说明一切物理现象是一种偏见。”

对机械主义自然观的更严厉的批判，来自新的实验事实。

1887 年观测“以太风”得出零结果；1897 年发现电子；在这前后又发现了天然放射性（铀放射，1896；钋和镭放射，1898）；热辐射实验规律表现出“紫外光灾难”（1899—1900）；1902 年证实电子质量与速度有关；同年又发现光波说难以解释的光电效应。这些确凿无误的实验结果，明显地背离了 19 世纪的物理学，有力地冲击着传统的机械观，为新物理学的建立奏起了序曲。

20 世纪一开始，就提出了量子学说（能量子，1900；光量子，1905）和狭义相对论（1905）。自此以后，近代物理学蓬勃发展，向高速领域、微观世界、宇宙世界迈进；陈旧的机械观不再适应新的情况，在更广阔的天地里，牛顿力学相形见绌，其局限性清楚地暴

露了出来。

这在后面的章节中还有叙述，这里就不赘言了。不过，我们应该认识到，机械观是物理学发展过程中的必然产物，它的提出绝不是幼稚可笑的，它使物理理论彻底摆脱了神学的干扰，带动了整个经典物理学的成长；即使在现代，牛顿力学也没有丧失它的活力，在大量现代化的工程技术中仍然正常地发挥着它的作用。科学是有继承性的，当我们谈论机械观的偏激和片面性时，对那些为机械观奋斗过的前辈，还是应怀着崇敬、感激的心情。

在近代物理学里，物质的波粒二象性及由此产生的量子力学，对机械观的冲击是最彻底的；量子力学放弃了粒子运动的轨道概念，因而也就放弃了机械决定论。这使得对经典概念眷恋难舍的“老派”物理学家不满意量子力学的流行解释（即哥本哈根学派的正统解释），其中最著名的有爱因斯坦、L. V. 德布罗意等人。由于这些物理学家坚持在微观世界中保留传统的决定论，他们的观点被称为新机械观。

新机械观是指生物学里的机构观或还原论。持这种论点的人认为：生物学最终将还原为物理学和化学。其对立面“生机论”或“活力论”，则怀疑物理学和化学是否具有这种能力。不管怎样，在当代的自然科学中，生物力学、生物物理等学科已破土而出，并正以新的生命力奋发崛起。

第 2 章　从冷和热引出的话题

2.1　热质说盛行与“热”测量的问题

自古以来，无论在东方还是在西方，人们普遍认为，宇宙万物都是由少数几种基本的原始物质组成的，这些原始物质可简称为原质。最早有各式各样的一元或多元的元素说，此后发展成原子(有重的颗粒)说和元气(无重的流体)说。

热质说即热素说，最早可追溯到将火作为物质的基本元素。热质说认为热质是导致冷热的一种自相排斥的无重流质，可透入一切物体而不生不灭。

就像化学家和物理学家都继承了原子说，物理学家和化学家又都继承了热素说。

在化学界，燃素说一度取代了热素说。1777 年，拉瓦锡(Lavoisier，1743—1794)发现氧，也积极支持了热素说的振兴；1738 年，法国科学院悬赏关于热的本性的论文，获奖者都是持热质说观点的人，拉瓦锡本人就是热质说的热情鼓吹者，1789 年他在《化学概论》一书中将“热”列为一种气态元素，符号为 T；道尔顿(John Dalton，1766—1844)也有同样的看法。甚至到了 19 世纪 50 年代，我国某引进的化学书仍然将“热”作为化学元素之一。热与化学之间的联系本来就是密切的，化学反应一般都表现出吸热和放热现象。

热质说的重新崛起，化学家拉瓦锡作出了杰出的贡献，而后来热质说的发展及量化，则主要归功于物理学家。在热平衡、物态转变的研究中，热质说显示了它的价值，并且开始在物理学里发挥

作用。

另一方面，关于热的本质一直还存在着另一种看法，他们否认热是一种特殊的物质，而主张热从属于“物体内部的运动”。玻意耳曾经以锤对钉子的打击使钉子变热的事实，来阐明这种观点。1798 年，朗福德（Rumford，1753—1814）伯爵进行了有名的炮膛实验，他坚持认为，实验中的摩擦生热与热质说不相容。这位伯爵有着传奇式的一生，他原来的姓名为 B. 汤普森（Thompson），在美国宣布独立时移居欧洲，带过兵，当过间谍；曾从事火炮研制，又是物理学家、社会活动家，是伦敦皇家研究院的创建者。1799 年，H. 戴维（Davy，1778—1829）用另一方式继续朗福德的摩擦实验，他将两个冰块互相摩擦，认为摩擦过程中冰化为水与热质说矛盾；因为，水的比热比冰的大，这似乎违背了热质守恒定律。

尽管指责是尖锐的，热质论者却可以进行巧妙的辩解。这些实验的批判力量不够分量，其原因更在于，不精确的定性实验，难以与较准确的量热实验相抗衡，而热质说能够最简单有效地说明有关量热的实验结果。

到了 19 世纪，可以说热质说进入了鼎盛时期。其显著特点是高等数学的应用及数学家的介入。1818 年，P. S. M. 拉普拉斯及 S. D. 泊松采用热质说研究了气体的弹性及声速，提出绝热能升温的概念。1822 年，J. B. J. 傅里叶以热质守恒的观点建立了热传导方程。

S. 卡诺（Carnot，1796—1832）则用热质说来研究蒸汽机的效率。卡诺的父亲曾研究如何提高水轮机的效率，这对卡诺产生了不小的影响。卡诺将蒸汽机类比于水轮机、热流类比于水流、热量守恒类比于水量守恒、温度差类比于高度差，将蒸汽机的工作原理抽象为某种弹性流体（如空气）所进行的循环过程，这个循环由两个等温过程和两个绝热过程组成，后来被称为卡诺循环。在此基础上，卡诺进一步得出一条重要的定理（卡诺定理，1824）：一切可

逆的卡诺热机具有相同的最大效率，其值由热源和冷凝器的温度决定。卡诺的有关论述不仅从原则上探讨了热机效率，而且实际上发现了热力学第二定律。

随着一系列热功转换及热功当量实验的成功，以及热力学第一定律、第二定律的相继提出，热质说逐渐衰败。气体分子运动论的建立给热质说带来了最后的打击，1860 年前后，热质说就一蹶不振了。

即使从 1789 年拉瓦锡正式命名“热质”算起，热质说也盛行了大约 80 年。它建立在虚假的“热质”基础上，却得出了一些有用的结论；这表明，其中一定具有正确的东西。确实，能量守恒在某些特定情况下（如传热过程），可以体现为热量守恒；又如，热质说所建立的诸如温度、比热、潜热等基本概念，以及一些重要的定量关系，后来都被移植到热力学里，为热力学的发展提供了方便。热质说能够在一定时期内立于不败之地，这仍然值得人们去进一步探讨。19 世纪末，热质说之所以打而不倒，似乎还涉及到“破”与“立”的关系，它为我们提供了一个例证，表明在自然科学的研究中，“不立不破”是不应该受到忽视的。

最后，应该澄清一个容易产生的误解，不要以为能量守恒取代了热量守恒，即等于热动说取代了热质说。德国医生 J. R. 迈耶（Mayer，1814—1878）是能量守恒和转换定律的发现者之一，他坚定地反对热质说，却并不怎么热衷于热动说；至少，他对热的原子学说持观望态度。

热，作为一种特殊物质的概念消失了，而作为大量分子、原子的一种特殊运动的概念，并未能一帆风顺地确立起来，这主要是唯能论思潮的干扰，他们的人数不多，声势却不小。

从人们开始怀疑热质说，到热质说真正被人们抛弃，其中对热的测量问题是一个重要的问题，如何定量地测定物体的冷、热程度是从 16 世纪末就开始的，其中经历了如何选择测温物质的过程。

第一个测量器是伽利略在16世纪末制造的，当然十分粗糙，但它的基本原理却至今还在应用。一个玻璃球容器连有一根开口管子，管子的开口倒放进水里，玻璃球中的空气热胀冷缩，使管中的水面随之下降或上升，也就是以空气为测温物质，利用它的热胀冷缩性能来测量温度。但这样的测温器没有定量化，圣克多利斯于1611年在上述测温器的玻璃管上做了110个等分刻度，这是空气温度计的首次出现。

第一支用液体（水）作测温物质的温度计是法国人雷依在1632年创制的，约在1644年又改用酒精为测温物质。但水会结冰，酒精又容易沸腾，于是法国人阿蒙顿又采用水银作为测温物质。

当时“温标”的概念尚未形成，温度计虽有刻度，但分度法是任意的，缺乏明确的客观依据。不过当时已有人提出要有两个固定点作为刻度的标准。如在佛罗伦萨实验科学院，以当地的夏季最高气温和冬季最低气温作为分度标，当然很不精确，刻度数也不统一，多则三四百格，少则几十格。

牛顿在测温学上也做过工作，他曾采用亚麻仁油作为测温物质，并规定雪的熔点为0度，人的体温为12度。后来荷兰的吹玻璃工匠华伦海特先后用酒精和水银为测温质，并把冰、水、氯化氨和盐的混合物的温度定为0度，冰的熔点定为32度，人体的温度为98度，水的沸点为212度。法国科学家列奥米只取一个定点，即雪的熔点为0度，而把使酒精体积改变千分之一的温度变化规定为1度。后来他接受他人的建议，把这两个定点的标度值对调过来，这样，水的沸点为100℃，冰的熔点为0℃，一直沿用至今。在美、英等国，华氏温标用得较多。

以上这些温标都与具体的测温物质有关，在精密测量中就不太好了。后来又有热力学温标，即开氏温标，它不依赖于测温物质。1967年，第13届国际计量大会规定了水的三相点的热力学

温度为 273.16K。这样热力学温度的单位就是水的三相点热力学温度的 1/273.16，并重新定义了摄氏温度

$$t = \text{热力学温度 } T - 273.15$$

温度计的发明使量热技术获得发展，对于热现象的本质的探讨也就开始了。17 世纪，笛卡儿、玻意耳、胡克、牛顿、阿蒙顿、培根等都认为热是运动的一种形式。玻意耳曾做力学实验产生热，并以铁锤敲击钉子为例说明发热是由于运动被阻止的缘故。但总的来说，“热是运动”这一假说当时还没有强有力的证据。同时又由于热质说能对一些现象进行解释而使量热技术发展受到了一定的阻碍，直到 19 世纪四五十年代能量守恒及转换定律的成立才算是把热质说真正抛弃。

2.2 工业发展要求新科学规律的诞生

19 世纪初，由于蒸汽机的进一步发展，迫切需要研究热和功的关系，对蒸汽机“出力”作出理论上的分析。所以热与机械功的相互转化得到了广泛的研究。其实，在这以前自然科学的发展就为能量转化与守恒原理奠定了基础。

机械能守恒是能量守恒定律的机械运动中的一个特殊情况。早在力学初步形成时就已有了能量守恒思想的萌芽。例如，伽利略研究斜面问题和摆的运动，斯蒂文研究杠杆原理，惠更斯研究完全弹性碰撞等都涉及能量守恒问题。17 世纪法国哲学家笛卡儿已经明确提出了运动不灭的思想，以后德国哲学家莱布尼兹(Leibniz，1646—1716)引进活力(Vis viva)的概念，首先提出活力守恒原理。他认为用 mv^2 度量的活力在力学过程中是守恒的，宇宙间的“活力”的总和是守恒的。D. 伯努利(Daniel Bernoulli，1700—1782)流体运动方程实际上就是流体运动中的机械能守恒定律。

永动机不可能实现的历史教训，从反面提供了能量守恒的例证，成为导致建立能量守恒原理的重要线索。

至19世纪20年代，力学的理论著作强调“功”的概念，把它定义成力对距离的积分，并澄清了它和“活力”概念之间的数学关系，提供了一种机械“能”的度量，这为能量转换建立了定量基础。1835年哈密顿(W. R. Hamilton，1805—1865)发表了《论动力学的普遍方法》一文，提出了哈密顿原理。至此能量守恒定律及其应用已经成为力学中的基本内容。

能量转化与守恒定律的初步形成，反映了工业发展对科学的要求，经过许多科学家的辛勤劳动，人们认识到自然界中的能量不能无缘无故地产生，也不会无缘无故地消失，永动机是注定行不通的，其中，值得一提的是卡诺早在1830年就已确立了功热相当的思想，他在笔记中写道：

“热不是别的什么东西，而是动力，或者可以说，它是改变了形式的运动，它是(物体中粒子的)一种运动(的形式)。当物体的粒子的动力消失时，必定同时有热产生，其量与粒子消失的动力精确地成正比。相反地，如果热损失了，必定有动力产生。”

“因此人们可以得出一个普遍命题：在自然界中存在的动力，在量上是不变的。精确地说，它既不会创生也不会消灭；实际上，它只改变了它的形式。”

完整的数学形式则是德国的克劳修斯(Rudoff Julius Emanuel Clausius，1822—1888)在1850年首先提出的，他全面分析了热量 Q、功 W 和气体状态的某一特定函数 u 之间的联系，考虑一无限小过程，列出全微分方程：$dQ=du+AdW$，他写道：

“气体在一个关于温度和体积所产生的变化中所取得的热量 Q，可以划分为两部分，其中之一为 u，它包括添加的自由热和做内功所耗去的热(如果有内功发生的话)，u 的性质和总热量一样，是体积 V 和温度 t 的函数，因而根据其间发生变化的气体初态和终

态就已经完全确定；另一部分则包括做外功所消耗的热，它除了和那两个极限状态有关外，还依赖于中间变化的全过程。”

这里的 u 后来人们称做内能，A 是功热当量，W 是外功。克劳修斯虽然没有用到能量一词，但实际上已经为热力学奠定了基石。

W. 汤姆生（William Thomson，即开文尔，Lord Kelvin，1824--1907）1892 年被封为开尔文勋爵。他在 1851 年更明确地把函数 u 称为物体所需要的机械能（mechanical energy），他把上式看成热功相当性的表示式，这样就全面阐明了能、功和热量之间的关系。

1852 年，汤姆生进一步用动态能和静态能来表示运动的能量和潜在的能量。1853 年，兰金（W. J. M. Rankine，1820—1872）将其改为实际能和势能，他这样表述能量转化与守恒定律：“宇宙中所有能量，实际能和势能，它们的总和恒定不变。”

这样，热力学第一定律就应运而生了。

热力学第一定律的产生，虽然已经把功、热转化问题讲得很清楚了，但是，对于工业发展来说则希望产生的热全部能变为有用的功，才能得到最大的收益。这样可能吗？

1824 年，卡诺根据热质观点已认识到：单纯提供热量不足以产生推动力，必须还要有冷。没有冷，热将是无用的。这表明循环工作的理想热机，其效率也不可能等于 1。事实上，热机效率

$$\eta = 1 - \frac{\text{放热}}{\text{吸热}}$$

这里的“放热”正是热机的工作中不得不向“冷”处（常称低温热源）输送的热量，从而使得 $\eta < 1$。

显然，$\eta = 100\%$ 的热机并不违背能量守恒定律；相反，这样的热机似乎是热力学第一定律鼓励人们追求的目标。若把不消耗能量的机器称之为第一类永动机，则如果假定循环工作的热机能够

完全堵塞通往“冷源”的热源，即只需要单一热源就可以工作，则海水、空气、土壤等都是潜力巨大的理想热源，这实际上相当于提供了另一类永动机，称之为第二类永动机。

第二类永动机是不现实的，这也使人们意识到，有关热现象的过程，除了应遵守热力学第一定律，还要受到其他规律的制约，这个规律仍然涉及热过程的方向性。

卡诺设计了一个高温热源、一个低温热源的两个等温和两个绝热过程的循环——卡诺循环，得到理想的最大效率：

$$\eta = 1 - \frac{T_{低温}}{T_{高温}}$$

经过开尔文、克劳修斯等人的努力，建立起了热力学第二定律。

开尔文说法 开尔文即 W. 汤姆生。他独立于克劳修斯提出了热力学第二定律(1851)，其陈述为：

我们不能从物质的任何部分，用冷却到低于其四周物体最冷温度的方法，借助非生物的媒质来产生机械效应。

他认为这应该是一条公理，如果违背这条公理，“我们就有一种自行作用的机械，能从一个其四周具有较高温度的其他物体的物体不断地吸热，并转化为机械效应。”由此可知，开尔文说法直接联系于：第二类永动机是不可能制成的。

通常将开尔文说法表达为：不可能从单一热源取热，使之完全变为有用的功而不产生其他影响。它表明了热、功之间转化的不对称。显然，功转化为热的过程，完全能独立自发地进行，并且功全部变为热可以不产生其他影响。

克劳修斯说法 克劳修斯比开尔文早一年(1850)提出热力学的“第二原理”，他对这个原理的陈述为：

在没有任何力消耗或其他变化的情况下，把任意多的热量从冷体传到热体是和热的惯常行为矛盾的。

这涉及到热传导的方向性。通常将克劳修斯说法表达为：不

可能将热从低温物体传到高温物体而不引起其他变化。

开尔文最早指出，他的说法与克劳修斯说法“虽然形式不同，却是互为因果的”。大约百年之后，人们终于发现，对于负温度系统，克劳修说法仍然有效，开尔文说法则不再成立，它应该改为相反的说法：不可能将功完全变为热，使之传给一个负温度热源而不产生其他影响。尽管有关热力学第二定律的各种说法，通常是彼此等价的，不过在某些情况下，这种等价性仍可能遭受破坏。

为了更概括、更精确地表达热力学第二定律，克劳修斯引入态函数熵，使热力学第二定律获得统一的数学表达式。

1854 年，克劳修斯由可逆的任意循环过程得出

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

其中，$\frac{dQ}{T}$被命名为熵 S，$\oint dS = 0$ 是可逆循环过程，$\oint dS > 0$ 是不可逆循环过程。

熵的引入，对热力学的发展有着重要的作用，熵的概念，现在已远不只在物理学中应用了。

在温度测量中对于温标的讨论引出了热力学第零定律，在常用温标中，科学研究中常用绝对温标(K)来表示。早在 17 世纪末，阿蒙顿(G. Amontons)观测到空气每下降 1 度，气体的气压也会下降一定的份额，继续降低温度，总会得到气压为零的时候，所以温度降低必存一限度。他认为任何物体都不能冷却到这一温度以下。他还预言达到这个温度时，所有运动都将趋于静止。这就是最初的绝对零度的概念。

绝对零度不能达到，在物理学的概念中似乎早已隐约预见到了。但是，作为一条物理的基本原理是 1912 年才提出的，这就是热力学第三定律，它不能由任何其他物理定律推导得出，只能看成是从实验事实作出的经验总结。

2.3 热学的微观解释和规律——分子运动论的发展和统计物理的建立

分子运动论是热学的一种微观理论，它是以分子的运动来解释物质的宏观热性质的。它依据两个基本概念：一是物质是由大量分子和原子组成的；二是热现象是这些分子无规则运动的一种表现形式。

这两个基本概念的起源可以追溯到17世纪，甚至在古希腊的自然哲学家那里也可以找到思想萌芽。古代自然哲学家们往往用朴素的原子假说来解释物质世界。公元前6世纪时，泰勒斯(Thales，公元前640—前546)就假想自然界的物质全是由水和水变成的各种物质组成，例如：土是水凝固而成，空气是水稀释而成，火则是由空气受热而成。赫拉克利特(Heraclitus)则以土、气、火、水作为物质组成的四种元素。后来，德谟克利特(Democritus，公元前460—前371)认为物质皆由各种不同的微粒组成。

分子运动论的兴起，与原子论的复活有密切联系。1658年，伽桑狄(Gassendi)提出物质是由分子构成的，他假设分子能向各个方向运动，并由此出发解释气、液、固三种物质状态。玻意耳在1662年从实验得到了气体定律，他对分子运动论的贡献主要是引入了压强的概念，并提出了关于空气弹性的定性理论。它把气体粒子比做固定在弹簧上的小球，用空气的弹性解释气体的压缩和膨胀，从而定性地说明了气体的性质，牛顿对玻意耳定律作过类似的说明，他认为：气体压强与体积成反比的原因是由于气体粒子对周围的粒子有斥力，而斥力的大小与距离成反比；胡克则把气体压力归因于气体分子与器壁的碰撞。

由此可见，17世纪已经产生了分子运动论的基本概念，能够定性地解释一些热学现象。但是在18世纪和19世纪初，由于热

质说的兴盛，分子运动论受到压抑，发展的进程甚为缓慢。

最早对热是一种运动提出确定数量关系的是瑞士人赫曼(J. Hermann，1678—1733)。早在 1716 年他就提出一个理论，认为：成分相同的物体中的热是热体的密度和它所含粒子的乱运动的平方以复杂的比例关系组成。所谓“乱运动”就是分子的平均速率，所谓“热”就是指压强；它的观念可以表述为一个公式：

$$p = K\rho v^2$$

式中，p 为压强，v 为分子平均速率，ρ 为密度，K 为一常数，仅仅取决于物体的特性。

第一位接近真正的气体分子运动论的，是瑞士著名数学家欧拉。1729 年，他发展了笛卡儿的学说，把空气想象成是由堆集在一起的旋转形分子构成。他假设在任一给定温度下，所有空气和水的粒子旋转运动的线速率都相同，由此推出状态方程：

$$p = \frac{1}{3}\rho v^2$$

他得到 p 与 ρ 的正比关系，解释了玻意耳定律，并粗略计算出分子速率 $v=477\text{m/s}$。尽管欧拉的分子运动图像与现代对气态的观点不符，但他的结果仍可看成是取得了初步的成功。

另一位瑞士数学家 D. 伯努利对分子运动论也作出了重要贡献。他在 1738 年发表的《水力学》一书中，有专门的篇幅用于讨论分子运动，并从分子运动推导出了压强公式，得到了比玻意耳定律更普遍的公式。

伯努利首先考虑在圆柱体容器中密封有无数的微小粒子(如图 2-1)，这些粒子在运动中碰撞到活塞，对活塞产生一个力。他假设粒子碰前和碰后都具有相同的速度。他分析：

“当活塞 EF 移到 ef 时，由于两方面原因它受到流体的力将会更大：一方面是由于空间缩小(单位空间的)粒子数按比例增加；另一方面因为每一个给定的粒子碰撞得更为频繁。……粒子间的

距离越近，碰撞发生得越频繁。……显然，碰撞次数反比于粒子表面之间的平均距离。”

为了计算第一种原因带来的影响，伯努利考虑粒子似乎都是静止的。若取 $EC=1$，$eC=S$。活塞从 EF 移到 ef 时，其高度由 1 减至 S。考虑到粒子均匀分布，三个垂直方向粒子数因此各增加 $1/S^{1/3}$ 倍，那么接近活塞处的粒子数应由 n 增至 $n/S^{2/3}$。他认为粒子是直径为 d 的球体，其初始平均距离为 D，则粒子表面之间的平均距离为 $D-d$。活塞落下后，粒子间的平均距离为 $DS^{1/3}$，所以表面之间的平均距离为 $DS^{1/3}-d$。

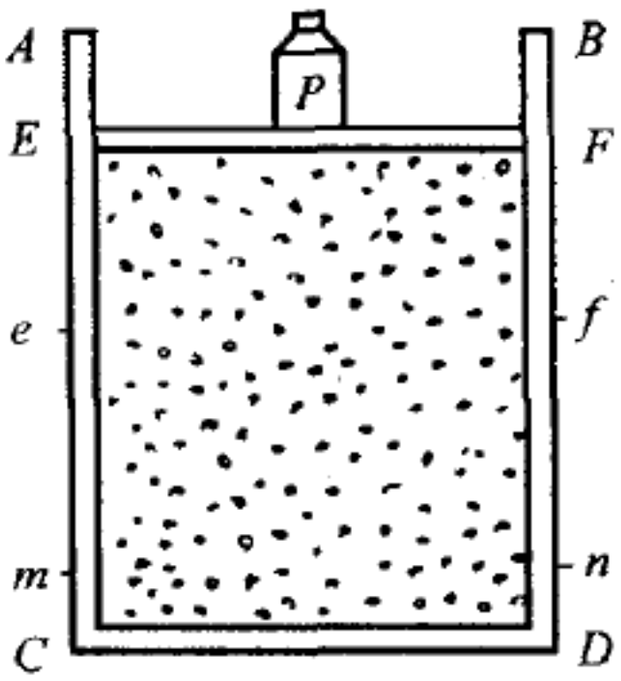


图 2-1　伯努利讨论分子运动论用图

假定压强与接触到活塞表面的粒子数成正比，与平均距离成反比，伯努利求得压缩前后压强之比为

$$\frac{p_0}{p}=S^{2/3}\cdot\frac{DS^{1/3}-d}{D-d}$$

接着，伯努利又作了一个假设：如果活塞上荷重 P 无限加大，则活塞必促使所有粒子都互相接触，这个位置为 mn，设此时的体积缩减为原来的 α 倍，则 $\frac{D}{d}=\alpha^{-1/3}$。于是压缩后与压缩前压强比为

$$\frac{p}{p_0}=\frac{1-\alpha^{1/3}}{S-\alpha^{1/3}S^{2/3}}$$

这是一个普遍结论。然后，伯努利作了如下推论：

（1）如果 $\alpha=0$，即粒子不占体积，则

$$\frac{p}{p_0}=\frac{1}{S}$$

这正是玻意耳定律。

(2) 如果能从极密的空气用实验确定玻意耳定律的偏差，就可以测出系数 α。不过必须施加极大的压力，测量要非常精确，并需注意保持温度不变。

可见，伯努利早在 1738 年就注意到要修正玻意耳定律，比范德瓦耳斯早 150 年之久。遗憾的是，伯努利的理论被人们忽视了整整一个世纪。

继伯努利之后，俄国人罗蒙诺索夫(M. B. Ломоносв，1711—1765)在 1746 年写的《关于热和冷原因的思索》和 1748 年写的《试拟建立空气弹力的理论》两篇论文里，论证了热的本质在于运动，讨论了气体的性质，阐述了气体分子无规乱运动的思想，并肯定了运动守恒定理在热现象中的应用。

另外还有瑞士的德鲁克(J. A. Deluc，1727—1817)和里萨奇(G. L. Lesage，1724—1803)，意大利的维斯柯维基(R. Boscovich，1711—1787)都曾致力于分子运动论。维斯柯维基是 18 世纪杰出的思想家之一，他提出过分子斥力模型。

19 世纪上半叶，分子运动论仍有进展。值得提到的是如下几位：

1816 年，英国的赫拉帕斯(J. Herapath，1790—1868)向皇家学会提出自己的分子运动理论。他明确地提出温度取决于分子速度的思想，并对物态变化、扩散、声音的传播等现象作出定量解释，但是权威们认为他的论文太近于遐想，拒绝发表。

1846 年，苏格兰的瓦特斯顿(J. J. Waterston，1811—1883)提出混合气体中不同比重的气体，所有分子的 mv^2 的平均值应相同。这大概是能量均分原理的最早说法。

焦耳在 1847—1848 年也曾发表过两篇关于分子运动论的演讲。他指出，热是分子运动的动能或分子间相互作用的能量。他还求出了气体分子的运动速率，并据此计算出气体的比热，与实验结果进行了比较。焦耳的文章发表在一不知名的杂志上，因此很

少为人们所知，对分子运动论的复活影响不大。

热质说衰落后，它被热的动力论取而代之，于是就创造了一个对分子运动论复活很有利的形势，因为人们自然地就会想到，既然热和机械功有当量关系，可以相互转变，热就应该与物体各组成部分的运动有确定关系。正因为这个原因，在建立热力学上作过重大贡献的实验物理学家焦耳和理论物理学家克劳修斯都分别提出了自己对分子运动的看法和有关理论。可见，分子运动论在19世纪中叶紧跟着热力学第一定律、第二定律的提出而得到发展，是有其必然的逻辑联系的。

通常都把分子运动论的复活归功于德国化学家克里尼希(A. K. Krönig，1822—1879)，他激发了克劳修斯和麦克斯韦的思路发展，他写道：

“……正如一个球投向墙壁，它的自由路程会被看成是运动开始时球中心到墙的距离，其实自由路程是这段距离减去球的半径。所以考虑到分子的直径，自由路程变小，碰撞次数增加了，于是反抗的压强也就按比例地变大。”

范德瓦耳斯假设分子排成正方体，每个分子可看成是直径为σ的球，分子间的平均距离为λ，根据克劳修斯的推算，如果其余分子均处于静止，则一个单独运动的分子的平均自由程为

$$l = \frac{\lambda^3}{\pi\sigma^2}$$

如果其余分子均以同样速度运动，则平均自由程应为

$$l_1 = \frac{3\lambda^3}{4\pi\sigma^2}$$

利用这一关系，范德瓦耳斯继续推算分子直径对平均自由程的影响。他写道：

“……如果所有的碰撞都发生在沿分子中心连线的运动中，则l_1应减去碰撞发生的中心间距，因为自由程的始端和末端都必须

减去分子直径的一半。故

$$l_2 = l_1 - \sigma$$

或
$$l_2 = \frac{\lambda^3 - 4\pi\sigma^3/3}{\frac{4\pi\sigma^2}{3}}, \qquad \frac{l_2}{l_1} = \frac{\lambda^3 - 4\pi\sigma^3/3}{\lambda^3}$$

考虑到 $\sigma/2$ 是被看成球分子的半径，$n\lambda^3$ 等于单位体积，以 V 表示；$4\pi n\sigma^3/3$ 等于分子本身体积的 8 倍，得：

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{V - 8b_1}{V}$$

这里 b_1 是分子的体积。”

范德瓦耳斯进一步考虑，认为 $8b_1$ 应改为 $4b_1$，他的理由是：

“（上面考虑的）碰撞仅限于对心的，因此取平均时，l_1 应减去比 σ 小的值。从下面的考虑，我们可以找到应从 l_1 中减去 σ 多大的分值。在碰撞的瞬间，运动分子的中心处在围绕第二个分子的中心、半径为 σ 的球面上。设想这个球面被垂直于运动方向的平面平分。若对心碰撞时，运动分子中心处于半球面的其他各点上，路程所减去的值应是运动分子的中心距该平面的距离，所以平均路程所减去的平均值应是半球面的平均坐标。但由于运动分子中心落在半球面上任一点的机会相等，我们必须对半球面上相等面元取平均坐标，而不是像容易想到的那种对平面上的相等面元。我们必须求出半球面的重心坐标：

$$\int Z\mathrm{d}\omega \Big/ \int \mathrm{d}\omega$$

这里 $\mathrm{d}\omega$ 是面元，Z 是平均坐标值，这个半球面的重心的坐标，已知是半径的一半，所以 l_1 应减去 $\frac{\sigma}{2}$ 而不是 σ。令 $l_1 - \frac{\sigma}{2} = l_3$，我们得到 $l_2/l_1 = \frac{V - 4b_1}{V}$。”

于是范德瓦耳斯导出了 $b = 4b_1$ 的关系。

范德瓦耳斯之所以能取得如此突出的成就，并在这一领域产生巨大影响，主要是由于他对分子运动比前人有更明确的概念，他继承并发展了玻意耳、伯努利、克劳修斯等人的研究成果，并注意到安德鲁斯等人已经从实验中发现了气液连续的物态变化，这些实验结果为他的工作提供了实践基础。

麦克斯韦(James Clerk Maxwell，1831—1879)发现气体分子速度分布律是分子运动论和统计力学的发展史中的一件大事。他是在1859年开始进行这项工作的，当时他28岁，已是皇家学院(King's College)的教授。1855年他开始研究土星卫环稳定性时，就曾注意到卫环质量的分布问题，他企图用概率理论处理，但是由于问题过于复杂似乎没有希望解决，所以只好放弃。不过他对概率理论的兴趣并未中断。

概率理论的发展要追溯到19世纪初，1808年，爱尔兰数学家阿德润(R. Adrain，1775—1843)在分析观测数据的误差中，提出了误差分布的两个实例。1823—1828年，德国数学家高斯(C. E. Gauss，1777—1855)对概率理论作了系统论述，推出了正则方程，也叫高斯分布律。到了1835年，天文学家魁泰勒特(L. Quetelet，1796—1874)发表了论述统计理论的专著，他还因擅长于将统计学推广到社会学领域而闻名。1848年，麦克斯韦的老师、爱丁堡大学的佛贝斯(Forbes，1815—1854)曾对1767年一次双星观测的统计结果进行过验算，引起了麦克斯韦对概率的兴趣，当时麦克斯韦刚进入爱丁堡大学，年仅17岁。后来他全面阅读了拉普拉斯等人关于统计学的著作。1850年英国著名物理学家和天文学家赫谢尔(J. F. W. Herschel，1792—1871)在《爱丁堡评论》上发表了长篇述评，介绍魁泰勒特的工作。这篇评论给麦克斯韦留下了深刻印象。

1859年4月，麦克斯韦偶然地读到了克劳修斯关于平均自由程的那篇论文，很受鼓舞，重燃了他原来在土星卫环问题上运用概

率理论的信念，认为可以用所掌握的概率理论对分子运动论进行更全面的论证。

可是在19世纪中叶，这种新颖思想却与大多数物理学家的观念相抵触。他们坚持把经典力学用于分子的乱运动，企图对系统中所有分子的状态（位置、速度）作出完备的描述。而麦克斯韦认为这是不可能的，只有用统计方法才能正确描述大量分子的行为。他从分子乱运动的基本假设出发得到的结论是：气体中分子间的大量碰撞不是导致像某些科学家所期望的使分子速度平均，而是呈现一速度的统计分布，所有速度都会以一定的几率出现。1859年，麦克斯韦写了《气体动力理论的说明》一文，这篇论文分三部分：第一部分讨论完全弹性球的运动和碰撞，第二部分讨论两类以上的运动粒子相互间扩散的过程，第三部分讨论任何形式的完全弹性球的碰撞。在第一部分中他写道：

“如果有大量相同的球粒子在完全弹性的容器中运动，则粒子之间将发生碰撞，每次碰撞都会使速度变化，所以在一定时间后，活力将按某一有规则的定律在粒子中分配，尽管每个粒子的速度在每次碰撞时都要改变，但速度在某一限值内的粒子的平均数是可以确定的。”

接着他用概率方法来求这个速度在某一限值内的粒子的平均数，即速率分布律：

“令 N 为粒子总数，x，y 和 z 为每个粒子速度的三个正交方向。x 在 x 与 $x+\mathrm{d}x$ 之间的粒子数为 $Nf(x)\mathrm{d}x$，其中 $f(x)$ 是 x 的待定函数；y 在 y 与 $y+\mathrm{d}y$ 之间的粒子数为 $Nf(y)\mathrm{d}y$；z 在 z 与 $z+\mathrm{d}z$ 之间的粒子数为 $Nf(z)\mathrm{d}z$，这里 f 始终代表同一函数。”

在此他作出了关键性的假设，即由于不断碰撞，粒子三个互相垂直的速度分量互相独立，他写道：

“速度 x 的存在绝不以任何方式影响速度 y 与 z，因为它们互成直角，并且互相独立，所以速度在 x 与 $x+\mathrm{d}x$，y 与 $y+\mathrm{d}y$ 以及

z 与 $z+\mathrm{d}z$ 之间的粒子数为 $Nf(x)f(y)f(z)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z$。”

如果假设 N 个粒子在同一时刻由原点出发，则此数将为经过单位时间以后在体积元($\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z$)内的粒子数，因此单位体积内的粒子数应是

$$Nf(x)f(y)f(z)$$

经推导可得：

① 速度在某一方向上的分量在 $x\to x+\mathrm{d}x$ 的粒子数为

$$N\left(\frac{1}{a\sqrt{\pi}}\right)\mathrm{e}^{-(x^2+y^2)}\mathrm{d}x$$

② 速率在 $v\to v+\mathrm{d}v$ 间的粒子数为

$$N\left(\frac{4}{a\sqrt{\pi}}\right)v^2\mathrm{e}^{-(x^2+y^2)}\mathrm{d}v$$

③ 平均速度 $\bar{v}=\frac{2a}{\sqrt{\pi}}$($a$ 为一常数)

④ $\overline{v^2}=\frac{3}{2}a^2$，$\overline{v^2}>(\bar{v})^2$

1860 年麦克斯韦用分子速度分布律和平均自由程的理论推算气体的输运过程——扩散、热传导和粘滞性，取得了一个惊人的结果：粘滞系数与密度(或压强)无关，随绝对温度的升高而增大。极稀薄的气体和浓密的气体，其内摩擦系数没有区别，竟与密度无关，这确是不可思议的事。于是麦克斯韦和他的夫人一起，在 1866 年亲自做了气体粘滞性随压强改变的实验。他们的实验结果表明，在一定的温度下，尽管压强在 10mmHg 至 760mmHg 之间变化，空气的粘滞系数仍保持常数。这个实验为分子运动提供了重要的证据。

麦克斯韦速度分布律是从概率理论推算出来的，人们自然很关心这一规律的实际可靠性。然而，在分子束方法发展之前，对速度分布律无法进行直接的实验验证。首先对速度分布律作出间接

验证的是通过光谱线的多普勒展宽，这是因为分子运动对光谱线的频率会有影响。1873 年瑞利(Rayleigh)用分子速度分布讨论了这一现象，1889 年他又定量地提出多普勒展宽公式。1892 年迈克耳孙(A. A. Michardson)通过精细光谱的观测，证明了这个公式，从而间接验证了速度分布律。1920 年斯特恩(O. Stern)发展了分子束方法，第一次直接得到速度分布律的证据。直到 1955 年才由库什(Kusch)和米勒(R. C. Miller)对速度分布律作出更精确的实验验证。

L. 玻耳兹曼(Boltzmann，1844--1906)是奥地利著名物理学家，他 22 岁获博士学位后，就长期致力于分子运动论的研究及热力学第二定律的微观解释。他力图以微观运动来说明宏观现象，并将现象还原为力学过程。他最早(1866)对熵增定律作出微观诠释是缺乏统计思想的，然而他居然从单一原子的温度概念出发，得出了熵函数的对数表达形式。

1868 年，他将麦克斯韦速度分布定律推广到有保守外力场存在的情况。1871 年，提出了有名的 H 定理，即在理想气体分子混乱运动的基础上，求得一个 H 函数，它满足不等式

$$\frac{\partial H}{\partial t} \leqslant 0$$

H 值的单调下降，标志着气体向平衡态靠近，在时间 t 足够长之后，气体将达到热平衡，平衡态气体的分子运动，正好服从麦克斯韦分布律。可以认为，上式就是熵增定律的微观对应式。在玻耳兹曼看来，H 定理完全是由可逆的力学定律得出的，这遭到他的老师 J. J. 洛喜密脱等人的严厉批评，他们提出了“可逆佯谬”，认为可逆的动力不能导致不可逆的热过程。

为了回答“可逆佯谬”，玻耳兹曼加强了统计概念，他指出：“热力学第二定律的分析论证只有在概率论的基础上才能成立”(1877)，在分析了均匀状态及非均匀状态出现的几率之后(这正是

现在一般教材中对宏观状态的微观状态数所作出的分析），他继续写道：

“在大部分的情况下，初始状态是可几性很少的状态，但从初始状态开始，该体系将逐渐走向可几性较多的状态，直到最后进入到最可几的状态，那就是热的平衡。如果我们把这种计算应用于第二定律，我们就能将普通所谓熵的那种量等同于实际状态的几率。”

同时，他求得体系的熵 S 与实际（宏观）状态的几率 W（即热力学几率）之间的关系为

$$S \propto \ln W$$

于是，按照上述理解，熵增对应于不均匀到均匀、不平衡到平衡；熵增的方向性只能从统计的意义上来认识，实际状态的几率应该有所涨落，而麦克斯韦分布只不过是最可几分布。

由于上式的重要性，我们在这里给出一个简单的论证。将所研究的体系分为两个相邻的子系，设待求的函数 $S(W)$ 是可微的，则首先应有

$$W = W_1 \cdot W_2$$

$$S = S_1 + S_2$$

或

$$S(W) = S(W_1) + S(W_2)$$

对上式保持 W_2 不变而改变 W_1，得

$$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}W} \cdot \frac{\partial W}{\partial W_1} = \frac{\mathrm{d}S_1}{\mathrm{d}W_1}$$

即

$$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}W} \cdot W_2 = \frac{\mathrm{d}S_1}{\mathrm{d}W_1}$$

同理，保持 W_1 不变而改变 W_2，又得

$$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}W} \cdot W_1 = \frac{\mathrm{d}S_2}{\mathrm{d}W_2}$$

由上两式，不难导出

$$W_1 \frac{dS_1}{dW_1} = W_2 \frac{dS_2}{dW_2}$$

因为 W_1，W_2 是任意给定的，这要求

$$W \frac{dS(W)}{dW} = 常量$$

而常量值与 W 无关。于是

$$dS(W) \propto \frac{dW}{W}$$

考虑到熵的可加性，此式的积分正是式 $S \propto \ln W$。

1890 年，法国著名学者 J. H. 庞加莱(Poincaré，1854—1912)又提出“循环佯谬”，又称“再现佯谬”，认为一个孤立、有限的保守力学系统在有限时间内将回复到它的起始状态；这显然表明，热力学不可能还原为力学。玻耳兹曼仍然以几率概念来答辩，他根据自己的计算表明，回复所需的时间极长，即使是一小包气体，也达到以年为单位的天文数字，回复是没有现实意义的。

M. von. 劳厄高度评价了玻耳兹曼的工作，认为：“熵和几率之间的联系是物理学的最深刻的思想之一。”热力学几率愈大，即宏观态所对应的微观态数愈多，从而体系内部的混乱程度愈高；因此，熵可以作为体系内部无序程度的量度。无序程度的增加，通常导致与规则运动相联系的做功能力的削弱；于是，熵增意味着热力学系统有用能量的减少，或者说能量的贬值。

1900 年，M. 普朗克研究黑体辐射时用到有名的 $S \propto \ln W$ 的关系式并得出

$$S = \frac{R}{N_0} \ln W = k \ln W$$

式中，R 为气体普适常数；N_0 为阿伏伽德罗常数；R/N_0 为玻耳兹曼常数(k)。

普朗克在《科学自传》中这样写道：“玻耳兹曼既没有引进这个常数，就我所知，甚至也没有考虑去研究它的数值。”又说：“因为熵

是一个相加量而几率 W 是一个相乘量，我就简单地假定 $S=k\ln W$，其中 k 是普适常数。”前面我们对式 $S=k\ln W$ 的论证，正是按照这一思路进行的。

玻耳兹曼是原子学说的坚定拥护者，他发展了麦克斯韦的分子运动论，使之成为更一般的统计理论，而且还无情地反击了“唯能论”。虽然他生前当之无愧地获得了各种荣誉，甚至“他的对手们也一直很尊重他”，但他常常抑郁寡欢，终于在 1906 年自杀身亡。这可能与他的健康状态愈来愈坏有关，最后几年里，他经受着多种疾病的折磨。在他的墓碑上，简单地刻着这样的铭文：

$$S = k\log W$$

后来，由于吉布斯、刘维等人的不断努力，逐渐使统计物理的创立得到不断地完善。

2.4 热物理留给人们值得深思的问题

1. 热寂说预示着世界末日的来临吗

克劳修斯在 1865 年提出熵的论文中，即将熵的概念用于整个宇宙，为了能表示宇宙基本定律，他又作了两点简单的假设：

(1) 宇宙的能量是恒定的。

(2) 宇宙的熵趋于极大。

按照克劳修斯的理解，宇宙熵趋于极大，即宇宙趋于热寂(热死)，整个世界都停止不动了，即宇宙到处的温度、物质浓度、化学成分……一切都均匀一致，那时宇宙就要失去活力，再也没有可利用的能量了，这就为“世界末日”论提供了“科学”依据。

对此，人们进行了各种各样的批判。

有人认为：如果认为宇宙在空间、时间上都是无限的，则显然不会出现“热寂说”。因为既然过去已经历了无限长的时间，而至今尚未进入“热寂”，人们也没有什么特别的理由相信未来的宇宙

一定会走向“热寂”。这也就是说，对一个无限的宇宙，谈论它的熵值及熵极大是无意义的。而且，我们现在讨论“热寂”实际上是将有限时空范围内的局部经验，推广至无限时空的宇宙，这根本不适用于整个宇宙。

也有人认为：热力学所讨论的是孤立系统，实际它并不是完全没有外界的，而推广到宇宙，宇宙是一个整体，其意义上则不能算作为孤立系统。

也有不少人从哲学的角度来批判，宇宙能的守恒应反映在量上的守恒和质上的不灭，即能量可用性不灭，能量永远保持多样性和转化性，如果能量丧失了质的守恒，量的守恒也就失去意义了。

玻耳兹曼曾想利用概率观点设想宇宙正处于平衡态的涨落中，遗憾的是尚未有天文学上的实验证实。

2. 信息、有序和麦克斯韦妖

1871 年，麦克斯韦在《热的理论》一书中，谈到对热力学第二定律的限制问题。他首先肯定了热力学第二定律在宏观上“无疑是正确的”，接着通过一个思想实验表明，当我们跟踪单个分子的运动时，有可能出现违反热力学第二定律的结论。这个思想实验的主角是自然界里根本不存在的“精灵”，被称为麦克斯韦妖。关于麦克斯韦妖的讨论，后来衍生出信息及负熵的概念，它们与熵的意义相反，联系于有序性。

麦克斯韦在该书的结尾回顾热力学第二定律时，曾写道：

“我们知道，在一个温度均匀的充满空气的容器里的分子，其运动速度决不均匀，尽管任意选取的任何大量分子的平均速率几乎完全一样。现在让我们假定把这样一个容器分为 A 和 B 两部分，在分界上有一个小孔，再设想一个能见到单个分子的精灵，打开或关闭那个小孔，使得只有快分子从 A 跑到 B，而慢分子从 B 跑到 A。这样，它就在不消耗功的情况下，使 B 的温度升高，A 的

温度降低，而与热力学第二定律发生矛盾。”

1871 年以前，麦克斯韦在与友人的通信中也不止一次谈到这个思想实验。

1929 年，L. 西拉德（Szilard，1898—1964）分析了麦克斯韦妖的操作过程，认为此妖在操作前应先取得关于分子位置及运动的信息，然后储存起来建立记忆，这样才有操作的依据。于是，信息概念首次被用于热力学问题，西拉德的思考可以看做是信息与熵相联系的序曲。

进一步的研究主要是由法国物理学家 L. 布里渊（Brillouin，1889--1969）作出的。他引用信息及负熵的概念仔细分析了麦克斯韦妖的行为，定量地阐明麦克斯韦妖并不能动摇热力学第二定律；如果将他的论证翻译为通常的热力学语言，可以大致介绍如下。

若该妖能觉察分子运动的快慢，就要从分子那里取得信息，如接受从分子那里散射来的光，这就需要有照明分子的辐射源（例如，手电筒的灯泡）。设气体的温度为 T，辐射源的温度为 T_S（$>T$），则辐射能 E 进入容器，应有熵增

$$\Delta S_E = \frac{E}{T} - \frac{E}{T_S} > 0$$

此外，麦克斯韦妖每接受一个光子 $h\nu$，其熵增为

$$\Delta S_D = \frac{h\nu}{T}$$

而被选分子通过小孔后，将导致气体的熵减，即

$$\Delta S_C = k\ln(W + \delta W) - k\ln W < 0$$

式中，W 为整个气体原有的微观态数，$W+\delta W$ 为分离一个气体分子后的微观态数；妖的作用是使 $\delta W<0$，这直接导致 $\Delta S_C<0$。于是

$$\Delta S_D + \Delta S_C = \frac{h\nu}{T} + k\ln\left(1+\frac{\delta W}{W}\right)$$

$$\approx k\left(\frac{h\nu}{kT} - \frac{|\delta W|}{W}\right)$$

显然，$|\delta W|/W \ll 1$，而光的频率 ν 与室温 T 很容易使得

$$\Delta S_D + \Delta S_C > 0$$

从而表明，全部过程并不违背热力学第二定律。

1948 年，贝尔实验室的 C. E. 香农(Shannon，1916—2001)研究沿传输线输送电讯，用类似于熵的玻耳兹曼表达式定义了信息量，初步建立了信息论。以莫尔斯电码为例，若以 0、1 组成 4 位数，其排列数应为 $2^4=16$，或者说存在着 $P=16$ 的可能选择；P 愈大，对应的信息量也愈大。如果现在有 3 条载波通道，每一条通道传送的 $P=16$，则总的 P 值应为 $2^{12}=16^3$。考虑到信息量的相加性，即 3 条通道的总信息量应该是单一通道信息量的 3 倍，这似乎要求信息量 I 与 P 的对数成正比，或

$$I = K\ln P$$

信息本身既不是物质，也不是能量；信息的传递却又离不开物质载体，甚至需要外界提供能量。由于噪声的传递的差错，在输送信息的过程中，信息量则是有减无增，这也表现出过程的方向性，但是它与孤立系统的熵增刚好相反。熵是无序性或混乱程度的量度，信息则要求减少不确定性，即减小混乱程度、增强有序性。于是，信息并不对应于熵，而对应于负熵，即应将上式改写为

$$I = K\ln P_0 - K\ln P$$

它表明，始态有 P_0 种选择，末态有 P 种选择；于是，信息相当于负熵。负熵概念是 E. 薛定谔最先(1943—1944)提出的，他主张："取负号的熵，它本身就是有序的一个量度"。20 世纪 50 年代初，布里渊也在贝尔实验室工作，他用西拉德的思想来发展香农的工作，使信息概念从纯粹的通信理论走进了物理学。按照这种观点，麦

克斯韦妖操作后使得气体的熵减，则是由于信息量的增大，而信息带进了负熵。

若令改写的公式中的比例系数 K 即是玻耳兹曼常数 k，则信息量的单位与熵的一致；这在通常的信息理论里很不方便的，它有自己的专用单位。信息作为科学概念，已有了越来越多的应用，除了物理学，它还进入到生物学、计算机学、语言学等领域。

3. 薛定谔的“菜单”——负熵与卡路里的并存

生命现象是最自然的一个例子。薛定谔在《生命是什么》(1944)一书中明确地写道：

“一个生命有机体在不断地增加它的熵——你或者可以说是在增加正熵——并趋于接近最大值的熵的危险状态，那就是死亡。要摆脱死亡，就是说要活着，唯一的办法就是从环境里不断汲取负熵，我们马上就会明白负熵是十分积极的东西。有机体就是依赖负熵为生的。”

一般地说，对于一个开放系统，若其熵值不变，应有

$$dS = dS_i + dS_e = 0$$

式中，dS_i 为来自系统内的不可逆过程的熵变；dS_e 为来自系统外的熵流。

由于 $dS_i > 0$，就要求 $dS_e < 0$，即需要自外界引进负熵；若为了提高系统的有序程度，则要求 $dS < 0$，这就需要自外界引进更多的负熵。于是，生物及人类的生存都需要低熵环境。

薛定谔在同一书中讲到，我们有不少饭店为了招徕顾客，在菜单上故弄玄虚地写上××菜中含有××卡路里，以此来表示多吃了此菜对人体有益，能为人体增加热量，补充营养，薛定谔则说，这种菜单上的标准尚不全面，应该在标志有××卡路里的同时，也还要标上它有××负熵值。

“熵流”和“负熵”曾经受到一些学者的严厉批评，因为它们偏离了熵原有的概念，但是尽管这样，使用它的人们却越来越多，使

用的面也越来越广。

4. 自然界中的方向性

这里我们要介绍几个自然界存在的有趣的方向性：时间的方向性、记忆的方向性和宇宙的方向性。

“子在川上曰，逝者如斯夫”，孔子站在向东流去的江水边，感慨道，过去的事情就像这江水一样，东去不复返，时间的箭头总是从过去指向未来，过去发生的事不可能再重现。比如一只玻璃杯，开始在桌上静止不动，后来不小心一碰掉在地上摔碎了，杯中的水也流了一地，这一过程是否能看到其逆过程？即地上的玻璃碎片自动聚集拼成一只完整的杯，同时洒流一地的水会自动流到杯中，最后杯子自动上升克服引力做功回到桌上原来的位置。后面这个过程，只可能在摄像机倒放时看到，真实世界中是绝不可能发生的。从这个例子可以看出，我们可以说明时间的方向性实际上是与热学中熵增大相联系的，杯与地面碰撞发热熵也增大了……而其逆过程是熵减少，于是热力学第二定律不允许这一过程发生，中国古代有一个“覆水难收”的成语，讲的是朱买臣的故事，它可以由此得到科学的解释。

人的记忆也有方向性，因为只能记忆过去，不可能记忆未来，记忆的方向始终指向过去，这是心理生理学的方向。此外，宇宙的演化也具有方向性，现在宇宙正处在膨胀时期，在这个时期，宇宙的演化是不可逆转的，时间的指向与宇宙的膨胀是一致的，其实宇宙时间就是根据宇宙的演化图景来定义的，时间的前后就是宇宙演化图景的前后，科学家们已证明，热力学第二定律的方向与记忆的方向、宇宙演化的方向是一致的，可以用它们来定义时间的方向（图 2-2）。

然而，世界真奇妙，我们有时也会看到一些反例，例如在量子世界，有可能也出现未来是可记忆的，而过去是不可记忆的现象。

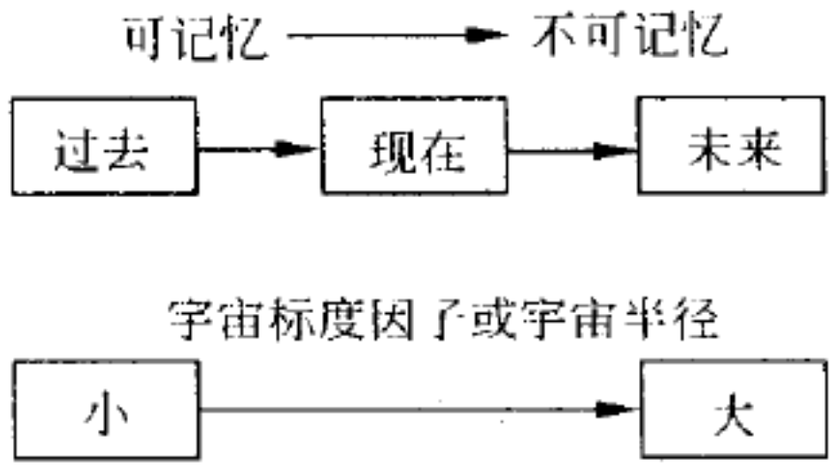


图 2-2　时间、记忆及宇宙演化的方向性

图 2-3 示意一个微观电子从 q_1 运动到 q_2 的情况，按照近代量子路径积分理论，电子在运动中从 q_1 到某中间面 P 时，电子知道自己的出发点，即过去是可记忆的，电子要落在 P 上何处，电子并不清楚，即未来是不可记忆的。但是电子从 P 面向 q_2 运动时，情况正好相反，若问电子去向何方，电子答曰：去 q_2，即未来是可记忆的；问电子从 P 的何处来？电子答曰：不知道，即过去是不可记忆的，可见微观世界有违反常规的行为。

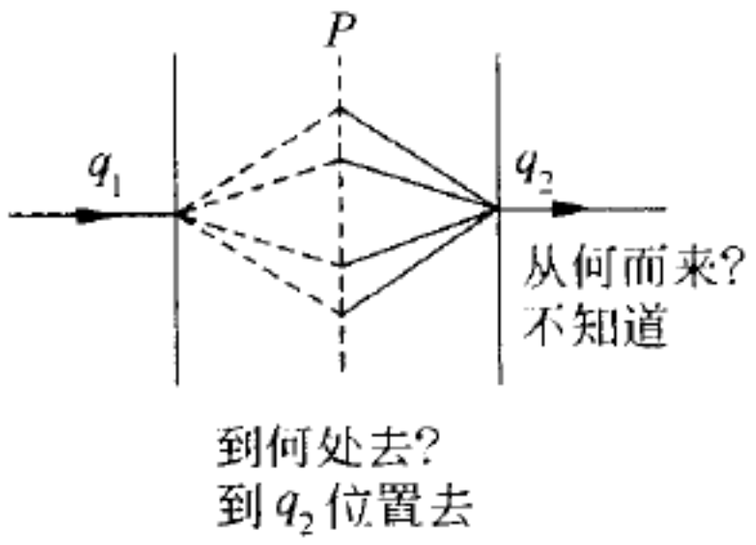


图 2-3　微观电子运动图

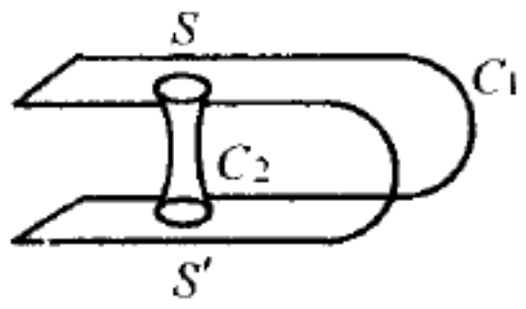


图 2-4　时空的蛀洞

再看一例，当有引力作用时，时空的拓扑结构可能会使我们能亲眼看到自己的过去。图 2-4 是一个特殊构造的时空面，它由一个管状的时空与一条弯成 U 形的时空带面粘合而成，从 S 点发出一束光，沿 C_1 绕带面前进，最后经过管状时空与带状时空的另一个粘合处 S'，它将会和从 S 点后一时刻发出的光相遇（这光是经

C_2 沿管状时空前进的，在 S' 处，后一时刻的光 C_2 会与前一时刻的光 C_1 相遇），于是 S 本人看到了自己的过去。

上面两个例子告诉我们，尽管自然界存在一些特定的方向性，但在量子与引力世界也会出现一些例外。在基普·S. 索普写的一本《黑洞与时间弯曲》的书中，有更有趣的描述，有兴趣的读者可以去读一下。

第3章　近代科学的重要基础——电磁学

3.1　电磁学发展的轨迹

电磁现象很早就为人类所注意了，但是，它却经历了几个不同的阶段。

1.“天上”与“人间”和“定性”与“定量”

公元前6—前7世纪发现了磁石吸铁、磁勺指南、摩擦起电以及雷电等许多自然现象，由于对其认识不够，这些令古代人吃惊的现象总是和天上的神明联想到一起。在西方，在公元前2000年左右，古代巴比伦的圆筒印章上就刻出持有雷斧的女神图案(图3-1)。后来又把雷作为宙斯向外投出的雷斧(图3-2)，以及宙斯投出的其他工具(图3-3)。



图3-1　持斧女神图



图3-2　宙斯投雷斧

在东方，我国的民间有的把主宰雷电之神称为雷祖(图3-4)。这个雷祖是受上天派遣而管理雷电的神明，他是一尊官员一样的

神仙，所以显得文质彬彬。然而，民间的老百姓慑于雷电闪光的威力，更多的场合是把有关雷电之神分为电母（图 3-5）和雷公（图 3-6）来分别供奉的，在一些庙宇中，也有他们应有的一席之地。

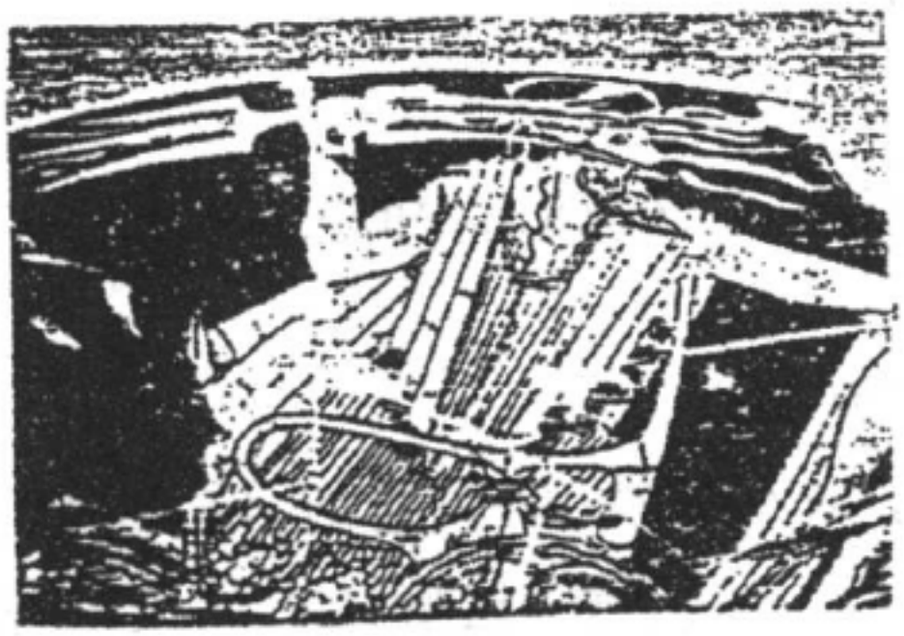


图 3-3　宙斯掷物



图 3-4　雷祖



图 3-5　电母



图 3-6　雷公

由于隆隆的雷声令人害怕，所以雷公的形象就显得比电母要狰狞。

图 3-7 是西藏所供奉的带有雷斧的雷神，在雷神传到东邻日本后，不仅带有雷斧，而且手臂也多了几个（图 3-8）。



图 3-7　西藏的雷神



图 3-8　日本的雷神

从有史记载以来，较早观察电现象的中国人在历史上是研究了雷电现象的，他们形象地创造出了雷的古文字，如冏、霄等都表明了他们的智慧和创造力。他们已经注意到雷电是来自两种对立的实体形成的，如日和月，而且是在雨天里常见的现象。后来人们又注意到摩擦起电的现象，如古希腊的哲学家塞利斯(Thales)和中国的王充等都研究了经过摩擦的琥珀能吸收草屑、芥籽的现象。而在远航船的桅杆的顶端会发出火花更是令船员们不解而视为不祥之兆，称之为“埃尔摩火”。对这些零散静电现象的较系统的观察和总结是由16世纪的英国科学家、英皇的御医吉尔伯特完成的，他从摩擦起电的实验入手，对静电现象作了定性的观察和解释。

当时有很多人想把自然界的现象，如天上的雷电与地上、人间的静电之间有无区别搞清楚，也有人想能否把天上的雷引到人间来。为此，也有人付出了宝贵的生命。

大约在1660年，德国马德堡的一位酿酒商和工程师奥托·冯·格里凯发明了第一台能产生大量电荷的摩擦起电机。一直到19世纪，这种摩擦起电机才被霍尔兹和托普尔发明的感应起电机所代替。约在1720年，英国的格雷对电荷能不能传递进行了研究，他发现不仅摩擦可以使物体带电，别的方法比如传递也可以使物体带电，他还发现导体和绝缘体的区别。法国国王御花园里的一位管家

杜菲发现绝缘体也可以通过摩擦的办法起电。他让助手把自己用绝缘丝绳吊在天花板上，亲身作人体带电实验，并发现了同性电相斥、异性电相吸的规律。荷兰莱顿大学的物理教授马森布洛克为了寻找一种保存电的方法，于1745年做了莱顿瓶实验，发明了能蓄电的莱顿瓶。这一发明，为科学界提供了一种贮存电的有效方法，为进一步研究电现象提供了一种新的强有力的手段；对电知识的传播和发展起了重要的作用。有人用莱顿瓶作火花放电杀老鼠的表演，有人用它来点燃酒精和火药。其中最壮观的一次示范表演是法国人诺莱特在巴黎一座大教堂前，邀请法皇路易十五的皇室成员临场观看莱顿瓶的表演。他调来了700个修道士，让他们手拉手排成一行，全长约1275米，然后诺莱特让排头的修道士用手拿住莱顿瓶，让排尾的修道士用手握住莱顿瓶的引线，接着让莱顿瓶放电，一瞬间700多个修道士因受电击几乎同时跳了起来，在场的人无不为之目瞪口呆。诺莱特以令人信服的证据向人们表演了电的巨大威力。美国费城的本杰明·富兰克林利用莱顿瓶发现了正电和负电及电荷的守恒定律。他的另一项重大的工作是统一了天电和地电，彻底破除了人们对雷电的迷信。1752年，他做了著名的风筝实验，将雷雨云中的电荷收集到莱顿瓶中，并证明这些电荷与实验室中其他电荷性质是一样的。为了引下天电，他本人曾被雷电击晕过去，他苏醒过来后还风趣地说："好家伙，我本想电死一只火鸡，结果差一点电死一个傻瓜。"富兰克林的实验惊动了费城教会，他们虽然斥责富兰克林冒犯神权，是对上帝和雷公的大逆不道，但富兰克林仍坚持研究，制造了世界上第一个避雷针。据说一百多年之后，费城盖了一座新的教堂，神职人员怕遭雷击，派人去找爱迪生，请教他新教堂要不要装避雷针，爱迪生讥讽地说："雷公也有疏忽大意的时候，你说要不要装呢？"人类在攀登科学高峰时，不总是一帆风顺的，有人甚至为了科学事业以身殉职。1753年7月26日，俄国科学家罗蒙诺索夫的老师利赫曼教授在实验室做实验时，看到雷雨欲来，便匆

匆回家，准备观察检电器的指针有什么变化。不料一个霹雷突然打下来，击倒了他。待罗蒙诺索夫闻讯赶来时，利赫曼已为人类的科学事业贡献了自己的生命。

物理学告诉我们，科学研究中“没有量化，就不可能深化”，因此，从英国的卡文迪许和法国的库仑开始进行了定量研究，尤其是贝内特发明的历史上的第一个验电器及库仑发明的扭秤则揭示出了电荷的种类、电量的多少、电荷相互作用力的大小等许多定量的静电规律。

在库仑作扭秤实验前，卡文迪许测带电情况时有 $F=\frac{k}{r^n}$，$n=2\pm\frac{1}{50}$（其中 F 是相互作用力；k 是与相互作用的两电荷量相关的确定值；r 是相互作用的两电荷的间距。）的实验结果，现结合仪器配合理论分析，得出的平方反比的偏差为 3×10^{-16}，平方反比定律在原子物理中也适用。

1785 年库仑定律建立以后，法国数学家西蒙·泊松于 1812 年用数学方法证明了，处于静电平衡的导体内部任何带电粒子所受的力为零，否则导体内部会有电荷流动。1813 年，德国的高斯得出了真空中的电通量的高斯定理，即

$$\oint_s E\cos\theta \mathrm{d}S=\frac{1}{\varepsilon_0}\sum q_i$$

1828 年，英国数学家乔治·格林第一个提出势的概念，由此推出静电学的不少重要结果。

2.“静”与“动”的电磁互生

在 1800 年以前，静电学只是一个与技术无缘的“静”电学年代。在公元 1786 年，伽伐尼发现了青蛙的肌肉因受到手术刀接触而会发生痉挛的现象，他称其为“动物电流”。之后，“静”电变成了“动”电，但未能获得稳定、持续的电流，也未能和工程技术连接起来，而公元 1800 年意大利的伏打发明的电堆才真正揭开了电学研

究中的新的一页，“动”电时代来到了。

1820 年下半年是电磁学的发展时期，奥斯特根据电通过直径较小的导线导致发热，继续减小导线直径会导致发光的现象，推测若直径再小会导致磁效应，但没有获得成功。后来他想，是否不是沿着电流方向的纵效应而是垂直电流方向的横效应呢？奥斯特基于这一思想又做了各种实验，在同年 4 月一次讲课中他偶然发现在电流附近的小磁针微微地跳动了一下，奥斯特紧紧抓住了这一现象，他苦苦进行了为时三个月的连续的实验研究，终于在 1820 年 7 月 21 日，发表了题为《关于磁针与电流碰撞的实验》的论文，向科学界宣布了“电流的磁效应”，轰动了整个欧洲，1820 年 7 月 21 日，作为电磁学发展史上一个划时代的日子载入了史册。

奥斯特的发现极大地震动了法国学术界，因为他们长期以来信奉库仑的信条，认为电和磁已被证明是不可能发生相互作用的两种现象。1820 年 8 月间，法国物理学家阿喇果在瑞士听到了奥斯特发现电流的磁效应的消息，立即敏锐地感到这一成果的重要性，迅即于 9 月初赶回法国，刚回到巴黎不久，他就于 11 日向法国科学院报告了奥斯特的这个最新发现。他详细地向科学院的同事们描述了电流磁效应的实验。阿喇果的报告，立即在法国科学界引起了巨大的反响。当时，在科学上极其敏感、最能接受他人成果的法国物理学家安培，对此作出了异乎寻常的反应。他第二天就重复了奥斯特的实验，并加以发展。他重复做了电流对磁针的作用的实验，提出了圆形电流产生磁性的可能性。安培还在这个实验中发现磁性转动的方向与电流方向的关系服从右手定则。后人称它为安培右手定则。9 月 25 日，他向法国科学院提出了第二篇论文，阐述了他用实验证明了两条平行载流导线，当电流方向相同时互相吸引，当电流方向相反时互相排斥，以后安培又研究各种形状的曲线载流导线之间的相互作用，并于 10 月 9 日向法国科学院提出了第三篇论文，至 12 月 4 日他提出了安培定律。

这是电流元 $Id\boldsymbol{l}$ 之间相互作用的基本定律，物理学书中的形式是以 $d\boldsymbol{F}=Id\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{B}$ 来表示的，电流元不同于点电荷，它不能单独在实验室内实现，因此它不能直接从实验中得到，只有闭合回路相互作用的规律才能由实验来检验。因此安培定律的表达式实际上是根据安培的四个历史上很有名的实验从理论上推导出来的。

安培是法国科学院院士，当过数学教授、实验物理教授，他的生活很艰苦，18 岁丧父，29 岁丧妻，这两大不幸对他打击很大，所以只活到了 61 岁。安培对电磁学的贡献很大，半个世纪以后，麦克斯韦称安培是“电磁学的牛顿”。

奥斯特的实验迅速在两个方面取得惊人的突进，一个是技术上立即诞生了电流计和制成了电磁铁；另一个是架起了一座连通电和磁的桥梁，导致电与磁关系的一系列发现，使电磁学作为一个整体的学科在世界上出现。这时，人们对电流能引起磁现象已深信无疑，但是，沿着相反方面能不能走通？许多科学家都在积极地探索这个问题。安培也是其中之一，遗憾的是他一直着眼于稳态现象，根本没有想到暂态现象，所以他失败了。遭受同样失败的还有瑞士物理学家科拉顿，他试图用磁铁在线圈中产生电流。1825 年，他用一个线圈与一个检流计连成一闭合回路，为了使磁铁不至于影响检流计中的小磁针，特意将检流针放在隔壁的房间里，科拉顿用磁铁棒在线圈中不断地插入、拔出，然后又跑到另一房间里去观察检流计，每次都得到零结果。科拉顿的实验装置设计得完全正确。他已经跨进了发现电磁感应规律的大门，可是却犯了和安培同样的毛病，没有想到暂态效应。靠他这样来回奔跑，当然无法观察到电磁感应。1827 年，美国物理学家亨利用纱包铜线在铁芯上绕了两层，然后在铜线中通电，发现铁芯上仅仅 3 公斤的铁片居然吸起了 300 公斤重的物体，亨利以此为开端，发现了自感现象。对于电磁现象的研究，还应该介绍英国物理学家、化学家法拉第的工作，法拉第从小生长在贫苦的家庭中，他父亲是个铁匠，母亲识

字不多，不可能受到较多的教育。9 岁时父亲去世了，法拉第不得不去文具店当学徒，他 14 岁那年全家迁往伦敦。经人介绍，他进入伦敦的李波书店当学徒工，装订书报，法拉第被大量的书报吸引住了。有一次在装订《大英百科全书》时，法拉第对电学的文章产生了强烈的兴趣，后来又被《化学对话》所吸引，从此对自然科学倾注了巨大的热情。在 7 年的学徒生活中，一切新书都通过他那儿，他都学到了，因此最早得到情报，学的知识最多。他是 7 年的订书工，也是 7 年的大学生。知识在于积累，才智在于勤奋，成功在于信心，这是一条真理。1812 年的一天，书店老板让他上街买东西，他看到英国皇家学会挂着科学讲座的海报，于是他赶去听了，他听得很投入。说老实话，当时在场听报告的人，能听懂的是少数，但法拉第却是其中之一。从中他受到启发，他将听讲的记录装成书册，又写了一封自荐的信一并寄给戴维，在戴维的介绍下，法拉第终于进入皇家学院实验室并成为他的助手。法拉第在实验室工作半年后，随戴维去欧洲旅行。对法拉第来说，这次旅行相当于上了“社会大学”。他结识了许多科学家，如盖·吕萨克、安培等，还学到许多科学知识，大开眼界。法拉第回国后，发挥出惊人的才干，不断取得成果，自奥斯特发现电流的磁效应之后，他一直在想，既然电能生磁，为什么磁不能生电，于是他在日记上写道：“一定让磁生电”，法拉第朝着这个目标断断续续地研究了近十年。

从他的日记中我们看到，明确记载的失败就有三次（1824 年 12 月 28 日、1825 年 11 月 28 日和 1828 年 4 月 22 日）。每次失败，他都写上“没有效果”。终于在 1831 年 8 月 29 日写了 19 条记录，例如：

“(1) 由磁产生电的实验等。”

“(2) 做好了铁环（软环、圆形的），厚 7/8 英寸，外径 6 英寸，用铜线在环的一半上绕好几个线圈，这些线圈都用线和白布隔开，铜线有三根，每根约 24 英寸。它们可以接起来成为一根，或作为

几根单独使用，用槽使每个线圈彼此都绝缘，若把一边叫 A 边，在另一边（与这一边隔一段空隙），用铜线绕了两个线圈，共约 60 英寸长，绕的方向与 A 边相同，那边叫 B 边。”（图 3-9）

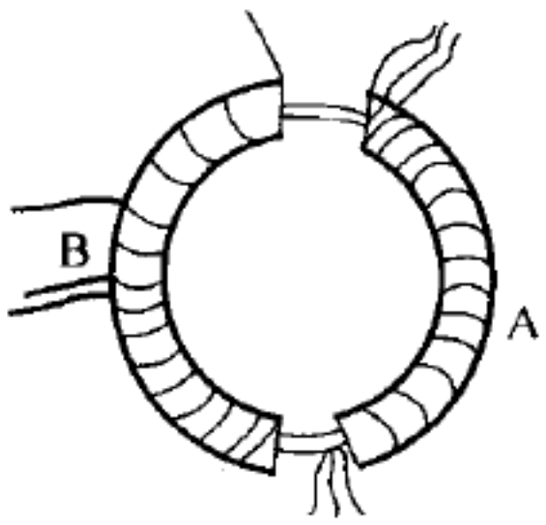


图 3-9　法拉第实验用线圈

“（3）使电池充电，电池由 10 对板组成，每块板的面积为 4 平方英寸，把 B 边的线圈连成一个线圈，并用一根铜线把两端连接起来，这铜线正好经过远处一根磁针（离环约 3 英尺）的上方，然后把 A 边一个线圈的两端接到电池上，立刻可看到对磁针产生一个明显的作用，磁针振动并且最后停在原来的位置上，在断开 A 边与电池的接线时，磁针又受到扰动。”

这就是法拉第第一次成功地观察到电磁感应现象的记录。接着他详细记录了用这个绕有铜线的铁环所做的各种实验和新的发现。

我们看到电磁感应的发现是法拉第意料中的事，使他感到意外的是电磁感应是一种短暂效应，他在日记中突出地记录了这一点。

发现了电磁感应后，法拉第花了近一年的时间（1831 年 8 月 29 日至 1832 年 7 月 11 日）对它作了专门详细的研究，写下了 64 页日记共 441 条记录，并画了不少说明的草图。法拉第后来的重要发现有：

1831 年 9 月 24 日，仅用磁棒和绕在铁棒上的导线产生电磁感应，他称之为“把磁转化为电的不同方法”。

1831 年 10 月 17 日，用磁棒插入或抽出线圈，产生感应电流。

1831 年 10 月 28 日发明圆盘发电机。

1833 年发现自感。

1845 年发现光的偏振面的磁致旋转（即法拉第效应）。

1845 年发现抗磁性等。

法拉第的贡献很多，就电磁感应而言，可归纳为：

(1) 把握住暂态效应，发现了电磁感应现象。

(2) 广泛而全面地研究了电磁感应现象，1831 年 11 月法拉第指出："正在变化的电流，正在变化的磁场，稳恒电流的运动，导体在磁场中运动，都会产生感应电流。"这为电磁感应定律的建立奠定了实验基础。

1832 年法拉第发现，在相同条件下，不同金属导体中产生的感应电流与导体的导电能力成正比。他由此意识到感应电流是由与导体无关的感应电动势产生的，这正是在各种情形下产生感应电流的关键。由此可见，法拉第经过归纳提炼，逐步掌握了问题的实质。

(3) 用力线说明产生感应电动势的原因，为定律的建立提供了物理图像。力线的概念是以近距作用观点解释电磁相互作用。他认为磁极和带电体周围充满了磁力线和电力线，它是电力和磁力的传递者，力线的疏密描绘了作用的强弱。

在解释电磁感应的过程中，法拉第把静态相互作用的力线图像发展到动态。他认为当通过回路的磁力线根数变化时，回路里就会产生感应电流，从而揭示了感应电动势产生的原因。1851 年，法拉第在《论磁力线》中指出："无论导线是垂直地还是倾斜地跨过磁力线，也无论它是沿某一方向或另一方向，该导线都把它所跨过的力线所表示的力汇总起来"，因而"形成电流的力正比于切割的磁力线数"。英国的开尔文勋爵对法拉第的力线评价很高。他说："在法拉第的许多贡献中，最伟大的一个就是力线概念，我想借助于它就可以把电场和磁场的许多性质，以最简单而极富启发性的表示出来。"值得一提的是法拉第具有深邃的洞察力，1832 年他写了一封密封的信给英国皇家学会，信封上面写着："现在应当收藏在皇家学会的档案馆里的一些新的观点"。这封信在档案馆

里躺了 100 多年，直到 1938 年才被后人发现，启了封。法拉第在信中预言了磁感应和电感应的传播，暗示了电磁波存在的可能性，还预言了光可能是一种电磁振动的传播。他在信的最后写道："就我所知，现在除了我以外，科学家中还没有人持类似的观念。"法拉第是一位靠自学成才的伟大科学家。他遵照他的"一辈子当一个平凡的迈克尔·法拉第"的意愿，始终如一地实践了自己"献身于科学"的诺言。后人为了纪念法拉第，用他的名字命名电容的单位，简称"法"。

1832 年，俄国物理学家楞次受到法拉第的启发，开始作了一系列的电磁实验，1833 年，发现了楞次定律，更明显地指出了感生电流的方向。

法拉第对电磁感应的贡献生动地说明，精巧的实验和深刻的洞察力把物理学推向前进。这是物理学史上一个杰出的范例。

遗憾的是法拉第数学基础较差，没有给出电磁感应定律定量的数学表达式。

对于电磁感应定律的定量表达式，首先作出贡献的是法拉第同时代的德国科学家 F·纽曼，他在法拉第深刻的物理思想的启发下作了一些假设，得出我们常见的电磁感应定律：

$$\mathscr{E} = -\iint_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

几乎与纽曼同时另一个德国物理学家 W. 韦伯，根据法拉第关于电流的看法，由安培公式导出：

$$\mathscr{E} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

纽曼和韦伯都持超距作用观点，他们的出发点和方法虽不相同，但都在 1846 年得出同样的电磁感应定律表达式。如果说纽曼是以假设的方式给出了电磁感应定律，那么，韦伯则是从安培公式推导出了电磁感应定律。因此，韦伯的工作表明，动生电动势是安

培公式的结果，而不是独立的新形象，这就为后来动生和感生电动势的区分，特别是为麦克斯韦提出涡旋电场概念创造了条件。

3. 电磁场理论的建立与启迪

英国著名的物理学家麦克斯韦在电磁学中的工作是19世纪物理学中最伟大的成就，是继牛顿之后的历史上又一划时代的贡献。他15岁开始写文投稿，16岁进入剑桥大学，年轻有为，才华横溢。

麦克斯韦认为纽曼和韦伯的理论“极为精巧”并“令人惊叹”。然而他指出“依赖于粒子速度的力的超距作用，并将其用于粒子的假设中是包含着机制上的困难的，它阻止我认为这一理论是最终的理论。所以我宁愿从另一方面寻找对事实的解释，假设它们是被周围媒质以及激发物体中发生的作用所产生，而无须假定可能存在直接作用，尽力解释远距离物体的作用……”麦克斯韦说：“我所建议的理论可以称为电磁场理论，因为它必须涉及电或磁物体附近的空间，它也可以称为动力学的理论，因为它假设在空间存在运动的物质，导致可观察的电磁现象。”

在实验中，我们知道，当磁场不变，导体相对磁场运动切割磁力线时，会产生电动势，这种电动势常被称为动生电动势。然而，又有实验表明，导体不动而磁场变化时，在回路中会产生感应电动势，这种感应电动势称之为感生电动势。这一情况下的感应电动势与前述的动生电动势之区别是，感生电动势的产生仅由磁场本身变化引起，而与其他因素无关。麦克斯韦分析了这个事实，提出了他的看法，他认为实质性的问题在于：变化的磁场在闭合导线中激发了一种电场，这种电场称为感生电场。感应电流的产生是这一电场作用于导体中自由电荷的结果，同时他对此加以推广，认为不管有无导体回路存在，变化的磁场总是在空间激发电场。我们要注意到，法拉第建立的电磁感应定律是对导体组成的回路讲的，而麦克斯韦假说则不管是否有导体，不管是真空或介质，都是适用

的。也就是说，如果导体存在时，由于感生电场的作用，便驱使导体中的自由电荷运动，从而显示出感应电流；如果无导体存在时，就没有感应电流，但是变化的磁场所激发的电场还是客观存在的。这个假说现在已被近代科学实验所证实。例如，电子感应加速器的基本原理，就是用变化的磁场所激发的电场来加速电子的，它的出现无疑是为感生电场的客观存在提供了一个令人信服的证据。

麦克斯韦通过对电磁感应现象的分析，提出了存在感生电场之概念。这种电场，不是由电荷所产生的，而是由变化的磁场所产生的。

按照电、磁的对称性，1861 年麦克斯韦进一步提出：既然变化的磁场会引起感生电场，那么，变化的电场也会引起感生磁场。

在此之前，人们知道电流会产生磁场，而这里说的那种电流是电荷传导而形成的。因此，通常导体中的电流称为传导电流。现在，变化的电场也会引起感生磁场，那么，变化电场其作用等效于传导电流，但由于它并不是真正的电荷传导而形成的电流，故称之为位移电流。

这样一来，就有两种电流可以产生磁场，一种是传导电流，一种是位移电流。

下面，我们以 L、R、C 充放电电路作为一个具体例子，进一步具体说明位移电流的概念。

如图 3-10 所示，电源通过 L、R 向平行板电容器充电，然后放电，从图中可以看到，传导电流在电容器两极板之间中断了，但是，此时极板间电场强度为

$$E=\frac{q}{\varepsilon_0 S}$$

式中，q 表示两极板上所带自由电荷的电量，S 是极板的面积，ε_0 为介电常数。在充、放电过程中，q 随时间变化，因此极板

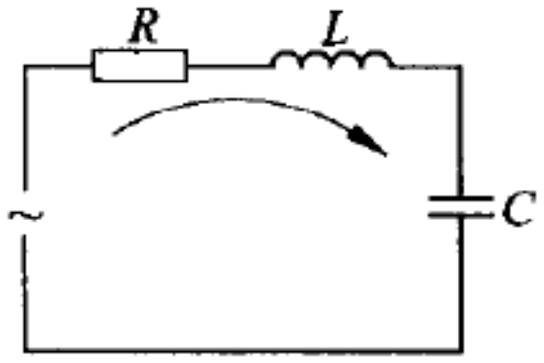


图 3-10　位移电流说明图

间的电场亦随时间变化，上式两边分别对时间求导数，有

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{S}\frac{\mathrm{d}q}{\varepsilon_0\mathrm{d}t}=\frac{I}{\varepsilon_0 S}=\frac{j}{\varepsilon_0}$$

上式表示，在电容器极板间虽然不存在自由电荷移动而形成的传导电流，但是在电容器极板间却有一个变化的电场，其电场对时间的变化率等于电容器两极板上的传导电流密度。这种电场强度对时间的变化率，即位移电流密度为

$$j_{位}=\varepsilon_0\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}$$

在引进位移电流的概念之后，非稳恒电流通过电容器的过程可以这样来理解：电流以传导电流的形式流入电容器的一个极板，然后以位移电流的形式通过两极板之间的空间，再以传导电流的形式从另一极板流出。在整个电路中，各个截面的“全电流”强度相同。因此，“全电流”永远是连续的。

应当指出，位移电流和传导电流是本质上不同的两个物理概念，传导电流是自由电荷的流动，而位移电流其实根本不是电荷的流动，它是电场对时间的变化率。同时，位移电流通过空间或介质时，不会像传导电流那样产生焦耳热。可见，位移电流和传导电流的唯一的共同性质是，它们都在其周围空间激发磁场，所以，麦克斯韦关于位移电流假说的中心思想就是：变化着的电场要激发感生磁场。下面我们将要看到，这正是电磁波的必要条件之一。而实验证实了电磁波的存在，这就为位移电流的假说提供了有力的证据。

根据电磁学现象的经验规律（库仑定律、安培定律、电磁感应定律、磁荷不存在）及上述两个基本假设，再应用矢量分析的数学手段，麦克斯韦得出了在真空中的电磁场方程组（积分形式）：

$$①\ \oint_S \boldsymbol{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}=\int_V\frac{\rho}{\varepsilon_0}\mathrm{d}V\quad（高斯定律）$$

$$② \oint_L \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = -\iint_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \quad （法拉第电磁感应定律）$$

$$③ \oint_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \quad （高斯定律）$$

$$④ \oint_L \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \int_S \mu_0 \boldsymbol{j} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} + \varepsilon_0 \mu_0 \int_S \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \quad （安培定律）$$

其中，ρ 为电荷密度，j 为传导电流密度，ε_0 为真空介电常数，μ_0 为真空磁导率。

应用上述方程组，加上 E 和 B 所应满足的边界条件和初始条件，就可以确定空间某点在某一时刻的电磁场，它们包括了静电场、稳恒电流和似稳电磁场等特殊情况。所以，麦克斯韦方程组以数学的形式概括了电磁场的基本规律，同时，为解决各种实际问题奠定了基础。

麦克斯韦关于存在感生电场及位移电流的假设，即变化的磁场会引起变化的电场，变化的电场又会引起变化的磁场，由近及远，继续下去，电磁场在空间以一定速度传播，就形成了电磁波。

