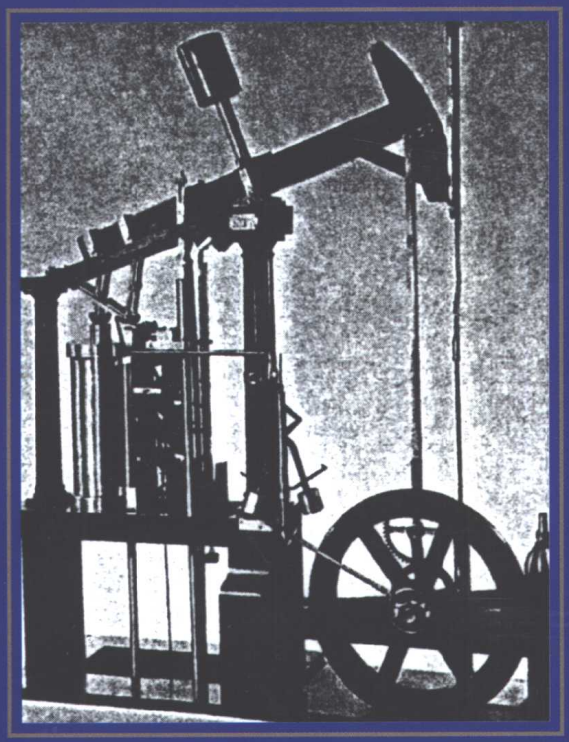
北京市高等教育精品教材立项项目

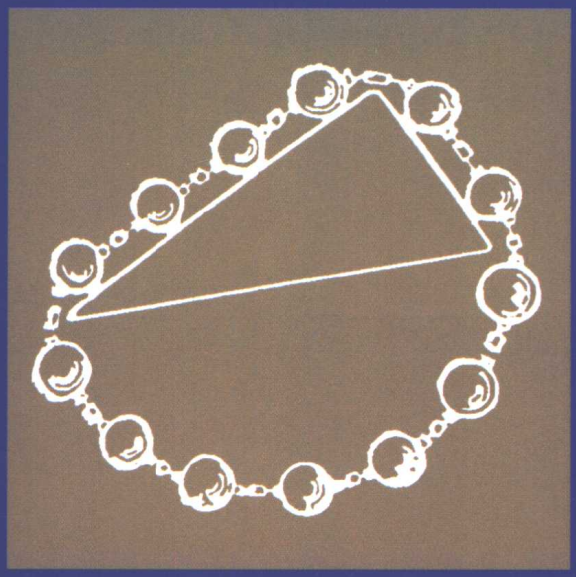
物理学史教程

李艳平　申先甲　主编



科学出版社
www.sciencep.com

(O—1688.0101)
责任编辑：孔国平
责任印制：钱玉芬
封面设计：张　放



ISBN 7-03-010933-3
9 787030 109330 >

ISBN 7-03-010933-3
定　价：40.00 元

内 容 简 介

本书是高等师范院校本科生教材，系统论述物理学发展史，包括古代物理学、经典物理学和现代物理学，共13章，每章末有思考题。注意分析杰出科学家的创造道路，倡导科学精神和科学方法，挖掘物理学史料的素质教育因素，并为物理学史与教育结合提出积极建议。书中对20世纪物理学及其思想方法的论述尤为深入，全面反映了该世纪的物理学发展状况。

图书在版编目(CIP)数据

物理学史教程/李艳平，申先甲主编. —北京：科学出版社，2003

ISBN 7-03-010933-3

Ⅰ.物… Ⅱ.①李… ②申… Ⅲ.物理学史-师范大学-教材 Ⅳ.O4-09

中国版本图书馆CIP数据核字（2002）第087321号

责任编辑：孔国平/责任校对：宋玲玲
责任印制：钱玉芬/封面设计：张 放

科学出版社 出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
http://www.sciencep.com
新蕾印刷厂 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2003年1月第 一 版 开本：787×960 1/16
2003年1月第一次印刷 印张：27 1/4
印数：1—3 500 字数：575 000

定价：40.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换〈环伟〉）

目　录

绪论 …… 1
第一节　物理学史的研究对象和方法 …… 1
第二节　物理学发展的基本模式 …… 5
第三节　物理学史与物理教学 …… 11

第一篇　古代物理学

第一章　中国古代物理学成就 …… 33
第一节　物质本原思想的演变 …… 33
第二节　物理学知识的积累 …… 40
第二章　西方古代物理学成就 …… 64
第一节　希腊时期关于物质本原的思想 …… 64
第二节　希腊时期经验物理学知识的积累 …… 69
第三节　中世纪阿拉伯和欧洲的物理学发展 …… 74

第二篇　经典物理学

第三章　科学革命和新科学观的诞生 …… 83
第一节　资本主义的兴起与文艺复兴运动 …… 83
第二节　天文学的突破与科学革命的发生 …… 86
第三节　新科学观的诞生 …… 91
第四章　经典力学体系的建立 …… 95
第一节　伽利略的力学贡献 …… 95
第二节　万有引力定律的发现 …… 103
第三节　牛顿与《自然哲学的数学原理》 …… 107
第四节　牛顿力学的完善与分析力学的创立 …… 111
第五章　光学的发展 …… 117
第一节　光学的早期发展 …… 117
第二节　光的波动说的复兴 …… 128
第三节　光速的测定 …… 133
第四节　光谱学的发展 …… 138

第六章　热力学和统计物理学的发展…… 143
第一节　关于热现象的研究 …… 143
第二节　能量转化与守恒定律的确立 …… 151
第三节　热力学第二定律的建立 …… 159
第四节　分子运动论的发展 …… 164
第五节　统计物理学的建立 …… 172
第七章　电学与磁学的发展…… 179
第一节　静电学与静磁学的建立 …… 179
第二节　电磁联系的发现 …… 186
第三节　法拉第的电磁学研究 …… 193
第四节　超距论电动力学理论的建立 …… 198
第五节　经典电磁场理论的建立 …… 203

第三篇　现代物理学

第八章　实验上的新发现与现代物理学革命…… 219
第一节　从阴极射线研究到电子的发现 …… 219
第二节　“以太漂移”的探索 …… 227
第三节　黑体辐射的实验和理论研究 …… 233
第四节　现代物理学革命的序幕 …… 235
第九章　相对论的建立…… 239
第一节　狭义相对论的诞生 …… 239
第二节　广义相对论的创立 …… 264
第十章　量子力学的建立…… 282
第一节　量子论的初期发展 …… 282
第二节　原子物理学的发展 …… 292
第三节　矩阵力学和波动力学的建立 …… 300
第四节　玻尔与爱因斯坦关于量子力学完备性的争论 …… 311
第十一章　核物理学与粒子物理学的发展…… 320
第一节　原子核结构的探索与核裂变的发现 …… 320
第二节　核理论的研究 …… 330
第三节　粒子的发现与强子结构的研究 …… 340
第十二章　凝聚态物理学的发展…… 352
第一节　固体结构的研究 …… 352
第二节　导电理论研究 …… 356

第三节　超导物理进展 …… 361
第十三章　非线性物理学研究进展 …… 375
第一节　非线性现象的发现 …… 375
第二节　混沌理论的创立 …… 380
第三节　远离平衡态的自组织现象研究 …… 394
结语：当代物理学面临的重大疑难和研究前景 …… 401
参考文献 …… 415
人名索引 …… 416
后记 …… 427

绪　论

第一节　物理学史的研究对象和方法

一、物理学的发展和物理学史的研究对象

同人类的其他任何知识领域一样，物理学也是人类社会实践的产物，它是随着人类社会实践的发展而产生、形成和发展的。物理学的发展，经历了古代物理学时期（经验物理学的萌芽时期，16 世纪以前），近代物理学时期（经典物理学时期，16 世纪到 19 世纪）和现代物理学时期（20 世纪）的发展阶段，它的研究内容、研究方法和基本观念都不断地发生着深刻的变化。

大约在公元前 7、8 世纪之后，中国和希腊形成东、西方两个科学技术发展的中心。当时科学已经以经验科学的形态从生产劳动中分化出来，但物理学还没有从哲学中分化出来，它只是“自然哲学”的一个组成部分。同时还由于社会对科学的需要十分有限，科学的社会功能并不显著，所以物理学的发展比较缓慢。在 2000 多年中，重大的发现极少，希腊时期的成就似乎成了不可逾越的顶峰；其中发展得较完善的只有静力学和天体运动的理论，此外还有一些关于光的直线传播的知识和关于物质本原的思辨性理论。这一时期的后期，西方处于黑暗的中世纪，以经院哲学为代表的宗教神学，扼杀了生气勃勃的希腊精神，科学的发展受到很大的抑制；但是，手工业生产技术的发展，却为实验科学的产生准备了条件。同一时期，中国的科学技术取得了辉煌的成就，走在了世界的最前面。

15 世纪末叶，资本主义生产关系的产生，促进了生产和技术的大发展；席卷西欧的文艺复兴运动，解放了人们的思想，激发起人们的探索精神。近代自然科学就在这种物质的和思想的历史条件下诞生，导致了 17 世纪主要在天文学和力学领域中的“科学革命”。牛顿力学体系的建立，标志着近代物理学的诞生。整个 18 世纪，物理学处在消化、积累、准备的渐进阶段，新的科学思想、方法和理论，得到了传播、完善和扩展。牛顿力学完成了解析化工作，建立了分析力学；光学、热学和静电学也完成了奠基性工作，成为物理学的几门基础学科。到了 19 世纪，物理学获得了迅速和重要的发展，相继建立了波动光学、热力学和分子运动论、经典电磁场理论等完整的、解析式的理论体系，使经典物理学臻于完善。

19 世纪末叶物理学上的一系列重大发现，使经典物理学理论体系本身遇到了不可

克服的危机，从而引起了现代物理学革命。由于生产技术的发展，精密、大型仪器的创制以及物理学思想的变革，这一时期的物理学理论呈现出高速发展的状况。研究对象由低速到高速，由宏观到微观，深入到广垠的宇宙深处和物质结构的内部，对宏观世界的结构、运动规律和微观物质的运动规律的认识，产生了重大的变革。相对论和量子力学的建立，克服了经典物理学的危机，完成了从经典物理学到现代物理学的转变。1927 年以后，量子场论、原子核物理学、粒子物理学、凝聚态物理学、非线性物理学、天体物理学和现代宇宙学，得到了迅速的发展，当代物理学已经发展成为一个庞大的学科群，包括了难以数计的分支学科。物理学向其他学科领域的推进，产生了一系列物理学的新部门和边缘学科，并为现代科学技术的发展提供了新思路和新方法。

随着物理学研究内容的变化，物理学的研究方法也在变化，不断得到丰富和提高。在古代，人们主要是靠不充分的直观的观察、思辨性的猜测、形式逻辑的演绎和简单的推理，直觉地、笼统地去把握物理现象的一般特性。实验的巨大作用尚未被认识到，只在阿基米德（Archimedes，约公元前 287～前 212）和中国的墨家学派等少数工作中有过体现。随着近代自然科学的兴起，观察方法就从以自然观察为主发展为以仪器观测为主，强调以系统的有目的的实验和观测事实为根据去归纳定律，建立理论。科学实验和数学方法的结合，使精确的、定量的物理学研究有了很快的发展。整理经验材料和建构理论的需要，也促进了分析、归纳和演绎等逻辑方法的发展。这一时期科学方法的发展，使物理学作为一门实验科学的特点显著地呈现出来。18 世纪末到 19 世纪末，物理学从分门别类的研究过渡到阐明各种运动形式的联系，从认识物理现象过渡到考察变化发展过程，在宏观物理领域里全面实现了理论综合。实验方法、数学方法和理论概括方法都有了显著的提高和发展。如在热学、光学和电磁学的研究中，许多实验发现为这些物理理论的发展奠定了坚实的基础，导致了能量原理和电磁场理论的重大突破；数学成为物理学家进行表达、加工、抽象思维和理论构建的工具，每一门物理学理论，都联系于一门特殊的数学方法。物理学研究中理性作用的增强，使科学假说方法得到普遍应用，促进了 19 世纪物理学学术思想的活跃，新思想、新见解层出不穷，引发了一系列著名的科学争论。研究由大量分子偶然事件组成的体系的宏观规律，使统计方法也被引进了物理学。20 世纪以来，由于各种大型、精密仪器设备的创制和分析技术的发展，特别是电子计算机的发明与应用，物理实验方法在精密、快速和自动化方面都达到了新的水平。数学方法更广泛深入的应用，使物理学理论的公理化、数学化特征日益突出，现代理论物理成了数学物理学。更由于物理学研究领域越来越远离人们的感性经验，创造性思维在创建新理论中的作用更加突出。科学想像、理想实验、大胆猜测，甚至类比、直觉和灵感等非逻辑方法，在现代物理学的研究中都是不可或缺的；追求简单、对称、和谐与数学美，已成为理论物理学家们科学哲学思想中的一个核心概念。

物理学基本观念的变更，最本质地反映出物理学思想的根本变革。爱因斯坦与英

费尔德指出："在建立一个物理学理论时，基本观念起了最主要的作用。物理书中充满了复杂的数学公式。但是所有的物理学理论都是起源于思维与观念，而不是公式。观念在以后应该采取一种定量理论的数学形式，使其能与实验相比较。"[①] 这里说的"基本观念"包括最少个数的原始概念和不能在逻辑上进一步简化的基本假设（公理，定律），它们构成了一个物理学理论体系的根本部分，在物理学理论的构建中起着理论基础的作用。

物理学理论是从概念上把握实在的一种努力。面对繁纷复杂的物理现象，人们总希望运用思维去把握全部感觉经验，从中整理出秩序来。这就需要借助于一些基本概念和根据假说所确定下来的这些概念之间的基本关系，描绘出一幅关于物理实在的简化的和易于领悟的世界图像；进而采用某些数学公式，利用逻辑演绎，用定量的、逻辑的形式建立起理论体系，并建立起它和广泛的经验事实的联系。这就是基本观念的理解作用和建构作用。它为理性地整理经验知识提供一个思维准则和形成理论体系的基本构架，指导着物理学家们得以超越浩繁的感性经验实现理论的升华。

因此，科学理论的基本观念不是固定不变的。当不断增加的感性经验知识尚可为原有的观念所容纳和理解时，科学的发展就表现为渐进的积累；而当新的科学事实无法为原有的理论框架所包容时，就会发生科学革命，提出新的基本观念。

物质实在是具有不变质量的粒子和粒子体系，独立的、绝对的空间和时间是物理事件的存在框架，力只引起运动状态的变化，宇宙物体之间存在着与媒质无关的中心力的作用，物体的运动状态由初始条件惟一确定这些机械论的物质观念、时空观念和因果观念，是牛顿力学体系赖以建立的基本观念。奥斯特电流磁效应的发现，第一次认识了非中心力；法拉第电磁感应定律，证明了"力"不是源于"力心"，而是产生于空间状态的变化，从而产生了"媒递作用"和"场"的观念，形成了电磁场理论的基础。爱因斯坦抛弃了"绝对运动"、"绝对以太"等观念，提出了依赖于物质运动的相对时空观念；发现了质量与能量的联系，取消了实物和场两种物质状态的原则区别；等效原理彻底抛弃了绝对运动观念，认为一切参照系对于描写物理定律都是有效的；认为时空具有非欧几里得性质，引力只是"时空弯曲"的表现。这些崭新的基本观念，形成了相对论理论的基础。量子理论的发展提出了微观现象不连续性的量子化概念，波粒二象性概念，测不准关系，采用具有几率意义的波函数作为运动状态的描述，从而打破了经典物理学的连续性原理、精确测量原理和机械决定性原理。

可见，随着人们科学认识的发展，人们的物理观念和物理世界图景也在发生着巨大的变革；每一个重要的新的理论的产生，总要伴随着出现一个新的科学概念和定律的体系，实际上是发现了一种新的思想方法。所以，物理学发展的历史，本质上就是物理学基本观念演变的历史。

---

① A. 爱因斯坦、L. 英费尔德，《物理学的进化》，周肇威译，上海科学技术出版社，1962年，第176页。

物理学史作为一门历史科学，首先就要描述物理学发展的历史，再现出物理学中各个最重要的基本概念、基本定律和基本理论的酝酿、产生和发展的过程。但是，决不能把物理学史限制在对过去史实的单纯追述和罗列，重要的是要研究在从一个时期向另一个时期的过渡中，引起物理学观念、物理学研究方法和物理学研究领域发生变化的条件和原因，研究物理学发展的基本规律。

二、物理学史的研究方法

物理学史是物理学和多门自然科学、社会科学综合交叉的产物，它既具有自然科学的性质，又具有社会科学的性质。概括和探求物理学发展的历史和基本规律，不仅与探索物理世界运动变化规律的物理学相联系，而且也与探索人类社会的生产、经济、思想文化等发展规律的社会科学相联系。物理学史的研究，又可分为综合史、断代史、国别史、学科史、思想史、实验史等不同的分支。在研究中既可侧重于物理学认识自身发展的进程，即其内在的逻辑发展的脉络，它的研究内容、基本观念和研究方法的发展和演化；也可侧重于各个历史时期的经济形态、生产状况、政治制度、思想文化等历史条件与物理学发展的关系。这种“内史”研究与“外史”研究的区分只具有相对的意义，它们不是相互排斥的，而是相互补充、相得益彰的。

为了理清物理学发展的历史线索，揭示物理学发展的基本规律，首先必须占有和研究大量的历史资料。搜集、积累和整理物理学发展的历史资料，是进行物理学史研究的基础性工作。物理学史资料大致可分为人物、事件、历史背景三个方面，包括物理学家的原始论文、专著、手稿、演讲、书信、谈话、实验记录，物理学家的回忆录、自传和传记，物理学发展的各个重要时期的社会生产、经济、思想文化的背景资料，以及有关科学技术史的综述性研究论著等文献资料。

要善于沿着历史本身的线索前进，透彻了解物理学发展中各个重要的事件以及它们之间的联系，透彻了解各个物理学家的科学贡献、创新思想、创造过程和研究方法，透彻了解各个时期人类掌握科学知识的水平、物理学家们的知识状况和物理学见解，透彻了解社会的物质条件和思想意识形态对物理学发展的影响。必须看到发展的不同阶段之间的复杂的联系，既要认识到物理学进化运动的继承性和不间断性，又不应当把认识的发展看成一种简单的继承和积累，而应当看作是一种批判的继承，它还包含着一连串摧毁旧观念的科学革命。

对物理学发展史上重大的历史事件进行“个案”的具体分析，在物理学史研究中是非常重要的。应选择出最有代表性的事件和现象，根据整个认识运动和历史运动的各个方面的相互联系，进行综合的、整体的考察，把事物发展的各个因素、各个侧面、各个阶段置于规律性的因果联系之中，从中做出富有说服力的论断。当前国际上科学史研究的一个动向是理论性的加强，物理学史的研究也应当在史料的积累和整理的基

础上，努力转向探讨物理学发展的规律性问题。

应该注意和善于使用一切现代科学（包括现代社会科学）的研究方法和现代技术手段。除了对古代器械和实物进行技术分析，复制古代的技术发明，重复和验证物理学史上的重要实验之外，还要充分利用建立在现代科学基础上的系统方法、信息方法、统计方法和电子计算机技术。只有这样，才能跟上科学技术发展的步伐，推动物理学史研究的进展。

物理学史作为一门综合学科，不仅包含着物理学、数学和化学等自然科学的基本知识，而且包含有丰富的哲学和社会科学的基本知识，它的研究成果的取得需要借助于许多学科的知识和成就。所以，进行物理学史的学习和研究，还应该掌握科学方法论、科学学、科学史、哲学史、思想史、文化史和通史等方面的基础知识。并要善于向科学家、哲学家、历史学家、经济学家，甚至艺术家、政治家们学习，关注他们考察问题的角度和目光，并把他们研究问题的有效方法移植到物理学史的研究中。

第二节 物理学发展的基本模式

关于科学发展的型式，《物理学的进化》中写道："我们只提到科学上的开辟工作，包括寻找新的和未预见到的科学发展道路，以及能创造出一个永远变化着的宇宙图景的科学思想奇迹。最初和最基本的步骤总是带有革命性的。科学的想像力发现旧的概念太狭窄了，于是用新的概念去代替它。沿着已经开辟了的所有思想路线而继续进行的发展，在到达下一个需要去征服的领域的转折点以前，是带有进化性的。"[①] 这里提出了科学发展的两种模式：进化性的积累模式，飞跃式的革命模式。这两种模式，同样适用于物理学的发展。

物理学的发展是一个继承与突破交互作用的辩证过程，既包含有进化式的量的积累，又包含有飞跃式的质的变革。物理学发展的历史表明，物理学的发展与物理学知识量的积累有关，每一个重大突破都是以积累和继承为前提的，同时又包含着对旧观念和旧理论的批判与扬弃。物理学发展中经常发生的以比较正确的理论代替错误的理论，以比较全面的理论代替片面的理论，以更为深入的理论代替比较初级的理论，都不是对旧理论的简单的否定，而是一种积极的扬弃过程。它既要吸收和保留旧理论中合理的、正确的成分，又要突破旧概念的限制，把理论体系建立在新的观念基础上。积累的量变不会单调地走向无穷发散；变革的质变也不会割断认识发展的链条。这两种过程的辩证统一，使物理学形成一种波浪式的发展进程。

20 世纪中叶以来，国际上一些科学史家和科学哲学家，对科学进化及其运动规律作了深入的探讨，提出了一些富有创见的理论。吸取这些不同学说中所包含的新颖、合

① A. 爱因斯坦、L. 英费尔德，《物理学的进化》，周肇威译，上海科学技术出版社，1962 年，第 17 页。

理、有价值的思想，有助于我们正确地总结和掌握物理学发展的基本规律，推动物理学前进的步伐。

一、进化性的积累观模式

不少科学哲学家对科学理论的发展持通过逐渐积累而增长的观点。这种积累观强调知识通过量的方面的扩展而形成科学的进步，科学的发展没有渐进的中断，而只有进化。

逻辑经验主义者、美国科学哲学家欧内斯特·奈格尔（Ernest Nager）在1960年出版的《科学的结构》中提出了“通过归并而成长”的科学发展观。他写道：“一个相对自洽的理论为一个内涵更大的理论所吸收，或者归并到另一个内涵更大的理论中，这种现象是无可置疑的，而且是近代科学史上屡屡呈现的特征。”

奈格尔指出有两种类型的归并：一是某一得到高度确证的理论合并到另一个更全面的、具有实质上相同的概念的理论中去，例如伽利略的落体定律被吸收到牛顿力学之中，这是所谓“同质归化”；二是某一得到高度确证的理论通过演绎包容到一个缺乏表达该理论所用的一些基本概念的更为深刻的理论中去。常见的是涉及物体宏观性质的理论归化到涉及物体微观结构的理论，如经典热力学理论归化到统计力学中；虽然经典热力学中的某些重要概念如温度、熵等并没有包含在统计力学中，但在揭示分子运动统计规律的前提中，完全可以推演出经典热力学的定律。奈格尔把这称为“异质归化”。关于新旧理论的更替，奈格尔提出要具有这样两个基本条件：一是“经验支持”，即新理论不但能解释旧理论所能解释的事实，而且还能解释旧理论所不能解释的更多的事实；二是“增殖力”，即新理论的假定提示着旧理论的进一步发展，并能预言旧理论不能预见到的事实。

这样，奈格尔就提出了一个“通过归并而成长”的“中国套箱”模型：一个理论被吸收到另一个具有更大范围的理论中，就像一套不断扩展的“中国套箱”。这个理论反映了科学理论通过量的增长而进步，通过积累而发展的历史事实，能够较好地说明新旧理论之间的继承性；这是一种线性直观的科学发展模式。