麦克斯韦的电磁理论刚问世时，并没有立即在物理学界中得到承认，一些杰出的物理学家像亥姆霍兹和玻耳兹曼等也经过好几年才认识到它的意义并支持了它。由于麦克斯韦不只是单纯总结前人的实验规律，还做了补充和推广，因此，他的理论是否正确，仍然是个问题，当然它只能通过实验才能解决。1879 年，亥姆霍兹为柏林大学出的物理悬赏题就有这个意思，他的学生赫兹参加竞赛获胜而取得金质奖章。后来柏林科学院又根据亥姆霍兹的建议，悬赏征求“用实验确定电磁作用与介质极化之间的关系”。他建议由赫兹去解决这个问题，但赫兹经过计算感到，采用当时的实验设备，无法产生解决这个问题所必需的快速电振荡，可又想不出新办法，只好作罢。但是这个问题一直藏在赫兹的心里。1884 年，赫兹从理论上研究了麦克斯韦的电磁理论后，又想到用实验验证这个理论问题。

1885 年秋，赫兹到卡鲁斯尔高等学校当教授，这个学校设备较好，为他的研究工作提供了方便。1886 年，他在做放电实验时注意到一个现象：用一弯成长方形的铜钱（两端之间有一个很小间隙）构成一个开路，用一条导线把这个开路连接到正在由感应圈激发而产生火花放电的回路上，间隙中会有火花出现；接到回路上任何一点，间隙中都有火花出现；而且不接到回路上，也有火花出现，他理解到这是电磁振荡的共振现象（谐振现象），是开路的固有频率等于放电回路的固有频率所致。

赫兹设计了一个振荡电路，这个振荡电路包括两个金属放电杆，每根杆的一端安装一个金属球，当将感应圈副线圈之几千伏的高电压加在两金属球上，在两球之间即得到火花，在火花放电的同时，就伴随着电磁波的发生与传播。如图 3-11 所示。

这个电磁波发生器，实际上相当于一个敞开的振荡电路，其等效性如图 3-12 所示。

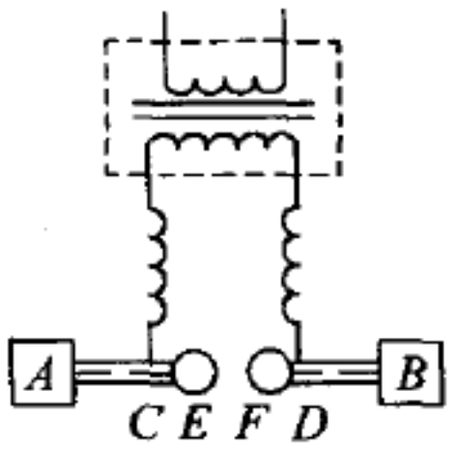


图 3-11　赫兹设计的电磁波发生器

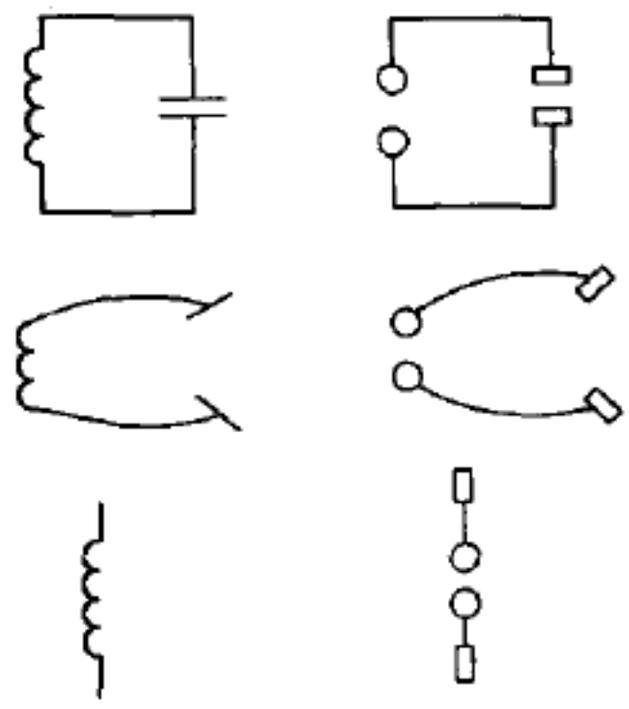


图 3-12　电磁波发生器的等效性说明

赫兹还设计了一个检波器，用以检验电磁波的存在。这个所谓的检波器很简单：将一条导线弯成圆形，在导线的两端焊上两个小球用作检波器（图 3-13）。这个装置，实际上是一个未敞开的振荡电路，它的固有振荡频率是由它的电容和电感决定的。当电磁

波到达这个振荡电路时，检波器的导线上就产生感生电动势。若调节两球间的距离，即改变它们之间的电容，则检波器的固有频率随之改变。当这个频率与外来电磁波的频率相同时，就发生谐振，在两球的间隙出现火花，因而能检验电磁波的存在。

赫兹又用一些方法，证明了电磁波和光波一样，可以发生反射、折射、干涉和偏振，这就证明了电磁波与光波的相同性，并成为光的电磁理论的实验基础：

（1）按照麦克斯韦电磁理论，可以这样来理解变化的电磁场在空间的传播：设在空间某一区域中的电场发生了变化，在它邻近的区域就会产生变化的磁场。这个变化的磁场又要在较远的区域产生变化的电场，接着又要在更远的区域产生变化的磁场，如此继续下去，变化的电场和变化的磁场不断地相互交替变化，并且由近及远地传播出去，这就是电磁波的传播。

（2）电磁波的传播过程中，电场 $\boldsymbol{E}$、磁场 $\boldsymbol{B}$ 的振动方向和电磁波传播方向 $\boldsymbol{k}$ 相互垂直，如图 3-14 所示。故电磁波是一种横波。

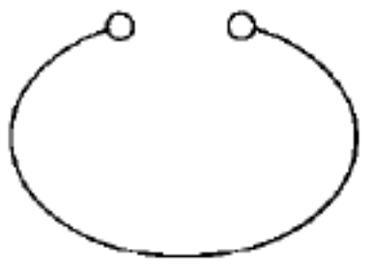


图 3-13　电磁波检波器

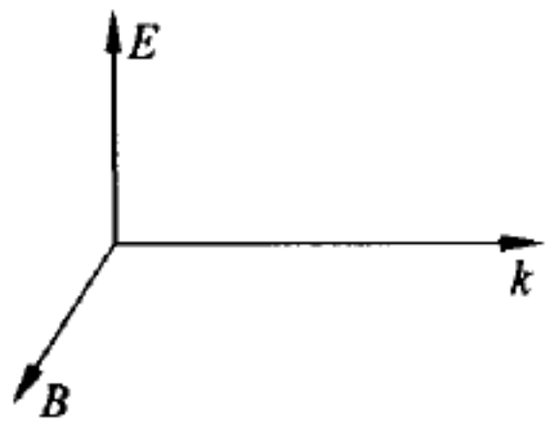


图 3-14　电磁波的横波性

（3）电磁波方程中的 v，根据推算可得

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

把 $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\ \mathrm{F/m}$，$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{H/m}$ 代入上式计算，得到

$$v = 2.998 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s}$$

这恰好与实验测得的光在真空中的传播速度 c 相等(在误差范围之内)。这是电磁波与光具有同一性的一个重要证明。

(4) 理论计算给出,在传播过程中,对于同一地点,电场强度 E 与磁感应强度 B 是成比例的,有如下关系:

$$\sqrt{\epsilon_0}E = \frac{B}{\sqrt{\mu_0}}$$

这个电磁波的传播过程,也就是电磁场能量的传播过程,可以证明,电磁场的能量

$$W = \frac{1}{2}\int_v \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}\right)\mathrm{d}V$$

其能量密度(单位体积内的电磁场能量)

$$w = \frac{1}{2}\left(\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}\right)$$

其能流密度,即单位时间内,通过垂直于传播方向的单位面积的能量,按类似的算法,可得

$$S = wc = \frac{c}{2}\left(\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}\right)$$

将 $\sqrt{\epsilon_0}E = \frac{B}{\sqrt{\mu_0}}$ 代入,则得到

$$S = \frac{EB}{\mu_0} \quad \left(\text{因为 } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\right)$$

现在已知,无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线等都是电磁波,但它们的频率(或波长)不同。为了便于比较,可以按照它们的波长(或频率)的大小,把它们依次排成一个谱,这个谱叫做电磁波谱(图 3-15)。

在电磁波谱中,波长最长的是无线电波。无线电波因波长的不同又分为长波、短波、超短波和微波等。长波主要用于远洋长距离通信;中波多用于航海和航空定向以及一般无线电广播;短波多用于无线电广播、电报通信;超短波、微波多用于电视、雷达、无线

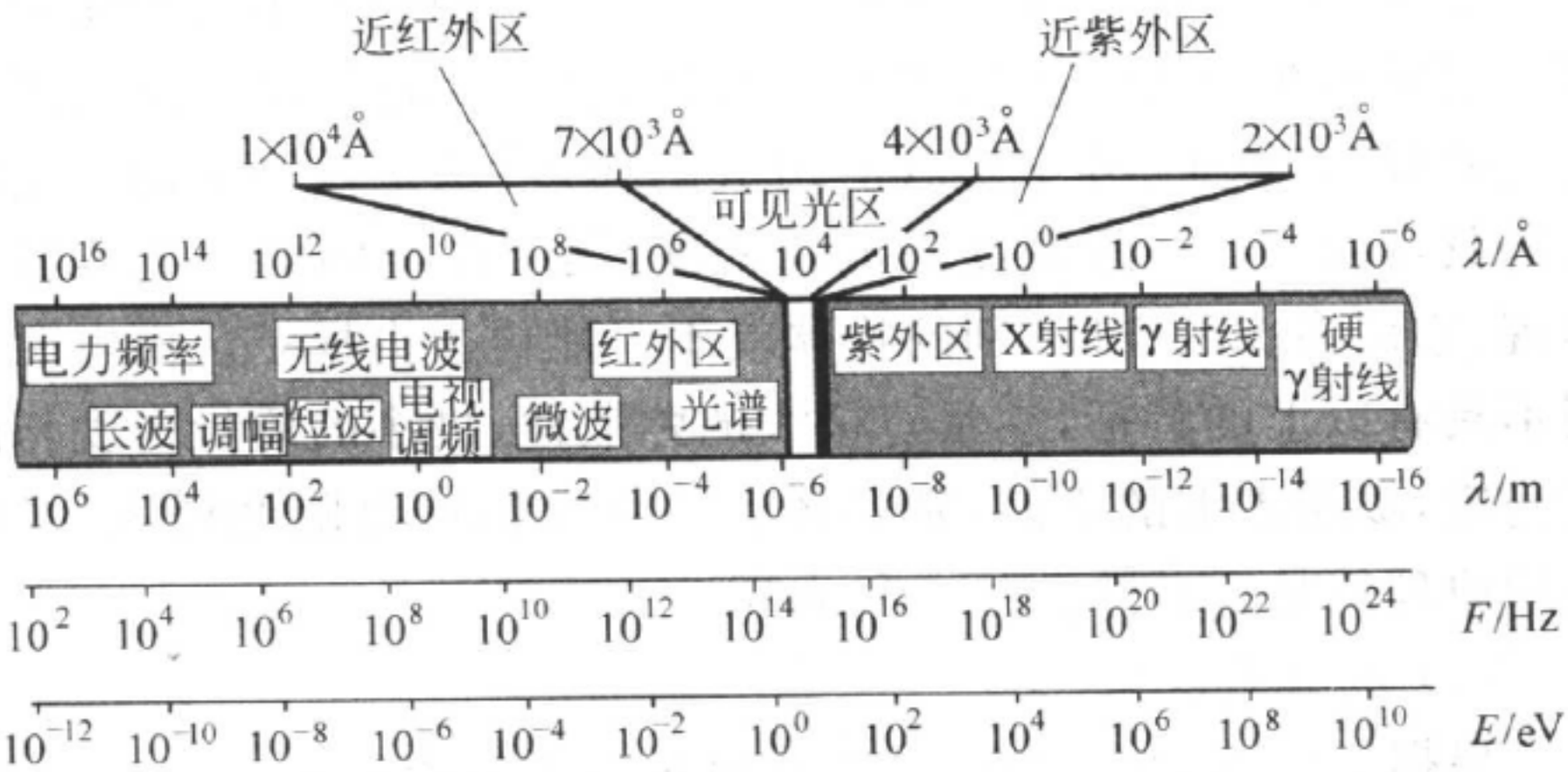


图 3-15　电磁波谱

电导航等。

其次是红外线、可见光和紫外线，这三部分合称光辐射，在所有的电磁波中只有可见光人眼可以看到，可见光的波长约在0.76～0.40μm之间，仅占电磁波中很小的一部分，再次是X射线，波长最短的电磁波是γ射线。

各种不同频率的电磁波，它们的共同之处就是像水波、声波一样，都遵守有关振动与波动的规律性(在前面已作过论述)；它们的不同之处在于它们与物质相互作用时所表现的情况不一样。例如，X射线、γ射线具有很强的贯穿、电离能力，而无线电波则容易被反射或吸收。在技术上，我们利用不同频率电磁波与物质相互作用的特性来达到不同的应用目的。

在电磁波谱中，可见光是人类认识最早的一种物质形态，除了水波、声波之外，光是人类最早认识的一种波动形态。像水波、声波一样，光波具有干涉、衍射等特性。

在法拉第-麦克斯韦的电磁场理论中，电磁场还不是独立的物质，它要依赖一种叫做“以太”的物质来存在。但是，后来的科学证实了电磁场是一种以独立的物质实体而存在的。

承认场是物质存在的一种形式，是有一定困难的，这种困难又有一定的历史原因。在历史上，物质概念很长时间以来是与所谓“实物”概念（原子、分子及其所组成的物体）联系在一起的。这种实物具有较大的质量密度与能量密度，集中在空间的一定位置上出现，它所占据的空间，别的物体就不可能再去占据了。而电磁场则不具有以上的特征，它具有极大的弥散性、极小的质量密度与能量密度，场所占据的空间，别的场和实物又都可以随便侵入（场的叠加原理就是这种特性的一种表现）。

（1）场具有能量

根据电磁场的场方程，可以导出场的能量表达为

$$W = \frac{1}{2}\int_V \left(\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2\right) \mathrm{d}V$$

电磁场具有能量是电磁场具有物质实在性的重要证明，这说明电磁场不是什么“虚空”，而是像实物一样具有可做功的能量。与实物之区别仅在于量上的不同——能量密度极小而已。

（2）场具有动量

根据电磁场方程，电磁场不仅具有能量，而且具有动量：

$$p = \frac{1}{c^2}\int_V \left(E \frac{B}{\mu_0}\right) \mathrm{d}V$$

根据电磁场具有场动量的性质，可以导出光射到物体表面会产生光压：

$$P = \frac{u}{c}(1 + \rho)$$

其中，u 代表光的能流密度；ρ 代表物体的反射系数。

光压的存在，在 1901 年已为列别捷夫用实验证实。

（3）场具有质量

在实物的物质概念中，质量是物质的一个基本特征。那么，电磁场有没有质量呢？光压存在的实验可以证明电磁场是有质量的。另外根据爱因斯坦 1905 年所导出的质能关系式：

$$E = mc^2$$

可以知道，电磁场亦有质量，其值为

$$m = \frac{1}{2c^2}\int_V \left(\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0}B^2\right)\mathrm{d}V$$

所不同的是，电磁场的量子——光子的静止质量为零，而实物粒子——电子、中子、质子的静止质量不为零。

(4) 在微观条件下，场与实物都具有二象性，且可以相互转化

在宏观条件下，场与实物的区别还是比较显著的，以至在很长的时间里，场的物理理论(物质结构的连续图景)与实物的物理理论(物质结构的分立图景)是平行发展，各自独立的。但是随着人类对物质结构的认识从宏观向微观深化，人们愈来愈多地发现场与实物这两种宏观条件下似乎全然相异的东西，在微观条件下具有愈来愈多的共同性质。如电磁场除波动性外，也具有粒子性；而电子、质子等除具有粒子性外，也具有波动性。场与实物都具有二象性。另外，在一定条件下，场粒子与实物粒子会发生相互转化。

对于电磁波的传播，它是否必定要和一般的机械波的传播相同，需要有媒质才行呢？如果这样，就要知道媒质是什么，它有怎样的性质，这将在 3.2 节中叙述。

3.2 以太说的发展

在物理学的发展过程中，以太学说也经历了三个阶段：旋涡以太、弹性以太、电磁以太。虽然后来它成为了一个过时的概念，但其影响却在现代物理学中徘徊不散。

1. 旋涡以太

笛卡儿最早试图以地面上的力学现象来说明天上的星体运动，认为太空里弥散着一种非常稀薄的连续流体，称之为以太。以太的挤压既传递相互作用，又由此显示作用结果。物体的周围都

有环绕物体的以太旋涡，物体愈重，旋涡愈强。笛卡儿认为，卫星为行星所吸引，行星绕太阳的运动，都是由于以太旋涡的作用。在他的以太学说里，以太旋涡好似水的旋涡，星体运转被看成是伴随以太旋涡的转动，这类似于浮在水面的稻草跟随着水涡的旋转。

由于笛卡儿在学术界的声望，旋涡以太的观念在欧洲风行一时；牛顿在研究了笛卡儿的学说之后，却认为旋涡以太将导致与开普勒定律不一致的结论。牛顿最终还是维护了自己的引力理论，使人们逐渐抛弃了旋涡以太。虽然如此，笛卡儿以机械模式来阐明宇宙的思想，对后世的影响仍然是不应低估的。

2. 弹性以太

18 世纪是以太学说的衰落时期，它的再度兴起，则依赖于光波说的发展及其最终挫败了光粒说。以太的再生是光以太取代了引力以太，是弹性以太取代旋涡以太。

声波是在弹性媒质里传播的，不言而喻，传播光波的媒质似乎也应该具有弹性机理。早期的光以太被认为是稀的弹性流体，这是为了说明以太对天体的运动几乎不显示阻力，以及以太能够很容易地渗透到透光物体的内部；作出这般假定，无疑是很自然的。

19 世纪 20 年代前后，光的横波性质得到更明确的肯定，这给不能产生横向振动的流质以太带来极大的困难。显然，光的偏振以及高频特点，要求光以太应该是具有足够大弹性的固态物质；另一方面，人们又不能完全放弃以太的流质特点。于是，光以太被设想为类似于沥青的物质，使之兼有固态和流体的特点。这种生硬的拼凑表明了物理学家的无可奈何，使本来就不可感知的以太加重了神秘色彩。

1845—1846 年，T. 杨以绝对静止的以太模型解释了光行差现象(图 3-16)。所谓光行差，即由于观察者的运动，星体(S)的真实位置并不在视线方向上，这是 1728 年英国天文学家 J. 布拉得首先发现并命名的。在杨之前，A. J. 菲涅耳曾提出以太可以被拖动

的假说，认为以速度 v 运动（相对于远离所有物体的宇宙以太）的物体，它内部的以太应具有速度 $u=(1-1/n^2)v$，n 为该物体的折射率，即运动物体内的以太要受到部分拖动。为了能够检验自己的理论，菲涅耳设想天文望远镜的镜筒中充满水，并计算了应有的观察结果。1871年 G. B. 艾里（Airy，1801—1892）证实了菲涅耳的预言。其实，早在 1851 年，A. H. L. 斐索（Fizeau，1819—1896）为了验证菲涅耳的理论，就进行了一个流水实验，将光分为两支，让它们分别顺着流水、逆着流水传播，再观测这两支光汇合后的干涉情况，实验结果已表明部分拖动以太学说的正确性。

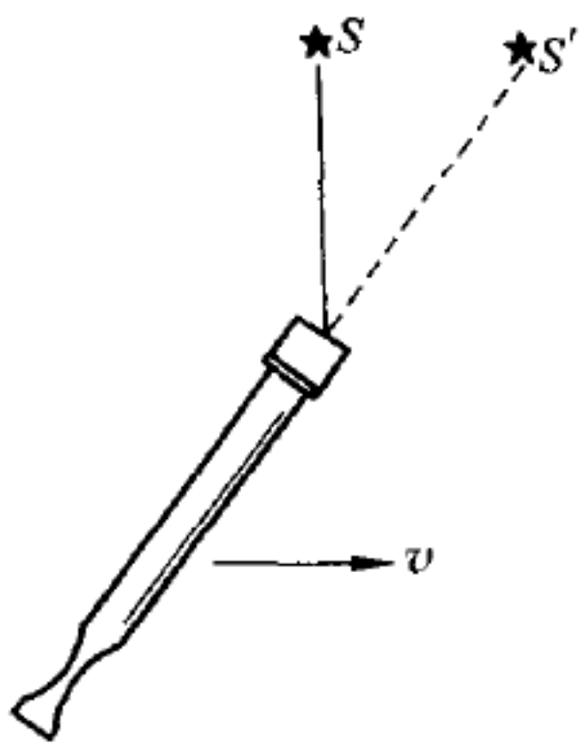


图 3-16　光行差现象

尽管菲涅耳的弹性以太理论取得相当大的成功，在物理上却不是不可指责的。例如，这样的弹性以太里，为什么不出现光纵波？又如，同一物体对不同频率的光应有不同的折射率，按照菲涅耳的拖动公式，则在同一运动物体内传播非单色光，将形成各种被拖动的以太！于是，后继者提出了各种改进方案，这里就不一一列举了。

3. 电磁以太

1865 年，麦克斯韦将光波纳入电磁波的行列之后，光的弹性以太概念开始向电磁以太概念转变。法拉第（1851）早就认为：如果接受光以太的存在，那么它可能是力线的荷载物。电磁场如何依附于以太，至少麦克斯韦没有阐述清楚；挑剔一点说，他给出的物理图像是混乱的。我们可以认为，他的电磁以太不过是有电性表现的弹性以太。他援用了一些机械模型，将电磁场的应力类比于弹性应力来处理，认为位移电流是由于以太电荷粒子的位移而

形成的真实的电流;现在我们都知道位移电流中仅有一部分,即物体中的极化电流,才能当作真实的电流。他既不能完全用力学概念来说明电磁现象,又不能完全不用力学概念来说明电磁现象,他说:"我不能再进一步,即对介质中的应力予以机械思考的说明。"这里所说的介质,指的就是以太介质。

以太理论的下一步发展,主要归功于 H. A. 洛伦兹(Lorentz,1853—1928)。他提出物体的电子结构理论,认为物体的运动并不拖动其中的以太。在洛伦兹的理论里,电磁以太除了传播电磁振动之外,其他的力学性质已全被剥脱,这样的以太差不多已成为一个空架子,只是还可以用来标记绝对空间的存在。洛伦兹为以太学说适应实验进展,为电磁以太清除机械图像,都作出了巨大贡献;但事与愿违,如此努力的结果,反而削弱了以太存在的必要性。

20 世纪初,狭义相对论的提出,一方面在惯性系中排除了优越惯性系,使绝对空间失去了存在价值;另一方面,将电场及磁场真正统一为一个整体,它在不同的惯性系里有不同的电磁表现,从而使电磁场成为一个独立的物质客体。这两方面的打击使以太学说再也难以维持下去,电磁以太不得不让位于电磁场。

这将在近代物理部分的相对论中介绍。

3.3 电磁学中值得推荐的几个物理研究的思想方法

1. 物理类比法

在建立电磁场理论的过程中,跨出极为重要一步的是汤姆生的类比研究。1842 年,他把包含带电导体的区域内的静电力分布与无限固体中的热流分布相比较,指出前种情形下的等势面与后种情形下的等温面相对应,前者的电荷与后者的热源相对应。人们知道,热理论的公式是以连续介质中相邻粒子相互作用为前提

得出的，这种类比是否可以把电作用看做是经某种连续媒质依次传递而实现的呢？

汤姆生研究了电现象和弹性现象的相似性。他考察了处于应力状态的不可压缩弹性固体的平衡，指出代表弹性位移的矢量分布可与静电体系的电力分布相比拟，再次暗示了在非恒稳情形下电磁作用的传播图像。

汤姆生的另一类比来源于光偏振面的磁致旋转，认为磁具有旋转的性质(1858 年，亥姆霍兹关于涡旋运动的研究使得这一观点加强了)。他指出如果电流产生的磁场可以和不可压缩的流体类比，则磁矢量可以用流体速度代表，从而电流对应于流体的涡旋线，这一类比可将流体力学的许多定理与电学的定理对应起来。

汤姆生的类比，有力地支持了法拉第通过力线表达出来的近距作用观点，为麦克斯韦建立电磁场理论的工作提供了极为重要的暗示、联想和启迪。

应该指出，类比研究在于寻找和揭示不同事物在一定范围内所具有的形式上的相似性，它常常预示着重大的发现或突破，类比研究的意义不仅在于移植数学工具或表达方式，还在于启发物理思想，帮助人们去认识和发现一些尚待研究的物理过程和规律。

法拉第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 3-17)。



图 3-17　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 3-18)。但由于法拉第数学水平有限，无法把他从类比引发的丰富的想象提高到定量理论。

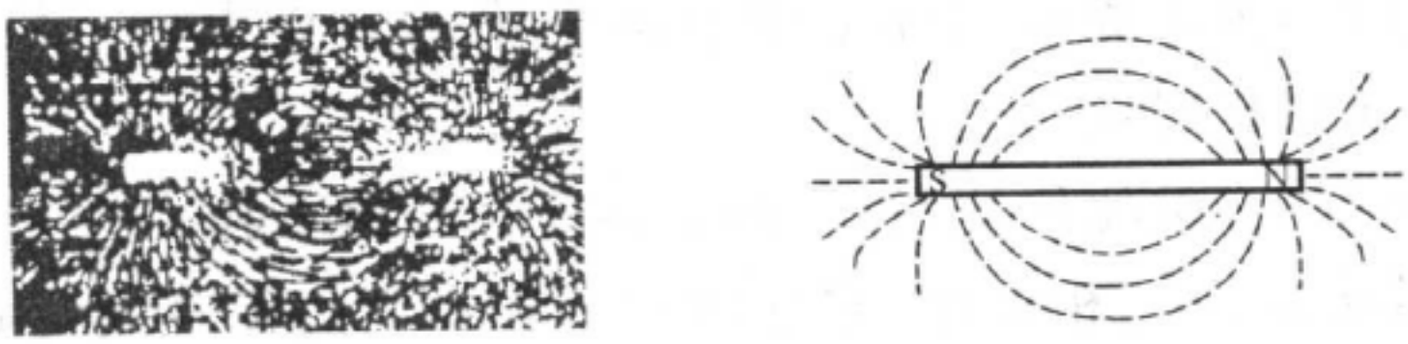


图 3-18　条形磁铁的力线分布

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》。

这篇论文的第一部分中，麦克斯韦阐述了力线和不可压缩体之间的类比，将汤姆生的论题作了重要发展，它将磁感应强度 ***B*** 和磁场强度 ***H*** 分别与流体力学的“流量”和“力”相对应，将电位移矢量 ***D*** 和电场强度矢量 ***E*** 也分别地对应为“流量”和“力”。而流量是遵从连续性方程的矢量，它可以遍及曲面作积分，而力则可沿

着线段积分，所以麦克斯韦方程组的积分形式为

$$\oint_S \boldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

$$\oint_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

$$\oint_L \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

$$\oint_L \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

麦克斯韦的第二篇论文是《论物理力线》(1861—1862)，在这篇论文中，他精心设计了电磁作用的力学模型，提出了流体场的概念。他认为，均匀介质中距离一个流体源(可以是有质流体源或是无质流体的热源)为 r 处的压强(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。据此麦克斯韦设想：在上述流体情况下，如果流体源是一点，以它为圆心做同心圆，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 3-19)。

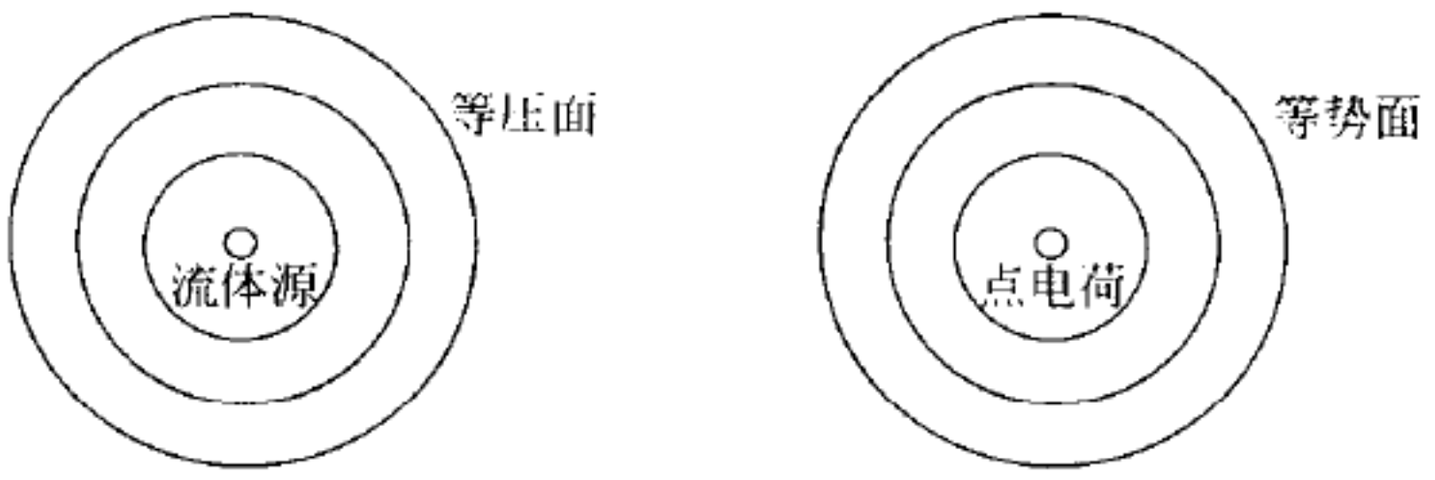


图 3-19　等压面与等势面

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热力学中温度对于热，有着共同的关系。电、流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，这种情况都能发生。"

麦克斯韦的这个类比如表 3-1 所示。

表 3-1　流体场与电场的类比

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	电场中的电力线
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 $$p(r)=\frac{kQ}{4\pi r}$$	真空中距点电荷 r 处的任一点的电势 $$U(r)=\frac{kQ}{4\pi r}$$
式中，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	式中，Q 为点电荷源的电量，可以看成"电通量"，相当于电力线的总量；k 为系数

对照这样的类比，根据电场强度和电势间的关系式，就可推出真空中点电荷电场强度的表达式

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

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力线条数(图 3-20)，于是就可得到一个一般公式：

$$E=kD$$

这也就是说，在电场中某处的电场强度跟通过该处单位面积上的电力线条数成正比。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。"

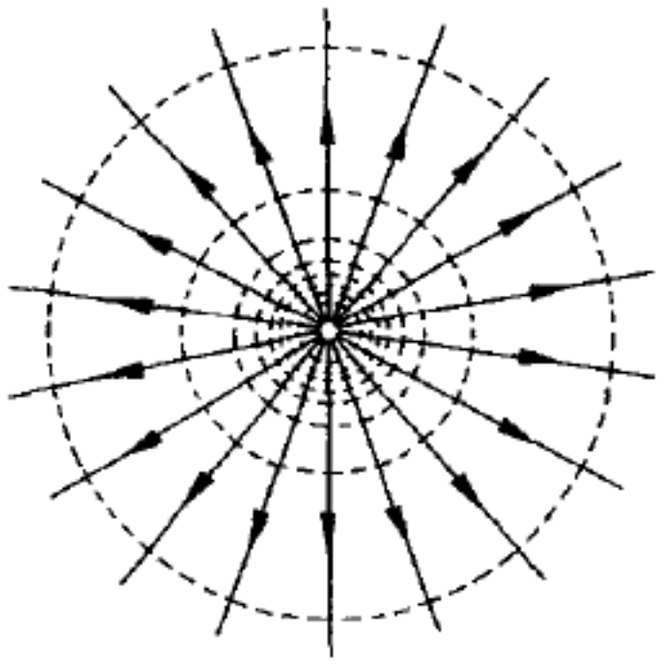


图 3-20　通过单位面积的电力线

他还提出："导体周围的电粒子现在可以做弹性位移；变化的电流不再像管中的流水那样完全限制起来，它能以一定的分量进入导线周围空间。"这是麦克斯韦对"位移电流"最初的认识，并且在推导中得出电磁场量的传播速度 $v=c$（光速）。因此他在论文中用醒目的斜体字写道："我们不可避免地推论，光是媒质中起源于电磁现象的横波。"麦克斯韦在这篇论文中逐渐形成和把握住的"位移电流"和"电磁波"的观念，正是其中的核心和关键。

麦克斯韦的第三篇论文《电磁场的动力学理论》(1864)是继牛顿力学之后，物理学史上又一座拔地而起的不朽丰碑。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像。1860 年，他带着这篇论文拜访已年近 7 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。百余年后的今天，人们仍然折服于它的完整、系统和严密，仍然处处感受到它的强大威力和广泛影响，它不愧为人类认识史上不可多得的理论珍品之一。

1873 年，麦克斯韦出版了巨著《电磁学通论》，在这部著作中，麦克斯韦更为彻底地应用动力学原理发展了他的动力学理论体系，使得他的电磁场理论更加完善，基础亦更为坚实。

麦克斯韦电磁场理论的建立，为我们提供了丰富的方法论的教益和启迪：

（1）寻找不同量之间的联系，建立统一的动力学解释是理论工作的一贯追求。麦克斯韦统一了电学、磁学和光学，爱因斯坦狭义相对论统一了电磁、光和时空，都是物理学各时代的里程碑。

（2）类比研究在科学发现中具有重大意义，不同事物外在的相似可能隐含着内在的相同的缘由，这是自然提供的一种暗示。麦克斯韦多次使用类比而逐步揭示了科学的真理。

（3）未知世界常常表现出传统的观念所意想不到的属性，这就需要广开思路，甚至需要有标新立异之勇气。麦克斯韦洞察到的位移电流和光，是认识电磁波的最好例证。

（4）广博的知识是科学创造的必要条件，麦克斯韦建立电磁场理论过程中涉及知识面之广是令人惊叹的。当前科学发展纵横交错，新兴学科、交叉学科、边缘学科不断涌现兴起，这一点更为重要。

（5）用数学工具精确地表述科学思想是科学发展的要求，也是科学成熟的标志之一，麦克斯韦就是凭借他深厚的数学基础和娴熟的数学技巧，将他的思想、模型和图像最终表述为描述电磁场的基本方程组。

（6）和谐是完善的理论的必需要素，比较纽曼和韦伯的理论，麦克斯韦电磁场理论更显得其独秀一枝。

麦克斯韦通过电磁现象和力学类比，提出的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，又用拉格朗日和哈密顿创立的数学方法，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度)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,成为19世纪中叶物理学史上实现的一次重大综合。无怪乎人们在评论麦克斯韦一生的功绩时说:"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。

2. 物理学史上第三次伟大的综合

分析与综合是人类认识事物的两种思维方式。人们对物理世界的认识,也是经历了以分析为主和以综合为主的两种过程。在物理学发展初期,人们对物理现象、规律的认识是零碎的、分散的、孤立的和局部的。随着认知水平的提高,人们找到了各种物理现象、物理规律之间的相互联系,逐步把物理学的研究推进到以系统综合为主的阶段。在物理学发展史上,有三次伟大的综合:第一次是17世纪牛顿力学的建立;第二次是能量守恒和转化定律的发现;第三次是麦克斯韦电磁理论的建立。通过这三次伟大的综合,宏伟的经典物理大厦才得以建立。下面我们着重介绍第三次伟大的综合。

前面曾介绍过有关电磁学的发展史,从中我们可以看到,关于电现象和磁现象的研究,早期是彼此互相隔绝的。1820年奥斯特发现通电导线对磁针的作用,开始揭示了电与磁的联系,法拉第高度评价了奥斯特的发现,认为"它猛然打开了一个科学领域的大

门，那里过去是一片漆黑，如今充满了光明。”后来，安培又发现了通电导线间相吸及相斥的规律。1831 年，19 世纪电磁学领域内最伟大的实验物理学家法拉第发现了电磁感应现象，并第一次提出了非常深刻的场和力线思想，至此，电和磁已被紧密联系起来了，然而，由于法拉第的数学能力不够，因此只能用直观的方式表达自己的思想，不能把自己的研究成果概括成为精确的定理的理论。完成电与磁二者的最终综合是另一位伟大的物理学家——麦克斯韦。

麦克斯韦 1854 年从剑桥大学毕业，他决定把数学和物理的结合当做自己的主攻方向。1855 年，他阅读了法拉第的巨著《电学实验研究》，并深深地被法拉第那大胆而新颖的见解所吸引。这是多么生动、多么形象的画面——力线，闪耀着法拉第智慧之光的力线布满整个宇宙空间，形成一种场，力就是通过场来传递的。

长期统治物理学的力的超距概念相对于“场”来说显得黯然失色！

然而，由于法拉第的数学知识有限，厚厚的几卷《电学实验研究》竟连一个数学公式也没有！正因为这样，许多物理学家常以轻蔑的眼光看待法拉第的观点：这不过是一个订书匠和实验室看门人凭借浅陋的幻想生造出来的粗糙的力线和力管。麦克斯韦决心用自己的数学天才精确地表达法拉第的光辉思想。

1855 年，麦克斯韦发表了关于电磁学研究的第一篇论文《论法拉第的力线》。法拉第本人对麦克斯韦说：“你的文章很出色，你是真正理解我理论的人。但你不应当只停留在用数学来解释我的观点，而应该突破它！”

麦克斯韦深受鼓舞，他的决心更大了。

1862 年，麦克斯韦提出了位移电流的概念。这是他对电磁学的又一重大贡献。他根据电磁现象的对称性，认为变化的电场也应在周围空间产生感应磁场。

1865 年，麦克斯韦综合了库仑定律、安培力公式、电磁感应定律等经验公式，运用数学手段，得出了真空中的电磁场方程，提出了电磁场的理论。麦克斯韦还预言了电磁波，认为光也是一种电磁波。这样，麦克斯韦就把相互独立的电学、磁学、光学三者完美地统一起来了。从奥斯特提供实验线索到麦克斯韦完成统一的理论，其间的发展如图 3-21 所示。

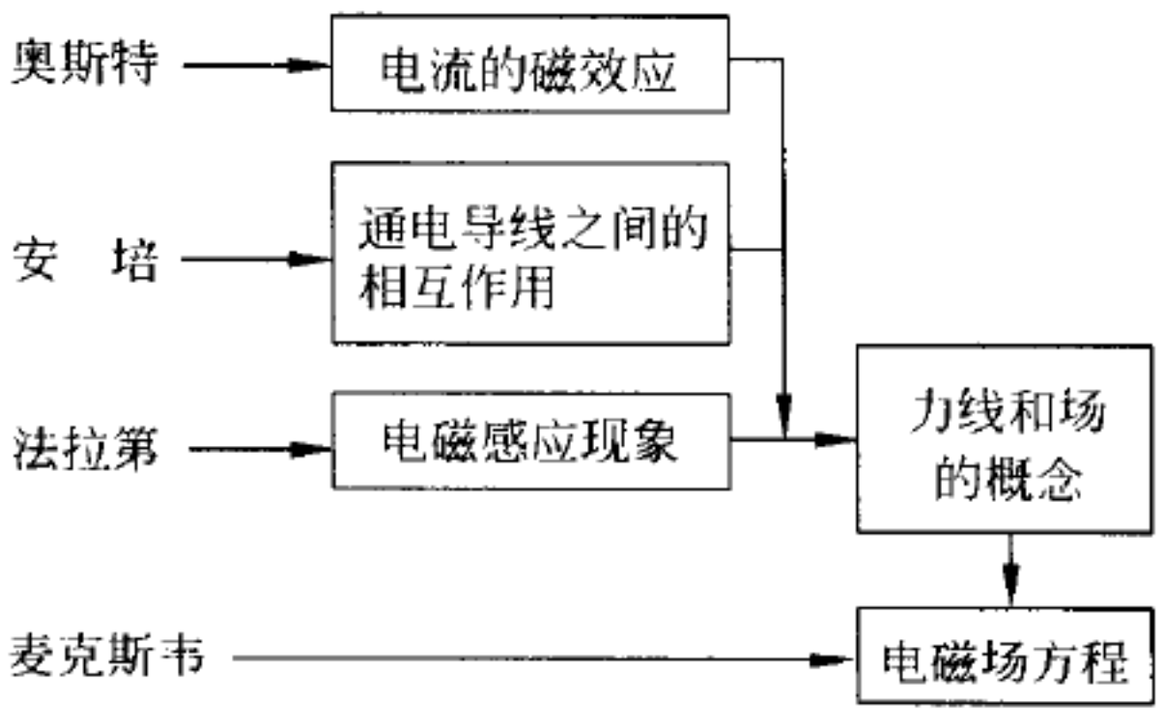


图 3-21　麦克斯韦完成电磁场统一理论发展图

1873 年，麦克斯韦出版了集电磁理论之大成的经典著作《电磁学通论》。1888 年，麦克斯韦关于电磁波的预言被赫兹证实。经过几代人的努力，电磁场理论的宏伟大厦终于建立起来了，实现了物理学史上第三次伟大的综合！

3. 守恒与对称

经典物理学的守恒定律，一般都有着悠久的历史，它们的重要性也早为人知；但是，守恒与对称的关系，一直到 20 世纪初，似乎都没有受到人们的重视和认真的研究。1842 年，C. G. J. 雅科比(Jacobi，1804—1851)初步接触到这个问题，而真正深入探讨守恒与对称关系的，当推德国女数学家 E. 诺德(Noether，1882—1935)；在微观领域中，则以 E. P. 维格纳(Wiginer，1902—　)的贡献最大，为此，他荣获了 1963 年诺贝尔物理学奖。

常见的守恒定律与对称变换的关系如表 3-2 所示。这里我们着重讲有关电荷守恒的问题。

表 3-2　守恒量与对称变换的关系

守恒量	对称变换
能　量	时间平移
动　量	空间平移
角动量	空间旋转
电　荷	电磁规范
重子数	重子规范(可能破缺)
$\left.\begin{matrix}e\\ \mu\\ \tau\end{matrix}\right\}$ 轻子数	轻子规范(可能破缺)

电荷守恒与非时空的对称性有关,它联系于电磁场的规范变换。若对电势 φ 和磁动势 A 进行下述变换:

$$\varphi \rightarrow \varphi' = \varphi - \frac{\partial \Lambda}{\partial t}$$

$$A \rightarrow A' = A + \Delta\Lambda$$

式中,Λ 代表任意可微函数 $\Lambda(x,y,z,t)$,则变换后麦克斯韦方程及场强 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{B}$ 均不变,称为规范不变性。规范不变性表明,电磁规律及电磁过程与 φ、A 的绝对值无关,或者说,可测量的物理量与电磁势的选择无关。上式所规定的平移对称,称为电磁规范对称。为了说明这种对称性与电荷守恒的关系,考虑图 3-22 所示的情况。已知带电体 Q 周围空间中 a、b 两点的电势不相等,若某一闭合系统在 a 处能无中生有地创造电荷 q,为此做功 E;然后将系统移到 b 处,过程中 Q 的电场将对 q 做功 W(正功或负功);在 b 处按原来创造电荷的方式逆着进行,使 q 重归于无,应释放能量 E,再将这个已经不带电的系统自 b 移回 a 处,返回过程中 Q 的电场不会做功。于是,系统回到 a 处后恢复原有状态,而来去过程的总能量并不守恒,即 $W(W\neq 0)$ 未能抵消;这表明,电荷不守恒与电势

的平移对称是不协调的。当然，这个例子还表明，电荷守恒与能量守恒之间彼此可以相通。

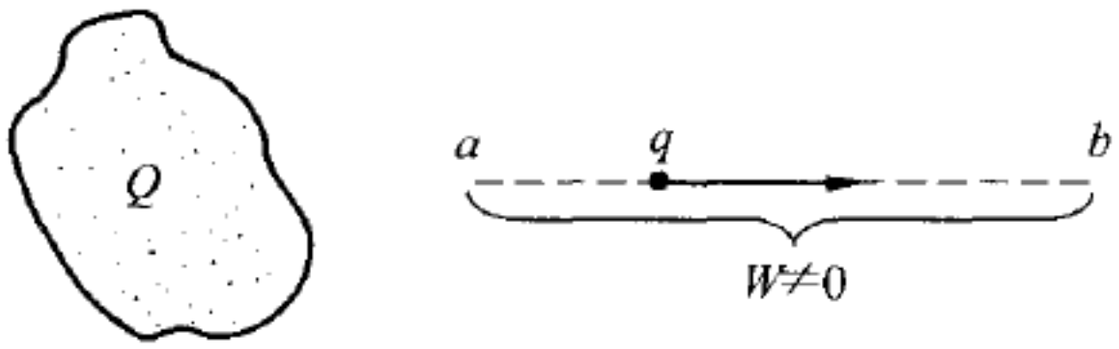


图 3-22　如果电荷能无中生有

规范对称后来有了很大的发展，从电磁规范走向了更多的规范群，是现代粒子理论的重要概念，受到人们越来越多的重视，有关概念也越来越抽象。

守恒定律往往直接从大量的实验事例中总结出来，带有极大的经验性，需要在应用时进一步接受检验，也需要在理论上作出说明。一方面，运动定律的建立尽可能地依赖了有关的守恒定律；另一方面，这些守恒定律又可以作为运动定律的推论。让我们先看一个具体的例子。

例如电荷守恒定律与麦克斯韦方程的关系。电荷守恒概念的提出，比库仑发现平方反比定律还早 30 多年，长期作为一个基本的实验定律在电磁学中得到广泛的应用；后来，它终于得以理论的说明，我们能够从麦克斯韦方程组出发，很自然地导出电荷守恒定律。但是，在建立麦克斯韦方程组的时候，又确实依靠了电荷守恒的思想。

这主要体现在位移电流的定义上，根据大家熟知的电容器充、放电（图 3-23），设电容的极板面积为 S，则位移电流

$$I_D = \int_S \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

它用到极板上的电荷

$$Q = \int_S \sigma \mathrm{d}S = \int_S \boldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

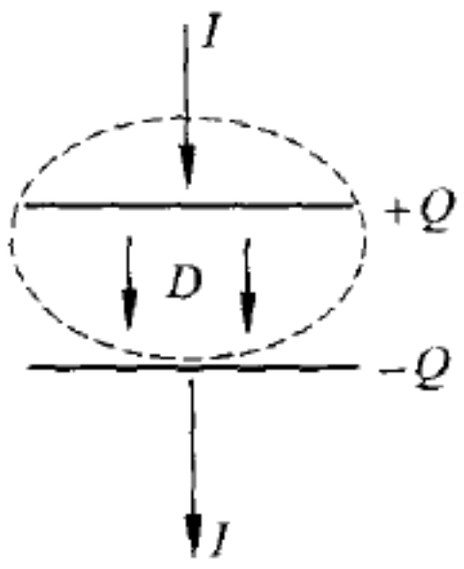


图 3-23　电容器充电

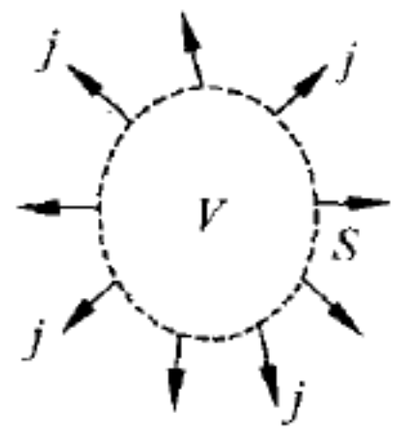


图 3-24　电荷守恒

及充(放)电电流

$$I = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

不难看出,最后一个等式正表明电荷的守恒,它不过是电荷守恒一般表示式的简化形式,通常将电荷守恒表达为(图 3-24)

$$\oint_s \boldsymbol{j} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = -\frac{\partial}{\partial t}\int_v \rho \mathrm{d}V$$

式中,j 为电流密度;ρ 为电荷密度。上述两式是一致的。

总的说来,运动定律的各种积分导致相应的守恒定律,积分常数的物理意义决定了守恒的物理量。已知运动定律及边界条件,就可以决定所研究的运动,而直接使用守恒定律来求解,这只是在一些简单情况下才有可能。对于略为复杂一点的问题,往往没有足够数量的守恒定律来确定所需的解答,因而宏观物理学更多的是依靠运动定律来确定物体或场的运动,这样决定的运动过程当然不会违反有关的各个守恒定律。而微观世界的粒子反应则不同,反应能否进行,完全由一些守恒定律来共同制约,而不是通过什么运动定律来判定;由此可以说明,微观粒子所遵循的守恒定律,为什么比宏观物体所遵循的要多得多。在粒子物理学里,当我们发现了新的守恒定律,也就认识到微观粒子的某种新属性。

第 4 章　物理学发展中的革命风暴
——相对论与量子论的产生

4.1　引言

19 世纪末叶，欧洲各主要资本主义国家的工业生产有了很大的发展，对新技术、新工艺和新产品的需求日益迫切。例如，当时白炽灯已经发明，人们为了寻找新的光源，大力进行真空和放电的研究。这一点对物理学的发展有着相当直接的影响。

然而，自然科学的发展还有它本身的规律。当时的物理学正处于一场大革命的前夜，它一方面好像很完善了，另一方面却又暴露出尖锐的矛盾。前一方面指的是对所谓经典物理学（大致可分为力学、声学、热学、光学和电磁学等分支）所达到的认识。它可概括为如下几方面：

（1）世间万物都由八十几种元素的原子所组成。

（2）原子是不可再分的最小微粒，它的运动服从牛顿力学定律。

（3）热就是大量分子做混乱机械运动的表现。利用力学规律性加上统计规律性及其处理方法，就可能解释气体、固体和液体等凝聚态物质体系的性质。

（4）存在正、负两种电荷，它们可能是某种流体样的东西；电荷产生电场，电荷的运动又产生磁场；电磁场可以脱离电荷而运动，这就是电磁波，而热辐射（红外线）、可见光和紫外线等是不同波长的电磁波。

(5) 无论力、热、声、光、电等现象如何复杂，一切过程都遵从能量守恒定律和动量守恒定律。

面对这些成就，在绝大部分物理学家的眼光里，物质世界的运动已经构成了一幅清晰的画面，基本问题都研究清楚了，留给下一代人所做的工作，将不过是把已有的实验做得更精密一些，使测量数据小数点后面增加几位有效数字而已。

可是，矛盾还是出现了。1900 年，著名的英国物理学家开尔文(威廉·汤姆生)在一篇展望 20 世纪物理学的文章中先说："在已经基本建成的科学大厦中，后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了。"接着他又说："但是，在物理学晴朗天空的远处，还有两朵小小的令人不安的乌云。"这两朵乌云，指的是当时物理学无法解释的两个实验，一个是热辐射实验，另一个是迈克耳孙-莫雷实验。开尔文真算是有眼力的了，但他可能也完全没有想到，正是这两朵小小的乌云，不久就发展成物理学中一场革命的风暴。而且实际上，在高潮到来之前，已经有三个重大的事件揭开了近代物理学的序幕，这就是电子、X 射线和放射性的发现。

由于电磁、真空等科学技术的进步，也由于寻找新光源的需要，在 19 世纪最后 30 年里，研究真空放电的人很多。

在一个真空管(用转动泵抽气)内密封一个阴极和一个阳极，在两者之间加上几千伏的高电压，在管内的稀薄气体中便会产生美丽的放电现象。随着水银扩散真空泵的应用，管内气压进一步降低(真空提高)，气体发光现象看不见了，若在对着阴极的玻璃管壁上涂敷荧光材料，在玻璃管壁上会产生蓝绿色的荧光。这表明从阴极发出一种肉眼看不见的射线，它沿直线行进，在磁场中偏转，由此可证明这种射线是带负电的，它能穿过很薄的金属箔，因此，不可能是负离子。1897 年，英国物理学家 J. J. 汤姆逊在前人大量工作的基础上，决心进一步弄清楚这种"阴极射线"，为此他重新设计了实验仪器(图 4-1)。

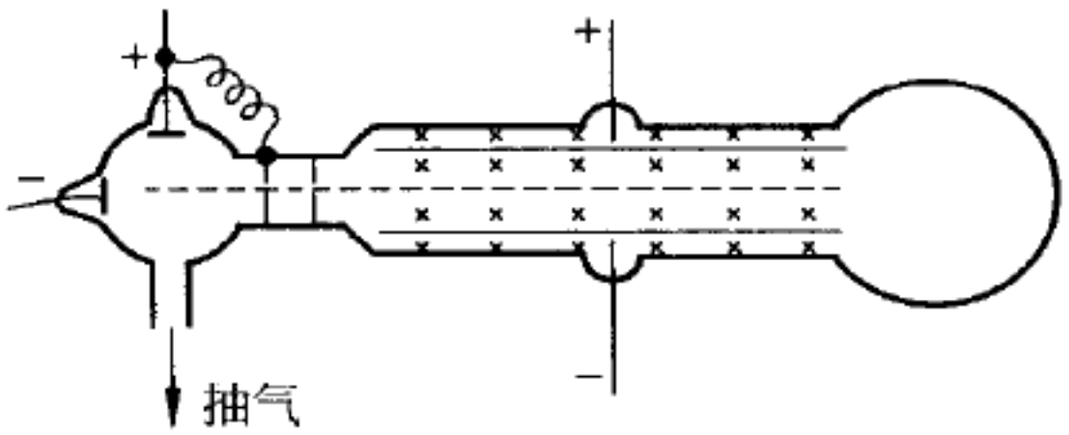


图 4-1　阴极射线管

（图中“×”表示磁场的方向由纸外指向纸里）

阴极射线穿出小孔以后进入一个静电场区域，它是由两块平行板电极加上电压 V（板间距离为 d）而产生的，人们就看到射线向上偏转一段距离；如果同时加上一个垂直于纸面向里的适当强度的磁场 B，便又可以抵消这种偏转，而使射线仍然射到对称的中心点。通过调节电压 V 和磁场 B，测量射线不偏转时的磁感应强度，汤姆逊就能够算出射线粒子的速度 v(m/s)：设粒子质量为 m(kg)，电荷为 e(C)，它在电场 E(V/m)中受力为

$$F_{电} = eE = e\frac{V}{d}$$

而在磁场 B 中受力为

$$F_{磁} = evB$$

平衡时两者相等，给出

$$eE = evB, \quad v = \frac{E}{B} \tag{4-1}$$

接着，撤去磁场，测出射线在平板电极右端出口处的横向偏离值 s。这个应等于 $\frac{1}{2}at^2$，而其中加速 a 由 $F_{电} = eE = ma$ 决定 $\left(a = \frac{eE}{m}\right)$，又因 s 比平板的长度 L 小很多，因而粒子的飞越时间 t 可由速度 v 及板长 L 简单地算出，即 $t = \frac{L}{v}$，所以

$$s = \frac{1}{2}\left(\frac{eE}{m}\right)\left(\frac{L}{v}\right)^2$$

再将(4-1)式代入，即得

$$s = \frac{1}{2}\left(\frac{e}{m}\right)\frac{L^2B^2}{E}$$

由此可见，阴极射线粒子的“荷质比”为

$$\frac{e}{m} = \frac{2E_s}{L^2B^2} = \frac{2V_s}{dL^2B^2}$$

由实验测量到的 V、d、B、L、s 等数值可以算出 $\frac{e}{m} = 1.7 \times 10^{11}\,\mathrm{C/kg}$。由于当时实验精度不高，结果仅用两位有效数字表示。

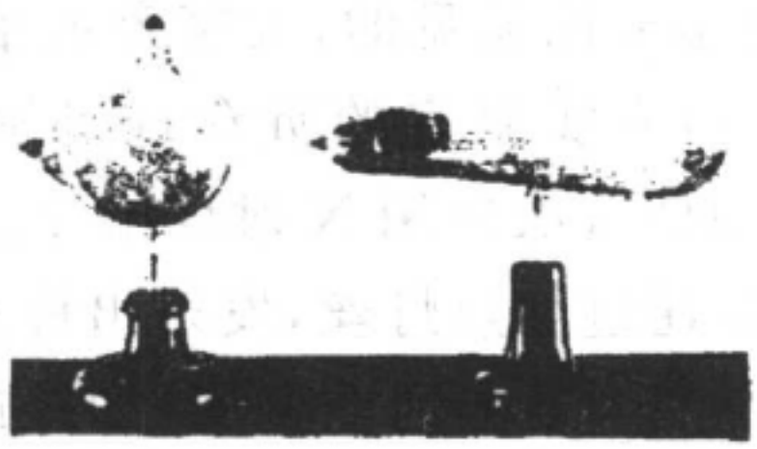
汤姆逊发现，这个荷质比数值与管内所充气体(空气、H_2 或 CO_2 等)的性质无关，也与阴极材料(Al、Fe 或 Pt 等)的性质无关。这意味着阴极射线是由一种荷质比完全确定的粒子流所形成。直到 1909 年，著名的密立根油滴实验进一步证明一切荷电物质都只能带有 e 的整数倍的电量，而一个阴极射线粒子所带的电量($-e$)是负电荷的电量单位。$\frac{e}{m}$不变，e 也不变，表示粒子质量 m 也是确定的。这种粒子，以后便称为电子。阴极射线就是高速电子流。根据近年的测量，电子电荷及质量分别为

$$e = 1.602\,189\,2 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$$

$$m = 9.109\,534 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg}$$

到目前为止，还没有发现存在电荷比 e 更小的粒子。另一方面，电子质量虽然很小，只有氢原子质量的 1/1836，但却不能说它是自然界中最轻的粒子。

比确认电子还要早一些，即 1895 年 11 月 8 日，德国的大学教授伦琴(图 4-2)在暗室中做放电管实验时，发现了另一种新现象。他用黑色硬纸把放电管密包起来后，却无意中发现放在一段距离外的涂有一种荧光材料(铂氰化钡 $BaPt(CN)d_6$)的纸屏竟发出微



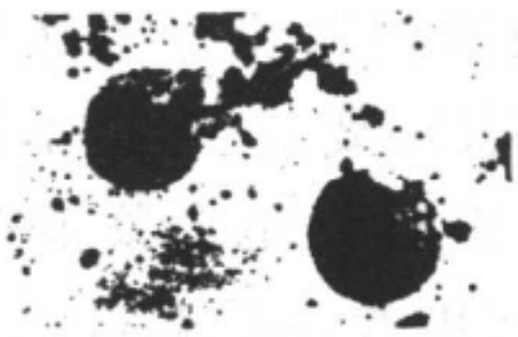
伦琴用过的阴极射线管



伦琴



伦琴用罗盘拍的X射线照片



古茨彼德的X射线照片



伦琴夫人手的X射线照片。
摄于1895年12月22日，
现保存在德国博物馆中

图 4-2　X 射线的发现者——伦琴

弱的荧光，经仔细观察，肯定了激发这种荧光的东西来自放电管，但同时可肯定这种东西不可能是阴极射线，因为后者透不出玻璃管。伦琴就称这种看不见的东西为 X 射线。经过连续 7 个星期的紧张研究，伦琴在年底写出了一篇论文，详细地分析了 X 射线的性质、产生的原因和在各种物质中的透射率。他指出：阴极射线打在固体上面便会产生 X 射线，固体元素越重，产生的 X 射线越强；X 射线既不受磁场偏转，也不能用玻璃透镜聚焦。伦琴发现，几乎所有物质对 X 射线都是透明的，15cm 厚的铅板才能显著地减弱它，而把手放在放电管和荧光屏之间时，由于肌肉对 X 射线

的吸收比骨质弱很多，屏上便可看到手指的骨骼造影。

伦琴这一发现的巨大潜在价值是显而易见的，大家奔走相告，许多实验室纷纷重复这一实验，并向来实验室的听众宣讲示范。三个月后，维也纳的医院外科治疗中便首次应用 X 射线拍片。

在后来制造的“X 射线管”中，是通过加热灯丝，发射出许多电子，使它们在高电压（几万伏）的加速下，轰击到重金属（如钨或钼等）制成的靶上，靶的表面便会发出很强的 X 射线。现已清楚，这是由于高速电子在靶物质内的运动受到阻碍而急剧减速，在这个减速过程中，电子便发出一种波长极短的光（约 1Å 左右，1Å = 10^{-8}cm，而可见光的波长在 0.76～0.40μm 之间）的电磁波，这就是 X 射线。X 射线的发现使人们认识的“电磁波谱”朝着短波方向拓宽了一大段。下面我们还要介绍从原子核内放出来的电磁波，叫做 γ 射线，它的波长还要短，穿透本领比 X 射线更强。

法国的贝克勒尔原来对荧光现象很有研究，1896 年 2 月，他听说伦琴的发现之后，就想看一看透过黑纸的日光能否激发出荧光来（现在我们知道这是不可能的）。一天恰好天阴，没有日光，他就把制备好的一种样品——硫酸铀酰钾复盐（$K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$，一种已知的荧光物质）用黑纸包起来，放在抽屉里的相片底片上面。几天后，他怕底片有些漏光，便决定将其中一张冲洗看一下，不料洗后一看，晶体的像竟赫然在目。他于是赶紧仔细做实验，证明感光是由于样品含铀所致，铀确实发出了一种肉眼看不见的射线，这就是天然放射性的发现。

后来许多科学家从事天然放射性物质的研究，尤其是最有名的一位法籍波兰女科学家居里夫人，通过十分艰巨的化学分离和鉴定工作，从成吨的铀矿里提炼出微量的放射性元素钋（Po）和镭（Ra）等，镭的放射性很强，在暗室中就能看到被它的放射性激发出来的蓝白色荧光。但放射性本身却是不可见的，于是人们把镭等放射源放在一个铅室中，让射线从狭小的通道射出来，进入一个

抽真空的磁场区域，如图 4-3 所示。磁场垂直纸面向里，这样便发现放射性射线分成三种类型：一种射线向左偏转较小，表示它是带正电的但是较重的粒子流，称为 α 射线；一种射线向右偏转较大，表示它是带负电的轻粒子流，称为 β 射线；还有中间一束射线不受磁场影响，表示它是不带电的射线，称为 γ 射线。

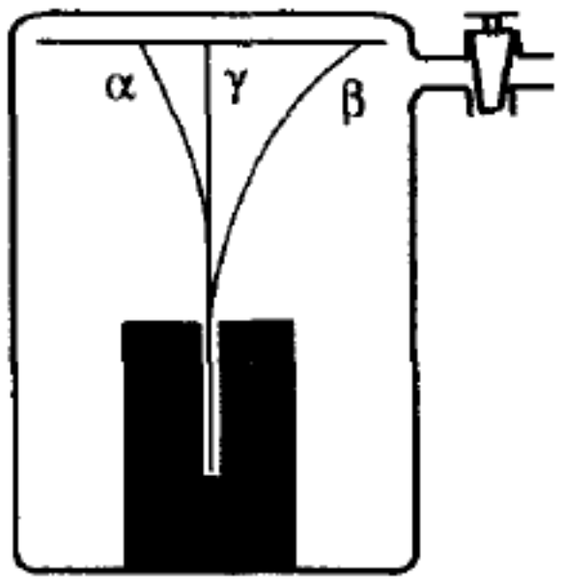


图 4-3　α，β，γ 射线在磁场（垂直纸面向里）中的偏转

更仔细的研究证明，组成 α 射线的 α 粒子，每一个带有两份正电荷（$2e$），质量和一个氦原子差不多；而 β 射线的荷质比与阴极射线的相同，它也是高速电子流；γ 射线性质和 X 射线相近，不过是波长更短的电磁波，因而它的穿透本领比 X 射线更强。

在 3 年里相继有 3 个重大发现，这绝不是偶然的，使大家眼界大开。过去以为原子是最小的不可再分的物质结构单元，现在新发现的电子却比最轻的原子——氢原子还要轻 1836 倍；过去以为除可见光外的电磁波，只有无线电波、红外线和紫外线，现在却有了波长更短的 X 射线和 γ 射线；过去一个原子在化学变化中释放出来的能量不过几个电子伏（$1\text{eV}=1.6\times10^{-9}\text{J}$），例如煤燃烧时，一个碳原子和两个氧原子化合（$C+O_2\longrightarrow CO_2$），同时放出能量约 4eV，而现在天然放射性现象中，一个原子放出的能量竟可以达到几百万电子伏，即几个 MeV（$1\text{MeV}=10^6\text{eV}$）。也就是说，天然放射性原子放出的能量比化学变化中放出的化学能要大 100 万倍！不仅如此，人们知道化学变化不会引起原子性质的根本变化，碳在燃烧后，一个碳原子虽然与两个氧原子化合在一起，它基本上还是原来的碳原子，然而原子经过放射 α 和 β 射线之后却变掉了。如一个镭原子放出一个 α 粒子后，就变成一个氡原子（一种惰性气体的原子）而跑掉了。这一切当然是十分惊人的，原来在肉眼看得

见的“宏观”世界，通过电子、X 射线和放射性的发现，人们打开了这个微观世界的窗户，窥探到一些奥秘，但微观世界对人们来说仍然是莫测高深。于是，从那时候起，各国的物理学工作者便加紧从这个新的方向去进行研究，从而把物理学从 19 世纪的经典物理学阶段推进到 20 世纪的近代物理学阶段。可以说，三大发现揭开了近代物理学的序幕。

序幕还不是高潮。从 1900 年起，在物理学研究中波澜迭起，这里我们先把 1911 年原子核的发现提前介绍一下，以便将研究的对象明确起来。

前面讲到天然放射性中，α、β 或 γ 射线从原子中带走了那么高的能量，另一个方面原子在化学变化中释放的能量又很低。由此推断，α 粒子、β 粒子(电子)和 γ 射线看来不可能是由于原子的化学变化而释放出来的，那么，它们是从原子深处的哪一部分跑出来的呢？

在发现电子之后，汤姆逊就提出过一个原子结构模型。他认为原子中的负电荷完全集中在电子上，而正电荷仍然是连续分布的。一个原子序数为 Z 的原子，就是一个带有 Z 个(单位为 e)正电荷的球状体，内部有 Z 个点状的电子，分布在准确的对称位置上。当这些电子静止在平衡位置上的时候，原子是稳定的；当电子偏离各自的平衡位置时，它们就会振动起来。这个模型实际上并不能解释原子的发光，更无法说明原子何以能放出高能的 α、β 或 γ 射线。由于问题太多，人们很难接受这种原子模型。

如何解决原子的结构问题呢？只有靠新的实验手段去变革原子，才能去认识它。1911 年，在新西兰出生的英国物理学家卢瑟福和他的合作者设计了一个实验，用天然放射性源中放出来的高速 α 粒子(速度 $v\approx 2\times 10^9\,\mathrm{cm/s}$)去轰击很薄的金属箔(例如厚为 0.0004cm 的金箔)，用硫化锌(ZnS)的荧光屏去观察 α 粒子被散射到各个方向的分布。实验发现：大部分粒子透过去了，或者偏转了一个很小的角度，但还有极小一部分(约 1/8000)α 粒子却偏转了一个很大

的角度(超过 90°),有一些甚至接近 180°,即几乎是反弹回来。按照汤姆逊模型 α 粒子的偏转都应该很小,理由是:原子整体上是电中性的,只有当 α 粒子进入原子内部后才受到电力的作用,但 α 粒子质量大、速度快,原子内带负电的电子很轻,它对 α 粒子的作用不足以改变后者的运动方向,而原子内的正电荷分布又很均匀、很分散,也不能显著改变 α 粒子的运动方向,于是 α 粒子应该长驱直入,经过几千层的金原子之后,平均偏转也不过 1°左右。

卢瑟福和他的合作者们增加了箔的厚度,发现大角度散射的 α 粒子数目也随之增加,这是一种"体积效应"。最后卢瑟福断定,大角度偏转的 α 粒子必定受到一次强有力的碰撞(图 4-4)。因此他假定原子内的正电荷不是分散在原子半径(10^{-8} cm)量级的范围,而是集中在原子中心的一个半径极小的球体积内,这个小球就称为原子核。由此分析向各个角度散射(尤其是大角度散射)的 α 粒子的数目,与实验完全一致,并且可进一步测出原子核的半径不超过 10^{-12} cm,即不到原子半径的万分之一;同时证明原子核所带正电荷为 $+Ze$, Z 就是该元素的原子序数。

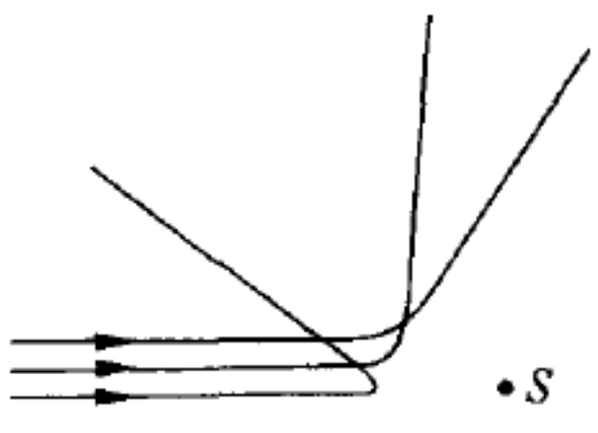


图 4-4 大角度偏转的α粒子

于是,新的原子结构模型——原子的行星模型产生了:原子核犹如太阳系的中心——太阳,Z 个电子则像 9 大行星那样绕"日"运行。原子核只占原子中空间范围的极小一部分,但却占有了原子质量的极大部分。我们现在还常常看到宣传画上画着的原子模型,但以后我们将逐渐说明,它只是人们认识原子结构的一个阶段,随着科学的发展,必须代之以更深的认识。

一种元素的化学性质是由原子序数 Z 决定的,Z 就是原子核外的电子数目,它也是原子核所带的正电荷的数目,所以一个原子的性质主要由它的核性质所决定。电子的电离乃是它的核外(外

层)电子增减的过程,原子核并没有发生变化,在化学变化中情况也是类似的。比如说,一个氧原子 $Z=8$,核内有 8 个正电荷,核外有 8 个电子,当它从外面拉来两个电子,便变成了氧的负离子(O^{2-});一个氢正离子 H^{+},就是失去电子的氢原子,即氢原子核,以后叫做质子。一个氦原子失去它的两个电子后也只留下一个核,它就是 α 粒子;等等。人们很快就明白,α、β、γ 等天然放射性都是从原子核内放出来的,这意味着核内蕴藏着巨大的能量。所谓"原子能",其实是"原子核能"。

从以上简短的介绍已可以看出,19 世纪末到 20 世纪初这段时间,确实是物理学的一个转折关头,许多物理工作者激流勇进,作出了重要的贡献。

4.2 相对论简介

1. 伽利略相对性原理和坐标转换

自古以来,空间概念来源于物体的广延性,时间概念则来源于过程的持续性,我国战国时代的著作《墨经》上说:"宇,弥异所也","久,弥异时也"。这里"宇"是空间的总称,"久"是时间的总称。"弥"是普遍的意思,"弥异所"即"不同地点的总称","弥异时"即"不同时刻的总称",这是从具体过程中抽象出来的空间、时间概念。牛顿基本上也是这种观念,他把空间、时间看做为物理事件的载体或框架,一切事件都相对于它们而用空间坐标和时间坐标来加以描述。具体地说,空间既作为物质世界位置性质的表现,又作为容纳一切物质客体的容器。在这两种空间概念的结合上,牛顿作了更进一步的假定:"在空时坐标的参考系中,存在一种优越地位的'惯性系',对于它来说,物体运动遵从惯性定律,即不受力(远离其他物体的相互作用)的物体保持其原有的或匀速运动状态。"当物体受力 F 时,按牛顿定律 $F=ma$ 产生加速度 a,这时的加速度是相对于惯性系的坐标来定义和测量的。因此,在牛顿力学中,空间、时

间不仅被看做为同物质一样的独立存在，而且还扮演了某种具有绝对意义的角色，它作为一种惯性系作用于一切物质客体。

与地球表面相连的参考系可看成是近似的惯性系，但地球除自转外，还以 30km/s 的速度绕太阳运动，因此，看来太阳系是更好的坐标系。但是，重要的是：即使是严格意义上的惯性系也不止一个，下面我们来说明这一点。

让我们在一只平稳航行的船上做一个自由落体实验，虽然船以速度 v 相对于地面在做匀速运动，但自由下落的水滴始终正好落在水滴正下方的盆里，不会因为船的匀速运动而向后偏斜。

1636 年，意大利科学家伽利略写道："……你可以使轮船以任何速度航行，只要它是在做匀速直线运动，你就一点也不会觉出前面所说的一切动作有任何改变，你也不能根据这些动作中的任何一个来判断轮船是在航行或是停泊着不动……你掷一样东西给一个人，假如他是在船头，你是在船尾，你不必用比你们两人处于相反位置上所用的更大的劲去掷那样东西。水滴仍会落在盘子底上，一滴也不会斜向船尾那个方向落下来。尽管当水滴还在空中的时候，船已经朝前行了几寸……"这里，伽利略已经明确地指出，不论做什么力学实验，都不能判断船相对于地球的匀速运动状态。而当船处于加速（或减速）状态中时，则因水滴下落时向后（或向前）偏斜，人们是能够判断出自己是处在加速（或减速）状态中的。如果承认地球表面是惯性系，那么匀速运动的船同样也是一个惯性系（不论速度大小）；但加速度的船则不是一个惯性系，而是一个非惯性系。于是，我们可以归纳出两条密切联系的结论：

（1）相对于一个惯性系做匀速直线运动的参考系也是个惯性系。

（2）在一个惯性系内通过一切力学实验都不能判断这个惯性系相对于另一个惯性系的匀速运动状态。

有关以太的讨论在第 3 章中已有说明，有人提出了将以太作为一个优先的静止坐标系来讨论光的传播问题，这就是迈克耳

孙-莫雷实验(图 4-5)。更具体、更详细的讨论在 4.4 节中还要说明。由于这一实验与静止以太论不相容,所以,引起了物理学界的震惊。但是有的书上把这一实验说成是相对论赖以产生的判断实验就不妥了。从当时的历史实际来说,人们对菲涅耳的理论是极为信赖的,不少人认为迈克耳孙-莫雷实验失败了,其理由是看不到预想的结果,但是谁也没有据此否定菲涅耳的静止以太论。

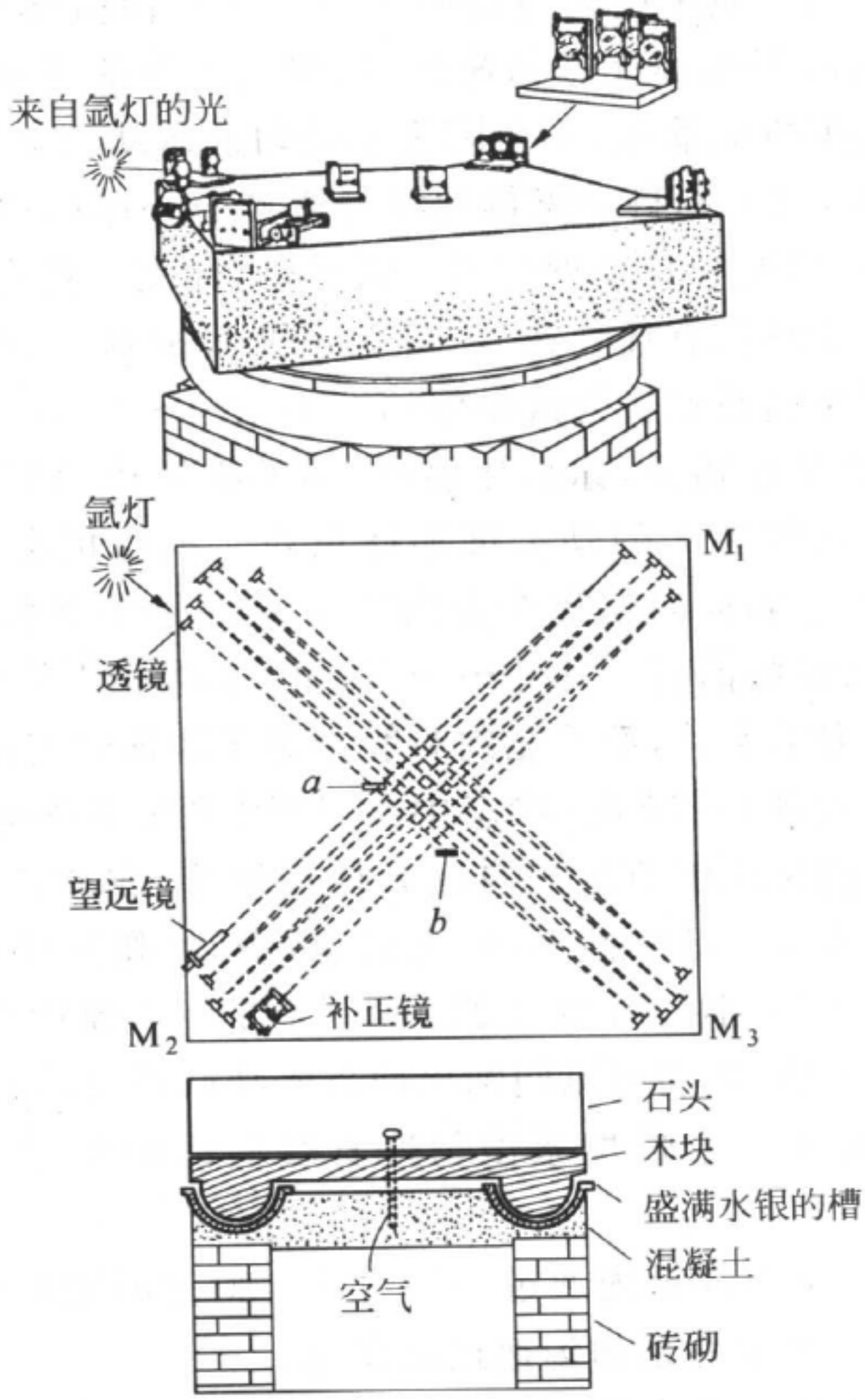


图 4-5　迈克耳孙实验装置图

1892 年，荷兰物理学家洛伦兹(Lorentz，1853—1928)提出了“收缩假设”来解释“以太漂移”实验的零结果。他假定物体在运动方向的长度有收缩效应，如果收缩的因子是 $\sqrt{1-v^2/c^2}$，便能得出条纹移动量的零结果。洛伦兹从物质结构上来解释长度收缩，他认为这种收缩是由物体内部的分子力引起的。他假定分子力像电力和磁力一样通过以太而传递，由于物体的平移可能影响分子力，从而使物体大小发生变化。

同年，洛伦兹发表了《麦克斯韦的电磁理论及其对运动物体的应用》的论文，着手研究运动物体的电动力学问题。在赫兹发现电磁波后，洛伦兹明确地接受了麦克斯韦关于场的概念。他首先把以太和有重量的物质鲜明地区别开来，认为以太是电磁场的载体，以太就是作为电磁场而存在。他假定静止以太充满整个宇宙空间，物体中大量微小的带电粒子是电磁现象的源泉，空间每一点以太的状态由麦克斯韦方程来描述。

为了研究运动物体中的电磁学规律，最方便的办法当然是把电磁学的基本方程变换到运动参考系中来。按洛伦兹的理论，麦克斯韦方程在静止以太参考系中是成立的；但实验顽强地显示出地球运动的一阶和二阶效应为零，这可能是根本不存在这种效应，也可能是被其他效应所补偿。无论如何，平移参考系中的电磁学规律的形式应当和静止系中的一样。

从 1892 年至 1904 年，洛伦兹探讨了在相互做匀速运动的参考系中的坐标变换式和电磁场变换式，经过十多年的努力，他得到了现在所用的洛伦兹变换式。按照这套变换式在运动参考系 S' 中和在静止参考系 S 中的麦克斯韦方程具有相同的形式(图 4-6)，他称这些方程是协变的(covariant)。所以在 S' 系和 S 系中电磁规律和光学规律是相同的。他把这一结果称之为“对应态原理”(theorem of corresponding states)，对于一个以电场强度 E 和磁感应强度 B 为特性的系统的状态，它们对 (x, y, z, t) 的函

数，在 S' 系中和 S 系中具有相同的形式。这就回答了地球运动对光学现象没有影响的问题，说明在地球上所做的任何光学和电学的实验不可能发现地球相对于以太的运动（本章后面还要详细介绍）。

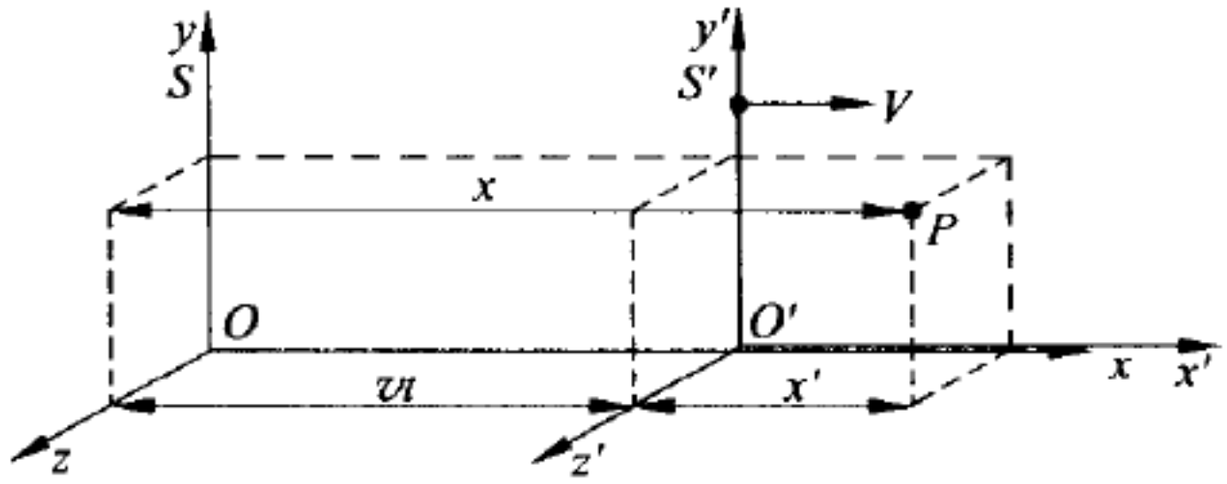


图 4-6　两个惯性参考系 S,S′

虽然洛伦兹提出了变换方程，但是他是先验地提出这组方程，而且把变换方程作为一种纯粹的数学手段，他把变换出来的坐标 (x', y', z', t') 中的 t' 叫做“地方时”(localtime)，并认为它只不过是个数学的辅助量，而不是真正的时间，他认为真实的、普遍的空间和时间坐标是相对于静止以太参考系的坐标。但是，也有些科学家作了其他方面的思考，这里先介绍彭加勒的相对性原理。法国数学家物理学家彭加勒(H. Poincare, 1854—1912)1895 年在研究拉摩(J. Larmor, 1857—1912)电磁理论的论文中，首次出现了反对绝对运动的提法，他在那里说：“从各种经验事实得出的结论能够概括为下述断言：要证明物质的绝对运动，或者更确切地讲要证明可称量物质相对于以太运动是不可能的。”1899 年，在巴黎大学的讲演中，当他描述了当时所做的一系列测量地球相对于以太运动的一阶、二阶实验没有产生任何效应后，他说：“我认为光学现象很可能只取决于物体、光源和所涉及的仪器的相对运动，不只是到二阶的量，而且到更加精确的量也是对的”。这就是说，在 1899 年彭加勒相信在原则上绝对运动是不存在的，只有相对运动才有意义。

1900 年，在巴黎举行的国际物理学会议上，他坚持了同样的原

则。他说:“我们的以太它真的存在吗? 我不相信更精确的观察能够揭示出比相对位移更多的东西。”他继续说:“对于考虑到二阶项所获得的负结果,找一个共同的解释是必要的。有理由假定这种共同的解释适用于更高阶的项,这些项是相当严格的和绝对的,于是某种新的原理必定要引入物理学。这一新原理断言某些事情是不可能的,很类似于热力学第二定律,在这一情况下,就是确定地球相对于以太的速度是不可能的。”彭加勒在这里明确指出对各种二阶效应实验要寻找一个共同的解释,他认为对每一个新的实验结果提出一种特殊假设的做法是不自然的。他预期着引入一个新的原理,这一新原理在方法论上类似于热力学第二定律,确定某些事物是不可能存在的。

至此,彭加勒论述的只是相对运动原理而不是相对性原理。1902 年,他在《科学与假设》中进一步阐述了这一思想。在该书第 5 章“实验和几何学”中,他断言:“在任何时刻物体的状态只取决于初始时物体的状态和物体间的相对位置,而与系统在初始时的绝对位置和绝对速度无关。简而言之,我称它为‘相对性定律’(law of relativity)。”他说:“例如宇宙系统,实验势必不能告诉我们它在空间有什么绝对的位置和方向,无论我们的仪器何等精巧,我们所能知道的,只是宇宙的各部分的情况及其相对位置。”所以,彭加勒的相对性仍然局限在对绝对运动的否定上。

1904 年 9 月 24 日,在美国圣路易斯城举行的科学和技术大会上,彭加勒在一篇讲演中首次使用“相对性原理”(the principle of relativity)这一词。他说:“按照相对性原理,物理现象的规律对一个固定的观察者像对于一个相对于他做匀速平移运动的观察者一样是相同的,所以我们没有也不可能有人以任何方法来辨别我们是不是处于这样一个匀速运动系统。”在这篇讲话中,彭加勒还敏锐地预感到一种新的力学即将出现,他断言:“也许我们应该建立一门新的力学,对这门力学我们只能窥见它的一鳞半爪,在这门

力学中，惯性随着速度增加，光速将会成为一个不可逾越的界限。”这段话既显示了彭加勒直觉的力量，也显示出他对新力学的见解具有定性的性质。

1906 年，彭加勒在他的《论电子的动力学》中写道：“从实验上证明地球的绝对运动的不可能性是自然界的普遍规律。相对性假设(postulate of relativity)是成立的，而且是普遍有效的。无论这个假设迄今是与实验相一致，还是以后被更精确的实验进一步证实或被推翻，在任何情况下看到这一假设所得出的结构都是正确的。”但是，尽管这样，洛伦兹、彭加勒都没有把相对论提出来。1915 年，洛伦兹在总结自己没有提出相对论的原因时说：“如果我现在必须写最后一章，我一定给予爱因斯坦的狭义相对论一个更为重要的地位，根据这一理论，运动系统电磁现象的理论达到了我没有获得的简明性。我失败的主要原因是我墨守这一概念，只是把时间 t 认为是真实的时间，而把我的地方时间 t' 充其量不过看做是个数学辅助量而已。”