20世纪40年代以来，人们借助于数量统计方法，对科学发展过程的数量特征进行研究，发现了科学发展速度日益加快的具体图景。一些从事科技情报、科学史和科学学研究的人员，对近代以来科学杂志、科学著作、论文数量、科学家人数以及科研经费增长的变化进行统计分析，发现这些从不同侧面表征科学知识数量的参数，每隔若干年就会增加一倍。在20世纪中叶，这个时间间隔大约为10～15年，即每年增长5%～7%。

有根据认为，恩格斯是最早提出科学加速发展规律的学者之一。在1844年所写的《政治经济学批判大纲》中，在讨论马尔萨斯的人口理论时他写道：“……科学发展的速度至少也是和人口增长的速度一样的；人口的增长同前一代人的人数成比例，而科

学的发展则同前一代人遗留下的知识量成比例，因此，在最普通的情况下，科学也是按几何级数发展的。”[①] 恩格斯的这一论断，可用微分方程$\frac{dY}{dt}=kY$作出数学描述。这里Y为科学成果数；t为时间；$\frac{dY}{dt}$为科学发展的“速度”；k为某门科学及其发展的具体条件的比例系数，它与国度和历史时期的情况有关。这个方程求积分可以得出称为科学运动规律的公式：$Y=Y_0e^{kt}$，e为自然对数的底，Y_0为$t=0$时的Y值。这就是科学发展的指数规律。

恩格斯关于科学加速运动规律的论述，被前述现代数量研究高度准确地加以证实。这个规律表明，科学知识是以指数规律，即多少年翻一番的速度发展的。20世纪中期，大约是10～15年翻一番；20世纪90年代大约是3～5年翻一番。物理学中90%的知识是第二次世界大战后的30年中获得的。科学加速发展规律表明科学知识的继承性与积累性特征，科学上的重大突破都是以积累为基础的，发展是以继承为前提的。科学知识的加速增长，促进了现代教育观念的改变，“专才教育”要变为“通才教育”，“知识教育”要变为“智能教育”，重要的是培养学生的认知能力和创新素质，“终生教育”成为必要。

无论是“归并成长说”或“指数规律”，都具有它的局限性，不能无限地外推。因为科学的发展除了知识的量的积累外，还会出现理论的质的飞跃，即理论体系的革命，例如哥白尼革命、现代物理学革命等。新理论决非旧理论的逻辑扩张，而是包含着基本观念的突破。近几十年来，越来越多的人已经放弃了把科学的发展仅仅看做是知识的简单积累的观点，探寻更为符合科学发展实际的模式。

二、波普的证伪主义模式

波普（Karl R. Popper，1902～1993）是英籍奥地利科学哲学家，从小喜欢哲学和音乐，后来与罗素、玻尔、薛定谔、爱因斯坦等哲学家和科学家都有交谊和学术交流，1965年被封为英国爵士，主要著作有《科学发现的逻辑》（1959）、《猜想与反驳》（1963）、《客观知识》（1973）等。

从培根（Francis Bacon，1561～1626）到逻辑经验主义，都按照归纳主义观点来说明科学知识的增长，认为科学知识来自对观察得到的经验事实的归纳，科学的发展就是通过归纳获得的科学知识的不断增加。其图式是：

观察（经验事实）→（归纳）科学定律→（检验/证实）科学理论→（演绎）解释和预见

这种科学发展观的核心是经验归纳和证实原则，即从个别经验事实的单称陈述归纳得

① 《马克思、恩格斯全集》中文版第1卷，人民出版社，1956年，第621页。

出全称陈述的定律，再经过经验的证实而上升为普遍的理论。这个学说虽然反映了科学不断进步的总趋势，但却解释不了革命性新理论的出现。

波普反对逻辑经验主义的科学发展观，坚持认为猜测与反驳（证伪）是科学知识发展的本质，提出了科学知识增长的证伪主义模式。他把这一模式表述为：

$$P_1—TT—EE—P_2\cdots$$

P_1 和 P_2 分别表示不同阶段的问题，TT 表示试探性、猜测性的理论，EE 表示消除错误。

波普认为，科学并非始于观察，而是始于提出问题，理性的创造力首先表现在科学家能否提出有价值的问题。因为，正是问题激发人们去学习，去实验，去观察。科学只能以问题开始，以进一步的问题而转折；新问题与旧问题之间的深度差和预见度差，表征着知识的增长。所以他说："不应当把科学的历史看作是理论的历史，而应当看作是问题处境以及不断地通过解决问题和改进这一处境的历史。"①

科学认识发展的第二个阶段，波普认为并不是对观察事实（经验）进行归纳得出科学命题，而是科学家为了解决问题和寻求答案，试探性地提出某些猜想和假说。因为归纳法只能告诉人们过去的知识，而不能告诉人们未来的知识；同时，科学定律是一种全称命题，它不可能从数量有限的经验（单称命题）中推导出来。所以，科学理论并不是观察的汇总，而是人们的发明——大胆提出来准备加以试探的猜想；任何科学理论实质上都是根据有限的经验材料大胆地跳跃到某种结论上，试探性地对问题进行解答。他指出，哥白尼太阳中心说、开普勒天体运动定律到牛顿力学、爱因斯坦相对论都是大胆猜想的产物。他说："科学发明近似于试探着说谎，近似于创造神话和诗的想像。"②

图式中的第三个阶段具有突出的意义。猜想和假说是否有价值，要经过经验的检验；但波普认为，检验总是在批判压力下进行的，即否定、反驳和证伪；检验不可能最终"证实"一个假说，但却可以"证伪"或否定一个假说。科学的合理性，并不在于每一个猜想和假设都合理，而在于批判选择的合理性。被证伪了的就被淘汰，同时产生出新的问题，代之以更新的假说；那些暂时没有被证伪的，就是暂时有效的理论；但任何一个理论，不管它经受了多么严格的检验，也不能说"证实为真"了，它终究还是会被未来的检验所证伪的。所以，科学理论都是几率性的真理，都必然包含着谬误，具有潜在的可证伪性。波普由此指出，科学与非科学的划界标准不是可证实性判据，而是经验证伪原则，可证伪的陈述才是科学的陈述。例如，"所有的物质遇热膨胀"，就是一个科学的陈述。

这样，波普就勾画出了这样一幅科学知识增长的图景：从问题开始，通过不断地

① 波普，《客观知识》英文版，1972 年，第 259 页。
② 《科学革命的合理性》，见《世界科学译刊》，1978 年第 8 期。

“试探—除错”、“猜测—反驳”，消除被证伪的理论，发现新的问题，提出新的理论，在“不断革命”中使认识愈来愈逼近于真理。

波普的贡献在于冲破了逻辑经验主义的静态逻辑分析的框框，从批判理性主义的证伪主义出发，对科学知识的增长做动态考察，肯定了科学认识发展的无终极性；他强调了理论思维的能动性，提出了具有批判精神的猜测、反驳、再猜测、再反驳的科学研究逻辑。但是，波普的科学发展模式贬低了经验的积累在科学理论建构中的基础作用，过分强调了经验的证伪作用，在经验、问题和理论之间没有揭示出真实的相互作用的机制；他的模式也夸大了科学理论的脆弱性，认为科学理论始终处于随时被证伪的不稳定状态，这是不符合科学史的实际的。

三、库恩的范式变革模式

美国科学史和科学哲学家库恩（Thomas S. Kuhn，1922～）认为逻辑经验主义和波普的证伪主义，对科学发展的观点都背离了科学发展的历史，前者忽视了科学发展中的革命阶段，后者则抹杀了科学发展中的常规时期。事实上，科学发展既不是渐进式的，也不是证伪式的，而是进化与革命，连续与中断交替的过程。在1962年出版的《科学革命的结构》一书中，库恩提出了“范式”（paradigm）概念和科学经历着常规时期与革命时期不同阶段的科学发展的动态模型。

库恩模型的中心概念是“范式”（又称规范、范型），范式的变更是科学革命的重要标志。范式是一个包含着科学、哲学、社会、心理等多种因素的概念。具体地说，是指“科学共同体”认识中的三种主要成分：一是概括（符号概括，文字概括）；二是模型（提供类比和启发的模型）；三是范例（具体的题解）。概括地讲，范式就是某个科学家集团的共同信念，以及在这一共同信念支配下确定的基本理论、基本观念和基本方法，并包括对该学科发展方向的共识。例如：哥白尼学说是哥白尼以来天文学派的范式，牛顿力学是经典物理学的范式。

库恩认为科学知识按照下述各阶段发展：“前科学—常规科学—危机—科学革命—新的常规科学……”

所谓前科学阶段，即这门学科的基本原则还处于尚未定向、众说不一的混乱时期，各种假说之间存在着很大分歧。随着争论的深入和研究活动的进展，某一种理论逐渐得到科学界的支持而占据优势，形成一套由假说、概念、定律、模型、方法和哲学观点所构成的科学范式，作为进行该学科研究活动的基础和手段。范式的形成标志着一门学科的定向和成熟，于是便进入常规科学阶段，在常规科学时期，范式指导着科学共同体成员的研究方向。随着常规研究的发展，会遇到某些“反常”现象，使原有的范式遇到了无法解释的困难，迫使常规科学家们对旧范式进行补充和修改。但是，出现反常现象的频率越来越高，对旧范式的偏离程度越来越大，为适应这种情况对旧范

式进行修补的规模和深度也越来越大，结果使旧范式日益复杂化，变得矛盾重重，混乱不堪。于是，“危机”出现了，旧范式迅速失去了控制能力，传统的常规研究随之结束；人们愈来愈多地去寻找克服危机的出路，科学活动进入非常研究时期，科学革命发生了。一些受旧范式束缚较小的科学家，毅然抛弃旧范式而创立新学说，使新、旧范式展开了激烈的斗争；新范式从各个战线驱赶着旧范式，并由于新的科学共同体的“皈依”逐渐取得了统治地位，从而开始了新的常规研究时期。同样，新的常规研究也会遇到反常而走向危机，爆发新的革命，产生出更新的科学范式，科学的发展，就体现在这种范式的变革更替之中。

库恩认为，范式本身只是一种信念，因而其形成和变更的原因不能从认识论的理性中去寻找，而只能从社会学和心理学中去寻找。库恩强调，新旧范式之间不具有继承关系，不存在逻辑联系，它们之间既不相容也不可比，因为两种范式之间没有共同的语言和意义标准。旧范式向新范式的转换，没有什么规则可言，只是不同信念的转变，也就是格式塔转换；这种转换只能是非理性的，是信仰、心理、社会思潮等因素影响的结果。所以库恩把科学革命比喻为政治革命，认为“没有比有关团体的赞成更高的标准了”。他引用普朗克的话说：“一项新的科学真理并不是靠使它的反对者信服，并得到他们的承认而获得胜利的，而是由于它的反对者最后都死掉了，成长起来的新一代一开始就接受了这一真理。”

库恩的模式把科学发展的进化与革命两种状态结合起来，因而是更合乎科学发展的实际的科学发展观。库恩由此指出，一个成功的科学家必须同时具有维持传统和反对偶像崇拜这两方面的性格，在科学研究的继承和突破之间、收敛式思维和发散式思维之间保持必要的张力。但是，库恩的模式所说的科学革命是突变性的，过分夸大了新旧范式之间的间断性；他的模式还片面强调了新旧范式的不可比性，因而无法说明不同理论的竞争和科学的进步。同时由于他把科学共同体的信仰作为选择理论的标准，所以有相对主义和非理性主义的倾向，这是不可取的。

四、拉卡托斯的科学研究纲领模式

拉卡托斯（Imre Lakatos，1922～1974）是英籍匈牙利科学哲学家。他原来是波普的同事和学生，后来又受到库恩思想的影响，在波普和库恩学说的基础上，提出了“科学研究纲领方法论”，用以改进波普“朴素的证伪主义”。

拉卡托斯认为，科学理论既不像波普所说的那样脆弱，也不像库恩所设想的那样新旧范式之间无连续性。他认为无论是波普的“反驳”，还是库恩的“危机”，都不足以淘汰一个理论；科学理论是有韧性的，它会通过不断修正和补充辅助性假设来消化“反常”以保护自己的基本部分。

拉卡托斯强调，科学最基本的单位不是各自孤立的理论，而是具有严密内在结构

的理论系列，只有理论系列而非一个孤立的理论才能被评价为科学的或伪科学的。理论系列构成了科学研究纲领，如牛顿的理论、热力学理论、相对论理论等。

科学研究纲领是一个有结构层次的体系，它由硬核、保护带和研究方法三部分组成。硬核是理论系列的核心部分，由最基本的理论构成，不容反驳或改变，一旦遭到反驳，整个研究纲领就被否定。如牛顿三定律和万有引力定律，就是牛顿力学的硬核。保护带是由一系列辅助性假设和初始条件构成的，其职责是保护硬核不受到经验事实的反驳。当反常出现时，就用修改、调整或增加辅助性假设的方法，以使硬核免受侵犯。如牛顿理论中行星运动的偏离，就用“摄动作用”开脱。研究方法包括反面启示法和正面启示法两部分，是为保护硬核而作出的方法论的规定。反面启示法本质上是一种禁令，告诉我们要避免哪些研究途径，并禁止把经验反驳的矛头指向硬核；正面启示法是一种积极的鼓励性的规定，它引导科学家们按照既定的方向进行研究，积极地发展科学研究纲领。

拉卡托斯承认任何研究纲领都不会是永恒的，它也有进化与退化的不同阶段。一个科学研究纲领经过调整其辅助条件后，如果对新的经验事实具有更大的预见力，并能对反常事实做出解释，它就是一个进化的研究纲领。而当某种研究纲领丧失了预见力，只能停留在对过去事实的解释上，不能对新的反常作出解释时，它便进入消极被动的退化阶段，这时就有必要以进化的研究纲领取代退化的研究纲领，从而形成科学的进步。

在拉卡托斯的学说中，蕴含着这样的一个科学发展模式：“科学研究纲领的进化阶段—科学研究纲领的退化阶段—新的进化的研究纲领证伪并取代退化的研究纲领—新的研究纲领的进化阶段……”

拉卡托斯的学说由于强调了理论系列是个有内在结构的整体，经验反驳不会轻易淘汰一个理论，这比较符合科学理论具有坚韧性的事实。他认为科学研究纲领有一个发生发展的过程，也注意到研究纲领之间的连续性与继承性，这就较好地反映了科学发展中的进化与革命的更替。但是，拉卡托斯对理论的评价标准是超历史的，并由于过分强调评价是一个过程，要给理论一个喘息的机会，一个已被淘汰的旧纲领可能在一定条件下获得新生，因而他的评价标准就过于宽松和软弱，简直同没有评价标准差不多。特别是他的方法论主张不惜任何代价地保护硬核免受批判，这就抑制了科学的批判精神，阻碍了科学理论的发展。

第三节　物理学史与物理教学

一、增强物理教学的历史感

教育要面向未来，就要使我们培养的学生适应未来社会发展的需要，这就必须重视培养真正能在受教育者身上长期起作用的素质。学校教育的目标一是要培养学生的

认知能力，即在学习、掌握知识的同时获得自主学习和拓展知识的能力；二是要教学生学会如何思维，提高创造力；三是要教学生如何做人，即培养正确的价值观和人生观，有更高的思想道德水平和文化素养。概括起来讲，包括了人文素质、科学素质、创造素质和思想品德素质等各方面的要求。

在实现物理教学的素质教育目标中，物理学史有着重要的作用。物理学史由于其学科内容的特点以及它所具有的丰富的教育因素，在素质教育中可以发挥独特的功能。

教育过程是一个“把凝固的文化激活”的过程；教师就是要通过教育过程揭示文化的精神和智慧，把文化的传授和学习转化成历史上文化创造者与今天文化学习者之间的对话。在以知识的灌输为主要目的的传统教学工作中，“文化的精神和智慧”被粗暴地阉割了。教师按照现代的认识编排出介绍知识内容的简捷方式和程序，从几个基本原理出发，运用数学演绎手段，逻辑地推演出各个具体定理和结论，以“纯粹的”、“修正的”形式展现出人类科学认识的“终极”成果；真实的认识发展过程中的历史曲折被抹平了，科学探索者的观测、困惑、沉思、试探和创新的智慧之光被掩盖了，历史意识被干干净净地滤掉了。这种讲授方法的结果，是给学生造成科学理论“直线发展”的错觉。我国物理学前辈钱三强先生指出：“科学经历的是一条非常曲折、非常艰难的道路。然而，我们的教师在对学生进行教育的时候往往是应用经过几次消化了的材料来讲授，或者经过抽象的理论分析加以表述，把已有的知识系统归纳，形成简明扼要的理论体系，这当然是必要的。但是这样的教学方法，往往会使学生对科学概念的产生和发展引起误解，以为什么结论都可用数学推导出来，失去了对观察和实验的兴趣。这样的结果使学生们不了解科学是怎样来的……今天我们科学界有一个弱点，这就是思想不很活泼，这也许跟大家过去受的教育有一定关系……”[1]

随着物理学理论越来越抽象，数学工具越来越高深和逻辑方法越来越广泛的使用，学生们虽然对物理学的成就越来越敬佩，但对物理学本身却越来越觉得深奥、玄秘和枯燥，把物理学家看做是智慧超人的偶像和高不可攀的天才。物理学家和物理教师们对物理学这一富有成果、博大精深的科学事业的热爱和兴奋感情，也很难有效地传达给青年学生。这种情况，都与物理教科书、教学过程和教师的素养中缺少历史知识和历史观点有直接关系。不少有识之士都指出，当前我们的科学教育中的一个重要缺陷，就是缺乏历史感和缺少关于这座科学大厦建造过程的重大历史知识。

概括地讲，教育的目标包括认知和情感两个范围。情感方面包括兴趣、欣赏、价值观和情绪意志的培养，这些非智力因素对教育同样是非常重要的。学习效果的好坏，与学习者的态度、情感、责任心和意志力是密切相关的。这就要求教师必须把情感教育渗透到物理教学中去。

爱因斯坦在谈到学校的管理和教师的态度对塑造学生的心理基础的影响时说：“我

① 郭奕玲、沈慧君，《物理学史》序，清华大学出版社，1993年。

以为对于学校来说，最坏的事是，主要靠恐吓、暴力和人为的权威这些办法来进行工作。这种做法摧残学生的健康和感情、诚实和自信；它制造出来的是顺从的人”；“在学校里和在生活中，工作的最重要动机是工作中的乐趣，是工作获得结果的乐趣，以及对这个结果的社会价值的认识。启发并且加强青年人的这些心理力量，我看这该是学校的最重要任务。只有这样的心理基础才能导致一种愉快的愿望，去追求人的最高财产——知识和艺术技能。”[1]

传统的灌输式的教学模式，很难使学生从物理学这一人类智力的杰作中受到情感的激励，物理课常常让学生厌倦，不能发挥他们的主动精神和想像力。

解决的办法之一，是充分利用物理学史料，以著名物理学家的成功与失败、喜悦与懊丧，以重大物理学突破中的曲折与反复、分歧与争论、停滞与跃进，以有血有肉的历史描述，用一种具体生动的科学发现的历史参与感去感染学生，启发起他们对物理学事业的恋情与乐趣。

剖析每一位物理大师的探索动机和科学思想，就会发现他们对科学的热爱与执著，都是与某种科学信念联系在一起的。科学家们之所以能够克服一切艰难险阻，坚韧不拔地去顽强探索，首先建立在他们对大自然存在着和谐、秩序和规律的坚定信念上，出于他们对自然规律的简单性和普适性的洞察和欣赏。支配奥斯特和法拉第提出他们关于电磁联系的伟大发现的思想，是他们对自然力的统一性的信仰与追求。普朗克之所以被吸引到黑体辐射的研究上，是因为他被基尔霍夫函数的普适性迷住了。爱因斯坦常常说自己有很深的“宗教感情”。他说：“相信世界在本质上是有秩序的和可认识的这一信念，是一切科学工作的基础。这种信念是建筑在宗教感情上的。我的宗教感情就是对我们的软弱的理性所能达到的不大一部分实在中占优势的那种秩序怀着尊敬的赞赏心情。”[2] 他说这种感情是科学研究的最强有力、最高尚的动机。他热情颂扬了开普勒和牛顿花费了多年寂寞的劳动寻求天体力学的原理，说：“只有献身于同样目的的人，才能深切地体会到究竟是什么在鼓舞着这些人，并且给他们以力量，使他们不顾无尽的挫折而坚定不移地忠诚于他们的志向。给人以这种力量的，就是宇宙宗教感情”。[3]

这些史料和论述，都会对学生产生心灵的深刻震撼，建立与物理学理论的深挚的情结，激发他们学习物理学和探求自然奥秘的热情。

传统的教学模式决定了教科书上所写的只是科学家们从成功走向成功的轨迹以及他们的探索所获得的有效成果。但是实际上，科学的道路是不平坦的，即使对卓有建树的科学大师们来说，失败、失误、悔恨和遗憾也会远远超过成功、幸运、机遇和喜

---

1 《爱因斯坦文集》，第三卷，商务印书馆，1983年，第144、145页。
2 《爱因斯坦文集》，第一卷，商务印书馆，1976年，第234页。
3 《爱因斯坦文集》，第一卷，商务印书馆，1976年，第282页。

悦的。有时候，虽然实际上已经取得了成功，获得了重要的发现，往往也会由于一些人为的和社会的原因而发生“科学蒙难”，使发现者受到埋没、压制、打击和诬陷。科学家的成功之路是艰辛曲折的，要准备付出比常人更多的劳动，忍受更大的艰辛，甚至要花费毕生的精力。在电磁学大师法拉第的实验日记上，记满了“没有效果”、“没有反应”、“不行”、“不成功”等结果，但他却矢志不渝地坚持实验探索。开尔文勋爵晚年在回忆他的科学生涯时说：“我过去五十年里所极力追求的科学进展可以用‘失败’这个词来标志……当然在失败中必然有些悲伤，但在科学的追求中，本身包含必要的努力，带来很多愉快的斗争，这就使科学家避免了苦闷，而且或许还会使他在日常工作中相当快乐。”这就是科学先辈们的苦乐观，在失败的包围中，追求、努力、斗争驱开了苦闷，带来了欢乐，这是科学斗士们一种悲壮的欢乐。了解科学大师们真实的探索足迹，更能激发学生投身科学探索的事业心，并对将要步入的人生道路的崎岖险阻有思想准备。把科学发现的真实历程引入物理教学，看来是不容再被忽视了。

学生认知能力的培养，主要是通过系统的教学过程来进行的。现代教育理论指出，学生的学习过程是在教师的指导下由学生的主体主动完成的特殊的认识过程，是学生通过自己的思考、试探、分析、综合、创造和再发现的过程。同胚胎的个体发育过程在很大程度上重复了生物物种的系统进化历史一样，学生的这种特殊的个体认识发展过程同人类整体认识的发展历史也是吻合的，遵从同样的发展规律。教学中的难点，常常就是科学发展中难以攻克的科学难题；教学中的重点，也正是科学发展史上关键性的突破和物理大师们伟大贡献的精华之点。学校教育效果的好坏，最终决定于学生这种特殊认识过程完成的流畅性与创造性程度，也就是表现在能不能在最短的时间内从整体上经历一下人类科学认识发展的主要阶段，从这种信息密度极高的经历中获得最大限度的信息量，并得到科学探索能力的培养。

物理学史集中地体现了人类探索和逐步认识物理世界的现象、特性、规律和本质的历程。它会告诉学生，任何一个具体的物理知识和理论体系，都是汇集了许多人的研究成果而建立起来的，常常需要几十年乃至上百年的努力才能迈出有意义的几步；它包含着认识论和方法论的因素，包含着深刻的物理思想和观念，体现着认识过程中理论与实践、继承与突破、理性与非理性、逻辑与非逻辑的辩证统一。认识的历史发展，比起教科书上知识编排的逻辑体系，有着更多的矛盾，更为丰富多彩，复杂曲折，因而也包含了丰富的“教书育人”的教育因素。物理教学的基本框架虽然是一个逻辑体系，但它的总体结构必然也要反映出物理学认识发展的历史过程，或者说它本质上也应该是历史的，科学的逻辑应是科学历史的缩影，历史和逻辑的统一是指导物理教学活动的一条重要原则。在物理教学中，应当把知识的逻辑展开与认识的历史发展有机地结合起来，真正做到把文化的传授和学习转化成历史上文化创造者与今天文化学习者之间的对话，让学生以物理学家认识物理世界的本来面目去认识物理世界，增强物理教学的历史感。

历史科学的特性和作用是，它以具体、生动、可靠的历史事实来说话，通过再现历史发展的具体过程，使人们从中获得某些启示，以增长智慧，提高对现实问题的认识能力。物理学史就是通过历史上成功的优秀物理学家面对物理问题是如何思考和解决的，其中哪些工作得到成功，哪些遭到挫折或修正，从而达到“益人神智”的作用。可以说，在物理教学中讲物理学理论，会给学生以知识；讲物理学史，会给学生以智慧，二者是相互促进的。物理教师不仅要善于运用逻辑的手段去讲解物理学的基本概念、定律和理论，还要善于对物理知识作出历史的叙述，把物理知识的获得作为一种经验，作为一个激动人心的知识奇遇来讲述，把着眼点放在科学中的发现、推理及概念的形成的认识过程上；要善于生动地描绘人类探索物理世界奥秘的艰辛历程，以其中的欢乐、困惑、惊奇和哲理去感染学生，确立他们物理学的历史意识，在给学生物理知识的同时，也使他们受到全面素质的培养。

二、物理学史与人文素质的培养

人类教育在经历了古典人文教育、近代科学教育之后，正在进入一个更加成熟的人文教育与科学教育并重的时代。

人文学科再度受到重视，反映了现代人类从物质追求到重视精神追求的时代趋势，反映了教育从人文化到科学化再走上科学化与人文化兼容互补的历史发展轨迹。美国物理学家和物理教育家拉比（I. I. Rabi）认为：“只有把科学和人文科学融为一体，我们才能期望达到与我们的时代和我们这一代人相称的智慧的顶点。”①

科学知识和人文知识，都是人类创造的文化遗产，都应该加以继承。人文学科的主要功能是“教化”，即绘塑推崇一种正确的价值和意义体系，从而为社会提供一种正确的人文导向；人文教育的目的是提高学生的文化品位、格调和情致。它要设立一种理想人格的目标和典范，引导人们去思考人生的目的、价值、意义，去完善人格，确立正确的人生观和价值观，追求人的完美化，为学生未来的发展奠定深厚的文化根基。

物理学史本质上是一门历史科学，它以人类与物理世界对话的历史为研究对象。所以它必然融合了与物理学有关的自然科学以及与人类思想、社会历史发展有关的文史哲的多学科知识，是一门自然科学、人文科学、社会科学、思维科学紧密交叉渗透的综合学科。这种特性决定了物理学史在实施科学教育与人文教育结合中的特殊作用。

人类在这个世界上主要是通过认识自然、改造自然和利用自然而求得自身的生存和发展的。所以，包括物理学史在内的科学技术史——人类认识自然、改造自然和利用自然的历史，才是人类历史的核心和真谛。科学技术史是人类文化和文明发展的一个重要方面的记录，是人类文化遗产的一个重要组成部分。它使人们对过去感到自豪，

---

① R. L. 韦伯，《诺贝尔物理学奖获得者》，上海翻译出版公司，1985 年，第 133 页。

对现在怀有责任感，对未来充满信心。因而在科学教育中，完全有必要把科学认识发展的脉络、动因、历史背景和发展规律揭示出来，阐明重要的科学概念、定律和理论的产生和发展过程，介绍科学观念和研究方法的演化和变革，论述重大科学突破对人类认识和社会发展的巨大影响。既说明科学是人类创造的，是人类创造力的最高级的杰出产品，是人和自然永不停止的对话过程；又说明“科学是一种在历史上起推动作用的革命的力量”，“是最高意义上的革命力量”，“是第一生产力”。人类文明史既是生产方式发展的历史，也是一种科学活动形态取代另一种科学活动形态的科学进步的历史。

在物理教学中，要想使学生正确认识物理学的进步对人类社会发展的重大作用，从而激发起对物理学的兴奋感情，确立顽强学习刻苦钻研物理知识的决心，一个有效的方法就是要使学生对物理学发展的历史有所了解，对物理学上的重大突破在人类认识史上所产生的震撼人心的冲击以及在人类社会发展史上所引起的重大技术变革有所了解。特别是近代以来历次物理学重大进展通过技术革命为中介转化为直接生产力，从而推动了社会经济发展，并最终引发社会革命，推动人类社会从农业社会到工业社会，从蒸汽时代进入电力时代、电子和原子能时代以至现今的信息时代的生动历史，更会使学生深刻了解科学技术的巨大社会功能。

但从另一方面来看，科学技术的进步也带来了一些人们当初不曾料到的负面效应，如环境污染、生态失调、自然资源过度消耗等；原子能的实际应用，最初却是以毁灭性的杀人武器的形式出现的，表明了科学技术的“双刃剑效应”。对这些史实的了解，必将增强学生的社会责任感，确立关于科学的正确的社会评价，使他们“学会关怀”，关怀社会，关怀全球的发展，关怀人类的命运，关怀人类社会的持续发展问题。

物理学的发展与哲学的关系是非常紧密的。追根溯源，物理学的发展一开始就是与哲学结合在一起的。亚里士多德的《物理学》，就是一部自然哲学的著作。古希腊、罗马的毕达哥拉斯、德谟克利特、柏拉图、伊璧鸠鲁、卢克莱修，中国古代的老子、庄子、墨子，近代西方的培根、洛克、笛卡儿、康德、黑格尔等众多先哲，都以对自然哲学（科学）问题的深入思考和探讨，为他们的哲学体系浇铸上时代和超时代的特征，而他们的思想体系在当时和后世的科学思想中都留下了不灭的印记。20 世纪以来，庞加莱、普朗克、罗素、爱因斯坦、怀特海、玻尔、狄拉克、普里戈金、霍金等思想大师们，结合现代物理学的发展从哲学的高度上所阐明的广泛综合的思想，对物理学和全部现代自然科学的探讨和发展都具有深刻的影响。现代物理学的发展，提出了许多尖锐的哲学问题，进一步推动了自然科学与哲学的结合。它们之间的界限越来越消失和模糊了。正如爱因斯坦所说：“如果把哲学理解为在最普通和最广泛的形式中对知识的追求，那么，显然，哲学就可以被认为是全部科学研究之母。可是，科学的各个领域对那些研究哲学的学者们也发生强烈的影响，此外，还强烈地影响着每一代的哲学

思想。”[1] 物理学史对物理学理论的本质、物理世界图景的变革以及对物理学大师们科学思想的揭示，必能提高学生的哲学素养，特别是加深理解各种哲学思想的科学基础和科学思想的内涵。

还应该指出的是，科学作为人类文化的有机组成部分，它的产生、发展与人类社会的整个文化背景都有着不可分割的联系，科学思想与文学艺术、宗教神学、道德伦理等人类文化是紧密相关的。中国古代的一些物理学和自然科学知识，就往往是在古人的神话传说、诗词歌赋、经典史籍、笔记杂说、戏曲传奇、小说野史中记载下来的。把这些科学史的内容引入教学，也会使学生受到浓烈的文化熏陶。

在科学教育中，利用科学史料进行科学美学的教育，是提高学生科学鉴赏力的一个有效手段。

在西方古代，毕达哥拉斯学派把对自然奥秘的探索与对自然美的追求统一起来，把“数的和谐”作为科学解释的最高原则。自那时以来，寻求自然界的和谐成为推动天文学发展的基本路标。17 世纪以后，近代自然科学中兴起的经验主义思潮，曾一度造成了科学与美学的某种分离。20 世纪以来，以相对论和量子力学为代表的现代物理学革命的兴起却在更大的深度上推动了科学美学的发展。众多的物理学家从各自的科学创造实践中，感受到科学理论的审美价值；在科学美学原则的指导下，他们做出了杰出的工作。美学因素不仅渗透到科学创造的原动力之中，而且也渗透到科学理论体系的构建与表述中，美学原则潜在地影响着科学成果的内容与形式。人们甚至把“美学价值”的大小看做是评价一个科学理论成就大小的重要标准。

著名物理学家费因曼（R. P. Feynman，1918～1988）指出：“干物理得有鉴赏力。”所谓鉴赏力，就是那种善于从“真、善、美”的结合上敏锐抓住问题的本质去创立理论的能力，这是一种高超的审美能力。狄拉克认为：“让方程式优美比让方程式符合事实更重要…… 在我看来，假如一个人在进行研究工作时着眼于让他的方程式优美，假如他有正常的洞察力，那么他就肯定会获得进步。”[2]费因曼正是凭着这种审美鉴赏力去审视和欣赏牛顿的万有引力定律、麦克斯韦的电磁场方程组和爱因斯坦相对论所体现的那种“完美的结构”，感受对称性、守恒定律、最小作用原理的“普遍特性”；又通过自身的审美直觉去洞察自然界内在的美，创造出了体现过去与未来之间的对称性的守恒的“费因曼图”，并进而提出了一种新的重整化理论，巧妙地避开了困扰量子场论计算中的发散困难，为量子场论确立了一种标准的处理程序。

“美是真理的光辉”。这句拉丁格言深刻地反映了美与真之间的内在统一性。科学理论的真理性与其形式的简单、对称、和谐是互为表里的。美学的直觉和高超的审美鉴赏力引导着科学家们去叩开科学真理的大门。

---

1 《爱因斯坦文集》，第一卷，商务印书馆，1976 年，第 519 页。

2 转引自陈熙谋等，物理通报，1996（12）：4。

在科学教育中，应当借助于科学大师们这种崇尚理性，崇尚统一，崇尚秩序、规律与和谐，崇尚科学美的思想与创造实践，引导学生去认识自然界的质朴的统一，认识科学理论的简单、对称、统一、和谐与普适性的内在的美；从而培养起他们的科学鉴赏力，并以追求科学美的思想充实自己，塑造自己，丰富自己的精神世界，完善人格的塑造，实现自身的美化，培育深邃的科学洞察力，开发科学潜能，在未来的科学技术工作中充分发挥自己的才能。

总之，人类认识和社会实践的发展都已表明，自然科学（包括物理学）与人文科学不是走向两极化，而是日益交叉渗透。这一不可逆转的历史走向，决定了科学史（包括物理学史）在“科学-人文”教育中的重要作用。在现代教育中，应该充分发掘和发挥物理学史的这种人文教育功能。

三、物理学史与科学素质培养

在封闭式的科学教育模式中，“科学素质”仅仅被理解为“科学知识”本身，甚至只要求学生能具体掌握住有关学科的理论事实、定义、结论、公式、计算方法就行了。但是实际上，“科学素质”虽然离不开“科学知识”，却并不等同于知识，它是更深层次的、基础性的东西，是对知识本质的理解、内化和激活。科学教育不仅要让学生掌握知识，而且要掌握运用和更新知识的科学方法，要具有尊重科学、热爱科学、按科学规律办事，并不断探索、勇于创新的科学意识、科学态度和科学精神。所以，广义的“科学素质”应该包括科学知识、科学思想、科学态度、科学精神和科学方法。物理学史在科学素质的培养上是大有作为的。

科学知识是不断继承发展而得以扩充深化的。现有的物理学知识都是人类从与物理世界的长期对话中，经过无数的曲折与反复，抽象、概括而获得的。但物理教科书上那种公理化、逻辑化的讲授方式，却掩盖了重要概念、定律和理论的发展过程。正如爱因斯坦所说，科学结论“几乎总是以完成的形式出现在读者面前。读者体验不到探索和发现的喜悦，感觉不到思想形成的生动过程，也很难达到清楚地理解全部情况。”①

历史是现状的由来，现在的知识体系都是历史发展的产物；历史并不仅仅是过去的东西，它必然也存在于现实之中，它总会以明显的或隐蔽的形式给后来的知识打上“印记”。这决定了科学教育中的“历史主义”原则。对于物理学中的各个基本概念、定律和理论，只有了解了它的产生、形成和发展的过程，即具体了解到它们是根据什么科学问题和实际原型被提出来的，又由于哪些矛盾和发现而得到修正和发展，经历了哪些重要发展阶段，为什么呈现出目前的状态，才能真正懂得它们的本质，理解它们

① 《爱因斯坦文集》，第一卷，商务印书馆，1976年，第79页。

丰富的内涵。对历史情况了解得越具体，对现状的理解也越深刻。我们所需要的与其说是赤裸裸的结果，不如说是研究；离开了引向这个结果的发展过程来把握结果，那就等于没有结果。对现有知识的历史考察，可以把发现的本质放在更真实的背景下，从而使学生得到超出定律和公式的许多启示。

比如物理学中非常重要的两个概念“动量”和“动能”，它们都与质量和速度这两个物理量有关，都能对机械运动进行量度，各自都有相关的定理和守恒定律。如果只从定义和罗列二者的适用条件对它们进行区分，学生还是难以理解它们的本质区别，在解题时还会混淆不清。如果能对物理学史上长达二百来年的关于“运动的量度”的争论做出介绍，并说明恩格斯从运动转化的高度上对两种量度的本质区别所做的剖析，必然会帮助学生深刻理解这两个概念及有关原理的实质，提高这部分内容教学的科学性和思想性。

再如作为分析力学公理基础的“最小作用量原理”，是在“经济”和“最小”观念的基础上逐渐发展起来的，有一个漫长的历史思考过程。一个时期内，这个原理甚至还被看做是一个神学原则，是上帝“造物之巧”的高超智慧的体现。只是在拉格朗日之后，这个原理才被看做是一个物理学原理。这段历史可以告诉学生，科学探索的过程并非总是由观察实验所归纳出的定律作为建立理论的基础的，它常常还会把一些不可直接证明的假设作为自己的公理基础。这种“公理”更像一种“直觉”和“信仰”，甚至还带有某些“拟人化”的色彩。明确地指出这一点，不仅会使学生加深对这一原理实质的理解，而且还会给学生以科学创造的启示。

光记住一些物理概念、数据、定律和公式，并不表示真正理解了物理学。因为科学的主体并不是它所获得的知识的多寡与深度，更重要的在于“探索”。对物理学知识的实质的全面理解，包含着对物理学理论发展的动态性以及对物理理论的相对真理性的认识。

现行教科书上关于物理理论的严密的逻辑体系，很容易使学生对这些知识的来源和理论体系的形成感到深奥莫测，也很容易形成对这些知识的僵化的绝对化的理解。实际上科学不是静止不动的，认识始终是一个生动的历史过程；任何具体知识都只是科学认识长河中的特定事物，都不具有绝对性和永存性。作为认识历史的选择结果的科学理论，都包含着对与错、真与假、优与劣的双重因素，包含着大量未知因素，不可能完美无缺。比如，人们对原子结构的认识，就经历了发现电子--汤姆孙模型—α散射实验—卢瑟福有核模型—原子光谱的实验规律—玻尔量子化原子模型—索末菲椭圆轨道模型，直到量子力学建立之后，人们才对原子结构和原子内电子的运动有了基本正确的了解；但至今对于高激发态、高电离态的原子结构以及粒子与原子碰撞时的行为，仍然存在很多不清楚的问题。

在物理教学中，应该结合物理学史讲清理论的由来和发展，讲述它的成功，讲它解决了哪些问题；但也要讲清它的缺陷和局限，讲清它存在的矛盾和发展前景。要让

学生理解任何物理知识的获得都是一个动态的、历史的过程，是“继承—发展—突破”这一过程反复循环的结果，不断经历着“问题—试探—除错”的多次选择。引力理论的发展、物质结构的探索、光的辩证性质的揭示、时空观念的变革、宇宙演化认识的深化等，都是一个充满矛盾的不断更新、不断提高的认识过程。教学中必要的历史回顾，会使学生在很短的时间内“亲身经历”一下各部分物理知识的“系统发育过程”，不仅会消除对这些知识来源的神秘感，而且还会从知识的更替演变中认识它的条件性、局限性，认识科学理论的相对真理性。科学认识是一个永无终点的过程，每一个领域都会不断涌现出激动人心的新发现。物理学永远是一个充满生机和活力的学科，它永远不会老化和僵死，永远不会停止探索的步伐。

最后还应该指出，在物理教学中引用物理史料，会使学生经受到物理学基本观念变革的洗礼，深刻领会物理学思想的真谛。

前面已经讲过，物理学理论的历史发展，最集中、最本质地表现在物理学基本观念和相应的物理世界图景的演变上。这种演变又最鲜明地反映着物理学思想的根本变革。近代以来，物理学的基本观念经历了牛顿力学的“原子论＋绝对时空观＋超距中心作用＋机械决定论”，到经典电磁场理论的“非中心力＋媒递作用观＋场”，到相对论的“相对时空＋质能联系＋等效原理＋时空弯曲”，到量子力学的“量子态＋不确定性＋几率决定性”的深刻变革。以系统论、量子理论、非线性物理和非平衡态物理为整体的最新进展，又形成了“整体性（全域相关性）＋动态性＋复杂性＋相干性（自组织性）”的全新观念。

不同的物理学基本观念，描绘出不同的物理世界图景。所以每一次物理学理论的变革，都使人面对一个崭新的物理世界。物理学的发展总是以物理观念、物理思想的突破为先导和基底的。正是由于伽利略否定了亚里士多德关于自然运动和强迫运动的思想，得出了惯性原理，把力学的研究引上正确的途径。中心力的传统观念，使奥斯特寻找电流对磁针作用的实验屡遭失败，当他从通电导线发热乃至发光的现象受到启示，考虑电流对磁针的作用可能是一种“横向力”时，他才获得了成功，并第一次发现了非中心力，萌生了场的初步观念。马赫对牛顿绝对时空观的批判，深刻地影响了爱因斯坦，终于迈出了创立狭义相对论的步伐。

通过对物理学革命历史的阐述，将会使学生深刻理解物理学理论范式的变革与物理学基本观念的转变的一致性；了解物理学中的复杂的数学公式和定义等，都不过是基本观念的表达形式和演绎工具，基本观念才是先导的、本质的东西。所以，每当学习一个新的理论时，必须改变自己的思想观念和思维方法。

物理学基本观念对于理论范式的这种本质的、决定的地位，鲜明地表征出物理学理论的人类学特征与主体性内涵，揭示出物理理论所研究的“物理实在”并非就是自然物本身，而只是人对自然的提问方式的一种显现，是认识主体与自然客体相互对话、相互作用的产物。海森伯指出：“在科学方面我们不是在同自然本身而是在同自然科学

打交道——这也就是说，在同被人思考和描述的自然界打交道。这并不意味着主观因素引进科学中去，因为无论如何不能说自然界中的事件是依赖于我们对它们的观察的；这只是说，科学处于人和自然之间，并且我们不能拒绝应用直观给予人或人所天生就有的那些概念。"[1]

所以，科学既是一种人类的知识体系，更是人类认识世界的一种方式和探索活动，是人与自然之间的一种交流、试探、协调和撮合，是客观实在与人类智力所创造的各种概念体系之间的俯就和套合。所以，科学是一种不断获取知识并使其一切知识成果不断经受检验、证伪而获得发展的批判的、非教条的事业，永远不会达到无事可做的认识的终点。认识了这一点，更有必要承认任何科学理论都只是对客观实在的一种局限的、近似的摹写。

四、物理学史与创造素质的培养

科学的本质在于探索，科学的生命在于创新。面对科学技术加速发展、社会生活剧烈变革、竞争日益激烈的形势，创造性是科技人才的最重要的基本素质之一。现代科学教育，必须重视培养学生的创新意识和创新能力。物理学史在培养学生的创造素质方面，具有独特的功能。

爱因斯坦在《论教育》中说："发展独立思考和独立判断的一般能力，应当始终放在首位，而不应当把获得专业知识放在首位。如果一个人掌握了他的学科的基础理论，并且学会了独立地思考和工作，他必定会找到他自己的道路，而且比起那种主要以获得细节知识为其培训内容的人来，他一定会更好地适应进步和变化。"[2]

独立思考和独立判断的一般能力，首先表现在怀疑和批判的精神。科学史上大量事例表明，不囿于传统理论和观念，不迷信权威和书本，是科学创造的思想前提。在科学本身的矛盾已经显现出来时，谁能首先同束缚科学发展的传统观念决裂，勇于提出新思想、新见解，谁就可能抢占到科学发展的前沿阵地，做出突破性的发现。众所周知，1956 年，当精确的实验结果把"τ-θ 疑难"尖锐地摆到物理学家们面前时，正是李政道和杨振宁敏锐地审察了从未被人怀疑的宇称守恒定律的适用范围，大胆提出了弱相互作用中宇称不守恒的假说，从而导致了物理学理论的一个突破性进展。批判的头脑，怀疑的精神，是打开未知科学大门的钥匙。

怀疑精神的具体表现，就是敢于和善于提出科学问题。著名物理学家韦斯科夫（V. F. Weisskopf，1908～ ）说："科学不是死记硬背的知识、公式、名词。科学是好奇，是不断发现事物和不断询问'为什么？为什么它是这样的？'科学的目的是发问，

---

[1] 海森堡，《严密自然科学基础近年来的变化》，上海译文出版社，1978 年，第 180 页。

[2] 《爱因斯坦文集》，第三卷，商务印书馆，1983 年，第 147 页。

问如何和问为什么，它主要是询问的过程，而不是知识的获得（很可惜多数人认为是后者而且是这样教的）。"[1]

物理学史上几乎每一个重大发现都表明，创造性思维活动起始于对困难或问题的认识，是围绕着解决问题展开的；而善于提出问题，总是从对事物、现象或已有的理论的怀疑开始的。在人类的认识史上，提出一个新异而又深刻的问题，必然会导致一个重大突破的实现，标志着科学的真正进步。的确，为了正确地提出一个有价值的物理学问题，需要审察已有的科学成果的含义及其根据，洞察困难的症结和突破的方向，需要有向传统观念挑战的勇气，还包含着物理思想和研究方法上的变革。

在我们已往的教学中，经常提到要培养学生"分析问题和解决问题的能力"，而忽视了"提出问题的能力"。但对于培养有创造性的、能独立思考的科学人才来说，后一点才是最重要的。科学家的创造力，首先就表现在他提出有价值的科学问题的能力上。

在物理教学中，为了培养学生提出科学问题的能力，仅仅像通常所做的那样从内容的衔接上提出问题是远远不够的，必须从真实的物理学认识发展的历史进程中，展示物理学探索过程中问题背景的演化，阐明重大物理学问题产生的历史条件及其所导致的深远后果。因此，在物理教学中，完全必要用物理学史上的精彩事例，培养学生独立思考的能力，提高善于提出科学问题的灵性和聪慧，使他们的思想沉浸在好奇之中，永远不闭塞怀疑的目光。

教学改革的重要任务之一，就是要把科研人员应该具备的本领和能力及早对学生进行培养。这就要求我们必须使教学中的概念、定律和理论知识尽量接近科学家们在其研究过程中形成的概念、发现的定律和创建的理论，以使学生从中领会科学家的实际创造过程和他们所运用的研究方法。

在物理学的长期发展中，确实创立了许多很成功的、成熟的常规方法。例如工程实践中比比皆是的理想模型方法，就是在物理学的发展中创立出来的。物理学研究中建立了许多理想模型、理想过程、理想实验，这些简洁可行的近似抽象方法促成了许多定律的发现。其他如观察和实验，分析和综合，归纳和演绎，类比和联想，猜测和试探，逻辑推理方法，形象化和模型方法，佯谬和反证方法，数学和定量方法，科学移植方法，科学假设方法，概率统计方法等，科学史上有大量生动事例说明科学大师们熟练而巧妙地运用这些方法取得重要成果的过程。利用这些事例，可以对学生进行具体的科学方法的教育。拉普拉斯指出："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。"[2]