爱因斯坦(图 4-7)对洛伦兹的贡献作了高度评价。1907 年，他说：“狭义相对论是洛伦兹理论和相对性原理的结果。”1955 年，他在致 C. Seeling 的一封信中写道：“毫无疑问，如果我们回顾狭义相对论的发展，那么它在 1905 年发现的时机已经成熟，洛伦兹已经看到为了分析麦克斯韦方程，那些后来以他的名字命名的变换方程是必不可少的。彭加勒甚至已经识破这些联系。”



图 4-7　爱因斯坦

2. 爱因斯坦相对论的建立

1908 年在另一篇《电子动力学》中，彭加勒表述的仍然是相对运动原理。“无论使用什么方法，除了相对速度以外，我们将永远

不能揭示出任何其他东西；我所说的某些物体的速度是相对于另外一些物体而言的。”1909 年，在法国科学促进会的一次讲演中，彭加勒详细地阐明了，以当地时间和收缩假设为基础的洛伦兹理论解释了“在所有光学实验中所观察到的完全补偿”，并且“在电学中也存在着同样的补偿作用”，他“最终坚信，相对性原理是完全正确的”。

由此看来，彭加勒的相对性原理类似于爱因斯坦的叙述，但是在内容上差别是很明显的，关键的差别是彭加勒原理承认静止以太存在，认为只有在静止以太中测量的光速才严格地为 c。他仍然坚持“真实时间”与“地方时间”的区别。他也像洛伦兹那样企图把“收缩效应”解释为动力学效应。他的相对性原理的内容主要是断定绝对运动不存在，实质上讲的是相对运动原理。

惠特克(Whittaker)在他的著作《以太和电磁理论的历史》中，基本上排除了爱因斯坦 1905 年关于狭义相对论的论文，而认为这篇论文只是“陈述了彭加勒和洛伦兹相对论，并加了一些补充，而且引起了很大注意”。他在 1955 年为爱因斯坦写的悼念传记中也没有改变这一评说。他说：“彭加勒 1904 年 9 月在圣路易斯城的讲话中创造了‘相对性原理’这个词组。爱因斯坦采用彭加勒的相对性原理作为物理学的一个新基础，并且指出洛伦兹变换群对彼此在相对运动的物体的物理学提供了一种新的分析。”前面我们对彭加勒的“相对性原理”已经作了翔实的介绍，对于惠特克这一不公平的评价也就不攻自破了，何况爱因斯坦并未读过 1904 年洛伦兹的论文，也不知道彭加勒的这篇讲话。

爱因斯坦一直坚持工作的连续性这一观点，他对他的前辈和同代人的工作都是充分肯定的，英费尔德(Infeld)在他写的《相对论的发展史》中叙述了他与爱因斯坦在普林斯顿的一次谈话，“我对爱因斯坦说：‘在我看来，即使您没有建立它，狭义相对论的出现也不会再等多久，因为彭加勒已经很接近构成狭义相对论的那些

东西了。'爱因斯坦回答道:'是的,这说得对。'"

1905 年建立狭义相对论的历史条件已经成熟,走到狭义相对论门前的人中,有洛伦兹、彭加勒、爱因斯坦,无论就学识的渊博和数学水平来讲,洛伦兹、彭加勒都比爱因斯坦强,但为何不是由他们建立狭义相对论,而是由"初出茅庐"的爱因斯坦建立狭义相对论呢? 这要从少年时代的爱因斯坦谈起,他从小就有发散的思维,少年时代的爱因斯坦就萌发了相对论的思想。1895 年,当他 16 岁在瑞士阿劳中学念书时,曾在无意中想到一个追光的假想实验,他想:"如果我以速度 c 追随一条光线运动,那么我就应当看到,这样一条光线就好像一个在空间里振荡着而停滞不前的电磁场。可是无论是依据经验,还是按照麦克斯韦方程,看来都不会有这样的事情,从一开始我直觉地看就很清楚,从这样一个观察者来判断,一切都应当像一个相对于地球是静止的观察者所看到的那样按照同样一些定律进行。"

这是与狭义相对论有关的"第一个朴素的思想实验"。而且,爱因斯坦在少年时代就开始对哲学产生兴趣,13 岁的时候,读了康德(Kant,1724—1804)的《纯粹理性批判》。1897 年,在大学二年级时读了奥地利物理学家马赫(Ernst. Mach, 1836—1916)的《力学及其发展的批判历史概论》。这本书对牛顿力学的绝对性的批判,给爱因斯坦以深刻的影响。

大学时代,爱因斯坦又打下了扎实的基础。他在大学头一年就自学了基尔霍夫、亥姆霍兹、赫兹等人的著作,在后两年又学习了洛伦兹著作。从这些著作中他首先吸取了光速不变性以及电磁场方程协变性的概念。

早在 1865 年,在麦克斯韦的《电磁场的动力理论》中,就从波动方程中得出电磁波的传播速度 $v=1/\sqrt{\epsilon\mu}$,ϵ 和 μ 分别是物质的介电常数和磁导率。对于在真空中传播的电磁波,其波速等于光速 c,$c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ 为一常数。1890 年,赫兹在写出静止以太参考

系中的波动方程时，明确指出波速 c 与波源的运动速度无关。洛伦兹在探讨运动参考系中的波动方程时，始终把光速不变性作为一个限制条件，作为他写出的变换式是否正确的准绳。所以爱因斯坦在《相对论的基本思想》中指出："从麦克斯韦-洛伦兹电动力学出发，这个理论采纳了光速不变定律(光速不变原理)。"

洛伦兹在确立他的变换方程时，除了要满足光速不变性的要求外，还要满足协变性的要求，即用洛伦兹变换式来计算从一个惯性系统转移到另一个惯性系统的变化时，必须要求物理学的一切方程都不改变它们的形式。爱因斯坦在《相对论发展简述》中说："洛伦兹理论的重大价值在于使静止物体和运动物体的全部电动力学回到了空虚空间的麦克斯韦方程"，这句话的意思就是说运动参考系与静止参考系中的麦克斯韦方程具有相同的形式。

但是洛伦兹理论在一个"有根本重要意义的地方"使爱因斯坦感到不满足，"比起别的运动参考系来，它给以太静止参考系以突出的地位"，在这一点上，这个理论与相对性原理相对立，而爱因斯坦对相对性原理是确信不疑的。他认识到，一切经验，包括电动力学领域里的一切经验(特别是迈克耳孙实验)都支持一切惯性系的等效性这个概念，也就是说都是支持相对性原理的。

当时，在确信伽利略变换是正确的前提下，爱因斯坦遇到了一个带根本性的问题："狭义相对性原理同麦克斯韦方程相矛盾"。如果按照伽利略变换，麦克斯韦方程在不同参考系中就具有不同的形式，这就违背了相对性原理。由于爱因斯坦对相对性原理是确信的，所以他对麦克斯韦方程产生了怀疑，花了一些时间试图修正麦克斯韦方程。"如果麦克斯韦方程对一个系统是正确的，那么它们在另一个系统中就不正确了。它们应当加以变化"。那些年，爱因斯坦用研究和尝试改变麦克斯韦方程的途径试图弄清楚这个问题。他没有取得成功……"白白用了近一年时间"。

这时，他还遇到了另一对矛盾：光速不变与速度合成法则的矛

盾。他企图用麦克斯韦-洛伦兹方程处理菲索关于曳引系数的实验。他相信“这些方程是正确的，它们恰当地描述了事实，它们在运动坐标系的正确性表明了所谓光速不变的关系……可是，这与从力学中所了解的速度合成法则却格格不入”。“他尝试用某种方法将力学方程和电磁现象统一起来，他遇到了困难”。他一度产生了对光速不变性的怀疑：“必须克服的困难是我们早已想到又不得不放弃(have to give up)真空中光速的不变性(constancy)，只是在探索若干年后我才注意到这个是建立在运动基本概念的任意性上(大概是同时性(simultaneity)这类概念)”。

这段时间内，爱因斯坦还对电磁场的对称性进行了考虑。在大学二年级(1897 年)，从考虑以太漂移实验开始，他力图从物理学文献中找到以太运动的实验证明，但毫无结果，于是他想通过实验来进行，他说：“那时，我想要检验以太相对于地球的运动……当我最早想到这个问题时，我没有怀疑以太的存在，即不怀疑地球通过以太的运动。我想用两个热电偶做如下实验，放置两个平面镜使来自单光源的光在两个不同方向上反射，一束光平行于地球运动的方向，另一束光与之相反。如果这两束光之间有一能量差，就能用两个热电偶测量出它们所产生的热量之差，以证实以太的存在。但是没有进行这个实验。”由于他的导师对此并未给予足够的重视，那就更谈不上建造仪器来验证了。

对于迈克耳孙实验的零结果，爱因斯坦说：“……我知道迈克耳孙实验的奇怪的结果。不久我得到这样的结论：如果我们承认迈克耳孙的零结果是事实，那么地球相对以太运动的想法就是错的，这是引导我走向狭义相对论的最早想法。自那以后，我认识到虽然地球在环绕太阳运动，但地球的运动不能由任何光学实验检验出来。”

当迈克耳孙实验的零结果使一些物理学家感到震惊和迷惘，忙于修补以太论的时候，爱因斯坦却得出“地球相对于以太运动的想法是错误的”结论。这与他在“追光”中的思想是一脉相承的。

因为在那时他就直觉地相信在相互做匀速运动的参考系中所看到的物理现象就按同样的定律进行。

为什么又说这是引导爱因斯坦走向狭义相对论的最早的想法呢？这是因为在“追光”中他是“直觉地清楚的”，而这时是从观察实验中得到结论，比过去对相对性原理的认识就更加具体、更加巩固了。但迈克耳孙实验在他原有的观念上并没有引起很大的变化，只是更加自信而已。

年轻人相聚在一起的畅想、切磋，是学术研究中的一个很好的方法，在 1902—1905 年间，爱因斯坦在伯尔尼结识了索洛文(M. Solovine)与哈比希特(C. Habicht)，三个青年组成了“奥林比亚科学院”，他们每晚聚集在一起以极大的兴趣和热情研读斯宾诺莎(Spinoza，1632—1677)、马赫、休谟(D. Hume，1711—1766)、亥姆霍兹、黎曼、彭加勒等人的科学与哲学著作。从这些大师们的经典著作中，爱因斯坦吸取了许多人类思想的精华。斯宾诺莎关于自然界的统一性观念对爱因斯坦有深刻影响，他曾经声称：“我信仰斯宾诺莎的那个在存在事物的有秩序的和谐中显示出来的上帝，而不信仰那个同人类的命运和行为有牵累的上帝。”即他相信世界的统一。正是因为他对自然界的统一性具有强烈的深挚的信念，所以他在 1905 年发表的几篇文章都具有同一风格，在文章的起始都提出了不对称性问题，即统一性遭到破坏的问题。马赫对牛顿的绝对时空观提出的批评以及对休谟的时空观提出的批评，为爱因斯坦在潜意识中放弃时间的绝对性或同时性的绝对性概念打下了基础。有了这样一个基础，相对性原理与伽利略变换之间的矛盾就有了解决的途径。

爱因斯坦 1922 年在日本京都大学的讲演中，生动地描述了这一矛盾的解决过程，“1905 年 4 月的一天，天气很好，我带着这个问题(光速不变性概念与速度合成法则的矛盾)去访问我在伯尔尼的一位朋友贝索(Michele Besso)。开始，我告诉他：‘近年，我遇

到一个难题，今天到这儿来，请你和我一块攻攻它。'我们讨论了这个问题的各个方面。后来我突然找到了问题的关键。第二天，我又来访问他，甚至没有问候一声就对他说：'谢谢你，我已经完全解决了这个问题。'我的解决办法是，分析时间这个概念不能绝对定义，时间与信号速度之间有不可分的联系，使用这个概念，我第一次完满地解决了整个问题。"

为了解决这些矛盾，爱因斯坦经过了一段时间的思考。1905年6月，爱因斯坦在《论动体的电动力学》这篇论文中抛弃了"以太"的概念，并提出了两个基本假设作为狭义相对论的基本原理。

(1) 狭义相对性原理

这个原理是力学相对性原理的推广，它的内容为：在一切惯性坐标系内，各种物理学的规律都是相同的，即在惯性系内，不能通过物理实验来判断该惯性系是静止还是匀速直线运动。

(2) 光速不变性原理

这个原理的内容为：在真空中，光速与光源或接收器的运动无关，在各个方向都等于一个恒量 c。这就是说，在相对于光源做匀速直线运动的一切惯性系中所测得的光速都相同。

第一条原理称为爱因斯坦相对性原理，它表明物理规律在所有惯性系都是相同的，或者说一切惯性系都是等价的。这一原理是力学相对性原理的推广，使相对性原理不仅适用于力学现象，也适用于电磁现象以及所有物理现象。

第二条原理称为光速不变原理，它表明在任何惯性系中，光在真空中的速率都相等，或者说光速与光源和观察者的相对运动无关。这一结论来自于电动力学的成果，它也为很多精确的实验和观察所证实，特别是为著名的迈克耳孙实验所证实。

正是在这两条原理的基础上，爱因斯坦建立起一套完整的理论——狭义相对论，而把物理学推进到一个新的阶段。

下面，把由爱因斯坦相对论得出的结论作一个简单介绍。

（1）同时的相对性

设想前苏联和美国的两艘宇宙飞船在宇宙空间以相对速度为 $c/2$ 相向而行，并以在某时刻相遇的情景来作说明。这两艘宇宙飞船长度相同，在首、尾都装有一个能接收光信号的光钟，在飞船中部都有一个光信号发射器，当两飞船中部相遇重叠时，信号发射。如图 4-10 所示，左列四图是美国飞行员所见到的现象，右列四图则是前苏联飞行员所见到的图像。美国飞行员说："光信号从中间发出后，同时到达我的飞船的前后两个光钟，而不是同时到达前苏联飞船上的两个光钟"，而前苏联飞行员则说："光信号从中间发出后，同时到达我的飞船的前后两个光钟，而不是同时到达美国飞船的两个光钟"，究竟谁正确呢？

爱因斯坦认为：他们两个都对。他们得出的结论之所以不同是因为他们分别处于不同的参考系。发生在同一地点（同一参考系）的两个事件的时间顺序是能绝对确定的，但是发生在不同地点（不同参考系）的两个事件的"同时性"不是绝对的，而是一个相对的概念，没有一个绝对的、通用于一切惯性参考系的"钟"。实际上，这里还牵涉到了一个重要的哲学范畴的概念，即"绝对"与"相对"的问题，对此，4.4 节中还将专门阐述，深入讨论。

（2）洛伦兹变换

爱因斯坦新的时空观和伽利略的绝对时空观间是完全不同的，而作为爱因斯坦相对论基础的新的实验事实是光速在一切惯性系内都各向同性，并为相同数值，简单的示意图见图 4-9。由此可见，新的时间-空间理论一定包含新的时空坐标变换关系，这就是由相对论所推得的洛伦兹变换关系式，结合图 4-6，图 4-10 来讨论可得，两个坐标系，即有撇的和无撇的坐标系中应有下列关系：

$$y' = y, \quad z' = z$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

以上就是发生在同一客观时空点的“事件”反映在两个惯性系中时间-空间坐标之间的变换关系，叫做洛伦兹变换。由洛伦兹变换很容易导出运动物体长度收缩，运动时钟变慢的运动效应，当然，这种运动效应只是在速度很大的情况下才显著地反映出来。当 $v \ll c$ 时，洛伦兹变换就可用伽利略变换来表示了。有人提出了所谓“双生子佯谬”的问题，说的是当孪生兄弟中一个从宇宙飞行中归来，两人是否会不一样年轻的问题(图 4-8)。



图 4-8　孪生兄弟佯谬图

(3) 狭义相对论动力学

经典力学在伽利略变换下是不变的。运动粒子的质量 m 是一个不随时间(也不随速度)而变的常量 m_0，经典力学的动力学方程为

$$F = m_0 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(v) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m_0 v) = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}$$

而由相对论可得

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

式中，m_0 是物体静止时的质量，称为静止质量；m 是物体以速度 v 运动时的质量。上式被称为质速关系。令上式中 $\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \gamma$，$\gamma$ 与 v 的关系如图 4-11 所示。

由于质量是随着 v 而变的，则又有狭义相对论的动力学方程如下：

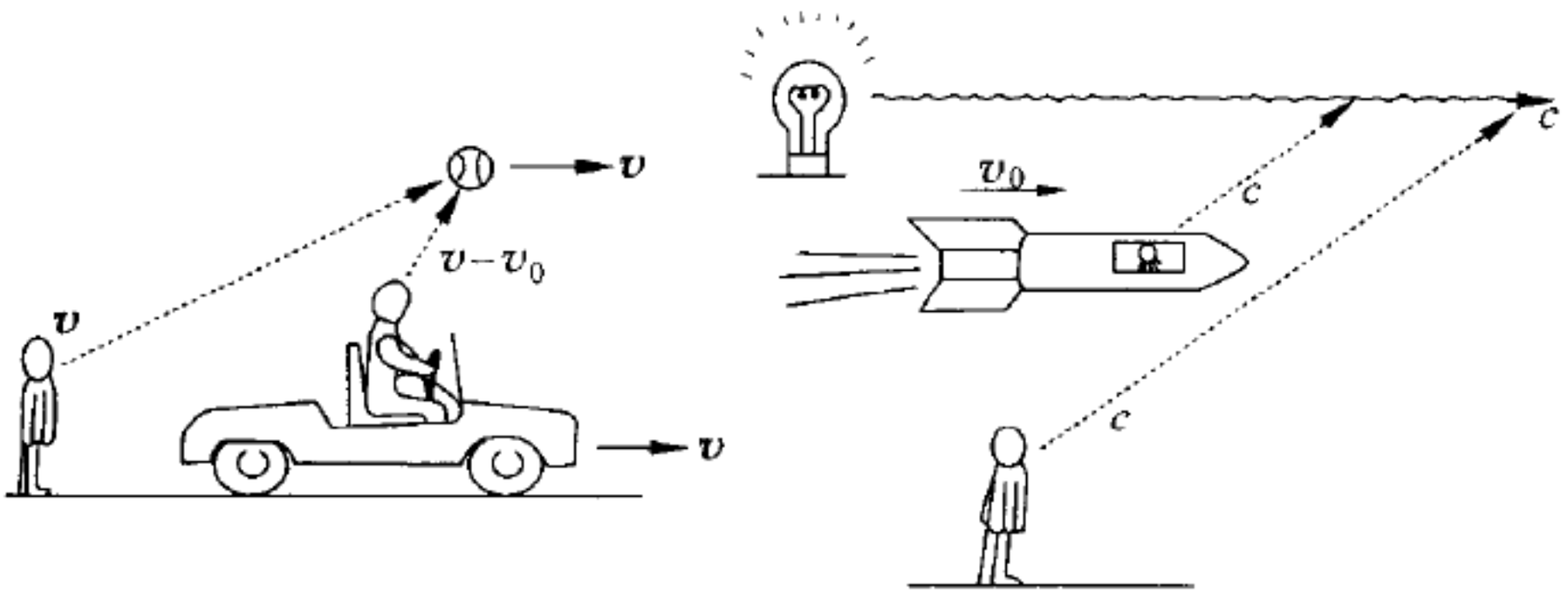
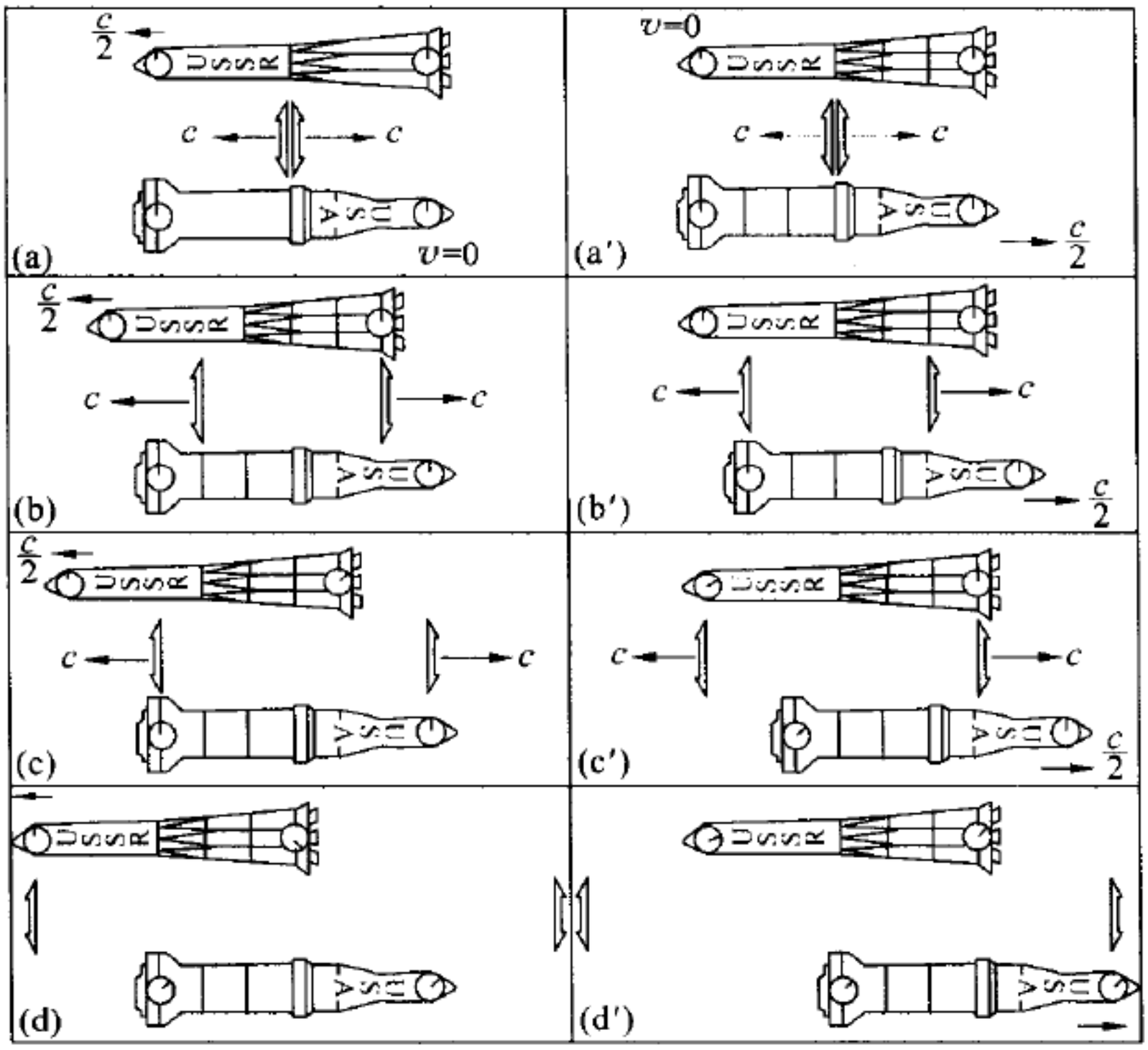


图 4-9　表示两种坐标变换原理的示意图



美国飞行员所见到的　　前苏联飞行员所见到的

图 4-10　不同宇宙飞船上的观测结果

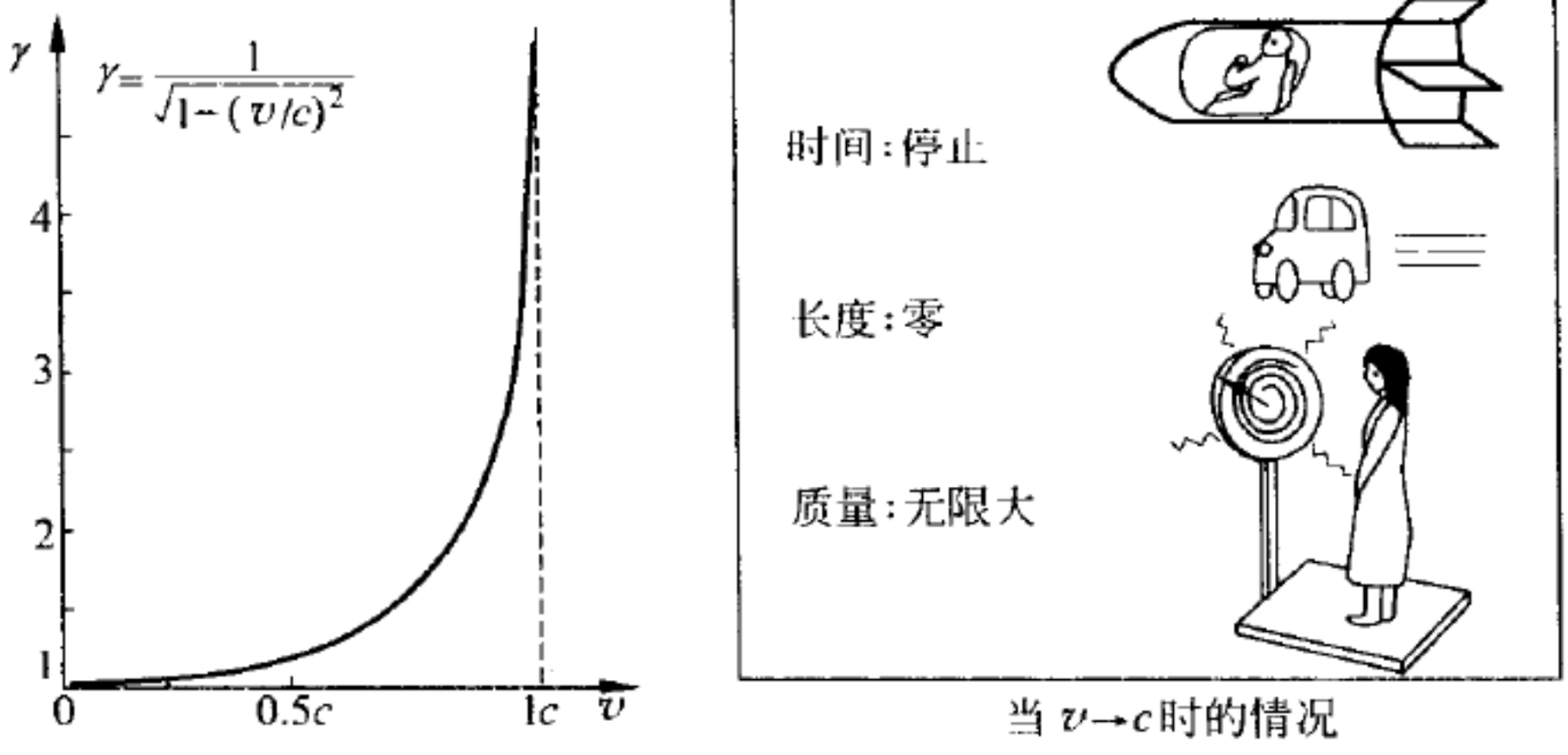


图 4-11　γ 和 v 的关系

$$F=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\right)=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(mv)=v\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}+m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

v 越大，m 越大，因而加速度 $a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$ 就越小，所以对一个已接近光速的粒子来说，受到外力时，与其说是增加速度，不如说是增加质量 m。

由于 $m=m_0\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$，若对 $\frac{v}{c}$ 来展开时，由于 $\frac{v}{c}<1$，将 $\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$ 按级数展开质速关系可写成

$$m=m_0\left(1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}+\cdots\right)$$

则

$$mc^2=m_0c^2+\frac{1}{2}m_0v^2+\cdots$$

这样，在略去高次项的条件下，一个运动着的物体的总能量 $E=mc^2$，可以分成两项，一项是运动的动能 $E_k=\frac{1}{2}m_0v^2$（$v\neq0$）；另一项是静止（$v=0$）时也有的能量，叫做静能 $E_0=m_0c^2$，即

$$E=E_0+E_k,\quad E_k=E-E_0=mc^2-m_0c^2$$

这就是相对论动能公式，而 $E=mc^2$ 则是质能关系公式。

这个质能相互联系的规律，在相对论之前，没有被人们所注意。现在可以看到，如果一个物体的质量减少 Δm，那么将会释放 Δmc^2 的能量，而 c^2 是一个非常巨大的数值，也就是将会释放出非常巨大的能量来，这就为原子弹、氢弹的制造奠定了理论的基石。

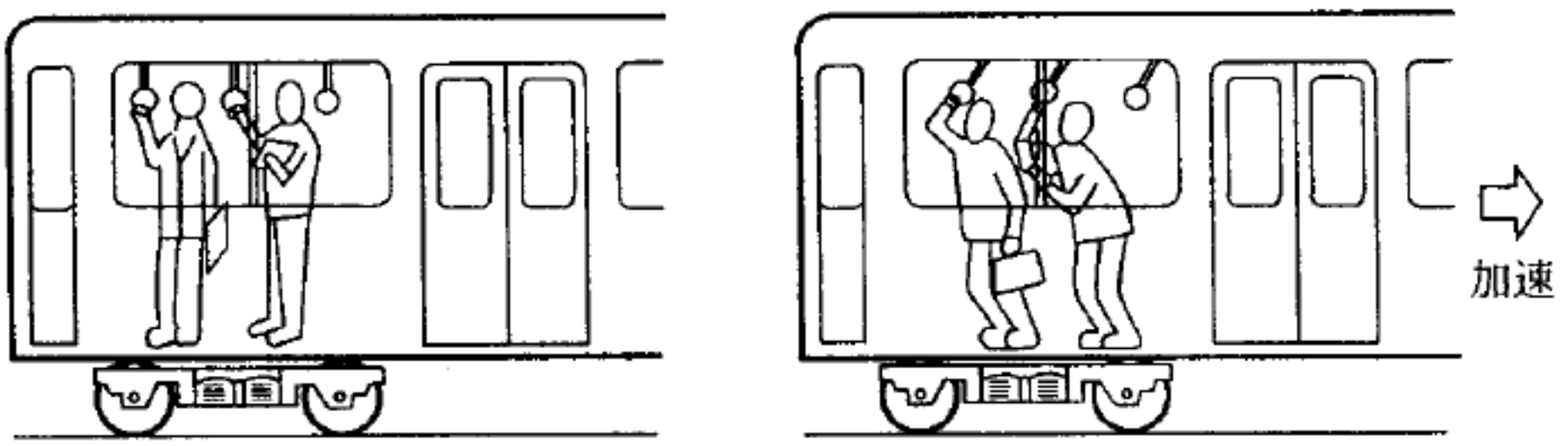
例如在核反应中，若以 m_{01}、m_{02} 分别表示反应粒子和生成粒子的总静止质量，E_{k1} 和 E_{k2} 分别表示反应前后的总动能，则我们应有 $m_{01}c^2+E_{k1}=m_{02}c^2+E_{k2}$。整理后则有

$$E_{k1}-E_{k2}=(m_{01}-m_{02})c^2$$

则

$$\Delta E=\Delta mc^2$$

爱因斯坦在提出狭义相对论不久就感到这个理论存在着一个严重的缺陷。“只把相对性原理，即认为自然规律同参考系无关这一假设应用于非加速参考系。是否可以设想相对性原理对相互作加速运动的参考系也仍然成立”。他自己还提出：“……我认识到，除了引力定律以外的一切自然现象都能借助狭义相对论加以讨论。我非常想弄明白其中的原因……使我不能满意之处是，虽然惯性和能量之间的关系已经如此美妙地从狭义相对论中推导出来，但惯性和引力之间的关系却没能得到说明。我猜想这个关系是不能依靠狭义相对论来说明的。”为此，爱因斯坦把相对性原理推广到非惯性系，创立了广义相对论（图 4-12～图 4-14）。



匀速运动系　　列车加速运动产生惯性力

图 4-12　惯性力的产生

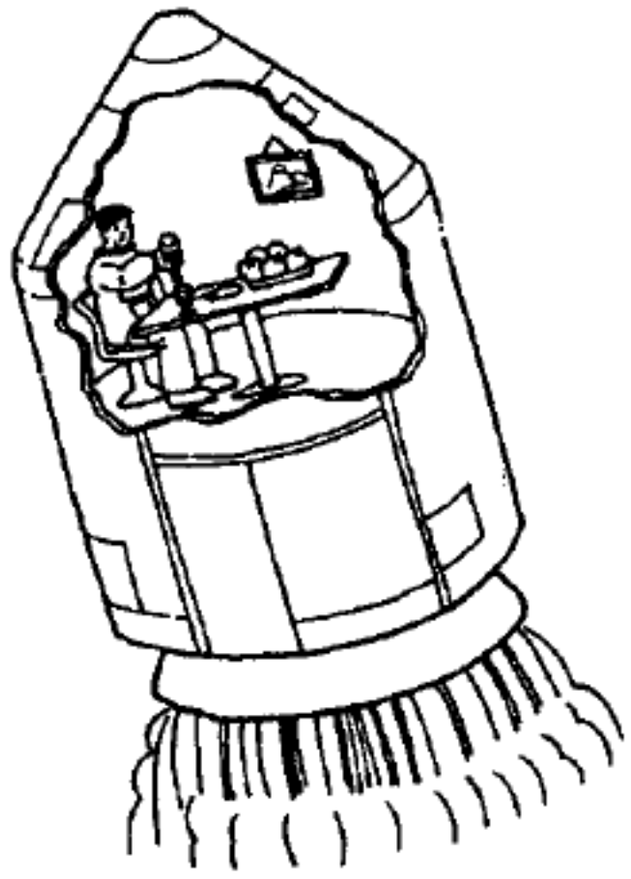


图 4-13　火箭喷射时可能产生重力

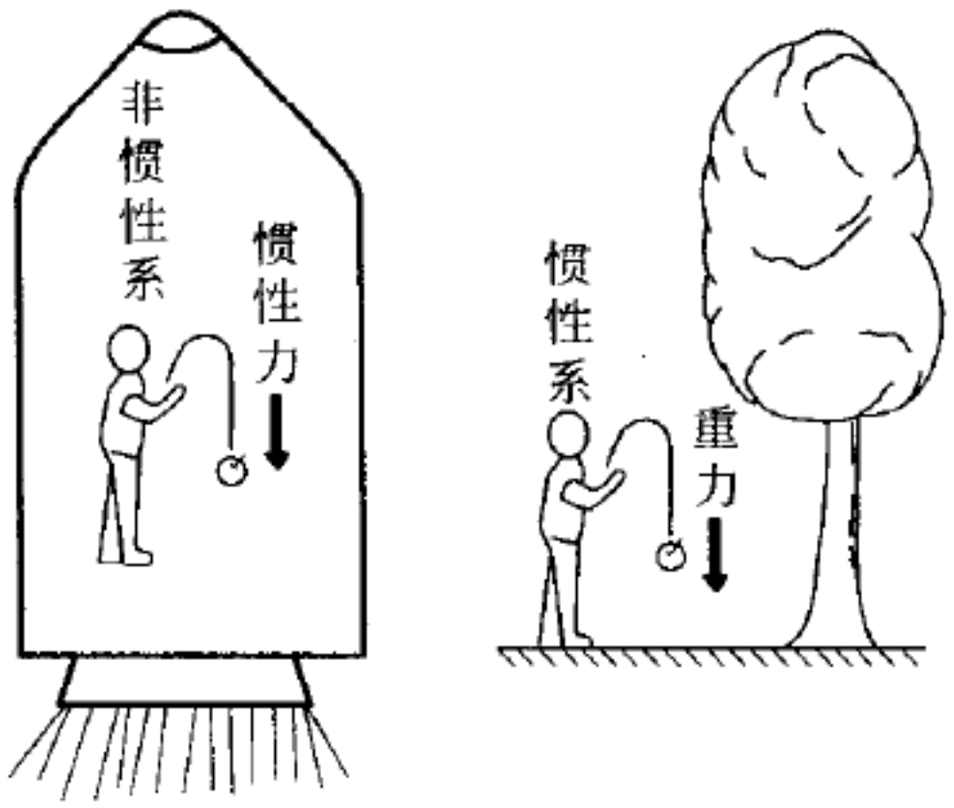


图 4-14　惯性力和重力的区别

3. 广义相对论提出的问题

(1) 引力质量和惯性质量的等同性

牛顿定律 $F=ma$ 中定义了反映物体运动惯性的物理量——惯性质量，而在万有引力定律 $F=\frac{GMm}{r^2}$ 中又引进一个反映物体相互间作用的接受或产生引力的能力的物理量——引力质量。以上

两者是从不同的实验基础上得出的，应属概念互不相同的物理量，但爱因斯坦却提出两者是相等的，他说："广义相对论的创立首先是由于物体惯性质量同引力质量在数值上相等这一经验事实，对于这一经验事实，古典力学是无法解释的。"这一等价性可从图 4-15 看出，在升降电梯中有一个人托着一个苹果，若牵引钢丝突然断裂，电梯处于自由下落状态，这时若把手抽掉时苹果仍然会停留在原来位置上，这样，爱因斯坦就提出引力与惯性力等效或引力场与加速场等效的原理。

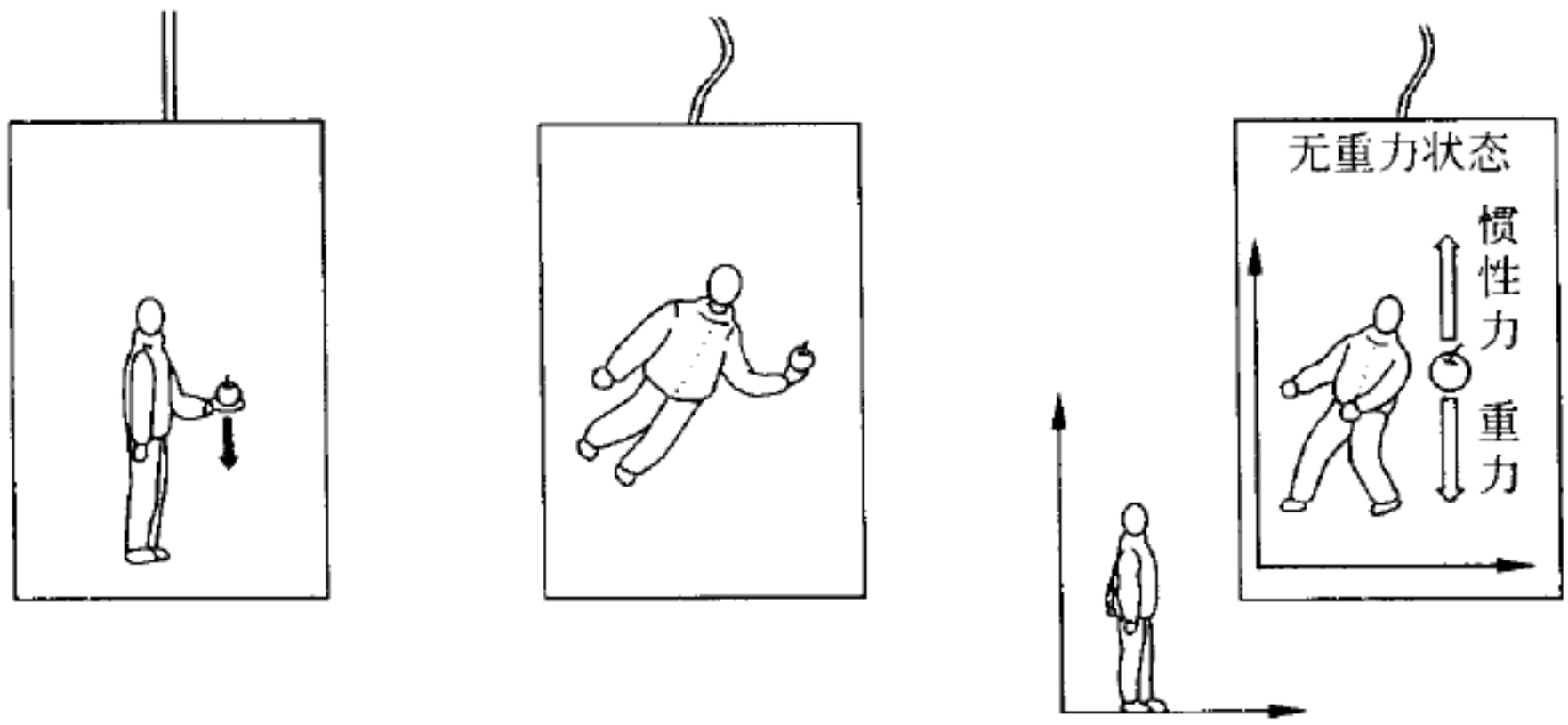


图 4-15　引力与惯性力等效原理图

将加速度和重力相关的关系用到光学中时，则会出现惊人的光的引力偏折现象，该结论由 1919 年在巴西和西非的两个日全食观测结果所证实(图 4-16)。

由爱因斯坦的计算可得

$$\Delta\theta = \frac{4GM}{R}$$

式中，R 为太阳半径；M 为太阳质量。G 为常数，计算出的 $\Delta\theta = 1.75''$，实测为 $1.98'' \pm 0.12''$ 或 $1.61'' \pm 0.30''$。

由爱因斯坦相对论推得的引力时间延迟效应，也由直接观测

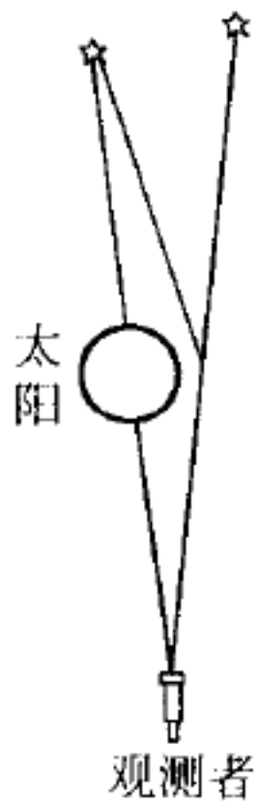


图 4-16　光的引力偏折

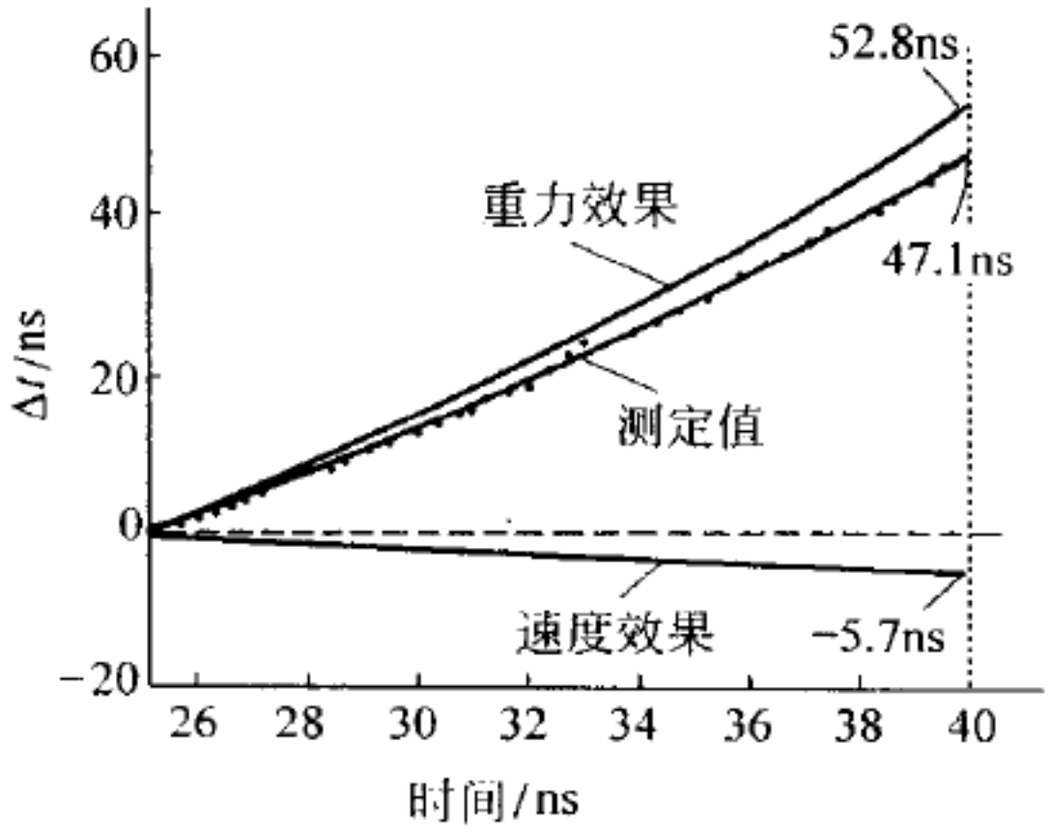


图 4-17　原子钟在飞行中延迟效应的测定

（重力效果和速度效果使时间的延迟与测定值一致）

卫星和地球上的原子钟的时间之差得到证实(图 4-17)。已知地球质量 $M_E=6.0\times10^{24}\,kg$,地球半径 $R_E=6.1\times10^{6}\,m$,假设卫星飞行高度为 $10^{4}\,km$,由于引力偏差 $\Delta\varphi$,卫星上的原子钟相对于地球上的原子钟频率显示的差值为

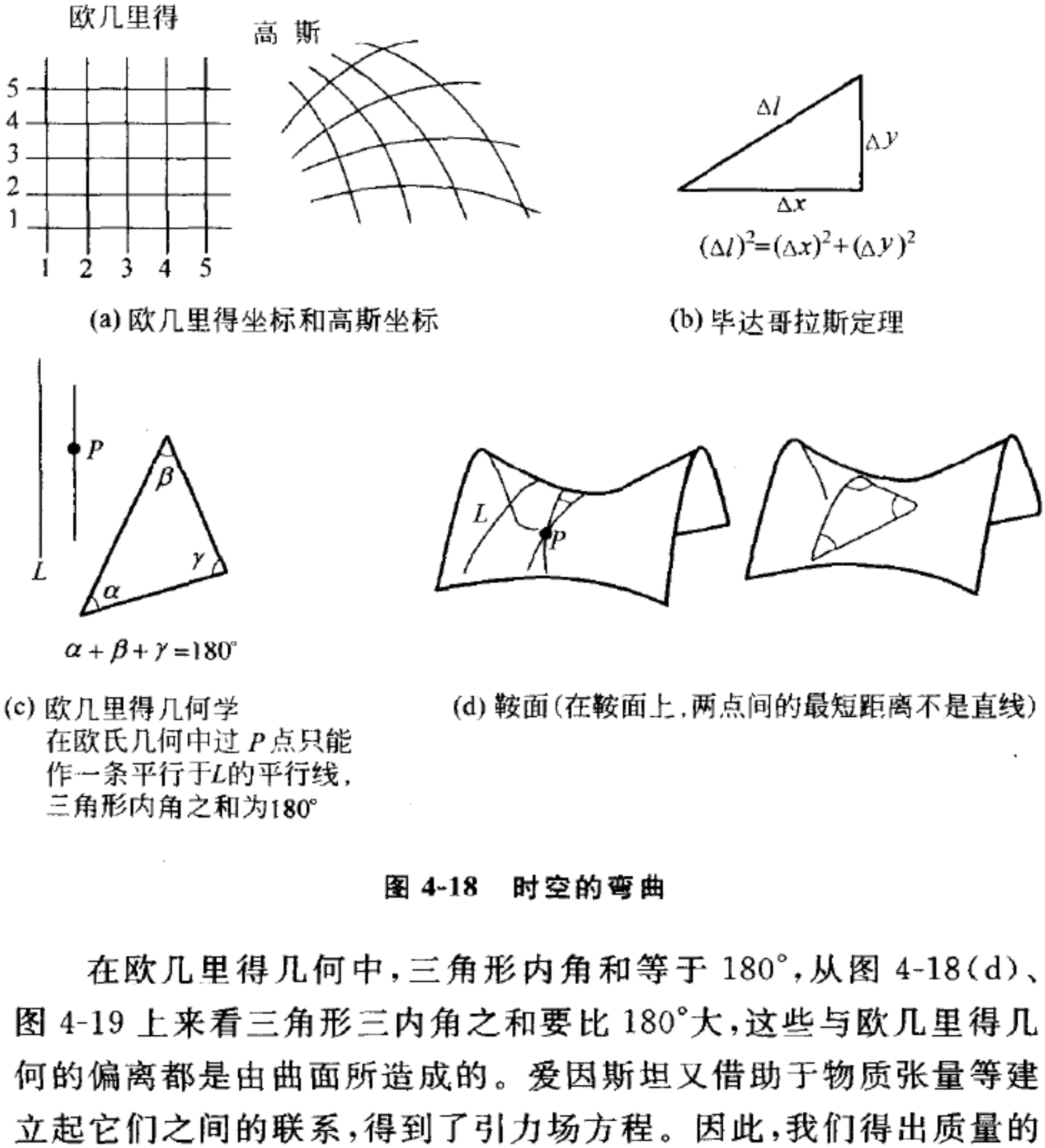
$$\frac{\Delta v}{v}=\frac{\Delta\varphi}{c^2}=\frac{GM_E}{c^2}\left(\frac{R-R_E}{RR_E}\right)=4.2\times10^{-10}$$

卫星上的原子钟比地面上的原子钟“快”4.2×10^{-10}倍。1976年,曾发射过带有频率为 1420MHz 的原子钟的人造卫星。卫星上的原子钟与地面上的一个同样的原子钟预先校准同步。当卫星远离地面 1 万 km 时,已观察到卫星上原子钟相对地球上原子钟频率变化 $\Delta v/v=4.5\times10^{-10}$,与理论计算符合得很好。

(2) 弯曲的时空

爱因斯坦又进一步对引力提出了革新的观点,他认为大质量物体(如太阳)将引起在其附近的时空几何学性质偏离欧几里得几何学,即我们所说的时空弯曲。在欧几里得几何学中两点间直线最短,在非欧几里得几何中并非如此,而从弯曲的四维时空所服从

的非欧几里得几何性质看来，光线的偏折以及其他物质运行所遵循的路径恰是沿非欧几何的“短程线”进行的。鞍面上的两点间最短距离不是直线(图 4-18)，球面上连接两点的最短距离是大圆的一部分(图 4-18)。



(a) 欧几里得坐标和高斯坐标

(b) 毕达哥拉斯定理

(c) 欧几里得几何学
在欧氏几何中过 P 点只能作一条平行于 L 的平行线，三角形内角之和为 180°

(d) 鞍面(在鞍面上，两点间的最短距离不是直线)

图 4-18　时空的弯曲

在欧几里得几何中，三角形内角和等于 180°，从图 4-18(d)、图 4-19 上来看三角形三内角之和要比 180°大，这些与欧几里得几何的偏离都是由曲面所造成的。爱因斯坦又借助于物质张量等建立起它们之间的联系，得到了引力场方程。因此，我们得出质量的存在及其运动，与时空性质有着不可分割的关系，统一的时间、空间，因质量的存在而变成了弯曲的结构。

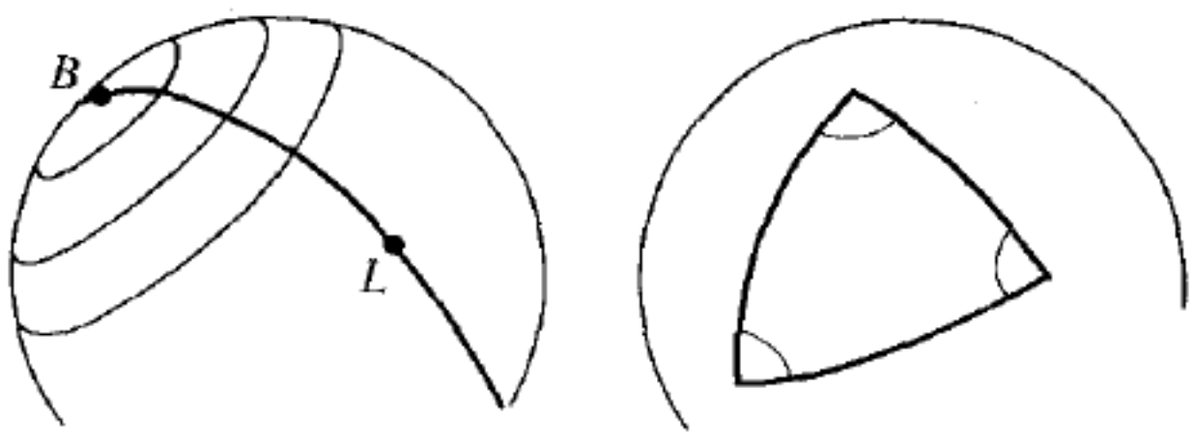


图 4-19　在球面上，连结两点的最短线是大圆的一部分

（3）膨胀的宇宙

根据爱因斯坦的引力场方程，不少人做了研究工作，爱因斯坦本人先提出了一个认为宇宙是均匀的，又是各向同性的假定。在此基础上，他根据广义相对论提出静态有限无边的宇宙模型，主张宇宙就其空间广延来说是一个闭合的连续区。这个连续区的体积是有限的，但它是一个弯曲的封闭体，因而是没有边界的。就好像一个球体的表面，虽然面积是有限的，但是沿着球面运动却总也达不到边。天体则均匀地分布在弯曲的封闭体中。爱因斯坦为了使静态有限无连接宇宙模型能符合动力学方程，特地修改了他自己的场方程，引进了一个具有斥力的因子，叫做宇宙项。他之所以决定引进宇宙项，完全是因为他相信，宇宙间的物质从大尺度来看必须是静态的。

然而，事实的发展恰好相反，1922 年苏联数学家弗里德曼求出了爱因斯坦场方程的解，这种解不是静态的，而是均匀膨胀或均匀收缩的。并且指出，爱因斯坦的解是不稳定的，小的扰动就会破坏它的静态性质，使它过渡到膨胀运动状态或者收缩状态。弗里德曼的解是否与真实的宇宙相一致，有待于从宇宙的观测上来回答。

美国天文学家哈勃(E. Hubble)在 20 世纪 20 年代分别对星系谱线的移动和星系到地球的距离进行测量，发现除极少数非常邻近的星系外，所有星系的谱线都向长波方向移动，即红移。如果

用多普勒效应解释红移现象，那么，就意味着这些星系都是向着远离我们的方向运动的。1929 年哈勃进一步发现，星系离开我们的退行速度与它们到我们的距离成正比，即

$$v = H_0 r$$

这就是著名的哈勃关系。哈勃关系在视星等跟红移的关系图上表现为直线(图 4-20)。因为所选择的这些星系具有相同的光度，所以它们的视星等与距离对数成比例。而另一方面，红移量又与退行速度成比例，所以视星等-红移图实际上也是一张距离-退行速度图，图中直线斜率就是上式中的比例常数 H_0，称为哈勃常数。它反映着宇宙的膨胀速度(图 4-21)，其数值大约为 2.1×10^4 $(m/s^{-1}/10^6 lg)$。哈勃定律的重要意义在于它向人们描绘出一幅宇宙膨胀的情景，从任何一个星系上看，其他星系都离开它而退行(图 4-22，图 4-23)，这类似于一个正在胀大的肥皂泡(二维曲面)，星系间的距离越远，相对的退行速度越大。

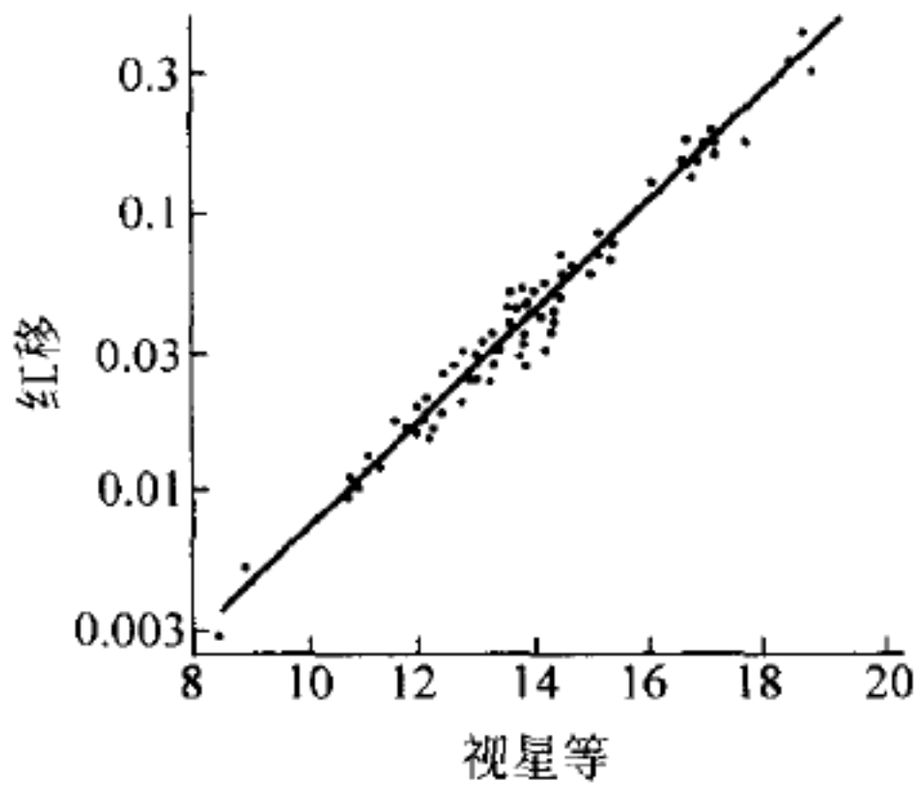


图 4-20　星系的视星等-红移

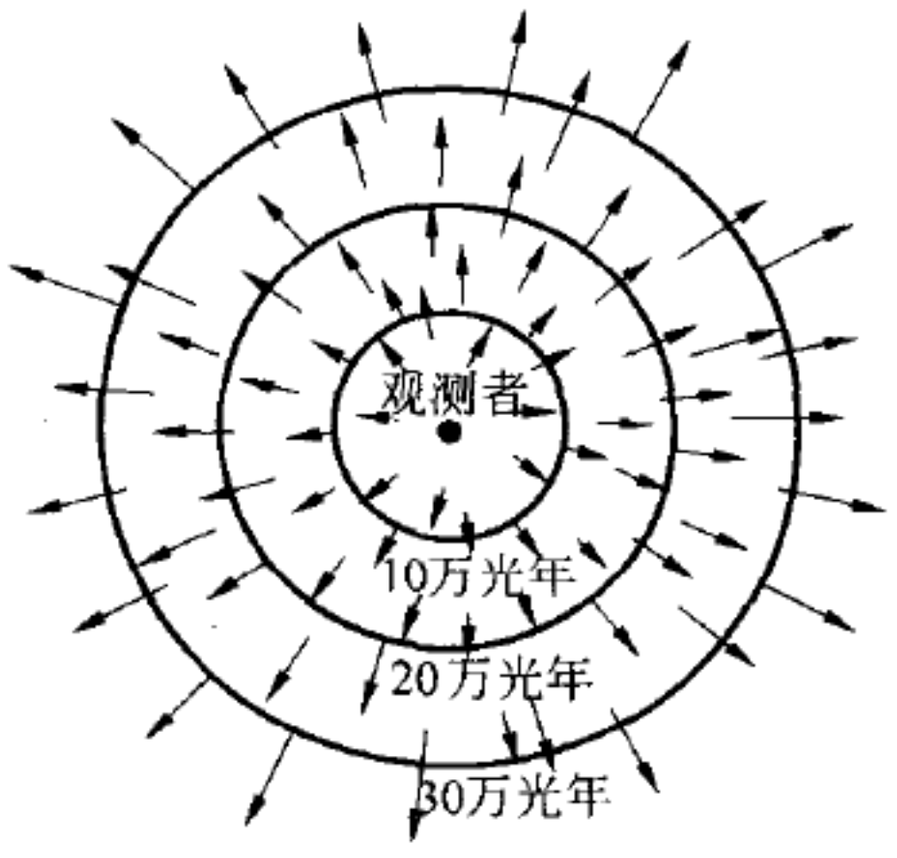


图 4-21　宇宙的膨胀

红移现象的观测结果出现之后，爱因斯坦发现自己错了，他曾经万分感慨地说过：引进宇宙项是他“一生中最大的错事”。因为

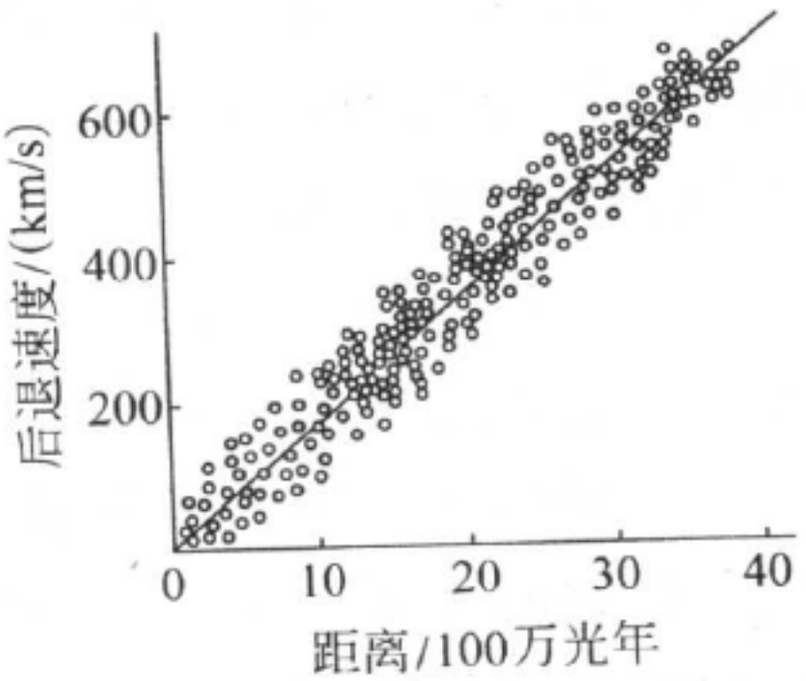


图 4-22　银河系退行速度与距观测者距离的关系

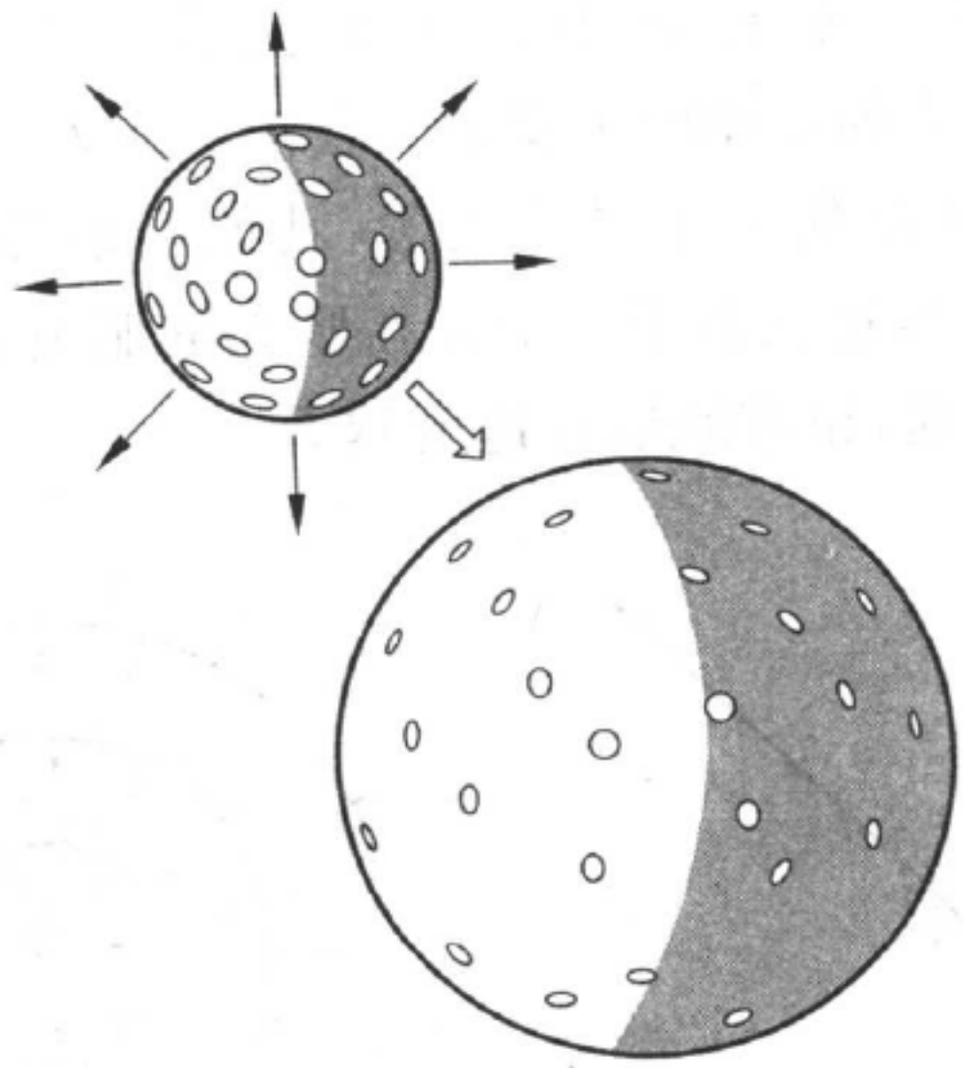


图 4-23　银河系本身也在高度分离扩张

爱因斯坦是以不轻信任何先验自明的概念著称的，竟没有注意到静态观也是个先验的东西。

由于认为宇宙是膨胀的，自然会使人们回溯宇宙的过去。如果宇宙中的物质总量一定，可以得出宇宙演变历史愈往前，宇宙中的物质愈密集，温度和压强也愈高的结论。这意味着在过去的某个时刻宇宙可能处于一个极高温度和极高密度的状态。1942 年

美籍俄国人伽莫夫(G. Gamow)提出，约在 140 亿年以前，宇宙由一原始火球发生爆炸而产生，并开始膨胀，宇宙的密度和温度随之降低，直到今天的状态，这种宇宙模型被称为大爆炸宇宙学。

按照这个模型，在大爆炸发生后的百分之几秒，宇宙温度下降到 10^{11}K，宇宙物质开始变成由我们熟悉的粒子——质子、中子、正负电子、正反中微子、光子等组成，它们之间相互作用很强，中子虽然不稳定，但质子与中子可能通过诸如 $\nu_e + p \leftrightarrows e^+ + n$，$\nu_e + n \leftrightarrows e^- + p$ 等反应相互转化。随着宇宙的膨胀，温度下降，中子转变为质子的反应率将超过质子转变为中子的反应率，于是中子的含量将减少。到爆炸后 3 分钟左右，温度下降到 10^9K，中子占核子数的 14%，而质子约占 86%，开始形成原子核。中子和质子将迅速结合成氘核又结合成氦核。当几乎全部中子都已与质子结合成氦核时，氦的质量约占总质量的 28%。今天探测到宇宙中氦的丰度为 25%～33%，与理论计算结果恰好一致，这是对大爆炸宇宙学的有力支持。

大爆炸后的温度变化如图 4-24、图 4-25 所示。在大爆炸发生后约 100 万年，宇宙的温度下降到 3000K。这时原子开始形成，光子与物质粒子的作用变得很弱，宇宙也变成了对电磁辐射是透明的。正是因为电磁辐射与实物的相互作用强度减弱，它的演化情况也将与物质分开来。此后宇宙在膨胀，温度继续降低，但这一电磁辐射却保持其黑体辐射谱。计算表明，从那时到现在，这一残留的辐射，温度由 3000K 降到 3K 左右。1965 年彭齐亚斯(A. Penzias)和威尔逊(R. Wilson)发现在 7.35cm 波长存在各向同性的微波辐射，其温度为 4K 左右。辐射的各向同性，表明它不可能来自某一天体。这一观测结果立刻使宇宙学意识到，它有可能是大爆炸的遗迹而称之为“宇宙背景辐射”。人们在不同微波范围内测量出它的强度分布，证明这一分布和黑体在温度为 2.9K 时发射的辐射的强度分布相同。观测结果和理论预言几乎完全一致，这是对大爆炸宇宙学又一非常有力的肯定。

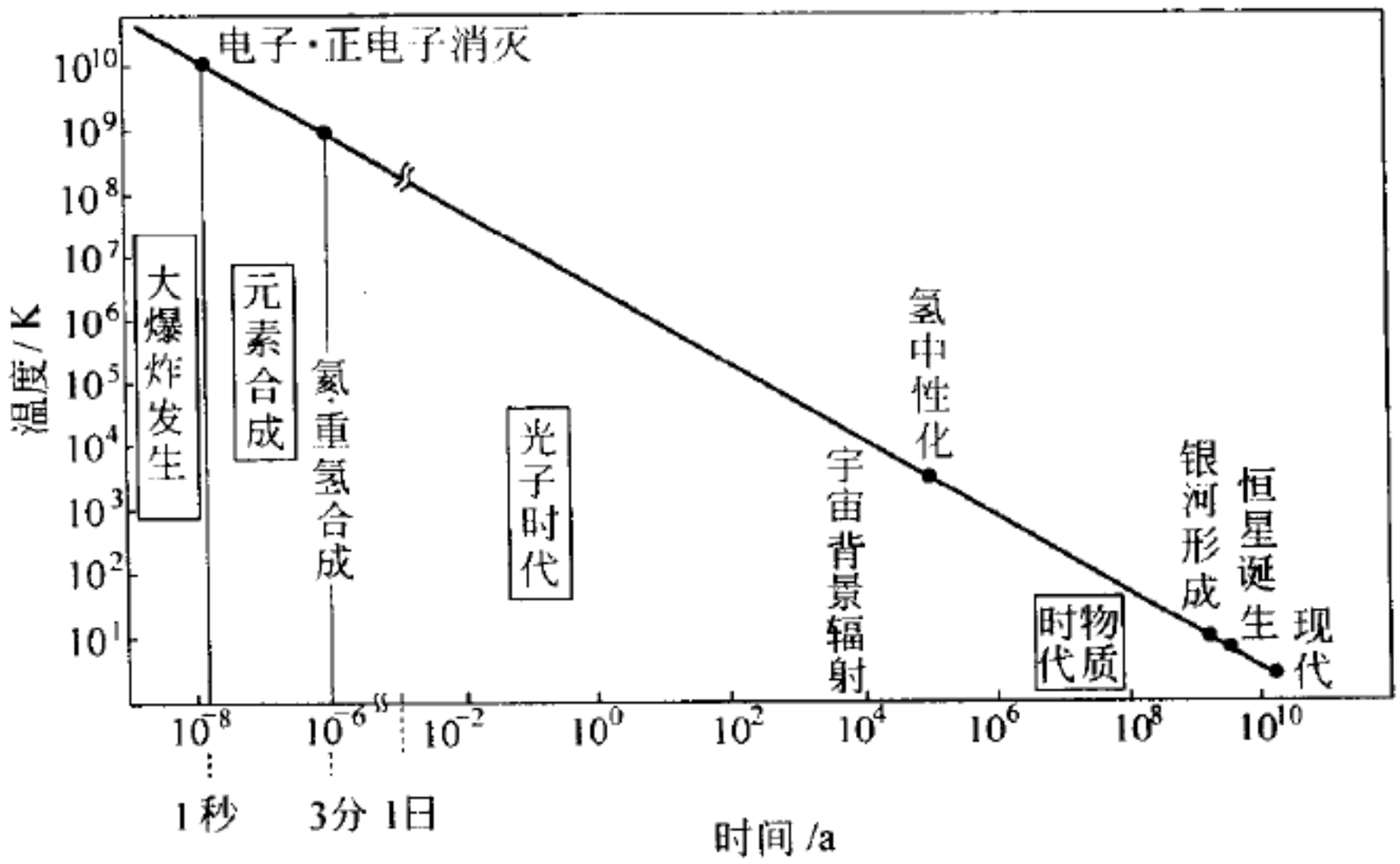


图 4-24　大爆炸后的温度变化图

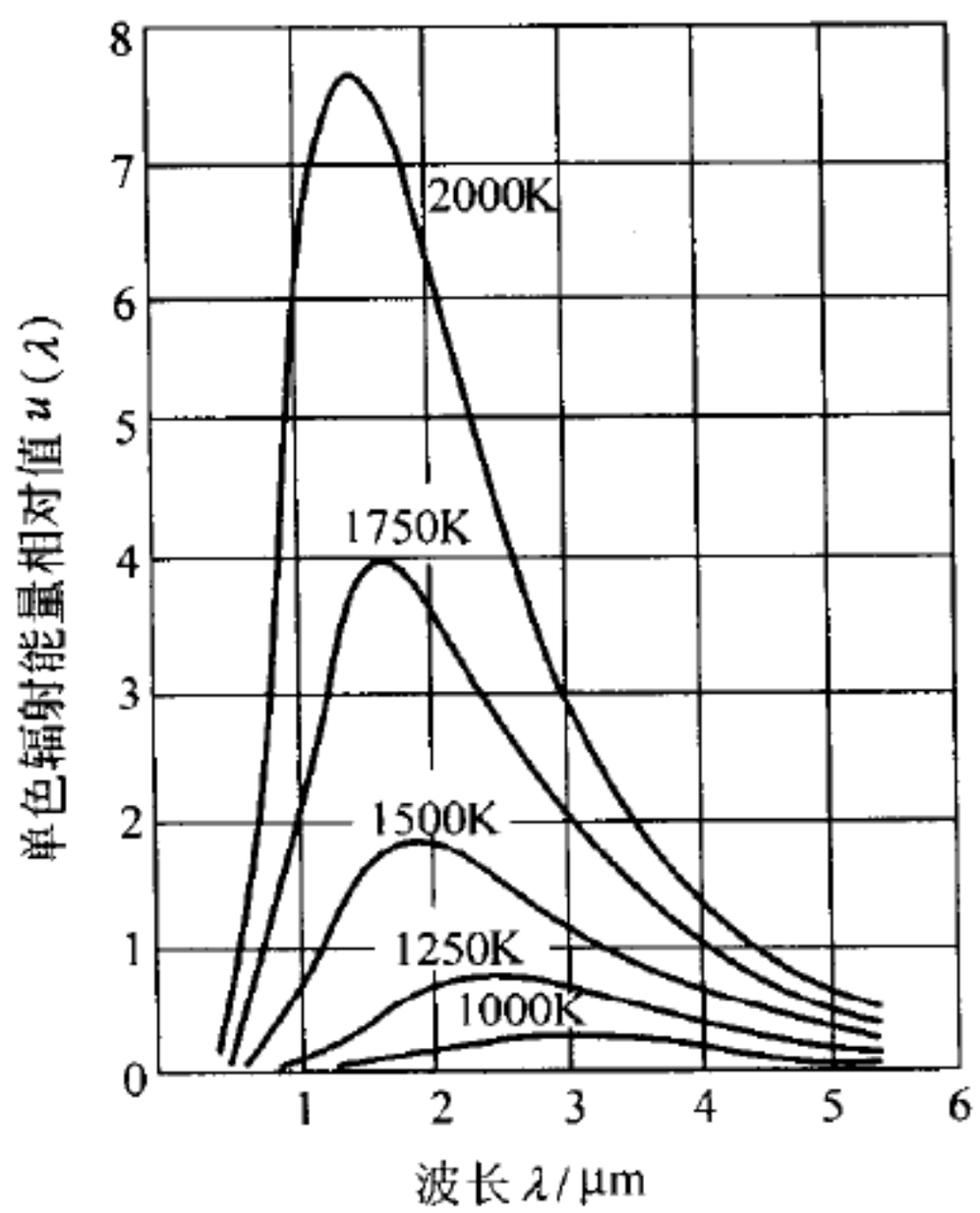


图 4-25　几种温度下的黑体辐射谱

大爆炸宇宙学最困难的问题是奇点问题，当我们继续上溯到爆炸时刻，宇宙理应为温度无限高、密度无限大的状态，而这正是当今物理学和数学所难以理解和无法处理的。

按照爱因斯坦方程的弗里德曼解，对于开放的宇宙可能是永远不停地膨胀下去，也可能是经历膨胀后又收缩。若对于封闭的宇宙，爱因斯坦方程则又预示，膨胀最终将会停止，然后宇宙收缩，最后在一次“大坍缩”中结束，宇宙的未来究竟如何？我们只能期待将来进一步的研究了。

4.3 量子论的产生和量子力学的发展

1. 量子论的产生

量子论的产生是从物理学界的一朵“乌云”（黑体辐射）所引出的。从日常的经验我们知道，一个物体（固体或液体）温度升高时，会向四周辐射热量，物体温度越高，热辐射越强烈。温度越高，光谱中最强的辐射频率越高，该物体颜色就由“红”到“白”到“蓝”。当这种辐射照到另外一个物体上去时，有的物体能吸收这些辐射的能量，有的物体则很少吸收，而将这些辐射反射出去。实验证明，吸收辐射本领大的物质同时也是辐射本领大的物质。一种“理想”的黑体将能够 100％地吸收投射到它上面的能量，而在同样温度下，它所发生的热辐射也比任何其他物体强。若在一个密闭空腔表面开一个小孔，空腔内壁非常粗糙，任何一种辐射都有进无出，100％被吸收，这个小孔就成了一个“黑体”了。19 世纪末叶，有人对“黑体”辐射的单色辐出度 $u(\lambda)$-λ 的曲线（图 4-25）进行研究，该曲线有如下特征：

（1）对一定温度 T，曲线形状是确定的。

（2）$\int_0^{\infty} u(\lambda)\mathrm{d}\lambda = aT^4$

式中：$u(\lambda)$为单色辐出度，a 为常量，且 $a=\frac{4\sigma}{c}$，c 为光速，σ 为斯特藩-玻耳兹曼常量。

(3) 一定温度为 T 的 $u(\lambda)$最高点对应的波长为峰值波长 λ_m，则有 $\lambda_m T=$常量$=0.2898(\mathrm{cm}\cdot\mathrm{K})$。

对此，维恩作了解释，他根据热力学，结合实验凑出了一个公式：

$$u(\nu)=B\nu^3 \mathrm{e}^{-A\nu/T}$$

它在 λ 小的区域几乎与实验完全符合，只是在长波区稍低于实验点。

1900—1905 年，瑞利、金斯两人假定腔内电磁波形成驻波，他们利用经典统计物理来计算，推导出了另一公式

$$u(\nu)=\frac{8\pi\nu^2}{c^3}kT$$

它在低频(长波)方面与实验符合尚好，但在高频则相差很大。上式中 k 为比例常数。

瑞利-金斯公式推导思想明确，其立论、推导均无错误，都是根据经典物理学一步一步推得的，现在它与实验不符合，一定是经典物理的基本原理有问题了，由于问题出在短波段，所以也有称之为“紫外灾难”的。

有一位德国人把注意力集中到这方面来了，他就是 M. 普朗克。

德国物理学家普朗克(Max Planck，1858—1947)(图 4-26)生于德国的基尔城，他的父亲是法学教授。1874 年 10 月，他进入慕尼黑大学，最初决定主攻数学，但很快又被物理学所吸引。他的老师约利(P. Jolly)曾极力劝说他不要研究物理。约利告诉普朗克：“在这一学术领域里，已经没有本质上新的东西有待发现了。”但是普朗克还是坚持抛弃纯数学，因为他对宇宙本质问题有浓厚的兴

趣。他在《科学自传》中谈到了他从青年时期起就爱好它的原因。他说:“引导我从事科学研究和从青年时期起就爱好它的原因,是一个不讲自明的事实,这就是我们的思维规律和我们从外界接受到的自然过程的规律是符合一致的,因而使人们有可能通过纯粹思维对这种规律作出解释。对此具有重要意义的是,外部世界是我们所面对的、独立于我们而存在的绝对所在,而探索这种绝对存在所适用的规律,我认为就是最崇高的科学研究任务。”这些话表明了一个科学家朴素的唯物主义思想,他坚信外部世界是独立于我们而客观存在,他坚信真理的客观性,他认为探索这种绝对存在所适用的规律是科学研究的崇高任务。



图 4-26　普朗克

普朗克早期的物理思想受到克劳修斯的深刻影响。当他在慕尼黑大学学习物理和数学时,就以极大的热情自学了克劳修斯的名著《热力学》。他在《科学自传》中,在谈了课堂教学的不足之处后紧接着说:“在这种情况下,我只能通过自学我所感兴趣的书刊来满足我的求知欲望,这时我所学习的自然都和能量定律有关。我在偶然中得到了克劳修斯的一本著作,它的明白易懂的语言和深入浅出的叙述给我留下了非常深刻的印象,我钻研它们的兴趣越来越高。”克劳修斯的一些主要热力学观念,如不可逆性、熵增加原理等给普朗克留下了极其深刻的印象。他把克劳修斯称为的“不可逆过程”命名为“自然过程”。他认为熵增加原理具有热力学第二定律的意义。他在 1879 年完成的博士论文中,对热力学第二定律作了详细的论述,但这篇论文并没有引起人们的兴趣。

但是,受到这种淡漠的对待并没有阻止普朗克对熵的研究。他在《科学自传》中说:“由于深刻体会到这个问题的重大意义,这

些遭遇并没有阻止我继续对熵进行研究，因为我把熵看作是能量一样，也是物理过程最重要的特性。”1880 年 6 月，普朗克写了《不同温度条件下物体的平衡熵》一文，获得慕尼黑大学授予的特别奖状。所以，我们可以看到在普朗克的热力学思想中，熵增加原理和非平衡态向平衡态发展的不可逆性，始终占有最根本的地位。普朗克把熵增加原理看成和能量原理一样是物理学中一条不可缺少的独立定律。这个在他青年时期形成的中心思想，一直主导着他的科学工作，当然也就决定性地影响了他处理黑体辐射问题的方式。

从 1894 年起，普朗克把注意力转向黑体辐射问题。他在 1900 年首先改进维恩公式，凑合实验数据，得到了如下的公式：

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

式中引入了一个常数 h，以后就称为普朗克常数，

$$h=6.625\times10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}$$

这样一来，普朗克公式与实验就符合得非常好（图 4-27）。在

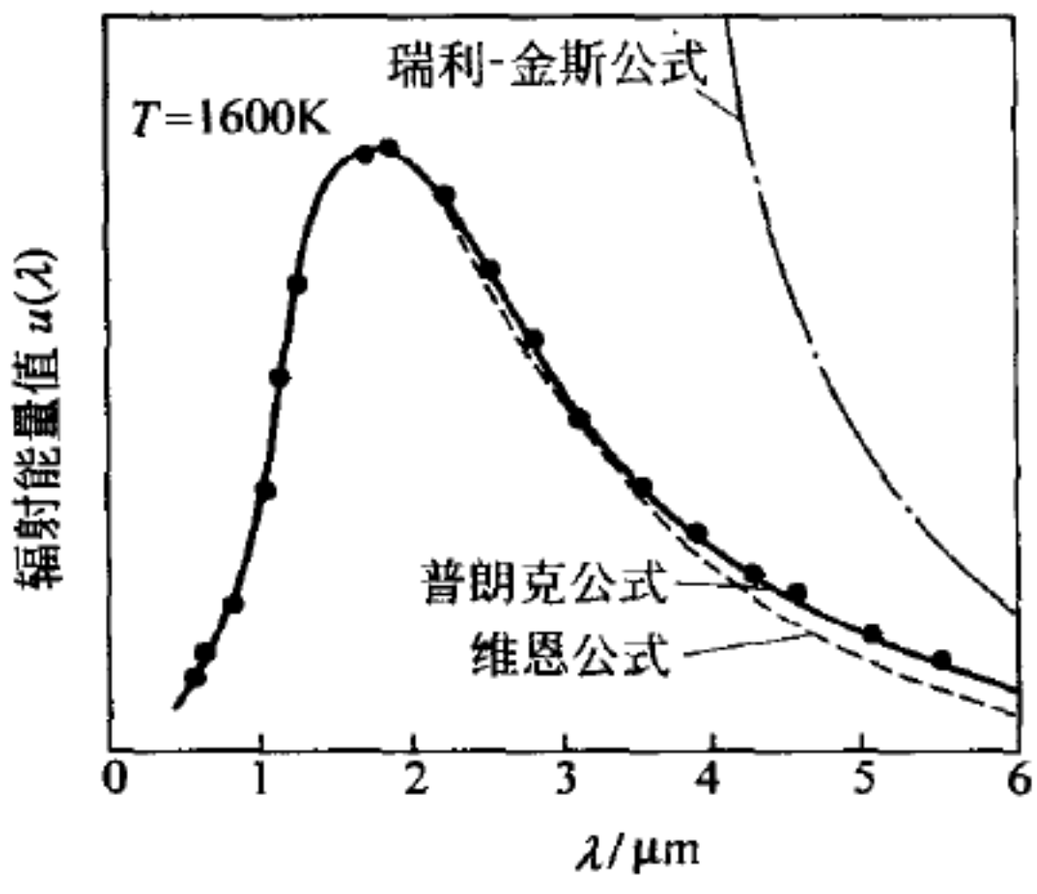


图 4-27　1600K 的热辐射谱

高频区，$h\nu \gg kT$，分母中的 1 可以略去，普朗克公式就近似地化为维恩公式；而在低频区，$h\nu \ll kT$，$e^{h\nu/kT} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT}$，则它又近似地化为瑞利-金斯公式。令人高兴的是，过去维恩和瑞利-金斯两个公式分别只顾了一头，现在普朗克公式则全面兼顾到了。

普朗克注意到在过去的理论中，器壁上的分子、原子被看作为吸收电磁波的“振子”，在能量上可以连续变化，就是说，电磁波和振子间的能量交换可以无限制地减少或增大，这一假定直接导致瑞利-金斯公式的得出，而这是不正确的。普朗克坚信，解决黑体辐射问题的关键在于弄清楚这些振子吸放电磁辐射的规律，于是他决定放弃经典的能量均分原理，勇敢地假定振子的能量不可以连续变化，当它吸放频率为 ν 的电磁波时，它只能处于一些等间隔能量状态中的一个，其能量为

$$E_n = nh\nu, \quad n = 1,2,\cdots$$

式中，n 称为量子数，它只能取正整数。把每一个可能的能量状态称为量子态，这种不连续的“量子”化的能量状态常以图 4-28 来表示，假定位置固定的（定域的）振子状态按能量的分布几率仍服从经典的玻耳兹曼统计分布公式，这样，可算出振子的平均能量为