不过，如果我们所说的"科学方法"是指科学家们在完成他们的研究工作中所运用的那些"程序"或"法则"，即他们借以实现其探索目标的"哲人石"，那就正如美

---

① 赵凯华，大学物理，1995（8）：5。

② 拉普拉斯，《宇宙体系论》，李珩等译，上海译文出版社，1978年，第445页。

国科学史家霍尔顿（G. Holton）所说，“科学发现没有惟一的方法。”因为每一项研究并不是只有一种方法，而且每个科学家在运用这些方法时也都有明显的个人特点。

大量证据表明，企图发现在一切科学研究中某种起决定作用的惟一“程序”的想法，是不可能实现的。科学创造绝没有一种可供人刻板地加以套用的程式和原则，科学创造本身就是一个再创造的过程。所以，科学方法的教育也不可能教给学生一套固定的、必然可以保证导向成功的“方法”。

因此，学习前人的方法，与其说是为了掌握具体的方法本身，倒不如说是为了积累前人科学思维的经验，是为了进行科学思维的训练。思维训练比起给学生一些具体的科学方法的ABC来，可能是更为重要的。具体深入地剖析若干科学发现的“案例”，详细了解若干科学大师们科学创造的思路，可以使人受到熏陶，从中得到一些启发与颖悟。那些经过认真选择的贴切的历史片段，虽然并不进行考试，学生们在记忆中却会保留下来，久久不会淡忘，这是一种经久发挥启迪作用的“长效剂”。物理学家劳厄（M. von Laue，1879～1960）说：“重要的不是获得知识，而是发展思维能力。教育无非是一切已学过的东西都遗忘掉的时候，所剩下来的东西。”[1]

还应该说明的是，要善于引用物理学史料，对学生进行非逻辑的反常思维训练。

在通常的物理教学中，向学生讲述的多是科学研究中理性的、逻辑的方法。而在实际的科学发现中，科学家们的创造工作却常常带有浓厚的非理性、非逻辑的色彩。敢于突破前人的传统观念，离开坦途潜入丛林，常常是突破性发现的必要条件。尤其是由于现代物理学的研究对象和理论体系脱离直观经验和高度抽象化的特征日益增强，通常的思维方式愈来愈显得无力；创造性思维，如科学想像、理想实验、试探猜测、大胆假设以及直觉、灵感等思维方式在建立新理论中的作用愈来愈突出。人们日益深刻地感悟到，归纳法、演绎法等通常的逻辑方法，很难使人类的思维迸发出创造性的火花。爱因斯坦认为，没有一个概念能够无歧义地从实验中逻辑地推导出来，人们免不了要自由地创造概念。

科学创造的过程，常常是“自由奔放”的。如果坚持概念的严格性、清晰性，就不可能正确对待人类思想的复杂性，科学就会停止下来。当一个科学家正致力于解决某个问题时，对他的自由创造，很少有意识地规定什么限制，根据研究的问题、个人素养和性格的不同，他可以采用不同的思考路线和方法。科学家就像一个探险者进入一个原始森林一样，以其各种才能敏感地捕捉每个线索，从对大量随机信息的处理中去摸索道路。任何一个理论体系，虽然可以通过不同的途径建立起来，但本质上都是一种为解决问题而进行的试探性的猜测，必须依赖于以对经验的共鸣的理解为依据的直觉。

物理学发展史上的大量事例，都可以揭示出科学创造的这一本质。例如，当安培

---

① 转引自《爱因斯坦文集》，第三卷，商务印书馆，1983年，第146页。

提出分子电流假设时，人们还根本不了解分子的电结构，“电子”也是70多年后才发现的。泡利在提出“中微子”假设时，他自己就幽默地把它称为“孤注一掷的措施”，而且打比方说“只有押了赌，才能谈到赢。”这些情况正是说明，这些重要发现并不是归纳经验事实的逻辑结果。

正是由于许多带有革命性的概念和理论，本身就不是从已有的理论中逻辑地推演出来的，以纯粹的逻辑方法来讲授，不仅学生难以接受，实际上也是不可能的。只有把它放到认识的历史长河中去，讲清它们的来历和脉络，并做出辩证的分析，才能使学生理解和接受。

因此，为了使学生能够适应不断发展着的科学创造工作的需要，既要使学生受到严格的逻辑思维的训练，又要使他们不把这种思维模式固定化，必须使他们从科学发展的真实历史中受到非理性、非逻辑的创造性思维的训练，以对未来的创造性工作有所准备。

五、物理学史与思想品德素质的培养

物理学史以其独特的精神价值，在学生的思想品德教育中，可以发挥重要作用：这种精神价值，主要蕴含在科学家的科学理想、献身精神、光辉言行和高尚品格中，以及中华民族的文明中。科学大师们的楷模形象和中华文明的深厚底蕴，会给学生人生价值的追求以深刻的影响。

深入剖析科学伟人的生平、环境、教育和成长道路，可以发现科学家不是超道德的，他们的科学探索活动和科学成就，与道德价值观是密不可分的。科学家也是人，是普通的人；但他们又极不普通，体现在他们的敬业精神和对科学事业的热爱与专注，体现在他们耐得寂寞、甘守清贫的勤恳诚实的劳动上。

物理学史上大量的事例表明，追求真理的科学理想和献身科学的牺牲精神，是科学伟人们取得成就的崇高思想境界的支撑。布鲁诺为捍卫科学真理走上火刑场；伽利略被终身监禁而矢志不移；开普勒贫病交加，历受迫害，死在小客店内；富兰克林为研究雷电而冒险进行“费城实验”，里赫曼为同一目的遭雷击身亡；法拉第鄙视名利，终生进行实验探索，最后老死在书桌旁；居里夫妇为提炼镭元素而甘受放射性的损害，他们的女儿和女婿也因长期从事放射性研究损害了健康而英年早逝……这些感人的事例，对于培养学生的科学理想和科学精神，是很有感染力的。

在物理教学中，要善于运用物理大师们的光辉言行，培养学生树立正确的人生观和价值观，使学生认识到人生的价值要放在社会大环境中和历史的长河中去衡量。爱因斯坦在《我的世界观》中就说：“人是为别人而生存的。”“我从来不把安逸和享乐看作是生活目的本身……照亮我的道路，并且不断地给我新的勇气去愉快地正视生活的

理想，是善、美和真。”[1] 在《论教育》中他殷切地教导青年人“要把为社会服务看做是自己人生的最高目的”。[2]

但是，在学校里应该如何去培养学生这种崇高的思想境界和价值观呢？爱因斯坦指出这是不能用“道德说教”来实现的，因为“言词是并且永远是空洞的，而且通向地狱的道路总是伴随着理想的空谈。但是人格绝不是靠所听到的和所说出的言语，而是靠劳动和行动来形成的。”这当然主要是鼓励学生去进行诚实的劳动。历史上许多伟大的科学家终生探索和执着追求，正为这种“劳动和行动”树立了光辉的榜样。不慕利禄，不畏艰险；追求真理，献身科学；尊重事实，勇于创新；一丝不苟，严谨治学；惜时如金，以苦为乐；刻苦顽强，百折不挠；忍辱负重，造福人类；……在科学大师们身上闪现出的这些高尚品质与情操，永远是激励后人脱离低级趣味，奋发向上，实现人的真正价值的精神兴奋剂。

科学是全人类的事业和财富。任何一个科学概念的形成，每一个科学定律的建立，所有重大的科学发现，都是经过不同国家一代乃至几代人的艰苦积累，汇聚和利用了许多人的研究成果才得以完成的。例如，万有引力定律就是在哥白尼、开普勒、伽利略、惠更斯、胡克等人研究的基础上，又经过牛顿长达 20 年的探索才得以完成的。牛顿坦诚地把自己的成就说成是“站在巨人的肩上”的结果。量子力学理论，也是在普朗克“能量子”假说、爱因斯坦“光量子”理论、玻尔的旧量子论和对应原理、德布罗意相波学说的基础上由海森伯和薛定谔最终建立起来的。作为一个科学工作者，必须要有开放的头脑，广阔的胸怀，要广泛吸收前人和他人的成果，善于进行学术交流；即使发生学术争论，其目的也是为了发展科学认识，追求真理，而不是为了维护学术权威和自己提出的学说的绝对真理性。科学是排斥独断论和专制主义的。要培养民主、理解、宽容、合作的精神，尊重别种文化，尊重别人的学术观点和劳动成果，在交流中取长补短，推动科学的进步。20 世纪 20 年代到 50 年代进行的爱因斯坦和玻尔两大科学巨人关于量子力学理论的完备性的世界性和世纪性的科学论战，给我们树立了科学争论的光辉典范。在原则性问题上，他们寸步不让；但在个人关系上，却又十分友善和相互尊重。

物理学史也是培养爱国主义精神的好教材。

在有关物理知识的教学中，适当介绍中国古代的物理学成就，是进行爱国主义教育的有效手段。中国古代有着光辉灿烂的科技成就，不少方面长期处于世界的领先地位。战国时代墨家关于杠杆和浮力知识的成就，比西方阿基米德早约两个世纪。西汉时期写成的《春秋纬·考灵曜》中关于地动和运动的相对性的叙述，比伽利略早出 16 个世纪。在公元前 3～4 世纪成书的《庄子·徐无鬼》中有弦线共振现象的最早记载；

---

[1] 《爱因斯坦文集》，第三卷，商务印书馆，1983 年，第 42、43 页。
[2] 《爱因斯坦文集》，第三卷，商务印书馆，1983 年，第 143 页。

公元11世纪沈括又描述了用纸游码演示的弦的共振现象，比欧洲早了6个世纪。沈括关于地磁偏角的发现比欧洲人早约400年。南宋赵友钦做过规模很大的光度学实验，早于西方约4个世纪总结出了一些光度学规律。明末科学家方以智对色散现象的概括是牛顿之前人们对色散现象认识的最高水平。中国古代一些技术发明，如地动仪、浑天仪、指南车、指南针等，都是驰名世界的科技珍宝。英国科学史家李约瑟(Joseph Needham，1900～1995)在他所著《中国科学技术史》的序言中说："中国的这些发明和发现往往远远超过同时代的欧洲，特别是在15世纪之前更是如此(关于这一点可以毫不费力地加以证明)。""在人类了解自然和控制自然方面，中国人是有过贡献的，而且贡献是伟大的。"①

诸如此类的生动事例，都有助于增强青年学生的民族自豪感，树立攀登科学技术高峰的信心。对中国近代科学技术落后的状况和原因的探讨，还可以激发青年学生努力拼搏，推进我国科学技术事业的责任感和进取心。

中国现代物理学家如叶企孙、吴有训、赵忠尧、王淦昌、钱三强、钱学森、邓稼先等热爱祖国的拳拳赤子之心，为国为民，奋发图强的精神和事迹，都会使学生深受感染。

长时间以来，人们曾认为，东方的传统思维似乎是与近代自然科学精神相悖的，但20世纪30年代以来，随着科学认识向高速、微观和宇观领域以及探索复杂性领域的扩展，越来越多的科学家日益深刻地认识到东西方思想的融合对推动现代自然科学进步的极端重要性。实际上，中国和东方古代思想，正在以特定的思维方式影响着现代人对世界的认识。早在1954年李约瑟就指出："为什么中国在科学理论方面虽然比较落后，但却能产生出有机的自然观？这种自然观虽然在不同的学派那里有不同形式的解释，但它和现代科学经过机械唯物论统治三个世纪之后被迫采纳的自然观非常相似。"②中国古代思想家不少富有哲理性的精辟论述，在现代自然科学发展中引起了异乎寻常的反响，成为现代科学理论思维发展的启迪和源泉。现在越来越多的科学家已经认识到，西方近代科学思想与中国文化对整体性、协和性理解的结合，将形成符合现代科学精神的新的自然观。我们没有理由不为中国的古代文明自豪，没有理由摒弃我国古人的智慧和优秀的传统文化。我们必须在青年学生的心中树立起中华民族完全能自立于世界民族之林的坚强信念！

六、在物理教学中如何运用物理学史料

当人们试图赋予物理教学以历史的分量时，首先遇到的问题是很少把历史和物理

① 李约瑟，《中国科学技术史》，第一卷第一分册，科学出版社，1975年，第3、18页。
② 李约瑟，《中国科学技术史》，第一卷第一分册，科学出版社，1975年，第4页。

学知识当作平等的东西看待。教师们自觉不自觉地认为物理教学的目的就是传授物理学知识，引入物理学史只是为了增加兴趣和活跃气氛，仅此而已。因此，历史材料很容易被按照物理知识教学的需要剪裁和篡改，似乎事情就是按照教材中叙述的逻辑顺序那样直线展开的。

按照前述这种教学思想，就会认为引入物理学史材料是多余的，物理学史知识只能居于附庸地位。可是实际上，物理学史在教学中如果运用得当，启发性强，指导作用大，对于发展学生思维，培养学生的全面素质是很有作用的。所以，既不能把引用物理学史料看做是多余的，也不能歪曲历史，给学生制造某种教师讲课所需要的假象。

把历史与教学结合起来，是一件很棘手的事情，需要谨慎从事。教学本身是科学的某种改造物，无论是物理知识还是历史知识，总要根据教学目的加以精选和组织。历史教学也不能完全等同于历史事实本身，课堂上讲的主要是历史教训，而不必是历史的全过程。所以物理学史的材料不仅要精选，而且要精心处理，恰当运用。

应当从指导今天和明天的意义上来选择史料。具体而言，主要选择下面几种史料用于教学，即代表了物理学的历史发展潮流的史料；反映着物理学思想的本质特征及其局限性的史料；富有教育意义的史料。

第一，说明物理学发展的里程碑或转折点的史料应当采用，特别是那些在实现物理学的历次大综合与突破中有重要作用的历史事件，很有必要引入物理教学。这样做会使学生不仅掌握具体的物理知识，还会对整个物理大厦的外观、内部结构和建设过程有完整的了解。如伽利略发现了惯性运动定律以后才彻底推翻了亚里士多德的运动理论即认为保持运动需要力的观点，从而找到了正确的线索，把力学研究引上正确的道路。学生们了解了这段历史后，自然也会消除掉那种把惯性定律看做为第二定律在无外力作用时的特殊情况，因而不必要单独成立的观点。

第二，有助于加深对基本概念、原理和方法的理解的原始文献和资料应该选用。物理学的基本概念常可从原始文献中找到清晰而有启发性的说明。例如牛顿当初是如何从开普勒第二定律中看出中心力场的存在？如何通俗明白地讲出行星能绕太阳运转和卫星能绕行星运转的道理？这些东西在牛顿的《原理》中是用简单的数学公式和图形说明的，它说明在高山上平射出去的物体如何随着初速度的增大而射程越来越远，以致最后由抛物线向圆轨道和椭圆轨道的转变。这种说明可以使学生很容易就理解了抛射体运动的抛物线轨道、圆轨道和椭圆轨道的联系和界限，对引力场中的轨道概念有一个深刻的理解，而这样的说明却是在人造卫星发射以前 270 年出现的，这是何等有先见之明的卓越思想！再如惠更斯在《碰撞物体的运动》中从两个不同的参照系（岸上和船里）考察两个物体之间的碰撞的方法和图画，则是相对性原理的精彩运用。1607 年伽利略提出的由两个观察者在两个山头上轮流遮灯来测定光速的办法虽然粗陋可笑，但却是非常直观的，后来斐索的齿轮法、傅科的转镜法、安德森等人的克尔盒法都是和伽利略遮光实验方案的基本思想一致的，只不过在具体的观测措施上有所改进

而已。

第三，富有方法论意义，有助于培养学生提出问题、分析问题和解决问题的能力的生动史料应当采用。每位物理学家在做出他们的发现时，都有自己独特的思路和研究方法，包含着他们卓越的科学洞察力和深邃的物理思想。深入剖析他们的创造过程，将会使学生带着一连串的思索和悬念在活动着，感受到知识的来龙去脉以及像读侦探小说一样的乐趣。甚至科学家们的挫折和失败，也会使学生从中受到教益，增长才干。

第四，借助物理学史资料，教育学生重视实验和实验的精密度，是很有效的。定量的实验研究是近代物理学发展的重要方法。应当向学生介绍物理学史上一些重要实验的科学背景、设计原理、实验方法，以及它们对物理学发展的重大意义和作用。还应当让学生了解，历史上重要实验的数据结果不仅表明着实验方法的进步，而且还表明，只有当实验的精密度达到一定的水平时，才可能导致新的发现。

在把物理学史料引入物理教学的具体方法上，一个很简单的作法就是要直接利用教科书上写入的现成的历史资料，例如关于如何从黑体辐射能量分布曲线的理论和实验研究导致了普朗克提出量子概念，多数教科书上基本是按照历史线索编写的；玻尔依据他的分立轨道、量子跃迁的假设而提出的原子结构模型，这部分教材也多是按照历史线索编写的。教师在讲授中只需适当地补充一些历史细节，就会起到加强学生的历史发展观点、敢于破除传统观念和勇于进行科学创造的科学精神的教育。教科书中经常出现很多科学家的姓氏。美国物理教育家弗伦奇（A. P. French）教授指出：一个最低的要求是，每当一个物理学家的名字第一次出现时，教师都应当尊严地说出他的全名和工作时代。不能让学生认为“欧姆”只是一个“定律”，“安培”只是一个“公式”，“科里奥利”只是一个“加速度”，“洛喜密特”只是一个“数目”，很可能不少学生会把“毕奥-萨伐尔”看做是一个人。如果可能，还应该补充一些有关这些人物科学工作的细节，从而使学生认识到物理学确实是人类创造的。讲一些科学家们在做出他们的发现时的工作条件是很有意义的。例如说明亨利在作他的电磁铁实验时，是用丝带裹着金属线实现绝缘的，而这些丝带是撕开他妻子的结婚衬裙得来的，因为在1829年商店里还没有绝缘导线，要自己动手做；欧姆是用悬起的一根磁针在导线附近的扭转角度来测定导线中的电流强度的，因为当时还没有检流计；伽利略测物体的下落时间时，是用上面的容器向下面的杯子里流出水的多少来计算时间的，因为当时还没有时钟，更没有停表，……这些例子都会说明科学是一步步走过来的，还会启发学生自己动手想办法为研究工作创造条件。

应该有选择地让学生阅读一些原始文献。教科书中介绍的物理学，往往与实践中发展起来的物理学很不相像，在教科书中资料数据被纯化、省略和篡改了，以致失去了实际发现过程的真实面目。在实际的过程中却有错误的起点，多向的猜测，直观的实验和激烈的争论，这是一个活生生的、有血有肉的曲折的进程。在教学中对历史资料作适当的精选是必要的，但无论如何让学生接触一些重要的原始材料是很有价值的，

原始文献中那些思考、论证、实验设计和实验数据，不仅会消除讲课中的枯燥，而且会使学生体会到直接参与科学家的探索活动的快感与信心。

结合讲课内容随时插入一些科学家的名言、警句和轶事，讲一个精彩的小故事，很容易活跃课堂气氛，启发学生的思考。有条件的学校还可建立物理学史实验室，选择若干个在物理学发展史上的重大基本实验，按照原来的设计和装置以及实验操作方法布置起来，让学生动手重复做一下。这样做可以使学生跟踪伟大先驱们的创造足迹，领会他们的思路，获得从常规的教学实验中得不到的才能。其他如举办物理学史专题演讲，放映物理学史幻灯片和录像带，布置让学生调查历史上的著名实验和科学发现的案例等，都是把物理学史引入物理教学的有效方法。

思 考 题

1. 物理学的研究内容是如何发展的？
2. 物理学的研究方法是如何演化的？
3. 什么是物理学的基本观念？物理学的基本观念是如何变革的？
4. 物理学史的研究对象和方法是什么？
5. 奈格尔的“归并成长说”和科学发展的指数规律的要点是什么？如何评价这种科学发展模式？
6. 波普的“证伪主义”模式的要点是什么？如何评价这种科学发展模式？
7. 库恩的“范式变革”模式的要点是什么？如何评价这种科学发展模式？
8. 拉卡托斯的“科学研究纲领”模式的要点是什么？如何评价这种科学发展模式？
9. 物理学史在人文素质培养上有哪些功能？
10. 物理学史在科学素质和创造素质培养上有哪些功能？
11. 物理学史在思想道德品质培养上有哪些功能？
12. 如何选择物理学史料并把它融入物理教学？

第一篇　古代物理学

第一章　中国古代物理学成就

中国物理学历史悠久，内容丰富。经过历代工匠和学者的努力，取得了大量的成果。中国古代物理学的发展大致经历了四个时期。

从远古到青铜时代，这大约经历了上百万年的时间。原始人类已可以制作各种不同的石器，掌握了取火技术，发明了标枪、流星索和弓箭等工具。在新石器时期又发明了制陶技术，出现了农业文明，制造石器的技术也由打制技术提高到磨制技术，各种农具、乐器和兵器相继被发明出来，物理学的种子也就在古代人类的智力活动之中播撒开来。在新石器时代的晚期，最重要的发明是铜器的出现。大约在距今4600年前，华夏大地进入青铜时代。随着青铜文化的繁盛，社会生产力水平大为提高，建筑、纺织、舟车制造等手工业生产技术部门都建立并发展起来。由于灌溉农业的发展，水利工程也受到人们的重视。在技术不断进步的同时，人们为了更有效地利用畜力、风力、水力和人力，发明了许多机械，这也大大促进了物理知识的不断积累。

经历了夏商西周三代社会制度的变革，奴隶制从兴起到兴盛，又逐渐走向衰亡。进入春秋战国时期，由于社会从奴隶制度逐渐向封建制度过渡，在学术上形成了一个“百家争鸣”的局面，进而使中国物理学的发展进入了一个高峰期。西周时发明了冶铁术，到春秋战国时得到迅速发展。铁制农具的应用和普及，大大促进了各种技术的发展，同时也加速了物理学知识的积累，力学、声学、光学，以及电学与磁学的知识比以往大大丰富了。此外，人们也开始讨论有关时间、空间与运动，以及物质本原和逻辑的问题，提出了诸如元素与原子的观点，扩展了古代物理学的深度和广度。

经过从秦汉到隋唐时期的发展，中国在宋元时期又迎来另一个物理学发展的黄金时期。除了理论研究的不断深入，人们也加强了实验研究，并取得了一些重要的成果，如地磁偏现象的发现，共振的定量研究，系统的光学研究，改进磁针指向效果的研究，人工磁化方法的探讨，等等。此外，在一般的学术研究中，学者在物理学的理论问题上也提出了一些重要的见解，对物理学思想的发展大为有益，使中国在这一时期的物理学研究达到了一个很高的水平。

明代的物理学研究也有所发展，但总的来说，相对西方的发展是迟缓的，至明末渐入世界物理学发展的潮流之中。

第一节　物质本原思想的演变

在远古时代，人们已注意到自然现象的各种变化，并渐渐地认识到自然变化的一

般图式，以及宇宙生成的问题。寻求物质本原或精神本原的探索活动也是古代智者常常思考的内容。这里我们将简略地考察有关物质本原思想的演变过程。

一、元素与原子的观点

物质本原是一元的还是多元的，这是古代哲学研究的重要命题。在学术发展的过程中，逐渐形成了中国古代物理学的一些基本观点，元素和原子观点是其中重要的组成部分。

1. 阴阳学说

阴阳的字义很简明，最初多指阳光的向背，如背阴与朝阳。到西周时期，阴与阳基本上是作为一种对偶概念出现的，如《诗经》中的“既景迺岗，相其阴阳”，以后又逐渐演变成解释或说明自然现象与社会现象的一对基本范畴。

《周易》是中国古代的重要文献，在经书系列中占据重要地位。在《周易》中，为了说明天地变化及种种现象，作者以阴阳的范畴为基础，构成了一种思维体系，进而形成了中国古人特有的思维模式。

《周易》的作者注意到自然界的各种现象，从中抽出 8 种基本现象，这就是天、地、山、泽、水、火、风、雷。为了能说明这 8 种现象，作者展示了一个演化过程，即“易有太极，是生两仪；两仪生四象，四象生八卦”（《易经·系辞上》）。大致的含义是，宇宙的本原是“太极”（这是物质的原始状态，也有解释成无的），“太极”生出天地（“两仪”），再生出四时（春夏秋冬——“四象”），再生出天地山泽水火风雷（“八卦”）。八卦中天地是派生山泽水火风雷之母。

为了形象地说明这一演化过程，作者还将阴阳的作用形式化和符号化。在《周易》中将阴阳分别表示为“- -”和“—”，分别称作“阴爻”和“阳爻”。通过阴爻和阳爻的有规则的组合，构成了八卦的形式，即乾、坤、震、巽、坎、离、艮和兑（图 1-1）。这样，八卦便脱离具体的自然现象而形成了 8 种抽象的实体。这种形式使人们对八卦的特征、八卦之间的关系和阴阳的作用，都可以便捷地加以说明和阐述。用八卦说明物质的本原和演化时显得比较圆通，并具有了理性的因素。

通过八卦的变化，人们可以对阴阳自身的性质有更全面和更深入的认识。阴阳之间是对立的和互根的，在阴阳图上，二者黑白分明，但又彼此包容，表示的正是这种意义。其次，阴阳是可以彼此消长和相互转化的。阴阳的彼此消长和相互转化是通过“太极”之动而促成的。此外，在八卦和由此派生的六十四卦的形式中，阴爻和阳爻数量在整体上是不变的，表示在阴阳之间它们保持着一种整体上的和谐。例如刚柔相济、刚柔相推就表现着阴阳的相互感动，进而促使天地万物的生生不息。

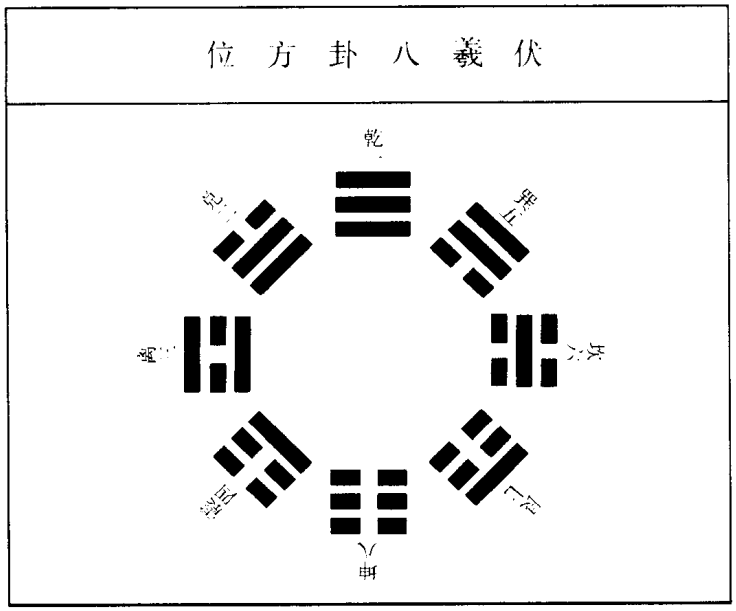


图 1-1　八卦的符号

2. 五行思想

古代的五行是指金、木、水、火、土五种基本物质或元素。在《尚书·洪范》中对五行的功用与性质做了说明，即“水曰润下，火曰炎上，木曰曲直，金曰从革，土爰稼穑。”

对于万物的形成，西周末的史伯提出“和实生物，同则不继”的命题，也就是说，不同元素的适当混合可以构成万物，即“以土与金、木、火、水杂，以成百物。”（《国语·郑语》）由此可见，史伯的五行与《尚书》中的五行已有区别，史伯的五行已带有元素的特点，世界万物皆由这五种元素构成。

随着对五行的研究，人们对五种元素之间的关系也逐渐有了更全面的认识。这样的关系有两种：相生和相克。相生的关系是：土生金、金生水、水生木、木生火、火生金；相克的关系是：土克水、水克火、火克金、金克木、木克土。这种“生”与“克”的关系虽然能说明某些自然现象，但也被赋予了一些神秘性，对古代物理学的发展产生了消极影响。

3. 原子观点

在说明万物构成的问题时，名家与墨家提出了不同于元素的观点。

名家的代表人物惠施（约前 375～前 318）曾提出一组重要的定义：“至大无外，谓之大一；至小无内，谓之小一。”（《庄子·天下》）其中“大一”是指一极大的程度，

可以用“无外”来描述；“小一”则小到“无内”的程度。儒家的经典中也有类似的说法，即“语小，天下莫能破焉”（《中庸》）。南宋朱熹（1130～1200）对此注释时借用了惠施的说法，即“莫能破，是极其小而言之。今以一发之微，尚有可破而为二者。所谓莫能破，则足见其小。”“物有至小而尚可破作两边者，是中着得一物在。若云无内，则是至小，更不容破了。”（《四书朱子大全·中庸》）

墨家相对“小一”和“莫能破”的概念提出了不同的定义。在《墨经·经上》中有这样的记述，即“端，体之无厚而最前者也。”其解释是，端“是无间也”。这就是说，端的尺寸非常小（“无厚”），因此，其内部是无间隙的。由于端是最小的，显而易见，“端”是不能被再分割了，即“非半弗斯，则不动，说在端。”可见“端”是构成物质的最小颗粒了。在构成物质时，“端”要先构成“尺”（类似线）和“区”（类似面），再构成“穴”（类似体）。

从墨家的论证来看，墨家的研究比名家要深入些，并形成了一种重要的物质结构理论。在先秦的物质理论研究中，墨家的成绩的确是令人自豪的。此外，墨家的观点有一个明确的特征，对物质进行分割，分割出“端”就不能再分割下去了。也就是说，物质是不能无限制地分割下去的。因此墨家坚持的是一种类似原子的观点。与墨家观点不同的是，物质可以无限分割下去。这种观点是一辩者提出的，他指出：“一尺之棰，日取其半，万世不竭。”（《庄子·天下》）这是一种有价值的观点。有趣的是，不管分割物质的结果会怎么样，直到今天人们仍难以对此做出无争议的结论。

二、元　气　说

在中国古代的物质结构理论中，元气说是一种重要的理论，也是古代物理学的重要成果之一。

1. 元气自然论

气是很细小的颗粒，非人的视力所能及，但气流却能使人感觉到。自然界中，气的形态是可变的，如“地气上为云，天气下为雨”（《黄帝内经·素问》）。“气有六，阴、阳、风、雨、晦、明。”（《左传·昭公元年》）

由于气具有可变化的自然形态，战国时期的宋钘（生活在前4世纪）和尹文（生活在前4世纪）以此对气做了全面的说明：“凡物之精，比则为生。下生五谷，上列为星；流于天地之间，谓之鬼神；藏于胸中，谓之圣人。杲乎如登于天，杳乎如入于渊，淖乎如在大海，卒乎如在于屺。”（《管子·内业》）大意是，万物是由各种精气的结合而产生的，在地面生出五谷，在天上排列出星辰，流动天地之间称为鬼神，储藏在胸中就成了圣人，所以称它为“气”。它有时光明照耀，好像升浮在天空；有时隐而不见，好像沉没在深渊；有时软润柔和，好像游动在海中；有时高高在上，好像耸居在山峰。

这种“精气”的见解是很有创见的，这种认识为荀子所发展。荀子（约前298～前238）认为：“水火有气而无生，草木有生而无知，禽兽有知而无义，人有气有生有知亦有义，故最为天下贵也。”（《荀子·王制》）这就是说，自然界的构成是物质性的气，但万物的质有所差别，所以形成的物也有所不同。

汉代一些学者也对气进行研究，他们将气分为阴气和阳气，并将气看做宇宙本原，气还具有能动性和可转化性。关于气的阴阳性质，淮南学者认为：“阴阳者，承天地之和，形万殊之体，合气化物，以成埒类。”（《淮南子·本经训》）

关于元气，东汉学者王充（27～100）做了全面的研究，他提出了较为系统的元气学说——元气自然论。王充认为，天地和万物都是由元气构成的，元气是自然界的完整基础。他说：“天地，含气之自然也。”（《论衡·谈天》）“谓天自然，无为者何？气也。”“天地合气，万物自生。”（《论衡·自然》）这就是说，天地是包含元气的物质实体，万物是由物质性的元气产生的，而且是“自然地”产生的。王充还利用元气理论解释了许多自然现象，特别是一些灾异现象，如日食和月食，雷雨成涝，旱灾、虫害等。

一些唐代学者也重视元气自然论的研究，并提出了一些重要的观点。柳宗元(773～819)对于宇宙起源，宇宙是有限还是无限，世界统一的基础等问题都有研究。他认为，“本始之茫，诞者传焉……曾黑晰眇，往来屯屯，庞昧革化，惟元气存，而何为焉？”（《天对》）大意是，宇宙是悠远渺茫的，关于宇宙起源的荒诞传说并不少。昼夜、明暗的交替，万物从混沌中发生和发展，都是元气运动所致，何必要假造物主之手呢？柳宗元还讲到：“彼上而玄者，世谓之天，下而黄者，世谓之地，浑然而中处者，世谓之元气。”（《天说》）刘禹锡（772～842）对“无形之空”有很精辟的说明。刘禹锡认为：“古所谓无形，盖无常形耳，必因物而后见耳。”（《天论》）形空互变，对空的把握要靠理智，即“以智而视”（《天论》）。柳宗元对刘禹锡的论证很赞赏，他说：“独所谓无形为无常形者，甚善！”（《答刘禹锡天论书》）刘禹锡的这些思想对后来元气学说的发展产生了有益的影响。

2. 元气本体论

宋代学术的繁荣对物理学的发展提供了较好的条件，特别是一些学术大家直接涉入元气理论的研究，对元气本体论的建立与发展做出了贡献。

关于“太虚”，佛家和道家都视作绝对的“空”或“无”，并且渲染上一些神秘的色彩。对此，张载（1020～1077）有针对性地提出了新的见解。他认为：“太虚者，气之体……形聚为物，形溃反原。”（《正蒙·乾称》）“太虚不能无气，气不能不聚而为万物，万物不能不散而为太虚。”“气之聚散于太虚，犹冰凝释于水，知太虚即气，则无‘无’。”（《正蒙·太和》）这意思是说，虚无的空间是气存在的基本形式，或气散而未聚的本体状态，“太虚”成为物质和空间的共有概念。万物是气的不同凝聚状态，

气凝聚可以形成有形的万物，万物散而为气又复归于无形的太虚。气在太虚中的聚合与分散犹如冰在水中的凝聚和融解一样，这不过是同一物质的不同形态的变化。显然，张载认识到了气与万物的转化关系，进而把握有形之物与无形之太虚的区别和联系。既然有形之物皆为气化，其气化的动力机制是什么呢？张载从气自身寻找运动之源，他认为，“凡圆转之物，动必有机，则动非自外也。”（《正蒙·参两》）朱熹对此大加赞赏，说“横渠说得透”。“横渠”是张载的号。

朱熹对气的物质属性和气化生万物的观点是赞同的，并对元气本体论也做了一定的发挥。他认为：“且如天地间人物草木禽兽，其生也莫不有种，定不会无种子白地生出一个物事，这个都是气。”（《朱子语类》）“天只是一气流行，万物自生自长自形自色。”（同上）对于气的性质，他认为：“天地只是一气，便自分阴阳，缘有阴阳两气相感化生万物”。（同上）二气“交感化生万物，万物生生而变化无穷焉”（同上）。

对于宇宙演化，张载讲：“若阴阳之气，则循环迭至，聚散相荡，升降相求，氤氲相揉。盖相兼相制，欲一之而不能，此其所以屈伸无方，运行不息，莫或使之。”（《正蒙·参两》）朱熹则说得更通俗：“天地初间，只是阴阳之气。这一个气运行，磨来磨去，磨得急了，便拶许多渣滓。里面无处出，便结成个地在中央，气之清者便为天，为日月，为星辰，只在外常周环运转，地便在中央不动，不是在下。”（《朱子语类》）这种说法只是一种猜测，但其中对气化宇宙，渐次演化成天地日月星辰的思想还是有价值的。

清初衡阳学者王夫之对中国学术做了较全面的总结，尤其对传统哲学发表了许多精辟的见解。对元气本体论的研究，王夫之（1619～1692）表示“希张横渠之正学”，表现出明确的学术倾向。

关于元气的可转化性观点，明末的宋应星（约1587～?）曾指出：“气从地下催腾一粒，种性小者为蓬，大者为蔽牛干霄之木，此一粒原本几何，其余则皆气所化也。”（《论气·气化》）“气所化”引起物增，但代价是消耗气。王夫之认为：“阴阳二气充满太虚，此外更无他物，亦无间隙，天之象，地之形，皆其所范围也。”（《张子正蒙注·太和》）大意是说，宇宙间充满了物质性的气，在宇宙的构成上没有与气无关的存在物，也没有虚空。自然界的天地万物都是气的体现，气无所不在无所不包。对于“虚空”，王夫之认为：“虚空者，气之量，气弥沦无涯而希微不形，则人见虚空而不见气。凡虚空者，气也。聚则显，显则人谓之有；散则隐，隐则人谓之无。”（同上）意思是说，虚空充满了气，有形的物是气，无形的虚空也是气，有形无形只是气的象而已，只是聚和散、显和隐所表现的形态不同罢了。

元气本体是不可毁坏的，张载对此曾明确指出：气“散亦吾体，聚亦吾体”。（《正蒙·太和》）这里所说的“散”和“聚”明显带有“状态”的含义，且为两种不同的状态。这大约包含了两方面的认识，即物质不灭性和运动不灭性。

关于物质的不灭性，一些明代学者已有明确的表述，如王廷相（1474～1544）指

出："气虽无形可见，都是实用之物，口可以吸而入，手可以摇而得。"气虽"有聚散"，但"无灭息"。方以智（1611～1671）也有类似的看法，"考其实际，天地间凡有形者皆坏，惟气不坏"（《东西均·所以》）。

王夫之从张载的理论入手，对物质的不灭性进行了充分的论证。他认为：气"散而归于太虚，复其氤氲之本体，非消灭也。聚而为庶物之生，自氤氲之常性，非幻成也。""聚散变化，而气本体不为之损益。"（《张子正蒙注·太和》）这种哲学上的认识对自然科学的研究提供了有益的指导，但是，王夫之并未停留在这个水平上，而是力图从实验上进行更为完整的论证。他举出了三种现象："车薪之火，一烈而尽，而为焰（炎），为烟，为烬，木者仍归木，水者仍归水，土者仍归土，特希微而人不见尔。""一甑之炊，湿热之气，蓬蓬勃勃，必有所归；若盦盖严密，则郁而不散。""汞见火则飞，不知何往，而究归于地。"（同上）

借助这些现象，王夫之进一步论证道："有形者且然，况其氤氲不可象者乎？"这就是说，有形的物体是不可消灭的，无形的元气也应是不可消灭的。这样，王夫之不仅从思辨的水平上把握住物质不灭的思想，而且借助实证的方法阐发了物质守恒的原理，比起前人和同时代的人，王夫之是前进了一大步。

中国关于运动不灭的思想起源很早。西汉淮南学者认为："物之动，动而有益则损随之。"（《淮南子》）这是运动不灭思想的初步表述之一。张载认为，"气"的运动是永恒的。"气块然太虚，升降事物，未尝止息。"（《正蒙·太和》）弥漫太虚中的气不断地飞扬，是永不停息的。对于元气的运动机制，张载认为，其动因来自它的内部，正如前面的引语，"凡圆转之物，动必有机，既谓之动，则动非自外也。"（《正蒙·参两》）其中"圆转之物"指的是日月星辰等天体，"机"指发动机的机括或原因。为什么"动非自外"呢？张载进一步指出："太和所谓道，中涵浮沉、升降、动静相感之性，是生氤氲相荡、胜负、屈伸之始。"（《正蒙·太和》）"太和"是阴阳未分之气，用以说明其运动的状态或变化的过程。张载利用元气这种内部的矛盾性质说明元气固有的和不灭的运动性质。

王夫之则进一步阐发了张载的观点。他认为："太虚者，本动者也，动以入动，不滞不息"（《周易外传》）。由此做类似的推论，元气是不灭的，元气的运动亦应不灭。这样，王夫之断言："有往来而无死生，往者屈也，来者伸也，则有屈伸而无增减，屈者固有其屈以求伸，岂消灭而必无之谓哉！"（《周易外传》）运动的形式可以改变，但其转化的量是不会增减的。

由此可见，王夫之在发展元气本体论时，把中国的元气理论推向了高峰，这是中国古代物理学理论研究中最重要的成果之一。

3. 元气与以太的比较

元气学说在中国古代自然哲学和物理学发展中占据着重要的地位，它同西方原子

理论是两种很不同的自然观，体现着两种不同的科学观念和传统。元气学说注重物质连续与不连续的相互统一，强调事物间的相互联系和相互转化。这似乎更符合自然界的真实变化，与自然本性更相接近。其实，西方人也很重视气的思想，至少是曾把元气学说作为原子理论的一种补充。

1644 年，笛卡儿提出以太旋涡理论，以解释原子间的虚空问题和超距作用问题。后来，莱布尼茨则明确提出用气转化为以太的设想，他认为："气，在我们这里可以称之为'以太'，因为物质最初完全是流动的，毫无硬度，无间断，无终止，不能分为部分。是人所想象的最稀薄的物体。"（《致德雷先生的信》）经美国传教士丁韪良的考证，他认为，笛卡儿的以太论可能来源于张载的元气论。

19 世纪末，机械以太论走到了尽头。后来，在场论的发展中，以太思想又有所体现。以太说作为原子论的补充，对现代物理学的发展仍会发挥作用。因此，元气思想的研究仍有一定的价值。例如，在量子场论中采用了类似气形转化的观点，即把光子看作是电磁场的表现形式，且每一种粒子都对应一种量子场，以场的激发和退激表示为粒子的产生和消失。这种看法实际上与元气的聚散状态的不同表现的观点基本上一致。

综观物理学发展史，原子论为牛顿力学的产生提供了理论的基础，以太论促进了电动力学的发展。中国古代元气理论中的"虚空即气"，"动非自外"，"气形转化"的观点，对现代物理学的研究仍可提供一种方法论和认识论的启迪。

第二节　物理学知识的积累

中国古代物理学的研究范围很广，除了要解决大量的技术问题，也对一般的理论问题做了一些思考。这些思考几乎涉及所有的物理学分支，在这里只简要地论述力学、光学、声学，以及电学和磁学的成就。

一、力　　学

古代工匠积累了许多有关力学方面的经验，其中部分被记录并留存下来。从理论的研究来看，在时间与空间，运动与静止，各种力的认识上都取得了不少重要成果；此外还记述了大量关于力学知识的应用的经验。

1. 时间、空间和运动

时间、空间和运动的研究是从一些实际的经验和直观的认识开始的。随着经验的不断积累和认识的不断深入，人们才逐渐地建立起较为科学的时空和运动理论。

最早的与空间有关的概念是老子（生活在春秋末年）提出的。他说："天地之间，

其犹橐龠乎？虚而不屈，动而愈出。”（《道德经》）魏国杂家尸佼（前390～前330）首先使用“宇宙”这个词，并最先给出宇宙的明确定义：“上下四方曰宇，往古今来曰宙。”（《尸子》）这里的宇就是空间，宙是时间。《庄子》中也有关于宇宙的定义：“有实而无乎处者，宇也；有长而无本剽者，宙也。”（《杂篇·桑庚楚》）意思是说，宇是实在的和无所不在的，宙有长短（可以计量）但无始终。这里的“无所处”和“无本剽”也说明了时空的无限属性。墨家也给出了时间与空间的定义：“久，弥异时也”，其解释是“合古今旦莫”；“宇，弥异所也”，其解释是“东西家南北。”其中的“弥”就是遍及的意思，“家”近乎“中”，即把自己的家当做相对四个方向的初始原点。在今天看来，墨家的论述仍是一个非常简洁的定义。

关于时间与空间的联系，《管子》中说得很明确，其中讲到：“天地，万物之橐；宙合又橐天地。”（宙合）意思是，天地包裹着万物，天地又包裹在宙合之内。《管子》中的“宙合”比老子的“天地”层次也多了一些，内容也更丰富些了。《管子》还进一步对其意义作了一些引申：“上通于天之上，下泉于地之下，外出于四海之外，合络天地以为一裹。”由此可见，中国古代对时间和空间的理论更强调其统一性。

关于运动与静止，墨家的考察很细致，并且给出了定义。他们写道：“动，域徙也”，即“边际徙者，户枢免瑟”，“止，以久也”，即“无久之不止，当牛非马，若矢过楹。有久之不止，当马非马，若人过梁。”这样的运动定义简洁明了，其意思就是空间（域）的改变（迁徙）。墨家的论证也很简单，门枢免除嘎吱声，在于它的边际经常运动（或徙），这又是转动现象。静止的定义也简洁明了，即某物体在某一时间内处于空间某一位置。静止的解释也是很好的。飞箭（矢）快速飞过一根柱子（楹）旁，在经过柱子的一瞬，人感觉不出有短暂的时间（无久），即人们不会说出通过柱子的一瞬箭就停止了，就像指牛为马；而人过桥（梁）则不然，它的每一步都好像停一下，能感觉出一个时间限（久），这种可感知的静止状态就像指马为马一样，是理所当然的。墨家关于静止的解释是针对名家“飞鸟之影未尝动也”（公孙龙），“镞矢之疾而有不行不止之时”（《庄子·天下》）而提出的。可见，同墨家相比，名家的思辨水平很高，对运动与静止的认识很深刻，但墨家比较注重运动与静止的实证性研究。

墨家还论证了时空与运动的关系。他们写道：“宇域徙，说在长宇久”，即“宇徙而又处宇，宇南北，在旦又在暮”。这是说，物体在空间的移动，是空间随着时间的持续自近而远的变化。墨家的解释是，物体在空间不断移动，须离开原来的空间而占据别的空间，如一物体从南向北运动，所经历的时间是从早到晚。因此，时间和空间的联系就统一在物体运动中了，空间与时间的联系也是很自然的事情了。他们还写道：“行修以久，说在先后。”即“诸行者必先近而后远。远近，修也；先后，久也。民行修必以久也”。这是说，旅行者必先到近处，后到远处，而远近就是距离之不同，先后就是时间之不同。因此，人们走过一定的路程就需要一定时间。这种论述非常朴素，但对运动与时空关系的描述是很清晰的。

有些学者对运动的相对性已有所认识。在《吕氏春秋》中有这样一个故事："楚人有涉江者，其剑自舟中坠于水，遽契其舟，曰：'是吾剑之所从坠'。舟止，从其所契者入水求之。舟已行矣，而剑不行。求剑若此，不亦惑乎？"要捞出水中的剑，凭一般的经验来看，应把剑丢在水中的位置确定下来，可是这个人却在船上刻上记号。作者笑话他，"不亦惑乎"。作者是以河岸做参照来确定剑在水中的位置，掉剑者则是以行走的船为参照，可惜的是作者没有进一步做出明确的说明。