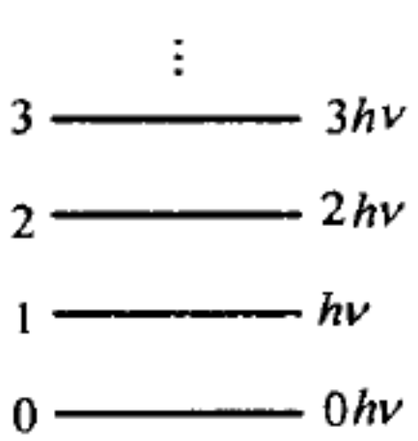


图 4-28　振子能量量子化

$$\bar{E} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

同时再假定空腔内频率为 ν 的电磁辐射与器壁上同频率的振子交换能量，从而达到平衡状态，于是立即可推得普朗克公式。如果 n 不限于正整数而可以连续变化，或者 $E = nh\nu$ 中的普朗克常数 h 趋向于 0，从而 E_n 的数值可以连续变化，即图 4-28 的能级无限密集，那么因 $h\nu \ll kT$，近似有

$$\bar{E}\approx\left(\frac{h\nu}{1+\frac{h\nu}{kT}-1}\right)=kT$$

这就回到瑞利-金斯公式。由此可见，瑞利-金斯公式在短波（高频）区的失败，显然是由于没有考虑到振子能量量子化的缘故。就这样，在1900年诞生量子物理学，它宣告过去经典物理学那种无限连续的观念破产了。微观世界中原来存在着不连续性，普朗克常数 h 就是这种不连续性的表征，$h\nu$ 则是频率为 ν 的振子能量的最小单位。对于这种能量子的概念在4.4节有关经典与近代观念的碰撞中还将深入讨论。

在普朗克理论中，只考虑了空腔内壁上“振子”能量的量子化，但对空腔内电磁的处理，还是用了麦克斯韦理论，就是说电磁场在本质上还是连续的，只是当它们与器壁振子发生能量交换时，电磁能量才显示出不连续性。这种观点还是不彻底的。1905年爱因斯坦进一步假定，电磁场能量本身也是量子化的，即辐射能本身也是量子化的，对于频率 ν 的场能量单位正是 $h\nu$，这样一份一份的电磁辐射，后来被叫做“光子”。

爱因斯坦最初引入光子概念是用来解释光电效应的。1887年赫兹首先发现了光电效应，1902年勒纳详细研究了光电效应的规律，研究装置如图4-29所示。图中S为一抽成真空的玻璃容器，其中装有阳极A和阴极K，阴极为金属平板，为了使光线（紫外线）能够穿过S直射至K上，S的端面开一窗口（为了不使紫外线被吸收常用石英窗口），然后将该系统串接于有灵敏电流计G的回路中，并接一伏特

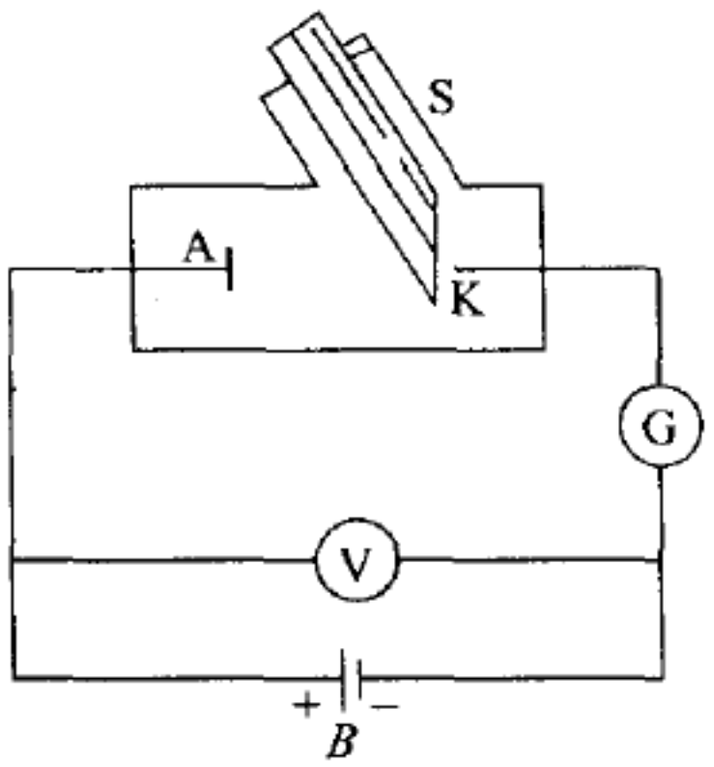


图 4-29　真空中光电效应实验

计以测定电压，当光线（紫外线）照射到 K 上后，K 上释放出电子，由此研究光电效应的基本规律。

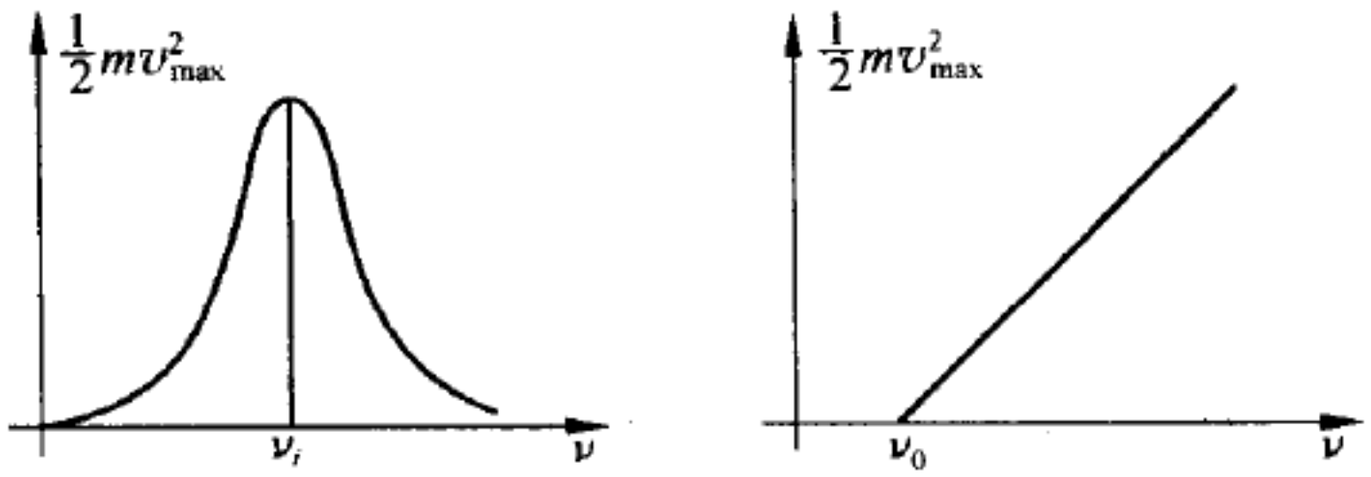
测量中发现以下几点，难以用光的波动理论来解释：

（1）对给定的光电阴极材料，若用不同频率的光照射时，并非所有的光都能使 K 上释放出电子，存在一个频率的阈值 ν_0，称之为“红限”。只有超过“红限” ν_0 的光，才能引起光电效应，它与光强大小无关，这与波的波动说是矛盾的。按光的波动说，只要光强足够大，任何频率的光都可以产生光电效应，不应存在“红限”。

（2）实验发现从光阴极 K 发出的光电子的最大初始动能与入射频率成线性关系，即

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = a\nu + b$$

它与入射光强无关。要按光的波动理论，光电子的最大初始动能对应于某光波中的某一频率 ν_i，此时它能使光电子共振；若大于或小于 ν_i，光电子初始动能都会减少，如图 4-30 所示。



(a) 按波动论的结果　　(b) 实验测得的结果

图 4-30　光电效应中光电子动能与光频率的关系

（3）按光的波动理论，物质中原子从入射光中吸收能量后，必须使能量积累到一定数量（即让光照射一段时间后）才能释放出电子，尤其在入射光弱时更应如此。但实验结果表明，只要入射光的频率大于“红限”，不论它有多弱，光电子总是立即发射出来（10^{-9} s 左右即可发射出来，可以认为是瞬时发生的），这又是波动理论不能解释的问题。

1905 年，爱因斯坦把 1900 年普朗克提出的能量子的概念加以推广，用来处理光与物质的相互作用的问题。他假设光在空间传播时，一束光是一群以光速 c 运动的粒子流，这些粒子称为光量子，现称光子，每一个光子的能量 $E=h\nu$（h 为普朗克常数，ν 为光的频率），不同频率的光子其能量不同，当其照射到金属阴极 K 上时，光电子从照射光子的能量 $h\nu$ 中接受能量，其中一部分是消耗在足以使自己脱离金属表面所需的逸出功 A，剩余的能量则转化为电子的动能 $\frac{1}{2}mv^2$，因此有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

这就是有名的爱因斯坦光电效应方程。用此方程可解释“红限”存在、光电效应时间极短以及光电子动能与频率的线性关系。

爱因斯坦光电效应方程不仅圆满解释了光电效应实验的问题，而且是人们第一次认识到光（电磁波）具有“波”、“粒”二象特性，这是具有历史意义的。接着再来讨论康普顿效应，康普顿效应是用一束波长为 λ 的 X 射线，投射到一块石墨上，经散射后 X 射线中除了与原波长相同的 X 射线外，还存在波长大于原波长的射线。用光的波动理论不能解释康普顿效应，因为光波作用于石墨，使石墨中电子等带电粒子形成受迫振荡，则其波长不应变化；若认为“X 光子”与原子中电子相互作用，则可解释散射的 X 射线中既有波长不变的又有波长变长的射线出现。当 X 光子作用于自由的或束缚微弱的电子，由于 X 光子把一部分能量给了电子，则其因能量下降而频率下降，因而波长较原来的长；当 X 光子作用于束缚很紧的光子，甚至是和整个原子作用时，按碰撞理论，它不会失去能量因而波长不会变化。而且康普顿实验得出的规律又进一步证实了光子和物质作用中，起作用的不仅是它的能量，而且还有它的动量，这又进一步肯定了光的量子说理论。

2. 原子光谱的规律

关于原子结构的认识，很重要的一个方面是从分析与研究原

子光谱的实验资料、经验公式而开始的，但光谱学的研究和发展却是早在原子理论建立之前就开始了。由于氢原子是所有原子中最简单的原子，氢原子光谱也是原子光谱中最简单的一个。

早在19世纪80年代，人们从某些星体的光谱中观察到的氢光谱线已达14条。1884年，瑞士的一名中学教师巴耳末（J. J. Balmer，1825—1898）研究了瑞典物理学家埃斯特朗（A. J. Angström，1814—1874）从气体放电管中获得氢原子的4条明亮的光谱线，这些谱线分别称为 H_α、H_β、H_γ、H_δ，它们的波长如下：

H_α　　$\lambda=656.210\text{nm}$　（红色）

H_β　　$\lambda=486.074\text{nm}$　（绿色）

H_γ　　$\lambda=434.010\text{nm}$　（蓝色）

H_δ　　$\lambda=410.12\text{nm}$　（紫色）

巴耳末发现的这4条光谱线的波长可以用一个简单的数学公式表示出来，即

$$\lambda=B\frac{n^2}{n^2-4},\quad n=3,\ 4,\ 5,\cdots$$

式中，$B=364.56\text{nm}$。由该式计算所得的波长数值在实验误差范围内与测得的数值是一致的。后人称这个公式为巴耳末公式，而将它所表达的一组谱线称为巴耳末系（图4-31）。它构成一个很有规律的系统，谱线的间隔和强度都向着短波方向递减。

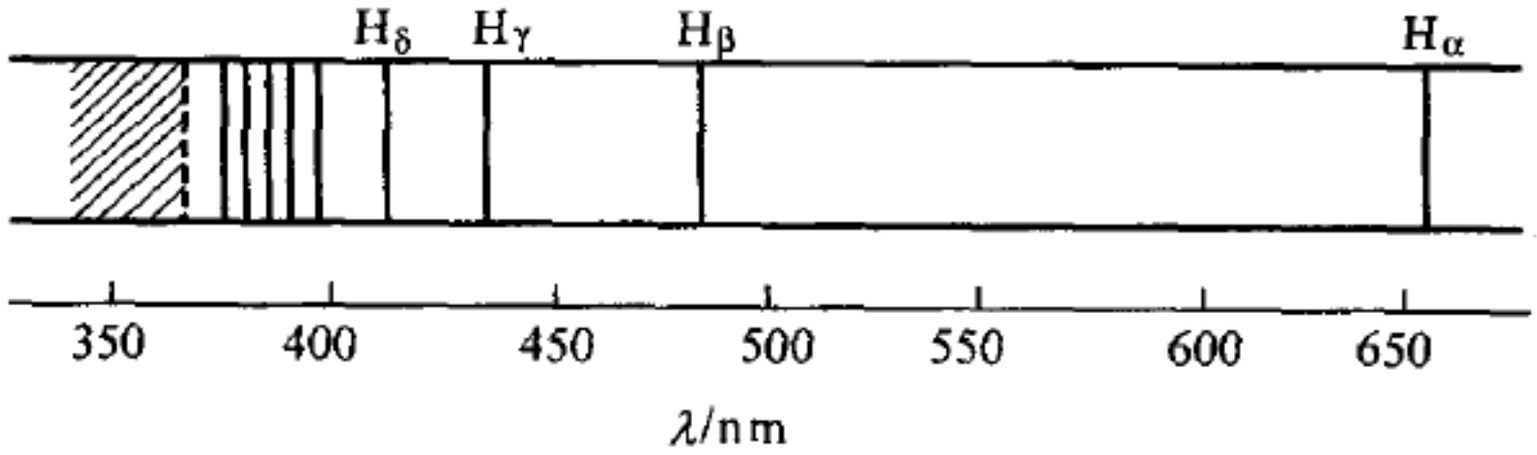


图4-31　氢原子光谱的巴耳末系和系限外边的连续谱

后来人们又把上述公式改写为

$$\frac{1}{\lambda}=\frac{10^8}{3645.6}\cdot\frac{n^2-4}{n^2}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

式中 $R=1.0972\times10^{-2}\mathrm{nm}^{-1}$ 叫做里德堡常量，它是由瑞典物理学家里德堡(J. Rydberg，1854—1919)将巴耳末公式改变后推得。

3. 玻尔的氢原子模型

尼耳斯·玻尔(Nidls Bohr，1885—1962)是丹麦杰出的物理学家。

1903 年秋季，玻尔进入哥本哈根大学的“数学和自然科学系”，主修物理学。1909—1911 年玻尔做硕士和博士论文的题目是“金属电子论”，在这过程中接触到量子论。1911 年秋季，玻尔赴英国剑桥大学学习和工作。1911 年 10 月间，卢瑟福到剑桥来参加卡文迪许实验室年度聚餐会，他在集会上发表了长篇演讲，论述了自己的新发现。玻尔后来回忆说，他对“卢瑟福性格和魄力留下了深刻的印象”。玻尔有转到曼彻斯特工作去的愿望，在他拜访卢瑟福时，卢瑟福向他介绍了他刚参加第一次索尔维物理会议的情况(这次会议的议题是辐射和量子理论)，也提到普朗克和爱因斯坦的看法以及自己对物理学发展前景的看法。这次谈话对玻尔以后的科学生涯产生了十分重要的影响，使他了解到量子论进一步发展的情况，萌发了他将普朗克的能量子和爱因斯坦的光子概念及原子核式模型结合起来的思想。

1912 年 3 月至 7 月，玻尔在曼彻斯特大学卢瑟福的实验室工作，这在他的终身事业中是一个最有决定意义的转折。玻尔到来时，卢瑟福等人已经确证了原子核的存在，追求原子核将引起的各方面的后果，成为整个曼彻斯特科学集体的兴趣中心。

玻尔热心地接受了卢瑟福的原子核式模型(图 4-32)，而且很快就认识到它的深远意义。他指出元素的化学、物理性质由原子



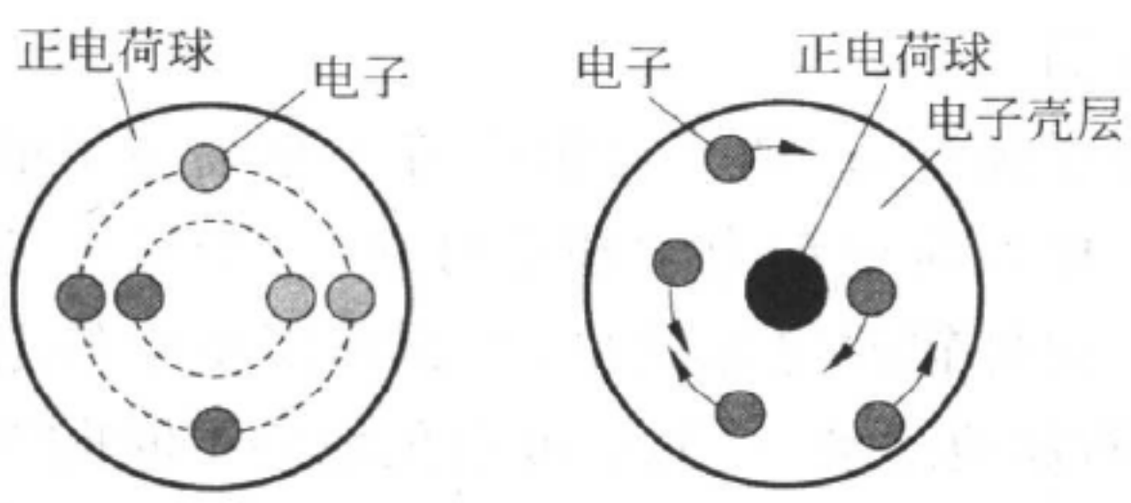
J.J.汤姆逊
英国物理学家



E.卢瑟福
英国物理学家



N.玻尔



汤姆逊模型　　卢瑟福模型　　玻尔氢原子

图 4-32　现代物体构造观(原子构造模型)

的核外电子所决定。原子所含的电子数目决定原子在周期表中的位置。也就是说,在决定原子的化学性质上,原子序数比原子量更本质。当玻尔听说周期表在原子量顺序方面显示了一两处反常,已经鉴定下来的稳定元素和衰变元素的数目超过了门捷列夫周期表中可以利用的位置时,他一下子就想到这些化学上无法分离的物质具有相同的核电荷,其不同只在核的质量和内在的结构。玻尔证明了如果人们承认电荷相同而质量不同的原子核的存在,从而有不止一个原子品种占据周期表的同一位置,则所有这些反常性都可以消除。1913 年,索第把这种具有不同质量而在化学上不可区分的原子命名为“同位素”。

玻尔还指出元素的放射性质直接与原子核有关,由放射性元

素放出的α粒子及电子是来自原子核。早在1902年卢瑟福就提出了放射性元素的嬗变理论。他指出放射性物质是不稳定的，它不断放射出某种射线进行衰变，即由母元素变为子元素直至变成稳定元素为止。玻尔按照原子核模型认为，放射性衰变必须被设想为原子核的嬗变。于是玻尔论证说，通过α射线的发射，原子核就失去两个单位电荷而变成周期表上退后两位处的那一元素的同位素。另一方面，在β衰变中，一个负电子的发射导致一个单元电荷的获得，从而嬗变后的元素就占据了周期表上前一位的位置。尽管看起来很简单，导致这些放射元素的"位移定律"的那种猜想在当时却不是显而易见的。

玻尔接受卢瑟福原子模型，但他又对困惑着卢瑟福模型的问题进行了深入的工作。按经典电动力学理论可知，一个做加速运动的带电粒子要不断地向外辐射电磁能量，卢瑟福模型中的电子绕核运动时，电子是在做加速运动，因而不可避免地要不断向外辐射能量，随着能量的减少，电子的运动半径就要减少，经很短时间(约10^{-12}s)就会落到原子核内去了，所以，卢瑟福原子是不稳定的，而且，在此过程中，辐射出的能量是连续的，则形成的光谱也应是连续的，这两点与实验测得的事实相矛盾。

为此，玻尔以原子稳定性与原子光谱实验规律为基础提出了三点基本假设：

(1) 氢原子中的一个电子绕原子核做圆轨道运动。

(2) 同经典理论相反，电子只能处于一些分立的轨道上，它在这些轨道上运动不会辐射电磁波，每一允许的轨道对应于一个确定的能量值E_n，即在氢原子中存在着一些具有确定能量的稳定态。

(3) 当电子从一个允许轨道跳跃到另一个允许轨道时，便会发射(或吸收)一份电磁辐射，即发射(或吸收)光子，其光子的能量为$h\nu$，由两轨道的能量差($E_n - E_{n'}$)决定：

$$h\nu = E_n - E_{n'}$$

$E_n - E_{n'} > 0$ 为发射光子；$E_n - E_{n'} < 0$ 为吸收光子。

根据玻尔理论，氢原子光谱的产生可解释如下：由 $E_n = \frac{Rch}{n^2}$ 可知，n 愈大，原子系统的能量的绝对值愈小。但代数值愈大，亦即电子离核愈远，原子能量愈大。电子在第一轨道亦即最内层轨道（$n=1$）时，能量最小，原子最为稳定，这种状态称为基态；量子数 n 大于 1 的各个稳定状态，其能量均大于基态，称为受激状态。当原子由正常状态跃迁到受激状态时，原子必须吸收一定的能量。处于受激状态的原子能够自发地跃迁到能量较低的受激状态或基态，在跃迁过程中，将发射一个一定频率的光子，其频率大小由 $\nu = \frac{1}{h}(E_2 - E_1)$ 式决定。

根据改写后的巴耳末公式 $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$ 和 $\lambda = c/\nu$，可得

$$h\nu = Rhc\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

若令 $-Rhc\,\frac{1}{n^2} = E_n$，则

$$h\nu = E_n - E_2$$

此式暗示人们，可以猜想氢原子中的电子处于一些分立的能级上，每一能级同一个“量子数 n”联系着，n 取正整数。当氢原子中电子在分立的能级上跃迁时，则会发生一定频率的光子而形成光谱。这个猜想的证明是个难题，阐明了它就能把物质结构阐述清楚了，氢原子光谱也就得到了合理的解释。图 4-33 是氢原子的电子轨道示意图。图中画出的那些轨道是允许的轨道。当氢原子中的电子从不同的较外层的稳定轨道，跃迁到较内层轨道时，便发射出相应的谱线系。应当注意，在某一瞬时，一个氢原子只能发射出一条谱线，不同受激状态的氢原子才能发射不同的谱线。在实

验中实际观察到的是处于各种轨道上的大量受激原子所发射的光，所以我们能够同时观察到全部谱线。

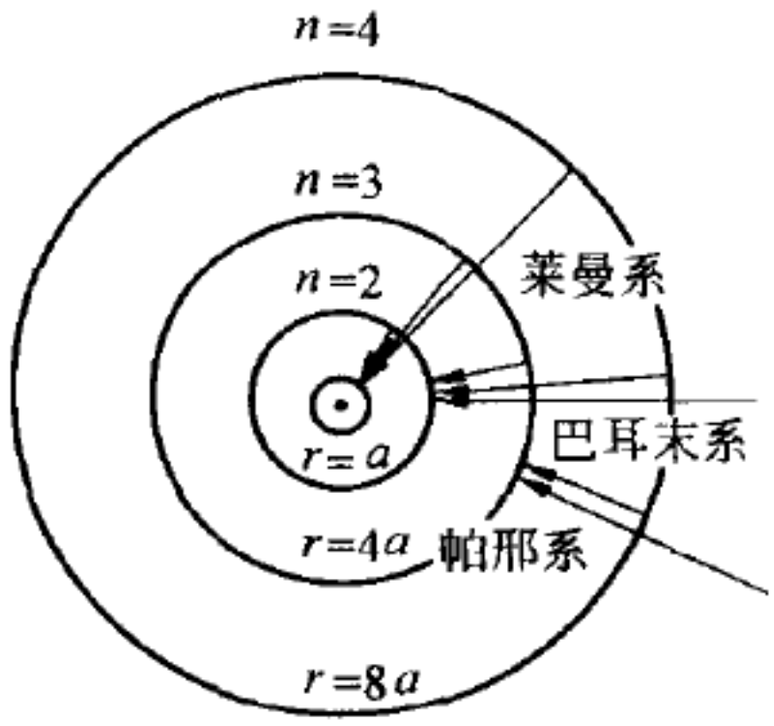


图 4-33　氢原子的电子轨道及光谱线

氢原子谱线的产生也可用能级图来表示。与轨道对应的能量只能有分立的数值，常称为能级。图 4-34 是按能量大小的比例画出的能级图，并标出了基态、激发态等的位置。

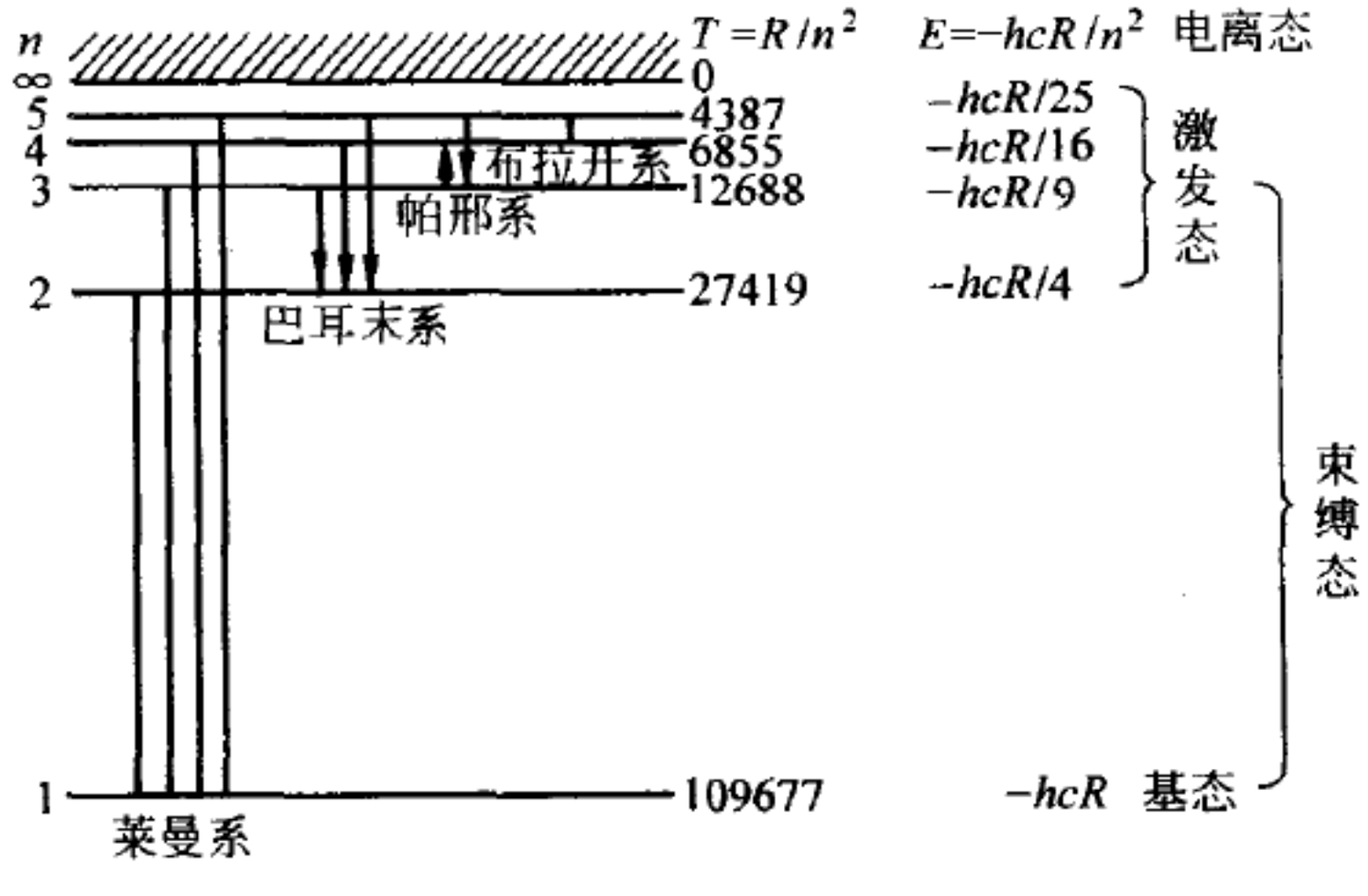


图 4-34　氢原子能级

玻尔假设电子在原子核的库仑场中绕核做圆周运动时，电子绕核运动的角动量是一个常数，由此而确定圆周轨道半径。但是经过后来其他科学家的努力形成了一套比较完整的原子结构的量子图像，即：电子绕核运动共有四个自由度，其中三个自由度确定了电子绕核的三维空间运动轨道，第四个自由度决定了电子自身的运动，我们用表 4-1 作详细说明。

表 4-1　量子状态

表征量子状态的力学量	表示式	量子数及其取值	对原子结构图像的影响
能量	$E=E_n$	主量子数 n $n=1,2,3,\cdots$	n 决定电子绕核运动半径大小
角动量	$l^2=l(l+1)\hbar^2$	轨道量子数 l $l=0,1,2,\cdots,n-1$	l 决定电子绕核运动轨道的形状，（如圆轨道、椭圆轨道、更扁的椭圆轨道等）
角动量 z 方向分量	$l_z=m\hbar$	方向量子数 m $m=0,\pm1,\cdots,\pm l$	m 决定电子绕核运动轨道平面的取向
自旋角动量	$S_z=m_s\hbar$	自旋量子数 m_s $m_s=\frac{1}{2},-\frac{1}{2}$	m_s 决定电子自旋方向是向上或向下

表 4-1 中 $\hbar=\frac{h}{2\pi}$。由于这些表征电子运动力学量的量子化，经典理论中的连续变化受到了上述量子条件的限制，使电子从无限多种状态中只能选取其中的某些状态——量子状态，每一个量子状态都由 4 个量子数 n,l,m,m_s 来表示。

4. 量子力学的发展

以玻尔理论为基础的量子理论，尽管取得了不少令人惊奇的

结果，但也存在着严重的缺陷和不足。由于这一理论是经典理论加上量子条件的混合物，因而不可避免地存在着难以解决的内在矛盾。首先，它一方面把微观粒子看作经典力学中的质点，采用坐标、轨道等概念，并应用牛顿定律来计算电子轨道，而另一方面又以量子条件限定了微观粒子稳定运动状态的轨道，在定态的绕核运动中的电子，它不发射电磁波，而在定态之间的跃迁又是一个不连续的过程，这些量子化特征与经典力学结论相悖。应用玻尔理论描述氦原子的原子结构就已经在数学上产生了不少困难，更谈不上其他复杂的原子了。因此，物理学发展面对的现实，要求有一个新的物理思想体系诞生。

纵观科学历史，大凡新的体系必定是在与旧体系相“抗争”中诞生。这里让我们回顾一下历史上有关光的波动性与粒子性之相关问题。

(1) 波动与粒子

自然现象中存在着各式各样的波，从大家所熟知的水波、声波、光波，到宏观世界里的引力波、微观世界里的自旋波，以及与粒子运动相缔结的德布罗意波。

这些波动大致可以归纳为三类：粒子振动状态、自旋状态的传播；场(电磁场、引力场)振动状态的传播；粒子出现几率的传播。前两类都属于物质运动状态的传播，并伴随有能量的传递，后一类则仅仅是几率分布状态的传播。以上三类的依次排列，大体上也就是人类认识这些波动的先后顺序。当然，自旋波是例外，它是很晚才发现的。

对这种波动的认识，明显地是从可直接感知的对象开始的，如最直观的水波，可听的声波，可见的光波，然后才扩展到越来越“理性”的波，如弹性波、电磁波、……一直到最抽象的德布罗意波。还应该提到，认识过程中突出地使用了类比方法，将光、声类比于水波，并且又在声、光之间进行类比，在粒子与光之间进行类比。类

比是一种很重要的研究方法，P. S. M. 拉普拉斯曾经说："甚至在数学里，发现真理的主要工具也是归纳和类比。"

关于光的本性的认识过程本身就是螺旋式上升、波浪式前进的一个极其生动的例子，从承认光波兼有粒子性（光子），到承认粒子兼有波动性（德布罗意波），物理学又多了一个宝贵的思想——物质普遍具有波粒二象性。

光学起源于视觉，其发展经历了微粒说、波动说、光子说三大阶段；相应地，光学的研究范围从几何光学、物理光学，最后进入到量子光学。

在古希腊和古埃及，不少人喜欢将眼睛与太阳类比，以为眼睛也是发光的，而视觉是由眼睛发射出的视线所触发的感觉。柏拉图就曾经说："在器官之中，上帝首先创造了发光的眼睛"；自此以后，这种思想长期影响着欧洲人，甚至到 17 世纪初，仍然还有人正面引用。"发射视线"说虽属无稽之谈，在历史上还是起过积极作用；西方的几何光学，就是依据视线及光线的直进特点，逐步发展起来的。

我国古代并没有发现将眼睛当作小太阳的议论；相反，早就正确地认识到，眼睛是依靠外来的发光才产生视觉的。例如，《墨子》上记载有："目以火见"；东汉的王符（约 85—162）更进一步阐述为："夫目之视，非能有光也，必因乎日月火炎而后光存焉。"此外，《墨经》还分析了针孔成像、投影以及平面凹面镜、凸面镜的物像关系。这些见解和成就，是值得我们为之自豪的。

几何光学有利于光的微粒说。干涉、衍射等现象的深入研究，则促使光的波动说最终战胜了微粒说，通常称光的波动理论为物理光学。20 世纪初，光的量子效应导致光子说的提出，它强调了光的粒子性，似乎又回复到微粒说，却又与旧的微粒说根本不同，它不排除光的波动性。兼容波粒二象性，这是量子理论的核心思想。

① 微粒说

光是由微粒组成，还是某种媒质里的波动，在西方曾经长期争论不休；有趣的是，论证双方都援引声、光之间的对比来加强自己的观点。如果将 18 世纪以前有关声、光的知识作一粗浅的比较（表 4-2），不难发现，对比结果将不利于光的波动说。

表 4-2　声、光之间的粗浅对比

声	光
不能通过真空，媒质具体	能够通过真空，媒质神秘
明显具有绕弯能力	明显具有直进特点
发声机理清楚	发光机理不清楚
声速低，易测	光速高，难测

牛顿在《光学》(1704)中谈到光的本性时，也用对比的方式指出：

死水表面的波，在其部分被宽阔的障碍物所阻时它就沿着障碍物的边缘弯曲并在障碍物后面逐渐地自行散开而成为静水。传声的空气波、脉冲波或振动波显然也会弯曲，虽然没有水波那样多。因为一个钟或一个炮可以在隔断该发声物体视界的一座山之外听到，声音通过曲管与通过直管一样快。但从来没有人认为光能曲行，也没有听说光能弯曲成影。

接着，牛顿在下一个问题中自问自答地写道：“难道光线不是发光物质放射出来的非常之小的物体吗？因为，这样一类物体可以直线通过均匀的媒质，而这正是光线不会弯曲成影的本质。”

微粒说不但轻易地说明了光的直进、反射，甚至还能够导出光折射时所满足正弦比的定律，并由此构成几何光学的基础；当时光学的应用，如放大、望远、显微以及绘画中的透视原理，无不隶属于几何光学。由于牛顿在学术上的声望，以及他在光的色散、颜色方面的出色研究，使得他认为光的本性是微粒的看法，导致 18 世纪

光学方面的微粒说占有明显的优势。

其实，在 17 世纪 60 年代，F. M. 格里马尔迪（Grimaldi，1618—1663）已发现光的衍射现象，R. 胡克（Hooke，1635—1703）还发现了薄膜颜色。1675 年，牛顿自己也发现了薄膜干涉——牛顿环（图 4-35），他巧妙地在凸面玻璃与平面玻璃之间形成了不等厚的空气膜。牛顿也仔细地重复过格里马尔迪的衍射实验，但他认为光的微弱弯曲“只在射线与物体非常接近时才有”，是射线（微粒）与该物体相互作用的结果，不同于声波和水波的绕射。

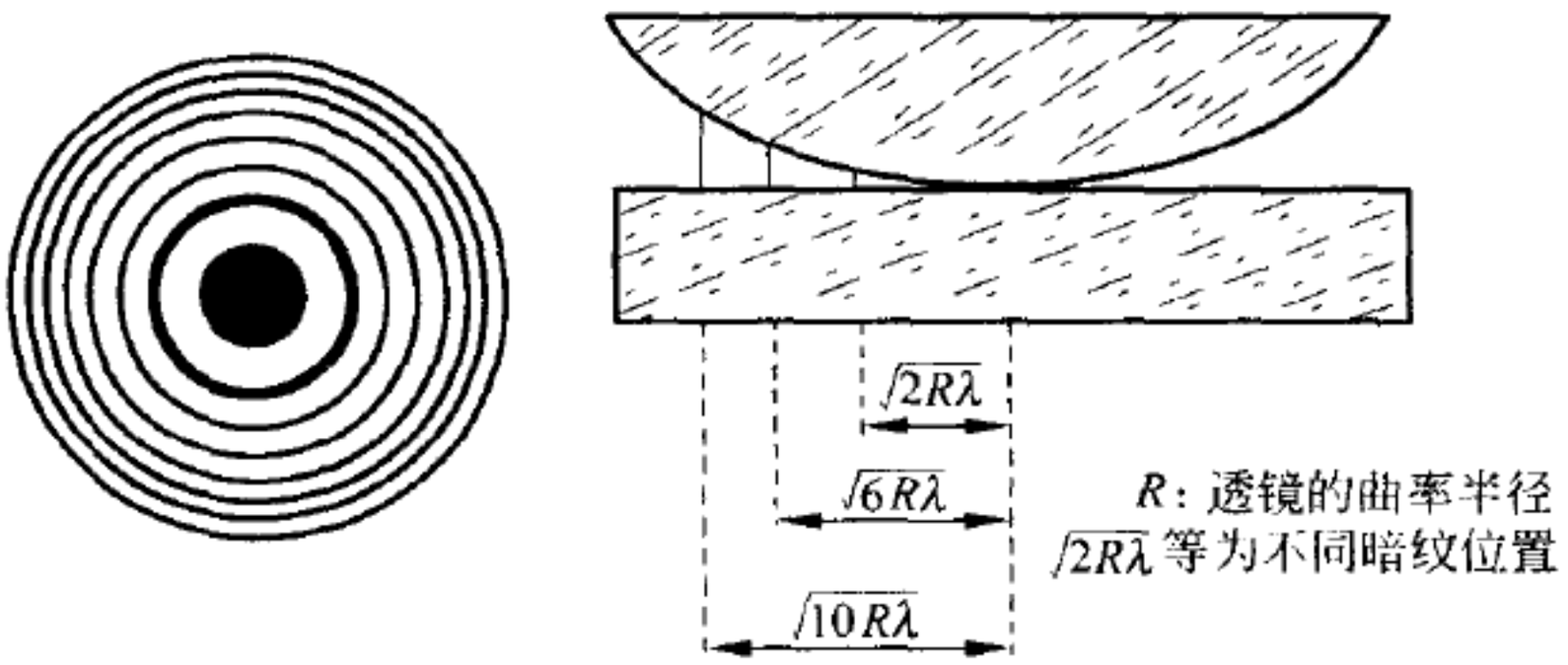


图 4-35　牛顿环

牛顿的微粒说并不是一种简单的粒子学说，也可以说它还不是一种完善的理论。他在《光学》中常常以提问的方式委婉地表达自己的看法，这一点似乎远不如《原理》理直气壮的说教。牛顿的光学仍然离不开神秘的以太媒质，他用以太的振动来说明颜色以及牛顿环的条纹。牛顿以微粒加以太的观点来说明有关光的现象，看来是从他的老师 I. 巴罗（Barrow，1630—1677）那里继承过来的，巴罗曾经这样说：“光的两个概念都有同样程度的困难。因此，我倾向于认为，光可能是由小物体的流动和连续的脉动这样两种运动产生的。若是可能，最好把某些作用归因于一种运动，而把另一些作用归历于第二种运动。”尽管巴罗并不是在近代物理的认识深度上得出这

一结论的，作为兼容波-粒思想的雏形，仍然是有意义的。

② 波动说

一般认为，波动说的正式提出是从 C. 惠更斯的《光论》开始，此书由 C. 惠更斯（Huygens，1629—1695）于 1678 年提交巴黎科学院，1690 年出版，其中阐述了著名的波传播原理，认为在波的传递过程中，“每一质点的周围，都兴起了以该质点为中心的波”，而且“光同声一样，是以球形波面传播的”，并用来说明光的反射、折射、双折射。

在此之前，格里马尔迪和胡克在 1665 年就彼此独立地提出了光的波动说；我国清代方以智（1611—1671）的《物理小识》（1664），其中真正涉及物理学的内容并不多，却谈到关于光波的见解。

波动说在 18 世纪内的发展是缓慢的，牛顿对光波的消极态度妨碍了波动说的研究；更主要的，如何从波动观点来说明光的直进，迟迟得不到圆满的解决。当时有影响的数学家中，唯有 L. 欧拉支持波动说，1746 年，他类比于弦的振动来说明薄膜的干涉条纹。由此可知，那个时期的光波学说还相当粗糙，对干涉、衍射等现象的处理尚缺乏竞争的实力。

对光的微粒说第一个进行强有力的挑战的是英国的天才学者 T. 杨（Young，1773—1829），他两岁即能识字读书，十四岁已熟悉微分学，并掌握多种语言；他是一名医生，其研究课题则涉及生理学、物理学、天文学以及古埃及学等不同领域。1800 年，他发表论文《关于声、光的实验和问题》为光的波动说辩护，抨击了牛顿的微粒说。从 1800 年起的三年内，他集中精力于声、光的干涉实验及理论说明；他进行了有名的双缝干涉实验，明确地提出波的叠加原理，并以波叠加的干涉条件及半波损失概念来解释牛顿环，认为衍射现象的基础即是干涉。光波学说的振兴，首要的功劳应属于杨。

使光的波动说严重挫败微粒说的则是 A. J. 菲涅耳。1815—1816 年，他通过实验和计算，进一步指出衍射乃是次波的干涉；1818 年，他

用杨的干涉原理来补充惠更斯原理，从而形成惠更斯-菲涅耳原理，并以它来说明光的直线传播。当时法国科学院悬赏关于衍射的研究论文，五人评审小组中的拉普拉斯、S. D. 泊松、J. B. 毕奥都是反对光波说的著名学者。富有戏剧性的是，泊松为了反对菲涅耳的衍射波动论，提出如下的诘难：如果波动说是对的，则平行光遭小圆屏阻挡，圆屏后方会出现中心亮点。泊松本人认为这显然是不可能的；然而事与愿违，实验结果表现出泊松提出的亮点，后来竟称之为泊松亮斑。于是，菲涅耳的论文获奖，光的波动说取得重大胜利。1821—1823 年，菲涅耳建立了光的弹性波理论，提出反射波、折射波的强度公式；特别是他还提出过拖动以太学说(1818)，得到一系列定量实验的支持。

17 世纪前，人们普遍认为光速是无限大的，G. 伽利略虽然认为光速有限，但测量光速的实验并没有成功；1676 年，O. C. 罗默(Romer，1644—1710)根据对木星卫星的观察，最早确定光速的值为 $2.14\times10^{8}\,m\cdot s^{-1}$，这在量级上无疑是正确的。按照当时流行的微粒说，水中的光速应大于空气中的，而光波说则相反；1804 年，杨曾经指出测定光速来判定两种学说孰是孰非的可能，直到 1850 年，J. B. L. 傅科(Foucault，1819—1868)分别测量了空气和水中的光速，其结果表明它们的数值之比为 4∶3，有力地支持了光的波动说。

有关光的本性的认识，傅科实验被认为是一次决定性的实验。自此之后，光的微粒说便一蹶不振了。菲涅耳使光的波动说上升为一种弹性波理论，其力学基础仍然是牛顿所建立的；在这个意义上，可以说菲涅耳是以牛顿的力学击败了牛顿的光学。

没过多久，J. C. 麦克斯韦提出了电磁场理论(1861—1864)，1865 年进一步在理论上论证了电磁波的存在，并认为光波即电磁波。于是，光的弹性波理论逐步让位于电磁波理论；一些物理学家忙于用电磁场的基本定律来重新阐述光波的各种传播现象，另一

些物理学家则着手在实验中验证电磁波。

以下的进展主要有：1873 年，麦克斯韦进行了光压的理论计算；1882 年，G. R. 基尔霍夫提出严格的衍射理论；1887—1888 年，H. R. 赫兹在实验室中成功地发射、接受电磁波，并验证了电磁波的一些基本性质与光波的一致。现在我们知道，电磁波有极宽的频谱，可见光只占其中极窄的一小段。1899 年，列别捷夫（П. Н. Лебедев，1866—1912）测得光对固体的压力。

③ 光子说

自从 M. 普朗克在处理黑体辐射问题时引入能量子的概念之后，爱因斯坦就觉得应该从辐射振子的能量量子化，扩展到空腔辐射场的能量量子化，并由此提出了光量子的概念。

1905 年，A. 爱因斯坦（Einstein，1879—1955）在论文《关于光的产生和转化的一个启发性观点》中，阐述了他对光的新观点：

“……光的波动理论，在描述纯粹的光学现象时，已被证明是十分卓越的，似乎很难用任何别的理论来替换。……尽管衍射、反射、折射、色散等理论完全为实验所证实，但仍可以设想，当人们把用连续空间函数进行运作的光的理论应用到光的产生和转化的现象上去时，这个理论会导致和经验相矛盾。”

确实现在看来，关于黑体辐射、光致发光、紫外光产生阴极射线，以及其他一些有关光的产生和转化的现象，如果用光的能量在空间不是连续分布的这种假说来解释，似乎就更好理解。按照这里所设想的假设，从点光源发射出来的光束的能量在传播中不是连续分布在越来越大的空间之中，而是由个数有限的、局限在空间各点的能量子所组成，这些能量子能够运动，但不能再分割，而只能整个地被吸收或产生出来。

爱因斯坦得出光量子的思路如下：他从黑体辐射的维恩公式出发，经过计算后得到下面的结论：

如果频率为 ν 和能量为 E 的单色辐射被（反射壁）包围在体积

V_0 中，那么，在一个任意选取的瞬间，全部辐射能量集中在体积 V_0 的部分体积 V 中的几率为

$$W = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\frac{N}{R}\cdot\frac{E}{\beta\nu}} \tag{4-2}$$

式中：N——阿伏伽德罗常数；

R——气体普适常数；

β——$h/\left(\frac{R}{N}\right)$。

式(4-2)又可表示为

$$W = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\frac{E}{h\nu}} \tag{4-3}$$

这与理想气体在类似情况下的几率公式

$$W = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N} \tag{4-4}$$

极其相似，只是这里的 N 代表气体的分子总数。对比式(4-3)与式(4-4)，爱因斯坦立即作出结论："能量密度小的单色辐射(在维恩辐射公式有效的范围内)，从热学方面看来，就好像它是由一些互不相关的、大小为 $R\beta\nu/N$ 的能量子所组成。"其中 $R\beta\nu/N$ 即 $h\nu$。

为进一步论证光量子假说，在论文的后一部分，爱因斯坦讨论了光量子概念的一些具体应用，包括对光电现象的处理。按照现代常用的符号，他提出的光电效应公式为

$$E_k = h\nu - A \tag{4-5}$$

E_k 为逸出电子的最大动能，A 为金属的逸出功(逸出一个电子所需的最小能量)。

光电现象是 H. R. 赫兹(1887)、A. Г. 斯托列托夫(Столетов，1889)发现的；1899—1902 年，P. 勒纳(Lenard，1862—1947)仔细研究了这一现象。爱因斯坦在论文中假设 $A=0$，$\nu = 1.03\times10^{15}$ Hz(这相当于太阳光谱在紫外段的极限)，得出 E_k 为 4.3eV，与勒纳的实验结果在数量级上相符。爱因斯坦接着指出，如果所

导出的公式是正确的。则 E_k-ν 的函数关系必定是一条直线，它的斜率与所研究的物质的性质无关。

为了检验式(4-5)，R. A. 密立根(Millikan，1868—1953)花了十年时间才得出一组光电效应的精确曲线(1915)，其中包括爱因斯坦所期待的直线关系(图 4-36)，直线的斜率可以用来决定普朗克常数，即 h 值。

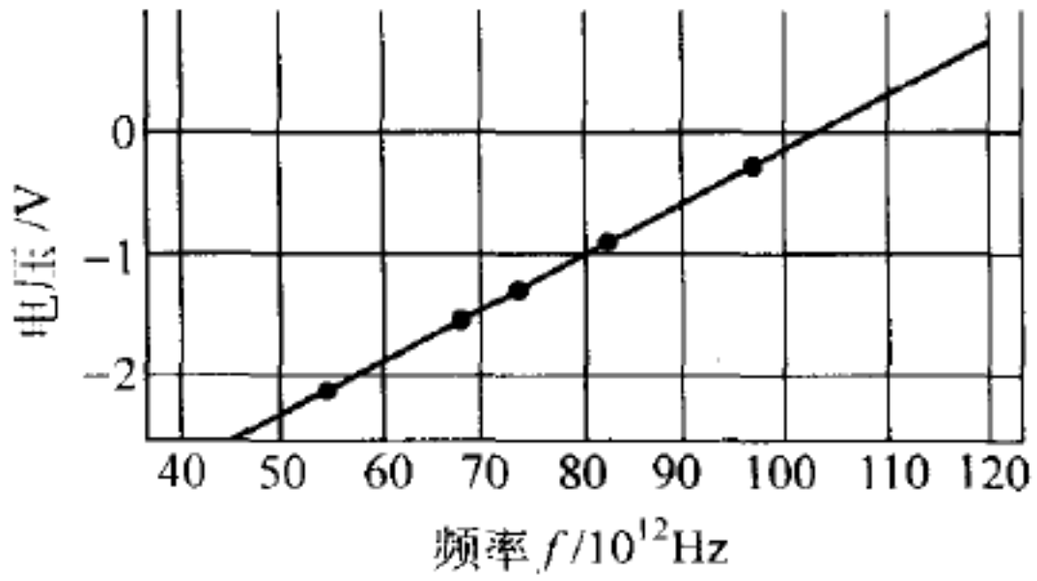
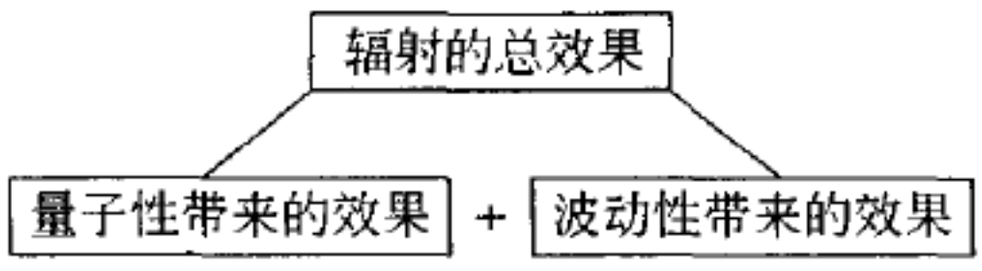


图 4-36　实测电压与光频率的关系

根据密立根的回忆，当时他的心情是这样的："我一生中曾花了十年时间去检验爱因斯坦 1905 年的方程，而且同我的一切期望相反，我在 1915 年不得不断言它的无歧义的实验证实，尽管它并不合理，因为它似乎违背了我们所知道的关于光的干涉的每一事实。"

光量子使光波又具有了粒子性，这种粒子性既不能排除波动性，也不能说明波动性，使很多物理学家难以接受。为了使光量子的概念更具有说服力，1909 年爱因斯坦进一步揭示了辐射的本质，阐明光同时兼有经典意义下的波动性和粒子性；他从普朗克的辐射公式出发，讨论了辐射压力的起伏。我们不妨用简单的方框图来表示爱因斯坦得出的结果：



爱因斯坦说:“我只希望以此来简要地说明,根据普朗克公式,两种特性结构(波动结构和量子结构)都应当适合于辐射,而不应当认为是彼此不相容的。”他清醒地知道,还没有能够成功地建立这样一个数学理论,它“既能描述辐射的波动结构,又能描述辐射的量子结构”。

对光量子概念的另一个有力的实验支持,是电子对光的散射,即康普顿(A. H. Compton,1922)实验,它不仅涉及光量子的能量,还涉及到动量。尽管如此,“爱因斯坦的二象性在当时只是被当作不太深刻的矛盾而未被人理睬”,1924 年,N. 玻尔曾对 W. K. 海森伯说:“就算爱因斯坦拍电报来告诉我,从现在起他掌握了光粒子存在的最终证据。即使这样,这封由无线电拍出的电报,也只能借助于辐射的电磁波才能到达我这里。”这表明,即使是当时很有革新思想、眼光敏锐的物理学家,也只能容忍光波在与实物相互作用(如吸收、辐射)时表现出量子效应。

光量子的概念促成德布罗意波的提出,而粒子波动性的证实,反回去又加强了光量子在物理学中的地位;特别是量子力学的建立及发展,为统一描述物质的二象性提供了系统的理论。由于爱因斯坦对量子力学的流行解释持批判态度,以致他在晚年仍然认为:整整五十年的自觉思考,没有更接近于解答“光量子是什么”这个问题。

(2) 实物粒子的波粒二象性

1923 年,德布罗意提出“物质具有波粒二象性”的假设,创造性地做出“电子具有波动性”的预言,为量子论的发展开辟了一条崭新的途径,打通了薛定谔(图 4-37)



图 4-37　E. 薛定谔(1887—1961)

通往波动力学的道路。1926 年，玻恩(M. Born，1882—1970)提出波函数的统计解释，找到了波与粒子统一的线索，把波与粒子统一到几率波概念的基础上，为量子力学提供了全新的概念基础。1927 年，海森伯(图 4-38)提出了不确定性关系(或原理)，加深了人们对量子本质的认识，极大地推进了人类认识微观客体本质属性的历史进程。



图 4-38　W. K. 海森伯(1901—1976)



图 4-39　L. V. 德布罗意(1892—1987)

路易·德布罗意(Louis de Broglie，1892—1987)(图 4-39)，1892 年 8 月 15 日生于法国塞纳河畔迪埃普(Dieppe)，出身于贵族，中学毕业后，他进入巴黎大学学习，最初学习历史、法律，1910 年获学士学位。在学习期间受到他的哥哥莫里斯·德布罗意研究 X 射线和彭加勒著作的影响，对科学感兴趣，1911 年改学物理学，1913 年获得“科学证书”。第一次世界大战期间，在埃菲尔铁塔上的军用无线电报站服役 6 年(1913—1919)。战后，他重新钻研物理并在他哥哥的实验室参加实验研究工作。在 P. 朗之万(Langevin，1872—1946)的指导下读博士，1924 年他在巴黎大学宣读博士论文《量子论的研究》时，其中首次提到与运动粒子相关联的波，现在习惯被称为物质波。认为实物粒子具有波动性，这确实是一个很大胆的思想，当时既没有任何已知的物理事实需要用这种思想来解决，也没有任何迹象表明粒子具有波动性。论文答辩前，朗

之万曾对前苏联物理学家 A. Ф. 约飞(Иоффе,1880—1960)这样说:“这个博士生答辩的思想当然很荒唐,但表述得非常优美和精彩,所以我同意进行答辩。”

在前面我们讨论了普朗克提出的经典量子论,爱因斯坦提出的光量子概念,以及康普顿的 X 光子的散射效应等,为解决微观世界的疑难问题作出了很大贡献,玻尔的原子结构模型又进一步完善量子理论。这些研究表明整个世纪以来的物理学研究,在光学上,比起波动的研究方法来,是过于忽略了粒子的研究方法,同时,在对实物粒子的讨论中是否又会有相反错误呢?是否过多地讨论粒子性而忽略波动性呢?在爱因斯坦的光量子理论中,对光子的描述则是使用两种矛盾的学说,那么对电子以及其他物质粒子,它们是否也有波动性呢?正是基于这种思考,德布罗意注意研究光的波动和实物粒子之间运动的相似性,他还独特地发现原子中表征量子状态的量子数只取整数,与波动光学中干涉、衍射现象的取整数之间似乎也有某些微妙的相似之处。因此,德布罗意大胆地设想电子和其他物质粒子就像光子和光波一样,具有波动和粒子二象性。

情况表明,德布罗意主要是在接受光的波粒二象性之后,由对称性及统一性的考虑而提出“物质波”的。

1924 年德布罗意提出了一个大胆的假设:

电子和其他物质粒子就像光子一样,具有波动和粒子两重性,因此,电子也像光子一样可以引入频率、波长等概念并和光子一样有如下关系:

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h} = \frac{m_0 c^2}{h\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m_0 v}\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

对于电子的这种关系式，称之为德布罗意关系式。这种和实验粒子相联系的波称为德布罗意波或物质波。

德布罗意的论点是在他的博士论文中阐明的，他的导师是朗之万，在由佩兰（Perrin）、朗之万、卡坦（Cartan）和莫格温（Maugain）组成的论文答辩委员会中各位委员对德布罗意的工作印象极佳。朗之万审阅了德布罗意的论文，他在报告中强调“除了思想独创性外，德布罗意以非凡的技巧作出努力来克服阻碍物理学家的困难”。他赞赏德布罗意理论的连贯性、真实性。但是，由于当时物质波理论还没有任何实验证据的支持，所以多数答辩委员对物质波的真实性存在疑虑。当答辩委员会主席佩兰问道：“这些波怎样用实验来证明？”德布罗意回答说：“用晶体对电子的衍射实验是可以做到的。”这是他早已考虑过的方案，并曾向他哥哥的同事道维耶（Dauvilier）提出做这个实验，但是后者因忙于其他实验而搁置下来。

德布罗意的物质波理论，最初并未受到物理学界的重视，但在他的导师朗之万将论文的复印本寄给了爱因斯坦后，事情起了戏剧性的变化。爱因斯坦向来欣赏物理学中的对称性，所以对德布罗意的想法很感兴趣，非常赞同，竭力支持。1924 年 12 月，爱因斯坦在给朗之万的复信中对德布罗意的工作给予很高的评价，声称这是“揭开了大幕的一角”。同年 12 月 26 日，爱因斯坦写信给洛伦兹，非常详细地谈到德布罗意的工作：“我们熟知的 M. 德布罗意的弟弟已经对于解释玻尔和索末菲的量子规则作了非常有趣的解释。我相信这对于揭示我们物理学中最难以捉摸的谜，开始露出了一线微弱的光芒。我还发现了支持他的解释的一些东西。”次年 1 月，爱因斯坦在柏林科学院的会议周报上发表的一篇论文中写道：“我将很仔细探讨这个解释，因为我相信它包含了比类推更多的东西。”他在同年 2 月发表的“爱因斯坦-玻色统计”的论文中，指出德布罗意在“非常值得注意的文章中”，把一个粒子归结为

一个波场。他写道:“看来粒子的每一运动都伴随着一个波场,这个场应该是能观察到的。”爱因斯坦认识到德布罗意工作的重大意义,他对玻恩说:“你一定要读它,虽然看起来有点荒唐,但很可能是有道理的。”玻恩在 1925 年 7 月 15 日给爱因斯坦的信中写道:“随后,我读了 L. 德布罗意的论文,并逐渐明白他们搞的是什么名堂,我现在相信物质波理论可能是非常重要的。”

德布罗意的论文经爱因斯坦推荐后,引起物理学界的广泛重视,特别是对奥地利物理学家薛定谔产生了深刻的影响。薛定谔也是在朗之万的促使下阅读了德布罗意论文的,他在发表波动力学的一系列论文以前,写了一篇关于气体理论的文章,清楚地说明了他对德布罗意假设的看法。他在绪言中说:“这意味着除了认真地考虑德布罗意-爱因斯坦的运动粒子波动理论之外,再无别的途径可言。”在 1926 年初,薛定谔发表他的第一篇波动力学论文时,曾清楚地表示他的“这些考虑的灵感主要是来自德布罗意先生的独创性论文”。这说明波动力学是在德布罗意物质波思想的直接影响下所获得的一个丰硕成果。

德布罗意在论文答辩时明确地指出,可以用电子波贯穿晶片来进行验证性实验,但在法国无人响应。纽约贝尔实验室的 C. J. 戴维孙(Davisson,1881—1958)在收到德布罗意论文复印本的第二天就开始了工作,后来他和 L. H. 革末(Germer,1896—1971)一起采用了劳厄(M. von. Laue,1879—1960)进行 X 射线衍射的方法,以单晶(镍立方晶体)衍射电子束获得成功,1927 年公布了他们的实验结果。四个月后,英国的 G. P. 汤姆逊(Thomson,1892—1952)也独立地得出电子波的衍射图样,他让电子穿过金属箔,衍射图样是环状的(图 4-40)。由于他们的出色工作,共同获得 1937 年诺贝尔物理学奖。G. P. 汤姆逊是电子发现者 J. J. 汤姆逊之子,父亲由于电子的粒子性获得诺贝尔奖,儿子则由于电子的波动性获得诺贝尔奖,成为物理学史中的美谈。



图 4-40　电子波衍射图

这个结果和 X 射线在晶体上反射时产生的规律类似，这说明电子和 X 射线一样也具有波动性；同样，根据衍射图形测出的数据计算电子波的波长，完全符合德布罗意公式。

电子既然具有波动性质，那么很自然会使人联想起原子、分子和中子也理应具有波动性质，后来的中子衍射实验证实了这一点。现在德布罗意关系式已成为人们的公认的表征电子、中子、质子、原子和分子等物质粒子的联系它们各自波动性和粒子性的基本公式了。

(3) 海森伯不确定关系

在经典力学中，纯粹的粒子是作为质点来对待的，都可以由机械决定论用一定方程来描述，任意给定时刻，质点的位置、动量都会确定，而且随着时间的变化可以描述出它的确定的轨道。因此，在给定作用力场中，知道初始时刻的位置、动量，就可确定今后任意时刻的位置、动量，也就是知道其状态了。但是，由于微观粒子具有波粒二象性，因而微观粒子就具有新的特征，即对于微观粒子我们不能同时测出其确定的位置和动量。对此，人们称之为不确

定关系。

下面以电子单缝衍射实验来说明，如图 4-41 所示，设有一束电子，以速度 v 沿 Oy 轴射向 AB 屏上的狭缝，狭缝宽度为 d，由于电子的波动性在 CD 屏上将观测到衍射图像。如果只考虑第一级极小，根据波动的衍射理论，中心处与第一暗纹间应满足下列关系：

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{d}$$

上式中 λ 为电子波波长。根据德布罗意公式

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

现在来考虑一个电子通过狭缝时的位置和动量。对一个电子来说，我们不能确定地说它是从缝中哪一点通过的，而只能说它是从宽为 d 的缝中通过的，因此它在 x 方向位置的不确定量就是 d，即有

$$\Delta x \approx d$$

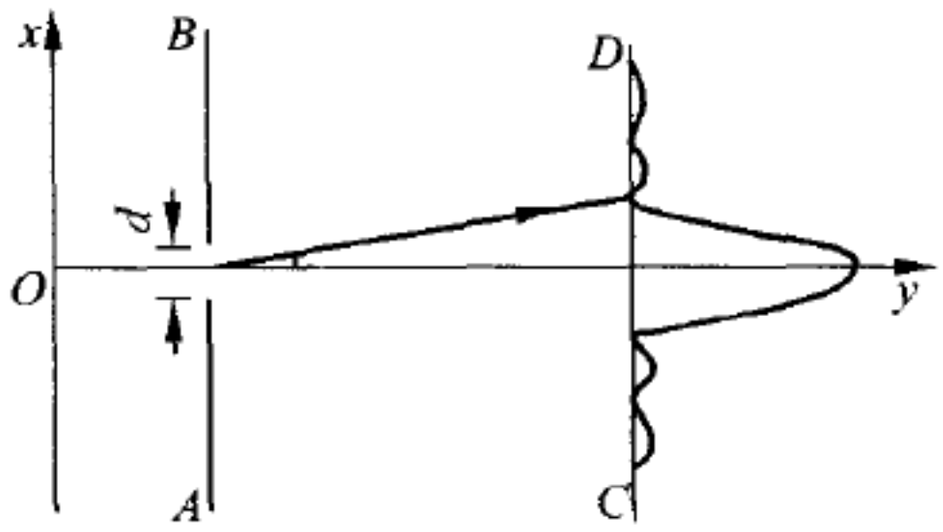


图 4-41　从电子单缝衍射说明不确定关系

由于电子动量的大小在通过狭缝前后保持不变，所以出射电子动量的 x 方向分量 p_x 只决定于它的出射角 θ。采取主峰近似，即忽略主极大以外的其他衍射峰，认为电子都落在中央主缝内，因此一个电子在通过狭缝时 x 方向的动量分量 p_x 的大小限制在 $0 \sim p\sin\theta$ 的范围内。这表明，一个电子通过狭缝时在 x 方向上动

量不确定量为

$$\Delta p_x = p\sin\theta$$

考虑到衍射条纹的次极大，可得

$$\Delta p_x \geqslant p\sin\theta$$

联立上述各式后，便得到不确定关系

$$\Delta x \Delta p_x \geqslant h$$

它说明在电子衍射的情况下，狭缝宽度 d 愈小，即位置不确定量 Δx 越小时，同方向上衍射电子的动量不确定量就越大。这就是说，电子的位置限制得越准确，则动量值越不能准确地确定。

在这里应当指出，以上论证不足之处是：从方法论的角度看来，举例并不是证明。举出一个反例，就足以使任何理论发生危机。单靠举出一个又一个实例，是不足以证明一条原理或定律的普遍有效性的，这种方法叫做“简单枚举法”。即使举出了成百上千个符合不确定关系的实例，也无法保证第 101 或第 1001 个例子不出毛病。另一方面我们看到，在玻尔和海森伯(图 4-37)感到十分满意的这种“波粒二象性”的论证里，更多的是从经典光学那里搬过来的公式和定律，显然，这种论证是很粗略的。至于严格的推导是由海森伯给出的，这里就不再讨论了。

(4) 量子力学波动方程

由上面的讨论可见，对于处于微观力学系统的电子运动状态，不能用经典力学的方法来讨论，那么如何描述微观粒子的运动状态呢？它是由薛定谔提出的薛定谔方程来描述的。

薛定谔(Erwin Schrödinger，1887—1961)，1887 年 8 月 12 日出生于奥地利首都维也纳。1906—1916 年，他就学于维也纳大学物理系，1910 年获得博士学位。毕业后，在维也纳大学第二物理研究所从事实验物理的工作。第一次世界大战期间，他应征服役于一个偏僻的炮兵要塞，利用闲暇时间研究理论物理。战后他仍回到第二物理研究所。1920 年他到耶拿大学协助维恩工作。

1921 年薛定谔受聘到瑞士的苏黎世大学任数学物理教授，在那里工作了 6 年，薛定谔方程就是在这一期间提出的。

1927 年薛定谔接替普朗克到柏林大学担任理论物理教授。1933 年希特勒上台后，薛定谔对于纳粹政权迫害爱因斯坦等杰出科学家的法西斯行为深为愤慨，移居牛津，在马克达伦学院任访问教授。同年他与狄拉克共同获得诺贝尔物理学奖。

1936 年，他回到奥地利任格拉茨大学理论物理教授。不到两年，奥地利被纳粹吞并后，他又陷入逆境。1939 年 10 月流亡到爱尔兰首府都柏林，就任都柏林高级研究所所长，从事理论物理研究。在此期间还进行了科学哲学、生物物理研究，颇有建树，出版了《生命是什么》一书，试图用量子物理阐明遗传结构的稳定性。1956 年薛定谔回到奥地利，被聘为维也纳大学理论物理教授，奥地利政府给予他极大的荣誉，设立了以薛定谔命名的国家奖金，由奥地利科学院授予。

利用德布罗意关系，我们可用一个单色平面波来描述一个有确定能量 E、确定动量 p 的自由粒子的状态，其形式为 $\psi=\psi_0\cos 2\pi\left(\nu t-\frac{x}{\lambda}\right)$。若改成复数形式，又可写成 $\psi=\psi_0 e^{-2\pi i\left(\nu t-\frac{x}{\lambda}\right)}=\psi_0 e^{-\frac{i2\pi}{h}(Et-px)}$。$\psi$ 是 x、t 的函数，得 $\psi(x,t)=\psi_0 e^{-i\frac{2\pi}{h}(Et-px)}$，此式亦称为德布罗意波函数。波函数振幅的平方表示在单位体积中发现一个粒子的概率，称为概率密度。另外，由于粒子必定要在空间中的某一点出现，所以粒子在空间各点出现的概率总和等于 1，也就是 $|\psi|^2$ 或 $\psi\psi^*$ 对全部空间的积分应等于 1。

$$\iiint |\psi|^2 dV = 1$$

上式称为归一化条件，此式的积分应遍及整个空间。又因为波函数是复数，则应写为 $|\psi|^2=\psi\psi^*$（ψ^* 为 ψ 的共轭复数）。和经典力学中描述粒子的运动方程相类似，微观粒子可用薛定谔方程来描

述，即

$$i\hbar\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}=-\frac{\hbar}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\psi(x,t)+U(x,t)\psi(x,t)$$

从薛定谔方程我们可看出，牛顿定律是宏观物体的运动方程，只要准确给出了初始状态及力场分布，任何一个时刻的状态就唯一地确定了。微观粒子的运动规律，由于波粒二象性，位置、动量不能同时确定，无因果关系可言，海森伯曾经说过一句很精辟的话："……在'如果我们确切地知道现在，我们就能预言未来'这句话里，结论倒没错而是前提错了。从原则上说我们是不可能详尽无遗地知道它的现在的。"

再者，从 $\psi=\psi_0\cos2\pi\left(\nu t-\frac{x}{\lambda}\right)$ 变为复数形式的 $\psi=\psi_0 e^{i2\pi(\nu t-\frac{x}{\lambda})}$，这并不能仅仅看成是数学上的运算而已，它是从一个平面波表示式抽象化为波函数的前奏，这并非是故弄玄虚，而是向揭露物理本质走近了一大步。列宁曾说过："一切科学的（正确的、郑重的）抽象，都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。"

对于量子运动概率的问题，有几派争论意见。如哥本哈根学派的观点，也有隐函数解释的观点，也有随机特性的观点等，目前尚未取得一致意见。但是，这是件大好事，因为科学发展的历史证明，不同观点、不同学派的争论是推动科学发展的重要因素。

4.4 经典与近代观念的碰撞

近代物理的两大理论支柱量子力学和相对论非常巧合地在哲学高度上回答了物质世界的两大基本问题：物质是如何构成的（物质观）？世界是如何运动的（时空观）？它的回答是：量子的、相对的。这两个概念在 19 世纪末以前的经典物理学中也有答案，即连续的、绝对的。

两种概念上的冲突与碰撞由来已久，但在20世纪的前若干年里表现得那么剧烈，却又那么“干净利落”。陈年老账似乎一夜之间得到澄清(1900—1927，与具有400年物理发展历史相比是何等的短暂)。这得益于当时技术的发展，也得益于时代造就的某个人(如爱因斯坦)和某个集体(量子发展的团体)，更得益于一代又一代前赴后继的追求科学精神、科学思想的人们。

今天，让我们来回顾这两种世界观的形成和碰撞经历，具有深刻的认识论价值。

1. 连续与量子

“量子”(quantum)一词，其拉丁字含义为“一份一份的东西”，有不连续之意。物理学中的量子问题，既时髦而又十分古老。

毕达哥拉斯学派强调数量之间的整数关系，这是最早的量子概念。弦振动的驻波、光干涉的条纹，都是大家所熟知的量子现象。源远流长的原子学说，明确地主张基元物质是一粒一粒的，电荷取分立值及物体普遍具有电性结构的确证，进一步加深了物质结构的不连续性。

另一方面，在20世纪之前，人们一直认为所有的物质运动无一不是连续的。于是，与运动紧密相关的能量、动量、角动量都是连续的，传播能量的波动也是连续的，作为一种特殊的物质——电磁场还是连续的，而能量子、光量子的概念与古典物理学格格不入。

将量子化条件强行塞进传统理论，便形成了半经典的旧量子论；虽然旧量子论的逻辑基础具有明显的矛盾，在应用上却取得了极大的成功。作为旧量子论的“三剑客”——M. 普朗克、A. 爱因斯坦、N. 玻尔，他们是量子物理学的先驱，本节将主要介绍创建者及其追随者的工作。

物质普遍具有波粒二象性，将物理学中连续与量子的关系推进到一个新的境界，使量子理论获得新生。不久之后，就相继提出

量子力学、量子电动力学等在逻辑上自洽的量子理论，为微观粒子提供了有效的运动规律，将各种物质场量子化，使微观物理学在多方面得到迅猛的发展。

(1) 电量子

电量子指的是电的基元粒子。最早认为电是粒子性结构的，正是提倡电液说的 B. 富兰克林。大约在 1750 年，他写道："电这种物质是由极少的粒子组成的，它可以渗透到普通的物质中，即使是最密实的物质，它的渗透是如此自由和容易，好像不受任何的阻碍。"由于富兰克林的有关叙述明显地缺乏科学依据，它类似于古希腊的原子说，只能算是一种朴素的看法，而不宜过于认真对待。

① 从法拉第到斯托尼

显示电依附于通常物质并暗示电荷总是某一基元量的整数倍的，是 M. 法拉第的溶液电解实验。这里仅介绍他在电解溶液方面的研究成果。

为了说明电解现象，他首先引入了离子、电解、电解质、电极等概念，从电解实验中他得出结论："化学功率，像磁力一样，与流过的电量的绝对值成正比"，又说："电化当量与普通的化学当量相吻合，而且就是化学当量"。1934 年，法拉第在皇家学会宣读了论文《论电化学分解(续)》，他在其中正式提出了两条电解定律；按照现代的写法，法拉第电解定律可表述为：

第一定律　电极上析出物质的质量 M 与电荷 Q 成正比。

第二定律　当 Q 相同时，M 正比于原子量 A，而反比于原子价 n。

这些实验事实必然导致结论：电不仅离不开通常的物质载体，而且由于物质的原子性，相应有电的原子性或量子性。事实上，只要将上述两条定律合并，即得

$$Q \propto \frac{n}{A}M$$

或引入比例系数 F，常称为法拉第常数，则

$$Q = F \cdot \frac{n}{A} M$$

实验测出 $F = 96494\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$。若取 M 刚好为 1mol 质量，应含有 $N_0 = 6.023 \times 10^{23}$ 个原子（或分子），于是，每一原子（或分子）上分配的电荷为

$$q = n \frac{F}{N_0} = n \cdot \frac{96494}{6.023 \times 10^{23}}$$

由此很自然地得出，电量子的电荷应为

$$e = 1.602 \times 10^{-19}\text{C}$$

这本是顺理成章的事，法拉第却过于谨慎让它从鼻尖下丢失了，他在自己的笔记中写道：

……如果我们采用原子理论或有关术语，那么在普通化学作用中彼此相等的物体原子，具有与它们自然结合的等量的电。但是我必须承认，我觉得使用原子这个词需要很小心，因为谈论原子虽然很容易，但是要对它们的本性形成明确的概念就很困难了，特别是在研究化合物的时候。

G. J. 斯托尼（Stoney，1826—1911）充分认识到法拉第电解定律对电量子的重要意义，为了使人们注意到他的理解，1874 年他曾致函英国的学术机构。1881 年，他提出电荷的基元单位，其估值为 3×10^{-11} 静电单位，大约只有真实值的 1/10，这主要由于当时对阿伏伽德罗常数 N_0 掌握得不准确。1891 年，他命名“电子”作为电的自然单位，即一个自然单位的电量通过溶液时，刚好能使一个氢原子或一个单价元素的原子从电极上释放出来，他在论文中写道：

一个有这样电量的电荷，在化学原子中，与一个化学键相结合。在一个化学原子中可有几个这种电荷，而每个原子似乎至少含有两个。这种电荷，定名为“电子”……

所谓至少应有两个电子，这是为了一正、一负才能构成中性的原子。

② 从汤姆逊到密立根

在 1895 年之前，很少有人去研究气体的导电性，X 射线及镭放射线的发现才推动了气体导电的研究，这主要归功于 J. J. 汤姆逊(Thomson，1856—1940)及其追随者。1897 年，汤姆逊利用阴极射线在静电场及稳恒磁场中的偏转，求得阴极射线是带负电的微粒束，而每一微粒所带电荷的量值 e 与质量 m 之比为(1.1～1.5)$\times 10^{11}$C/kg，与放电管中是何种剩余气体无关；后来更精确的实验表明，阴极射线的 e/m 值为 1.7573×10^{11}C/kg。

关于阴极射线的本质，当时各种意见极不一致，汤姆逊认为：

在研究方面，粒子带电说比以太说具有一个很有利的条件，因为它立论明确，可以预知后果；至于以太说，则在任何已知情况下都不可能预知后果，因为根据此说，我们所研究的是迄今没有人观察过的以太中的现象，而关于这种现象的定律，我们一无所知。

他明确称这些微粒为电子。从此以后，原来作为电的自然单位的“电子”，摇身一变而成为一种带电的基元物质实体，它带有负电且具有确定的荷质比 e/m。

为了直接测定电子的电荷值 e，一些物理实验室开展了有关的研究工作，其中以 R. A. 密立根的油滴实验最为著名。开始时(1909)，他研究带电水珠的平衡，后来才改用油珠来代替易蒸发而不便滞留的水珠。实验结果表明，如取每个油滴的带电量为某一最小值 e 的整倍数，则每次求得 e 值，其前两位数几乎彼此一样，折换成国际单位制，e 的平均实测值为 1.602×10^{-19}C。密立根为测定电的量子(基本电荷)及证实光的量子性作出了杰出的贡献，从而荣获 1923 年诺贝尔物理学奖。

③ 从狄喇克到盖耳曼

现在我们知道，现有宏观电荷都只能是正、负 e 值的整数倍，

甚至对微观的自由粒子也无一例外；这种整倍数的量子性，其精度已达 10^{-20}。

为了在理论上说明，自然界中的电荷为什么只能取如此分立的量值，P. A. M. 狄喇克于 1933 年提出了一种解释：若自然界存在有磁单极子 g，则各种电荷应为基本电荷 e 的整数倍，并且

$$eg = \frac{h}{\mu_0}$$

式中，h 为普朗克常数；μ_0 为真空磁导率。虽然如此，不仅迄今为止尚未发现磁单极子，似乎今后能找到它的希望也十分渺茫；不过，也许在宇宙的初创阶段，磁单极子曾经密集存在。

1964 年，M. 盖耳曼和 G. 兹韦克（Zweig，1937— ）提出强子的三夸克结构模型：用任意一组三个夸克结合成重子，任意一个夸克与另一反夸克结合成介子。按照这种设想，不仅要求有1/3的重子数，还要求夸克的电荷不再是基本电荷的整数倍，而应该是分数电荷。事情是这样的，如果以两个 u 夸克和一个 d 夸克组成质子（电荷数为 1），两个 d 夸克和一个 u 夸克组成中子（电荷数为 0），则以一个 u 夸克置换中子里的某一个 d 夸克后，这个中子即变为质子，其电荷数增加 1，于是，u 夸克与 d 夸克的电荷数之差为 1。设 u 夸克的电荷数为 Q，则 d 夸克的电荷数为 $Q-1$，并且立即可写出：

$$\text{对质子}\quad 2Q+(Q-1)=1\rightarrow Q=\frac{2}{3}$$

$$\text{对中子}\quad 2(Q-1)+Q=0\rightarrow Q-1=-\frac{1}{3}$$

这表明，u 夸克带电 $2e/3$，d 夸克带电 $-e/3$。后来，三夸克模型发展为六夸克模型，夸克及反夸克的电荷仍为 $\pm 2e/3$ 或 $\mp e/3$。夸克学说对粒子物理有着显著的贡献，学者们普遍认可了夸克的存在，同时也就接受了分数电荷的概念。

分数电荷的出现并没有破坏电荷的量子性，电荷仍只能取分

立的量值，仅仅在超微观的领域里，基本电荷不再是 e 而是 $e/3$。何况，由于夸克被“幽禁”着，微观世界的自由粒子及宏观物体所具有的电荷还是士e 的整数倍。

(2) 能量子

20 世纪以前，物理学中的物质运动都是连续变化的，有关运动的物理量当然也都是连续变化的，基于这种思想，建立了热力学及麦克斯韦-玻耳兹曼统计理论。将这些理论应用于热辐射的研究，其结果与实验事实有着明显的分歧，这迫使 M. 普朗克(Planck，1858—1947)采用能量子的假设，即不得不承认运动的不连续，并限定其能量取分立值。

① 理论与实验的交叉作用

在 4.3 节中我们讨论过了有关热辐射的研究，以黑体辐射为主要对象，它是理论工作与实验工作相互促进的极好例子：理论工作者密切关注着实验方面的信息，实验方面对辐射的测量技术，则由于理论研究的刺激而得到迅速改善。

1896 年，W. 维恩首先得到黑体辐射能按波长的分布函数，不久即被 F. 帕邢(Paschen，1865—1947)的实验证实；另一方面，H. 鲁本斯等人的实验结果却表明，维恩定律对长波波段有明显偏差(1899—1900)。1900 年是决定性的一年，M. 蒂森(Thiesen)及 J. W. S. 瑞利先后对维恩的分布函数提出修改方案，但是他们得出的公式，仅在长波方面与实验结果吻合较好，尽管瑞利公式中出现了没有交代清楚的指数因子，实验物理学家却似乎都乐于接受；普朗克在鲁本斯的帮助下，也求得一个对长波段有效的分布函数。普朗克从鲁本斯那里得知：高温时，黑体的单色辐射强度与绝对温度成正比。这正好是瑞利公式的结论。

为了使理论上求得的黑体辐射能的分布函数与实验曲线进行全面的对比，这里将黑体辐射能密度按波长分布的关系描绘在图 4-42 中。

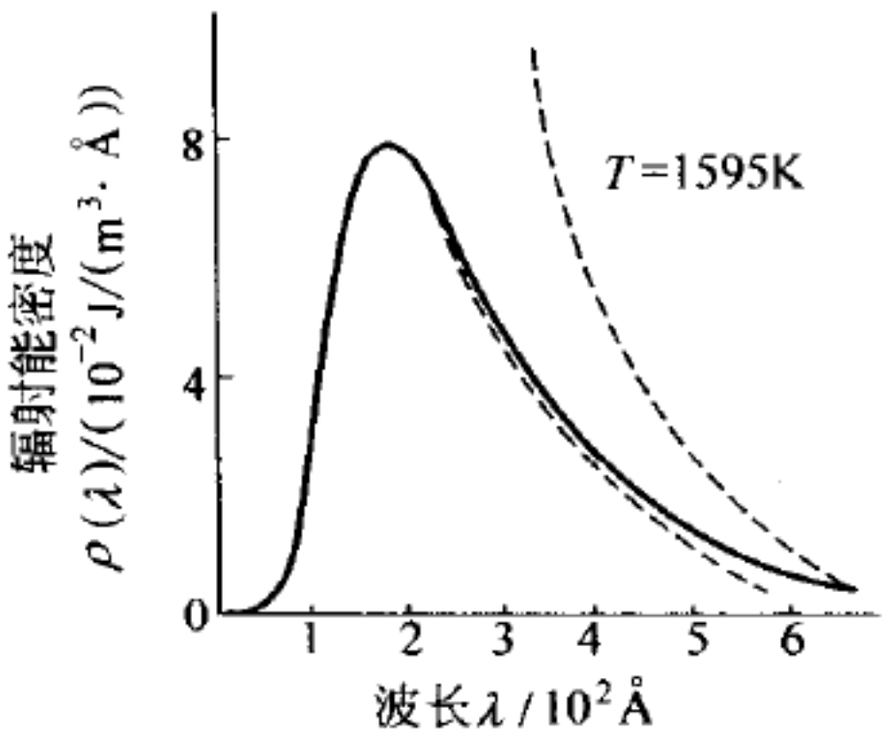


图 4-42　黑体辐射能密度按波长分布

仍是 1900 年，普朗克努力寻求到了在长波和短波两方面都正确的分布函数，第一步建立实验曲线的经验公式，第二步再给出理论说明并补充推导过程。

他抓住两头，分别从在长波段、短波段有效的分布函数出发，通过热力学分析后，将它们改用内能 U 和熵 S 表示为

$$\frac{\mathrm{d}^2S}{\mathrm{d}U^2}=\frac{\alpha_1}{U}\quad\text{对短波段有效}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2S}{\mathrm{d}U^2}=\frac{\alpha_2}{U^2}\quad\text{对长波段有效}$$

α_1、α_2 为与频率有关的常量。根据这两种表达形式，普朗克采用了一种所谓的内插法，具体地说，他假定

$$\frac{\mathrm{d}^2S}{\mathrm{d}U^2}=\frac{\alpha}{U(\beta+U)}\tag{4-6}$$

因为它显然在两个极端情况下能返回到原有的理论结果：

$$\beta\gg U\longrightarrow\frac{\mathrm{d}^2S}{\mathrm{d}U^2}=\frac{\alpha_1}{U}$$

$$\beta\ll U\longrightarrow\frac{\mathrm{d}^2S}{\mathrm{d}U^2}=\frac{\alpha_2}{U^2}$$

于是，式(4-6)被认为是内插有效的。然后，将式(4-6)的热力学

关系还原为相应的分布函数。1900 年 10 月，普朗克求得黑体辐射的能量密度为

$$\rho(\lambda) = \frac{a\lambda^{-5}}{e^{\frac{b}{\lambda T}} - 1} \tag{4-7a}$$

其中 a 和 b 都是常数，可以由已知的有关定律确定。若以频率 ν 来代换波长 λ，即以 $\rho(\nu)d\nu$ 来代换 $\rho(\lambda)d\lambda$，就不难得出今天大家所习惯的表达式

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \tag{4-7b}$$

式中，h 为普朗克常数；k 为玻耳兹曼常数。

② 量子与传统的生硬结合

普朗克的第二步工作是寻找式(4-7)的理论解释。根据经典统计理论及运动的连续概念，无论如何也推导不出式(4-7)；普朗克将空腔内的热辐射当作赫兹振子的辐射来处理，而式(4-7b)告诉我们，振子的平均能量为

$$\bar{u} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

这明显地与能量按自由度均分原理不一致。为了在理论上导出式(4-7)，普朗克可能从玻耳兹曼过去的工作中受到启发，玻耳兹曼曾经(1877)将分子能量的连续分布当作不连续分布进行运算，让每一分子的能量都是某一基元能量 ε 的整数倍，然后取 $\varepsilon \to 0$。普朗克也假定辐射振子具有不连续的能量 $n\varepsilon$，而 n 为较大的正整数；为了通过经典统计方法得出式(4-7)，这里只能假定 $\varepsilon = h\nu(\neq 0)$。

于是，在不到两个月的时间里，普朗克终于能够对式(4-7)作出理论说明，但需要在经典统计理论中强行引入能量子的概念。1900 年 12 月 14 日，普朗克向柏林物理学会提交了他的研究成果。这是对传统的运动连续性概念打响了第一枪，从此诞生了量