晋代束晳（262～301）认为，"乘船以涉水，水去船不徙矣"。他还说："仰游云以观，日月常动而云不移。"（《隋书·天文志》）晋代葛洪（283～343）也说："见游云西行，而谓月之东驰。"（《抱朴子·塞难》）由此可见，束晳和葛洪对运动的相对性是有所认识的。汉代成书的《春秋纬·元命苞》中写道："天左旋，地右动。"就像云与日月运动的关系一样，由天体的东升西落（左旋）运动可以证明地的某种运动（右旋）。这段论述实际上是利用相对运动的性质证明地球的运动。这是古代最早的地动思想吧！

伽利略（Galileo Galilei，1564～1642）在论证地球运动时提出了著名的"萨尔维阿蒂大船"实验，从而奠定了"伽利略相对性原理"。无独有偶，在我国汉代也有人提出了类似的观点，即"地恒动不止，而人不知。比如人在大舟中，闭牖而坐，舟行而人不觉也。"（《春秋纬·考灵曜》）"考灵曜"的这段论述完全可以看做是古代物理学的相对性原理，并且是中国古代物理学研究的重要成果之一。

2. 对力的认识

对于力的作用，淮南学者提出了一些很有价值的见解。他们指出："十围之木，持千钧之屋；五寸之键，制开阖之门。岂其材之巨小足哉，所居要也。"（《淮南子·主术训》）这是说，选取适当的作用点对力的作用效果是有影响的。淮南学者还使用了"积力"的概念，他们写道："积力所举，无不胜也。""力胜其任，则举之者不重也。"（《淮南子·主术训》）"积力"就是一些力相加的结果，单个力小于重物之重就不能举起重物，但是几个力的"积力"则可能举起重物。

对于力、重力和重心，古人也进行了研究，并给出了适宜的定义。墨家最早提出的力的定义是："力，刑之所以奋也。"其解释是"重之谓下，举重，奋也"。这里的"力"字象征人用农具奋力翻土，喻做"体力"较为适宜，说明力就是身体用以克服阻力的原因。例如重力是向下的，举重就是"奋"。

在西安半坡曾出土了一些尖底瓶，它属于仰韶文化期，距今已有5000多年了，是对重心的一个很好的应用。它的外形呈流线型，像鱼形，小口、短颈、鼓腹、尖底，腹侧有双耳。最独特的是它的稳定性质。对此通常有两种解释。一种解释是，将两耳系绳放在水面上，由于水的浮力和尖底瓶的重心作用，瓶上部会自动倾斜，下半部离水面并上翘起；随着瓶内水量增多，瓶下半部也逐渐下沉，直至瓶内水满而直立。在运

输时将瓶背在肩背上。另一种解释说瓶水常用手提着运输，这就要求水量要适宜。当壶腹空空或满满时，重心较高，手提时很难保持竖直状态。只有壶水注入约60%～70%时，壶才可以保持竖直的状态。后人称尖底瓶之类的装置为“欹器”。荀子曾记述了孔子（前551～前479）参观鲁桓公庙时对欹器的注意，并且指出它的性质是“虚则欹，中则正，满则覆”。

对于浮力，墨家写道：“形之大，其沉浅也，说在具”，“沉形之衡也，则沉浅非形浅也；若易五之一”。这个实验比较直观：一浮体放入水中（“沉形”），平衡时（“衡”），浮体下沉深度小于浮出的高度（“沉浅非形浅”）；整个浮体的重量与水对物体下沉部分的浮力相等，就好比市场上五件商品与一件商品的等价交换。南宋吴曾的《能改斋漫录》中记载：“朔人献燕昭王以大豕，曰：养奚若？王乃命豕宰养之。十五年，大如沙坟，足如不胜其体。王异之，令衡官桥（秤杆）而量之，折十桥，豕不量。命水官浮舟而量之，其重千钧。”这是说，燕昭王（前331～前279在位）的一头猪喂养得太胖，最大的秤杆也不能给它称重。因此，燕昭王命“水官”用船来称重，这才知道猪的体重。《三国志》中还记载了一个著名的“曹冲（生活在东汉末）称象”的故事，其法与燕昭王的方法一样。宋代的僧怀丙也曾利用浮力打捞铁牛。

关于弹力，我国古人早就有所认识并加以利用了。20世纪60年代，在山西朔县峙峪村的旧石器时代晚期遗址中，人们发掘出一枚石镞。这枚石镞是用燧石制成的，尖端非常锋利，一侧的边缘也非常锋利。经测定，距今已有3万年了，这差不多是世界上最早的石镞了。可以进一步推测，弓箭的发明还要更早。此外，利用材料弹性的事例还有很多，如能射弹丸的弹弓，吹管乐器中的簧片，弹棉花用的弹弓等。

在弹性材料的长期使用中，人们注意到材料形变的规律。最早的记载是《考工记》，在“弓人”中有“量其力，有三钧”的说法。东汉郑玄（127～200）的注释是：“假令弓力胜三石，引之中三尺，弛其弦，以绳缓擐之，每加物一石，则张一尺。”（《周礼注疏》）。唐初，贾公彦（生活在隋唐年间）又作了进一步的注释。他指出：“当‘弛其弦，以绳缓擐之’者，谓不张之，别以一条绳系两箫，乃加物一石张一尺，二石张二尺，三石张三尺。”（同上）其中的“两箫”是指弓的两端。郑玄和贾公彦的论证都是很朴素和简捷的，但却明确指出了外力与形变的正比关系。早期制作的多为三石（即90斤）拉力的弓，这可能是当时较为标准的弓。

西方对于弹性原理的实验和论证是比较晚的。1676年，英国物理学家胡克（Robert Hooke，1635～1703）以字谜形式发表了关于弹性力的定律。1678年，他公布了谜底，即“有多大的伸长就有多大的力”。

3. 力的知识的应用

简单机械是人类最早的发明之一，随着人们生产活动的不断扩大和认识活动的不断深入，机械的复杂程度也不断提高，并且对力学的发展产生了重要影响。

古人早就对杠杆原理有所认识并加以利用了。在《庄子》中记录了桔槔的使用情况，说明当时利用杠杆类的机械于农业生产是较为普遍的。另外，在商业活动中使用的各种衡器，也涉及杠杆类机械。中国古代的衡器主要有三类：天平，不等臂秤和提系杆秤。中国历史博物馆藏有公元前4世纪楚国铜衡两件，它们出土于安徽寿县（楚国后期的首都）。其中一件长为一尺（战国时的尺），分为10等分；另一件的刻度为半寸。制造这样的衡器可能依据工匠的丰富经验或杆秤公式（即杠杆原理）。墨家关于杠杆的实验研究对指导衡器的制造有一定的作用。

关于大气压的认识，南北朝时成书的《关尹子》中写道："瓶存二窍，以水实之，倒泻；闭一则水不下，盖（气）不升则（水）不降。井虽千仞，汲之水上，盖（气）不降则水不（升）。"唐代的王冰也进行了类似的探讨，他说："虚管溉满，捻之悬之，水固不泄，为无升气而（水）不能降也；空瓶小口，顿溉不入，为气不出而（水）不能入。"（《黄帝内经注》）这都是大气压的作用，前者的"瓶存二窍"和后者的"虚管"讲的是一种情况，只有一个出口就倒不出水来。而且只有一个小口的瓶子，将水迅速（"顿"）灌入瓶子也是不可能的。

西汉末年，丁缓发明了被中香炉。刘歆（？～23）在《西京杂记》中写道："长安巧工丁缓者……又作卧褥香炉，一名被中香炉。本出防风，其法后绝。至缓始更为之。为机环转运四周，而炉体常平，可置之被褥，故以为名。"（卷一）由刘歆的记述可见，被中香炉的机械特性非常好，它的各个圆环可以转动，炉体却保持着水平。香炉外有三个环，在内环轴上支撑灰盂，内环轴架在中环上，中环架在外环上。刘歆的记载也被后人转载，并在各代均有精美的被中香炉被巧匠们制造出来（图1-2）。



图1-2　唐代的熏香炉

张衡（78～139）对科学技术的研究有突出的贡献，在天文学、数学、物理学和机械制造等方面均有建树。在张衡众多的机械发明中，候风地动仪是一项非常了不起的发明，这也是世界上最早对地震研究的重大成果之一。

在《后汉书·张衡传》中记载："阳嘉元年（132），复造候风地动仪。以精铜铸成，圆径八尺，含盖隆起，形似酒尊，饰以篆文山龟鸟兽之形。中有都柱，旁行八道，施关发机。外有八龙，首衔铜丸，下有蟾蜍，张口承之，其牙机巧制，皆隐在尊中，覆盖周密无际。如有地动，尊则振，龙机发，吐丸而蟾蜍衔之。振声激扬，伺者因此觉之。虽一龙发机，而七首不动，寻其方向，乃知振之所在。验之以事，合契若神。"

根据这段记载，人们推断，"都柱"是一个上粗下细的立柱，在它的四周安装着8

个曲杠杆。由于“都柱”的重心高，对地震很敏感。一旦发生地震，震波传来使“都柱”因惯性作用而倒向震源的方向，并且触及相应的曲杠杆。在杠杆的作用下，这个方向的龙嘴被掀开，铜球滑出并落在蟾蜍嘴里。借助铜球的撞击声便可以判断出地震的方向。

在张衡制作地动仪之后，永和三年（138）朝西的一个铜球突然掉入蟾蜍嘴内。当时在洛阳城并未感觉到地震。后来陇西送来消息，那里发生了一次大地震。与地动仪所测方向、时间皆合。大家都对张衡的才能深为佩服。

二、光　　学

中国古代光学中在光的直线传播，光的反射和折射，光的色散的认识，以及关于小孔成像的实验等方面，不仅有众多的成果，而且具有较高的认识水平。

1. 光学的实验研究

中国古代在光学的研究中，成绩最多和最好的要算是墨家、沈括（1031～1095）和赵友钦（1279～1368）了。他们的研究成果分别记录在《墨经》，《梦溪笔谈》和《革象新书》中。

光线是沿直线传播的，古人对光的这个性质的证明主要有两个实验。一个是小孔成像，一个是关于反射镜成像的研究。

《墨经》里记载了世界上最早的小孔成像实验（图 1-3）。其中写道：“景倒，在午有端与，景长，说在端。景：光之人，照若射，下者之人也高，高者之人也下。足蔽下光，故成景于上。首蔽上光，故成景也下。在远近。有端与于光，故景库内也。”物体（这里是人）通过小孔成的像是倒立的，投射到屏上的一切光线均相交于针孔处一点（“端”），而原因也就在于小孔像“端”一样细小。进一步的解释是，光照在人身并从人身发出，这光像射出的箭一样。从人体下部射出的光线，射到高处；从人体上部射出的光线，射到低处。而从足部射向下方的光线被小孔下面的墙挡住了，足部射出的光线只能成像于屏幕高处；从头部射向上部的光线被墙挡住了，它只能成像于屏幕低处。物距由远而近，屏幕上的像即由小而大（“远近”是为了解释“景长”的）。物体通过小孔在屏幕上形成倒像的现象被称作“库”（“有端与于光”说明“在午有端与”）。

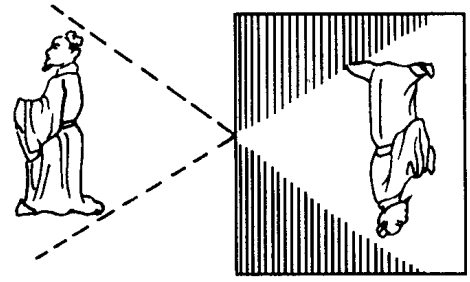


图 1-3　小孔成像原理图

沈括对小孔成像也有研究。他在《梦溪笔谈》中写道：“阳燧照物皆倒，中间有碍故也。算家谓之‘格术’，如人摇橹，臬为之碍故也。

若鸢飞空中，其影随鸢而移；或中间为窗隙所束，则影与鸢遂相违，鸢东则影西，鸢西则影东。又如窗隙中楼塔之影，中间为窗束，亦皆倒垂与阳燧一也。阳燧面洼，以一指迫而照之则正，渐远则无所见，过此遂倒。其无所见处，正如窗隙，橹枭，腰鼓碍之，本末相格，遂成摇橹之势；故举手则影愈下，下手则影愈上，此其可见（阳燧面洼，向日照之，光皆聚向内，离镜一、二寸，光聚为一点，大如麻菽，著物则火发，此则腰鼓最细处。）”

沈括对小孔成像的描述同墨家差不多，只是他从静态（楼塔）和动态（鸢）两方面加以观察，论述得更加全面了。此外，沈括提出了“格术”的方法，这是一种数学方法，因此，沈括的论述大体属几何光学。文中记述的“本末相格”，“本”就是物体，“末”就是它的像，而“相格”指物像正相倒。

在这一现象的研究中做出重要贡献的还有宋末的赵友钦。他是南宋皇族的成员，对光学很有研究，其主要内容收在《革象新书·小罅光景》中。为了纪念他关于小孔成像的实验，就将这个实验称为“赵友钦实验”。赵友钦在楼房内挖了两个直径约 4 尺的坑，名阱。左阱深 8 尺，右阱深 4 尺，左阱内可放一高 4 尺的桌子。阱上加盖，盖板有一孔。他用两块直径 4 尺的圆板分别放在二阱中，每块板上放 1000 多支蜡烛作为光源，楼板是像屏（图 1-4）。这样的设计是很巧妙很合理的，它的光源较为稳定，还可以控制和调节光源的亮度。

赵友钦的实验分为几个步骤来完成。

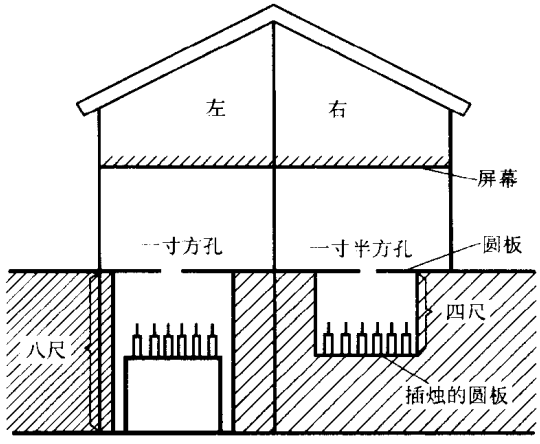


图 1-4　赵友钦实验装置

首先是保持光源、小孔和像屏距离不变，但两阱口盖子的小孔孔径不同，左板孔宽一寸，右板孔宽一寸半。实验时，左阱的蜡烛放在桌上；左右阱内的蜡烛数一样，并且都点燃。赵友钦发现，像的大小几乎不变，但二者浓淡不同，浓度不同与孔的大小有关。他认为，“千烛自有千景，其景随小窍点点而方”。他借助光线直线传播的原理来解释说：“烛在阱心者，方景直射在楼板之中。烛在南边者，方景斜射在楼板之北。烛在北边者，方景斜射在楼板之南，至若东西亦然。其四旁之景斜射而不直者，缘四旁直上之光障碍而不得出，从旁达中之光，惟有斜旁出窍而已。阱内既已斜穿窍外止得偏射，偏中之景千数交错，周遍叠砌，则总成一景而圆。”这就是说，每一烛光成像“点点而方”，但 1000 多支烛光“周遍叠砌”就可以形成一圆且倒的像了。两阱烛光所成的像有浓淡之差，是由于孔径不同而“所容之光”不同造成的。

接着赵友钦又改变光源、改变像距、改变物距，并作了总结。他指出：“景之远近

在窍外，烛之远近在窍内。凡景近窍者狭，景远窍者广。景广则淡，景狭则浓。烛虽近而光衰者，景亦淡；烛虽远而光盛者，景亦浓。由是察之，烛也，光也，窍也，景也四者消长胜负所当论者也。”

最后，赵友钦还改变孔的大小和形状，考虑的问题实际上是一个大孔成像的问题。小孔成像与大孔成像区别何在呢？赵友钦认为，“原尖小窍之千景，似乎鱼鳞相依，周遍布置；大罅之景千数，比于沓纸重叠不散，张张无参差。大则总是一阱之景，似无千烛之分，小则不睹一阱之全，碎砌千烛之景”。

赵友钦最后总结道：“是故小景随光之形，大景随空之像，断乎无可疑者。”这就是说，大孔成像（明亮部分）和大孔形状相同，小孔成像和光源形状相同。

赵友钦对实验的重视，是颇有些实证精神的，因此在中国古代物理学发展史上占有重要的地位，他的实验的确是中国物理学史上的一个首创。

我国古人很早就发明了铜镜，先秦时期的铜镜铸造技术已经成熟了。《考工记》中曾记有关于铸镜原料的合金成分，即含锡量多为50%，如此高的含锡量可以增加磨制后表面的光洁度。《淮南子》中还记录了铜镜的抛光方法，利用该方法可以使镜面清楚地显现出“鬓眉微毫”。

关于凹面镜成像，墨家的学者写道：“鉴笠，景一小而易，一大而正，说在中之外，内。”“分鉴：中之内，鉴者近中，则所鉴大，景亦大；远中，则所鉴小，景亦小，而必正，起于中燧正而长其置也。中之外，鉴者近中，则所鉴大，景亦大；远中，则所鉴小，景亦小，而必易，合于中长置也”。

由于凹面镜的内表面像一个“斗笠”，墨家便将它称为“鉴笠”。它所成的像只有两种：缩小的倒立像和放大的正立像，并且分别成在球心之外和之内（“说在中之外，内”）。墨家解释了“分鉴”的情况，即处在球心内外来照镜子的情况：物体处在球心之内时，物体离球心近些（“鉴者近中”），则物体照上去要大些（“则所鉴大”），形成的像也要大些（“景亦大”）；物体离球心远些，则物体照上去要小些，形成的像也要小些。这时像必定是正立的（“而必正”）。物体是从焦点开始（“起于中燧”），正立着往镜面方向挪动其位置的（“正而长其置也”）。由此可见，当时墨家已知凹面镜的焦点了，即“中燧”，这大概是从取火时的聚光点发现的。

物体处在球心之外时：如果物体离球心近些，则物体照上去要大些，这样形成的像也要大些；物体离球心远些，则物体照上去要小些，这样形成的像也要小些。在这种情况下，像必定是倒立的（“而必易”）。物体是在球心同自己的像重合（“合于中”）之后，再背着镜而挪动其位置。

最后谈到他们在球心附近看到的两种情况：“所鉴大”和“所鉴小”，这是说处在球心的观察者观看物体时的视角是大或是小，对应的像有两种情况：“景亦大”和“景亦小”。这个说法是不对的，因为像的大小取决于处在焦点的观察者观看物体时的视角。

从经文看来，墨家尚未发现凹面镜成的第三种像，即当物体处在球心与焦点之间

时，能形成放大的倒立像。这大概是因为墨家在观察凹面镜成像情况时，并未将像投在屏幕上，而是用眼睛直接接受像。

墨家对平面镜成像的研究与分析取得了重要的成果，他们认识到，物与像离镜面是等距的，特别是物与像的对应关系是点点对应。这不但揭示了像不会失真的原因，而且提出了一种分析方法。平面镜也可以组合起来应用。汉代的淮南学者曾设想："取大镜高悬，置水盆于其下，则见四邻矣。"（《淮南万毕术》）这种装置实际上是世界上最早的潜望镜。

在殷墟5号墓（"妇好墓"）发掘出的铜器中，有4枚铜镜，其中有一枚微凸。在河南安阳侯家庄1005号墓中也出土有微凸的铜镜。这些文物的科学意义是很明显的，它标志着从平面镜向凸面镜发展的过渡，甚至是飞跃。春秋战国时期，墨家也对凸面镜进行了研究。

墨家的学者写道："鉴团景一。""鉴：鉴者近，则所鉴大，景亦大；其远，则所鉴小，景亦小。景过正，估㓠。""鉴团"就是凸面镜，它所形成的像只有一种。墨家对这种像的解释是不正确的，然而所得的结论是正确的，即凸面镜所形成的像总是正的（"必正"），恒位于镜面的另一侧（"景过正"），估计比物体总是要小一些（"估㓠"）。

沈括在《梦溪笔谈》中写道："古人铸鉴，鉴大则平，鉴小则凸。凡鉴洼则照人面大，凸则照人面小。小鉴不能全视人面。乃复量鉴之小大，增损高下。常令人面与鉴大小相若。此工之巧智，后人不能造。比得古鉴，皆刮摩令平。"

《淮南万毕术》中有关于冰透镜记载，说当时有人曾"削冰令圆，举以向日，以艾承其影，则火生"。这是一种冰质透镜，它也可以用作取火的用具。但是，现在我们知道，冰透镜的制取是有条件的，使用它也难以持久，因此，应选取玻璃和水晶之类的材料制作透镜。

透光镜也称透光鉴，它其实并不是透镜，而是一种表面曲率不同的反射镜。这种反射镜的正面是普通的铜镜，可以照人面，背面通常是图案和铭文。当反射光束照射到屏幕上时，可以清楚地看到背面的图案或铭文。这也就是"透光"名称的由来。

传世最早的透光镜是珍藏在上海博物馆的四面镜子，据专家鉴定，它们均为西汉遗物。沈括曾收藏过一些透光镜，镜子的铭文"字极古，莫能读"（《梦溪笔谈》），可能是先秦之物。当然也可能是工匠仿古摹刻的字迹。

对于透光镜的研究，历来受到古今学者的重视。沈括对他收藏的透光镜进行了实验研究，他对所观察到的现象描述说："世有透光鉴，鉴皆（背）有铭文，凡二十字，字极古，莫能读。以鉴承日光，则背文（纹）及二十字皆透在屋壁上，了了分明。人有原其理，以为铸时薄处先冷，惟背文上差厚，后冷而铜缩多；文虽在背，而鉴面隐面有迹，所以于光中现。予观之，理诚如是。然予家有三鉴，又见他家所藏皆是一样，文画铭字无纤异者，形制甚古，惟此一样透光；其他鉴虽至薄者，皆莫能透，意古人别自有术。"（《梦溪笔谈》）沈括认为，铸镜时纹处较厚，冷却慢，收缩较大；无纹处

较薄，冷却较快，收缩较小。因此，细看上去，“鉴面隐然有迹”。沈括的看法对后世的影响较大。但是，沈括也看到另一种现象，为什么同样依法炮制的某些铜镜却不透光呢？

同沈括不同的是，元代吾衍提出了另一种说法——“补铸法”。他说：“假如镜背铸作盘龙，亦于镜面窍刻作龙如所状，复以稍浊之铜填补铸入，削平镜面，加铅其上，向日射影，光随其铜之清浊分明暗也。”（《闲居集》）明末清初的方以智支持吾衍的说法。

2. 大气光象和色散研究

相传，有两个小孩为一个光学问题而发生争辩，而这个争论曾经难倒了孔子。在《列子》一书中写道：“孔子东游，见两小儿辨斗。问其故，一儿曰：‘我以日始出时去人近，而日中时远也，’一儿以日初出远，而日中时近也。一儿曰：‘日初出，大如车盖，及日中，裁如盘盂。此不为远者小而近者大乎？’一儿曰：‘日初出则沧沧凉凉，及其中时热如探汤。此不为近者热而远者凉乎？’孔子不能决也。两小儿笑曰：‘孰为汝多知乎？’”这就是著名的“小儿辩日”的故事。

这场争辩的大致意思是说，一方认为早上的太阳“大如车盖”，中午时它又“裁如盘盂”。依据透视关系可知，对于同一物来说，远的物体看上去显得小，近的物体显得大。因此早上的太阳离得近，中午的太阳离得远。另一方则认为，早上的太阳“沧沧凉凉”，午时它又“热如探汤”。依据我们的冷热经验可知，对于同一热源来说，较近时人感觉较热，远时则感觉不到它的热。据此来判断，早上的太阳离得较远些，中午时离得较近些。