子理论。

普朗克对自己所完成的工作的重要性及严重性，都有足够的认识。据传，当时他曾经对他的儿子说，他的发现不亚于牛顿的发现；虽然如此，能量子与经典物理学的深刻矛盾一直使普朗克惴惴不安。不仅一些老派的物理学家都拒绝接受“能量子”，其实普朗克自己也并不喜欢它，认为“那是走投无路被逼出来的”（见 1931 年普朗克给 R. W. 伍德（Wood，1868—1955）的回信）。

普朗克在临终时还说：“我总想能用什么方式把基本量子和经典理论调和一下。为此，我花费了巨大的精力，徒劳无益地研究了好几年。”一方面，他致力于在经典物理学中建立“基本量子”的基础，将它联系于相空间作用函数的相对论不变性，使之与最小作用原理相结合，以致他坚持称“基本量子”为“作用量子”，而不愿意叫做“能量子”；另一方面，他试图完全沿用传统的概念来构筑热辐射理论，1911 年，他在《论量子发射的解说》一文中主张吸收是连续过程，只有发射是量子过程，1914 年则彻底退回到经典理论。N. 玻尔曾经直率地这样谈到普朗克：普朗克生命中的最后 40 年，也许更多一些，是致力于把他自己的发现从世界上勾销。确实，这也反映在他对光量子的态度上，据 A. Φ. 约飞的回忆，普朗克曾告诫他在光的理论上不要走得太远，他说：“经典理论给了我们这么多有用的东西，因此必须以最大的谨慎对待它、维护它。”

尽管普朗克是量子论的开山始祖，他却是被逼上梁山的；在爱因斯坦提出光量子、N. 玻尔对氢原子进行了有效的量子化之后，普朗克仍然节节后退，深深地陷于经典理论而不能自拔，使人们为之惋惜不已。

普朗克毕竟是老一辈的物理学家，提出量子概念时已 42 岁了，这比年轻人自然少了一些锐气；他出生在德国正统的保守家庭里，父亲是一位忠于职守的法律学教授。他的一生也是够不幸的，40 岁以前在学术上也并无显赫成绩，50 岁以后他的原配夫人及子

女又相继去世，只得在纳粹的野蛮统治下苦度残年，待到第二次世界大战结束，他已经极其衰老了，1947 年 10 月 4 日与世长辞。

2. 绝对与相对

“绝对”和“相对”是一对重要的哲学范畴的概念。人们最早是在对事物进行比较时使用这些概念的；如果事物之间不可比拟，就说成是绝对的，若是可以比拟就说成是相对的；因此，“绝对”往往具有无条件、永恒、不变以及普遍性等含义，“相对”则意味着有条件、短暂、可变以及特殊性等。

哲学上有关“绝对”的概念，在物理学里既表现为物理变化中的守恒性，也表现为坐标变换下的不变性。前者在变化过程中反映了物质及其运动的不灭，它是在时间流逝的进程中显示出来的；后者则是在观察者改变参照系物质及其运动所表现出的固有性，这种与参照系或坐标系的选择无关的固有不变性，强烈地体现了事物的客观性。于是，在物理量中既有守恒量，还有不变量；物理学工作者习惯于将与固有不变性相联系的不变量，称为绝对量。既然守恒量和不变量是在不同的条件下得出的不同概念，它们之间也就不存在简单的对应关系。例如，质量是守恒量，却不是不变量；熵是不变量，却不是守恒量；电荷则既是守恒量，又是不变量。

这里仅讨论变换参照系或坐标系时所出现的相对性和绝对性，这涉及到物质运动、物理规律、时间空间以及诸多的物理量。对于同一坐标系内所描述的物理变化，其变化过程中也会显示出绝对性。

(1) 物质运动

物质的存在及其运动，既体现出空间和时间，又离不开空间和时间。所谓绝对运动和相对运动，它们首先要求对绝对空间和相对空间的认可；不承认绝对空间，也就没有必要去谈论绝对运动，即使如此，这仍然不妨碍我们去讨论运动的绝对性和相对性。运动的绝对性并不是绝对运动的另一种说法，它们是完全不同的两

个概念，各有自己的内涵。以下，我们从绝对空间和绝对运动说起，然后再谈运动的相对性和绝对性。这就要介绍绝对空间和绝对运动。自古以来，人们长期认为空间是一个大容器，或者是一个大海洋。古希腊的泰勒斯就认为大地是浮在水面的圆盘；亚里士多德也认为“有容物体之最初不动的境界”，“物体，当在它的外面有着某个能容纳它的物体时，则是处在一定的地点。物体，当它没有这些时，就不存在。”具体地说，亚里士多德相信月球以上的世界是充满了以太的海洋。

这些无所不包的容器或无所不在的海洋，它们往往被认为代表了绝对空间，其他物体相对于绝对空间的运动称之为绝对运动，相对于它们的静止则是绝对静止。亚里士多德即认为，月球以下的地球是绝对静止的。在我国，无论是主张“天圆地方”的盖天说，还是主张“浑天如鸡子”、“地如鸡子中黄”的浑天说，无不认为大地是静止的。亚里士多德-托勒密宇宙地心体系占统治地位约 2000 年之久，哥白尼体系也只是以静止的太阳代换了静止的地球。

牛顿在《原理》中是这样区分绝对空间与相对空间的：

绝对的空间，按其实质永远是相同的和不动的，与任何外界情况无关。

相对的空间为前者之量度或任何有范围的运动的部分，这部分由我们按照它相对于某些在日常生活中被认为不动空间的其他物体的位置而确定。

尽管牛顿又说：“可能没有一个真正静止的物体可以作为其他物体的处所和运动的参考”，但他毕章还是相信绝对空间的存在，并用旋转的水桶来进行论证；然而，牛顿的论证方式与试图论证的对象一样，它们都是虚假的，曾受到 E. 马赫的猛烈批判(1883)。

C. 惠更斯却自有主见，他认为：“绝对空间是一种幻想”。显然，发现恒星的运动具有重大的历史意义，它使人们无法确认一个绝对静止的物体。牛顿的挚友、著名的天文学家 E. 哈雷(Halley，

1656—1742)曾明确指出,“恒星不动”的观念是错误的;1718 年,他将自己对恒星方位的观测与古代天象资料进行对比,发现在经历了 1000 多年之后,有四颗恒星的位置确实有了变动。1783 年,F. W. 赫歇耳(Herschel,1738—1822)发现了太阳的运动;约半世纪后,赫歇耳的发现获得有力的证实。

尽管人们所观测到的物质运动都是相对运动,很多物理学家却一直认为有绝对静止的宇宙背景存在;这主要是因为,光的波动理论需要空间充满能够传光的以太媒质。然而,特别是在 19 世纪后半世纪里,多次使用光学或电磁学的方法,试图发现地球的绝对运动都一再失败。狭义相对论的提出,最终使绝对静止与外界无关的空间概念,在物理学中丧失了立足之地。

所谓运动的相对性,说的正是物体之间的相对运动。要观测或描述任何一个具体的物体运动,事先都要选好某个物体作为观测或描述的参考依据,即确定参照系。对于同一物体的运动,不同的参照系一般会得出不同的描述结果。运动的相对性,其实质即运动描述的相对性,有时又称为运动的相对性原理。

最晚在东汉(公元 25—220)中期成书的《尚书纬·考灵曜》已指出:“地恒动不止而人不知,譬如人在大舟中,闭牖而坐,舟行而不觉也。”用浅显的比喻说明了运动的相对性。这比西方的类似论述要早得多。

在西方,R. 笛卡儿、C. 惠更斯等人的著作中都明确地提到运动的相对性。G. 伽利略在遭受第一次宗教审判之后,仍撰文阐述运动的相对性概念(1632),并用来捍卫哥白尼的地动说。

根据运动的相对性,以太阳为参照系来描述星体的运动,或以地球为参照系来描述星体的运动,原则上都是允许的;在这个意义上,地心系与日心系彼此平权。然而,这并不等于说,托勒密以地心系描绘的图像与哥白尼以日心系描绘的图像彼此等价;简而言之,各个行星以圆轨道匀速绕太阳运动,并不等同于太阳及其他行

星以圆轨道匀速绕地球运动。B. 第谷曾提出另一宇宙体系，仍以地球为静止中心，太阳在圆轨道上环绕运行，其他行星则绕着太阳做圆运动；如果放弃绝对空间及绝对静止的观念，第谷体系与哥白尼体系基本上是同一宇宙模型，其差别仅在于选择不同的参照系。

选择不同的参照系来描述同一物体的运动，它们之间是彼此平权，而又不总是相互等价的，哪一些描述有价值，哪一些描述毫无意义，这取决于具体问题的实际需要，有时是实用上的需要，有时则是认识上的需要。为了更深刻地理解物质运动，并不是所有的参照系在物理上都是彼此平权的，牛顿运动定律和麦克斯韦方程组都只是在惯性系里才直接有效。于是，当我们要从运动学的描述深入到动力学的研究，就应该特别注意参照系的选择；在这个意义上，哥白尼系仍然优于第谷系，因为太阳相对于地球，是一个更好的惯性系。

运动的绝对性是针对静止的相对性而言的，它与绝对运动的概念无关。所谓运动的绝对性，说的是运动的无所不在，哪里有物质哪里就有运动，运动是物质不可缺的固有属性，世界上没有无运动的物质，也没有无物质的运动。随便选定一个参照物体，任何物质相对于这个参照系总是绝对运动着。作为一种指导思想，运动的绝对性鼓舞人们去认识物质世界里多样的运动形态。自然科学的不断前进，使人类已了解的物质运动形态越来越多：生物运动、化学运动、机械运动、电磁运动、热运动、各种场的运动等，它们丰富了运动的绝对性思想，使之更具体、更生动、更有科学依据。

例如，一个外观上静止的物体，周围环境的作用可以使得它正在进行缓慢的化学变化，它的内部又一定存在着热运动、电磁运动以及更深层次的微粒运动；即使在热力学温度零度，也仍然有着零点能量，这对应于零点运动。总之，运动形态的多样性保证了运动的绝对性。

如果说，质量是代表物质的最基本的物理量，能量是描述运动

的最基本的物理量，那么，A. 爱因斯坦的质能公式，即能量与质量恒成正比，而比例系数为真空光速的 2 次方，则是运动的绝对性在物理学里最概括的表示，它简明地体现了运动与物质之间的不可分割关系。

19 世纪末，“唯能论”者宣扬以能量来代替一切，其实质即主张运动就是一切，而物质是没有的；尽管这种思潮对物理学的发展影响不大，但在现代物理学家中，仍可以听到一些类似的错误说法。对于核反应中的“质量亏损”、电子偶的湮没、爱因斯坦的质能公式等新发现，时常有不恰当的叙述，似乎质量与能量可以互相转化，“物质可以消灭”而留下运动。

其实，质能公式只是告诉我们，质量和能量的增减总是平行进行，但是，质量有静质量与动质量之分，能量也有静能与动能之分，动、静质量之间发生的微小转化，与之相伴随的动、静能量之间的转化将是巨大的。所谓质能可以相互转换，其错误在于将质量与静质量、能量与动能混同了起来，完全忽视了质量中还有动质量、能量中还有静能。在任何自然过程中，质量和能量都是分别守恒的。

(2) 物理定律

将运动的相对性说成是运动的相对性原理，这不会引起什么误解。然而，物理学里还有另一些相对性原理，如力学相对性原理、狭义相对性原理、广义相对性原理等，它们却是用来表明物理规律的绝对性，即坐标变换下物理基本规律具有不变的形式；对这些内容冠之以相对性原理，就似乎不那么协调，多少有些令人费解了。不过，所有的这些相对性原理，包括运动的相对性原理在内，都有一个共点同，就是强调了参照系之间的平权，在每个原理论述的范围内，原则上排除了优越的参照系。

① 力学相对性原理

牛顿力学的基本定律原来被认为只是对绝对空间有效的，伽

利略坐标变换(图 4-43)保证了这些力学定律对另一些参照系同样有效,这些参照系就是惯性系。显然,惯性系之间的相对运动,都是沿直线匀速进行的。于是,对所有惯性系而言,力学规律是绝对的,这就是力学相对性原理。这在前面已经讨论过。

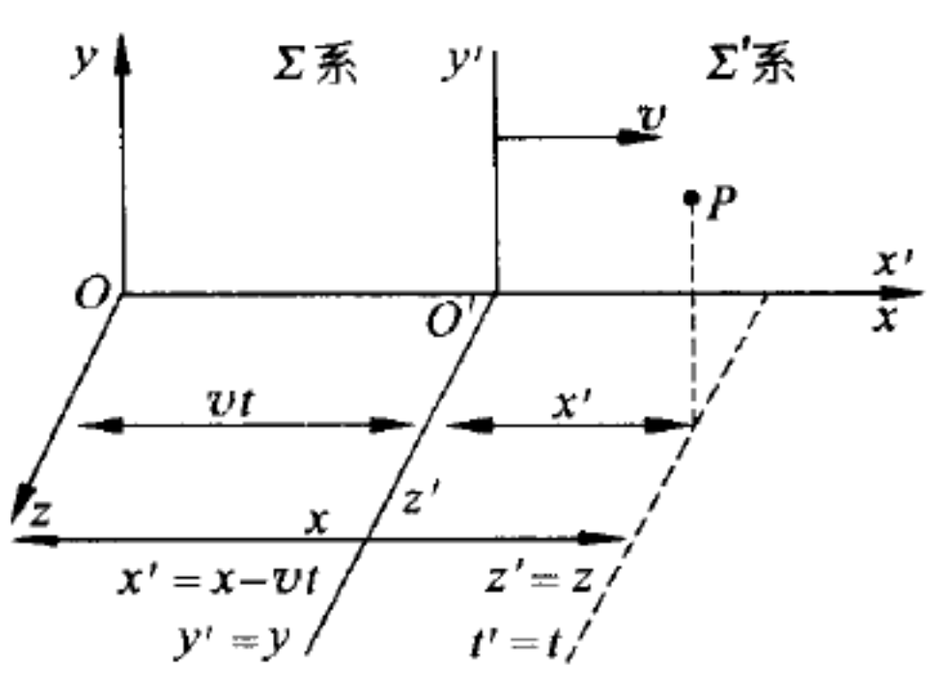


图 4-43　伽利略坐标变换

前文所说:"舟行而不觉也",其实已经涉及到力学相对性原理;伽利略则有更详细更生动的叙述,他在 1632 年出版的《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》中写道:

船停着不动时,你留神观察:小虫都以等速向舱内各方向飞行;……水滴滴进下面的罐子中;你把任何东西扔给你的朋友时,只要距离相等,向这一方向不必比向另一方向用更多的力;你双脚齐跳,无论向哪个方向跳过的距离都相等。……再使船以任何速度前进,只要运动是匀速的,也不忽左忽右的摆动,你将发现,所有上述现象丝毫没有变化,你也无法从其中任何一个现象来确定,船是在运动还是停着不动……。

因此,力学相对性原理又常常被称为伽利略相对性原理。

根据这个原理,我们不难推论出:在任何一个惯性系内,无法用力学规律及机械运动来求自身的绝对速度。牛顿相信绝对空间的存在,他自己建立起来的力学理论,既无法证实它,也不需要它的存在。

② 狭义相对性原理

19 世纪的波动光学，要求宇宙空间充满能够传光的以太媒质，承认这个无所不在的假想媒质，相当于将绝对空间实体化了。无论是早先的弹性以太，还是后来的电磁以太，都被认为是传播光波的载体。设以太系中真空光速为 c，则在任何一个相对以太有绝对运动的惯性系里，真空光速不应该再取 c 值。

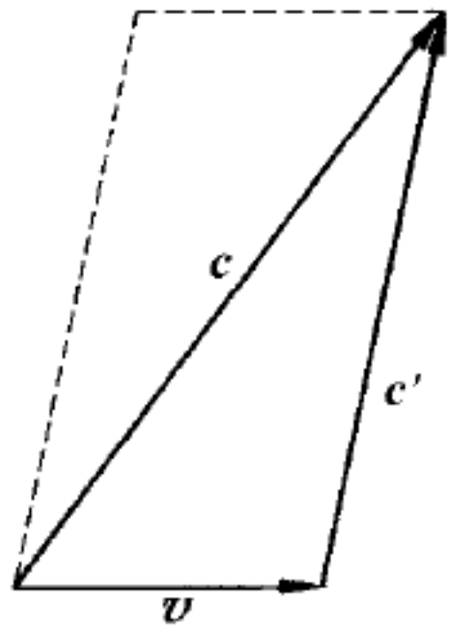


图 4-44　光速的传统变换

若惯性系 Σ' 相对宇宙以太的速度为 v，根据传统的速度变换公式，即平行四边形法则(图 4-44)，光在 Σ' 系内的传播速度 c' 应为

$$c' = c - v$$

于是，光波只是在以太参照系内的传播是各向同性的；光的经典波动理论，使以太系成为惯性系里的特殊参照系。这启发人们使用光学方法来寻找地球的绝对运动；然而，自 19 世纪中期A. H. I. 斐索进行流水实验以后，一些有关运动媒质中光传播的实验，都未能显示出任何绝对运动。虽然如此，只要我们假定地球的绝对速度 v 远小于相对以太的真空光速 c，在计算中能略去 v^2/c^2 及其更高次方的各项，以太理论都能给出令人满意的说明。

在 v/c 很小的情况下，利用光的干涉的这些实验，似乎表明了以太理论的成功。另一方面，又似乎暗示了以太的不必要，因为它们的实验结果都与绝对运动无关，不能给人们带来任何有关以太的信息；爱因斯坦走向狭义相对论，其中就包括了这样一些思考。

J. C. 麦克斯韦的电磁场理论，使以太在惯性系中的特殊地位更加巩固；按照麦克斯韦提出的理论，电磁场是依附于以太的，电磁振动是以太背景上的振动，电磁波则通过以太传播，电磁场的基本方程——麦克斯韦方程组也只是对以太系严格有效，由场方程导出的真空光速 c，其理论值约为 $3\times10^5\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$，当然是相对以

太系而言的。由于地面上测得的真空光速 c' 与 c 值很接近，从而可以认为，前面假定地球的绝对速度 v 远小于 c 是合理的。

v/c 级实验的无能，要求人们改进实验设计并提高实验精度。第一个 v^2/c^2 级干涉实验是由 A. A. 迈克耳孙(Michelson，1852—1931)完成的(1881)，其实验原理如图 4-45 所示，其中 S 为光源，M_1、M_2 是平面反射镜，P 是半透光、半反射的薄片，T 是望远镜；为了保证光路 2 总有可能平行于地球的绝对速度 v，整个装置能够在图面内缓慢旋转，并经常记录望远镜 T 中所观测到的结果。当整个装置如图旋转 90°以后，望远镜中应有干涉条纹移动，据理论计算，条纹移动数 ΔN 应为

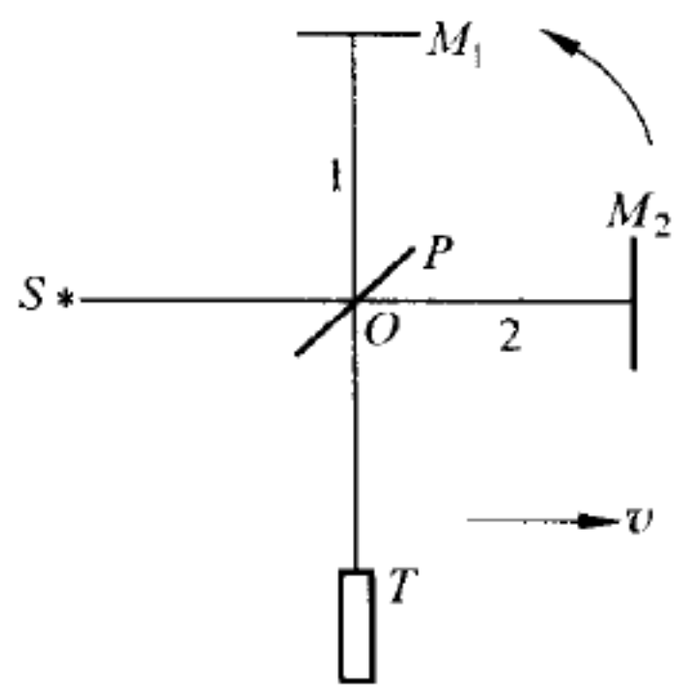


图 4-45　迈克耳孙实验

$$\Delta N \approx \frac{2L}{\lambda}\left(\frac{v}{c}\right)^2$$

适当选择光的波长 λ 和臂长 L(即 OM_1 或 OM_2 的长度)，理应在旋转过程中能观测到干涉条纹的变动；然而，实验结果却是否定的。

后来，这个实验又在不同的季节、不同的地点，甚至在不同的海拔高度上重复过；其中迈克耳孙和 E. W. 莫雷(Morley，1838—1923)的改进实验(1887)，求得 $v<4.7\times10^3\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$。因为地球公转的速度约为 $30\times10^3\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$，如果自然界中确有以太存在，这个结果实际上意味着地球是静止地处在以太里。

要圆满解释迈克耳孙-莫雷实验的否定结果，而又不与其他的已知事实发生冲突，这就使得以太理论左右为难。正当很多人在以太危机中千方百计地挽救以太的时候，爱因斯坦却在着手消除以太的工作。按照爱因斯坦本人的说法，迈克耳孙-莫雷实验及有

关讨论，并没有对他创建狭义相对论起多大作用，他说："直接引导我提出狭义相对论的，是由于我深信：物体在磁场中运动所感生的电动力，不过是一种电场罢了，但是我也受到了斐索实验结果以及光行差现象的指引。"

否认自然界中以太背景的存在，同时也就在惯性系中排除了优越参照系；于是，各个惯性系都应该彼此平权。这就是爱因斯坦创建狭义相对论的出发点，也是总的想法；将这一思想正式肯定下来，就成为狭义相对论的第一条基本原理——狭义相对性原理。爱因斯坦在关于相对论的第一篇文里，这样写道：

诸如此类的例子，以及企图证实地球相对于"光媒质"运动的实验的失败，引起了这样一种猜想：绝对静止这个概念，不仅在力学中，而且在电动力学中也不符合现象的特性，倒是应当认为，凡是对力学方程适用的一切坐标系，对于上述电动力学和光学的定律也一样适用，对于第一级微量来说，这是已经证明了的。我们要把这个猜想（它的内容以后就称之为"相对性原理"）提升为公设……

这里所说的相对性原理，现在常称为狭义相对性原理。

狭义相对性原理　这个原理通常被陈述为：物理学基本定律对所有惯性系有同样的表达形式。

只有这样，各个惯性系在物理上才完全处于彼此平等的地位。可以认为，狭义相对性原理不过是伽利略-牛顿力学相对性原理的推广。这个原理之所以被称为狭义的，是因为它只限于惯性系，而不涉及到一切非惯性参照系；于是，在物理学的基本定律中，实际上还要排除万有引力定律，引力的存在会破坏惯性系所要求的时空均匀性。引力现象与任意的坐标变换紧密相关，对于它们的研究，使爱因斯坦后来又提出了广义相对论。

严格地说，狭义相对性原理只是在惯性系中排除了优越参照系的存在，至于宇宙中是否有着浩瀚的背景物质，它既未否定也未

肯定。现在我们知道，宇宙中确实有 2.7K 的黑体辐射背景存在。

有了狭义相对性原理，还得在落实这个原理的具体方案上作出决策。最容易使人作出的选择是修改麦克斯韦方程组，使之通过伽利略变换后能保持其形式不变。这不仅因为牛顿力学早已登峰造极，多方面显示了它的无比威力，它的基本定律对伽利略变换又能保持其形式不变，而且，伽利略变换所代表的，是自古以来支配了人类几千年的时空观；在一般人看来，这些都是神圣不可侵犯的。

然而，爱因斯坦却反其道而行之，他采取了保留麦克斯韦方程组而修改伽利略变换的研究途径。使麦克斯韦方程组能在新的坐标变换下保持其原有形式不变，这就要敢于向传统的时空观挑战，进而又必然要去触动严谨的牛顿力学。很明显，没有非凡的洞察力和大无畏的革新精神，就不可能作出这样的决策。

前面已经提到，真空光速的理论值是麦克斯韦方程组的一个直接而又重要的结论；既然确认了麦克斯韦方程组在所有惯性系里都同等有效，实质上即确认了所有惯性系里的真空光速都是 c。引用爱因斯坦自己的话来说："麦克斯韦-洛伦兹理论的成就，使人们对空虚空间电磁场方程的有效性深信不疑，因此，也特别相信这样的断言：光是以某一不变的速率 c '在空间里'进行传播的。……为了这些理由，就必须把光速不变定律对于一切惯性系的有效性，提高到原理的地位上来"。于是，爱因斯坦又提出了狭义相对论的第二条基本原理——光速不变原理。

光速不变原理　它可以陈述为：各惯性系里的真空光速都取同一值 c（约 30 万 km/s）。

这个原理表明，在任何一个惯性系里，真空中的光速都是各向同性的，既与光源的运动无关，也与光的频率无关。显然，光速不变的概念与速度变换的平行四边形法则不一致；由此可知，光速不变与传统的时空观尖锐对立着，可以将它作为建立新的时空理论

的起点。

从狭义相对论的基本原理(特别是光速不变原理)的提出,可以看到,爱因斯坦为创建这一理论,确实作出了不朽的贡献。另一方面,也应该强调,狭义相对论的出现,毕竟是大势所趋,是科学发展、技术进步的必然产物。关于这方面的情况就不细谈了。总之,挽救以太的种种努力,都是顾此失彼而不能自圆其说,在这种山穷水尽的形势下,迟早会有人另辟蹊径的。事实上,当时确有一些人已走近狭义相对论的边缘。例如,法国大数学家 J. H. 彭加勒在 1899 年就相信,绝对运动在原则上是找不到的;1904 年,他也曾提出相对性原理,这在前面已作过叙述。

③ 广义相对性原理

狭义相对论只是局限在惯性系里讨论问题,也没有涉及到万有引力现象;为了使相对论能用于加速系并能包括万有引力的内容,爱因斯坦自觉地将狭义相对论扩展为广义相对论,谋求所有坐标系(不限于惯性系)之间的平等,主张"物理学的定律必须具有这样的性质,它们对于以无论哪种方式运动着的参照系都是成立的"。这就是广义相对性原理。为了论证这一观点,爱因斯坦列举了一个大家所熟知的简单事实:

设 $\mathring{K}$ 是一个伽利略参照系,那是这样的一种参照系,相对于它(至少在所考查的四维区域内),有一个同别的物体离得足够远的物体在做直线的匀速运动。设 K' 是第二个坐标系,它相对于 K 做均匀加速的平移运动。因此,一个离开别的物体足够远的物体,相对于 K' 坐标系有一加速运动,而其加速度及其加速度的方向都同这一物体的物质组成和物理状态无关。

一位对 K' 相对静止的观察者能否由此得出结论,说他是在一个"真正的"加速参照系之中呢?回答是否定的;因为相对 K' 自由运动的物体的上述状况可以用下面的方式作同样恰当的解释。参照系 K' 不是加速的;可是在所讨论的时间-空间领域里有一个引

力场在支配着，它使物体得到了相对于 K' 的加速运动。

现在，我们用数学式作一简单概括。设 K' 对惯性系 K 有加速度 a，质量为 m 的物体对 K 做惯性运动；于是，m 物体在 K 系里：

$$\left.\begin{array}{l}\text{合力} = 0\\ \text{加速度} = 0\end{array}\right\}\text{牛顿第二定律有效}$$

在 K' 系里：

传统理解

$$\left.\begin{array}{l}\text{合力} = 0\\ \text{加速度} = -a\end{array}\right\}\text{牛顿第二定律无效}$$

爱氏理解

$$\left.\begin{array}{l}\text{合力} = m(-a)\\ \text{加速度} = -a\end{array}\right\}\text{牛顿第二定律有效}$$

其实，这里引入的力 $m(-a)$ 即通常所说的惯性力，爱因斯坦不过是将惯性力实在化，将惯性力场看做一种类似于万有引力的引力场罢了。惯性力的引入，使我们能够直接在加速系里使用力学定律；尽管如此，长期以来大家都认为惯性力是虚假的，既交代不出这种力的“施主”，也说不清它是哪种类型的力。爱因斯坦却极其认真地对待惯性力，惯性力使力学定律在加速系里也同样有效，这正是广义相对性原理所需要的。

爱因斯坦敢于将惯性力引力化，其根据首先在于惯性质量与引力质量相等。爱因斯坦在《相对论的意义》中写道：

力学里两个物体的质量之比有两种彼此根本不同的定义方式：第一种，作为同一动力与它们的加速度的反比（惯性质量），第二种，作为同一引力场里作用在它们上面的力的比（引力质量）。……经典力学对于这种相等没有提供解释。但是显然只有在将这个数值上的相等化为这两种概念在真实性质上的相等之后，才能在科学上充分证实我们规定的这种数值上的相等是合

理的。

于是，爱因斯坦认为，惯性质量同时又是引力质量，从而对惯性力作出了全新的理解。通过如下的对比：

$$\text{万有引力} = m \times \left(\frac{GM}{r^2}\right)$$

$$= \text{引力质量} \times \text{引力场强度}$$

$$\text{惯性力} = m \times (-a)$$

$$= \text{引力质量} \times (\text{加速度})$$

其结果势必导致承认加速度 K' 中有另一种引力场存在，而 $(-a)$ 即为该引力场的强度。基于这样的认识，才使得“惯性与万有引力的性质归于统一”。

为了说明惯性引力场的产生原因，爱因斯坦从马赫对牛顿水桶实验的批判中找到了答案，认为“一个必然的后果是：惯性来源于物体的一种相互作用”，具体地说，将惯性引力场的起源归之于所有遥远星系构成的整体。

根据上述观点，人们无法在一个封闭的升降机内，用机械运动来判别其中的引力场是惯性力场还是重力场；或者说，无法判别升降机是加速系还是不是加速系。不仅如此，爱因斯坦更进一步将升降机内的力学过程推广为所有的物理过程，认为：无论我们采用何种物理方法（力学的、电磁学的、……），都无法在局部范围内（其中引力场是均匀的）将惯性力场与万有引力场区别开。这就是等效原理，是广义相对论的第二条基本原理。

从惯性质量与引力质量的相等发展到惯性力场的实在化，这不仅为广义相对性原理提供了一个有力的依据，而且通过等效原理，又导致了加速系与万有引力场的统一处理，真是一举两得！从平凡的事物中悟出不同凡响的道理来，这是爱因斯坦才智超群的一个重要方面。

以广义相对性原理和等效原理为基础，爱因斯坦于 1916 年正

式提出了广义相对论。广义相对论的建立及发展，不仅使人类对万有引力以及整个宇宙有了更深刻的认识，而且对时空观又进行了一次革命。然而，爱因斯坦广义相对论的理论基础仍然是有争议的，有些人不同意爱因斯坦对它的基本概念的某些解释；惯性力场究竟是否是物质场，很难说已有定论。尽管如此，无论在理论体系的优美上，还是与实际观测的一致上，爱因斯坦的理论都处于领先的地位；它经受了多次的挑战，战胜了不少对手。

(3) 时空观问题的再讨论

从古至今，世俗对时间、空间的看法有很多绝对观念，常称为绝对时空观。20 世纪以前的物理学，其时空观与世俗是一致的；伽利略-牛顿的时空观则代表了绝对时空观。相对论要求新的时空观，爱因斯坦使物理学的时空思想发生了两次根本性的变革，不仅将空间和时间统一了起来，而且时空与物质运动、物质分布有关。

① 牛顿的时空观

牛顿将世俗的时空观以公理的形式写进了《原理》，由此正式确立了绝对空间和绝对时间的概念。牛顿认为："绝对的、真的及数学的时间，按其自身并按其本质来说，在均匀地流动着，与外界任何对象没有关系。"伽利略变换则定量地表达了这种时空观；在两个相互做匀速运动的参照系里，由伽利略变换，立即有

$$\Delta x = \Delta x'$$

$$\Delta y = \Delta y'$$

$$\Delta z = \Delta z'$$

$$\Delta t = \Delta t'$$

这表明，长度测量和时间测量都是绝对的；当被测物体与观测者之间有相对运动，显然应该同时测定其端点的位置，这导致 $\Delta x = \Delta x'$。不仅如此，在绝对时空观里，时间与空间绝对无关，事件发生的时间顺序是绝对的，异地而同时发生的事件，怎么观测也总是

同时发生的。这里，时空与物质运动、物质分布全然无关。

② 爱因斯坦时空观

传统时空观不仅在人们的思想中早已根深蒂固，即使在当代，日常生活及广泛的工程技术领域里，仍然沿用着绝对时空的概念。相对论要求新的时空观，爱因斯坦却不可能完全抛弃伽利略变换，而只能是发展它、修正它，使它成为新的时空变换的一种极限。

首先，光速不变原理要求放弃绝对时间的概念。我们可以这样设想，对图 4-43 所示的情况，当两惯性系的坐标轴彼此完全重合时在共同的原点有闪光发出，由于这两个坐标系里的光速都是 c，光沿 x 和 x' 轴的传播方程为

$$x = ct$$

$$x' = ct'$$

于是，若仍旧保持 $t=t'$，则总有 $x=x'$，这个结论是不能接受的。

在狭义相对论里，爱因斯坦求得时空坐标的变换式为

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

该式常称为洛伦兹变换。早在狭义相对论提出之前，H. A. 洛伦兹就已经找到了这一组方程式(1903)，而且在这一组时空坐标的变换下，麦克斯韦方程可以保持形式不变；但是，他认为各惯性系所有的“地方时”t 和 t'，不过是只有数学意义的一个辅助量，并不代表真实的时间，爱因斯坦则认为它们都是真实的时间。洛伦兹在去世的前一年(1927)不无遗憾地说道：“对于我，只有真正的时间。我把我的时间变换看做只是启发式的假说。因此，相对论事

实上只是爱因斯坦一个人的工作。”

显然，当 $v \ll c$ 时，洛伦兹变换与伽利略变换趋于一致，这正是我们所期待的。洛伦兹变换不仅与光速不变原理一致，而且对那些曾经使以太理论陷于困境的有关实验，在这里都能得到统一的圆满的说明。

洛伦兹变换从根本上改变了传统的绝对时空观。首先，长度和时间的测量都是相对的，由前式可以导出“动钟缓慢”和“动尺收缩”两大效应，前一效应表明时间的测量以相对静止的测量所得值为最短，后一效应表明长度的测量则以相对静止的测量所得值为最长。由于各个惯性系都有自己的时间标准，一个惯性系里两个事件发生的时间顺序，在另一个惯性系里就可能完全颠倒过来；同时发生的事件不再具有绝对同时的意义。为了保证两个能够有因果联系的事件出现的时序是绝对不变的，狭义相对论限定，物质运动的速度不应超过真空光速 c。

超光（$u > c$）粒子是否真的不存在，仍然有着不同的看法，特别是 1967 年以后，不少人对超光粒子进行了大量的理论研究，也开展了一些实验工作，尽管到目前为止，还没有真正发现这类粒子，还是有人在继续探索。

狭义相对论的时空概念，对传统时空观的偏离是如此之大，以致在使用洛伦兹变换来处理具体问题时，稍有不慎就容易出现矛盾的结果。因此，有关狭义相对论的佯谬特别多，其中以时钟佯谬尤其引人注意。

早在 1905 年，爱因斯坦在他提出狭义相对论的第一篇论文里，就已经将动钟缓慢公式的应用条件放宽。原来所谓的动钟，其实是另一惯性系里的静钟，因而它的运动状态，应该限制在匀速直线运动的范围内。爱因斯坦却认为，动钟的运动状态可以不必受这种限制。如图 4-46 所示，设原来两只时钟 A 和 A' 已对准零点，当 A' 钟以速率 v 任意绕行一周以后，二钟又重新会合，爱因斯坦

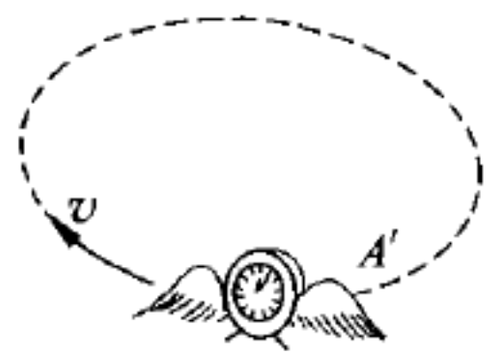


图 4-46　两个不对称的时钟

断言，这时 A' 钟的读数将小于 A 钟的读数，其关系仍满足通常的动钟缓慢公式，即

$$T_{A'}=\sqrt{1-(v/c)^2}\,T_A$$

这种单方面的时钟缓慢效应，与狭义相对论里时间测量的相对性有很大的差别，曾经引起长期而激烈的争论。要对上式给出理论说明，最根本的一点是要注意到：A 钟与 A' 钟始终处于不对称的地位，A 是惯性系里的时钟，而 A' 则是有加速度的，它所在的参照系并不是惯性系。A' 钟是 A 钟所在惯性系里的运动钟，如果能够忽略加速度对动钟带来的影响，则仍可应用上式；反过来，A' 系不是惯性系，A 钟对它的运动并不导致时钟缓慢效应，即

$$T_A\neq\sqrt{1-(v/c)^2}\,T_{A'}$$

在非惯性系里处理问题，原则上需要用到广义相对论的理论；按照这一思路完成的有关计算，其结果与新推得的上式完全一致。而且，1966—1972 年间进行了一系列的有关实验，对此式给予了充分的支持。

本章前述的一对孪生兄弟，其中之一做超高速的宇宙航行后返回地球，按上式，他将比留下来的孪生兄弟显得年轻！以上讨论了这种时钟佯谬，常称之为孪生子佯谬。然而，这只是在超高速（v 近似为 c）的飞行条件下，才有较大的效果；对于人类现有的技术水平及知识储备，它是难以实现的。

洛伦兹变换使时空坐标的变换彼此交织在一起，而且时空的量度与观测者的运动状态有关，或者反过来说，时空与物质的运动有关；然而，每一个惯性系里的时空仍然是到处均匀的，空间也是各向同性的，这表明，狭义相对论的时空与物质的分布无关。只是

在广义相对论里，由于涉及到万有引力及非惯性系，时空才依赖于物质的分布；在那里，时空不再是到处均匀的，空间也不再各向同性。

(4) 物理量的问题

常常会听到这样一些说法：牛顿力学是绝对的，牛顿将什么都绝对化了；爱因斯坦的相对论则将什么都相对化了，“每件事都是相对的”。这种简单化的理解既不全面，也欠正确。我们在前面已经说明，相对论的物理规律，在坐标变换下能保持其定律形式绝对不变，因果关系及相应的时序也是绝对的。

不管怎么说，“相对论”这几个字毕竟容易使人产生上述的误解。A. 索末菲多次表示，相对论的命名是不幸的选择。1921 年，爱因斯坦在一封私人信件中也认为，他并不喜欢这个词。其实，爱因斯坦的相对论比牛顿-麦克斯韦的古典物理学更全面、更深刻地贯彻了绝对观念。以下仅就物理量在变换参照系时的表现作一些补充说明，主要是将狭义相对论与古典物理理论里的物理量进行比较。

① 古典物理学里的物理量

在牛顿-麦克斯韦的物理理论里，确实有很多物理量及有关概念是绝对的，它们对各种观测者一视同仁，质量、力、势能、温度、热量、电场强度等物理量都是不变量。时空观是绝对的；电场与磁场的区分也是绝对的；动生电动势与场生(常称为感生)电动势之间，绝对地不能相互转化。

尽管古典物理理论中有着很多绝对化了的物理概念，但这种局限性却是人类在认识自然的过程中不可避免地要出现的，并且在一定范围内，它们是客观世界的极好的近似模写，即使在今天的宇航飞行中，牛顿力学仍然以很高的精确度发挥作用。

另一方面，古典物理学中也还是有一些物理量是相对的，例如，由于运动描述的相对性，就引出一系列相对的物理量，速度、动

能、动量、功等都不是不变量；而且，它们不具有任何的绝对意义，或者说，它们是完全相对的。于是，我们似乎可以说，牛顿力学的绝对是不彻底的绝对。

② 狭义相对论里的物理量

相对论否定了绝对时空观，时间和长度的量值都是相对的，但在洛伦兹变换下，时间坐标和空间坐标却可以组成绝对的不变量，即有

$$x^2+y^2+z^2-c^2t^2=x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2$$

$$\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2-c^2\Delta t^2=\Delta x'^2+\Delta y'^2+\Delta z'^2-c^2\Delta t'^2$$

它们进一步表明时空是一个统一的整体；将时空分开来看，彼此都是相对的，而统一起来又显示出绝对性。于是，当我们取

$$x_1=x$$

$$x_2=y$$

$$x_3=z$$

$$x_4=ict$$

则不变量等式可改写为

$$x_1^2+x_2^2+x_3^2+x_4^2=x'^2_1+x'^2_2+x'^2_3+x'^2_4$$

$$\Delta x_1^2+\Delta x_2^2+\Delta x_3^2+\Delta x_1^2=\Delta x'^2_1+\Delta x'^2_2+\Delta x'^2_3+\Delta x'^2_4$$

这种对称形式清楚地表明，在每一个惯性系里，一维时间和三维空间共同形成了一个四维的赝欧几里得空间；其所以是赝的，因为第四维的坐标 x_4 是虚的。四维时空的建立应归功于 H. 闵可夫斯基(Minkowski，1864—1909)，他有句名言："从今以后，空间本身和时间本身都已成为阴影，只有两者的结合才保持独立的存在。"

在狭义相对论里，极少数的物理量(如电荷、熵等)是洛伦兹变换下的不变量；绝大多数都是要变的，却又两两组成一个四维矢量或张量，它们都各自形成不变量。例如，通常的三维速度是相对的，它与真空光速的适当组合可以构成一个四维速度，而四维矢量的大小是不变量；又如，粒子的动量和能量分别都是相对量，当它

们组合成四维动量矢量就能显示出不变性。于是，运动既有守恒性又有不变性，无论从纵向或横向来看待运动，运动都是绝对的。

既然麦克斯韦方程组对所有惯性系一律有效，就必然导致洛伦兹变换下电现象与磁现象之间的相互转化。若某一惯性系里有两个静止的电荷，则该惯性系空间仅有静电场，两电荷之间的作用为库仑力；设另一惯性系对前一惯性系有相对运动，则现在空间里既有电场还有磁场，电荷所受的作用除了电力还有磁力。这表明，我们无法绝对地谈论电场或磁场，它们不过是同一个电磁场在不同侧面的表现；只是在相对论里，电场与磁场才得到真正的统一。电场强度 E 与磁感应强度 B 共同形成一个二阶的四维张量，使电场的变换与磁场的变换交织在一起，而且显示出组合不变量：

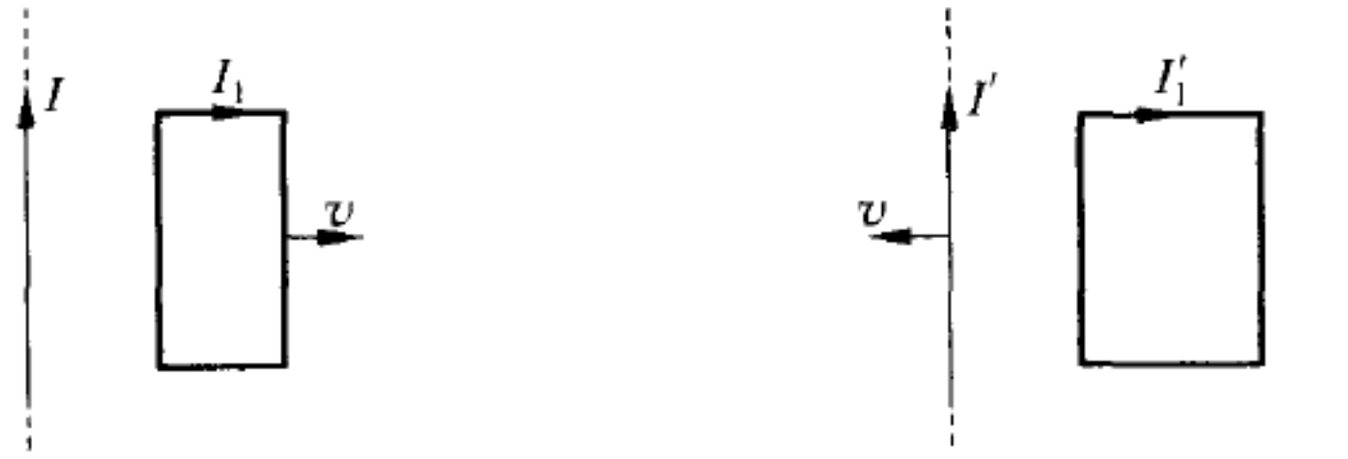
$$E_1^2 - c^2 B_1^2 = E_2^2 - c^2 B_2^2 = \cdots\cdots = \text{恒量}$$

$$E_1 B_1 \cos\theta_1 = E_2 B_2 \cos\theta_2 = \cdots\cdots = \text{恒量}$$

式中，E_1、B_1 为惯性系 Σ_1 里的电场强度、磁感应强度；θ_1 为二者之间的夹角；E_2、B_2 为惯性系 Σ_2 里的电场强度、磁感应强度；θ_2 为二者之间的夹角；如此等等。当然，仅仅依靠这两个等式，我们仍无法由已知的 E_1、B_1 来确定未知的 E_2、B_2；但是，这两个关系式却可以保证，电磁场的某些主要特征不会随参照系的变换而改变，从而在场强描述的相对性中显示出绝对性。例如，若在惯性系 Σ_1 里 $E_1 > cB_1$，则在任何一个惯性系里都有 $E > cB$；又如若惯性系 Σ_1 里只有电场或者只有磁场，则在另一个既有电场又有磁场的惯性系里，E 与 B 一定是正交的，即 $\cos\theta = 0$。

前面已经提到，促使爱因斯坦创建狭义相对论来取代以太理论，很重要的一点是爱因斯坦对电磁感应效应的相对性深信不疑。大家知道，按照电磁感应产生的原因，基本上可分为两大类：一类是由于运动导线在磁场中切割磁力线而引起的，磁场本身并不随时间变化，其电动势称为动生电动势；另一类的磁场却是随时间变化的，随时间变化的磁场要在它的周围产生涡旋电场，由此导致的

电动势可称为场生电动势。导线运动与否、磁场是否随时间变化，都与观测的参照系有关，所以，电磁感应的这种区分，显然不再应该是绝对的。图 4-47 表示了对同一个矩形线圈中的电磁感应现象，处于不同惯性系里的观测都有不同的理解。



(a) Σ 系中为动生电动势　　(b) Σ′系中为场生电动势

图 4-47　电磁感应的相对性

关于热力学中基本物理量的洛伦兹变换，M. 普朗克(1907)及爱因斯坦等人最早给出温度 T 和热量 δQ 的变换关系为

$$T = \sqrt{1-v^2/c^2}\,T_0$$

$$\delta Q = \sqrt{1-v^2/c^2}\,\delta Q_0$$

其中带角标 0 者为静测量值。1923 年，A. S. 爱丁顿曾提出不同看法，未能引起大家的重视。1963—1969 年 H. 奥特(Ott)及 C. 梅勒(Mφller，1904—1980)等人纷纷主张

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

$$\delta Q = \frac{\delta Q_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

从而引起一场热烈的争论，甚至还有人认为温度为不变量，即 $T=T_0$；分歧的原因，主要在于彼此对功、热的区别持不同的见解，一时难以形成统一的认识。

总之，相对论中很多的物理量，单个地看是相对的，而一对一对地组合起来又可以是绝对的。于是，在相对论中每一个物理量都参与了不变性。从这个意义上来说，爱因斯坦的理论比牛顿的理论更彻底地贯穿着绝对性；这种绝对性蕴藏在表面的相对性之内，其意义也就更加深刻。

第 5 章　对微观物质世界结构认识的发展史

5.1　不同层次上的物质构造

1. 利用工具的观测

人类对物质世界的大小认识是从人类自身的高度(器官的长度)开始的,这种认识是向两个方向延伸,一个方向是向尺度大的方向,这就是利用光学法(光学望远镜、射电望远镜)测距,以及利用多普勒效应去研究天体、宇宙;另一个方向是向分子、原子的尺度上发展,其观测手段则是利用光学显微镜去观测人们肉眼所不能观测的微小的物体,如利用光学显微镜去观测微生物(图 5-1)。利用光学显微镜观测也被有些人称之为用光(光子)来进行观测的方法。再深入下去则是利用电子显微镜来观测,也就是所谓的用电子来"看"原子的方法(图 5-2)。而在物质结构的理论研究方面,则有玻尔模型,并且对典型的氢原子用薛定谔方程来进行定量计算,进一步科学家又把视线转向半径只有原子线度万分之一大小而质量却占有大部分原子质量的"核"。原子核是什么?原子核是由什么构成的?原子核能不能再分?……这些很自然地成为人们关心的问题,也就是科学家们研究的目标了。这就形成了新的物理分支——原子核物理学和基本粒子物理学。物理学不同分支学科与所研究结构的尺度如图 5-3 所示。从物质结构层次化的图示来看,物理学的主要空白区域突出地显示为图中的底部和顶部。其一是尺度上最微小但能量最高的世界,对应的学科为粒子物理学(亦称高能物理学);其二是最宏大的世界,即天体与宇宙,对应

的学科为天体物理学和宇宙论。这两者表面上看来南辕北辙，结果却殊途同归，有合二为一的趋向。

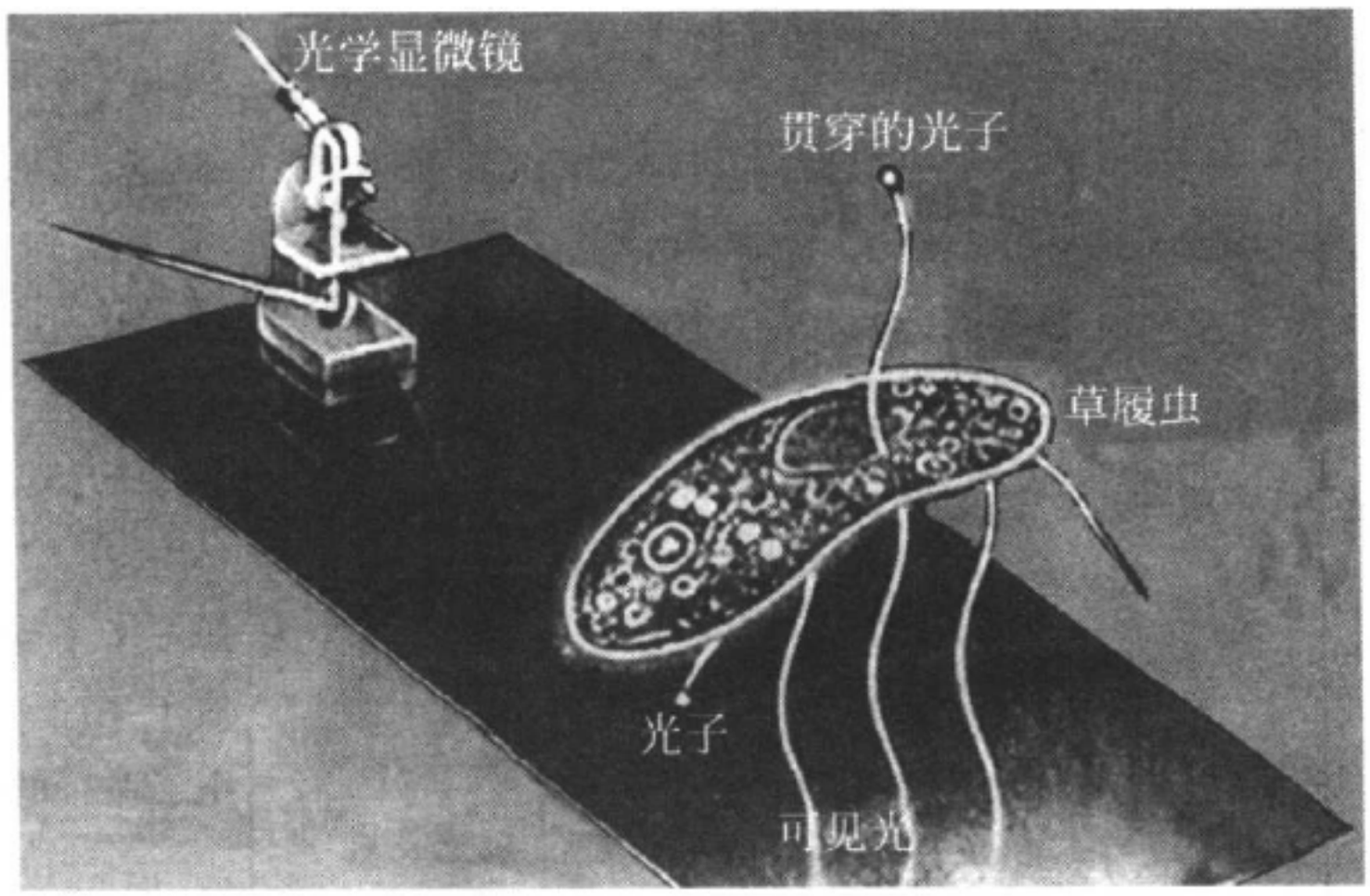


图 5-1　光学显微镜——用光来观测微生物

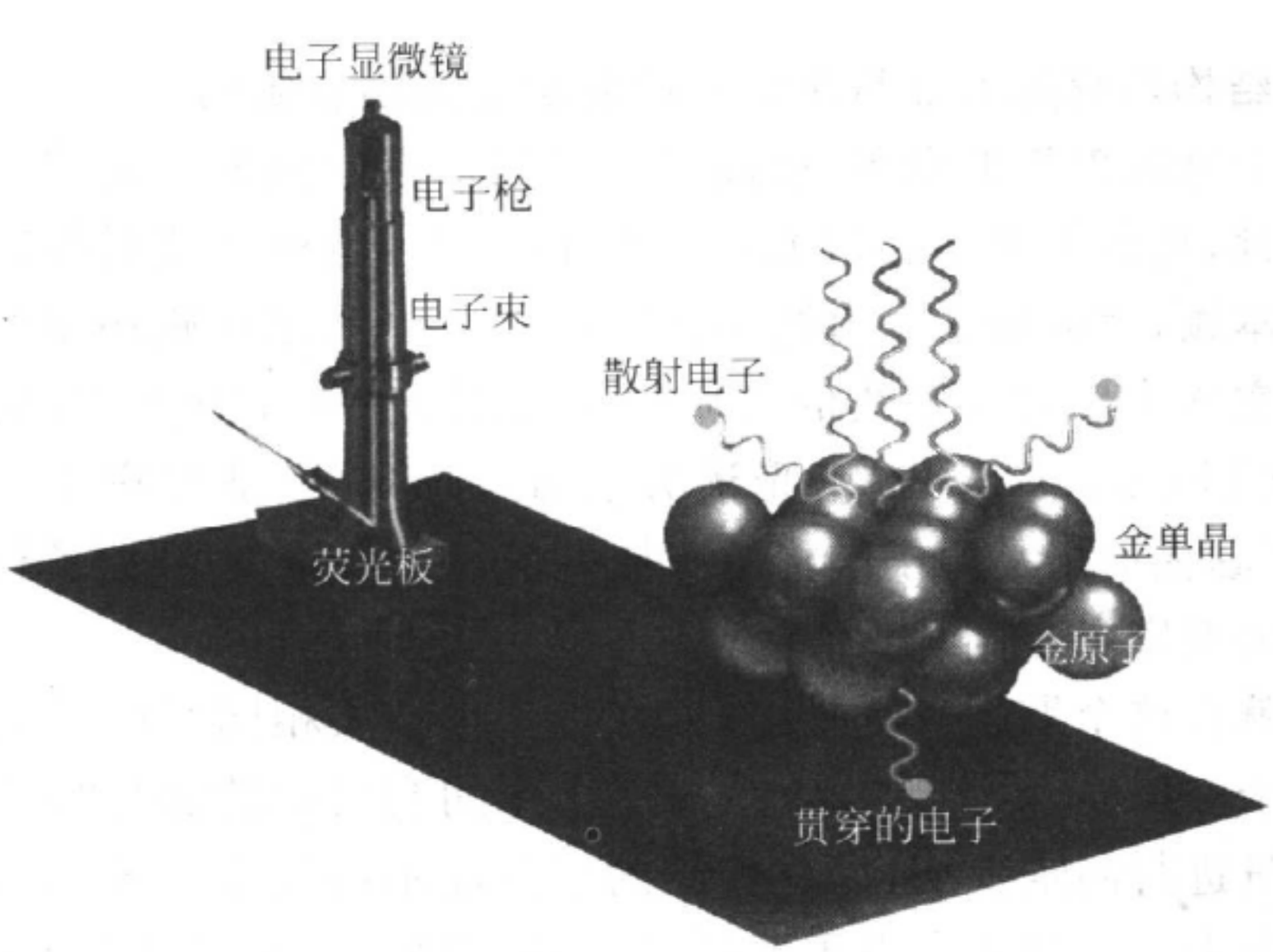


图 5-2　电子显微镜——用电子来“看”原子

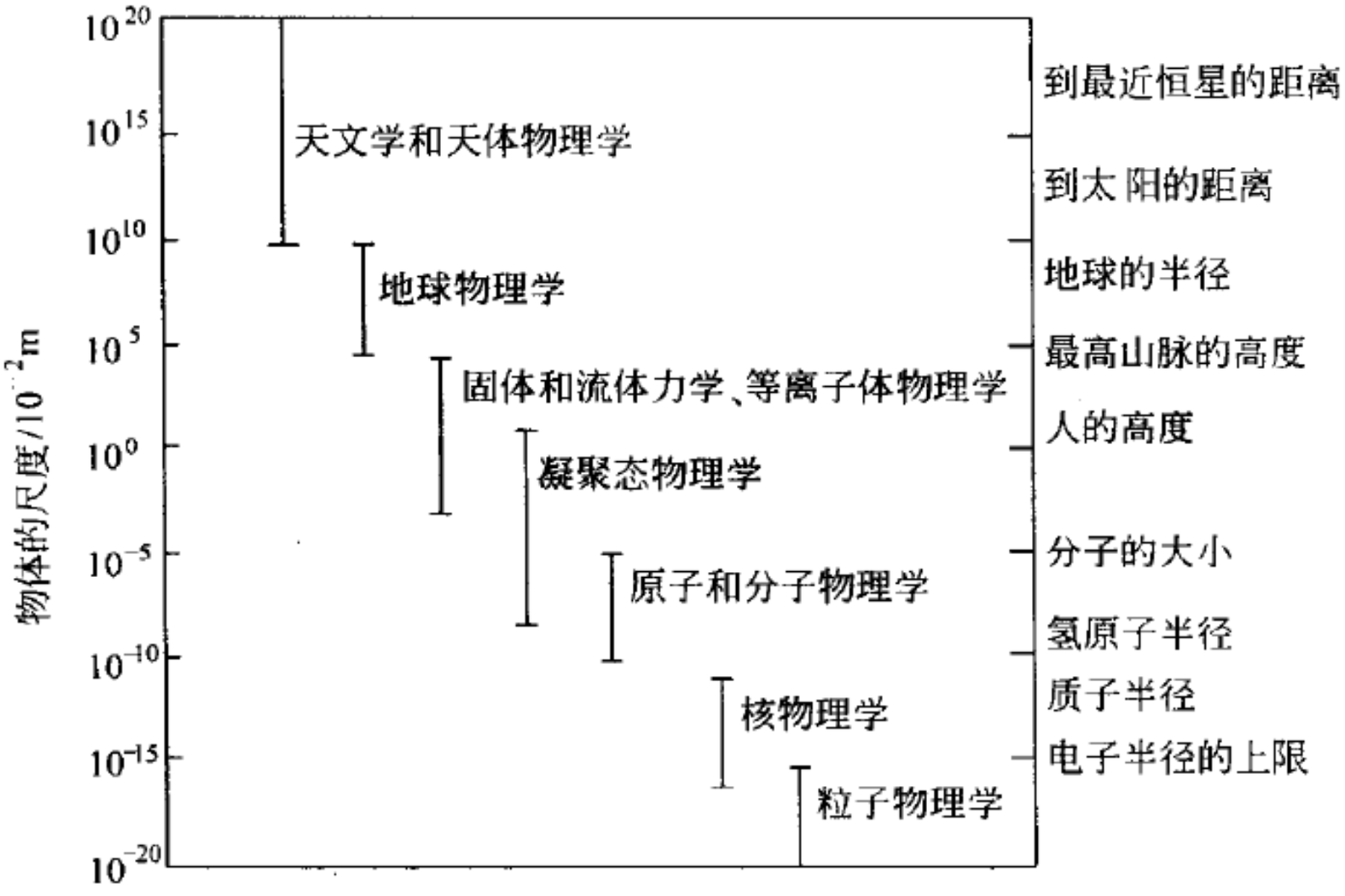


图 5-3　物理学不同分支学科与所研究结构的尺度

2. 核结构与核裂变显示出的不同层次上的物质结构

天然放射性的发现，前面已经讲过。卢瑟福为了确定 α 射线的本性，进行了多年的研究。早在 1899 年，他根据放射性辐射的穿透本领，就区别了 α 射线和 β 射线；1903 年，他从磁场使射线偏转的实验中发现 α 射线的荷质比和氦原子相同；1909 年，他同罗伊兹(Thomas Royds)用光谱方法证实 α 粒子是氦离子。1911 年，卢瑟福提出了原子结构的有核模型，为原子物理和原子核物理的发展奠定了基础。

就在这个期间，人们发现存在着化学性质相同而原子量不同的原子。J. J. 汤姆逊在 1910—1911 年间利用偏转法对“阳射线”的质量进行测定发现，“阳射线”的质量随不同气体而异，原来，它们是失去一个或多个电子的原子；他还发现，氖元素是由 20 倍和 22 倍氢质量的两类原子组成的。1913 年，索第根据他所做的放射

性实验，认识到存在着化学性质完全相同但质量不同的若干元素，他把它们叫做“同位素(isotope)”，意思是在周期表上位于相同的位置。索第还推断，作为铀放射系列终点的铅的原子量应为 206，作为钍放射系列终点的铅的原子量是 208。他的预言后来为实验所证实。

在此基础上，索第假定原子核是由 α 粒子(可能还有氢原子)和电子组成的。到 1913 年，人们认为原子核中包含有足够数量的 α 粒子和电子。前者是为了解释元素的原子量所必需的，后者为了说明元素处于周期表中的相应位置。

既然原子核是由粒子构成的，可否用一个粒子击出一个或几个粒子呢？

1919 年，卢瑟福做了用镭放射出 α 粒子去轰击氮原子核的实验。从氮中释放一个射程长于 α 粒子的粒子，卢瑟福认为这是“由于氮原子(核)在与快速 α 粒子相碰时产生的巨大的力的作用而解体，而此时释放出的氢原子乃是氮核的组成部分。”卢瑟福把它叫做“质子”。这样，在 20 世纪 20 年代，原子核包含有质子已被人们所公认，也就是原子核是由带负电的电子和带正电子的质子所组成的。

但是，人们不久就发现，原子核由质子和电子组成的假说遇到了严重的困难。1925 年，乌伦贝克(George Eugene Uhlenbeck)和古兹米特(Semuel Abraham Goudsmit)根据光谱提出，电子具有自旋，它自旋的量子数等于 1/2；很快就弄清楚了，质子的自旋也等于 1/2。这样，对氮核来说，由于它有 14 个质子和 7 个电子，因而这些粒子的总自旋数应取分数值。然而，实验表明，氮原子核的自旋等于 1。原子核的“质子-电子”假说遇到的另一个困难是，根据海森伯 1927 年提出的测不准原理，把电子束缚在很小的核的体积内，它的动量将有很大的不确定性，因而，它在核内逗留的时间就不可能超过几分之一秒。这些都使人们怀疑原子核内可能有

其他粒子存在。

首先发现原子核中有中子的是查德威克，中子的发现对核物理的发展有着重要意义。

J. 查德威克(James Chadwick，1891—1974)于1891年10月20日生于英国的曼彻斯特。1908年以前他曾在曼彻斯特高级中学读书，1911年，毕业于曼彻斯特大学物理专业。此后两年中，查德威克在卢瑟福的指导下，在曼彻斯特物理实验室从事各种放射性现象的研究，1913年获硕士学位。同年，他到柏林夏洛滕堡技术物理研究所，在盖革(Hans Geiger，1882—1945)教授的指导下继续从事原子物理的研究工作。他于1919年回到英国，继续在卢瑟福的指导下工作。在剑桥大学，他参加了卢瑟福用α粒子轰击氢元素蜕变的研究工作，并对原子核的特性和结构进行了研究。

1921—1935年间，查德威克应聘到冈维尔和凯恩斯学院工作，1923—1935年间任卡文迪什实验室副研究主任，1927年，被选为英国皇家学会会员。

1932年，查德威克发现了中子，同年获得皇家学会休斯奖章；1935年因发现中子获诺贝尔物理学奖。就在这一年，查德威克被推选主持利物浦大学昂琼斯物理学讲座。

1943—1946年，查德威克去美国工作，担任制造原子弹的曼哈顿计划的英国代表团团长。回国后，1948—1959年任剑桥大学冈维尔和凯恩斯学院院长，致力于核物理、粒子物理的研究。

中子发现的过程大致可分为两个阶段：第一阶段是关于原子核中存在中性粒子假说的提出和探索性的实验研究；第二阶段是与中子发现直接有关的工作。

1920年美国化学家哈金斯(W. D. Harkins，1873—1951)就提出了中子存在的设想，但这仅仅是一种假说而已。实际上卢瑟福提出存在中子的假设是以实验为依据的。当时曾试图使强电流通过氢放电管来探测这种假设的“中子”的生成，均未获得成功。

1930年，德国科学家波特（Walther Welhelm Georg Bothe，1891—1957）和贝克（H. Becker）用α粒子轰击较轻的元素，特别是轰击铍时，发现从铍中发射出一种贯穿力很强的中性辐射。这两位物理学家认为，这是一种高能电磁辐射，即“高能γ量子”，这些γ辐射的能量几乎是入射的α射线能量的10倍。

波特和贝克的工作引起了许多物理学家的兴趣，许多人都在自己的实验室中重复他们的实验。其中约里奥·居里夫妇（Frederic Joliot Curic，1900—1958，Irene Joliot—Curie，1897—1956）所做的卓越实验，可认为是中子发现史上的一个转折点。1931年，他们进一步用来自铍的新射线去轰击石蜡，发现这种从铍放射出的新射线能从石蜡中打出强质子束来。1932年1月11日，他们向巴黎科学院报告了这一结果。约里奥·居里夫妇把这一现象解释为γ光子同质子的康普顿散射。但是，非常明显的是，这种散射比当时已知的任何类似的散射所产生的作用要强100万倍，但他们并没有深入探求这个现象的解释，因而错过了发现中子的机会。

1932年1月底，约里奥·居里夫妇的论文传到了卡文迪许实验室，查德威克把论文的内容告诉了卢瑟福。据说，卢瑟福听了他们提出的这种解释时大声喊道：“我不相信。”查德威克也不相信这种解释。但他经过一番思考随即意识到：反冲质子有这样大的能量绝不可能是光子碰撞的结果，而很可能就是10年前卢瑟福所预言的中性粒子碰撞所致。查德威克用如图5-4所示的装置对这种新射线的性质进行了深入的研究。他用钋加铍作为源，使用这种新射线去轰击氢、氦、氮等元素。他通过比较这些反冲进而估算出，这种射线的粒子的质量与质子的质量近乎相等。他把这种射线的粒子称为中子，于1932年2月17日写信给《自然》杂志社，并于2月27日以题为“中子存在的可能性”的论文发表了他的研究结果。

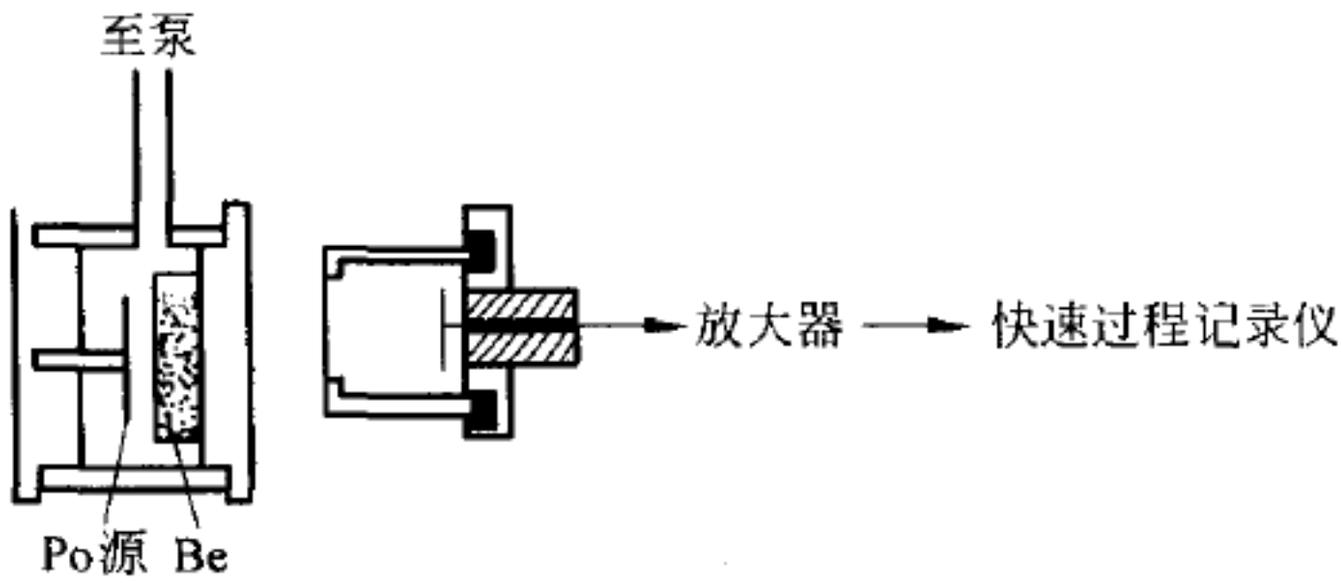


图 5-4　查德威克发现中子的装置简图

中子的发现使人们对原子核结构有了新的认识，1932 年前苏联科学家伊凡宁科就提出了原子核是仅由中子和质子所构成、不含电子的观点，海森伯也发表了核内只含有质子和中子的论述并进一步计算核的有关参数，如原子核质量、电荷、自旋、磁矩、统计规律等，这样原子核构成的理论就由质子-电子理论进步到质子-中子理论了。

进而，人们又对原子核的模型作了研究，但至今尚未有一个统一的为人们一致公认的结构模型，往往是一个模型在解释某一性质时比较成功，但在其他方面又遇到了困难。目前，这些模型中比较重要的有：液滴模型、α 粒子模型、费米气体模型、壳层模型、单粒子壳模型、多粒子壳模型、集体运动模型，以及把集体运动模型和壳层模型统一起来的统一模型等。

目前对于原子核的微观机理还不是很清楚，对于原子核的内部结构及其运动规律仍然是人们正在进行探索的一个重大课题。

在研究原子核内部结构中，人们都是利用天然放射性物质释放出的射线去轰击其他原子核的。1919 年卢瑟福曾用 α 粒子轰击氮原子，发现氮原子被轰击后释放出了质子，其过程是：

$$^{14}_{7}\mathrm{N}+^{4}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow{}^{17}_{8}\mathrm{O}+^{1}_{1}\mathrm{H}$$

这个实验的成功是人类有史以来首次通过有意识的行为改变原子核，但若用α粒子去轰击重元素原子核时，却不会产生上述现象。这表明，由于整个原子核是带正电的，天然放射的α粒子要接近并击中重元素原子核是困难的。这样，实验又从另一方面启示人们必须用质子通过电场或磁场加速，使之具有足够大的能量才行。1929年卢瑟福的学生科克洛夫特和沃尔顿建成了第一台60万～80万伏静电加速器，并成功地用加速了的质子去轰击锂。他们因此而获得1951年度的诺贝尔物理学奖。

1930年，劳伦斯（Ernest Orlando Lawrence，1901—1958）设计制造了第一台回旋加速器；1932年，做出了用回旋加速器加速粒子实现人工核反应的第一个报道。从此以后，世界各地的许多实验室都在设计和建造回旋加速器。

回旋加速器为核研究提供了强有力的手段和方法，使核物理学得到了蓬勃的发展。劳伦斯由于发明了回旋加速器和有关人工放射性方面研究的成果而获得了1939年诺贝尔物理学奖。

在用天然放射的α粒子轰击的工作中，一个值得提出的结果引起了人们的重视：1934年约里奥·居里夫妇用钋源放射出的α粒子轰击铝时，发现轰击后的铝有正β射线放出，并持续几分钟，其反应是：

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{4}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow{}^{30}_{15}\mathrm{P}+^{1}_{0}\mathrm{n}$$

$$^{30}_{15}\mathrm{P}\longrightarrow{}^{30}_{14}\mathrm{Si}+^{0}_{1}\mathrm{e}$$

磷的同位素半衰期约有3min，这种同位素不是天然同位素，因此，就得出了可利用α粒子轰击出人工同位素，这是历史上的首次发现。而且，它又是人工放射性的发现，是人工实现核反应的一大重要突破。约里奥·居里夫妇为此获得1935年的诺贝尔化学奖。这时，人们在想，能否使重元素也能发生分裂呢？

1934年，费米在他的同事阿玛第（Eduardo Amaldi）、达高斯蒂诺（Oscar D'agostino）、拉瑟蒂（Franeo Rasetti）、赛格雷（Emilis

Segre)等人的帮助下，以极其简陋设备的条件，用中子对周期表中的元素逐个地进行轰击，进行系统的研究。开始时，用中子对从氢到氧进行轰击，都没有成功，但到氟时，则获得了强烈的放射性同位素。在短短的几个月内，他们就用中子轰击了63种元素，并得到了37种放射性同位素。特别重要的是，当他们用中子轰击第92号元素铀时，发现它产生的放射性元素不是一种，而且至少有一种是当时元素表中没有的元素（超铀元素），当时，费米把第93和第94号元素称为Neptunium和Plutonium（即现在的镎和钚）。

1934年10月，费米和他的同事在研究银的人工放射性现象的实验时发现，透过石蜡块的中子在产生核反应方面的效果要比直接从中子源出来的中子有效得多，甚至要增大到100倍。费米认为，这是由于石蜡含有大量氢，中子通过石蜡时与氢核碰撞失去了一部分能量，其速度减小变为慢中子，这种慢中子经过原子核附近的时间延长了，因而它被俘获的机会自然就增大了。费米的这一发现不仅使人工放射性物质代替价格昂贵的天然放射性物质成为可能，更重要的是它为核能的释放和利用提供了必要的手段。

在费米宣布发现超铀元素的同时，哈恩和迈特纳也在研究用中子轰击铀的产物。他们从玻尔提出的原子核的液滴模型出发，与细胞分裂进行类比，设想铀原子可能进行了一种核分裂，钡与其他元素正是铀分裂后的产物。1939年2月，他们在美国《自然》杂志上发表了题为《中子引起的铀分裂：新型核反应》的论文，在这篇文章中，他们写道："……因此，看来有这种可能性，铀核只有小的结构和稳定性，因而在俘获中子后，它自身可能分成大致相等的两个核。以核的半径和电荷计算，这两个核将相互排斥，并获得200MeV（1MeV＝10^6eV）的总动能。""分裂之后……可能每一部分都会出现一系列蜕变。如果其中一部分是钡

的同位素，那另一部分就会是氪（$Z=92-56=36$），它经过铷、锶、钇而衰变成锆。”在这里，他们对铀核分裂的物理图像、分裂机制、分裂产物等都给出了明确的分析，同时，还指出了进行实验验证的方法。

1939 年初，费米得知了发现核裂变的消息，立即全力投入了铀的研究；还有约里奥·居里夫妇和西拉德（L. Szilard，1898—1964）等人都分别独立地证实了链式反应不仅可能，而且速率很高。这表明，铀核裂变的链式反应一旦实现，极短时间内将有巨大的能量释放出来。

这就是费米用中子轰击原子核取得成果的重大意义，他也因此获得 1938 年诺贝尔物理学奖。

E. 费米 1901 年 9 月 29 日生于意大利的罗马。1918 年取得了比萨高等师范学院的助学金，于 1922 年以一篇有关伦琴射线的论文取得博士学位。

1923 年，费米获得了政府的奖学金，出国考察。他在哥廷根与 M. 玻恩教授一起工作了几个月。1924 年，他到了莱顿与埃伦菲斯特一起工作，同年返回意大利，在佛罗伦萨大学主持数学物理和力学讲座两年。1927—1938 年间，费米被选为罗马大学理论物理学教授。1938 年，费米因发现慢中子和用中子轰击原子核产生人工放射性而获得诺贝尔物理奖。费米和他的助手们在核物理学研究方面的一系列重大成就，使罗马曾一度成为世界的物理学中心之一。由于墨索里尼的迫害，费米一家不得不在 1938 年利用到瑞典领取诺贝尔奖金的机会迁居美国，1944 年成为美国公民，1954 年 11 月 28 日于芝加哥逝世。

1938 年，费米无疑已是中子方面的最高权威。他到美国后，继续在这方面进行研究，为原子反应堆和首次受控链式反应进行了一系列极为重要的实验，为建造世界上第一座原子反应堆和第一颗原子弹作出了重要贡献。

费米是20世纪杰出的物理学家，他在理论物理学、实验物理学方向都有很多建树。曾有人评价说：随着专业化的不断增长，我们要再次看到像费米这样一位多才多艺的杰出人物的概率是很小的。

除了重核裂变外，轻核聚变也是获得核能的一种方法。但是要使轻核聚变必须使聚变物质具有足够大的能量才可能进行，这种在高温下的轻核聚变反应也叫做热核反应，用人工方法进行的热核反应是人工热核反应。氢弹就是利用人工方法的热核反应得到一种爆炸。

除了利用核裂变来观测外，上述利用核裂变出来的α粒子作为“炮弹”来轰击原子核，也得出许多有意思的结果，但是为了使这个“炮弹”的能量更大，又发明了前述的加速器，让粒子通过回旋加速，或直线加速获得足够的能量来轰击原子核，图5-5是一个直线加速器的图形，发展下去还有用正、负电子对撞来获得更大能量的装置，如图5-6所示。有关正、负电子对撞的问题后面还将详细叙述。

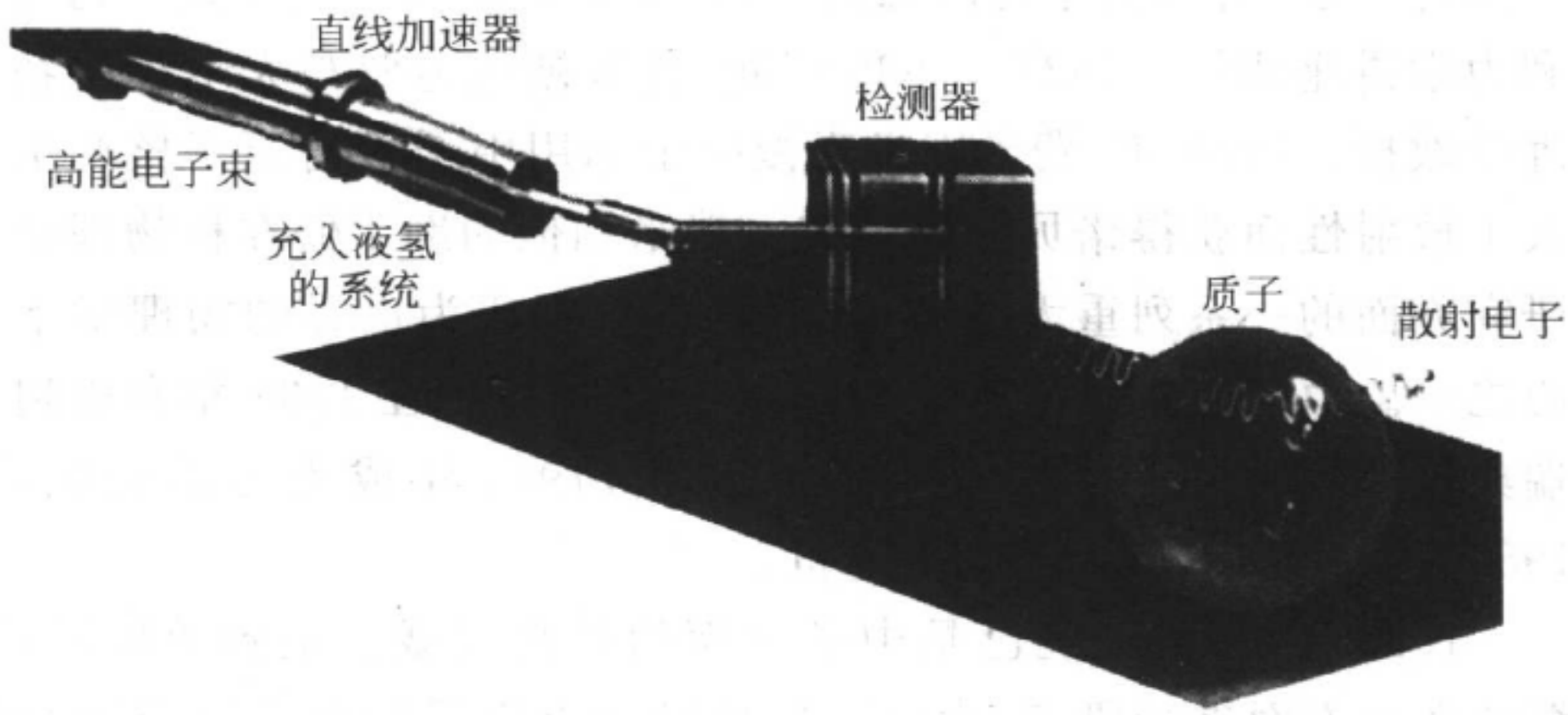


图5-5　直线加速器——用电子和质子“看”粒子的内部

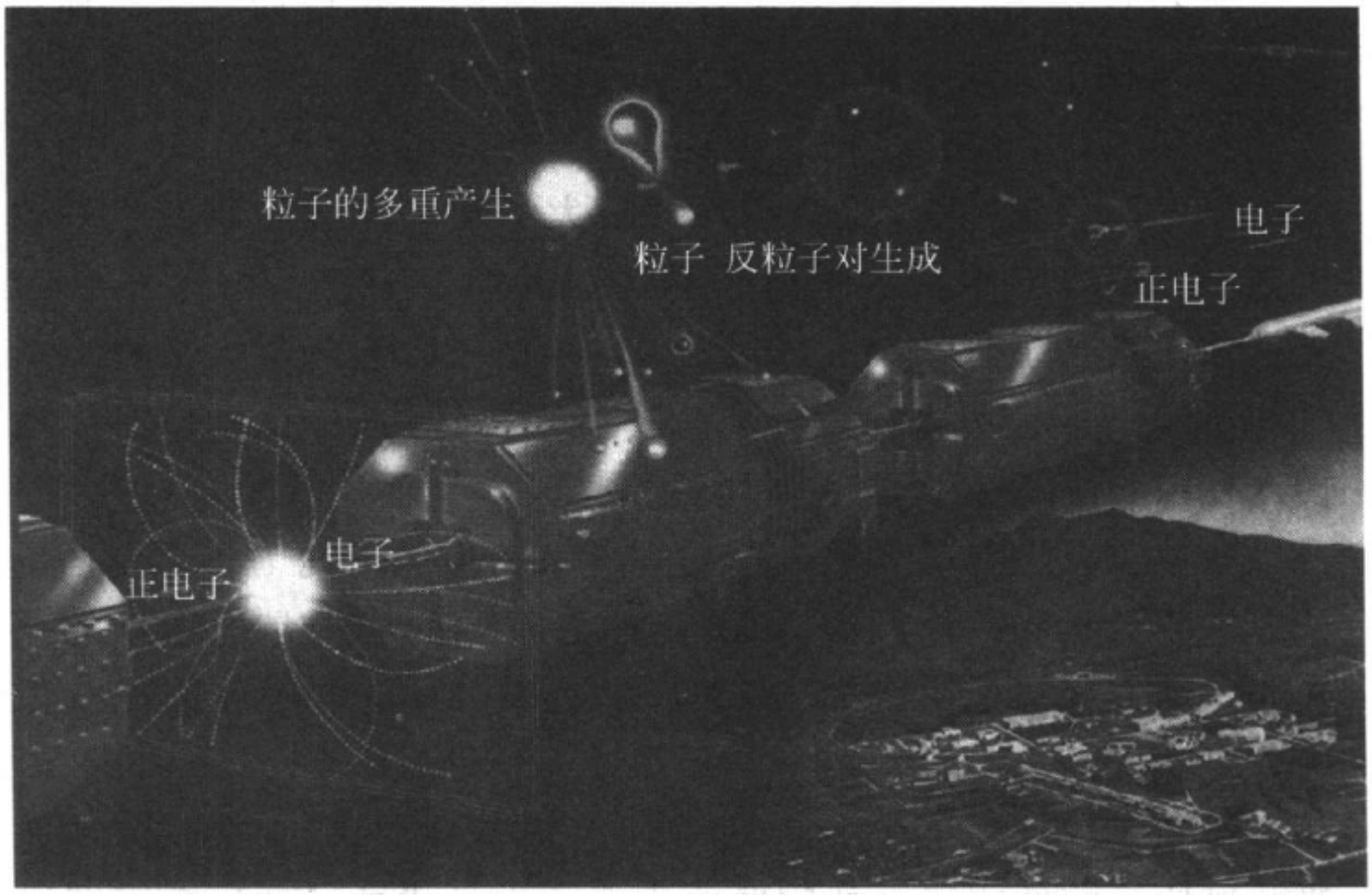


图 5-6　有 300 亿 eV 能量的正负电子对撞机

5.2　物质基本构造探秘

1.“基本”粒子的性质及规律

从 1897 年汤姆逊发现电子以来，到 1932 年已发现的粒子有电子、质子、光子、中子等 4 种，当时认为电子、质子等已是物质世界最小的“基元”，不可再分了，因而，将它们称为“基本粒子”。后来，进一步又把在当时的认知水平下，和上述粒子可以产生同层次转换的粒子，也称为“基本粒子”，而事实上，这些基本粒子又被发现有其内部结构，因此，现在已改称为“粒子”而把“基本”二字去掉了。下面介绍一下其他粒子的发现过程。首先，被发现的是正电子，正电子是由狄拉克在理论上作出的预言，然后由安德逊用实验证实的。

狄拉克于 1902 年 8 月 8 日出生于英国的布里斯托尔。他曾在布里斯托尔的商业中学读书，以后进入布里斯托尔大学攻读电气工程，1921 年获电气工程理学学士学位。毕业后又在布里斯托尔大学学了两年数学，此后考入剑桥大学圣约翰学院研究生院攻读数学，于 1926 年获哲学博士学位。1930 年，年仅 28 岁的狄拉克就成了英国皇家学会的成员，1932 年被任命为剑桥大学卢卡斯(Lucasian)讲座数学教授，一直任职到 1969 年成为荣誉退休教授。1971 年后就任美国佛罗里达州立大学物理学教授。

狄拉克是世界著名的数学物理学家。他的研究工作主要是量子力学的数学和理论两个方面，他的最重要的成果是他建立的著名的波动方程。他由于在 1928 年建立了相对论电子理论而获得 1933 年的诺贝尔物理学奖。

到 20 世纪 20 年代末期，量子力学已经建立，用它来研究和处理微观粒子的低速运动的问题取得了很大的成功；同时，爱因斯坦建立的相对论，虽然能够讨论粒子的高速运动，但在处理微观粒子的波粒二象性上却无能为力。1928 年，狄拉克从相对论和量子力学的一般原理出发，建立了一个“相对论性”的电子运动方程，现在人们把它叫做狄拉克方程。利用这个方程来讨论氢原子的能量分布、电子的自旋、磁矩以及讨论高速运动电子的许多性质都与实验结果符合得很好。

但是，狄拉克理论本身却存在着一个严重的问题。因为他的方程有两个解：一个解，粒子的总能量是正的；另一个解，粒子的总能量却是负的，而且存在无穷多的负能级，并且正能态和负能态的分布是完全对称的。根据量子力学原理，如果存在着没有下限的负能级，那么一个正常的原子就可以无限地向更低的能级跃迁，这样，原子的稳定性就成了问题。

狄拉克为了解决他的方程中的负能态问题，他根据泡利不相容原理，于 1930 年提出著名的空穴理论。他假定，自然界的所谓

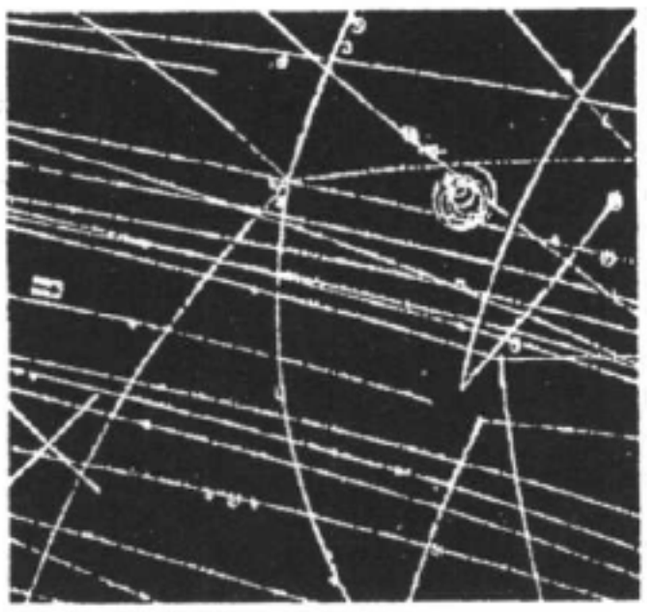
“真空”并非空无一物，所有的负能态都被电子填满了，形成了负能态的电子海，正能态的电子不可能再往下跃迁，这样就保证了原子的稳定性。当处于负能态的电子受到激发由负能级“海洋”中逸出时，那里就留下一个空穴，这个空穴就相当于一个带正电的粒子。从对称性考虑，这种带正电荷的粒子应当与电子具有相同的质量。可是，由于当时所知道的带一个正电荷的粒子只有质子，于是，狄拉克假设：“在电子的分布中，具有负能量的空穴就是质子。当具有正能量的电子落入空穴并填满它时，我们应当观察到电子和质子将同时消失，并伴随着辐射的释放。”狄拉克关于质子是电子的反粒子的假设提出后，立即遭到了奥本海默(J. R. Oppenheimer，1904—1967)的批评。他指出，如果质子是电子的反粒子，氢原子就不可能是稳定的。1931 年 5 月，狄拉克改变了原来的看法，提出空穴是一种“实验物理还不知道的新粒子，它们与电子的质量相同，电荷相反”，即预言了“正电子”的存在(图 5-7)。



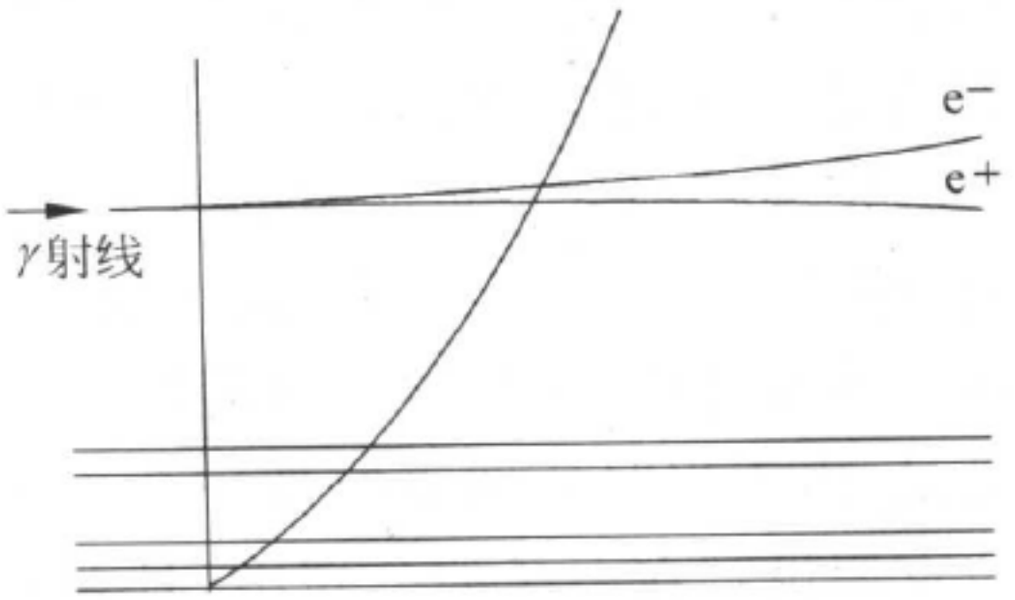
图 5-7　狄拉克与狄拉克对正电子存在的预言

狄拉克的这个预言在 1932 年宇宙射线的实验中首先得到了证实(图 5-8)。

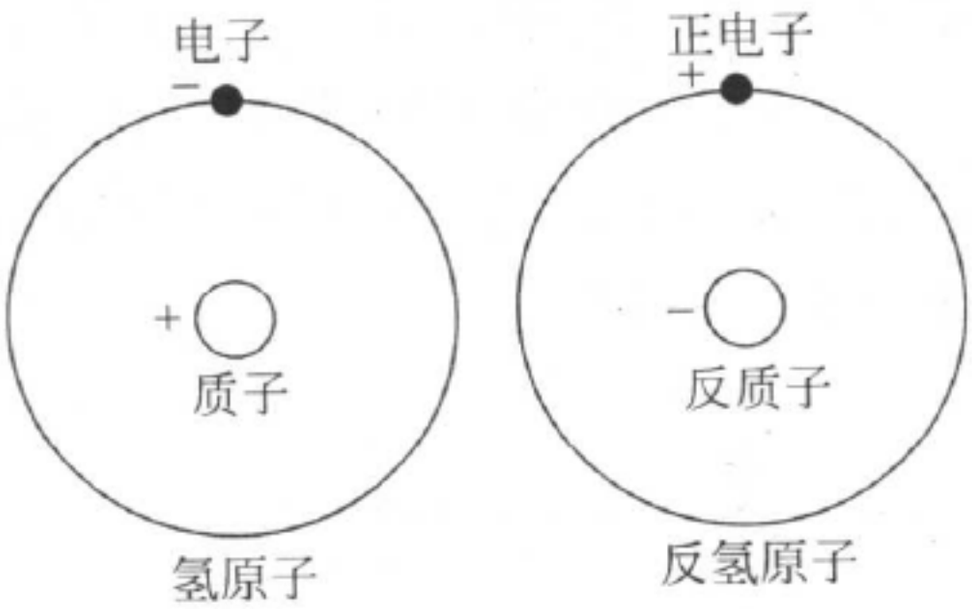
1932 年 8 月 2 日，安德森(Carl David Anderson)在宇宙射线的实验中证实了狄拉克的预言，发现了正电子。关于这一重要发



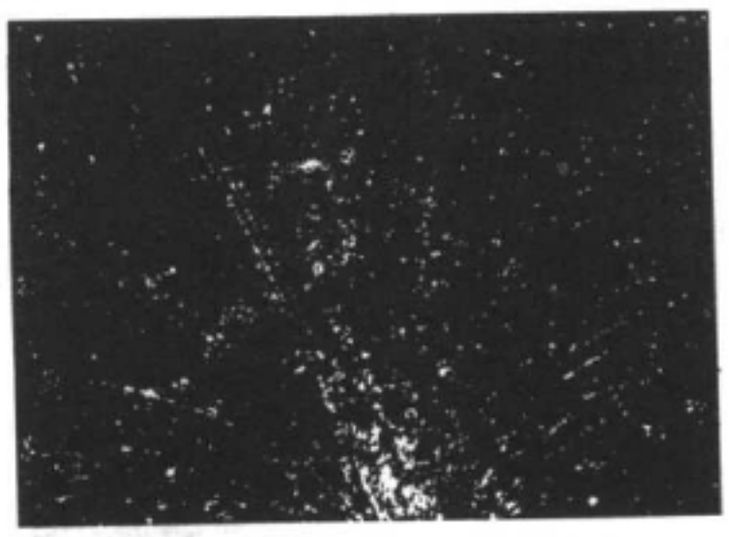
(a) 用一个反质子($\bar{p}$)轰击一个质子(p)则会产生两个π^+-π^-对



(b) 从γ射线可得电子-正电子



(c) 粒子世界与反粒子世界



(d) 在云雾室壁上可测出宇宙射线中的基本粒子

图 5-8　宇宙射线实验

现的经过,他在《物理评论》上发表的文章中写道:“1932 年 8 月 2 日,对在垂直方向上的威尔逊云室(磁场强度为 1500Gs,云室是由密立根教授和作者于 1930 年夏天建成的)中的宇宙射线径迹照相时,发现了一些径迹。我们觉得,这些径迹只能用存在着某种粒子来解释,这种粒子具有正电荷,它的质量相当于自由的负电子通常具有的质量。”据说,他当时并不知道狄拉克的预言,后来,当他知道狄拉克的理论预言后,他断定他观察到的正是狄拉克预言的

那种带正电的电子，他便将它命名为正电子。

其实，在安德森之前，在云室的照片中就曾留下了正电子的踪迹。例如，约里奥·居里夫妇在研究钋轰击铍产生的辐射时，就曾在云室中看到了正电子的踪迹，但是他们却把这解释为是一个反方向运动的电子所致。安德森在云室中加了一块 6mm 厚的铅板，使粒子通过它的速度减慢了，他根据粒子在磁场中的偏转方向、磁场方向和径迹在铅板两边的曲率半径的大小等，对这种粒子的性质做出了正确的判断。

安德森的发现使狄拉克的理论得到了证实。狄拉克的空穴理论给出了反粒子的概念，后来的事实证明，一切粒子都有与之相对应的反粒子，这是一个普遍的规律。在粒子物理中，已不再采用狄拉克的空穴理论来认识正反粒子之间的关系，而是从正反粒子完全对称的场论的观点来进行处理，所以，正电子的发现打开了一个广阔的新的研究领域，导致了量子场论的诞生。这样，粒子家族中又添了一名新成员。安德森由于发现正电子而获得了 1936 年度诺贝尔物理学奖。

20 世纪 30 年代在粒子的研究中，有一个困扰科学家们的问题，那就是所谓 β 衰变问题，由于 30 年代实验条件的限制，有些粒子还不能被观察到，因而就出现了一些难以解释的矛盾，原子核 β^+ 衰变就是其中之一。

早在 1914 年，查德威克对放射性物质所发射的 β 射线谱进行研究时发现，其动能是连续分布的。当时已经知道，α 射线和 γ 射线的能谱都是分裂的，而 β 粒子的能谱则是连续的，并且当电子能量取最大值时，与末态核的能量加在一起，才满足能量守恒定律。一般说来，在 β 衰变中，能量总有某种程度的损失，这就产生了在 β 衰变中如何才能满足能量守恒的严重问题。对这个问题，不少物理学家曾提出了许多假设，但都未能解决。例如，曾有人认为，在 β 衰变中，原子核放射的 β 粒子的能量在开始时都等于连续能

谱中的极大值，但在β粒子放射的进行过程中，由于它们与放射源本身或周围介质的轨道电子的相互作用，一部分能量损失掉了，有的β粒子的能量损失较多，有的少些，这样β粒子能谱就成为连续分布了。不过，这种解释很快就被实验事实所否定。玻尔为解决这个问题曾认为，能量守恒定律只是在总体上成立，即在大量事件的统计平均的意义上保持宏观上的守恒，而在每一个微观事件中，例如在β衰变中，能量守恒不再成立。

1930年，泡利(图5-9)提出了与玻尔相反的看法。他从β衰变中可观察的能量总是不足而不会是“盈余”的事实出发，认为这明显地不能做统计平均来解释。于是，他假定原子核在β衰变中除了放出电子外，还放出其他一些粒子将一部分能量带走了。泡利把这种粒子描述成是一个没有电荷、自旋为$h/2$的中性粒子，这样就既能保持能量守恒，又满足了自旋的要求。



图5-9　W. 泡利(1900—1958)

这里值得注意的是，泡利预示着一种新粒子存在的可能性。费米紧紧抓住了这一新的想法，他把泡利讲的中性粒子定名为“中微子”，并很快建立起相应的β衰变理论。

在一般的理论中，粒子数是守恒的，质子、中子等既然都是基本粒子，那就不可能再分了。那么β衰变放出的这些粒子是怎样产生的呢？费米大胆地突破了粒子数守恒的框框，他认为β衰变中放出的电子和中微子都是瞬间发射而产生的，就像电子在能级上跃迁产生光子一样，在β衰变的过程中是原子核中质子和中子的相互转换变化，这个过程也可以看成是核子在不同的量子态间跃迁的产物，即

$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}(\beta^-$ 衰变)　　$p \rightarrow n + e^+ + \nu(\beta^+$ 衰变)

其中，n 是中子，p 是质子，e 是电子，$\bar{\nu}$ 是反中微子，e^+ 是正电子，ν 是中微子，这两种衰变只能发生在核内。

在费米的理论中，假设了一种完全新型的力，即所谓弱相互作用力。这种新型的力跟引力、电磁力和强相互作用力(核中核子之间的力)一起组成了我们现在所说的四种相互作用力。

中微子由于没有电荷，它只参与弱相互作用，因而穿透本领极强，所以实验上很难发现它的存在。直到 1955 年美国洛斯阿拉莫斯实验室的雷乃斯(Frederic Reines)和考万(Clyde Lorrain Cowan)用高功率反应堆产生的反中微子源进行实验，才证实了中微子的存在。1962 年以后，又发现了另一种中微子 ν_μ 及其反粒子 $\overline{\nu_\mu}$。现在一般认为，中微子有这样三类：ν_e，ν_μ，ν_τ。

在研究原子核性质的过程中，人们逐渐弄清了原子核内部核子间的核力具有这样的特征：核力是一种短程力，核力的作用半径接近于 1.5×10^{-13}cm，在这个范围内其强度量级相同，超过这个范围，其强度迅速减弱到可以忽略；核力是一种强相互作用力，原子核内的质子间尽管存在着强大的静电斥力，而其个别粒子仍以 700 万 eV(7MeV)数量级的能量相结合，这样把核子结合在一起的力显然不能归结为电磁作用力或引力的某种表现。那么，这是一种什么样的力呢？

海森伯和费米都曾企图用类似于两个带电粒子间的相互作用是由于相互发射和吸收光子的方法来解决核力问题。海森伯认为，核力是核子间交换一种服从玻色-爱因斯坦统计法的无自旋电子产生的；费米也曾提出，中子和质子是通过相互发射和吸收电子和中微子而发生相互作用的。1934 年，塔姆(Jgor Yervgenievich Tamm，1895—1971)在《中子与质子间的交换力》的论文中，进一步对核子间交换电子和中微子产生的相互作用进行计算后指出，这样产生的力远比核力强度小(要小 10^{10} 倍)。

1934 年 10 月，日本物理学家汤川秀树提出了核力的介子理论，解决了核力难题。

汤川秀树(Hidiki Yukawa，1907—1981)于 1907 年 1 月 23 日出生于日本首都东京。他在小学高年级时就对数学有浓厚的兴趣。在高中时，他曾读过普朗克的《理论物理引论》，普朗克的思想使他着了迷，对他后来选择理论物理学作为他的研究方向有一定的影响。他在京都大学理学院学习时，曾听过长岗半太郎教授所做的“今昔物理学”的演讲，这使他对 1900 年以来物理学的发展有了全面的了解，他在 1929 年取得硕士学位，1938 年获博士学位。

汤川秀树和他同时代的日本科学家朝永振一郎(1900—1979)、坂田昌一(1911—1970)等人通过努力，逐步形成了在世界上具有很大影响的一个理论物理学派。

汤川由核力和电磁力的类比，勇敢地提出了核力的介子理论。电子-电子的相互作用，是由一个电子放出的光子被另一电子所接收，这两个电子之间便发生了库仑相互作用，由于这种光子并没有离开电子，所以被称为“虚光子”，在核子间一个中子和一个质子通过交换一个“虚粒子”而间接作用，这表示它们都是“交换力”，即核力也是交换力，这种核力的作用随它们相互间距离的变化而变化。汤川根据核力的相互作用距离约为 10^{-13} cm 左右，估算出这种交换的虚粒子质量约为电子质量的 200 倍，即介于电子和质子之间，便称为“介子”。起初，除日本外，其他国家的反应冷漠。可是，就在这一年安德逊等人从宇宙射线中发现了一种质量为电子质量 207 倍的粒子，人们以为它就是汤川预言的介子了，可是继续研究发现它同核子的作用极弱，比电磁作用还弱 10^{11} 倍，因此不可能是传递核力的介子，后来搞清楚了这个粒子的性质，它就是 μ 介子，那么汤川介子是什么呢？直到 1947 年，英国的鲍威尔从高空气球的乳胶上的探测才发现这是一种互为正反粒子，平均寿命只有 2.6×10^{-8} s，并且 100% 衰变为 μ 介子的一种 π 子，叫做 π 介子，

它的质量是电子的 273 倍，所以有人戏言，当年是先找到了“儿子”，后来才找到“老子”，而在 $\pi \rightarrow \mu$ 的变化中也有放出中微子的现象。以上讲的是 π^+，π^-，后来发现还有不带电的 π^0，不过它的寿命更短，只有 0.84×10^{-16}s。

到 1947 年发现 π 介子时为止，人们认识到的粒子已达 14 种之多：光子(γ)、电子(e^-、e^+)、中微子(ν、$\bar{\nu}$)、介子(μ^+、μ^-、π^+、π^0、π^-)、质子(p，$\bar{p}$)、中子(n、$\bar{n}$)，其中中微子、质子、反中子、π^0 介子是当时已被预言而尚未被实验所证实。就在这一年，罗切斯特(George Dixon Roechester)和巴特勒(Clifford Charles Butler)在宇宙射线实验中首次得到了后来被称为奇异粒子的径迹照片，这就是后来被称为 K^0 和 K^- 的介子。

1950 年前后实验中所发现的一大批新的粒子，如 K^+、K^0、K^-、$\bar{K}_0$、Λ、Σ^+、Σ^0、Σ^-、Ξ^0、Ξ^+ 等，它们都具有以下两个明显的特点：第一是这些粒子总是协同产生，非协同衰变，而且是通过强相互作用产生，通过弱相互作用而衰变；第二是这些粒子产生时非常迅速，而衰变过程却很缓慢。

正是由于这些粒子具有上述两个“奇异”特性，当时的理论无法加以解释，所以它们被称为奇异粒子。

1953 年，盖尔曼(Murray Gellmann)等人为了解释奇异粒子的有关实验规律，引入了一个新的量子数 S(奇异数)，并假定，在强相互作用下有关粒子的奇异数之和严格守恒。奇异数 S 的引入很好地解释了奇异粒子的特性，在强相互作用过程中奇异数守恒，在弱相互作用过程中奇异数可以不守恒。

粒子的性质，除了质量、电荷、自旋以及半衰期等外，还有一种“宇称性”。宇称的概念是 O. 拉波特(O. Laporte)在 1924 年分析分子光谱时最先提出并总结成为宇称守恒定律。复杂原子的能级可以分为 Gestrichene 和 Ungestrichene，即偶能级和奇能级。在这些能级间跃迁，如果只发射或吸收一个光子，能级总是由偶变奇

或由奇变偶，这种能级的奇偶性就叫做能级的宇称。偶能级宇称为+1，奇能级宇称为−1。拉波特总结其规律为：在发射一个光子的原子跃迁中，初态宇称等于终态总宇称（计算时把所有粒子宇称相乘），即宇称守恒。威格纳证明这种规则是原子中电磁力的反演不变性，即左右对称性。1927 年，威格纳（Eugene Paul Winger）证明了在原子现象中宇称守恒。以后又进一步推广到原子核物理和粒子物理中，直到 1954 年左右，实验表明，宇称守恒定律是有效的。

1954—1956 年间，人们在观察当时称为 θ 和 τ 粒子的某些 K 粒子的衰变现象时，发现了一个疑问，即“θ-τ 疑难”。精确的实验证明，θ 与 τ 这两种奇异粒子的质量、电荷、自旋、半衰期等都相同，它们似乎应是相同的粒子；可是它们的衰变方式却不同，θ 衰变为两个 π 介子，τ 衰变为三个 π 介子，即

$$\tau^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^{\mp} + \pi^{\mp}$$

$$\theta^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^{0}$$

对实验结果的分析表明，3 个 π 介子的总角动量为零，宇称为负；而两个 π 介子的总角动量如果为零，则宇称为正。因此，如果确认宇称守恒定律严格成立，那么 τ 与 θ 就不可能是同一种粒子；而如果认为 τ 与 θ 是同一种粒子，宇称守恒定律就不成立。

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

就在这种情况下，旅美中国科学家杨振宁和李政道经过仔细的分析研究，对宇称守恒定律在弱相互作用过程中是否成立的问题提出了质疑。他们指出：“在检查了当时已存在的关于这个概念（指宇称概念——笔者）的实验基础以后，得到下述结论：和一般所确信的相反，在弱相互作用中实际上并不存在左右对称的任何实验证据。如果左右对称在弱相互作用中并不成立，则宇称的概念

就不能应用于 θ 和 τ 粒子的衰变机构中。因此 θ 和 τ 可以是同一种粒子。”

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

弱相互作用下宇称不守恒的发现，进一步激发了人们对微观世界奥秘的探索。

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

著名的原子物理和原子核物理学家，诺贝尔奖获得者 E. 赛格雷在《从 X 射线到夸克》一书中，在谈到杨振宁、李政道、吴健雄三位物理学家的贡献时评论说：“从当代这三位中国物理学家所取得的成就，也可以看出中国这个伟大的国家在度过当前的革命震动时期，并恢复其作为世界文明发源国之一的作用后，将来可能对物理学作出什么样的贡献。”

这些被称为基本粒子的粒子结构是怎样的呢？它们是否是由更基本的粒子组成的呢？1964 年，盖尔曼进一步提出“夸克模型”，他认为，所有已知的基本粒子，都是由三种更为基本的“夸克”(quark)粒子所组成的。这就是现在习惯被记为 u、d、s 的三种“夸克”。

1974 年，美籍华裔科学家丁肇中和他领导下的小组，在美国纽约州长岛的布鲁克海文国立实验室发现了一种前所未知的新粒子，他命名为 J 粒子；差不多同时，美国的利希特(Burton Richter)等人也发现了一种新粒子，命名为 ψ 粒子。这两种粒子实际是同一种粒子，现称 J/ψ 粒子。丁肇中和利希特因发现 J/ψ 粒子而共同获得了 1976 年度诺贝尔物理学奖。

J/ψ粒子有着非常独特的特性，它质量很大(质子的三倍多)，寿命很长(1～10^{-20}s)，由理论和实验研究得出，这种粒子是由一种新的夸克c及其反粒子$\bar{c}$构成的，c称为粲夸克，后来又发现了底夸克b、顶夸克t。在夸克模型中，重子是由三个夸克组成的，J/ψ粒子是由一个粲夸克(c)和一个反粲夸克组成的。2003年7月1日，中、美科学家在北京宣布，在正负电子对撞机上发现了一个新粒子，据分析，它可能是几十年前费米和杨振宁所预言的多夸克态粒子。李政道教授来信祝贺说："这是一个十分重要的成果，也是物理学中很有意义的工作。"

至此，上述六种夸克通常称为六"味"，而每"味"的夸克又有三"色"，即红、黄、蓝(也有称红、黄、绿或红、绿、蓝的)三色。这样，夸克有六"味"，三"色"，加上它们的反粒子共有36种。

按静止质量大小，基本粒子被分为：光子、轻子、介子、重子四大类。如物质结构的其他层次一样，"相互作用是事物的真正的'穷极原因'"。因此，研究基本粒子之间的相互作用的性质，探索基本粒子内部相互作用的特征，是认识物质结构基本粒子层次的最重要任务之一。

基本粒子之间的相互作用这一层次与物质结构的原子、分子、宏观物体……相比，具有更深刻、更丰富的内容。首先，在基本粒子之间的相互作用这一层次里完全排斥了超距作用观点，它是通过不断地吸收与发射场的量子而进行的。其次，相互作用的类型，除我们已熟知的引力相互作用及电磁相互作用外，尚有两种新的相互作用类型——弱相互作用及强相互作用出现。下面我们将会分别阐述。

2. 物质基本构造的三大家族

有人对物质的基本构造作了分类，认为第一家族中有u夸克、d夸克及电子、ν介子等轻子；第二家族中有c夸克、s夸克以及μ^+介子，μ^-介子，ν介子，μ介子等轻子；第三家族中有t夸克、b夸克及ν介子等轻子(图5-10)。

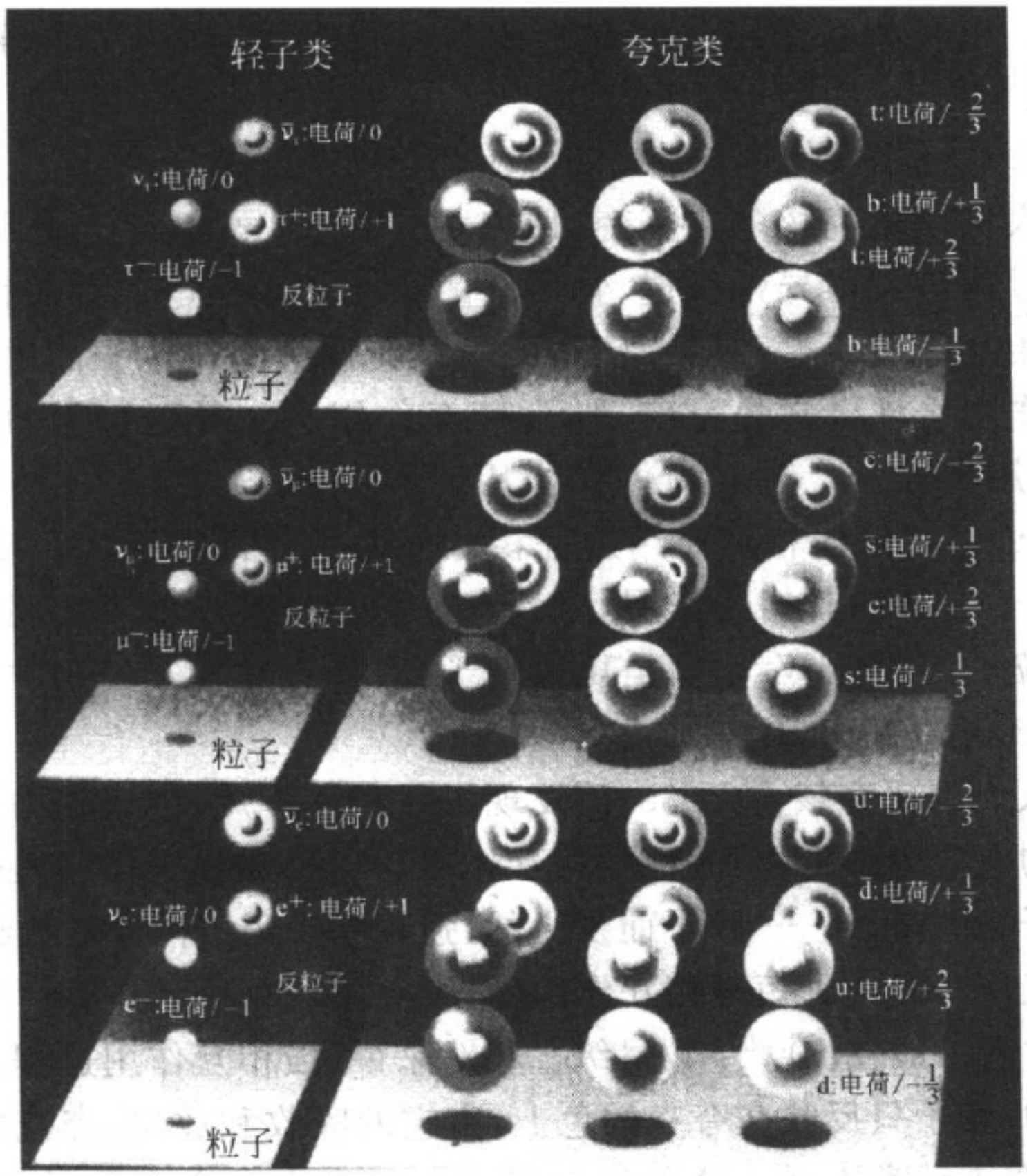


图 5-10　物质基本构造的三大类中的轻子类、夸克类

(1) 电磁相互作用

带电的粒子,或不带电但带有磁矩的粒子都能与电磁场直接发生作用,或者以电磁场为媒介彼此发生作用。这种有电磁场参与的相互作用,称为电磁相互作用。电磁相互作用是通过交换电磁场的量子——光子而发生的,电磁相互作用的耦合常数 $\alpha=\frac{e^2}{hc}=\frac{1}{137}$,因为它最早出现在索末菲 1916 年所发现的氢原子的精细结构之中,所以 α 亦称为精细结构常数。电磁相互作用是一种长程相互作用(作用半径 $r\to\infty$),其作用特征时间为 10^{-21} s 数

量级。电磁相互作用是一种非常普遍的相互作用，光子、轻子、介子、质子均参与这种相互作用。

(2) 弱相互作用

人们因研究核的β衰变(1934)而发现了弱相互作用。由于β衰变过程进行得异常缓慢，物质间的相互作用比电磁力弱得多，故称弱相互作用。这种弱相互作用通过交换中间玻色子而进行。弱相互作用之耦合常数$\approx 10^{-10}$，弱相互作用是一种更短程的相互作用(作用半径$r<10^{-16}$ m)，其作用时间则较长，可从10^{-18} s直到15 min，也就是弱相互作用过程相对来说是非常缓慢的。重子、介子、轻子均参加弱相互作用，但只有中微子是唯一不参加弱相互作用的粒子。W^+、W^-、Z^0是规范粒子，表现在弱相互作用中。

(3) 强相互作用

人们因研究核力(1935)而发现了强相互作用，由于核力比早已熟悉的电磁力强得多，故称强相互作用。这种强相互作用是通过交换胶子场的量子——胶子而发生的，强相互作用的耦合常数约为1。强相互作用是一种短程相互作用(作用半径r为$10^{-14}\sim 10^{-16}$ m)，其作用时间一般在10^{-23} s数量级。相对来说，强相互作用过程是非常迅速的，胶子只反映在夸克的色上，由它的吸收和放出，夸克的色改变，但夸克种类不变。这种强相互作用只发生在介子及重子之间，光子及轻子不参与强相互作用。1962年，奥孔曾经引入强子一词，用它来代表参加强相互作用的粒子：介子及重子。

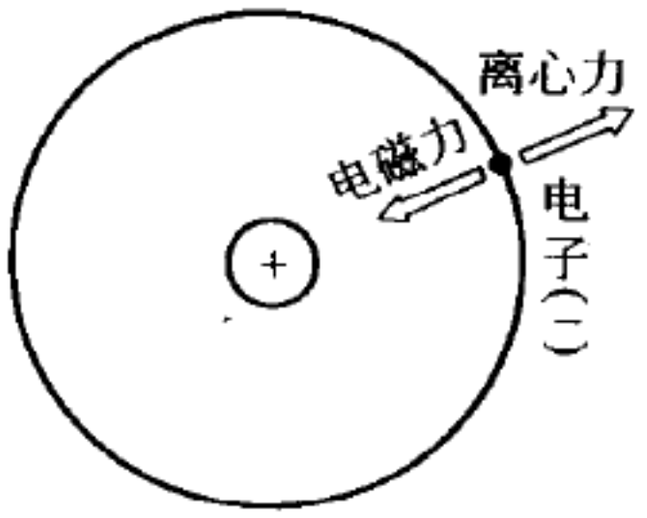
(4) 引力相互作用

引力相互作用是一种比弱相互作用更弱的相互作用。若强相互作用的强度为1，则引力互相作用的强度约为10^{-40}。因此，引力在基本粒子世界的效应一般是略而不计的，但引力的量子效应在更小的领域有可能表现出来。

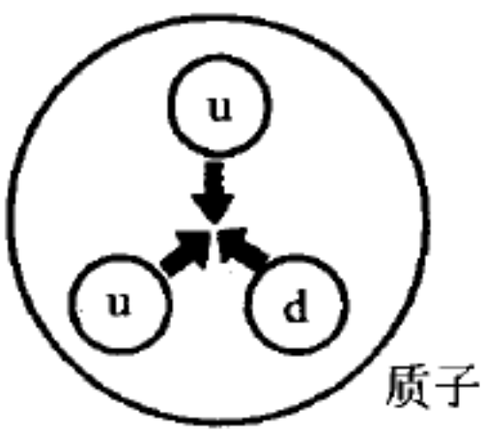
引力是人们最早熟悉的一种相互作用，但也是本质隐藏得最深的(与上述三种相互作用比较)一种相互作用。对于引力的规律及本质的认识，在物理学史上经历了三个阶段：第一阶段是牛顿总结的万有

引力定律;第二阶段是爱因斯坦的引力场方程;第三阶段是引力场的量子化(注:引力场能否量子化,尚未解决)。按照引力场的量子化观点,引力场还存在着自己的量子——引力子。引力的作用就是通过交换引力子而发生的。到目前为止,这种引力子还未观察到。

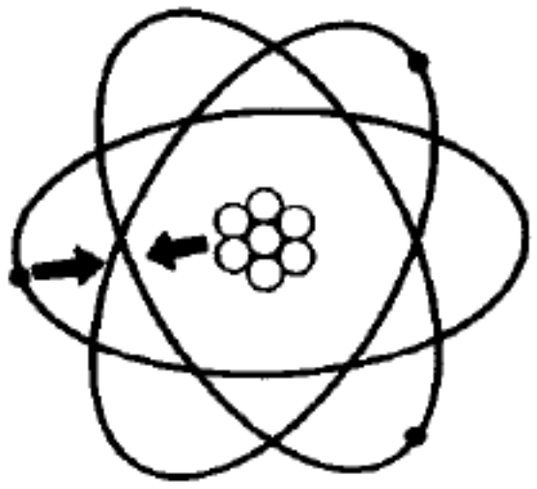
由于各种相互作用,基本粒子将发生各种形式的相互转化。在已知的基本粒子中,没有一个不能作某种转化的,这是物质结构基本粒子层次的一个很突出的特征(图 5-11、图 5-12)。四种相互



电磁力与离心力的平衡



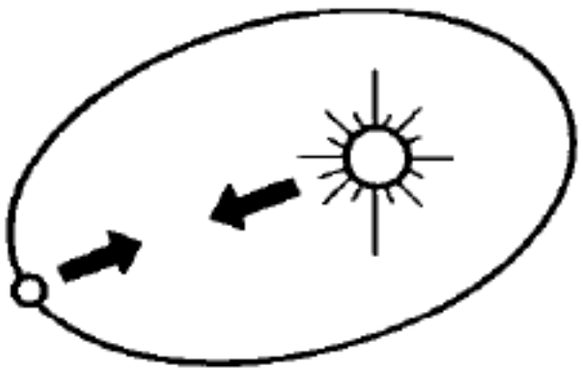
(a) 夸克间的"强相互作用力"



(b) 电子-质子间的 "电磁力"



(c) 放射性衰变中的"弱相互作用力"



(d) 天体间的相互"引力"

图 5-11　基本粒子间的相互作用

作用的基本特征如表 5-1 所示。

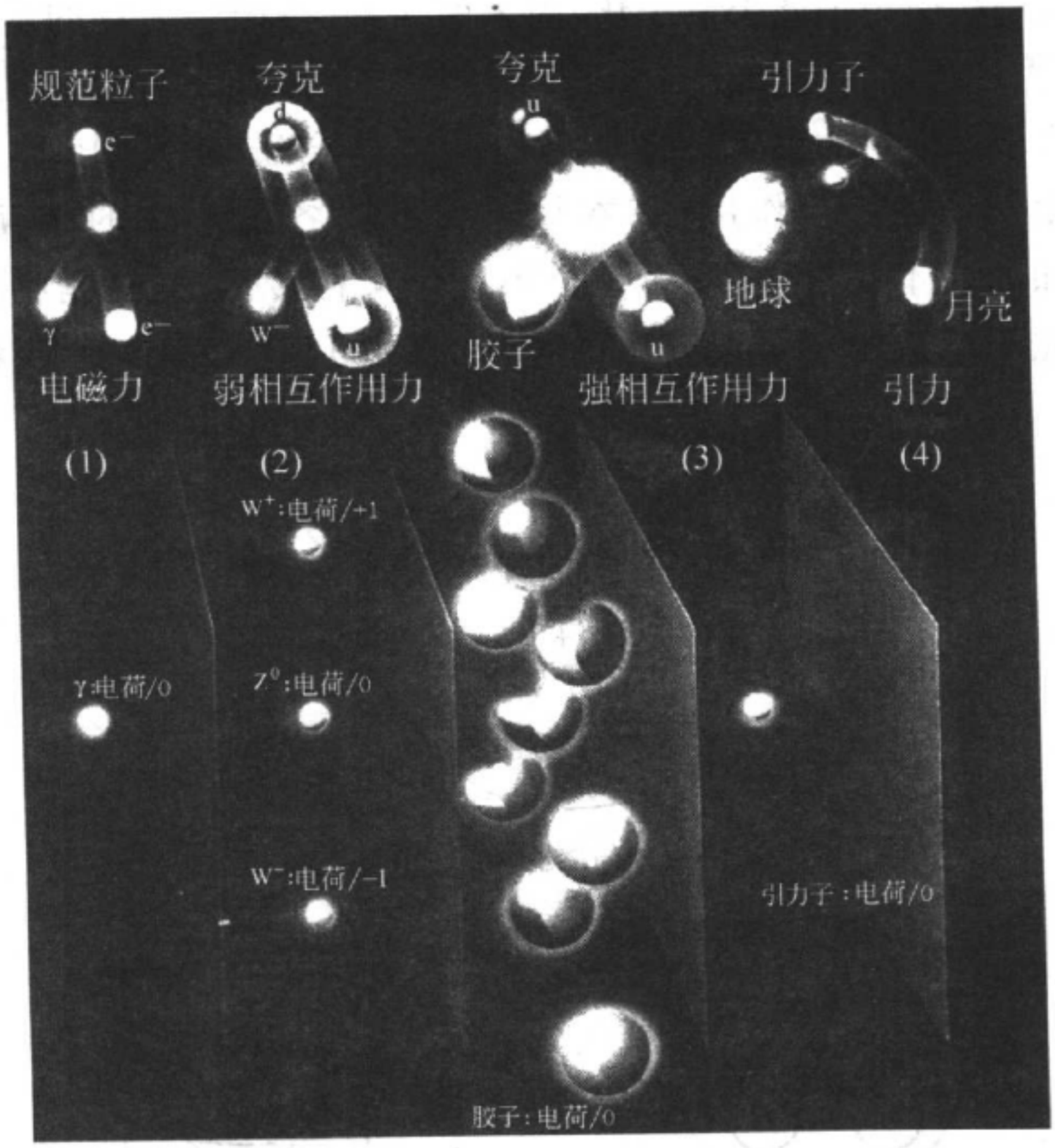


图 5-12　物质基本构造的三大类中的规范粒子类及基本粒子间的相互作用

表 5-1　四种相互作用的基本特征

	引力相互作用	弱相互作用	电磁相互作用	强相互作用
强度	$\approx 10^{-40}$	$\approx 10^{-15}$	$\frac{e^2}{hc}=\frac{1}{137}$	≈ 1
作用半径（作用力程）	$r\to\infty$	$r<10^{-16}\,\mathrm{m}$	$r\to\infty$	r:$10^{-14}\,\mathrm{m}$ ~$10^{-16}\,\mathrm{m}$

续表

	引力相互作用	弱相互作用	电磁相互作用	强相互作用
反应速度（特征时间 τ）		τ:10^{-18}s ～10^{-15}s 直到 15min	10^{-16}～10^{-21}s （τ:10^{-21}s）	10^{-23}s
交换的场量子	引力子(?)	W^{+}、Z^{0}、中间玻色子	光子	胶子，π
参加的粒子	静止质量不为零的粒子 一切物体间	轻子、介子、重子	光子及电荷或磁矩不为零的粒子 e，μ，γ，强子	介子、重子、胶子
遵守的守恒定律		质量、能量、动量、角动量、电荷、轻子荷、重子荷的守恒定律	质量、能量、动量、角动量、电荷、轻子荷、重子荷、奇异数、同位旋分量、宇称的守恒定律	质量、能量、动量、角动量、电荷、轻子荷、重子荷、奇异数、同位旋、同位旋分量、宇称的守恒定律
举例	天体间作用力	β衰变	原子间结合力 安培力	核力

3. 物质世界相互作用的实例介绍

(1) 太阳中心进行的核反应

在太阳中心，4 个质子融合后成为一个 He 核，质子聚变是太阳中的主要能源。2 个质子可变为一个重氢，重氢再和一个质子变为一个 He 核，3 个 He 核和 3 个 H 核结合则成为普通的 He，并放出两个质子。

(2) 质子、中子和介子

质子、中子是由三个夸克组成的，介子是夸克-反夸克对组成的。质子是 u，u，d 三个夸克组成的，中子是 u，d，d 三个夸克组成

的，三个夸克是红、绿、蓝三个状态，强子是白色的，因为红、绿、蓝三个颜色重合就成了白色。

(3) 弱相互作用与电磁力

单独的中子约在十分钟内衰变成质子过程中出现电子以及正电子、中微子的三个粒子，这就叫做介子的衰变，作用于其上的力由于有 W^- 的交换而有弱相互作用力，其中中微子仅能感知弱作用力，很难有反应，但它可贯穿地球和月球。

(4) 电子、中微子反应

电子、中微子接近氢原子时，变换 Z^0 粒子后的电子，也有相近或相斥而远离的现象。

(5) 使质子和电子结合的力

构成原子核中的质子、中子间的作用的强作用力是汤川秀树在 80 年前预言有 π 介子存在，而后在宇宙线中被发现的，从夸克层次上来看，质子和中子中的夸克相互作用是汤川的介子理论来描述的。

上述实例介绍可参看图 5-13、图 5-14。

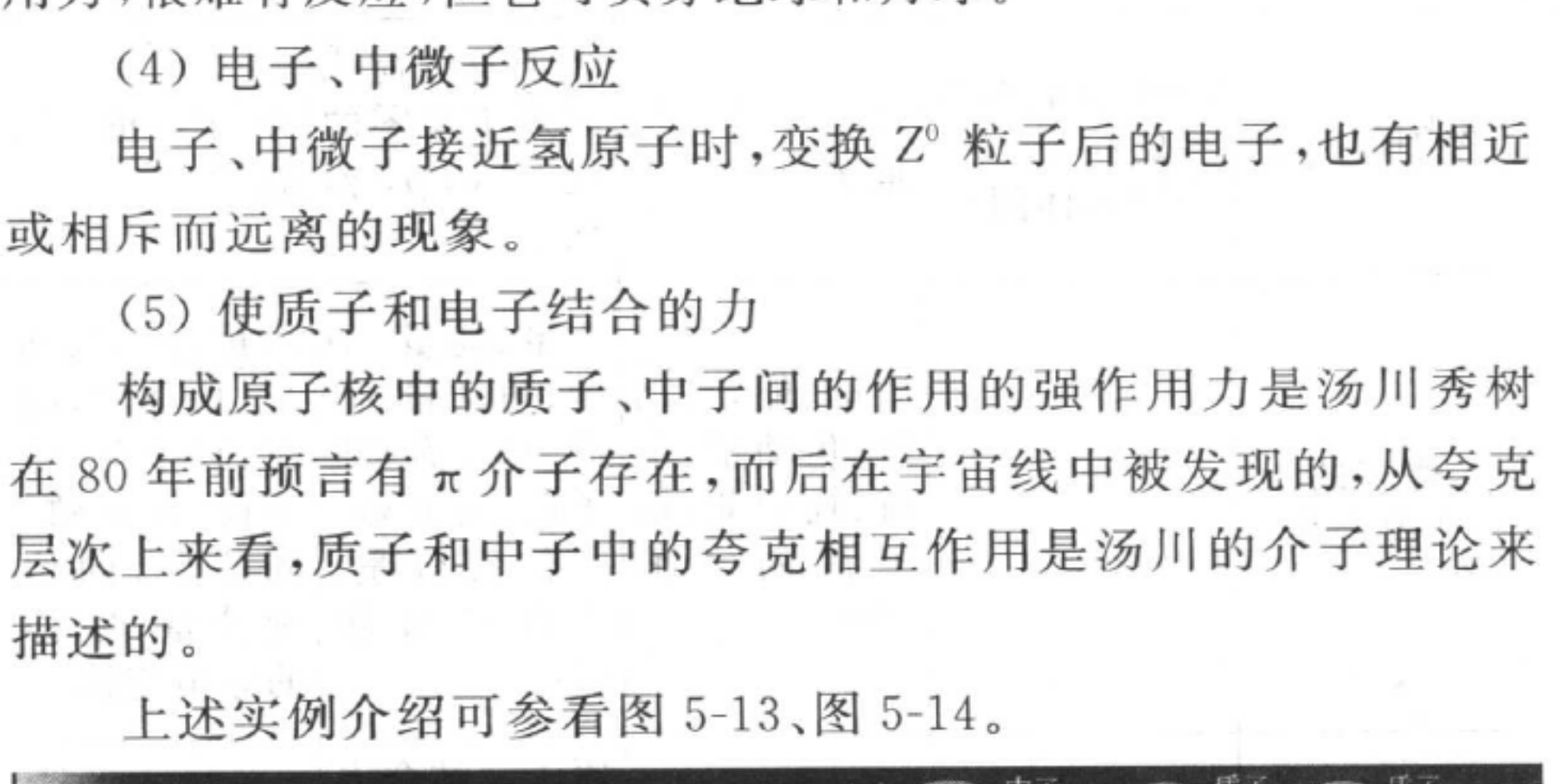


图 5-13　弱相互作用和电磁力

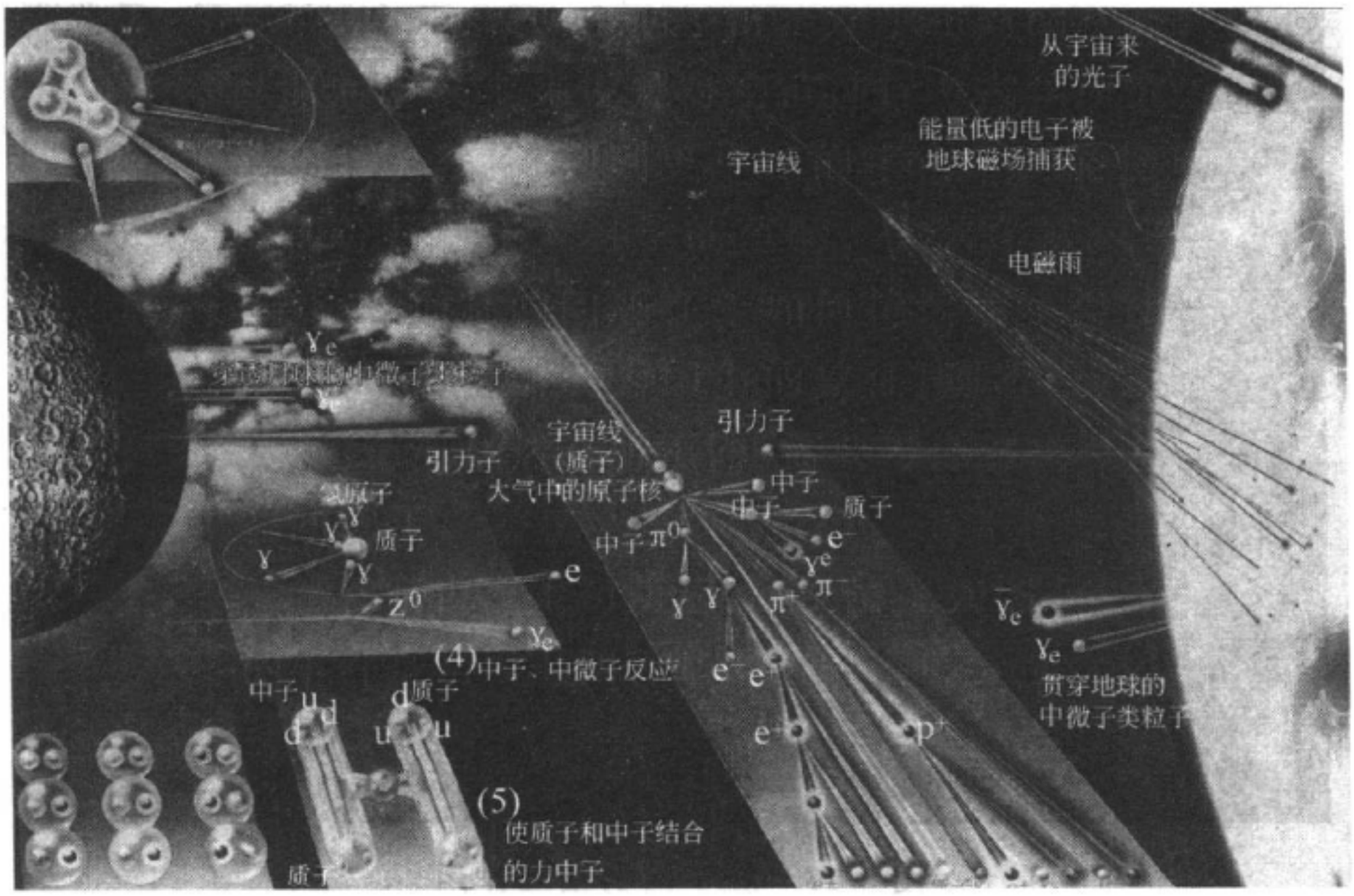


图 5-14　中子、中微子反应与质子、中子结合力

4. 夸克间的强相互作用

（1）夸克的色和胶子

夸克实际上并不具有颜色，只是像光的三原色那样具有三个基本的物理特性，将三者叠加在一起时，其结果就消失了，成了白色。对于色则还有其补色，也就是介子中夸克和反夸克形成“对”而结合在一起就成了白色。为此，把夸克具有的基本特性称之为“色”。

夸克间的牢固结合是由于胶子在夸克的色传递反应中显示的力。例如，红夸克放出一个胶子就变成了蓝色，即从红夸克中取出一个胶子放出去就变为蓝，也可以认为具有红和反蓝（补色的黄）。胶子具有两色，在夸克飞行的同时，夸克改变其色并传递力，由于胶子只能在反应中变色，有色胶子间相互作用也有反应。因此，胶子间有引力相互作用（图 5-15）。

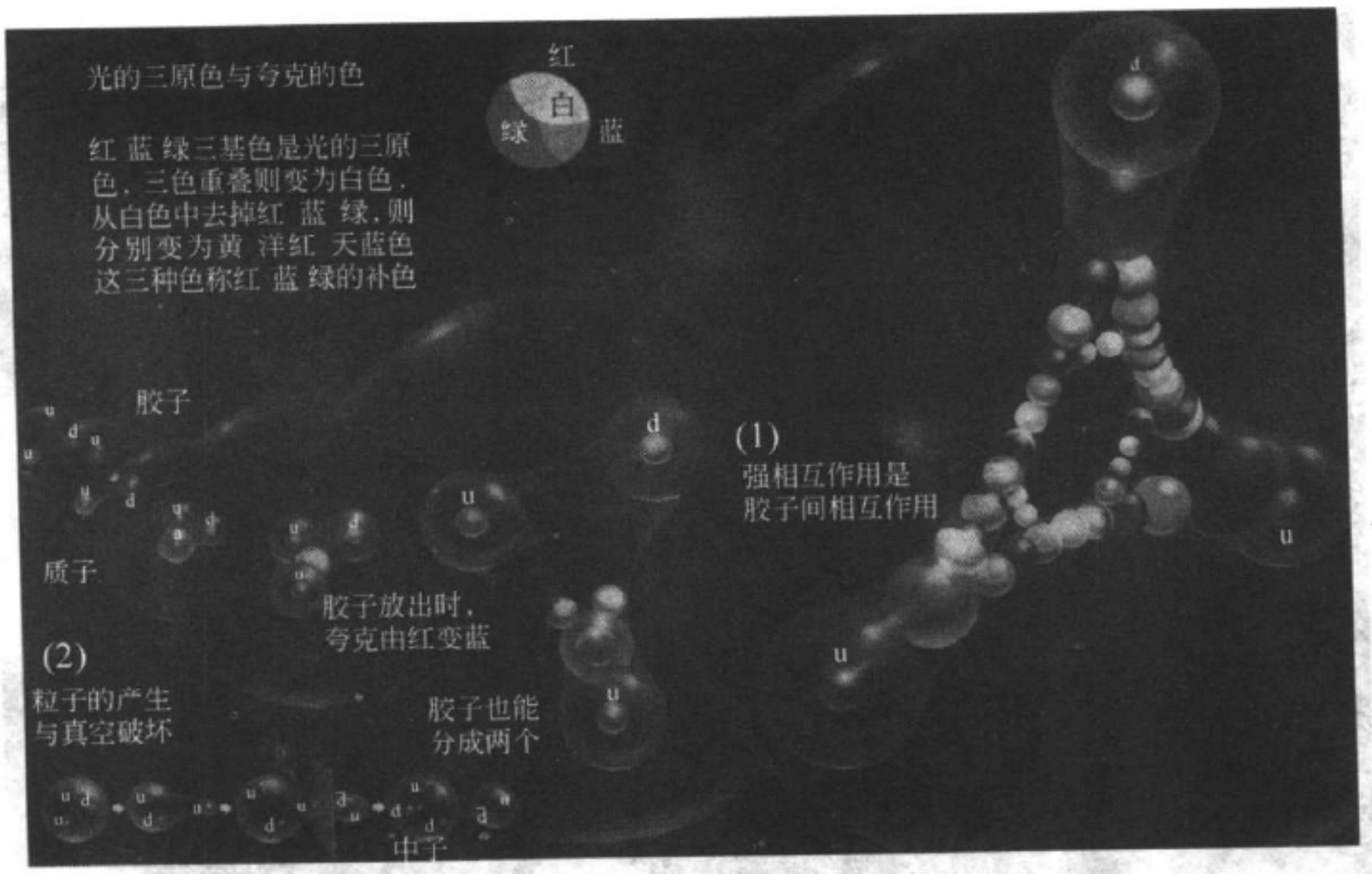


图 5-15　胶子间的相互作用

(2) 粒子的产生和真空的破坏

在真空中会因夸克和反夸克对的生成而消灭。一旦夸克间的胶弦切断，则由真空中夸克和反夸克对扩开成切口而会有新的夸克进入，这就像条形磁铁不可分一样，它不能切开形成单独的 N 极和 S 极。

5. 弱相互作用机制和对称破缺

轻子族的色是感觉不到的。为高能的 μ 中微子与中子碰撞时可忽略其“色”。μ 中微子是 W^+ 粒子和 W^- 粒子吸收 d 夸克成为 μ 中微子的。对于电荷为 $-\frac{1}{3}$ 的 d 夸克变为电荷为 $+\frac{2}{3}$ 的 u 夸克，电荷增加为 1。由于 μ 中微子的能量变化，u 夸克远离和接近时 u 夸克伸长为弦状，则产生夸克和反夸克而放出介子。碰撞的 μ 中微子能量变大时，弦拉长直到断开，这时也能产生一些介子，这就是弱相互作用机制，它是镜像的基本粒子把所有电

荷都算进的现象，是实际所产生的空间反演，而粒子、反粒子的反演则是不再产生空间反演的现象。由于光子交换是在电子运动变化反应中的，所以空间反演后的现象实际也有粒子反粒子反演的现象。

若在正电子放出的方向上放一面镜子，当 $\bar{\nu}$ 粒子的 β 衰变现象进行得快时，粒子运动行进方向上会有反演的现象，由于粒子的自旋方向不变，行进方向右旋变为左旋，左旋变为右旋而映射，这就是对称破缺的显示。

以上内容可参阅图 5-16。

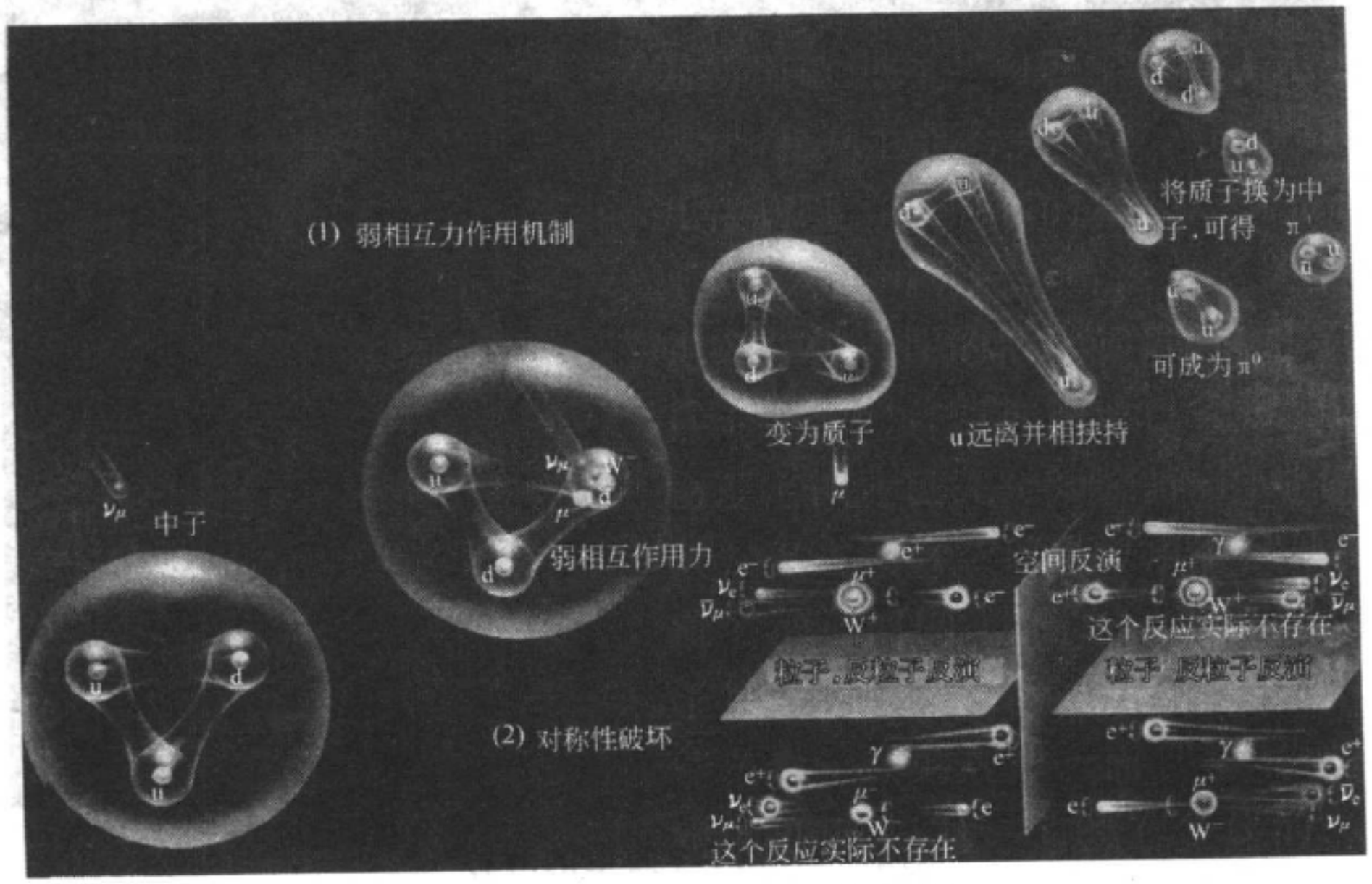


图 5-16　弱相互作用与对称破缺

5.3　基本粒子的对称性和统一场论

在物质世界中，对称性是一个重要的概念，在微观世界中更是为人们所重视的问题。对于粒子世界，我们所讨论的对称性一般

包括时间反转对称、粒子反粒子的反转对称、空间旋转对称、空间反转对称等类型，对称性又是和某种守恒定律相对应的。因此，对对称性的研究不只是一般所讲的几何学的意义了，它反映了粒子世界中的一些基本物理规律。这里我们先做一些介绍，在以后叙述的内容中，将还要涉及。

图 5-17 是介绍了这几种对称性的说明图。

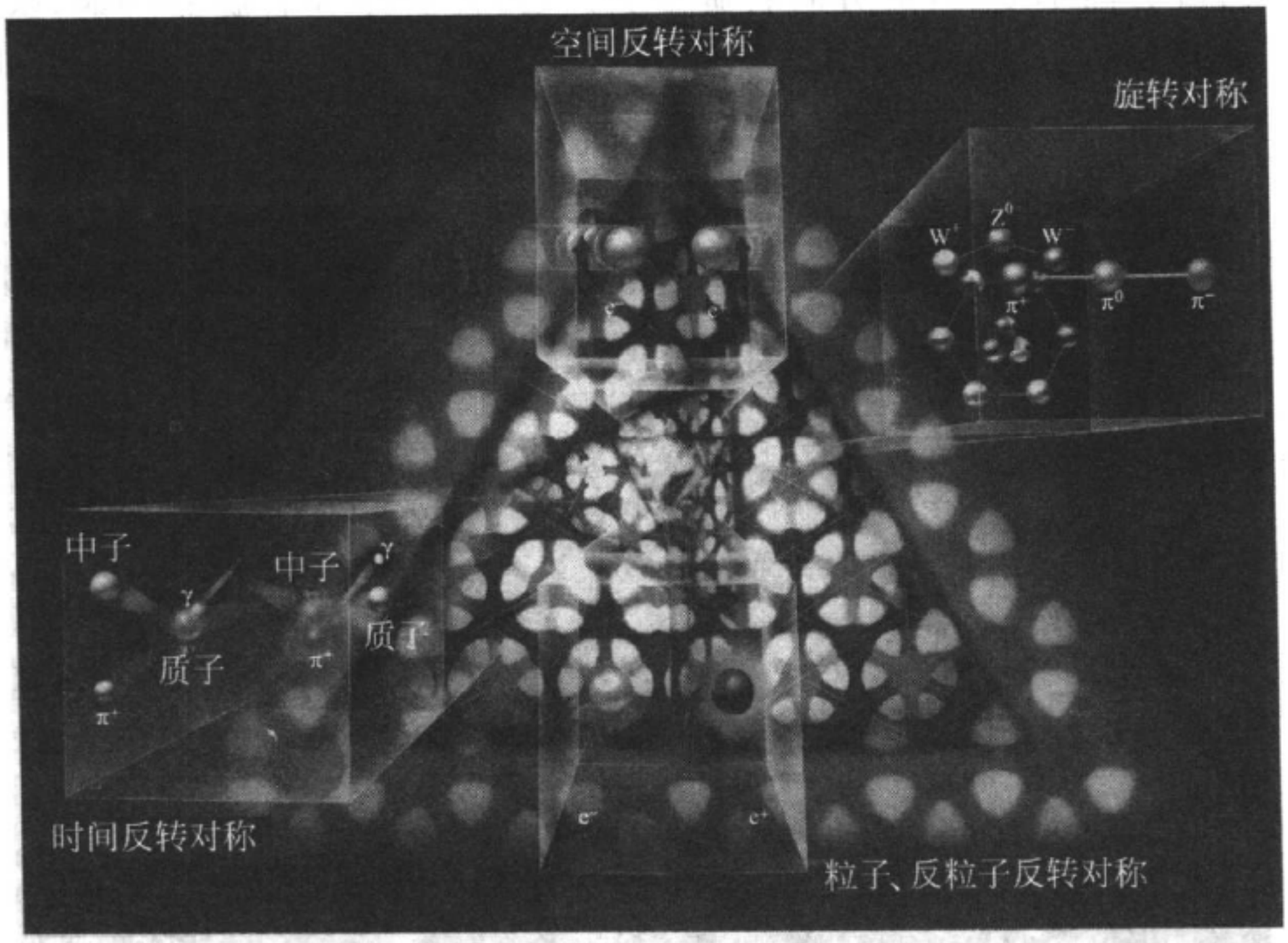


图 5-17　几种类型的对称

前面我们提到了自然界的四种作用，即引力、电磁力、弱相互作用力及强相互作用力。对于这四种力(场)的作用是否能统一起来，这是多年来不少科学家孜孜以求的梦想，尤其是爱因斯坦晚年曾花费了很大的精力致力于这些研究。图 5-18 是将一些科学家研究工作的来龙去脉用图示法所表示出来的脉络图，从中不仅可

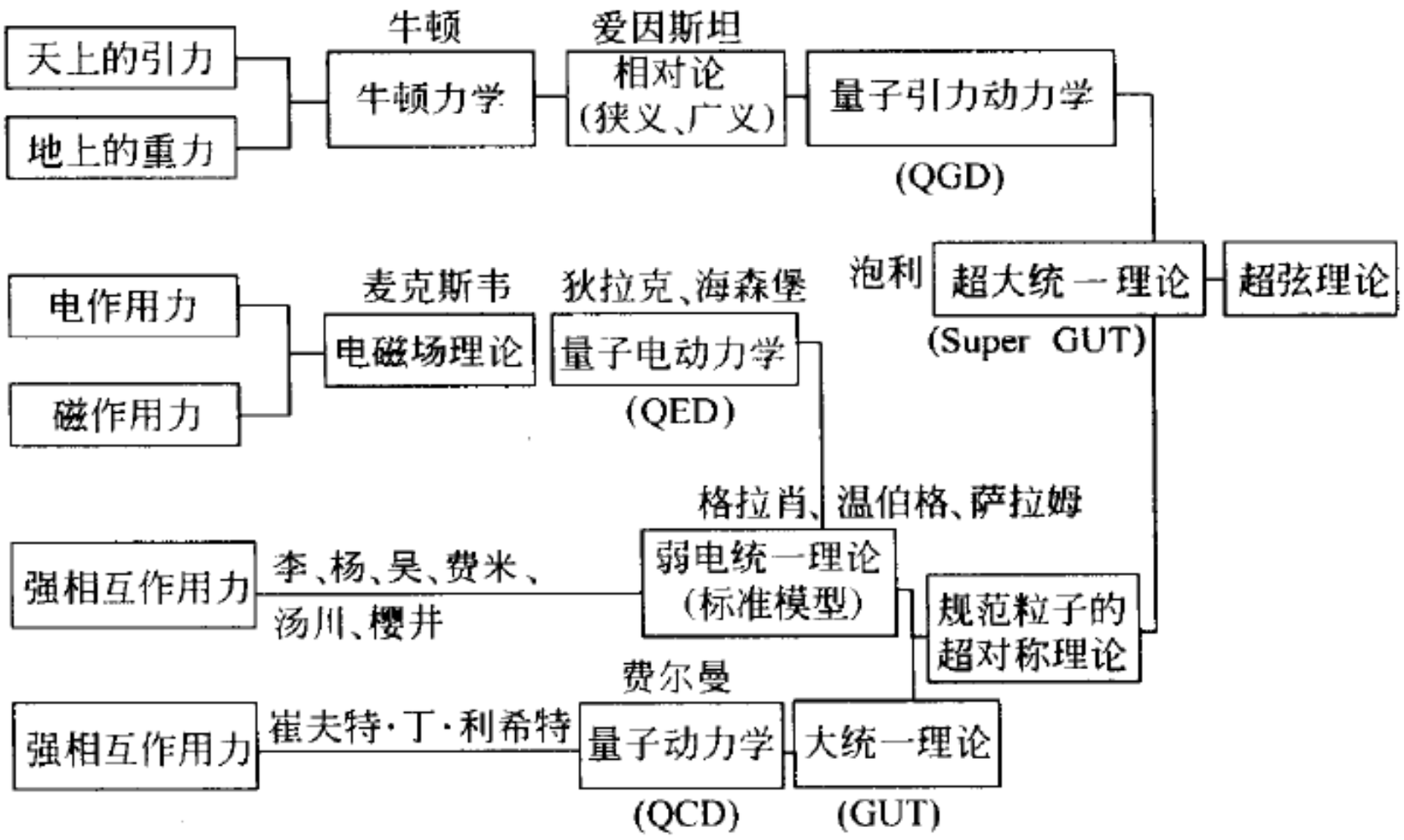


图 5-18　相互作用研究脉络图

以看到历史上许多科学家的工作，也能看出近年来的研究工作走向。尤其值得提起的是近年来一些科学家所做的一些工作，首先要介绍的是杨-缪尔斯规范场理论，对于这个理论的粗略解释是，若把一个正方形的橡皮分成许多小格，再把每一小格都旋转一样的角度则可得到图 5-19 右上方的图形；若我们把每一小格或再分得更小的小格各自旋转不同的角度则可得图 5-19 左下方的图形。对此，我们可做出解释：①橡皮形变是因各部分旋转不一造成的，也就是局域化相因子变换而引起对称性的破坏，而造成对称性破缺。②橡皮形变是因为外加力场，这个场叫做规范场，新加入了规范场就能代替局域化相因子变换。同样，若对某一系统而言，则可用图 5-20 来表示。设某系统其哈密顿量为 H，若有电场作用，局域化相因子变化，就会显示其哈密顿量变化，这时若施加一个 A_μ 的新场（规范场），就可以使该系统的哈密顿量保持不变，这时的哈

密顿量 H 就变为新的哈密顿量 H'，也就是 H' 是电场加上规范场 A_μ 后的共同结果。杨-缪尔斯理论对引力规范不变性做出了很大的贡献。

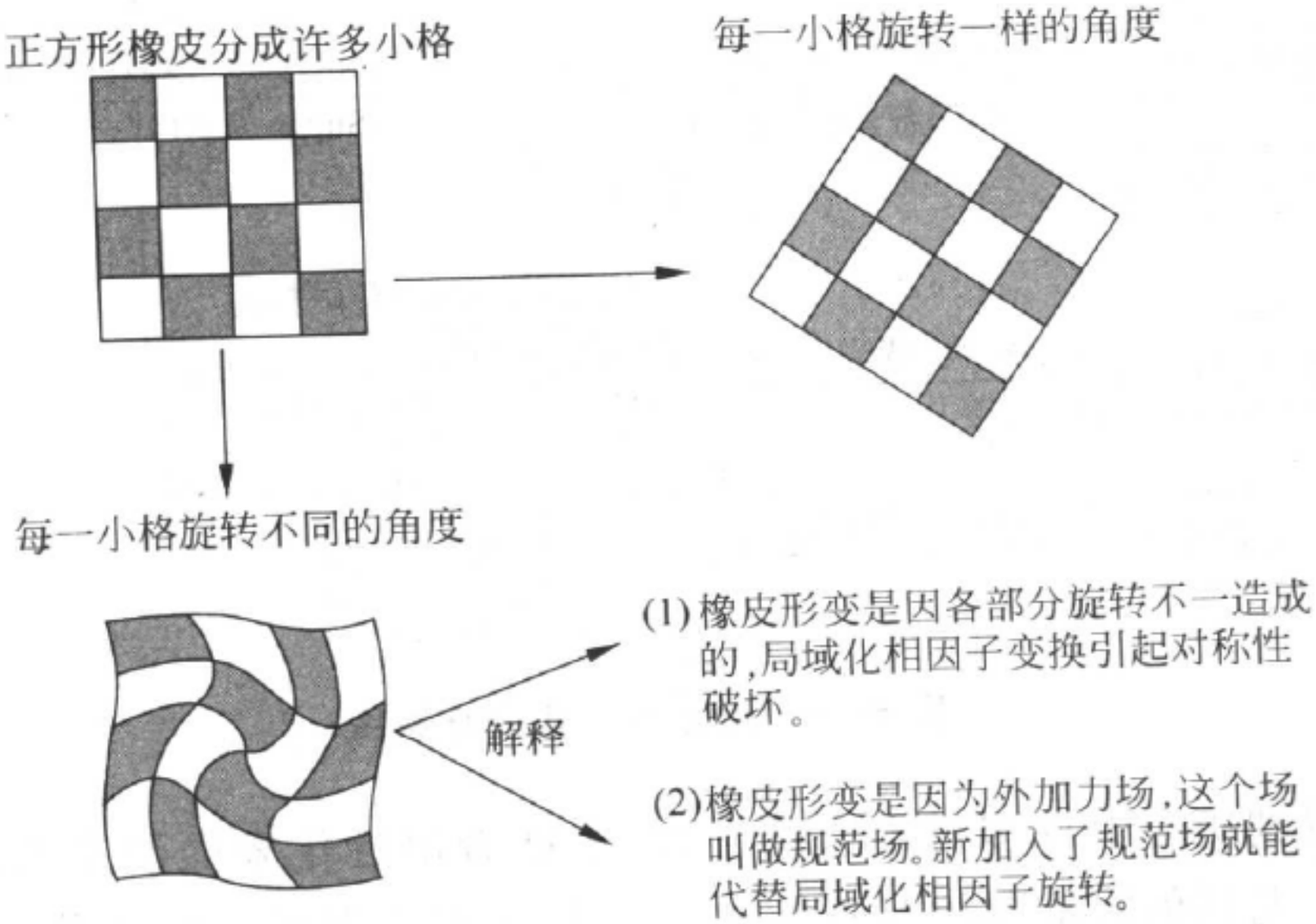


图 5-19　规范场说明示意图

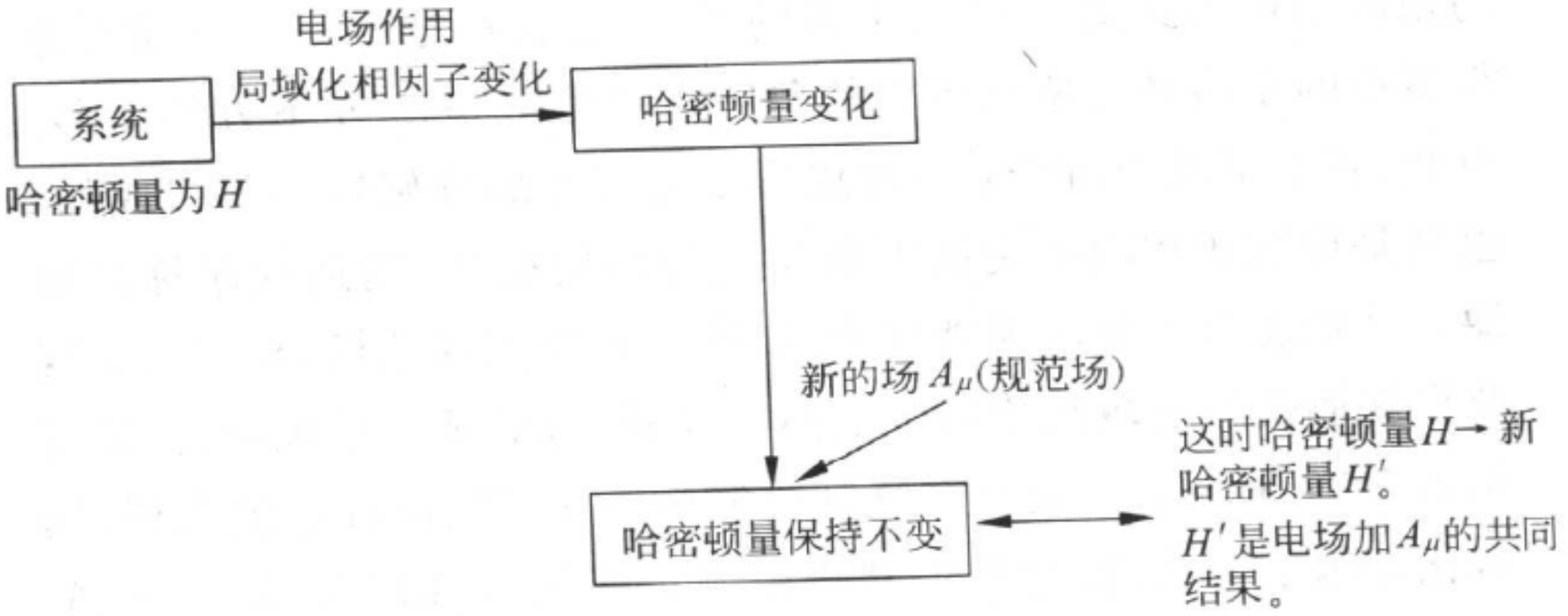


图 5-20　对某一系统规范场变化的解释图

后来，又发展出来了弦理论，所谓弦理论，就是把粒子看作为振动方式的一种体现。有人把弦理论纳入了 M 理论，对于 M 理论中的 M，有人说 M 代表了 Magic(魔术)，有人说代表了 Mystery(神秘)，也有人说代表了 Membrane(薄膜)……当然，还有其他的说法，不过由此也可看出，人们在不停地追求，理论也就在不断深入、不断扩展。此后，又发展形成了超弦理论。在弦理论中其基本假定是将基本粒子表示为一小段振动弦，而不是以前理论中假定的点状物，弦理论的显著特点是，若弦振动的方式不同表现出的就是不同的粒子。如以某种方式振动它就表现为一个引力子，若以另一种方式振动，它又表现为一个规范玻色子。20 世纪 80 年代初期，舒尔茨(Schuarz)和格林(Green)将超对称用于弦理论，建立起了超弦理论。超弦理论是十维时空体系中振动的弦，超弦理论自然地包含了杨-缪尔斯的引力规范不变性。事实上，这些不变性是一个推广的巨大规范结构的一小部分。所有的粒子(夸克、轻子、规范玻色子、引力子以及他们的超对称伙伴)被建造于同一基本客体——基本弦上。由于其复杂的对称结构的帮助，量子超弦理论是可以重整化的。因而超弦理论有可能解决重整化引力的长期难题，这也是第一次宣称可以重整化引力的理论。超弦理论已成为四种基本相互作用统一理论的强有力的候选者。

现在，在宇宙的低能状态下，是分别从弱相互作用力、强相互作用力和电磁力三方面来讨论。当能量高时，强相互作用变弱，10^{24} eV 能量下，三个力同时增强，这时，强相互作用力、弱相互作用力、电磁力的差别就表现出来了，夸克和轻子的区别也就出来了。夸克变为轻子，轻子变为夸克，这种反应的媒介物就是“x 粒子”、“y 粒子”等新规范粒子。若 x 粒子、y 粒子存在，那么即使是在低能状态下，质子也会产生由夸克变为轻子的反应，即质子衰变。但是，夸克类同类粒子仅靠近到超近距离才有反应，否则该反

应不会发生。其发生几率是 10^{23} 年会产生一次捕获，若微质子存在时，其中有几个在短时间内会衰变。为了检验质子衰变，世界各地都在进行实验，从实验可知，简单的衰变反应比质子衰变寿命 10^{23} 年还要长。这也否定了简单的大统一理论的预想，有关三种作用力及质子衰变的图示请见图 5-21。

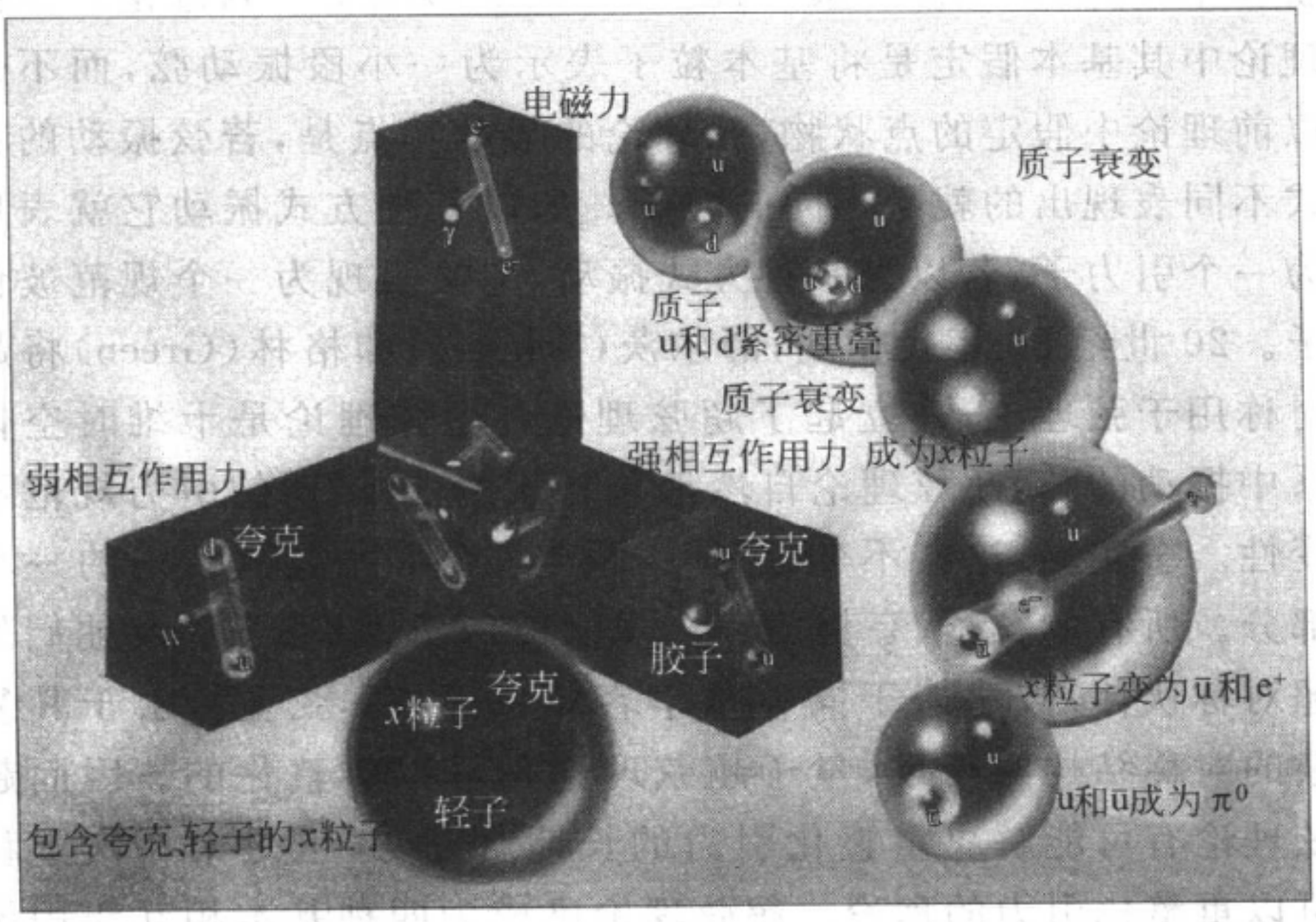


图 5-21　三种作用力和质子衰变

若将物质结构在尺度上的变化和能量变化联系起来可以发现，尺度上最微小却是能量最高的就是粒子物理的内容。另外，我们又发现粒子物理学与天体物理学（及宇宙论）这两者表面上看来南辕北辙，结果却殊途同归，有合二为一的趋向，奇妙地体现了大与小辩证的统一。粒子物理学所面临的挑战在于探索更加细微尺度下也就是更高能区物质结构的规律，希望能超越现有的标准模型，追求相互作用的进一步统一。而宇宙大爆炸的

标准模型则表明早期宇宙是处于超高能状态。因而高能物理学从某种意义上来说是对宇宙进行考古学研究。提高研究的能量范围，就等于追溯到更早期的宇宙。高能物理和天体物理的实验研究都属于大科学的范畴。大科学威风凛凛，但大也有大的难处，所面临的问题在于如何持续地获得社会的支持。多少年前，巨型加速器成为国力的象征，理所当然地得到国家的支持。现在，情况显然有所不同，需要考虑这类基础科学研究的社会效益问题了。