小儿判断日之远近的前提都是真实的，但是，为什么他们得到的结论却是矛盾的呢？这个问题可不一般啊！连孔子都不能做出正确的抉择，并且还受到两个乳臭未干的小孩的嘲笑。

最早对“小儿辩日”提出解释的是汉代的桓谭，他引用了别人的研究结论，认为太阳到达天顶时比处在地平时要远些，提出的理由与“小儿”的看法差不多。东汉的王充从视觉上加以说明，“日中光明，故小；其出入时光暗，故大。犹昼日察火光小，夜察之火光大也”。看来，王充从亮度上讲的理由是较合理的。张衡则认为，昼夜之间日地间距离是不变的。他的理由是，“日之落地，暗其明也。由暗视明，明无所屈，是以望之若大。方其中，天地同明，明还自夺，故望之若小。火当夜扬光，在昼则不明也”。张衡把早晨和中午太阳的变化归于视错觉也是有道理的。

晋代束皙研究“小儿辩日”后指出：“旁方与上方等。旁视则天体存在于侧，故日出时视日大也。日无大小，而所存者有伸厌。厌而形小，伸而体大，盖其理也。又日始出时色白者，虽大不甚；始出时色赤者，其大则甚；此终以人目之惑，无远近也。”这就是说，天体处在地平线时和位于天顶时离我们是一样远的。只是因为处在地平线

时，看上去天体在人的侧面，可以平视，就显得大些，因此，日出时看上去就显得特别大，实际上，太阳并无大小之别。只是由于对物体的感觉刺眼或不刺眼才产生了视觉上的差别，若感觉刺眼则物体就显得小，若感觉不刺眼则物体就显得大。同理，太阳呈白色时就不觉得大，呈红色时就显得很大。不只观察天体时如此，观察日常物体也有类似的感觉。

束皙接着指出："且夫置器广庭，则函中之鼎如釜，堂崇十仞，则八尺之人短，物有陵之，非形异也。夫物有惑心，形有乱目，诚非断疑定理之主。"这里，束皙又举出几个例子以说明他的论点。他认为，在一个大庭中，一只像牛一样大小的鼎，会让人觉得它好像一个小瓦盆。一个身高八尺的汉子走入一个高四、五丈的大门中，好像也变得矮小了。所以会如此，这都是一种相对差异造成的错觉。概括起来，束皙的分析可以用三种原因去说明"小儿辩日"的问题。①生理原因："所存者有伸厌"，也就是有不刺眼和刺眼之别。②亮度原因：色白（亮）和色赤（较暗）对视觉上大小的影响。③比衬原因："物有陵之，非形异也"，例如，当太阳处在地平线时有一些物体相衬托（"陵"），处在中午的空中时无物体相衬托，这就产生了物有大小的印象。

晋代姜岌对"小儿辩日"的研究结果同束皙是相同的，但是，他的侧重点有所不同。他认为："夫日者纯阳之精也，光明外曜，以眩人目故人视日如小。及其初出，地有游气以厌日光，不眩人目，即日赤而大也。无游气则色白，大不甚矣，地气不及天，故一日之中，晨夕日色赤，而中时日色白。地气上升，蒙蒙四合，与天连者，虽中时亦赤矣。"姜岌的议论是很高明的，他注意到大气光象的问题，并借此以解释太阳色赤和色白的原因。这种解释是较为科学的，符合近代大气吸收和消光理论。

虹是一种很常见的自然现象，古人很早就注意观察这种大气光象，唐代的孔颖达（574～648）非常科学地指出："云薄漏日，日照雨滴则虹生。"（《礼记·月令疏》）这是说，从云的缝隙射出的光线照在雨滴上就产生了虹。著名的道士张志和（约730～810）不仅认识到"雨色映日而为虹"，而且进行了一个著名的实验，即"背日喷乎水成虹霓之状，而不可直者，齐乎影也"（《玄真子》）。这是第一次用实验的方法来研究虹，并且还是第一次进行的日光色散的实验，但对于虹的形状总是弧状的解释是比较含糊的。张志和的实验研究将虹的研究提高到一个新水平上。这个实验还获得了较广的普及，据说，就连长安的儿童都能表演这种现象。

沈括曾出使北部的契丹，在辽河附近，当时雨刚刚停下来，天空出现了虹。他发现"自西望东则见"，反之"都无所睹"。对于虹的成因，他认为："虹乃雨中日影也，日照雨则有之。"朱熹的研究更为详细，他指出："虹非能止雨，而雨气至是已薄，亦是日色散射雨气。"这就明确指出虹是"日色散射雨气"。

说到色散的研究，中唐著名道士张果有一本修炼内丹的著作《修真历验钞图》，其中有一些图示，用以辅助说明。书中的"鸡子石英证含光图"讲到从白石英看到"映日则光玉矣"的"五色玄英"的现象，这种白石英是无色透明晶体，属六角晶系。从

图中可以看到，道士可能用白石英制作了三棱镜，而且这幅图可以看做是一幅光路图(图 1-5)。两条示意的入射光线是斜线，经过三棱镜后，它们改变了行进的方向，改为与三棱镜底表面垂直的方向。这说明道士可能注意到光线的折射现象。张果的图注是："石英色白，上有五色光。"张果对这五色光的排列也在"瑾瑜证神宝图"中作了图示。如图所示，道士将五色光一一画出。张果的图注是："从右第一行（此处漏排一字），而行浅红，三红，四黄，五黑。"这幅图说明道士记录了他们看到的实验现象，但是仍不够精确，特别是道士用五行的原理来说明色散现象显得有些牵强。尽管如此，这仍可以被看做是一幅记录色散的光谱图，这也差不多是世界上第一幅光谱图了（图 1-6）。《修真历验钞图》记录的色散现象是并不奇怪的。这里有两个原因可以说明，道士比较注意观察自然现象，像上面提到的张志和对虹的观察和模拟就是一例。此外，中国古代也很注意对晶体学的研究，在这方面积累了大量的材料，对于透明材料对光的色散现象应该是有所认识的，这里张果的记录是十分认真的。



图 1-5　鸡子石英证含光图

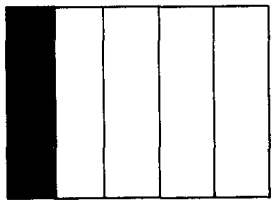


图 1-6　瑾瑜证神宝图

三、电和磁的知识

中国古代较早地开始积累电和磁方面的知识，像雷电现象的观察和摩擦起电的经验，磁石吸铁和指南的研究与应用都是早期研究的重要内容。特别是磁的研究与应用对中国古代的生产、军事、航海测量等技术的发展产生了重要作用，同时，在东西方科学与文化的交流上也发挥了巨大的作用。

1. 电的研究

中国古代关于电现象的研究内容是较为丰富的，其中关于摩擦起电和雷电现象的观察和解释尤为突出。

对于摩擦起电现象，东汉王充作了记载和解释。他说："顿牟掇芥，磁石引针……他类肖似，不能掇取者，何也？气性异殊，不能相感动也。"（《论衡·乱龙》）王充认为，摩擦过的玳瑁（"顿牟"）可以吸引芥籽，磁石可以吸引铁针，这都是因为芥籽和玳瑁，铁针和磁石具有相同的"气性"，因而能够相互感动；有些看上去相同的东西不能通过类似的办法使之相互吸引，这是因为它们的"气性"不同所致。王充将元气理

论引入静电（和静磁）现象的研究中，这些解释是较为合理的。东晋时的郭璞（276～324）也注意到上述现象，他将这种作用用“气有潜通”来解释。三国时期，吴国的虞翻还注意到“琥珀不取腐芥”的现象。

雷电是一种常见的自然现象，雷为其响，电为其闪，古代神话中将它们归为雷公电母所为。殷代的甲骨文和西周的铜器上分别可以见到雷和电二字。

史书中记载了公元490年会稽山阴恒山保林寺被雷电击中的现象，书中写道：“电火烧塔下佛面，而窗户不异也”（《南齐书·五行志》）。笔者注意到佛面与窗户的不同，但未能道出其原因。沈括对雷电的作用也有记载。他讲道：内侍李舜举家遭到雷电的袭击，“雷火自窗间出，赫然出檐，人以为堂屋已焚，皆出避之，及雷止，其舍宛然，墙壁窗纸皆黔。有一木格，其中杂贮诸器，其漆器银扣者，银悉熔流在地。漆器曾不焦灼。有一宝刀，极坚刚，就刀室中熔为汁，而室亦俨然。”（《梦溪笔谈》）人们注意到，遭到雷火袭击的房屋，木质的器物却平安无损，如漆器“不焦灼”；金属本是不易烧毁的，但却“熔流在地”或“熔为汁”。

南宋初的庄绰也讲到，南雄州的一次雷击，“大雷破树者数处，福慧寺普贤像亦裂，所乘狮子凡金所饰与像面皆销释，而其余采色如故。”（《鸡肋篇》）庄绰的记载同沈括的类似，并且提到了沈括的记载。明代的方以智讲得更加明确，他指出：“雷火所及，金石销熔，而漆器不坏。”

关于雷电的产生，先秦的慎到（前395～前315）首先提出了“摩擦生成说”，他指出：“阳与阴夹持，则磨轧有光而为电。”类似的看法还有淮南学者，他们认为，“阴阳相薄为雷，激扬为电”（《淮南子·坠形训》）。这就是说，阴阳二气彼此撞击产生雷，而相互渗透产生电。

王充的研究更加深入，但也是基于阴阳二气的相互作用。他指出：“盛夏之时，太阳用事，阴气乘之。阴阳分争，则相校轸。校轸则激射。”（《论衡·雷虚》）他还说：“试以一斗水灌冶铸之火，气激襞裂若雷之音矣。”（同上）冷水灌进冶铸的大火炉，相当于阴阳二气之争，同时产生了爆裂之声。王充的说法实际上是一种“爆炸起电说”的雷电理论。

后人对雷电的研究更为深入。如“电是雷光”（孔颖达：《左传疏》）；“电，阴阳激耀，与雷同气发而为光者也”。阴阳激发“其光为电，其声为雷”（陆细：《埤雅》）。阴气凝聚时将阳气包裹其中，使阳气爆炸，爆炸过程中“光发而声随之”（周密：《齐东野语》）。雷电是“阴阳之气，闭结之极，忽然迸散出”（朱熹）。朱熹注意阴阳作用的突变过程，说明雷电的形成是一个瞬间的爆发。

明代刘伯温（1311～1375）的解释要更全面些。他说：“雷，何物也？曰：雷者，天气之郁而激发也，阴气团于阳，必迫，迫极而迸，迸而声为雷，光为电。”刘伯温的说法基本上概括了历代学者的观点，其基础仍为元气学说。

2. 磁的研究

磁现象的认识比电现象的认识要早，差不多可以追溯到冶铁业创建之初，因为天然磁体也是一种铁矿石。

最早记载磁石的文献是《管子·地数》，其中写道，“上有慈石者，下有铜金”。“铜金”应是一种铁矿或与铁矿共生的矿物，利用磁铁可以找到它的位置。《吕氏春秋》中对磁石的吸铁性有了明确的记载，即“慈石召铁，或引之也”（《春秋纪·精通》）。稍后成书的《鬼谷子》中也有“慈石之取针”的话。磁石与铁的关系，高诱（生活在2～3世纪）注释《吕氏春秋》时指出：“石，铁之母也。以有慈石，故能引其子。石之不慈者，亦不能引也。”这是把吸铁性称作了“慈性”，所以，吸铁的石头就自然称作“慈爱的石头”。

磁石吸引物质只限于铁，这在《淮南子》中有所记述，即“若以慈石之能连铁也，而求其引瓦，则难矣”，“及其于铜则不通”。宋代的陈显微和俞璞对此从磁石的内部原因加以探讨和说明。陈显微指出，“磁石吸铁……阻碍相通之理，岂能测其端倪哉？”俞璞则认为，这是“神与气和，隔阂相通，犹如磁石之吸铁也。”（《古文参同契笺注集解》卷上）宋代的张君房也认为，“磁石吸铁，隔碍潜通”（《云笈七签》）。

除了磁石的吸铁性之外，磁石与磁石之间的作用也被人们发现了。这种性质被人们用于棋盘上的游戏，淮南学者曾对这种游戏作了记载。他们写道：“取鸡血与针磨捣之，以和磁石，用涂棋头，曝干之，置局上，即相拒不休。”（《淮南万毕术》）这种斗棋的“幻术”玩起来是十分有趣的。司马迁（约前135～?）的《史记·封禅书》中也记载了类似的游戏，说一位方士为汉武帝表演斗棋，他可以使棋子“自相触击”。

沈括对指南针的改进做出了重要的贡献。在研究磁针时，他发现，“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也”（《梦溪笔谈》）。这是关于磁偏现象的重要发现。

磁偏现象并非都是“微偏东”的。看风水的人对磁偏现象有更多的认识，他们在使用堪舆罗盘时有类似的记载。南宋的曾三异曾说道：“天地南北之正，当用子午。或谓江南地偏，难用子午之正，故丙壬参之。”（《因话录》）曾三异的意思是，在地磁子午线和地理子午线一致的地方，用子午正针是可以的。而在中国的东部地区，地磁子午线与地理子午线之间就有一个夹角，就要参用丙壬缝针。

明末刘献廷（1648～1695）注意到屏蔽的现象。他写道：“或问余曰：‘磁石吸铁，何物可以隔之?’犹子阿孺曰：‘惟铁可以隔之耳’，其人去复来曰：‘试之果然。’”（《广阳杂记》）虽然刘献廷未能对磁屏蔽现象做出较好的解释，但对这种现象的发现和记载仍是很有价值的。

3. 电与磁的应用

雷电的破坏作用是明显的，如何消除它的破坏作用，至少是降低它的破坏程度？这涉及到避雷技术。

在《汉书》中有“矛端生火”的记载，矛是有尖的，当带电的云层经过时，矛端放电会产生微弱的亮光。公元304年，成都王发动叛乱，陈兵邺城，人们在夜晚看到“戟锋皆有火光，遥望如悬烛”的景象（《搜神记》）。这种说法同《汉书》的记载差不多，但是，显然是夸大了。对于建筑的防雷措施，古代工匠已有一些得意之作。据唐代王睿的记载，汉代的柏梁殿遭火灾，有一位巫术家建议对建筑作一些改进。把瓦作成鱼尾状（“鸱尾”或“蚩吻”），放在屋顶就可以防止雷电的破坏（《炙毂子》）。

北宋时期，曾公亮（998～1078）曾利用地磁场作了磁化热铁片的实验。为了制作指南鱼，工匠利用磁化的方法把铁片剪成的鱼形磁化时，“以铁钤钤鱼首出火，以尾正对子位，蘸水盆中，没水数分则止”（《武经总要》）。这种做法是使鱼尾向北下倾几分，可使它更接近地磁场的方向，使磁化的强度能加强些。对于磁针的磁化问题，沈括记载了“磁石磨针锋”的方法。这种方法简便易行，效果也比较好。

曾公亮记载了借助人工磁化方法创制的指南鱼。关于收贮指南鱼，曾公亮指出要用“密器收之”。估计这是一种铁盒子，它形成封闭的磁路保存磁性。这里的“密器”很可能就是炼丹术士使用的器具。道士们大量使用磁体可能与他们作“幻术”表演有关，这促使他们进行有关磁体的研究。

指南针的发展有很长的历史。先秦的韩非子（约前280～前233）曾经提到最早的磁性指向器，他说：“故先王立司南，以端朝夕。”“司南”就是指南的装置。《鬼谷子·谋篇》中也有“郑子取玉，必载司南，为其不惑也”的说法，明确说明司南的作用是为了不迷失方向（“为其不惑”）。司南的样子如何呢？东汉王充给予了较为明确的说法，即“司南之杓，投之于地，其柢指南”（《论衡·是应》）。从这个说明可以看出，司南的形状是勺形；使用时放在地盘上；司南稳定后，它的长柄（“柢”）指向南。由于指南针的广泛应用，要求指南针的指向精度和稳定性不断改进，从而引起指南针的结构和形式不断得到改进。

北宋时，人们为改进司南的指向精度而创制了新的指南仪器——指南鱼。但由于指南鱼的磁性较弱，使它的使用价值有所降低了。

对指南针形制的改进，北宋沈括的贡献尤巨，他总结出了4种不同的装置，即“水浮多摇荡，指爪及碗唇上皆可为之，运转尤速，但坚滑易坠，不若缕悬为最善。其法取新纩中独茧缕，以芥子许蜡，缀于针腰，无风处悬之，则针常指南。”（《梦溪笔谈》）第一种装置是，把磁针横穿在灯心草上，而后放在水面上。这种方法的缺点是“多摇荡”而不稳定。第二种和第三种装置是，把磁针放在指甲和碗唇上。它们的优点是运转灵活，但缺点也是明显的，即非常不稳定（“坚滑易坠”）。第四种装置是，用

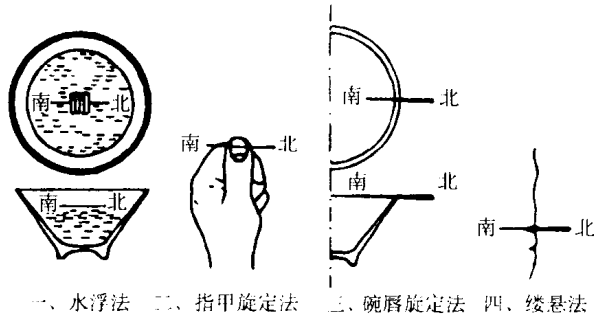


图 1-7 指南针四种形制

悬丝系住磁针来定向。它避免了上面的缺点，而且运转也很灵活，但是要选好悬丝。沈括指出，要选取新矿中的独茧缕。这是因为这种蚕丝纤维组织的弹性及韧性都很强且匀，不易扭转。同时用芥子涂蜡黏合独缕，不用结纽（而产生扭转）。这样就使指南针不因受干扰而转动不止（图 1-7）。

在南宋的文献中还记载了两种形制的指南器，即指南鱼（图 1-8）和指南龟（图1-9）。陈元靓（1100～1150）写道："以木刻鱼子，如母指大，开腹一窍，陷好磁石一块子，却以蜡填满，用针一半佥从鱼子口中钩入，令没放水中，自然指南。以手拨转，又复如此。"（《事林广记》卷 10）另一种形制是，"以木刻龟子一个，一如前法制造，但于尾边敲针入去，用小板子，上安以竹钉子，如箸尾大，龟腹下微陷一穴，安钉子上，拨转常指北，须是针尾后"（同上）。



图 1-8 指南鱼

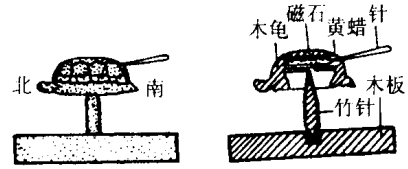


图 1-9 指南龟

鱼龟二制中，前者属"水针"，明清航海中仍使用这种指南针。巩珍于明代宣德九年（1434）所指出："斩木为盘，书刻干支之字，浮针于水，指向行舟。"（《西洋番国志》）这也是关于航海罗盘结构的最早描述。后者则可以看做是旱罗盘的始祖。旱罗盘可以克服水罗盘飘忽不定的缺点。罗盘是磁针与有分度的"地盘"组合起来的装置。地盘产生于汉代，这在上面已经提到。磁针与地盘的结合可能是在宋代，曾三异所说的"地螺"就是这种装置，他说，"地螺或有子午正针，或有子午丙壬间缝针"（《因话录》）。其中"螺"为罗的假借。地罗源于古代的地盘，所以，明代的航海罗盘还用以前的（地盘的）二十四式，因此也称为地罗经或罗经盘，简称为罗经或罗盘。旱罗盘不用水，因此也称作"旱针"或"干针"。

可能早在12～13世纪，中国的指南针就传入阿拉伯地区，进而又传到了欧洲。由于航海业的发展，欧洲人大大改进了指南针，使旱针的技术臻于成熟，并使它得到迅速的普及。可见，指南针为航海业的发展创造了条件，这为资本主义的发展带来了繁荣，为世界文明的发展做出了贡献。

四、声　　学

中国古人在声学的研究与发展中，做出了许多发现和发明。在音律的研究上取得了突出的成就，并对古代文化的发展起到了重要的作用。对于物体的发声与传声，共振与共鸣等现象也从理论和实验上做出了很好的研究。甚至“声学”一词也在宋代被确定下来（沈括曾讲：“此声学至要妙处也。”《梦溪笔谈》）。

1. 律学的研究

律学的内容包括产生乐音的有关法则或规律，律制的规定，定律器的制定，还要旁及与历法和度量衡的关系。简单地说，律学是综合声学、乐学和数学为一体的一门综合性学科。

律学是古代声学研究的重要内容之一，因为共有12个乐音，故称作“十二律”。十二律是律学研究的核心，其名称按音高顺序排列可写作：黄钟，大吕，太簇，夹钟，姑洗，仲吕，蕤宾，林钟，夷则，南吕，无射，应钟。与今天的音名比较，它们相当于C，$^{\sharp}$C，D，$^{\sharp}$D，E，F，$^{\sharp}$F，G，$^{\sharp}$G，A，$^{\sharp}$A，B。

五声的名称是宫，商，角，徵，羽；七声的名称是再加两个变声：“变徵”，“变宫”。《淮南子·天文训》把“变徵”叫做“缪”，“变宫”叫做“和”。

五声可能产生于商代。就制作能发出五声或七声的乐器的年代来说，20世纪80年代在河南舞阳贾湖发现的16支骨笛，其制作的年代可追溯到8000年前。这些骨笛是竖吹的，形状固定且制作精美，对其中一支保存完整无裂纹的骨笛进行测试，它可以发出六个音：宫、角、和、徵、羽、变宫，相当于do，re，mi，fa，sol，la，si。而这正是中国的传统音阶，如此高的科学艺术成就，真使人叹为观止！正如唐代杜佑(735～812)所说的，“自殷以前，但有五声”（《通典》）。

在C调正声音阶下，十二律与七声的关系如下：

律　名：	黄	大	太	夹	姑	仲	蕤	林	夷	南	无	应	清黄
今音名：	C	$^{\sharp}$C	D	$^{\sharp}$D	E	F	$^{\sharp}$F	G	G	A	$^{\sharp}$A	B	C′
音　阶：	宫		商		角		变徵	徵		羽		变宫	清宫

五声音阶体系虽然在4000～5000年前就已经确立了，但是，对它开展数学和物理学上的研究和论证，并且使其规范化却是从春秋战国时期才开始的。其中最重要的成

就是确立了一种重要的数学物理方法——“三分损益法”。它最早见于《管子·地员》。其中的记载是：“凡将起五音，先主一而三之，四开以合九九，以是生黄钟小素之首，以成宫，三分而益之一为百有八，为徵；不无三分而去其乘，适足以是生商；有三分而复于其所，以是生羽；有三分而去乘，以是生角。”（“小素”即“白练，乃熟丝，即小弦之谓”。《清史稿·乐志二》）与这段记载对应的具体操作是，将一空弦依次乘以2/3或4/3，即缩短1/3（“损一”）或加长1/3（“益一”），分割成不同的长度，这就产生出频率不同的乐音，具体的推算是：设黄钟宫音的弦长为$3^4=81$，徵音的弦长为$81\times 4/3=108$，商音的弦长为$108\times 2/3=72$，羽音的弦长为$72\times 4/3=96$，角音的弦长为$96\times 2/3=64$。

三分损益律是古代律学研究的一项重大成就。但是，也要看到，按三分损益律生成的“十二律”是一种不平均律，在转调上出现了困难。为了解决这些问题，由此揭开了长达2000年之久的寻找理想的平均律的篇章。

朱载堉（1536～1610?）是朱元璋的九世孙。在乐律学研究上取得重要的成就，估计他的十二平均律完成于万历九年（1581），最早见于《律学新说》。更为详细的论述见于《律吕精义》（1596）。这是一种相邻律间音程差数相等的律制。朱载堉的方法是：先把八度（比值为2）开平方，为八度的一半；再开平方（即开四次方），为八度的1/4；再开一次立方，为八度的1/12，比值为1.059463。