在宇宙发生初期，其演变情况如图 5-22 所示，宇宙初期发生的事件是与以上四种基本作用相联系的。

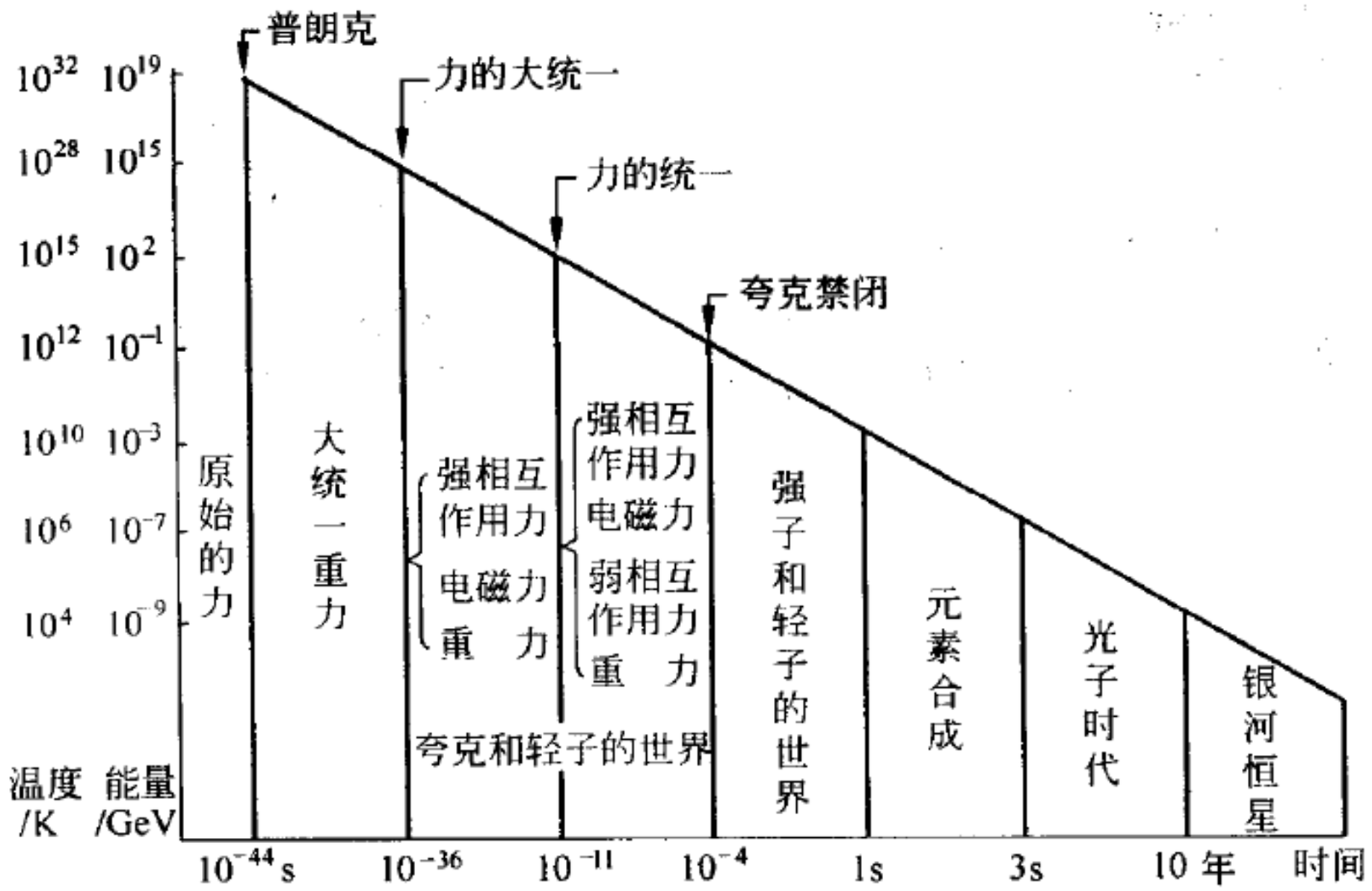


图 5-22　宇宙初期事件

现在，我们正在用加速器再现宇宙初期事件。图 5-23 表示宇宙大爆炸后的反应并用加速器再现宇宙初期的事件。

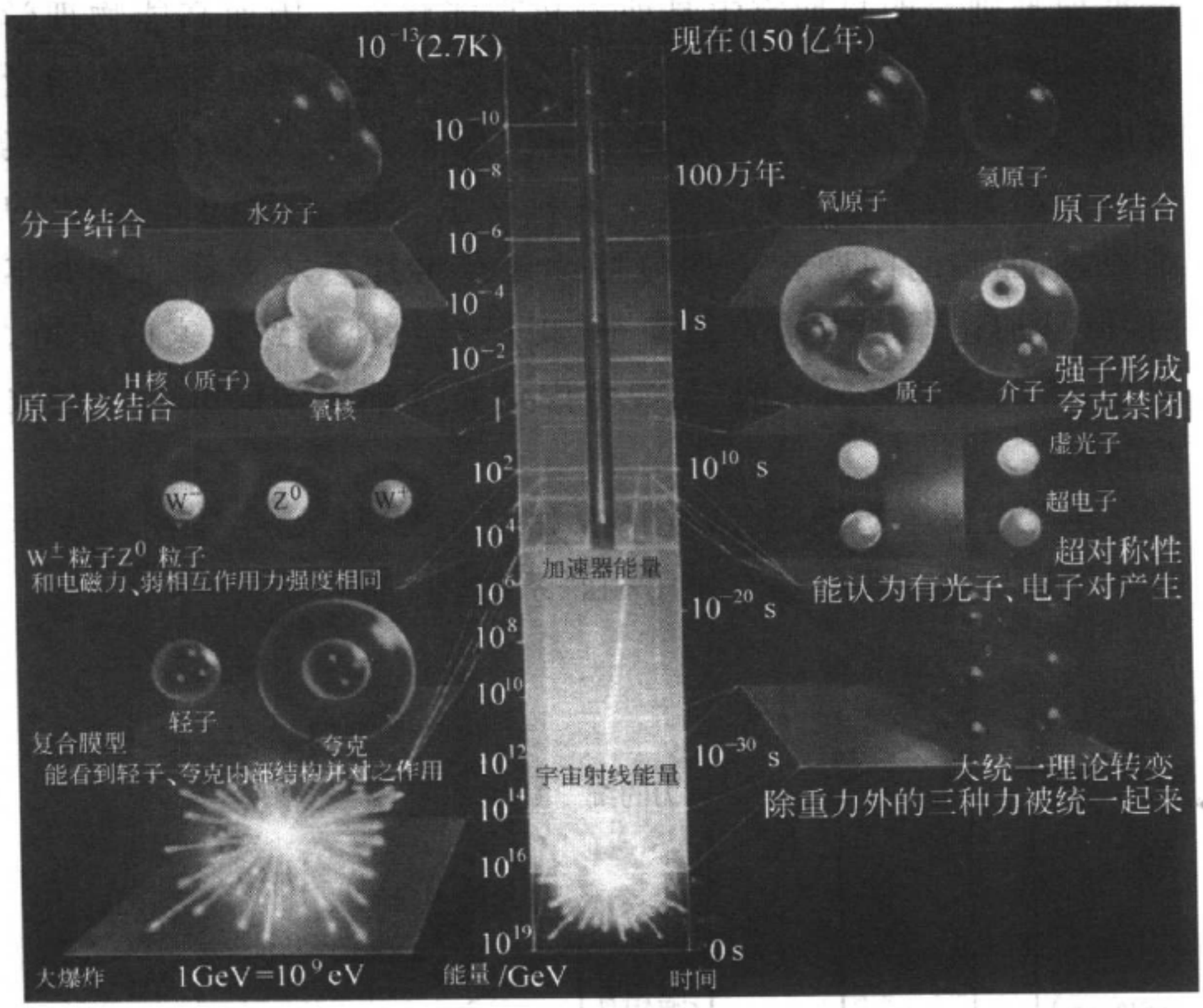


图 5-23　宇宙大爆炸后的反应(时间、能量图)

5.4　描述微观物理世界的最基本观点是什么

自从物理学形成以来，物理学的基本概念、规律不断演化发展，尤其 20 世纪对微观物质世界的认识更是不断深入。为此，人们往往思考一个最为基础也是最为重要的问题，这就是描述微观物理世界的最基本的观点是什么？对于这个问题的回答，典型的有以下三种：

① 还原论的观点，即寻求物理世界的最基本的单元。

② 波、粒二象性的观点，即认为波动性和粒子性这两个绝对相反的观点贯穿于研究物质世界的全部内容。

③ 对称性是最基本、最重要的观点，即认为对称性对应了物理世界中的守恒定律。

下面我们就分别来叙述。

1. 还原论的观点

物理学家惯用的一个观点往往是还原论。所谓还原论，就是将世界分成许多小的部分，每一部分研究清楚了，最后拼起来整个世界的问题就解决了。这个观点是很自然的，物理学家过去受到的正是这个训练，基本上就很容易接受这一观点。鼎鼎大名的爱因斯坦就讲过："物理学家的无上考验在于达到那些普适性的基本规律，再从它演绎出宇宙。"这可以说是爱因斯坦的雄心壮志，也是几代物理学家抱有的看法。就是说，如果把世界基本规律搞清楚了，那么一切事情都解决了。著名理论物理学家狄拉克也讲过一句很有代表性的话，当时适逢量子力学初步建立之后，他说："现在量子力学的普遍理论业已完成，作为大部分物理学与全部化学的物理定律业已完全知晓，而困难仅在于把这些定律确切应用将导致方程式太繁杂而难以求解。"他的意思是基本的物理规律已经知道了，下面似乎就是一个求解的问题，至于求解，由于有些方程过于复杂，似乎还解不出来。这话并不错，但他忽略了复杂事物中可能蕴含了新的规律。而且基本规律知道了，具体规律是不是就一定能推出来，这一直是有争议的。

19 世纪还有一种极端的意见，就是所谓实证论的观点，以奥地利科学家马赫为代表。马赫也是哲学家，他认为物理学家只需要追求宏观物体之间的规律，去搞清微观的东西似乎没有用处，且对微观世界是否存在，分子、原子是否存在，他一概采取否定态度。显然这类观点过于极端。实际上应该看到，物质结构存在不同的层次，层次与层次之间是有关联、有耦合的，因此需要理解更深层

次的一些规律。譬如固体的导电问题，牵涉到电子在固体中的行为问题，如果把这一行为搞清楚了，那么对固体为什么导电，为什么有的是半导体，有的是导体，有的是超导体这类问题都可给出解释。这就有利于推动人们去研究导电现象，以及利用这些现象做出晶体管，做出集成电路，做出超导的约瑟夫森结，来为人类服务。这就说明层次与层次之间存在耦合现象。

另一方面，层次与层次之间也存在脱耦现象。所谓脱耦现象，就是下一个层次的现象对上个层次未必有重要关系。例如，1995年发现了顶夸克，这在粒子物理界是件大事，因为设想的几种夸克包括最后一种顶夸克也都发现了。但是这一发现对固体物理或凝聚态物理有没有可以观察到的影响呢？没有，到现在为止，似乎一点影响也没有。粒子物理的进一步发展，对其本身、对理解粒子的性质和宇宙早期的问题，确实具有极大的重要性，对于原子核理论也具有一定意义。但是，它对理解相隔好几个层次的物质就丧失了重要性。再如，原子核的壳结构对遗传有没有影响呢？一般说来看不出太大的影响。这些例子都表明，层次之间既存在耦合，又存在脱耦，而且大量粒子构成的体系往往涌现新的规律。

对此，物理学家提出了所谓层创论的观点。这里是著名凝聚态理论家安德森(P. W. Anderson)讲的一段话："将一切事物还原成简单的基本规律的能力，并不意味着我们有能力从这些规律来重建宇宙。当面对尺度与复杂性的双重困难时，构筑论的假设就被破坏了。大量复杂的基本粒子集体，并不等于几个粒子性质的简单外推。"也就是说，知道两三个或四五个粒子的规律，并不能说明 10^{20} 或 10^{24} 个粒子的集体规律。在每一种复杂的层次上，会有完全新的性质出现，而且对这些新的性质的研究，其基本性并不亚于其他研究。也就是说物质结构存在不同的层次，大量的粒子会构成一个新的层次，也展现了新的规律，对这些新的规律的研究，本身也具有基本性，重要的是要认识到各个层次之间既有耦合，也

存在脱耦。并非是探究清楚最微观层次的规律，就可以把世界上的问题全部解决。

近年来有些科学家提出一个观点，认为粒子物理理论中建立的标准模型面临着新的挑战，下一步就是希望建立“万事万物的理论”。进行这类尝试是完全应该的，要向未知领域再推进！但一定要采取辩证的观点对待：既使这个理论取得进展，也并不意味着万事万物的问题就可迎刃而解了。物理学现在的生命力，并不是要把它的全部命运都跟万事万物理论联系在一起，而是体现在众多的发展层次，在不同层次上都有新的挑战和机遇，存在广泛发展的天地。

尽管由于物质结构层次化的结果，使得当今物理学家很难精通也不必要精通物理学的各个分支，但是物质结构在概念上是有其统一性的。相同的概念会在不同的层次上出现。著名物理学家巴丁(J. Bardeen)的一段话很有启发性，他说：“处在这日益专业化的时代之中，得以认识到基本物理概念可能应用于一大批看起来五花八门的问题，是令人欣慰的。理解某一领域所获得的进展常常可以应用于其他领域，这不仅对材料科学的众多领域是确实的，对广义而言的物质结构亦复如此。作为阐述的例证，为理解磁性、超流性和超导性所发展的概念也被推广应用于众多的领域，如核物质，弱相互作用与电磁相互作用，高能物理学的夸克结构与众多的液晶相。”这段话值得我们深思。

2. 波粒二象性的观点

有人曾说过：“物理学科的发展经历了两个时期：从质点运动和波动这两个极限来反复研究热、光、声、电、磁等效应的经典物理和解释了原子内结构及波粒二象性的近代物理。”从牛顿力学开始建立之时起，物体(物质)的运动都是和服从牛顿力学的物体(包括微粒)运动相互联系起来的。甚至对光的认识也是如此，认为光是由微粒组成的，光的特性是由粒子运动而形成的。

人们对波动的认识也是从牛顿力学开始的，然后再从大家所熟知的水波、声波、电磁波（光波）中认识到了这些都可归纳为是粒子（介质、媒质）振动状态的传播，进一步的讨论人们认识到了微观世界中的自旋波。例如，铁磁物体内有大量具有自旋的原子，热激发可以使这些自旋本来都彼此平行的原子有一部分突然反向，原子间的相互作用能使局部反向的自旋状态以波的形式逐渐传开。再进一步就是讨论粒子振动状态的传播发展到场（电磁场、引力场）振动状态的传播，而这些都隶属物质运动状态的传播，并都伴随能量的传递。在微观世界的讨论中又发现粒子出现几率的传播，这就是几率波，它仅是几率分布状态的传播。因此，初期是研究质点（物体）本身的运动，接着就是振动物体振动状态的传播（物体本身没有传播出去），接着又是场的振动状态的传播，以及微观世界中的自旋波传播，再抽象到几率波、物质波，这个过程的进展是很明显的。对各种波动的认识，明显地可看出都是从可直接感知的对象开始的，如最直观的水波、可听的声波、可见的光波，然后才扩展到越来越“理性”的波，如弹性波、电磁波……一直到最抽象的德布罗意波。还应该提到，认识过程中突出地使用了类比方法，将光、声类比于水波，并且又在声、光之间进行类比，在粒子与光之间进行类比。类比是一种很重要的研究方法，P. S. M. 拉普拉斯曾经说：“甚至在数学里，发现真理的主要工具也是归纳和类比。”

随着对波动认识的逐步加深，人们对波动性和质点运动特性这两个矛盾着的对立面的相互关系开始了研究，例如，关于光本性的认识过程，它本身就是螺旋式上升、波浪式前进的一个极其生动的例子。从承认光波兼有粒子性（光子），到承认粒子兼有波动性（德布罗意波），物理学又多了一个宝贵的思想——物质普遍具有波粒二象性，这正体现了在物理学史中这两个极限观点的辩证的关系对物理学的发展所起的重大作用。

1923 年，德布罗意提出“物质具有波粒二象性”的假设，创造

性地做出“电子具有波动性”的预言，为量子论的发展开辟了一条崭新的途径，打通了薛定谔通往波动力学的道路。1926 年，玻恩提出波函数的统计解释，找到了波与粒子统一的线索，把波与粒子统一到几率波概念的基础上，为量子力学提供了全新的概念基础。1927 年，海森伯提出了不确定性关系（或原理），加深了人们对量子本质的认识，极大地推进了人类认识微观客体本质属性的历史进程。

波粒二象性作为一对矛盾的统一体，人们一般很难将它与“和谐”的概念相联系。然而，N. 玻尔却从其中领悟出“互补性”思想。在矩阵力学和波动力学相继提出不久，玻尔就认识到，在量子力学的物理解释中兼容波粒二象性的重要意义，他一方面要说服 W. K. 海森伯接受波动观念，另一方面又要说服 E. 薛定谔接受粒子观点；特别在海森伯提出测不准关系之后，玻尔更加明确了波粒之间的互补性，他这样阐述了微观世界里的互斥互补概念：

“互补一词的意义是：一些经典概念的任何确定应用，将排除另一些经典概念的同时应用，而这另一些经典概念在另一种条件下却是阐明现象所同样不可缺少的。”

玻尔甚至将互补思想推广到物理学之外的其他领域，这就更容易引起广泛的争论。因此，可以说粒子、波动以及他们既矛盾又统一的特性，随着物体尺度上的微细化而体现出了不同层次上的复杂结构和物性，当然也可以说粒子、波动的观点贯串在物理学史的全部发展过程中，因而有人强调它应是描述微观物理世界的最基本的观点。

3. 对称性的观点

对称性对物理世界的重要性，在进入 20 世纪后，人们才有了更多的认识和更深刻的了解，其重要性表现在以下几个方面：

① 对称性显示了守恒定律。

② 对称性及对称破缺思想对物理基础理论的演进及物理定

律表述的影响。

③ 对称性作为研究方法在认识物理世界过程中所发挥的巨大作用。

对称(symmetry)是一个外来词,原意为几何图形有规则的重复,即反映了几何变换中的不变性。旋转对称表明,几何图形绕定轴转动后不变;反射对称则来自平面镜前后的物像关系,它们的几何尺寸是相同的……后来,这些简单的不变性又扩展到几何图形的放大或缩小。

蜂窝、雪花、……以及诸多动物的外表,都显示出这样或那样的对称。人们从自然现象中接触到广泛的形象对称,并且从其中得到美的感受,反过来又有意识地将它用于建筑、装饰、绘画、文学等艺术性较强的领域。一般说来,带有变化的对称,更容易受到人们的喜爱。

借鉴于形象对称,很快就衍生出抽象对称;毕达哥拉斯甚至将奇偶、真伪、……与左右、物像并列。于是,对称性几乎无所不在。英国诗人 A. 威克汉姆(Wickham, 1884—1947)曾经奉献出这样崇敬的诗句:“上帝,您至高无上的对称。”

物理学首先通过物质结构认识到对称性,从雪花到晶体,从球状的太阳到盘状的银河系,甚至比原子更小的微粒子,无不具有对称特点;抽象对称在物理理论里也逐渐崭露头角,特别在进入 20 世纪之后,人们认识到对称性与守恒定律之间的紧密关系,对称性更加受到物理学界的重视。可以说,现代物理学的不少重大突破,都直接或间接与对称性及其破缺有关。

这里首先介绍对称与守恒,我们知道经典物理学的守恒定律一般都有着悠久的历史,它们的重要性也早为人知;但是,守恒与对称的关系,一直到 20 世纪初,似乎都没有受到人们的重视和认真的研究。1842 年,C. G. J. 雅科比(Jacobi, 1804—1851)初步接触到这个问题,而真正深入探讨守恒与对称关系的,当推德国女数

学家 E. 诺德(Noether，1882—1935)；在微观领域中，则以E. P. 维格纳(Wigner，1902—1995)的贡献最大，为此，他荣获 1963 年诺贝尔物理学奖。

时间、空间的某些对称性导致了大家所熟知的守恒定律：空间均匀性引出动量守恒、时间均匀性引出能量守恒、空间各向同性引出角动量守恒。我们以动量守恒为例，给出简略的说明。空间均匀性即空间的平移对称，要求物理定律在空间平移时保持不变。对于一个远离其他物体的力学系统，如果在空间某处其质心是静止的(只要选择合适的惯性参照系，这总是可能的)，则将这个系统移至空间的另一处，其质心相对于原来选定的参照系将仍然静止；否则，移动前后的力学规律应有所不同，这与前提矛盾。于是，一般地说(对于任一惯性系)，力学系统在空间平移的过程中其质心有不变的速度，这表明系统的动量守恒。关于能量守恒及角动量守恒，也同样有类似的关系，这里就不作详细讨论了。当然有很多抽象的逻辑关系，不是都可以用浅显的道理能说清楚的。

这里要想一再说明一下宇称守恒和空间的左右对称，当原子吸收或释放光子时，能级之间的跃迁，不是从偶到奇就是从奇到偶。能级的偶性或奇性，后来被称为能级的宇称，并定义偶能级有宇称+1，奇能级有宇称−1。如果认为，原子释放光子时，初态的宇称等于原子终态宇称与放出的光子的宇称之积，则被原子吸、放的光子应具有奇宇称，从而维护了宇称的守恒。

1927 年，维格纳得出证明，拉波特法则来源于原子中库仑力的镜面对称性，并由此引进波函数的宇称概念，将宇称守恒与镜面对称联系起来。

大家知道，平面镜前后的物像关系是左右对称的，右旋坐标系的镜像是左旋坐标系(图 5-24)；将“物”坐标系的 x 轴逆反，即得

"像"坐标系。于是,镜像变换后,有

$$x \to -x$$

$$y \to y$$

$$z \to z$$

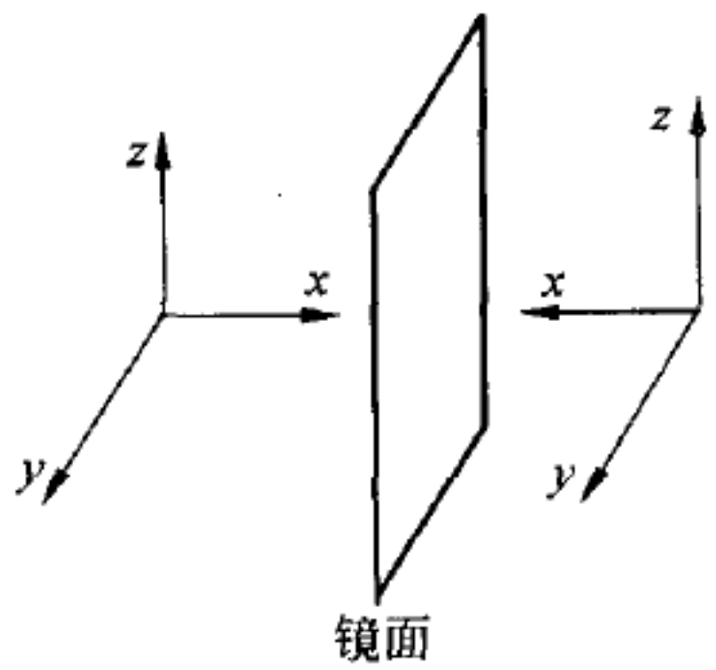


图 5-24　坐标系的镜像

不难看出,它等价于空间反演变换(图 5-25)

$$x \to -x$$

$$y \to -y$$

$$z \to -z$$

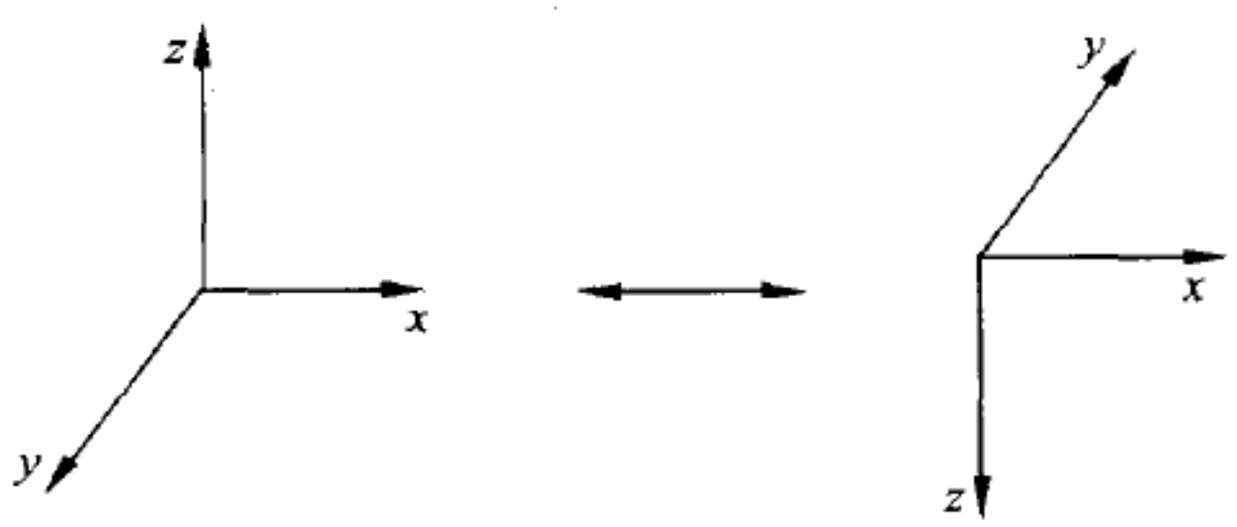


图 5-25　二坐标系等价

只要将像坐标系绕 x 轴旋转 180°,图 5-25 中的两套坐标轴就可以完全重合。

物理学的镜面对称，要求镜面两边的物理过程，或者都可以实现，或者都不可以实现，物理规律对左手坐标系和右手坐标系同样有效。波函数 $\psi(r)$ 宇称的奇、偶也是以 $\psi(r)$ 的空间反演结果来区分：

$$\psi(-r)=+\psi(r)\text{——偶宇称}$$

$$\psi(-r)=-\psi(r)\text{——奇宇称}$$

以无限深势阱为例(图 5-26)，波函数 ψ_1、ψ_3 是偶宇称($P=+1$)，波函数 ψ_2 则是奇宇称($P=-1$)。

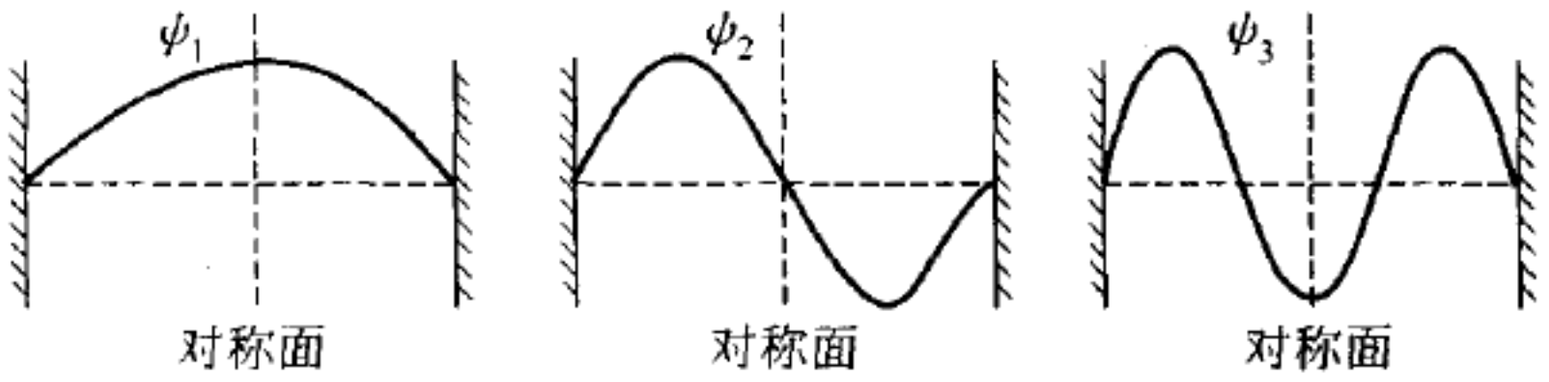


图 5-26　无限深势阱的波函数

宇称概念很快由原子物理学推广到核物理学及粒子物理学，人们逐渐习惯于使用原子宇称、核宇称以及各种粒子的内禀宇称。正如杨振宁在接受诺贝尔奖时所说，θ-τ 疑难出现之前，“在所有这些发展中，证明了宇称概念以及宇称守恒定律是非常富有成效的，而且这些成功反过来又支持了左右对称的有效性。”维格纳所确立的宇称守恒定律，简称为 P 不变性，它标志着空间反演的对称性。1932 年，维格纳又提出时间反演的对称性，即 T 不变性。后来从电磁的规范变换又引出了规范对称，引出了对称群、规范群，这些虽然越来越为人们所重视，但也越来越抽象了。

这里我们再介绍八种普遍成立的守恒定律和它们相应的对称变换，如表 5-2 所示(同表 3-2，为方便介绍，这里将表再次列出)。

表 5-2　普遍的守恒定律

守恒量	对称变换
能　量	时间平移
动　量	空间平移
角动量	空间旋转
电　荷	电磁规范
重子数	重子规范(可能破缺)
e, μ, τ 轻子数	轻子规范(可能破缺)

事实上,守恒定律往往直接从大量的实验事例中总结出来,带有极大的经验性,需要在应用时进一步接受检验,也需要在理论上做出说明。一方面,运动定律的建立尽可能地依赖于有关的守恒定律;另一方面,这些守恒定律又可以作为运动定律的推论。

狄拉克极其迷恋对称性,1933 年他在接受诺贝尔奖的演说中最后有这样一段话:

如果我们承认正、负电荷之间的完全对称性是宇宙的根本规律,那么,地球上(很可能是整个太阳系)负电子和正质子在数量上占优势应当看作是一种偶然现象,对于某些星球来说,情况可能完全是另一个样子,这些星球可能主要是由正电子和负质子构成的。事实上,有可能是每种星球各占一半,这两种星球的光谱完全相同,以至于目前的天文学方法无法区分它们。

但是,与对称性相对应的是不对称、对称的破缺,这在自然界中也同样是显而易见的。以正、负电子的出现,推论到正、负物质的存在可能,因而,后来有人试图建立正、反物质对称的宇宙模型,但未能成功;事实上,我们所观测到的宇宙十分不对称,反重子数

的密度几乎为零，即使在宇宙射线中难得一见的反质子也不是原始的，而是来自次级反应。尽管如此，人们仍然舍不得放弃完善的对称性，认为早期的宇宙还是有着等量的正反物质，只是在发展过程中演变成今天极其不对称的局面。

其次，再讨论一下对称性、对称破缺思想对物理基础理论演进及物理定律表述所产生的影响。这里先从近代物理基础理论的建立谈起。关于德布罗意波及薛定谔方程的提出，都用到对称性思想，前者为了维护完整的波粒二象性，后者则是联想到了哈密顿原理与费马原理之间是“非常相似”的。

无论是狭义相对性原理所主张的所有惯性系之间的平权，还是广义相对性原理所主张的所有坐标系之间的平权，其实质都贯彻了一种对称性思想，即反映了平移对称。A. 爱因斯坦在论文《论动体的电动力学》中，一开始就写道：“大家知道，麦克斯韦电动力学——像现在通常为人们所理解的那样——应用到运动的物体上时，就要引起一些不对称，而这种不对称似乎不是现象所固有的。”接着，他分析了由于导体与磁体之间的相对运动所产生的(感应)电动势，其中闪耀出爱因斯坦的对称性思想。同样，在谈到广义相对论时，爱因斯坦在《自述》中写道：牛顿的力学理论有“一种内在的不对称性，即在运动定律中出现的惯性质量也在引力定律里出现，但不在其他各种力的表示式里出现”。正是这一思考，引导爱因斯坦走向了等效原理。

其实，对称性思想对经典物理学的发展也是有重大贡献的。以电磁学为例，电磁对称作为指导思想尤为突出。M. 法拉第进行电磁感应实验并求得其规律，就是出于这种考虑，是由奥斯特实验对应过来的；J. C. 麦克斯韦建立电磁场理论的两个基本思想也是对称的：随时间变化的磁场在周围伴生电场，随时间变化的电场在周围伴生磁场。

物理学的宏观定律往往也具有优美的对称形式，众所周知，万

有引力定律、库仑定律以及几何光学的物像公式都是十分对称的；在每一个守恒定律里，参与守恒的各个方面都处于对称的地位；牛顿第二运动定律似乎不直接显示出对称，但在分析力学里取代它的哈密顿正则方程，却有着漂亮的对称形式。

作为宏观电磁场的基本定律，麦克斯韦方程组早先是8个零散的矢量式，后来经过H. R. 赫兹(1884)及O. 亥维赛(Heaviside，1850—1925)的整理(1885)，才演变成今天的形式。值得一提的是，他们原来写出的方程都是极其对称的，为了保证形式上的对称，亥维赛曾对应于电流密度引入磁流密度，他称之为“磁导流”，对应于永磁体，引入了驻极体，不过他认为：“这样的东西也许是不存在的。”但多年后发现驻极体是确实存在的，并很有实用价值。我们现在所使用的麦克斯韦方程组，它既对称又不完全对称，这种有变化的对称性，既陶醉了大批的物理学家，也使得一些追求绝对对称的人们不满足。当然，如果将麦克斯韦方程组改写成四维形式，还是可以掩盖它的不对称性，这时，需要使用电磁场张量 $\boldsymbol{F}_{\mu\nu}$，它是由电场强度和磁场强度联合组成的。于是，麦克斯韦方程变为

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}_{\mu 1}}{\partial x_1}+\frac{\partial \boldsymbol{F}_{\mu 2}}{\partial x_2}+\frac{\partial \boldsymbol{F}_{\mu 3}}{\partial x_3}+\frac{\partial \boldsymbol{F}_{\mu 4}}{\partial x_4}=\mu_0 \boldsymbol{j}_\mu$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}_{\mu\nu}}{\partial x_\lambda}+\frac{\partial \boldsymbol{F}_{\nu\lambda}}{\partial x_\mu}+\frac{\partial \boldsymbol{F}_{\lambda\mu}}{\partial x_\nu}=\boldsymbol{0}$$

其中 $\boldsymbol{j}_\mu$ 为四维电流密度。显然，四维表达形式极为对称，极其简明、优美。

总之，物理学家不仅追求物理思想的对称性，讲究定律形式的对称美，还特别注重物理规律在时间反演、空间镜像、电荷共轭中的对称关系。

最后谈一下对称性作为研究方法的问题。当我们谈论物质结构和物理理论的对称性时，实际上已经涉及到，对称性作为研究方

法在认识过程中所发挥的巨大作用。

研究科学史的美国学者 G. 霍尔顿(Holton,1922—),特别注意到爱因斯坦喜欢分析理论形式上的对称或不对称,他以 1905 年爱因斯坦关于狭义相对论、光量子、布朗运动的 3 篇论文为例,说道:"人们也会发现这三篇论文的风格基本上是相同的,并且显示了爱因斯坦那时著作中独特的东西。每篇论文一开始都讲到形式上的不对称或别的不合于流行的美学性质的地方……"这里所说的文章风格,其实是体现了爱因斯坦的思想方法,即将对称性作为分析问题的有效武器。

本章前述的内容已经可以看出,在物理学的一些重大突破中,对称性这把钥匙确实打开了不少奥秘之门。当然,这是客观世界的对称性,赋予了对称性方法的有效性。N. 玻尔曾高度评价了波函数的对称性在量子统计及量子化学中所起的作用,在谈到对称性对粒子物理学的影响时,他更加强调:"人们在对称性关系的研究中寻求了前进的途径,而且,从那时起,通过很多种粒子的迅速的相继发现,这种途径已被提到了重要的地位"。

对称性不仅提供了指导思想,也提供了研究方法。利用对称性,能够有效地减少运算方程中的独立变量数,简化变量之间的函数关系,从而使求解过程变得简捷易行。事实上,麦克斯韦电磁场方程、薛定谔波动方程以及爱因斯坦引力场方程,都只是在一些特定的对称条件下才给出严格解。

抓住了对称性,往往就抓住了物理问题的要害,抓住了物理现象的主要因素;因此,人们常常尽可能地利用对称性来建立物理模型。例如,通常假定太阳在周围建立的引力场、原子核在周围建立的静电场是球对称的,正是出于这种考虑而忽略了它们自身的旋转、电量或质量分布的不对称等次要因素。

物理定律的表达形式,随着理论的发展会逐步得到改进。可以这样说,定律的形式既反映了认识的水平,也会影响它的使用价

值；由于表达形式的改进，从而有力地推动了理论的发展，这在物理学史上是屡见不鲜的。牛顿力学的发展，尤其是分析力学的崛起，说明了这一点；麦克斯韦方程组的演变，也同样说明了这一点。从根本上说，是内容决定了形式；当人们认识到更优美的形式，往往更深入地接触到内容的本质。经验表明，优美的形式通常都是对称的。

为了使大家有更深的印象，我们再多举几个例子。氢光谱巴耳末公式经 J. R. 里德伯改写后，其对称形式更明确地反映了光子在原子的两个能级之间的跃迁的本质，它更容易推广到其他的光谱系，事实上，W. 里兹(Ritz，1878—1909)提出的光谱项及其组合原则就是由此发展出来的。里德伯对巴耳末公式形式的改进，为光谱理论及原子理论作出了不可磨灭的贡献。

相对论的时空关系，为我们提供了另一个令人深思的情况。爱因基坦在早先的相对论里，虽然对时间、空间进行了统一的处理，使时间和空间的变换彼此有关，但空间与时间在本质上是那样的不同，很难想象应该对它们等同看待。然而，爱因斯坦在大学时代的老师——数学家 H. 闵可夫斯基却将时间当作第四维参量，引入虚坐标 $x_4 = \mathrm{i}ct$，从而获得“空间坐标和时间坐标在形式上的等价性”，使一维时间和三维空间组成“四维时空”(1908)。

开始时(约 1910 年)，爱因斯坦对闵可夫斯基的这项工作很不以为然，以为这不过是形式上的表面文章，据 M. 玻恩证实，爱因斯坦曾经公开持否定态度。一次，爱因斯坦这样打趣着说：“自从数学家们冲击了我的相对论以来，我自己再也不理解相对论了。”但是，他很快就消除了偏见，透过闵可夫斯基的四维时空，更深刻地理解了相对论。

确实，在惯性系的四维时空里，不仅首先显示出优美对称的不变量

$$(\mathrm{d}s)^2 = (\mathrm{d}x_1)^2 + (\mathrm{d}x_2)^2 + (\mathrm{d}x_3)^2 + (\mathrm{d}x_4)^2$$

又相继得出一系列的四维矢量、四维张量，使物理量的各种组合不变性能够鲜明地披露出来；更重要的是，没有狭义相对论的四维平直时空，就不会有广义相对论的四维弯曲时空。闵可夫斯基对时空在形式上进行的对称处理，居然给相对论及理论物理带来如此巨大的影响，这是爱因斯坦始料未及的，其教益更是深刻的。

W. K. 海森伯也谈到“数学形式化所固有的创造力”，并追溯到毕达哥拉斯学派的神秘主义，他认为：它“已对人类思想发生了最强烈的影响”。从数学形式“创造”出物理内容，或者说，先求得完美的数学形式，再充实它的物理内容，这在物理学史上确有例证。在相对论提出之前，洛伦兹坐标变换已能保证麦克斯韦方程组在变换前后形式不变，在 H. A. 洛伦兹眼里，这一组时空变换仅具有形式上的数学意义，而爱因斯坦，却让它成为有实际意义的物理变换。又如，盖耳曼早先提出夸克模型时，原以为它们不过是“数学”夸克，尽管长时期没有观测到自由夸克，但夸克理论的成功使人们早就将它们看做物质实体，即从数学夸克上升为物理夸克，并受到物理学家的认真对待。

上面介绍了对称性在物质世界及物理学研究中的作用及重要性，也谈到正物质与反物质之间极不对称的事实。应该说，物质世界是对称的，又是不对称的，它确实又显示了多种多样的不对称性，从物质结构到守恒定律，都存在着对称性遭受损害的情况。研究不对称及其起源，是研究对称性的补充及延续。

H. 韦耳（Weyl，1885—1955）说：“不对称很少仅仅是由于对称的不存在。”这种看法，已经成为现代物理学的流行观点，即认为不对称来自对称。将现实中的不对称归结到历史上的对称，将不对称看做是对称性的破缺，其中心思想是以对称来说明不对称，而世界原本是对称的。

因此，这种观点也为许多人认为是描述微观物理世界的最基本观点。

5.5 20世纪物理学留下的未解疑难问题

20世纪物理学取得了惊人的进步，但也留下了一些未解的疑难问题。Joseph Norwood Jr. 曾经提出了所谓的20世纪四大物理难题的问题。

1. 统一场论的问题

图5-18中，表示了一些科学家对统一场论的研究工作，这里再作进一步的说明。前面介绍过，宇宙中物质间存在着四种基本的相互作用，即强作用、弱作用、电磁作用和引力作用。一般认为，这些相互作用都是靠“场”来传递的。例如，经典物理学中电磁作用靠电磁场传递，引力作用靠引力场传递。人们总是希望能用最简洁的方法表示自然界的规律，因此，物理学家们试图寻找一种能统一地描述这四种相互作用的场理论，这就是“统一场论”的研究。

经典的电磁理论和牛顿的引力理论仅仅解释了电磁作用和引力作用的宏观现象和规律，而实现统一场论，则必须从相互作用的微观机制出发，建立各自的微观理论，再逐步地统一。

20世纪30年代初，由狄拉克、泡利、海森伯等人建立了量子电动力学(QED)，克服了经典电磁理论无法解释电磁辐射和物质相互作用过程(如黑体辐射问题、光电效应现象)的缺陷。到了20世纪40年代末，由于重整化方法的建立，这一理论更趋完善，使之成为描述电磁作用的非常成功而且相当精密的理论。

弱相互作用的最初理论是由费米于1934年提出的，以后在实验和理论研究的推动下不断发展。尤其是1957年，李政道和杨振宁提出的弱作用下宇称不守恒的假说被吴健雄等人用实验证实，由马谢克、苏达香、费曼、盖尔曼以及樱井等人对费米的理论作了修正，修正后的理论就是普适费米弱相互作用理论——V-A理论。

1954 年，杨振宁和缪尔斯提出了一种新型的场理论——规范场理论，这个理论对以后统一场论的研究具有开拓性意义。经过一大批科学家的努力，规范场理论得以广泛的运用。

20 世纪 60 年代末，格拉肖、温柏格和萨拉姆建立起弱电统一的规范场理论。这个理论解释了实验上已观察到的弱作用和电磁作用的规律，它成为统一地描述电磁作用和弱作用的动力学理论——量子味动力学(QFD)的标准模型。

20 世纪 70 年代，人们开始建立强相互作用的规范场理论——量子色动力学(QCD)，这个理论已经得到了不少实验的支持。进而有人尝试在弱电统一理论和量子色动力学的基础上，建立强、弱、电磁三种作用的大统一理论(GUT)。比较有希望获得成功的是 1974 年乔治和格拉肖提出的 SU(5)群大统一规范理论。

目前，不少人又开始在广义相对论的基础上，建立引力的量子理论——量子引力动力学(QGD)，人们渴望最终能建立包括引力在内的超大统一理论(Super GUT)。

尽管统一场论的理论进展很快，但还存在着不少问题。目前的理论认为，物质粒子的电磁作用和弱作用是通过味规范场——光子场以及中间矢量玻色子场传递的，强作用是通过色规范场——胶子场传递的。这些得到了实验的支持。而广义相对论预言的引力波，以及量子引力理论预言的传递引力作用的“引力子”始终未被发现。另外，大统一理论预言质子的寿命大约是 10^{31} 年(一年内在 10^{31} 个质子中，会有一个蜕变)。有不少人在做这类实验，但目前尚未证实。

统一场论的工作越来越多地与早期的宇宙状态以及更高能量的尺度联系起来。伴随着更大的统一，必须用比现在的实验手段所能达到的更高能量尺度的实验来验证。这方面的工作是困难的。

20 世纪 90 年代，又有人开始了第五种相互作用的探索，还有

人另辟蹊径，开始研究统一四种相互作用的新理论，例如超弦理论。这方面的工作又引起了不少物理学家极大的兴趣。这在前面已作过介绍了。

2. 宇宙中的反物质

本书前面已经叙述过，第一个从理论上推演出反物质粒子存在的是狄拉克，他的相对论量子力学的电子方程，预言了电子的反粒子——正电子。1932 年，美国人安德逊发现了正电子。正电子的发现揭示了一种新的对称性，即粒子-反粒子共轭对称，这对于物理学基础的研究具有深远的影响，它导致人们去寻找一系列反粒子。

继正电子发现之后，人们又陆续发现了反质子、反中子、反氘核等一系列反粒子，这促使人们进而研究反粒子构成的物质——反物质，一种未知的物质世界。

反物质的研究激起了物理学家、宇宙论学者、天文学家和哲学家们的一阵兴奋，促使他们从对称性出发去考虑宇宙的结构。

人们根据我们唯一知道的产生反物质粒子的过程是“成对产生”，自然地想到，既然反物质粒子总是伴着正物质粒子产生，那么，也许反物质应与正物质具有相同的丰度存在于自然界。有物质构成的星球、星系，似乎也该有反物质构成的星球和星系。

著名的瑞典物理学家阿尔文和克莱因认为，我们生活在物质的星系，另外还有反物质的星系。我们所观测到的宇宙中，正、反物质的总量相等。但是，至今并未获得支持宇宙中存在反物质的观测证据，并且这种宇宙模型无法解释另一种科学界广泛承认的标准宇宙模型——“大爆炸”(big bang)宇宙说的两个著名的观测事实：3K 宇宙微波背景辐射和氦的丰度。

大爆炸宇宙说认为，由于早期的宇宙存在着“对称性自发破缺”，使得今天只存在正物质的宇宙。宇宙是不对称的，正物质多于反物质，甚至根本不存在反物质。

世间到底是否存在由反粒子构成的反物质？如果存在，它们具有什么样的性质？到底存在不存在由反物质构成的天体和“宇宙”？是由于“大爆炸”之初对称性自发破缺，使得自然界只有我们这个正物质的世界，还是由于我们的观测能力和理解力无法感知和解释的确存在的反物质世界？……目前仍未得出满意的答案。

这里不能不把有关丁肇中在这方面的工作，给大家作个介绍。当美国物理学家们说服政府拨款 50 亿美元(以后追加到 100 亿美元)，以建造周长 54mile(1 mile＝1.609344km)的超级超导对撞机(SSC)时，丁肇中提出一个耗资 8 亿美元的实验，须聘请 1000 个物理学家参加工作的计划。

1993 年秋，美国国会砍去了 SSC 项目。以丁肇中的才干可以做的许多实验被削减至两个，它们被列入 CERN 的大型强子加速器计划之中。丁肇中没有参加，他说他知道，到碰撞机完成实验，他“大概早已退休了”。他准备做某种完全不同的事情。

在国会埋葬了 SSC 计划之后一个月，丁肇中打电话给艾伦，了解艾伦有关天体物理学的所有情况。在接下来的两个月里，丁肇中与艾伦、塞拉蒙交换独创性意见。参加交换意见的还有四个物理学家：H. 荷佛尔(H. Hofer)(瑞士联邦理工学院)、Y. 格拉克辛诺夫(Y. Galaktionov)、V. 贝克尔(U. BecRer)(均在欧洲粒子物理研究中心(CERN)工作，连同荷佛尔，都是丁肇中的长期合作者)、A. D 鲁犹拉(A. De Rujula，CERN 和波士顿大学联合任命职务的理论家)。在丁肇中告知他们意向后，他们很快就把他们可能做的实验减缩到两个：要么在西藏的喜马拉雅山高处建造一面巨大的镜子来研究宇宙 γ 射线，要么把一个装置送上太空轨道去观察成 10 亿计数量的宇宙射线，以寻找少量(并不刚好是千分之十)可能从遥远超星团产生出来的反物质。

丁肇中决定，从太空寻找反物质是较佳的选择。仅就从未做过这件事来说，也是较佳选择。艾伦说：“丁肇中的伟大之处在于

他从一般原则出发:是否有令人信服的论据来说明为什么没有反物质?没有。有谁以你所需要的灵敏度寻找了反物质?没有。那么你就去寻找反物质吧,你不必去作繁琐的盘算来评价寻找工作,事情就这么简单。”丁肇中的准则是:“我们所从事的就是探索未知。”或者说,“我认为,作为一个实验工作者,去测定未知事物,责无旁贷。”

这样一个实验,要求按奥瓦里兹在他生命的最后 20 年(他在 1988 年去世)间的主张:在太空放置强大的磁体。任何荷电粒子通过磁体时,在磁场的影响下会发生弯曲。由物质组成的宇宙射线产生一种弯曲方式,由反物质组成的宇宙射线则产生另一种弯曲方式。因为粒子运动很快,它们必须在几尺的路程中显著地弯曲,这就要求有一个很强的磁场。奥瓦里兹和他的同事们曾经提出过很多实验,都要求在太空放置一超导磁体,在当时,超导磁体技术大概是得到磁场足够强、体积足够小的磁体的唯一方法。

但是超导磁体带来各种技术上的复杂性,因而价格昂贵。例如,磁体必须冷却到接近绝对零度,并且在太空保持恒温,这就要求有精密的制冷设备,在太空,这尤其是个难题。因为当设计沿绕地球轨道运行时,它就交替着受阳光的烘烤和受阴影的冷冻。估计在太空放置超导磁体要耗资 1.5 亿至 3 亿美元。

1994 年 4 月,丁肇中回中国访问,他到了中国科学院电气工程研究所。丁肇中说,“我发现他们已经用新型材料钕、硼、铁制造出非常精密的永久磁体。我还得悉,90%的钕产自中国。他们能够生产高质量、高磁场的磁体。我同他们交谈越多,就使我越相信:这是一条制造在太空工作的廉价磁体的好路子。”

丁肇中说,中国物理学家和工程师们最后同意用大约 60 万美元制造他的磁体。“这是市场价的零头儿”。再说,把一个永久磁体送上太空与把一个厨房大小的磁体送上太空的难度相同,只须把它锚定在宇宙飞船或空间站的表面就行了。“毋须担心动力供

应或制冷。”丁肇中说,“也毋须担心怎么去固定它,因为它不会破裂。”

然而磁体只是实验的一部分,物理学家必须在它里面放置某种粒子检测器,用它查验几十亿的宇宙射线样品,并显示出其中是否有少量反物质而不出差错。塞拉蒙说:“换句话说,你需要一个足够大的仪器用以检测 1 亿个宇宙射线核子。这还不能说万事大吉。如果你的仪器不好,会漏辨了每千个核子甚至每百万或每亿个核子中的一个反核子。”

幸好,丁肇中具有丰富的粒子辨认经验。比如,丁肇中在 CERN 的实验,考查了数以 10 亿计的正负电子碰撞,然后通过对遗迹的仔细筛选,正确辨认了每一个粒子。这是用为 L-3 实验所设计的硅传感器进行的,该设计者是来自佩鲁贾大学(the University of Perugia)和意大利国家核物理研究所的 R. 伯底斯通(R. Battiston)和他的合作者们。丁肇中和他的合作者决定把类似的技术设备置于他们的永久磁体内。

日内瓦大学的 M. 波尔欣(M. Bourquin)小组设计了寻找反物质的检测器。他解释说,磁体像一个竖直圆柱体,直径约一码,高近一码(注:1 码=3 英尺,1 英尺=0.3048 米)。顶部和底部是一对塑料制成的称为闪烁器的平板,用它测定任何进入磁体空心核心的粒子电荷(尽管它并不告知电荷的正负)。闪烁器平板还要测定每个粒子的速率和能量。

与磁体核心水平相截的是硅传感器的 6 片平板。当荷电粒子通过硅时它释放出电子,记录下粒子的位置。每一宇宙射线通过硅板会留下 6 个撞击点,从而在核心上划出一条轨线。径直切割磁体空心核心的磁场与传感器平行,把粒子拉向一方或另一方,致使轨线弯曲。物理学家从曲率的大小可知粒子的质量,从弯曲的方向则可知它荷正电还是荷负电,电荷表示它是物质还是反物质。塞拉蒙说:“然后,如果我们检测到宇宙射线的一个核子电荷比如

说是－6，这就是反碳，从而终于证实反恒星的存在。因为碳与反碳只有恒星才产生，产生的过程叫核合成。”

捕获物是：宇宙射线通过磁体的一端到另一端，大概至多弯曲100μm。因此，丁肇中和伯底斯通及其伙伴们必须保证他们能够以几个微米的精确度检测出每一个撞击点的位置，否则他们就会把本来弯向某一方向的宇宙射线误认为弯向另一个方向。伯底斯通说，他们能够造出这样的硅传感器，它可以辨别宇宙射线通过的点精确到 10μm 之内。他们还想办法使造出来的传感器在飞船受损伤的情况下，仍能保持所要求的精确度。比如传感器将用碳纤维薄片作支架，以使飞船发射时保持坚固。如果温度变化，纤维不会因膨胀和收缩而使其精确度受到损害（例如，从日内瓦的超过72K 到太空的 3K）。研究者还考虑，一旦检测器到达太空，可以对精确度进行双重核验：对于绝对高能的宇宙射线，即使通过实验中的高磁场，它们也是真正笔直的。

然而在太空完成实验，与把实验设备送上太空不是一回事。虽然反物质频谱仪（丁肇中及其伙伴对他们实验的称呼，简写为AMS）能够像卫星那样飞行，但是美国国家航空和宇宙航行局（NASA）和欧洲太空局批准卫星计划的过程是非常漫长的，卫星发射也相当拖沓，以致他们“在 2017 年之前无法付诸实施”，波尔欣说。

看来阿尔法国际太空站是一个最佳选择，计划开始时间与美国自由号太空站（价值 800 亿美元）相同。但是 1993 年克林顿让自由号太空站国际化。科学界同自由号太空站的昂贵价格斗争了好几年。科学家说，如果自由号站有过一个客户，那大概就是航天航空工业，但航天航空工业不是科学家。1992 年，大约 20 多个科学团体正式反对这个计划。

“我去找 NASA”，波尔欣说，“这个作了重大修改的自由号站计划，确实需要某种科学。那么，在那里可以建立何种科学？也许

是许多小的生物实验(如老鼠之类),但是建立一个大科学实验室不好吗?”

大概丁肇中的计划就是答案。他不只是给 NASA 的太空站提供一流的科学,他也提出了一流科学要价的价码。丁肇中以其庞大的国际协作,凭借几十个国家的工程技术,可允诺以 2000 万美元来建立实验。美国能源部对实验作了考察,在搞清楚它的科学价值之后,预付 300 万美元,其余由丁肇中的国外合作者捐资。NASA 要做的就是首次把装着 AMS 的太空飞船送上天。NASA 的主管 D. 高尔登(D. Goldin)说:“特殊飞行需要这个机会让 AMS 飞一回。”“他办完‘手续’后把 AMS 带回地面,进行复原。然后又把它放回太空站。”“总共花费 1300 万美元——包括两次上天又返回,再把它连接在太空站上。”“我们用很少的钱得到了‘巨型轰炸机’的发展潜力。”

反过来,NASA 和高尔登则要求丁肇中及其同事们遵守安全规则,并且要求把实验的名称改为 Alpha 磁频谱仪。新的名称是为了避免给人这样的印象:科学的 AMS 只是用于寻找反物质。艾伦说:“你若在过道里遇到谁,他们会说:谁都知道没有什么反物质。”另一方面,上述理论家们会说,被作为暗物质问题假设候选物的某种粒子(占宇宙的 80%,是看不见的),可能衰变为反质子。丁肇中的实验可以收集到数以千计的反质子,从中筛选出来的有可能是暗物质产生它们的证据。比如,那些有相同能量的反质子如果占很大百分比,那大概说明它们统统来自同一类暗物质的粒子。丁肇中的巨大磁体甚至可能捕获到反暗物质粒子。这无法预料。例如,美国能源部审查丁肇中计划的斯拉姆(D. Schramm)说,他推荐这个实验,并不是因为他认为这个实验会找到反物质,而是因为它是部分解决暗物质的良好选择。

丁肇中似乎并不对某一方面显得特别关心。在他的有关 AMS 的演讲中,他喜欢去敲定首次在天文学中应用光测的年代;

那是1054年，是最早精确记录超新星的年代。事有凑巧，这是一个中国纪录。他说："那时，没有人做过太空荷电粒子的精确测量，我们将要做那样的事。我们要非常清楚地研究宇宙线的组成，我们将从中学到很多东西。由于它是前人没有做过的事，我们不知道结果会得到什么，但是我们将有所收获！"

下一步就是要制造出更巨大、有效的超导磁铁，这个计划正在紧张地筹划中。

我们认识宇宙的主要依据是今天天文学观测为我们提供的宇宙知识和现有的物理学基础理论。目前人类对宇宙的观测还很不完整，也不够精确，物理学的理论也在不断发展。因此宇宙学未来的发展还依赖于天文观测的不断深入、精度不断提高和物理学理论的新的飞跃。

3. 大数之谜

物理学中有一些带有神秘色彩的无量纲数，例如，万有引力耦合常数是

$$\frac{Gm_p^2}{c} = 5 \times 10^{-39} = c_1 \tag{5-1}$$

质子和电子间静电力与万有引力之比是

$$\frac{e^2}{Gm_p m_e} = 2 \times 10^{39} = c_2 \tag{5-2}$$

用原子时标(取光穿过一个经典电子所需的时间作为时间单位)量度的宇宙年龄

$$t = \frac{m_e c^3}{e^2 H} = 7 \times 10^{39} = c_3 \tag{5-3}$$

用质子质量为单位表示的宇宙总质量

$$\frac{M}{m_p} = 10^{78} = c_4 \tag{5-4}$$

奇妙的是这些数都与10^{39}有关！我们近似地有

$$c_1^{-1} = c_2 = c_3 = c_4^{1/2} = 10^{39} \tag{5-5}$$

这意味着什么呢?

狄拉克认为:"自然界中出现的没有量纲的非常大的数是彼此相关的。"狄拉克把这种观点称为"大数假说"。他进一步指出:"如果一个这样的数 K 大概是 $10^{39\alpha}$,则大数假说要求 K 正比于 t^{α},其比例常数接近于 1,从大数的数值就能推断出它对宇宙年龄的依赖关系。"由此,我们根据(5-1)和(5-2)两式,考虑 m、e、c、h 为常量,可得出 G 正比于 t^{-1},即引力常数随时间推移而减小! 由(5-4)式我们会想到,"宇宙中质子的总数与 t^2 成正比增加,因此宇宙中一定在创造着物质,而且是继续不断地创造物质"(狄拉克语)。

目前正不断有人测量 G 的变化,也有人在寻找质子数增加的依据。

另一位物理学家爱丁顿认为,10^{39} 这样的无量纲数是联系宇宙尺度和微观粒子尺度的关键。这样一些数把表征宇宙总体特征的量,如宇宙年龄、总质量与表征微观世界的量,如质子质量、电子质量、原子时标、普朗克常数等联系起来。

还有人认为:"这些无量纲数的数值决定了宇宙的性质;改变这些值,宇宙的性质就变了,因而,在现代,物理学暗示了一个可能的宇宙系集。"

当然,假说有待于验证,建立于假说基础之上的计算、推论都不一定是自然界真实的规律。但是有一点是肯定的,这就是:一个完美的物理学理论必须能解释这许多与 10^{39} 相联系的无量纲数!

4. 时间箭头的问题

自然界的时间是不可逆转的。热力学第二定律规定了一切自然发生的宏观热现象都是不可逆的。生物学中,时间除了要描述变化,还要描述进化。

"大爆炸"理论认为,整个宇宙也是一个演化过程的产物,是在有限的过去的某一时刻从极度稠密、混沌一片的状态中产生,并且在不断地膨胀……

对于自然界的大量现象，时间具有明显的方向性，从过去通过现在指向未来，它不具有反演对称性。即：不可以用$-t$代替t来描述这些现象。

然而，物理学的许多定律、定理具有时间反演对称。例如，牛顿力学定律、麦克斯韦电磁方程组、量子力学中的薛定谔方程等。在这些方程中，以$-t$代替t同样满足方程。

只要给定某一时刻行星的位置和速度，通过牛顿定律就可以计算出它在所有过去($-t$)和未来(t)时刻的位置和速度；电磁波的传播满足麦克斯韦方程，也可以有两种解：推迟解和超前解。前者对应于t，后者对应于$-t$。但是，根据我们的经验应该从这些可逆方程中选择对应于t的解。行星是从前一时刻的位置运动到后一时刻的位置，而不是相反；麦克斯韦方程只能选择推迟解，因为我们不可能在电台发射讯号之前就接收到讯号。那么，我们为什么必须采取这样的选择呢？

一些物理学家认为，自然界中规律和约束条件(如初始条件、边界条件、对称条件等)是相互独立的。很显然，我们认为不同的行星系统，以至星系，是根据相同的自然规律和不同的初始条件开始演化的。因此，人们从这些约束条件中去寻找时间不对称的根据。

我们知道，只有当普适的定律确定了初始条件、边界条件，才可能得到唯一确定的解。即定律决定什么是可能发生的，而约束条件则决定什么是实际发生和对我们来说是有意义的。

有人根据“大爆炸”宇宙说，认为宇宙中最根本的方程是可逆引力场方程，若加上“大爆炸”的初始条件，可得到符合我们今天观测的宇宙膨胀解。而这种宇宙膨胀定义了全部宇宙的时间箭头，其他一切时间箭头，诸如热力学时间箭头、电磁学时间箭头、量子力学时间箭头以及生物学时间箭头等，均可由宇宙学时间箭头导出。

我们的定律是根据经验得来的。目前经验告诉我们，时间箭头是从过去指向未来，定律只可选择 t 解。但是，我们并不能轻率地抛弃 $-t$ 解，没有认识的事物，不等于不存在。在狄拉克预言正电子之前，人们并不知道自然界还存在一类反粒子。同样，在我们没有理解 $-t$ 解的物理意义之前，并不意味着 $-t$ 解没有物理意义。

爱因斯坦的相对论认定，自然界中光速为极限速度。但是近年来竟有人发现类星体抛射物质的速度超过光速。于是有人研究认为，如果出现超光速，时间就会倒流，物质的质量和线度将由虚数来描述。这将是一个不违反今天物理规律的新世界！当然，这有待于证实。

总之，时间箭头把自然界物质的微观、宏观、宇观各层次，把物理学、生物学、宇宙学、信息论等自然界的各种规律联系起来。关于时间箭头的种种讨论仍在继续。

当前世界各国物理学家都在对一些疑难未解的问题和一些前沿课题进行深入研究，作为一个实例，下面我们再介绍一下德国物理学界研究追逐的九大热点问题。

德国研究联合会是德国资助科学研究的主要机构，2002 年发表了《德国研究联合会的研究计划及其资助前景，2002—2006》报告，其中描述了对德国物理学研究的展望。

① “弦论”——进一步揭示物质的起源

20 世纪理论物理研究所取得的最大成就，是量子论和相对论的建立与发展。现在，物理学家最关心的是开创有关量子物理，尤其是有关量子引力的一种全新理论，即在基本粒子基础上，进一步观察和研究替代它的弦、膜及其动力学的“弦论”，以便能够根据所谓极小物体的振动状态来预报大量的基本粒子。目前，“弦论”最终被实验验证的路途还十分遥远，而且，由于弦太过微小，只能利用加速器直接证实。最近几年内，德国科学家的研究目标将是通

过“弦论”的推导和科学实验建立相关的科学定理。

②“暗物质”——重新认识宇宙的形成过程

宇宙辐射的起源和结构，是天体粒子物理研究领域中十分引人注目的问题之一，而且已经成为新的研究分支——它是由天体物理和基本粒子这两个传统领域融合而来的。迄今为止，科学家们利用物质内在引力的相互作用所计算出的银河外星系的质量，比我们可以感知的宇宙的质量要大得多。德国科学家认为，寻找“暗物质”对于重新认识从原宇宙爆炸到今天的宇宙结构形成过程将产生深远的影响。与之相关的集约性研究工作，一部分集中于通过分子云和尘埃构成的恒星形成的研究，另一部分则侧重于行星体系形成的模式——包括探索其他有生命形式的行星研究。

③“引力波”——发展新的实验技术

火星和地外行星以及与之关联的地球活动，是今后物理学研究的另一个重点。在这一领域中，德国的物理学家、化学家和生物学家将共同进行跨学科的密切合作。计划中的行星研究项目将通过国际联网而使其研究工作产生质的飞跃。

引力波天文学是当前的一个大有现实意义的课题，尽管这方面的研究还处于初始阶段，但却隐藏着巨大的发展潜力，向宇宙打开的这扇新窗口将为人们认识重要的宇宙现象（诸如超新星爆炸和黑洞）作出巨大的贡献。为了直接记录引力波，就需要实验技术发展到相当高的水平，这是目前还难以做到的。现在各个国家（包括德国）都在建造灵敏度高的激光射电干涉仪，以便在天体物理研究领域取得更大的进步，而且人们可望在近 3～5 年内能观察到第一个宇宙信号。

④“定制物质”——突破自然物质极限

在德国，定制物质研究是物理学、化学和工程学研究的一个非常重要的任务。生产“定制物质”（根据需要而生产的人工组合物质）可以开拓由多种物质成分组合的新物质的新性能，并能控制这

些新物质的存在方式(一维、二维或三维)及其原子级别的纳米纵向尺度。同时,“定制物质”研究所取得的成就,对于在今后十年里继续保持并提高计算机的功能、存储介质的容量和工作速度也都是十分重要的。此外,微小的纳米范围内的磁性动力学,以及电子固有自旋的控制性使用等,也都是当前重要的研究课题。

⑤“量子计算机”——未来计算机家族中的新贵

当前,量子计算机研究备受重视,与之相应的是量子力学研究也有了迅速发展,研究重点已经从离子陷阱学研究转向固态或液态离子研究,这对于研制量子计算机是十分必要的。目前的关键问题在于其纠错率以及有效范围的分析;同时,在把量子现象向传统系统上的纳米尺度演进时,还要关注其质量上的新性能。

⑥“光波量子力学”——高能与节能并举

光波量子力学的相干性是在激光下产生的,而第一台激光器是在 40 年前完成的,而且其提供的超短波长正好在 X 射线的范围内。当前的研究重点是,进一步了解和控制诸如对原子时间尺度的化学反应的动力作用,并在可见的光谱范围内改进激光器的可使用性及其照明装置效率,以便达到节省巨大能源的作用。在材料加工中,高功率激光器的应用已经变得越来越重要了。

⑦“自组织”系统——在复杂系统中寻求平衡

具有很大自由度的关系已经变得越来越重要了。过去,科学家们在大部分的物理特征研究中最大限度地谋求自由度的尝试取得了巨大成功,现在已经可以将这种经验转换到复杂系统中了。除了由各种组件构成的人造系统外,“自组织”学科的利用正在发挥日益重要的作用,而具有最大自由度的“自组织”系统也正是地球生态系统。物理、化学和地球科学领域的进步必须是互相渗透的,这样才能真正搞清楚气候的长期发展趋势以及人类对气候的影响等重要问题。

目前,物理学家们隐约揣测到的另一个发展领域,就是在生物

系统与“传统”的系统(诸如半导体)基础之上的电子元件的结合。在这里,材料、方法和专业领域之间的界线已经被彻底打破了。“软物质”(具有更多自由度、结构成分间存在微弱的相互作用的物质)研究的广泛领域预示着将产生极为丰富的新现象、新知识和新应用。

⑧ 等离子体

等离子体是在宇宙中对聚变研究、激光研制和加速器技术起重大作用的非线性复杂系统。由于强大的电磁相互作用,高温等离子体适合以卓越的方式研究现代非线性多粒子物理现象,诸如很少碰撞的输运过程、激波、湍流现象、相变、有序结构的形成等。在材料表面处理方面,低温等离子体提供了许多工业应用技术与方法。激光产生的等离子体可以借助于实验室大规模产生使用于定时进行的固体和分子结构研究的超短 X 射线脉冲。

⑨ 大型研究设施

在实验物理方面,通过使用从纳米规模的激光器到数十公里规模的基本粒子加速器,使这些新的仪器不断取得了飞跃性的进步。实验室的实验和大型仪器上的实验各有其独到的重要作用。目前,一整套物理研究新型仪器的计划正处于讨论之中。进一步发挥现有的和计划建设的基础设施的潜力,实现许多研究中的新设想和为高等院校与工业界培养后备力量的前提是,物理学研究领域中后起之秀的链条不能中断。

到本书出版,我们虽然尚未读到有关这个计划的全面总结的资料,但应该说有不少方面工作的进展还是令人高兴的。

5. 其他重要之谜

近年来国内外一些研究者不断提出有关古老的自然科学领域的问题,现将其中有关物理学的七个重要之谜介绍给大家。

(1) 固体是如何起作用的

很多科学家因在科学方面的偶然发现而获得诺贝尔奖。如

1987 年度的诺贝尔物理学奖获得者 J. A. 贝德诺尔茨(Johannes Georg Bednorz)和 K. A. 米勒(Karl Alexander Muller)就是偶然发现高温超导体而获此殊荣的。

物理学家早在 1911 年就发现这样一个现象:很多种固体如果被置于一定的温度(即跃变温度)下冷却会失去全部电阻。但直到 20 世纪 80 年代中期,人们才在－273℃略高一些的跃变温度环境下得到了超导体。创造如此低的温度条件其代价是极为昂贵的,因为超导体必须在－269℃左右的液态氦中得到(在这种环境下得到的超导材料具有特殊的技术用途)。贝德诺尔茨和米勒在对含有铜和氧的陶瓷进行的试验中首先发现:陶瓷材料处于略高于－196℃的温度条件下会出现失去电阻的超导现象,而人类能够通过相对简便的氮冷却方法创造这样的温度。

尽管自 1986 年以来人们不断发现能显示超导材料特征的各种化合物,但迄今为止,为高温超导体找到宽广应用途径的愿望仍然没能实现。其原因首先在于易碎的陶瓷材料毕竟不容易成型和加工;另一个深层次原因,即物理学家至今还未搞清楚是什么机制使得电流在没有受到阻力的情况下通过固体的。如果人们掌握了超导体形成的机制,那么就能预先知道将哪些化学元素结合,最后得到我们所期望的超导体。

有一种描述“新”超导体的理论,即寻找电子和原子在晶格中如何共同起作用并产生超导现象的途径;还有一些发生在固体中的现象,物理学家还在摸索中。如“具有记忆能力的金属”经过某种变形后会自动地恢复原来形状,它们对自己原先的形状有一定程度的记忆力,即记忆金属具有保持本身平衡状态的性质。它们如何保持这种物理状态的,以及为什么只有某些金属和合金具有形状记忆性质,物理学家至今都无法知道。

光与物质之间能量转换的过程对自然和技术,如花卉、漆或者杂志封面颜色的形成以及半导体激光器光束的产生起着重要作

用。但是对于光与物质之间能量转换的基本过程，科学家们还在摸索中。汉堡大学理论物理学院的克拉默(Kramer)教授指出："爱因斯坦的跃迁几率理论有助于解释光能转换过程。但这个理论至今没有其他人能理解。"

形成这个物理学知识缺口的原因是，科学家对于固体方面的知识太缺乏。如在一个与方糖一样大小的晶体中就隐藏着大约10^{23}个原子，该原子数量相当于银河系中全部星体数量的10亿倍；每一个原子又有一个或多个电子，它们相互之间以一定的晶格形态联系起来并且相互影响着。

因此，固体性质的问题跟量子物理学、天气和生物学问题一样，至今未被认识的甚多。如果根据每一个原子的性质来确定固体的性质，即使我们使用最大功率的计算机都无法实现这个目标。当然，人们可以采用简便的模型来解决复杂问题，但是得出的答案只能是近似的。

通过少量原子的巧妙结合，人们制造出纳米级尺度的微晶体管、微数据存储器或者微机械，这就是所谓的纳米技术。计算机元件的工作效率随着传统硅技术的微型化而得以提高。基础理论研究得益于纳米技术的发展，人们可以准确地对原子性质及其相互作用作理论上的说明，也许这能帮助我们理解还无法解释的固体现象。

(2) 什么是不确定物质

什么是物质？这个问题似乎很容易回答：物质是看得见摸得着的，它们有各种颜色，它们影响人类文化。日常生活中确实如此。然而，有一位天体物理学家得出完全不同的结论，他认为：有相当多的物质是不确定的、不可见的、还没有被发现的，只有通过万有引力才能显示它们；我们在日常生活中所接触的物质以及在夜空中闪烁的星体仅仅是冰山一角；所有可见的和已知的物质仅仅占整个物质世界的极小一部分，而大部分是与我们人类玩捉迷

藏游戏的“不确定物质”。

虽然不确定物质不被人发现，但它们对地球上生命的生存条件有很大影响。如果这些不确定物质突然离我们远去，那么包括地球在内的行星系将被抛出轨道。因为太阳系是以大约 220 km/s 的速度绕银河中心运动的。太阳系的运行受到银河引力的巨大影响。然而宇宙学家发现了一个问题：银河中的所有已知物质的质量不足以与离心力达到平衡。于是科学家得出结论：一定存在另外一种未被人类了解的物质形态——不确定物质。

这种神秘形态的物质不仅使得行星轨道保持稳定，而且还促使了地球和其他星球的形成。在早期的宇宙中，物质的分布还是均匀的。但这些物质经历了第一次压缩后不再像一般物质那样，它们不会受电磁辐射的作用而集聚起来。在引力场作用下，一般的、能见的物质聚集起来并浓缩成数个漩涡状星云。德国马普地外物理学院研究所教授冈瑟·哈辛格(Gunther Hasinger)指出：“这些星云连在一起，就像一串珍珠，并且在星云以外，几乎形成了巨大的真空。”科学家试图用超级计算机来模拟这个过程。

但是，这些确实存在的不确定物质是哪里来的？哈辛格认为：“借助哈勃太空望远镜观察到的星系群里巨大的发光弧线的发现，是最为惊人的证明。”巨大质量的星系群使得星系后面的光线转向，该光线在哈勃图像中呈弧形或者环形。由于引力透镜显示出变了形的星云图像，科学家计算出，现有的质量一定是星系群中全部星体的 60 倍。物理学家估计：这些丢失的质量也许就是不确定物质。

1998 年，科学家们探索到遥远的超新星光在减弱，由此他们得出结论：宇宙很可能在不停地呈加速度地膨胀。于是天文学家提出了一个新问题：加速度的力来自何方？1916 年，爱因斯坦在他创立的广义相对论中坚持认为：宇宙肯定是要么将崩溃，要么膨胀。当时的天文学家把宇宙看成是静止的。为了冲破宇宙静止

观，爱因斯坦在他的方程式中引进了“宇宙常量”。爱因斯坦后来称这件事为他生活中所做的“最大的蠢事”。

应该设想有一种与爱因斯坦的“宇宙常量”相适应的能量。该能量具有与引力相反的性质，它产生的排斥力使得宇宙不停地加速度地膨胀。哈辛格指出：“经过多少年的试验证明，我们发现宇宙常量是急需的，它是爱因斯坦一生中最后一个胜利。”但是这种能量还是很神秘的，应该称其为“不确定能量”。

根据观察到的加速度膨胀的宇宙，天文物理学家建立了一个解释性模型。按照该模型，我们知道神秘的不确定能量占到全部宇宙能量的 70%，而一般物质和不确定物质对宇宙能量总和的贡献分布占 5%和 25%。美国 WMAP 卫星对太空中微波辐射的测量结果证实了这些数据。

(3) 质量从何处来

物理学家如果能够成功地追踪到希格斯粒子，将会发现这些粒子相互间协调得很好。研究粒子的科学家是根据一个标准模型来看待世界的，这个模型告诉人们物质是如何构成整体的，以及构成怎样的基本对称状整体。德国多特蒙德大学试验物理学教授迪特里希·韦格纳(Dietrich Wegener)认为：“组成物质的还有比原子更小的粒子——中微子、电子、夸克。”之所以称它们为无质量粒子，是因为科学家还没有什么办法将它们的质量表示出来。

30 年前，苏格兰物理学家彼得·希格斯(Peter Higgs)认为：真空不是空的，而是有磁场穿过其中。也就是说，有某种粒子在真空中移动，即无质量粒子是有重量的。我们可以把穿过真空的磁场比作一台晚会，当一位明星来到这个晚会并穿越大厅时，立刻会被一群崇拜者团团围住，此时的质量似乎一下子在加大。希格斯-玻色子就好比是这样的明星，它的到来吸引着众多的人，原先相互不认识的人们重新组合成新的人群。

按照标准模型，希格斯粒子是极其微小的，于是就产生了一个

问题：我们该如何来区分不同质量的粒子？德国乌珀塔尔大学高能物理学教授彼得·马丁(Peter Matting)指出："标准模型下所有粒子的质量是自由参数，其数值必须通过测量确定，而且还必须补入某个值(这个值至今未能计算出)。"但科学家至少能表示出希格斯粒子的质量。

韦格纳说："目前还没有其他理论可以代替标准模型，我们似乎必须重新开始。"为此，欧洲粒子研究中心的科学家准备从2007年进行大规模强子碰撞实验，以证实希格斯-玻色子的存在。他们的实验将在地下的27km长的圆形隧道里进行：1200块超强超导性磁铁在那里引导着质子和反质子进行对流，并且以光速相互碰撞，碰撞每秒钟将发生10亿次。

韦格纳对采用强子碰撞实验来证实希格斯-玻色子存在的计划抱乐观态度。这是因为科学家已经找到了关于希格斯粒子质量的新的计算值。科学家根据以前的实验得出的希格斯-玻色子的质量是90×10^9eV(物理学上表示粒子质量使用最多的能量单位)，而根据新的测量方法：希格斯-玻色子的质量是110×10^9eV，质量如此之小，无怪乎科学家至今仍未发现这种粒子。

科学家希望强子碰撞试验不仅能追踪到希格斯-玻色子，而且还希望能成功地找到呈超级对称状的粒子。慕尼黑马普研究所的物理学教授尤利乌斯·韦斯(Julius Wess)解释："每一个已知的粒子均有一个与自己对称的伙伴粒子。虽然物理学家不能够准确地预测一个伙伴粒子的质量，但却能够了解已知粒子的所有其他性质。"

(4) 什么是时间

"绝对的、真实的和数学意义上的时间在流逝，它的性质可能是相同的，与其他任何学科之间没有相互联系。"这是牛顿1687年在《自然规则的数学原理》一书中对时间现象的描述。这位古典力学的创立者表述了观察时间的方式，人们在日常生活中确实按照

牛顿的方式来观测时间。

按照物理学规律，时间的流逝是不会倒转的。爱因斯坦创立的狭义相对论很明确地告诉人们：实际情况比我们所认为的要复杂得多。根据爱因斯坦方程，在两个做相对运动的观察者眼中，时间流逝的情景是不一样的。这说明在不同位置上不仅观察到的事件不同，而且时间流逝的速度也不同。按照相对论定律，每一个观察者都有一个他自己的“原时”。

物理学家通过用飞机运送一部极其精确的原子钟的实验，证实了确实存在时间的相对性。在实验开始之前，科学家将飞机上的原子钟时间调至与地面的原子钟的时间相同。当飞机着陆后，科学家对照两部相同原子钟的时间，飞机上经过长途运输的原子钟显示的时间比地面上的原子钟稍微慢一点。当然，对此也有不少人做了更深入的实验，如飞机向东和向西绕地球飞的结果会怎么样？飞机飞行高度不同又有什么不同？原子钟内的放射性衰变是否受其他影响等，也都有不同的说法。

当人们按照广义相对论来考虑问题时，情况将显得更加复杂。根据该理论，在一个重力场的不同位置上，时间流逝的快慢是不同的，实验证明了这一点。德国海德堡大学理论物理学教授迪特尔·策（H. Dieter Zeh）指出：“仅仅因为我们的平常经验是有限的，我们只能够到达宇宙中的一小块地方，加上我们的智力是狭隘的，我们显然还没有完全获得对空间和时间的准确理解。”

广义相对论把时间描述成有边际的。正如包括霍金在内的许多物理学家所指出的：宇宙大爆炸不仅给世界带来了物质，也随之带来了空间和时间的开端。

时间确实是单向的吗？方向真的是不可逆转的吗？描述日常现象的物理学基本规律对时间可逆转来说是格格不入的。人们观察不到一块破碎的窗玻璃是如何自动拼合成一个整体的，也观察不到咖啡中的牛奶是如何恢复到液滴形状的。正如热力学的两大

基本原理所表述的那样，熵所描述的系统状况虽然是瞬息即逝的，但要确定这样的系统状况的可能性仍然微乎其微。

热力学第二定律与关于双向时间对称性相悖。所以物理学家没有把双向时间对称性与热力学的时间矢量等同起来。而热力学的时间矢量所描述的时间是从过去到未来的流逝，人们一直把以此种时间流逝形式视为时间流逝的基础，由此看来这种对时间的认识带有主观性。现在的问题是：热力学第二定律不是从物理学基础方程导出的，而只是一种以经验和随意产生的需要为依据的假设。

许多物理学家对以上说法不太满意。迪特尔·策认为："时间开始于宇宙大爆炸，时间开端在宇宙膨胀过程中起着时间矢量的作用。用来衡量宇宙膨胀参量的对数首先给予了永恒的宇宙一个内在动力，人们才感觉到时间在缓缓地前进。"

现在的问题是：如果宇宙什么时候开始缩小，那么时间也会逆转吗？还有人的生命旅途是否能够在时间上逆向？很多物理学家认为这是可能的。然而包括霍金在内的很多科学家不相信逆向时间旅行的可能性，相反地他们提出：人类会造成各种各样的发生在过去的祸害，这些祸害将导致完全属于荒谬的情况的发生。

英国物理学家休·艾佛立特(Hugh Everett)研究出的多种世界模型，不失为是一种关于时间逆转问题的解答方法。按照模型，宇宙在每一时刻都在分裂出无数个各不相同的相互独立的宇宙，而所有想象得到的世界进程都存在于无数个宇宙中的某个宇宙中。由此看来，时间旅行者到达某个过去的时刻，可以看成他移居到了另外一个平行的世界中去。

上述对时间问题的阐述是该确认还是反驳，还是存有争议的。

(5) 哪里是量子世界的起点

要直观地理解量子理论，对许多物理学家来说几乎是一种毫无成功希望的冒险。量子世界中的电子、光子和原子的性质跟我

们所熟悉的世界中的电子、光子和原子的性质之间存在很大差别：粒子能够穿透墙壁，相隔一段距离的各个粒子之间竟然会产生相互联系，同时能够按各种途径回到原状。量子世界中最为奇特的现象之一是感应，这是人们在实际生活中所观察到的。测量工具明显地改变了量子力学领域中的实在性：量具将不确定的和模糊的事物变换成确定的和具体的事物。至今没有人能够解释一个粒子同时处于多种状态这一现象。因为一个时刻的一次测量只能“确定”一种已确定的状态。

我们来看奥地利物理学家欧文·施罗丁格(Erwin Schrodinger)用猫为对象做的一个实验：他把一只猫锁进一只放有随时都在衰变的放射性物质的箱子里(猫只有在原子不发生衰变的条件下才能够生存，然而放射性物质的原子衰变是避免不了的)，结果那只猫死了。将该实验中的猫比做量子力学，当箱子锁着时，猫生存和死亡都有可能，它处于两种状态叠加的状态下；而当箱子开着的时候，猫才可以在生存和死亡之间做出选择。

如何准确地来理解对观察者产生的影响？究竟是否存在这种影响？我们应该在哪里用什么样的方法去发现微观世界和宏观世界的区别？很多物理学家接受了非相干性理论来解释微观和宏观世界中的物质显示出的不同特性。根据非相干性理论，不可控制的环境影响使得量子力学性质在某个系统中失去，这就是我们在日常生活中所认识到的情景。

以上的关于物质性质的解释是否正确，至今人们还无法知道。但是，近几年来的物理学实验显示：我们可以继续向量子世界的疆域接近，微观世界尽管很大，但是我们仍可以用量子力学的规律来加以定义。以玻色-爱因斯坦凝聚态为例，该物质是由 100 万个超低温气体原子组成的微型云状物，它在绝对零度稍高一点的温度条件下冷凝，并保留在一个磁陷阱内，其表现就像受量子效应影响的巨大原子。这种巨大原子的直径有几微米，但比一般原子大

得多。

玻色-爱因斯坦凝聚态极可能是未来的量子计算机的组成部分。未来的量子计算机的计算速度将比今天的计算机快得多。根据量子化定律，量子计算机几乎能够同时完成任意多的运算。一部传统计算机必须逐步依次完成的运算，可以让一部量子计算机平行地完成，这就表明将节省大量时间。

建造量子计算机仍然是遥远的事，但量子效应将被我们利用，当然同时要实现这个目标是极其困难的，期间很多变化因素会出现。所以量子物理学不仅很难理解，而且它的实际运用也是遥远无期的。

(6) 湍流是如何形成的

如今宇宙探测器能够登上火星，显微镜能够使人看到原子和分子，特殊的处理方法能够用来破译人类基因结构。但是，在像咖啡搅动这样的日常生活常见的现象中，偏偏存在着让我们费解的物理学现象：牛奶是如何与咖啡混合在一起的？要在理论上阐述“咖啡是如何起漩涡的?”是一件很困难的事。英国物理学家霍雷斯·拉姆(Horace Lamb)早在 1932 年就表示期望搞清楚两件事：“第一件是量子电动力学，第二件事是流体运动。我对搞清楚第一件事是充满信心的。”他说对了。几年以后，他搞懂了量子电动力学，而流体问题的解决至今仍然还没有获得突破。

流动现象不仅仅存在于咖啡中，乘坐飞机的旅客经常会因飞机受空气湍流影响而受惊。湍流经常出现在天空的云块和浴池里的涡流中。湍流与湍流之间会相互影响，它们甚至会成为一个相互不可分割的系统。

在工程师看来，湍流不是什么严重问题。然而在物理学家看来，需要建立一个解释流体运动的方程，尽管他们在 150 年前已经建立起了描述湍流运动的方程式。但是德国奥敦堡大学流体动力学教师约希姆·派因克(Joachim Peinke)指出：“我们既不能用数

值方法也不能用数学方法来解出该方程式。”

是什么因素使得湍流运动如此难以描述？派因克解释道：“首先是处于混乱的和非线性状态的湍流运动具有不可估计性。”最近几年里，科学家运用混沌理论看到了湍流中的内聚性。虽然混沌理论与涡流有关联，但如果用其来解释涡流，仍然是困难重重。不过，派因克强调：“混沌理论的方程式是可解的，湍流问题是可以得到解释的。”

既然湍流在工程师们看来不成为问题，为什么科学家还要去解出湍流方程式呢？德国马尔堡大学理论物理学教授布鲁诺·埃克哈特(Bruno Eckhardt)指出：“如果我们理解了湍流，我们就可以建立更好的模型。有了这样的模型，我们就能够进行具体的预测工作，例如预测天气，还可以毫不费力地处理出现在石油管道和水管中的湍流。”这样的模型还适用于车辆驾驶的速度控制。当驾车者在踩油门踏板时，他一定要考虑空气涡流对车辆的影响，在这种场合下，新型的涡流运动模型就派上用场了。

湍流理论帮助科学家计算出行将出现的流体运动，利用已掌握的方程式对高山或者平原的空气流动趋势进行精确的预报，以及对几百公里范围内的天气进行准确预报。大气干扰的各个空间方向有 100 万个以上的数据处理单元，这些数据处理计算单元的计算量超出了现有计算机的计算容量。因此如果能够开发出一种能处理如此巨大数据量的计算机，我们就可以长久地利用这些数据。日本的科学家已经研制成功能在每个方向模拟 4096 个数据的处理单元，这是目前最高的纪录。

(7) 世界公式是否存在

自从有了自然科学，科学家最想做的一件事莫过于用尽可能简单而完美的方式去解释世界。他们想把关于世界本质和认识包含在一个具有解释性的世界公式里。这个包罗万象的“首要理论”将收集现代物理学的两大支柱——量子力学和广义相对论。量子

力学描述的是单个原子的性质，但是在日常生活中当众多原子集聚时，它们的效应就失去了。而相对论涉及的是广袤的星际，解释的是宇宙规律。既然人们认为量子力学和相对论是极其美妙的，为什么不把这两种理论融合在一起，以建立科学家们所希望的世界公式呢？但是，事情并不那么简单，因为这两种理论中的部分内容是相互抵触的。

因此，物理学家要建立一个包涵介于量子力学和相对论之间的难以确定的内容的理论，其涉及的范围将更广。德国马普研究所的引力科学家简·普莱夫卡(Jan Plefka)说："这个理论的重要功能就是把存在于自然的力——电磁力、强力、弱力和引力这四种力统一起来。"电磁力描述的是带电粒子与引起电荷运动的磁场之间的引力或者斥力；而放射性衰变，即所谓的β衰变是弱力的一种特定形式，影响范围极小，仅有大约一个质子直径的1%，因此我们很难觉察到弱力的存在；强力的作用在于将各个夸克同时留在质子和中子内部，使夸克与质子和中子组成原子核。

引力是所有的力中最强的，它是我们最能够觉察到的力，如玻璃器皿在地上摔破就是引力的作用。按照爱因斯坦的广义相对论的描述，引力使得众多原子处于簇拥在一起的状态。普莱夫卡解释道："我们还不能描述微观宇宙中的引力。"微观宇宙是量子力学研究的领域，所以说，一定存在物质的最小组分——量子。那么我们是否可以这样来表述引力：它是最小单位的力，它可以像可换零件一样将自己的作用转移到另一个粒子上。科学家已经发现，电磁力、弱力和强力都有这种"零件可换"现象。至于引力的性质，科学家还在摸索中。

1968年，物理学家创立的弦理论抛弃了长期以来确立的点状粒子概念。按照该理论，组成物质的基本粒子呈橡皮带状，即像一根"线"；这些"串起来的线"不仅存在于我们所熟悉的三维空间中，而且同时处于一个新的纬度中。根据我们目前的认识水平，这个

纬度就存在于宇宙大爆炸中。我们从日常生活中感知的那个世界仅仅是三维的。根据弦理论，宇宙大爆炸中还存在另一个三维空间，只是它太微不足道。普莱夫卡指出："我们完全可以用口香糖来说明问题。当口香糖被拉成一条线时，才发现口香糖仍然有三个纬度，只是另外两个纬度很小。"

人们对弦理论的理解是初步的，科学家还将对该理论继续做补充。普莱夫卡说："物理学家从许多近似的角度来解释弦理论，但是他们还不能够对该理论作精确的分析。"弦理论有 5 个不同的模式，所有模式看上去都是合乎逻辑的。

大约在 10 年前，科学家发现：这 5 个模式仅仅反映了全部弦理论不同的方面，他们把这 5 个模式组成了一个内容丰富的 M 理论。按照 M 理论，宇宙总的空间纬度数为 10；组成物质的最小粒子并不是像弦理论所描述的呈"橡皮带"状，而是像由许多细线组成的"肥皂泡沫"。不过，普莱夫卡还是认为："我们仍旧不能正确描述 M 理论。"总之，通向世界公式的道路还很长。

第6章　物理学研究中常用的思想方法

物理学的发展史告诉我们，一个科学理论的形成离不开科学思想的指导和科学方法的应用，正确的科学思维和科学方法是我们认识世界的基本手段，掌握了它就能使我们透过现象看清事物本质，从认识科学的必然王国而跃进到掌握应用科学的自由王国。科学方法是我们学习中打开学科大门的钥匙，无论是自然科学的各学科或者是社会科学的各学科，掌握了研究科学的方法，就有了在未来从事各项工作的“武器”，就能创新，就能发明创造，发挥聪明才智，成为一个有益于人类、造福于人类、贡献于科学的有用人才。下面就介绍一下物理学研究中常用的一些思想方法。

6.1　分析与综合

1. 分析与综合的关系

牛顿曾说过：“在自然科学里，应该像在数学里一样，在研究困难事物时，总是应当先用分析的方法，然后才用综合的方法。”恩格斯也说过：“思维既把相互联系的要素联合为一个统一体，同样也把意识的对象分解为它们的要素。没有分析就没有综合。”

分析和综合是抽象思维的基本方法。所谓分析，就是把研究对象分解成为各个组成部分，然后对各个组成部分加以研究的一种方法；所谓综合，就是把研究对象的各个部分联系起来，从而在整体上把握事物本质和规律的一种方法。简单地说，分析就是从整体到部分的思维方法，综合则是从部分到整体的思维方法。分

析和综合是相辅相成的，分析就是为了综合，没有分析就无法综合，分析是综合的基础，综合则是分析的归宿。分析的方法一般可分为三个环节，并常常采用两个手段。这三个环节是：

① 把整体加以“解剖”，把部分从整体中“分割”出来；

② 深入分析各部分的特殊本质（这是分析中最为重要的一环）；

③ 进一步分析各部分间的相互联系和相互作用。

常用的两个手段则是：

① 获得原始资料实验数据，就是首先要获取第一手资料，包括原始的资料、事实、素材、实验数据等，这些要尽可能完整、正确，不带有偏见和误差；

② 用抽象思维的方法进行加工、整理，并能上升变为观点或有说服力的定量关系等。

例如，我们曾介绍过丹麦的天文学家第谷做了大量准确的天文观测，这些数据都是非常珍贵的资料。他的测量都是用肉眼进行的，其准确程度也是惊人的，其角位置误差小于0.067°。就相当于把一个绣花针放到一臂之远处，用眼观察针孔的张角相类似，这对分析与综合的研究方法来说，是具备了很好的条件。但是，尽管第谷擅长观察，并且非常准确，但他却缺乏正确的抽象思维能力，因此他得到的结论是错误的。正如他的助手开普勒所说：“他是个‘富翁’，但他不知道如何正确使用这些财富。”开普勒依据第谷的观测资料讨论行星轨道，开始时当先验的圆形轨道与观测数据不一致时，他就抛弃原来的模型，采用与观测数据相吻合的椭圆轨道模型。他认为假说提出的主要目的是“说明现象，及其在日常生活中的用途”。如果一个假说明显违背观察到的事实，绝不允许用一些方便的假设去掩盖这一矛盾，而是从可观察的实验现象作为出发点，从事实本身寻求运动的原因。在思维方法上开普勒应用的是先分析后综合，他先以“寻找宇宙数的和谐”作为出发点，先把太

阳系这个整体分解为各部分，并从中找出研究火星轨道中的“8角分(即8′)”的相差作为主要矛盾来深入，紧抓不放。用开普勒自己的话说：“这8角分是不允许忽略的，它使我走上改革天文学的道路。”由此，才得出椭圆轨道的定律来。然而，分析又必须以综合为归宿，对各个行星的行为进行分析的目的又是为了综合，即为了找出整个太阳系的整体运动规律。

一个第谷，一个开普勒，两个人是一对无形之中配合默契的师徒。第谷善于观察，没有他丰富准确的天文观测资料，开普勒再聪明也是一个空想家而已。开普勒精于抽象思维，没有他的理论概括，第谷的观察资料也只能是一堆废纸。他们两位一个有明亮的眼睛，一个有聪慧的头脑；一个精于观测实践，一个精于理论思考；使分析、综合方法在科学上得到一次很成功的应用。

再从物质结构认识过程的发展来看，从汤姆逊模型到卢瑟福模型再到玻尔模型，从科学方法的角度来看，这也是一个有意义的科学综合。因此，所谓综合的方法，就是在思想上把研究对象各部分连续起来，把由分析获得的各个部分、单元、要素的认识复原、综合为对考察对象的整体认识。汤姆逊发现电子以后，卢瑟福根据α粒子散射实验提出核式结构模型，这应该算是一次在原子层次上的综合，玻尔为了解决卢瑟福模型的困难又更上一个层次的综合，但是它还不彻底，还需进一步的工作。

2. 物理学中常用的几种分析方法

(1) 定性分析法

所谓定性分析，就是判断性的分析，如判断某种因素是否存在，判断某种事物有何性质等。前面曾经讲过正电子的发现，其实在安德森发现正电子以前，约里奥·居里夫妇就曾经清楚地在云室中看到过正电子的径迹，但是他们把它理解为向放射源移来的电子了，安德森的成功就在于对他的照片成功的定性分析。约里奥·居里夫妇的失误也就是他们以“想当然”的态度对待某些现

象，未能进行认真的定性分析，这使他们继中子发现之后又一次与诺贝尔奖失之交臂。

(2) 定量分析法

定量分析就是对事物作数量上的分析。一切事物都是质和量的统一体，事物的质变和量变是紧密联系和相互制约的，所以，对任何事物都必须进行定量分析。从定性到定量，这是物理发展的必然。“定性是定量的不足”，这是卢瑟福早就下过的定义。从科学研究来看只有量化才能深化。

哈雷彗星回归是定量分析的一个有力例证。在牛顿之前，人们认为彗星是神秘的星体，牛顿却认为，彗星并不神秘，它同样遵循力学规律。英国天文学家哈雷(E. Halley，1656—1742)根据牛顿理论进行定量计算，指出 1682 年出现的大彗星就是 1531 年、1607 年观察到的彗星，并预言它将在 1785 年再次出现。1743 年克雷洛计算了木星和土星对它的摄动作用，指出它下次出现应在 1759 年。到 1759 年 3 月 13 日人们果真观察到彗星近日点的位置，这件事轰动了全欧洲。

海王星的发现也是一个实例。1781 年，英国天文学家赫谢耳(J. Herschel，1791—1781)发现了天王星。以后，人们总是发现天王星的轨道计算结果与实验观察有出入，于是就有人怀疑起牛顿的万有引力定律了。1845 年，年仅 23 岁的剑桥大学学生亚当斯(J. C. Adams，1819—1892)认为可能有一个未知的行星影响天王星的运动。但是，在茫茫宇宙里，要找到这颗未知的行星，犹如大海捞针一样，是何等的困难！但亚当斯勇敢地面对这个难题，经过两年艰苦的计算，找到了这颗未知的行星，从而证明了天王星运动的“不正常行为”不是万有引力定律不灵，而恰恰是其他一颗未知行星对天王星施加了万有引力的结果。

可惜亚当斯这个无名小辈的看法并未引起权威们的重视，他的计算结果被置之不理。

1846年，法国巴黎天文台的青年天文学家勒维烈(U. J. J. Leveier，1811—1877)独立地计算出这个未知行星的方位，接着德国人伽勒(J. G. Galle，1812—1910)在勒维烈所指示的方位，通过观察很快地发现了海王星。巴黎天文台台长阿喇果(D. F. J. Arageo，1786—1853)风趣地说："勒维烈发现这个新的天体，却没有朝天空望过一眼，他在他的笔尖下便看见这颗行星了。"

(3) 因果分析法

我们认识物理现象时，必然会遇到现象之间的错综复杂的关系，即现象之间的相互制约和普遍联系，而因果关系则是物理现象间相互制约和普遍联系的主要表现形式之一。

通俗一点讲，定性分析是解决"是什么"的问题，定量分析是解决"有多少"的问题，而因果分析是解决"为什么"的问题。

本书前面介绍过的伽利略的科学推理的理想实验，正确地讨论了"力"和"运动"之间的因果关系，得出了力是产生加速度的原因的结论。

伽利略正确的因果分析为牛顿的动力学奠定了基础，正如爱因斯坦所说的那样："伽利略的发现以及他所应用的科学推理方法是人类历史上最伟大的成就之一。"

(4) 比较分析法

所谓比较分析，就是确定研究对象之间的差异性和同一性的思维方法。这里所说的"差异性"和"同一性"不是指表面现象，而是指本质上的"差异性"和"同一性"。对于比较分析，我们所要求的是要能看出异中之同、同中之异。物理学研究中的比较分析，就是要在表面差异极大的物理现象中看出它们本质上的共同点，在表面极为相似的物理现象间看出它们本质上的差异点。

运用比较分析，可以对事物进行定性鉴别和定量分析。例如通过光谱的比较分析，可以测定物质的化学成分和含量。1859年，基尔霍夫(G. R. Kirchhoff，1824—1887)首先用这个方法，确

认太阳也含有地球上常见的化学元素。

运用比较分析，还要揭示出不易直接观察到的运动和变化。例如，恒星在短时间内的运动是不易直接观察到的，因此，恒星长期以来被人们误认为是永恒不动的星体。但是，1718 年，哈雷将他在圣赫勒拿岛所作的观测，同 1000 多年前古希腊天文学家喜帕恰斯(Hipparchus，—公元前 127 年)与托勒密(C. Ptolemy，约 90—168)所作的观测相比较，看到了 4 个恒星(毕宿五、天狼、大角、参宿四)的位置有明显差异，因而发现了恒星的自行。又如，人们根据海王星轨道的摄动现象，由万有引力推出海王星以外还可能存在一颗行星。但经过几十年的观察，这颗行星一直没有找到。直到 1930 年 3 月 13 日，才由美国天文学家汤波(C. W. Tombaugh)运用比较分析法发现。汤波首先对天空中可能发现行星的区域进行了缜密的搜索，拍下照片。然后，将相隔几天所拍的两张星空照片进行详细比较，结果发现照片上某一个光点的位置有了明显的改变，因而确定了这个光点就是所要找的那颗行星——冥王星。由于冥王星比月球体积还要小，而它也不具有独立的自己绕日运行轨道，在 2007 年布拉格国际天文会议上决定将其从太阳系九大行星中除名。

(5) 元过程分析法

在物理学研究中，有一种特有的分析方法——元过程分析法，也叫做“微元法”。它是把研究对象分割为无限多个无限的小部分，或把物理过程分解成为无限多个无限小的部分，抽取其中一部分加以研究的方法。

从有一定质量分布的刚体内部抽出一个非常小的质量元进行研究，通过分析这些小单元的局部运动中各物理量之间的关系和变化规律，建立描述整个物理过程的运动方程。有了这个方程，不仅可以求出物理过程在某一特定条件下的瞬时状态，而且可以把握整个物理过程的运动变化趋势和特点。

分析与综合是人类认识事物的两种思维方式。人们对物理世界的认识，也是经历了以分析为主和以综合为主的两种过程。在物理学发展初期，人们对物理现象、规律的认识是零碎的、分散的、孤立的和局部的。随着认识水平的提高，人们找到了各种物理现象、物理规律之间的相互联系，逐步把物理学的研究推进到以系统、综合为主的阶段。在物理学发展中有三次伟大的综合，这就是——17 世纪牛顿力学的建立，19 世纪能量守恒及转化定律的建立，以及 19 世纪麦克斯韦电磁场理论的建立。分析与综合是紧密相连的，恩格斯曾说过："思维既把相互联系着的要素联合为一个统一体，同样地也把意识的对象分解为它的要素，没有分析就没有综合。"

科学的发展是沿着"分析—综合—再分析—再综合……"的轨迹前进的。

6.2 归纳与演绎

牛顿曾说过："在实验物理学上，一切定理均由现象推得，用归纳法推广。"爱因斯坦也认为："运用于科学幼年时代的以归纳为主的方法，正让位于探索性的演绎法。"

1. 归纳法和穆勒五法

归纳法就是一种从个别事实中概括出一般概念、一般规律的思维方法。它是一种推理形式，运用归纳法并进行推理时，可以分为三个基本步骤：

第一步　搜集材料。一般说，搜集的材料越多、越全面，推出的普遍结论越可靠。

第二步　整理材料。从自然界和实验所获得的材料往往是纷杂繁多的，难以直接洞察内在所蕴含的规律性。英国著名哲学家培根(F. Bacon，1561—1626)在谈到归纳法时曾说过："……我们如果不把它(指材料——作者)归类在适当的秩序以内，则它一定

会使人的理解迷离恍惚起来。”整理从观察和实验所得到的材料，这是归纳法极为重要的一步。

第三步　概括抽象。通过对材料进行比较，剔除其非本质的成分，把事物的本质因素及其内在规律揭示出来。

归纳法也是人们认识自然、研究自然的一种古老的方法。古希腊哲学家苏格拉底（公元前 469—前 399）所提出的著名的问答法中，已有归纳的含义。不过，他的这种归纳只是简单地从许多个别事物中找出它们的共性，这种归纳法还没有科学的地位。现代归纳法是培根提出的，他第一次最完备地指出了归纳法在人们的认识过程中的科学地位。他断言：“人类在认识过程中必须从因果联系，从分析个别事物、现象出发，任何可靠的真理都必须以大量的事实为根据，通过对大量事物的比较，就可能使单一的、个别的东西上升到一般，上升到结论。”

归纳法可分为完全归纳法和不完全归纳法两类。前者是从所有个别对象的全部总和中归纳出一般结论的方法；后者则是在没有列举全部对象而得出结论后再推理的方法。这种方法又可分为简单枚举法和科学归纳法。由于简单枚举法不能保证在没有考察的对象中不出例外，因而可靠性不强。但作为一种初步探索的方法，或作为提供假说的方法，在初步研究中仍有其作用。

在不完全归纳法中，根据某类事物部分对象的本质分析，找出它们的内在联系，推出该事物的一般性结论，称为科学归纳法，它是优于简单枚举法的一种不完全归纳法，其结论是可靠的。

在不完全归纳法中，还有一种对科学十分有用的方法，叫判明因果关系的归纳法，其中包括：契合法、差异法、契合差异并用法、共变法和剩余法。因为这些方法是英国著名逻辑学家和哲学家穆勒（J. S. Mill，1806—1873）总结的，因此称为穆勒五法。

（1）契合法

如果所研究的现象在两个或两个以上的场合中，只有一个情

况是共同的，那么，这个共同情况就与所有研究的现象之间有因果关系。

我们用 A、B、C、D、E、F、G 分别代表不同的情况，a 是我们所要研究的现象，契合法可表示如下：

情况		现象
场合(1)	A、B、C ——	a
场合(2)	A、D、E ——	a
场合(3)	A、F、G ——	a
⋮		

所以，A 与 a 之间存在因果关系。

但是，契合法也不是一种绝对有效的方法，这是因为：①在我们观察到的几个具体场合下出现的那个共同情况，也可能与我们研究的现象毫无关系；②在我们观察到的几个具体场合中的那些不同的情况，经过进一步的分析以后，可能都包括一个共同因素，而这个共同因素恰恰是我们所研究的现象产生的原因。

例如，18 世纪意大利的生物学家兼医生伽伐尼(L. A. Galvani，1737—1798)看到，当助手的解剖刀碰到死去的青蛙腿暴露在外的神经时，蛙腿竟然猛地抽动了一下。他对此十分感兴趣，经过研究，提出了“生物电”的观点——动物体内可以产生一种电流，它是蛙腿抽搐的原因。他为什么作了如此分析呢？因为 1715 年法国的阿当松(M. Adanson，1727—1806)在研究电鳗时曾被击昏，醒来后，他把“电鳗”与当时已发明的莱顿瓶联系起来，他认为动物体有电。这样，伽伐尼就把蛙腿的抽搐归为生物电了，伽伐尼也曾决定重复做实验，以究其原因。

起初，伽伐尼用铜钩与铁窗相连，他发现无论是晴天或雨天做实验，被铜钩勾住的青蛙的腿在碰到窗子的铁栏杆时都发生痉挛。他联想起美国的富兰克林(B. Franklin，1706—1790)的风筝实验，认为雷雨天大气中的电可以在蛙腿中储存起来，然后在晴天又释放出

来。这个结论对不对呢？他决定在一个封闭的实验室中重复这个实验，结果发现：当他在室内把青蛙放在实验台的铁板上，用铜丝去触蛙腿时又发生了痉挛，这就排除了是大气电使蛙腿抽动的原因。1792 年，他在《论肌内运动中的电力》一文中，描述了他所做的实验："我选择了不同的时辰，用各种不同的实验重复多次，但结果都是相同。只是在使用某些金属时，蛙腿的肌肉抽动得更加强烈而已。"

于是，伽伐尼提出了"动物电"的观点，他在上述文章中说："类似的结果使我感到很惊奇，于是我猜想：动物有电。我感到，发生这种现象时，好像有一种流质由神经流向肌肉，并且像莱顿瓶里那样，形成一个链。"他最后得出一个结论："根据我们至今所了解和研究过的一切，我认为完全有理由可以肯定，动物具有电，我们可以将其称为'动物电'。"

其实，伽伐尼对蛙腿痉挛这一现象作了错误的因果分析，他误用了"契合法"。他为了寻找蛙腿痉挛的原因，分析了蛙腿痉挛现象出现的各种场合间存在着一种什么共同的情况（这些共同的情况应是蛙腿痉挛的原因）。分析来、分析去，只找到一个共同情况——生物电的存在。于是，他根据"契合法"得出结论：生物电是蛙腿痉挛的原因。其实，伽伐尼忽视了一个重要的细节：只有当他用不同的金属接触时，例如用铜钩戳穿蛙腿而接触到铁板时，蛙腿才会发生痉挛。在"生物电"这样的传统观念束缚下，像伽伐尼这样优秀的实验家也失去了做出重要发现的机会。

对伽伐尼"生物电"的观念持不同意见的科学家，更加深入地探讨了这个问题。意大利的自然哲学教授伏特（C. A. Volta，1745—1827）决心检验一下蛙腿的抽动是不是"生物电"引起的。当他用当时已知的方法获得的电流通过青蛙的肌肉时，发现像伽伐尼所看到的一样，蛙腿也会发生抽搐。于是他得出结论：青蛙的神经反应是被动的，它只是像一台"仪器"，反映了电流的通过，而不是电流产生的原因。那么，在伽伐尼实验中，电是从哪里来的

呢？他决定越过伽伐尼的原始实验去寻求答案。他猜想，可能是两种不同的金属接触时产生了电。

为此，伏特从 1872 年起，花了整整 3 年时间，用各种金属搭配成对，一对一对地做了许多实验。通过实验，将不同金属排成序列：锌、锡、铅、铜、银、金等（这就是著名的伏特序列）。他发现，只要按这个序列，将前面一种金属与后面一种金属接触在一起，前者就带正电，后者带负电，无一例外。伏特就这样找到了蛙腿抽搐的真正原因——不同金属的接触电位差引起电流，而青蛙肌肉仅是通电导体而已。从思维方法的角度看，伏特对伽伐尼实验进行了正确的因果分析。

（2）差异法

如果所研究的现象出现的场合与它不出现的场合之间，只有一点不同，即在一个场合中有某个情况出现，而在另一个场合中这个情况不出现，那么，这个情况与所研究的现象之间就有因果关系。

差异法可表示如下：

	情况		现象
场合(1)	A、B、C	——	a
场合(2)	B、C	——	—

所以，A 与 a 之间有因果关系。

在场合(1)中，原因 A 出现，所研究的现象 a 也出现，场合(1)叫正面场合；在场合(2)中，原因 A 不出现，所研究的现象 a 也不出现，场合(2)叫做反面场合。

光电效应的发现是差异法应用的最好的实例。

最早发现光电效应现象的是德国科学家赫兹（H. R. Hertz，1857—1894），赫兹用实验的方法证实了电磁波的存在。如图6-1所示，赫兹调节感应圈使小铜球 M_1、M_2 间产生火花，调节探测器两铜球 M_3、M_4 的相对位置，在某一位置时，M_3、M_4 间也产生了明显的火花。这说明了振子产生的电磁波在探测器中引起了电谐

振。赫兹无意中发现，当 M_1、M_2 间火花产生的光照射到 M_3、M_4 间隙上，M_3、M_4 间火花放电就容易些；若把 M_1、M_2 间火花产生的光与 M_3、M_4 间隙隔开，则 M_3、M_4 间放电就比较困难。而且，赫兹还发现，容易引起 M_3、M_4 间隙放电的光是紫外线。他当时无法解释这些，只是如实地作了记叙。

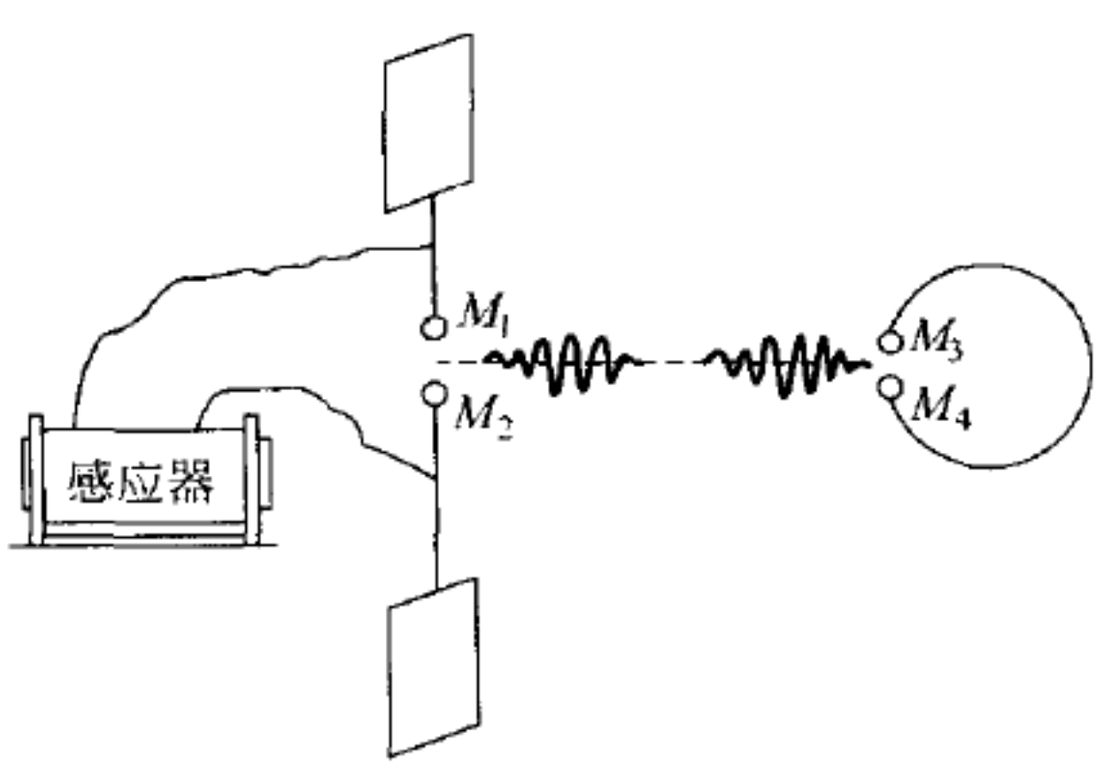


图 6-1　赫兹实验示意图

1889 年，海华兹（W. Hollwachs，1859—1922）做了一系列实验。他用碳弧光照射绝缘的锌板（锌板连接验电器）发现，如果锌板原来带负电，经照射后会迅速失去电荷；若在碳弧前面用一块玻璃隔开，则现象消失。说明起作用的确实是紫外光，从锌板放出来的肯定是负电荷。

我们仔细分析一下海华兹的思维过程，就会发现他使用的是“差异法”。这里，正面的情况是紫外线照射（A、B、C、…），反面的情况是无紫外线照射（B、C、…）（玻璃吸收了碳弧光的紫外部分），而正面情况下出现的现象是失去负电荷（a），反面情况下出现的现象是不失去负电荷 。因此，A 是 a 的原因，即紫外线的照射是锌板失去电荷的原因。

差异法比契合法有较大的可靠性，因为：

① 在差异法中不仅有正面场合，而且有反面场合；

② 在差异法中，除了在正面场合有某种情况与在反面场合中没有这种情况外，其他情况是完全相同的。

但是，应用差异法也可能产生错误。应用差异法时，要求正面场合与反面场合只有一点不同。如果在正面场合中还有其他在反面场合中没有的情况，而这一情况又被忽略了，那么就会产生错误。下面介绍一个例子，供读者参考。

劳伦斯(E. O. Lawrence，1901—1958)是美国著名的科学家，他以发明回旋加速器为科学作出了重大的贡献。1919 年，英国科学家卢瑟福(E. Rutherford，1871—1937)用 α 粒子轰击氮原子核，得到氧的同位素，从而实现了人类历史上第一次人工核转变。其反应式如下：

$$^{4}_{2}\mathrm{He}+^{14}_{7}\mathrm{N}\rightarrow^{17}_{8}\mathrm{O}+^{1}_{1}\mathrm{H}$$

由此，人们认识到：粒子可以轰开原子核的大门，而且意识到，如果加速粒子，使之获得更高的能量，则高能粒子可以更容易地轰开原子核的大门，可以在核物理领域内取得更大的成就。

这种需要激励着物理学家们设计各种加速器，使带电粒子在电场中获得加速。

1932 年，考克拉夫特(J. D. Cockcroft，1897—1967)与沃尔顿(E. T. Walton)发明了静电加速器，在卡文迪什实验室里以人工加速的粒子实现了核转变。他们用 77 万 V 高压加速质子，使 $^{7}_{3}\mathrm{Li}$ 的原子核发生分裂，产生两个 α 粒子：

$$^{7}_{3}\mathrm{Li}+^{1}_{1}\mathrm{H}\rightarrow 2\,^{4}_{2}\mathrm{He}$$

这是第一次由人工加速的粒子引起的核反应。

但是，靠静电加速器获得更高能量的粒子是困难的。因为要获得更高的能量，就需要更高的电压，这在技术上会带来极大的困难和危险。

劳伦斯采取一个非常聪明的办法，制成了回旋加速器，其基本结构如图 6-2 所示。在恒定的磁场中放置两个 D 形盒，并接上高频交变电压，在空隙中产生交变电场。带电粒子就可以在电场力

作用下被加速，在磁场力作用下回旋，最后待积累到很高的能量时被引出。

这样，仪器中的电位差与一次加速的电位差相比，就微乎其微了。劳伦斯的发明，具有不可估量的技术价值。

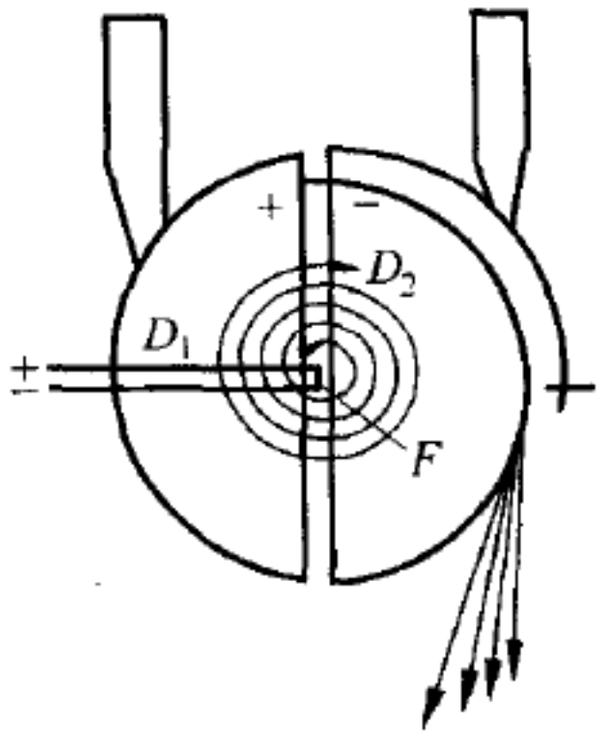


图 6-2　回旋加速器

第一个回旋加速器直径只有几英寸，离子在其中回旋的玻璃真空室可以放在一只手掌中。以后加速器规模逐渐扩大，到 1936 年，劳伦斯制成了一台直径 37 英寸的回旋加速器，它可以产生放射性同位素源了。劳伦斯和其他一些物理学家们不同，尽管他也用回旋加速器进行一些核物理研究，但他的主要兴趣在于改进加速器的性能，开发新的机器，这也确实是他所擅长的领域。也许正因为如此，他也非常遗憾地失去一次重大发现的机会。

正当劳伦斯以他的加速器制造比约里奥·居里夫妇的强千倍的放射性物质时，约里奥·居里夫妇却还在用天然放射性源轰击着原子核。劳伦斯的条件比约里奥·居里夫妇不知道要好多少倍，但做出人工放射性这一伟大发现的，却不是劳伦斯，而是约里奥·居里夫妇。

1934 年，约里奥·居里夫妇(图 6-3)在用 α 粒子轰击铝箔时，除探测到预料的中子外，还探测到了正电子(正电子是物理学家们在 1932 年发现的，它的质量跟电子相同，带一个单位的正电荷，符号是 $^{0}_{1}e$)。使人感到意外的是，拿走 α 放射源以后，铝箔虽不再发射中子，但仍继续发射正电子，而且这种放射性随着时间衰减的规律与天然放射性一样，也有一定的半衰期。原来，铝箔被 α 粒子击中后发生了如下反应：

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{4}_{2}\mathrm{He}\rightarrow{}^{30}_{15}\mathrm{P}+^{1}_{0}\mathrm{n}$$



约里奥·居里



伊伦·居里



1935年约里奥·居里夫妇
获得诺贝尔物理学奖



朗之万将科学院院士宝剑赠给约里奥·居里





约里奥·居里夫妇在实验室中

图 6-3　居里夫妇

反应生成物 $^{30}_{15}P$ 是磷的一种同位素，它有放射性，像天然放射性一样发生衰变，放出正电子。$^{30}_{15}P$ 的衰变反应可写成

$$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{0}_{1}e$$

这是人类历史上一次伟大的发现——第一次用人工的方法获得了放射性元素。

1934 年 1 月，约里奥·居里夫妇在发表的文章中写道："概括起来说，现在第一次可以利用一种外源，使某些原子核具有放射性。这种放射性在激发它的辐射源撤离后，仍可持续一段时间。类似我们观察到的寿命长的放射性 $^{13}_{7}N$ 的原子核，就可以用氘核轰击碳放出一个中子后产生出来。"该反应式为

$$^{2}_{1}H + ^{12}_{6}C \rightarrow ^{13}_{7}N + ^{1}_{0}n$$

一个多月以后，劳伦斯看到了这篇文章，立刻明白了自己实验设计中存在的缺陷，让本来可以属于自己的伟大发现从眼皮底下悄悄地溜走了，他是多么后悔啊！

劳伦斯在实验设计上究竟存在什么缺陷呢？原来劳伦斯为了加快实验速度，把回旋加速器和盖革计数器（一种常用的探测放射性辐射的仪器）共用了一个开关。这样，劳伦斯当然不能知道当回旋加速器关闭后，放射性现象仍然存在，计数器仍然会有放射性计数。但作为探测仪器的计数器因无电源而无法计数，从而使劳伦斯和他的同事们都以为不存在放射现象了。在这一现象的研究中，从思维方法的角度看，劳伦斯实在是一个不高明的研究者。本来，"差异法"是一个判别因果关系的很有用的归纳法，劳伦斯应该把回旋加速器和盖革计数器两个开关分开。当开启回旋加速器（使放射源发出的粒子轰击碳核）和关闭回旋加速器（撤走放射源）后，观察计数器的变化，用"差异法"去分析"有放射源"和"撤走放射源"两种情况下出现的不同现象，这样自然就可以发现人工放射性了。而劳伦斯把两个开关合二为一。开关接通时，计数器有反应（正面场合），开关关闭后计数器无反应（反面场合）。而反面场合与正面场合相比，发生了两个变化：加速器、计数器均停止工作，

因此，无法判断计数器无反应是由加速器停止工作引起的，还是由计数器停止工作引起的。劳伦斯在这里违反了“差异法”判断因果关系的一个原则——正面场合与反面场合相比，只能有一点不同，否则就无法判断因果关系。

看了约里奥·居里夫妇的文章后，劳伦斯立即改变接线线路，让回旋加速器和盖革计数器各自独立工作，然后，把一块碳靶放在粒子流必经之处。当回旋加速器运转了一会儿停止后，盖革计数器还在“咔哒！……咔哒！……咔哒！”地响个不停。正如约里奥·居里夫妇所预言的那样，$^{13}_{7}N$ 竟如此容易地出现了！

劳伦斯的学生与助手利文斯顿(M. S. Livingston)说：“这个咔哒、咔哒的声音，当时在场的每一个人是不会忘记的。”另一位助手摇头叹息着：“我们都是一群傻瓜！我们早就应该轻而易举得出这一发现！”的确如此，一年多以来，他们经常轰击碳，但由于线路的失误，居然轻而易举地把这个可以获得诺贝尔奖的发现让约里奥·居里夫妇在条件差得多的情况下夺走了。利文斯顿悔恨地说：“我们当时真想打大家的屁股！”

由此例可以看出，尽管条件很差，有了正确的思想方法照常能干出优异的成果来。

(3) 契合差异并用法

如果在出现所研究现象的几个场合中，都存在一个共同的情况，而在所研究的现象不出现的几个场合中，都没有这个情况，那么，这个情况与所研究的现象之间就有因果关系。

这一方法可以表示如下

	情况	现象
正面场合	A，B，C——	a
	A，D，E——	a
	A，F，G——	a
	⋮	

	情况		现象
反面场合	H,I	——	—
	J,K	——	—
	L,M	——	—
	⋮		

所以,A 与 a 之间有因果关系。

自从 1820 年 7 月奥斯特(H. C. Oersted,1777—1851)发现了电流的磁效应后,人们一直注意着把磁(变化的磁)变为电的问题。在本书的第 3 章已经讲了不少,现在结合方法问题再补充讨论一些问题。

法拉第把产生感应电流的情形概括为 5 类:①变化着的电流;②变化着的磁场;③运动着的稳恒电流;④运动着的磁铁;⑤在磁场中运动着的导体。他正确地指出感应电流与原电流的变化有关,而与原电流本身无关。法拉第把上述现象定名为"电磁感应"。

法拉第分析了自己做的许多实验,发现凡出现电磁感应现象的情况下,都是在闭合的线圈中磁力线的通量发生了变化;凡是不产生电磁感应现象时,通过闭合线圈的磁力线的通量并不变化,而电磁感应现象的强弱,取决于磁通量变化的剧烈程度。为此,他总结出电磁感应现象的规律——"不论金属线是沿直线还是沿斜线作切割磁力线运动,也不论是向这个方向还是那个方向运动,电动势的总量要由被切割的磁力线条数来表示。"也可以说,感应电动势正比于每秒钟被金属线切割的磁力线条数(即正比于磁通量的变化率),这就是电磁感应定量化的最基本的表达式。

从思维方法的角度看,法拉第总结电磁感应定律,是用了契合差异并用法,即凡有电磁感应现象出现的场合(正面场合),都存在磁通量变化的情况;凡无电磁感应现象出现的场合(反面场合),都无磁通量变化的情况。因此,磁通量的变化是产生感生电流的原因。

(4) 共变法

如果每当某一现象发生一定程度的变化时，另一现象也随之发生一定程度的变化，那么，这两个现象之间有因果关系。

设 A_1，A_2，A_3，…是现象 A 的不同状态，a_1，a_2，a_3，…是另一现象 a 的不同状态。共变法可表示如下：

	情况	现象
场合(1)	A_1，B，C——	a_1
场合(2)	A_2，B，C——	a_2
场合(3)	A_3，B，C——	a_3
⋮		

所以，A 与 a 有因果关系。

例如，法国物理学家盖·吕萨克(GayLussac，1778—1850)根据多次实验发现：一定质量的气体在压强不变的情况下，温度增加其体积也随之增加，体积与其绝对温度成正比；反之，体积随温度的减小而减小，这就是著名的盖·吕萨克定律。英国的物理学家玻意耳(R. Boyle，1627—1691)和法国物理学家马略特(E. Mariotte，1620—1684)各自独立地发现：一定质量的气体，在温度不变的情况下，如果气体压强增大则体积变小；反之，若气体压强变小则体积增大；这就是著名的玻-马定律。

像盖·吕萨克定律这样，一个量随另一个量的增加而增加的共变关系称为同向共变；像玻-马定律这样，一个量随另一个量的增加而减小的共变关系称为异向共变。当然，也有这样的情况——既是同向共变，又是异向共变。如果原因作用量一直在增加，其结果量将在一定的时间、地点、场合下增加；而越过某转折点以后即减小，反之亦然。例如，斜抛物体的运动射程，在初速度不变的条件下，起初，随抛射角的增大而增大，越过 45°后，则随抛射角的增大而减小。在这种情况下，必须找出同向共变向异向共变转折的转折点，才能真正弄清因果关系的内在规律。

在应用共变法时，往往是固定某一个因素作单因素变化，但是必须要注意到有无其他因素这时也在变化，以及这种变化对我们的本因素变化引起结果的影响。

前面讲过的3种方法，即契合法、差异法、契合差异并用法，都是从情况出现与不出现来判明因果关系的。共变法却是从现象变化的数量或程度来判明因果关系的。因此，在应用共变法时是可以度量的，可以得出表示原因和结果的两个量之间的函数关系，因而共变法有较大的可靠性。

共变法还有一个优点，就是当有些现象无法消除（或不易消除）时，我们研究这些现象之间的因果关系时，显然不能用差异法，因为差异法要求消除这些现象，当不能消除（或不易消除）的现象比较多的时候，甚至不能使用契合法。但是，在上述情况下，我们却可以应用共变法，使那些不能消除或不易消除的现象发生数量上的变化，从而判明它们之间的因果关系。

（5）剩余法

如果已知某一复合现象是另一复合现象的原因，同时又已知前一现象中的某一部分是后一现象中的某一部分的原因，那么，前一现象的其余部分是后一现象的其余部分的原因。

剩余法可表示如下：

A、B、C、D是a、b、c、d的原因；

B是b的原因；

C是c的原因；

D是d的原因；

所以，A是a的原因。

1896年，贝克勒尔（H. A. Becquerel，1852—1908）发现了铀的放射性现象，但并未引起整个科学界的关注，因为贝克勒尔的研究仅局限于铀，因此，以后的进展也不大。正当放射性研究处于徘徊不前的状况时，居里夫妇却以极大的热情投入到这个领域的研究

中去。

居里夫人猜想，是否除铀以外还有什么元素也具有放射性？它利用居里(Pierre Curie，1859—1906)制作的象限静电计进行了精密的电流测量，发现除铀以外，钍也有放射性。

居里夫人用放射线引起空气电离的强弱程度来度量放射性的强弱，发现了一个重要规律：铀或钍的化合物的放射性强度只与化合物中铀或钍的含量成比例，所含的铀或钍越多，放射性就越强，与它的化合情形及物理状态毫无关系。因此，居里夫人得出结论：放射性是原子的一种特性。

居里夫人进一步检验了各种放射物的放射性强度，发现一些沥青铀矿的放射性要比纯粹的氧化铀强烈 4 倍之多。起初，居里夫人怀疑自己是否测量错了，但经过反复实验，结论是相同的，这使得她相信这个结论是可靠的。为了解释这种现象，她设想：除了铀以外，这些矿物中，必定还有一种新的放射性元素存在，其放射能力比已知的铀或钍要强得多。

在这里，显然居里夫人应用了“剩余法”：放射性元素的存在是产生射线的原因，而铀是产生一部分射线的原因，则另一部分放射线一定是由某种尚未测知的放射性元素引起的。

为了寻找这种稀有的元素，居里夫人废寝忘食、昼夜不停地工作，终于从一二百公斤的原料中提炼出几十克的与硫化铋相混合的东西，同时将硫化铋在真空中加热到 700℃，找到了升华物，它的放射性比铀强 400 倍！于是，居里夫妇在 1898 年 7 月 18 日向法国科学院报告了新元素的发现，出于对祖国深沉的感情，他们说：“假使这新元素的存在将来能证实的话，我们想叫它‘钋’，用以纪念我俩中一人的祖国——波兰”。

几个月以后，居里夫人又用类似的方法发现了放射性比铀要强 900 多倍的另一种元素——镭。短短的几个月内，居里夫妇发现了两种新元素——钋和镭，引起了物理学界的轰动。为了提炼

出纯的镭，居里夫妇从 1899 年至 1902 年花了整整 3 年半的时间，终于分离出了 0.12 克纯氯化镭，放射性比铀强二百多万倍。测出了镭的原子量为 225，他们又花了 3 年工夫，提炼出金属镭，使科学界对镭的存在深信不疑。

人们在研究物理规律时，往往不是仅用一种判断因果关系的归纳法，而是综合使用几种归纳方法。前面，我们已经介绍过物理学家们是如何应用“差异法”发现光电效应的，下面再看一看物理学家们又是用什么方法来研究光电效应规律的。

光电效应规律的研究主要是由德国的物理学家勒纳德(P. Lenard，1862—1947)完成的。早在 1889 年，他就开始做一些简单的光电效应实验。1897 年，J. J. 汤姆逊(J. J. Thoson，1856—1940)发现电子以后，勒纳德在 1902 年证明了光电效应中发射的负电荷是电子，他还做了一系列实验，从实验中找寻光电效应的规律，其装置如图 6-4 所示。当入射光射到清洁的金属表面(阴极 C)时，就有电子发射出来，若有些电子射到阳极 A 上，该电路就将有电流通过。阳极相对于阴极的电势可正可负，以使达到阳极的电子数增加或减少。

图 6-5 表示两种程度不同的同频率的单色光 a 和 b 照射到阴极 C 上，测得的电流与电压的关系曲线。改变电压 V，光电流 I 大小随之改变，这里是用“共变法”研究电压、电流的因果关系。电流随电压的增大而增大，这是一种“同向共变”的关系；当电压足够大时，电流达到饱和，其值不变，这种“共变关系”结束。

但不同的入射光强对应不同的饱和电流，饱和电流的大小与入射光强成正比——这是勒纳德发现的又一种“共变关系”。

勒纳德又创造了一种测光电子最大初速度的方法，他在电路上，加反向电压(即遏止电压 $-V_1$)，使光电流为零。发现不同强度的同种频率的单色光，其遏止电压相同，即电子逸出的最大初速度相同，他发现了入射光频率与遏止电压有因果关系。这里，勒纳

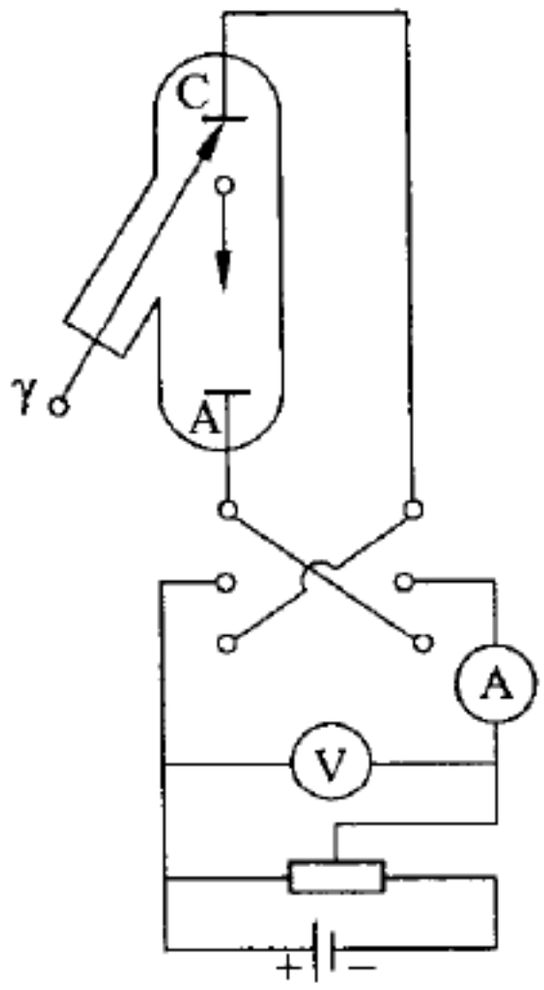


图 6-4　光电效应实验

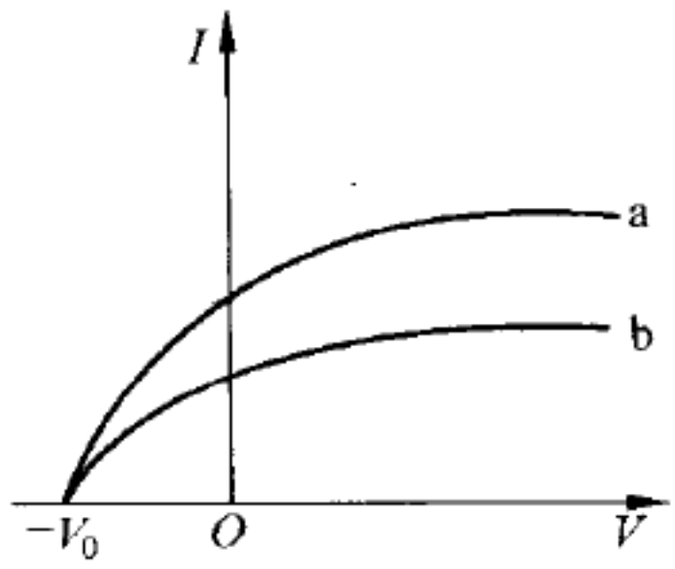


图 6-5　光电流 I 与电压 V 的关系

德又应用了“契合法”。两次实验中有一种情况相同(入射光频率同),出现了同一现象(遏止电压相同),因此,入射光频率与遏止电压有因果关系。图 6-6 是遏止电压与频率的关系图形,人们正是通过遏止电压的测量去推算入射光频率的(关于这一点,第 5 章已作过解释了)。

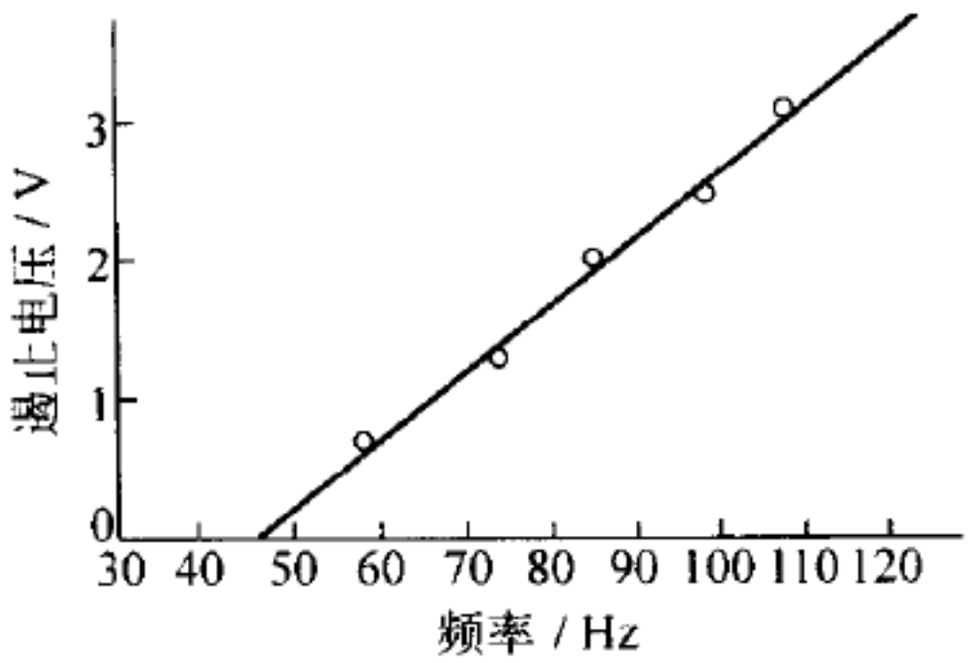


图 6-6　遏止电压与频率的关系

勒纳德发现的这些因果关系,用经典理论是无法解释的:①按

经典理论，当光强增大时，作用在电子上的力也增大，因此光电子的初动能也应增大，但事实是光电子的初动能与入射光强无关而仅与频率有关。②按照经典理论，光是一种电磁波，其能量是连续的。当入射光不太强，只要有足够长的时间积累，电子也能达到一定的能量而逸出金属表面。但事实并非如此，要么一经照射就立即有电子逸出金属表面，无需延迟时间（至多 10^{-9}s）；要么无论光照射多久，电子也无法逸出金属表面。

本书第 4 章中讲述的爱因斯坦光量子的假设就是在这些方法的指导下应运而生的。

归纳法在科学认识中所起的作用，一直为许多著名的科学家所推崇。牛顿说："在实验中各个定理都是从现象中推论出来的，然后再通过归纳而成为普遍的原理。"爱因斯坦也说过："科学家必须在庞杂的经验事实中，抓住某些可用精密公式来表示的普遍特征，由此探求自然界的普遍真理。"归纳法正是从经验事实中找出普遍性特征的认识方法，即从个别到一般的方法，它使科学家们能从经验事实中找出一般的规律。即使是实验事实不多，也可以从这些少量事实的考察中看出一些真理的端倪，给予人们一些启迪，使人们能提出假设和猜想。尤其是在科学实验中，人们为了寻求因果关系必须恰当地安排实验，使之合理有效。这时应用穆勒五法，利用一些因果关系去设计实验，则是非常奏效的。

当然，归纳法也不是万能的，它带有很大的或然性，因为它常常会局限于经验的、表面的、现象的反映之中，尤其他是以人们的直观感觉为基础的，因此在揭露事物本质上就不可能深刻。

2. 演绎法

前面谈到的是由特殊到一般的归纳法，现在介绍一个由一般到特殊的演绎法。

和归纳法相反，演绎法是从一般到个别的推理方法。作为出发点的一般性判断称为"大前提"，作为演绎中介的判断称为"小前

提”，把由“大前提”和“小前提”推演出来的结果称为演绎的结论。演绎推理的主要形式就是由大前提、小前提、结论组成的“三段论”。

下面介绍一个演绎法应用得很好的小故事。

法国的动物学家居维叶(G. B. Cuvier，1769—1832)的一个顽皮学生曾装扮成一个怪兽去吓唬午睡的居维叶，他被吵醒后，睡眼惺忪中看到一只“怪兽”正在把有角的头以及两只蹄子伸进卧室窗口，还不时发出怪叫声，一副张牙舞爪的样子。居维叶定睛一看，然后又满不在乎地继续入睡了。那个装成怪兽的学生很惊奇：“老师并不知道我在恶作剧，可他为什么不怕呢?”事后带着这个问题，他请教了老师。居维叶说：“有蹄有角的动物都是食草动物，不是食肉动物，我才不怕呢!”实际上，居维叶在定睛看“怪兽”时，心中已作了演绎推理，已完成了两个“三段论”：

① 大前提：凡有蹄有角的动物是不吃人(不食肉)的动物；

小前提：我见到的是有蹄有角的动物；

结论：我遇见的动物是不吃人的。

② 大前提：不吃人的动物不必害怕；

小前提：我见到的是不吃人的动物；

结论：我不必害怕。

演绎法是逻辑证明很好的工具。

如果选择确实可靠的命题作为大前提，经过合乎逻辑的推理，得到的结论就一定是正确的。因此，演绎推理是一种必然性的推理，这个特点在几何学中表现得极为突出。爱因斯坦甚至说，如果一个人初次接触到欧氏几何学而不曾为它严密的逻辑性所感动的话，那他是不会成为一个出色的理论科学家的。

演绎推理也是做出科学预见的一种手段，若把一般性的原理(理论)运用到具体场合，作出正确的推论来，这就是科学预见。由于科学理论是已被实践证明了的真理，由此作出的推论就是有科

学根据的，才可称之为科学预见。

归纳法和演绎法是非常辩证的，这两者之间既有区别又有联系，归纳法是有偶然性的，前提和结论并无必然联系；而演绎法则是有必然性的，其前提和得出的结论是有必然联系的。归纳法是从个别到一般，演绎法则是从一般到个别。在结论范围方面，归纳法的结论范围超过前提范围是可以的，而演绎法结论范围则不可能超过前提范围。

当然，演绎是以归纳为基础的，归纳又是以演绎为指导的，没有演绎指导，归纳往往要失败，所以归纳和演绎互为条件，互相渗透，在一定的条件下互相转化。杨振宁通过亲身经历认为中国缺乏实验手段，实验结果少，演绎型的训练多，而在美国从大量实验结果中构造新模型，提出新观点，归纳出新物理定律的训练多。

6.3 类比

类比是一种逻辑推理，也是抽象思维中的一种基本形式。它是通过联想，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性质的方法。

1. 类比推理的两个基本环节

（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

进行类比推理即通过比较，展开联想。其一般形式如下：

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

如果借用数学上的比例结构来表示这种类比推理的思维操作，可表示成如下的形式：

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

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'。既然对象 X 有 (a,b,c,d) 属性，X' 有 (a,b,c) 属性，开展联想，类比 X' 中应有 d 属性。

历史上还有一段用类比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)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些艰深生涩的科学论述的内容，没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，船没有风帆怎能航行，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计划，美国最终于 1945 年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使他在海战中受重创的史实，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。

当然，我们更应注意类比在科学认识中的作用，麦克斯韦说："借助类比，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。"爱因斯坦也认为："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。"

2. 类比在科学认识中的作用

(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，成为科学理论的。

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。

如库仑定律中电荷间作用力的问题，开始是从引力作用类比过来而假想的，法国科学家普利斯特利根据实验结果，把电荷的作用与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为如图 6-7 所示。

(2) 类比推理能有效激发科学家的想象

类比推理的一大特点是不拘一格，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

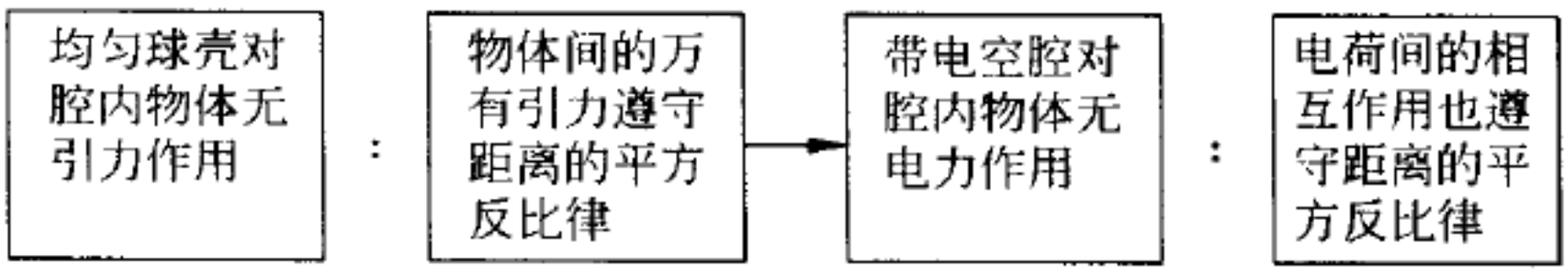


图 6-7　类比假设图

行一种必然的推理。因此，它能激发想象，启示联想，促进跨学科的交流、渗透和借鉴。例如，在原子核模型的建立中，弗利胥(O. R. Frish)受玻尔在原子核研究中提出的“液滴模型”启发的影响，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为如图 6-8 所示。

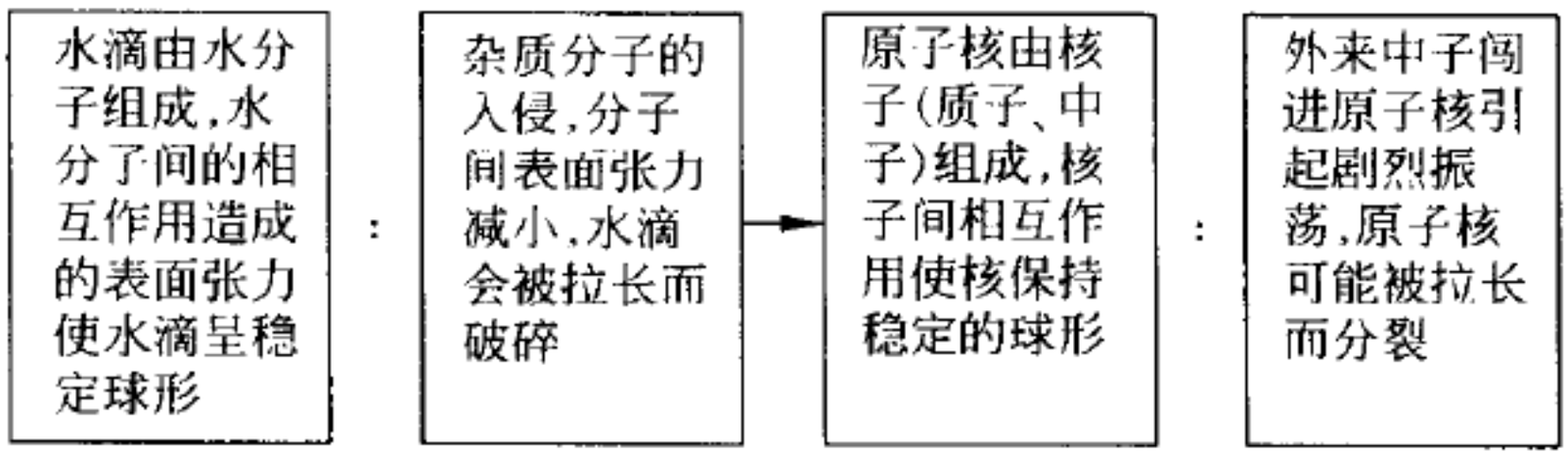
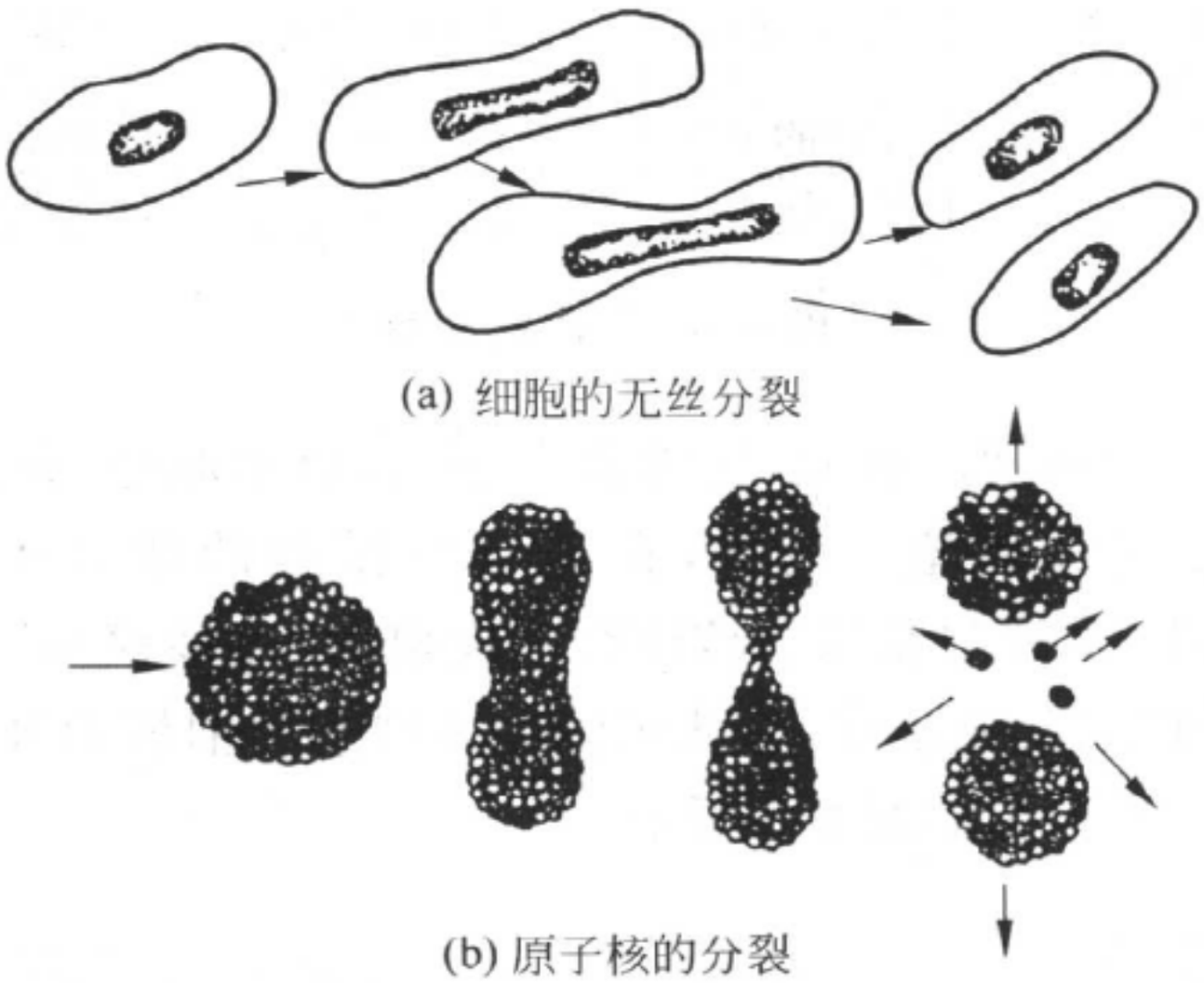


图 6-8　类比关系图

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，变成两个细胞(图 6-9)。

弗利胥是物理学家迈特勒的侄子，迈特勒对弗利胥的类比很赞赏，他们立即对裂变时释放的能量作了初步计算。迈特勒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。

弗利胥回到哥本哈根后，把自己与迈特勒的看法告诉玻尔，玻



(a) 细胞的无丝分裂

(b) 原子核的分裂

图 6-9　细胞的分裂与原子核的分裂

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，它不仅用铀，而且用钍进行核反应，都得到相同的结果。

1939 年 1 月 26 日，以迈特勒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。

重核裂变是人类利用能源的一个划时代的大事。

(3) 类比可导致技术上的发明创造

传说中国有名工匠鲁班发明锯就是受到路边茅草边缘长着锋利细齿能使人拉破手指的启发而制成的，再如望远镜类比于人们的眼睛，电话类比人的耳朵等都是使人产生灵感而引发的发明。

近年来，在社会科学中引进了不少自然科学的概念模型，同样也是由类比得到启发而展开的，如企业生态学这门科学就是把企业看成是一个细胞，它有新陈代谢，它有与外界的质量、能量交换等功能，由此而建立起企业生态学的学科。

(4) 类比为模拟实验提供逻辑基础

有一种实验方法叫模拟法，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性质和规律的结论。例如图 6-10 是一种模拟类比法，它是通过模型和原型的类比来进行研究的。

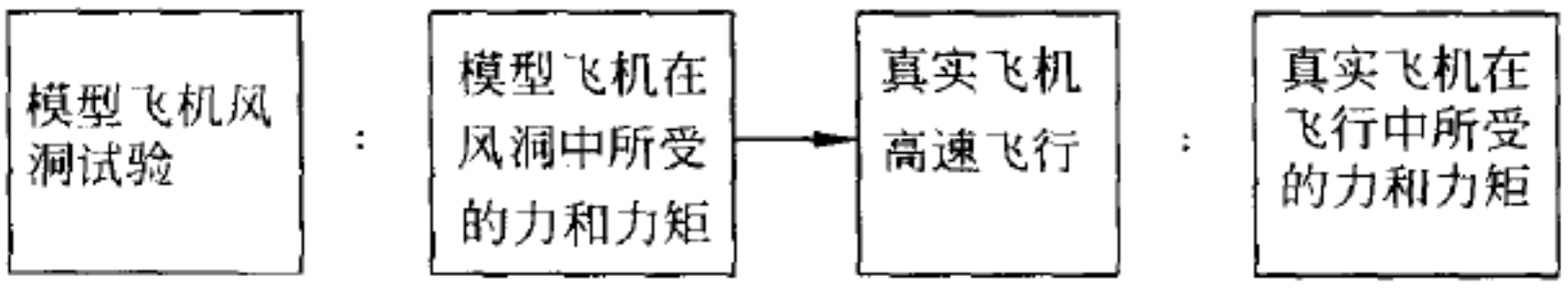


图 6-10　模拟类比法

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。

类比的方法很多，可以从类比对象来考虑，如物理现象间的类比，跨学科现象间的类比；从系统论上来说，可以是局部类比、整体类比，也可以是体系的类比；从方法论来说，又可以按其所用方法、手段来进行类比。这里举例来说明，比如众所周知的阿基米德（参见图 6-11）原理的发现就是一个简单共存类比法。

古希腊的阿基米德（Archimedes，约公元前 287 年—前 231 年）面对余拉古希罗大帝（King Hiero，公元前 269 年—前 216 年在位）提出的判断金王冠中是否掺假的难题，一直冥思苦想，他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（见图 6-11），从而解决了“王冠问题”。

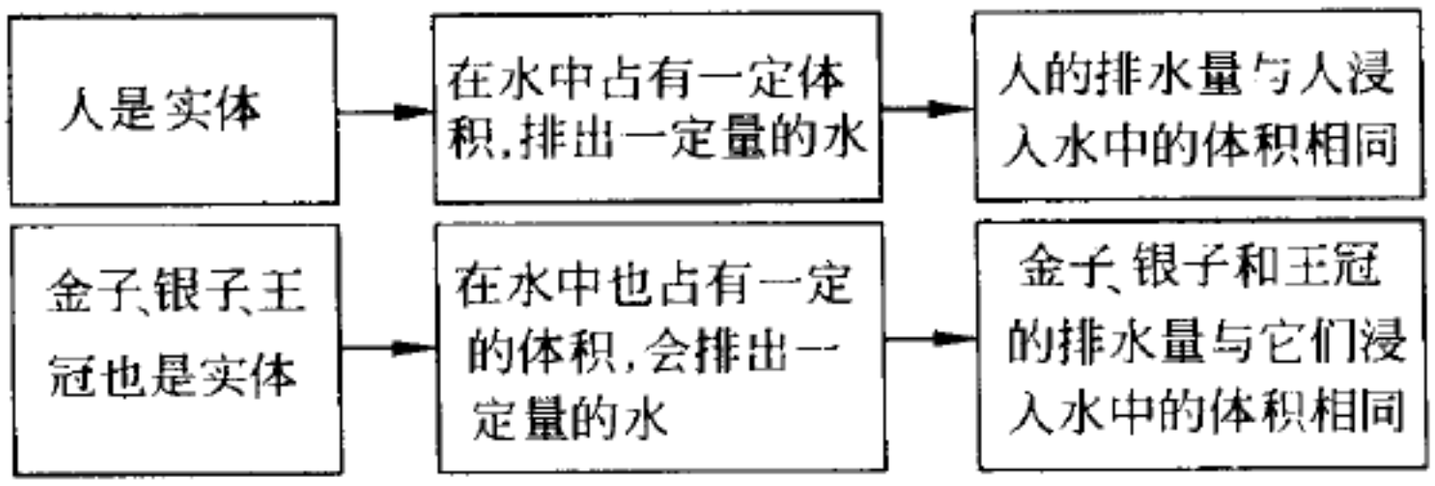


图 6-11　阿基米德王冠问题类比图

当然，作为简单共存类比法，由于对象属性之间逻辑性联系较薄弱，因此，它得到结论的可靠性也要差些。

若两个研究对象各自属性之间可能存在类似的因果联系，依

此而进行的一种逻辑推理，我们称为因果类比。

如果我们用 A 和 B 分别表示两个（类）对象，用 $a_1, a_2, a_3, \cdots$ 表示对象 A 所具有的属性，用 $b_1, b_2, b_3, \cdots$ 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，可类推出与它相似的对象 B 的因果关系。

因果类比可以统一地用图 6-12 表示。

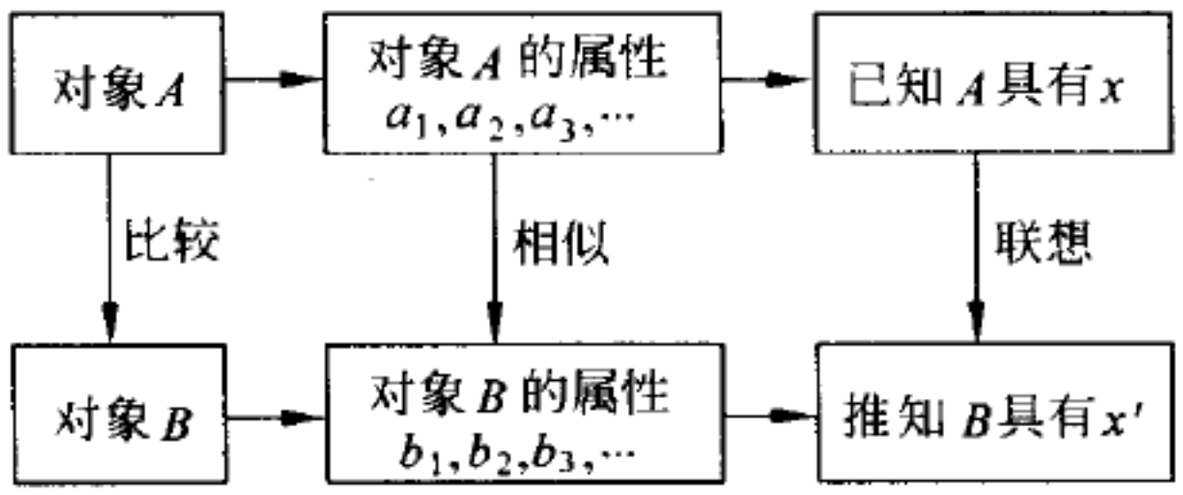


图 6-12　因果类比图

因果类比的例子很多，如光学与声学特性的类比，安培提出分子电流的假设等都是采用了这种因果类比法。

本节中我们曾介绍库仑定律与引力定律之间的类比关系。实际上，通过实验证明：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）及其相关的知识结构的一种类比推理方法。

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。这种数学类比可用图 6-13 表示。

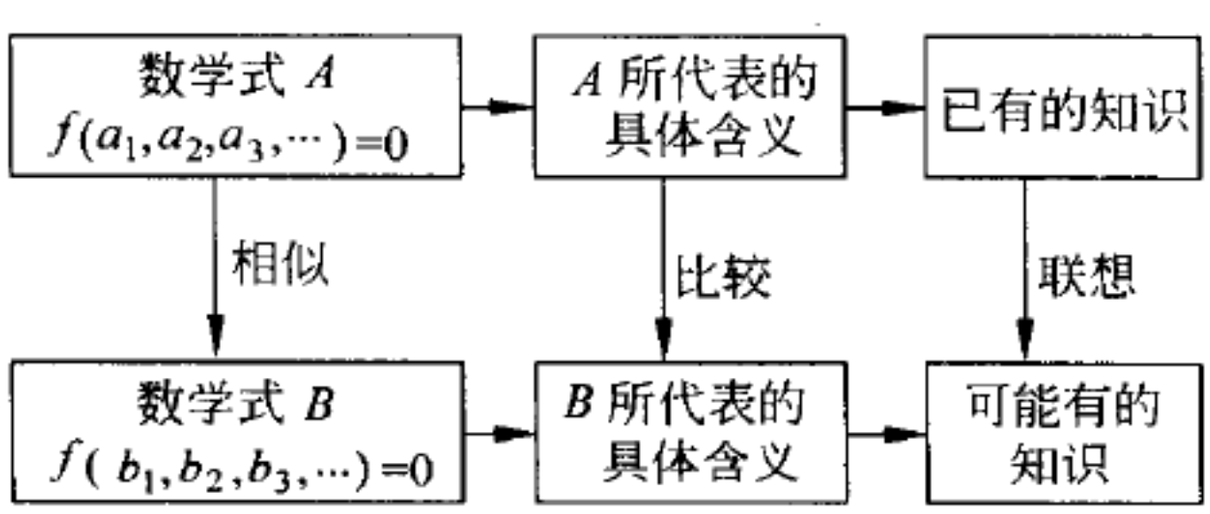


图 6-13　数学协变类比

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。这种类比可用图 6-14 表示。

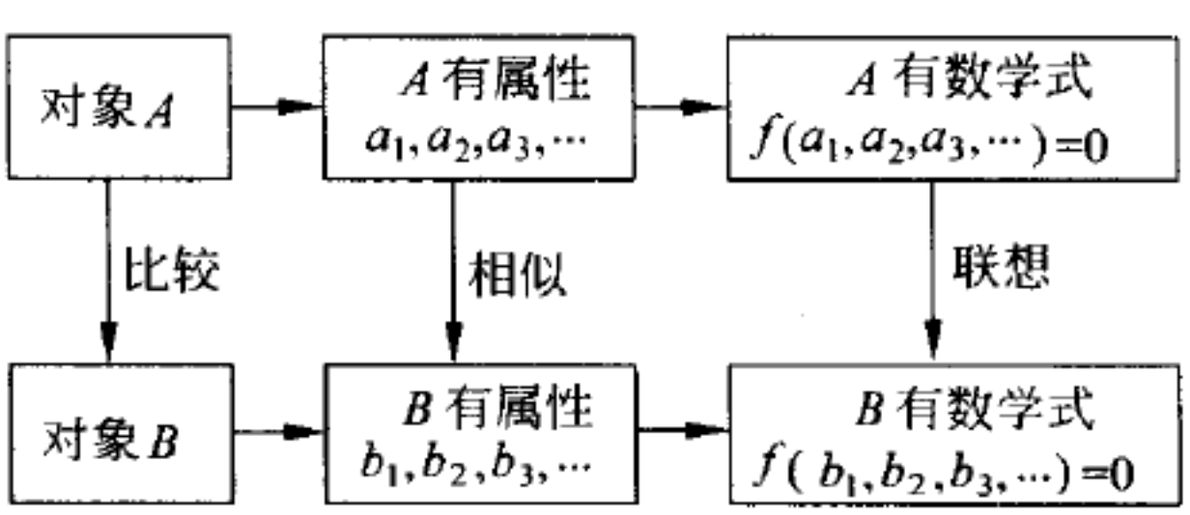


图 6-14　数学比较类比

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，它注重从事物的相似性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。

还有一种类比叫模型类比，它是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。

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,这种类比推理可用图 6-15 表示。

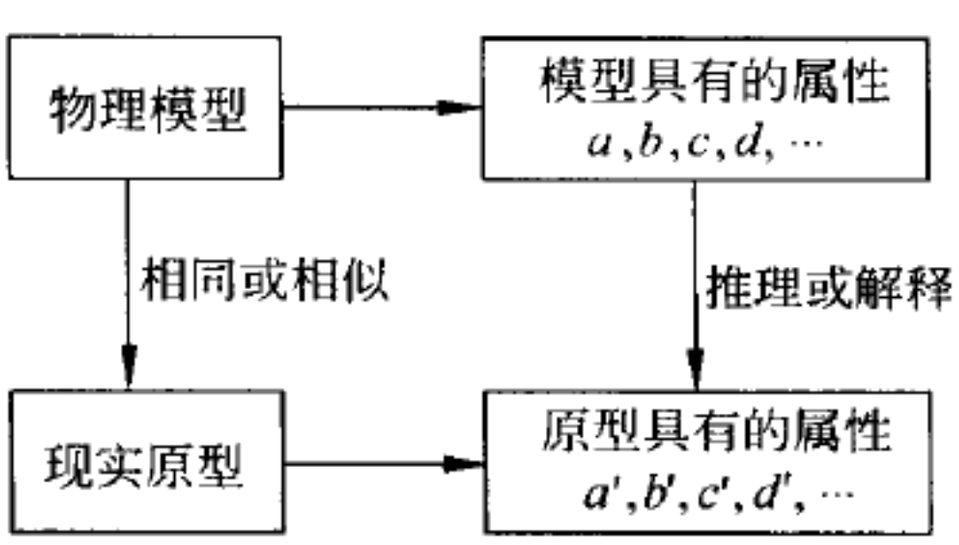


图 6-15　物理模型类比

“物理模型”是为了便于研究而建立的高度抽象的反映事物本质特征的理想物体,人们运用“物理模型”便于计算、推理、探索物质运动的规律,建立物理方程。在构造“物理模型”时,要对复杂事物加以抽象化,突出研究对象的主要特征,在具体的过程中还要不断与实际比较,加以修正,最后达到“物理模型”与现实原型中的物理世界基本符合。

1991 年诺贝尔物理学奖获得者皮埃尔·吉勒·德燃纳,被人称为“当代的牛顿”。他把液晶和聚合物等复杂物质形态类比,得出了令人惊叹的简单规律。

(5) 类比对学习、研究的作用

前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的黑暗角落”。

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)功能和模型(实验的)功能等方面。

6.4 从原型到模型的方法

6.3 节中我们讨论了模型类比的问题，这里再对从原型到模型的方法做些讨论。模型是理论知识的一种初级形式。做理论研究时，通常都要从“造模型”入手，对复杂事物加以抽象、简化，突出研究对象的主要特征，构成一个概念或实物体系，这就形成“模型”，从原型首先简化出来的往往只是一个“物理模型”。为了能对模型进行研究，我们还要进一步要用数学的语言，对之进行描述、计算，找出其“量”的关系和规律，也就是说“只有量化，才能深化”。这后一步的工作，也可以说是由“物理模型”上升为“数学模型”的步骤，物理学中有许多由原型到模型的例子。如克劳修斯提出的理想气体模型，推导出气体压强公式；范德瓦尔斯分子模型的提出，导致真实气体方程的建立；卡诺理想热机模型和理想循环的建立，导致卡诺定理的确立……从本书前几章内容来看，这种例子是举不胜举的。

建立模型是物理学研究中常用的一种重要研究方法，它不仅可应用于形成正确理论，也有助于对各种具体现象、具体问题的研究，它可以有以下一些作用。

(1) 简化、纯化事物原型

模型是一种理想化的形态，它最明显的特点是对事物原型加以极度的简化和纯化，摒弃其中次要的、非本质的因素，突出其主要的、本质的起决定影响的因素，并寻求与现象间的对应的“量”的关系。有时这种简化、纯化，甚至是一个思想推理过程，是逻辑推理的方法和形式，这样可以避免现实事物中的许多困难，为探索新理论提供简单可行的方法。如伽利略为说明惯性原理提出了物体在光滑斜面上下滑再上升的实验，相对论中为说明同时性采用了火车、火箭等，这些做法都牢牢地抓住了事物的本质，并能形象、生

动、具体地使人们更便于接受新思想，更容易理解新概念。

（2）解释事物或现象的原因

模型和原型间是有一定逻辑关系的，也就是从原型出发，简化、纯化成模型，对模型的研究得出了结果，结果反过来又可为解释原型提供演绎的系统。例如，利用金属导电模型来解释欧姆定律时，就是以导体中的自由电子在运动过程中频繁地与金属正离子（晶格框架）碰撞而改变运动方向，限制了定向移动速度的增加来进行解释和推导的。事实上，许多研究表明，解释事物现象原因的最终结果，往往导致假说、理论（包括物理的和其他社会科学等）的出现，尤其是假说的出现和得到证实更有实际的意义，因为假说是根据一定的科学事实和科学理论对研究中的问题所提出的假定性的看法和说明。当我们所做的由原型上升为模型的工作有成效后，进一步的演绎过程中就可以有一些假定性的看法和说明。这是一种思维的升华，而它的基础就是我们从原型到模型的上升和展开。例如麦克斯韦为了解释在变化磁场中导体回路上所产生的感生电流现象，提出了感生电场的假说；为了解决安培环路定律在传导电流不连续时所遇到的困难，提出了位移电流假说。这些对电磁场理论的建立都起着重要的作用。

（3）指出方向，作出预见

由于从原型到模型的过程排除了大量次要的、非本质的、非决定性因素的干扰和影响，而突出了其主要的、本质的、决定性的因素，因而它对现象的讨论和描述就是透过现象抓住本质，因此在研究事物时，更有助于发挥逻辑的力量，可以超越现实条件而得出更重要的结论。由于自然科学上对事物的研究往往要借助于一些手段、工具，在这些手段、工具尚未发达时，就会有暂时观察不到的现象。但是模型的力量往往会领先于这些实际手段、实际工具的观察而能做出科学的预见，例如，海王星的发现是勒维烈“用笔和纸”发现的，他没有向天空看过一眼。

这种假说的方法，还有一种做法，就是按原有的理论去展开讨论，使之得出矛盾的结果，再动摇其原有理论的基础，这就是所谓的“佯谬法”、“悖论法”，如爱因斯坦的“追光悖论”、伽利略的“落体佯谬”，以及物理学中的其他的“悖论”、“佯谬”都是非常有趣和有效的。

当然，在实际的科学发现中，并不存在什么十分严格的逻辑通路，科学的创造常常是由于科学家们独特的创造性思维的结果。作为物理课的学习，我们不应只强调教授前人的研究成果，而对于前人如何得到这些成果的思路和研究方法却很少提到。中国有句古语叫：“授之以鱼，不如授之以渔”。从教学来说，“授之以鱼”的教学，则远不如“授之以渔”的教学。法国物理学家拉普拉斯说：“认识一位巨人的研究方法，对于科学的进步……并不比发现本身更少用处，科学研究的方法通常是极富兴趣的部分。”为此，本书特别安排了本章的内容，以供学习、参考。

参 考 文 献

1. 吴宗汉等. 物理学概论. 南京：东南大学出版社，2001
2. 吴宗汉. 文科物理十五讲. 北京：北京大学出版社，2004
3. 薛瑞丰等. 物理学史的启迪. 西安：西北工业大学出版社，1998
4. 刘佑昌. 现代物理思想渊源. 北京：北京航空航天大学出版社，1995
5. 李元杰. 寻找上帝的科学. 武汉：湖北人民出版社，2000
6. 郭奕玲等. 物理学史. 北京：清华大学出版社，1998
7. 倪光炯等. 改变世界的物理学. 上海：复旦大学出版社，1994
8. R. P. 费曼. 费曼物理讲义. 上海：上海科技出版社，1986
9. 郭奕玲等. 物理学家的足迹. 长沙：湖南教育出版社，1990
10. 赵峥. 探求上帝的秘密——从哥白尼到爱因斯坦. 北京：北京师范大学出版社，1990
11. 冯端. 物理学现况的一些辩证思考. 科学，2003，55(5)
12. 陈怡，程钢.《老子》《论语》今读. 北京：高等教育出版社，2003
13. 邱仁宗. 科学方法和科学动力学. 上海：知识出版社，1984
14. 石左虎. 物理学中存在的七个谜团. 世界科学，2006，9～10 期