当把2开到12次方得到频率的倍律后，再把1.059463自乘12次，就得到十二律的平均倍数，具体的数字是（单位为尺）：黄钟（正律）为1.000000，应钟（倍律）为1.059463，无射（倍律）为1.122462，南吕（倍律）为1.189207，夷则（倍律）为1.259921，林钟（倍律）为1.334839，蕤宾（倍律）为1.414213，仲吕（倍律）为1.498307，姑洗（倍律）为1.587401，夹钟（倍律）为1.681792，太簇（倍律）为1.781797，大吕（倍律）为1.887748，黄钟（倍律）为2.000000。朱载堉所说的“倍律”比正律低八度。所列的数字表示振动体（弦）长度。朱载堉依据十二平均律确定了“均准”（即弦准），这是世界上第一个依据十二平均律建立的定律器，并且也是世界上第一个依据十二平均律建立的弦乐器。此外，朱载堉还制定了一套标准律管（36根，含三个八度）。由于竹质的律管有不均匀的缺陷，他选用了铜材。铜易加工，易于满足设计的要求。如果将这套律管排列连接起来，它们就可以构成一个十二平均律的管乐器组。

在制作律管时，朱载堉发现律管长度加倍或减半且管径相同时，律管发出的音有差别。为此，他根据实验和借助数学找出管口校正方法和数据。朱载堉同前人所用的方法不一样，他的方法是缩小管径来校正。因此，他的律管实际上是异径律管。朱载堉的思想和方法是非常科学的。

2. 声的性质的应用

关于声音的产生，宋应星认为，声“不能自为生”，须“两气相轧而成声”，“人气轧气而成声”。他列举了一些例证，如“冲之有声焉，飞矢是也；界之有声焉，跃鞭是也；振之有声焉，弹弦是也；辟之有声焉，裂缯是也；合之有声焉，鼓掌是也；持物击物，气随所持之物而逼及于所击之物有声焉，挥椎是也。”这些都是物体的振动或急速运动冲击空气而产生声的。

声音是如何传播的呢？气是传播声音的重要载体。然而，由于空气和空气的波动是不可见的，人们对于声波的认识是很晚的事情了。王充指出：“鱼长一尺，动于水中，振旁侧之水，不过数尺，大若不过与人同，所振荡者不过百步，而一里之外淡然澄静，离之远也。今人操行变气，远近宜与鱼等；气应而变，宜与水均。”（《论衡·变虚》）这就是说，普通大小的鱼在振动时，它所产生的波动不会传播得很远。人的言行也可使气产生振动，它产生的波动也不会传播得很远；气对于声源振动而产生的波动也就像水波一样。王充的波动思想在中国声学发展史上是具有重要意义的。

宋应星把声音传播同水面波动现象相类比，这是对王充关于声波理论的发展。宋应星认为，“物之冲气也，如其激水然。气与水，同一易动之物。以石投水，水面迎石之位，一拳而止，而其文（纹）浪以次而开，至纵横寻丈而犹未歇，其荡气也，亦犹是焉特微渺而不得闻耳”。（《论气·气声》）宋应星的表述更为肯定，对于声音来说，“其荡气也，亦犹是焉”。在论述炮弹爆炸的威力时，宋应星指出：“其时虚空静气受冲而开，逢窍则入，逼及耳根之气骤入于内，覆胆瘭肝，故绝命不少待也。”（同上）炮弹爆炸的破坏作用是冲击波产生的作用，宋应星的这种认识还是比较模糊的。

共振是一种重要的现象，它是在某一物体发生振动时，另一（些）物体也随之发生振动的现象。声学上的共振现象往往称为“共鸣”，这是当两个物体发生振动时，它们的固有频率相同或具有简单的整数比时所产生的现象。

最早对共振现象进行记录的是《庄子》一书。其中写道：“为之调瑟，废于一堂，废于一室，鼓宫宫动，鼓角角动，音律同矣。夫或改调一弦，于五音无当也。鼓之，二十五弦皆动。”（“徐无鬼”）其中的“废”是放置的意思。庄子并不是音乐家，他如何调出这种现象的呢？现在已经难于知道了。在音乐的文献中没有见到类似的记载，可见调出这样的弦音是比较困难的。

对这种现象，吕不韦（？～前235）曾组织人员进行研究。他们指出：“类同相召，气同则合，声比则应。鼓宫而宫动，鼓角而角动。”（《吕氏春秋·有始览》）高诱为此作注道：“鼓，击也。击大宫而小宫应，鼓大角而小角应，言类相感也。”（《吕氏春秋·有始览》注文）这段的解释既有定性的，也有定量的内容。定量的解释中，他们注意到声与声之间的相互作用；定量的解释是“大宫”与“小宫”，“大角”与“小角”的作用应成比例，它们相隔八度。淮南学者也注意到泛音的现象，他们指出：“徵音非无羽

声也，羽音非无徵声也。五音莫不有声，以徵、羽定名者，以胜者也。”（《淮南子·诠言训》）高诱的注释是：“徵音之中有羽声，而以徵音名之者；羽音徵，以著言者也。”（《淮南子·诠言训》注文）其中第3个“徵”字疑为“微”。淮南学者和高诱都注意到基音与泛音之间的频率关系，同时还注意到它们之间的强度关系。徵音与羽音的定名是以基音最强的为根据，即诸音的对比中，根据“胜”者或显“著”者来定其名。由此可见，早在先秦时期，人们就注意到徵音或羽音的泛音的存在，尽管在基音与泛音的比较中要以基音来命其名，但基音与泛音之间的共振现象是清楚的，至少在西汉时期已经明确认识到了。

除了弦线的共振，古人还注意到钟与钟之间的共振现象。如西汉文人韩婴写道：“古者，天子左五钟，将出，则撞黄钟，而右五钟皆应之……此音乐相和，物类相感，同声相应之义也。”（《韩诗外传》）“同声相应”的说法是对共振现象的物理解释。

古人还对“自鸣”现象多有记述。最先提出这个术语的是西汉的董仲舒（前179～前104），他指出：“物之以类动者也，其动以声而无形，人不见其动之形，则谓之自鸣也。”（《春秋繁露·同类相动》）董仲舒认为，同类的物体运动或振动会产生自鸣，由于它是以声音的形式表现出来，人们不能直接看到它的成因。他以琴瑟的弦音为例，认为“五音比而自鸣，非有神，其数然也”（同上）。可见，董仲舒已注意到自鸣的数理关系。

唐代的南卓讲述了一个共振故事。他讲道：太常丞宋沆“一日早于光宅寺待漏，闻塔上风铎声，倾听久之。朝回复至寺舍，问寺主僧曰：‘上人塔上铎，皆知所自乎？’曰：‘不能知。’沆曰：‘其间有一是古制，某请一登塔循金索，试历扣以辨之，可乎？’僧初难后许。乃扣而辨焉。寺众即言：‘往往无风自摇，洋洋有闻，非此也耶？’沆曰：‘是耳，必因祠祭考本悬钟而应也。’固求摘取而观之，曰：‘此姑洗之编钟耳，请且独缀于僧庭。’归太常，令乐工与僧同临之，约其时彼扣本乐悬，此果应之，遂购而获焉。”（《羯鼓录》）宋沆在众风铎之中辨认出一个特殊的声音，可见他的耳朵是极其灵敏的。这个风铎果然与众不同，它“往往无风自摇”。宋氏立刻就认识到，这是因为寺中祭祈时敲钟所为。他将此风铎拿到太常（这是朝廷的乐府机构）验证，进行了共振实验，即敲钟时看风铎是否应声而鸣。实验成功地证明了他的猜想。

沈括进行了更为严格的共振实验。他曾在一友人的家中看到一种共振的现象，并对此作了记录，他写道：“予友人家有一琵琶，置之虚室，以管色奏双调，琵琶弦辄有声应之，奏他调则不应，宝之以为异物，殊不知此乃常理。二十八调但有声同者即应。”（《梦溪笔谈·乐律》）其中的“管色”就是筚篥，古代的一种吹奏乐器。“双调”是古代燕乐的一个调名。为了进一步研究这种现象，沈括设计了一个实验，即琴瑟的弦发生共振的实验，他写道：“琴瑟弦皆有应声。宫弦则应少宫，商声则应少商，其余皆隔四相应。今曲中有声者，须依此用之。欲知其应者，先调诸弦令声和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦，则纸人跃，他弦即不动。声律高下苟同，虽在他弦鼓之，应弦亦震，此

之谓正声。”（同上）其中宫与少宫，商与少商就是弦长为 1∶2 的对应弦；“隔四相应”是弦长为 2∶3 的对应弦。前者两音相差一个八度，后者则相差一个五度。这就是说，某一弦的固有频率同另一弦的固有频率相同（1∶1）或成倍（分）数关系皆可发生共振。沈括还用“纸人”来演示其“相应”的情形。因此，沈括的实验是世界上第一个弦线共振实验。

3. 建筑声学效应

中国古代声学在建筑上的应用是很早的。这主要涉及到两种现象，即建筑的消声和扩声，以期获得最好的效果。关于建筑的扩声效应，较为有名的有两处，即北京的天坛和山西永济的莺莺塔。

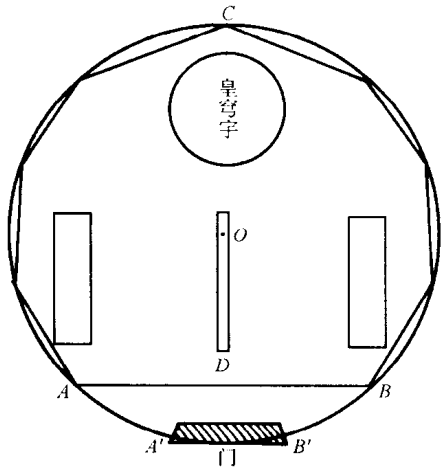


图 1-10　回音壁传声示意图

永乐年间，明王朝开始建造祭祈用的各种坛庙，在南郊建造了天坛。天坛的祭祈建筑是祈年殿和圜丘，辅助建筑还有斋宫和皇穹宇等。

回音壁是皇穹宇的围墙，高约 6 米，直径为 65 米。在皇穹宇的北边是供奉牌位的主殿，主殿与围墙之间最短的距离为 2.5 米（如图 1-10所示）。整个围墙的表面非常光滑，是很理想的声音反射体。当处于 A 位置的人贴近围墙小声说话，声音就会沿回音壁传至 B 位置的人。由于主殿的遮挡，声波沿回音壁传播受到一定的限制，当声波与围墙切线的交角小于 22 度，声音可沿回音壁递次反射到 B 处；如果大于 22 度时，声音传至主殿近处时就受到主殿散射，不能沿壁传播。所以 22 度是一临界角，小于它就可以发生全反射。

声音为什么不能从 A 径直传至 B 呢？这是由于声波通过空气直传按 $1/R^2$ 衰减，而沿墙壁反射按 $1/R$ 衰减，因此直传声很快就衰减掉了，而沿回音壁反射衰减较小，可以收听到经过若干次反射的声音。据实测证明，二者的强度相差 40 倍左右。

从主殿出来下台阶，踏上甬路数到第三块石板，站在上面拍手掌可以听到三声回音，为此这块石板就叫做“三音石”。为什么能听到回声呢？这是由于回音壁和东西配殿的作用的结果。当击掌的原声传至东西配殿和回音壁后，先后返回三音石。由于配殿的距离较近其反射声先抵达三音石，回音壁的反射声后抵达三音石（图 1-11）。

对话石（图 1-11 中的 A）是近年来发现的一种新的声学效应。这是皇穹宇前甬路上的第 18 块石板。当在这上面轻声说话时，站在东配殿东北角的同伴可以清楚地听到，并立即回话。其实他们两人彼此是看不见的。在对话石上还可以同西配殿的对称位置上的人对话。根据分析已弄清楚它的传声机理，即声波经过回音壁“有效墙壁”的反

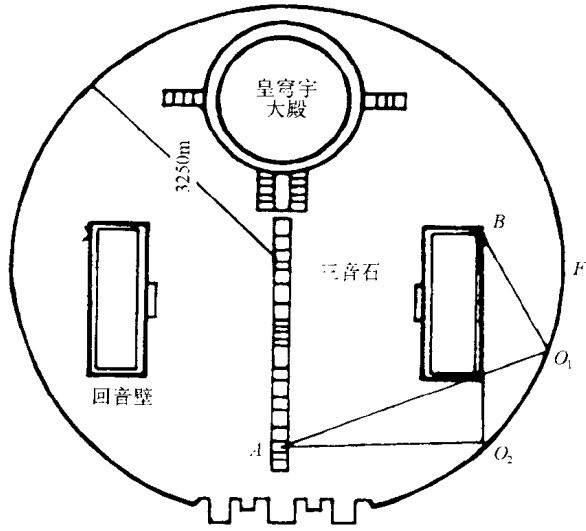


图 1-11　三音石和对话石回声示意图

射和会聚，在对话石和东配殿东北角（或西配殿西北角）之间传播。

圜丘位于皇穹宇的南面，是一个三层的圆形石台，最高层离地面约 5 米，半径 11.4 米，每层圆台周围有石柱栏板。站在中心的石板（“天心石”）上讲话，觉得好像是增音了。经过测试发现，从天心石发出的声音，由于石栏杆和（石）地面的反射作用，在天心石上可以接收到三个回波（但第三个回波很弱，可以忽略不计），其中两个回波经过与原声混合后，可以使声音变得更加浑厚和悦耳，强度也加大了（图 1-12）。

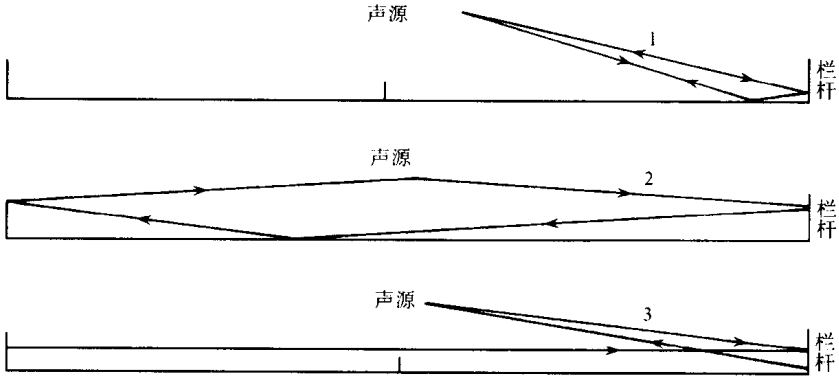


图 1-12　圜丘回声示意图

普救寺位于山西永济，寺中有一舍利塔，由于“西厢记”的故事，这座塔也被称作“莺莺塔”（图 1-13）。这是一座空心砖塔，初建于唐武则天时，后又重建于明嘉靖四十二年（1564）。塔高 13 层，高约 50 米。这座塔有一明显的声学效应，即可产生蛙

鸣般的回声，因此“普救蟾声”列于河东“清八景”之一。

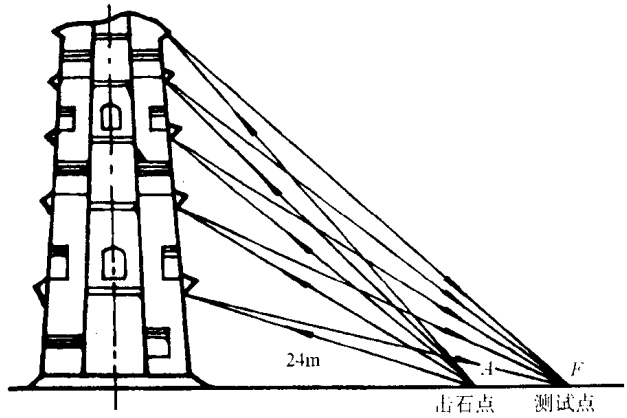


图 1-13　莺莺塔回声示意图

莺莺塔的回声可分为三种：当距塔 10 米处击掌或击石时，在此处听不到回声，而距塔 30 米外能听到它的回声，而且这回声好像是从砖塔上空传出来似的。在距塔 15 米处击掌，听到的蛙声好像从塔底传出。在距塔 20 米处击掌，可以听到从塔上空传来的蛙声，而且可以在一个较大的范围听到回声，这个范围差不多从塔前 4 米到 100 米处。此外，在塔前一侧击掌，在另一侧的对称位置也能清楚地听到回声，而别的地方则听不到。而距塔 2.5 公里的村庄的锣鼓声和歌声在塔下亦可听到，远处村民的说话声也可被塔聚敛放大。

形成这些效应的原因是，塔内部中空，相当于一谐振腔，可以将声音放大；塔外檐整体形成一内凹的弧形，有利于声波的会聚，并且每层塔檐的圆弧状按一定比例收缩，使声波可以会聚到一定的区域。因为有这样的塔内构造和塔外形状，才产生了如此奇妙的声学效应。

思　考　题

1. 我国古人对时间和空间的认识，有哪些重要观点？
2. 我国古代关于运动与静止、运动与时空的关系的论述有哪些？有什么意义？
3. 我国古代墨家关于力学研究的主要成就有哪些？试说明取得这些成就的原因。
4. 我国古代关于浮力的认识和应用有哪些？
5. 关于杠杆的认识和应用有哪些？
6. 最早的尖底瓶出土于何处？它的力学意义是什么？
7. 简述古代发明的一些重要机械，说明其力学意义。
8. 说明古代学者关于弹性形变的认识，以及他们所取得的成就。
9. 简述墨家在光学上的研究成就。

10. 简述我国古代各种反射镜和透镜的发展情况。
11. 透光镜是什么镜？它的原理是什么？
12. “小儿辩日”争论的内容是什么？这种争论有什么物理意义？
13. 张果的色散研究取得了哪些成果？
14. 张志和对于虹的研究成果有什么意义？
15. 我国古人对雷电的认识有哪些？他们是如何防止雷电的破坏作用的？
16. 我国古人对磁石性质的认识有哪些？
17. 我国古人对地磁现象有哪些重大发现？
18. 指南针的形制有几种？大致经历了哪几个阶段的发展？
19. 什么是律学？什么是十二律？十二律之间有何联系？
20. 什么叫五声音阶？它产生于何时？
21. 什么叫三分损益律？什么叫十二平均律？它们是如何发现和给出的？
22. 我国古代关于共振研究有哪些重要的成果？试举例以说明之。
23. 天坛有哪几种声学效应？

第二章　西方古代物理学成就

希腊文明是借助铁与字母建立起来的，他们从野蛮时代快步进入了铁器文明的时代。希腊人重视工商活动，由于地处地中海以东的地区，可以从事海上贸易，这使他们有机会接触到周边地区的多种文明。通过军事与工商活动，希腊人的殖民活动又不断开拓出新的地区。在良好的和自由的环境中，希腊人那种难以泯灭的探索精神，那种对新鲜事物表现出的好奇心，使得他们对早期科学和哲学的发展做出了重要的贡献，为世界文明渲染出极富特点的色彩。

古代希腊的历史大约经历了3个时期：①从公元前8世纪到前4世纪的城邦时期。这时的雅典不仅是众多城邦的盟主，而且也是科学文化发展的中心。这几百年间，出现了一大批著名的哲学家和科学家，如泰勒斯、毕达哥拉斯、德谟克利特、柏拉图和亚里士多德等。②从公元前4世纪到前2世纪的亚历山大时期。以亚历山大为首的马其顿人不仅征服了全希腊，而且建立了地跨欧亚非大陆的庞大帝国。在埃及还建立了“亚历山大里亚”城，在城内建立了博物馆和图书馆，聚集了大批优秀的科学家，开始了希腊最富创造力的新时期，科学文化的中心也自然地从雅典迁到了亚历山大里亚城。③从公元前2世纪中叶，希腊被罗马人征服，开始了罗马时期。初期由于政治动荡，科学文化处在停滞状态。当社会逐渐稳定之后，从公元2世纪到4世纪，亚历山大里亚的科学再度中兴。不过这时的科学家已失去原有的创造力，在重视实用的氛围中，研究活动多与实际生活的需求相关，满腹经纶的科学家多表现在对以往科学的注释上。

第一节　希腊时期关于物质本原的思想

早在雅典时期，一些哲学家已开始注意到前人考虑过的宇宙本原、万物组成、大地构造等问题。他们不断思考，反复辩驳，提出了各种观点，这些不同的观点构成了希腊物理学研究的重要内容之一。

一、元　素　论

在地中海东岸的爱奥尼亚人先后建立了10余个不同城邦，而最为典型的是米利都。这里不仅是一个贸易中心，工商业发达，而且随着经济贸易的发展，逐渐发展成为一个学术中心，创建这个学术中心的就是一位商人和社会活动家泰勒斯（Thales，前620～前550）。

由于经商，泰勒斯常与埃及人和巴比伦人接触，除了商业活动，他对埃及和巴比伦的科学知识发生了兴趣。泰勒斯认为，自己的学术活动不仅是对埃及和巴比伦知识的继承，而且也是对新时期的理性活动的开拓。他还创立了最早的关于理性科学和哲学的学派，这个学派进行了世界本原的研究，几何演绎的研究，地球处在空间状态的研究，以及生物演化的研究。

泰勒斯注意到在原始的神话中，大地往往被一些巨大的物体支撑着。泰勒斯对地中海沿岸陆地起源的问题进行思索，他认为，陆地不是被固体支撑着，而应被液体支撑着，即大地漂浮在液面上。此外，看上去千差万别的各种物体，它们应有同一的本原，他从神话得到启发，这本原应是水。万物起源于水，复归于水，任何东西都会产生和消灭，惟独水是长存的。

泰勒斯的学生阿那克西曼德（Anaximander，前611～前547）认为，世界本原不可能是水，他认为万物的本原必须在宇宙的斗争中保持中立，应是无任何规定性的“无限者”，阿那克西曼德的学生阿那克西米尼（Anaximanas，前585～前528）则将万物的本原看做是“气”。同泰勒斯一样，他认为大地并无固体支撑物，并且也无液体支撑物，而是“宛如漂浮在空气中的一片宽大的树叶”。他的老师阿那克西曼德则将大地完全分离出来，就像天上的星球一样，固定在旋转的天球上，大地本身是扁平的圆柱，不需要支撑，静止在天球的中心。这可以看做地心说的雏形。

爱奥尼亚地区另一城邦爱菲斯的赫拉克立特（Heraclitus，前540～前475）继续对米利都学派关于物质本原问题的探索，并将这个问题提高到一个更高的水平上，提出了自然界的辩证法观念。

赫拉克立特基本上继承了米利都学派的传统，也将物质本原归于可感觉的物质——火。但赫拉克立特认为，米利都学派的研究并未涉及世界发展变化的原因，不能说明物质运动的起源。因此他的研究重点在于运动变化的原因，而火是在永恒对立的相互转化中实现世界的统一性。赫拉克立特指出：“这个世界对于一切存在物都是一样的，它不是任何神所创造的，也不是任何人所创造的；它过去、现在、未来永远是一团永恒的活火，在一定的分寸上燃烧，在一定的分寸上熄灭。”世界没有开端，没有终结，处于永恒的运动变化之中。他还认为，同一事物中对立的两个方面的斗争产生了万物，在不断的斗争中，从统一的本质中产生出事物和现象的多样性：“一切转为火，火又转为一切，有如黄金换成货物，货物又换成黄金。”

公元前5世纪，希腊与波斯之间的战争爆发，爱奥尼亚被波斯帝国占领。希腊东部地区的科学和哲学传统被转移到其他地区，但是关于物质本原的探索并未终止。

西西里岛的一位王子恩培多克勒（Empedocles，约前493～前433）因不愿意接受王位而到处游学，专心研究科学与哲学，并接受了米利都学派的观点。米利都学派和赫拉克立特等人相继提出的水、火、气三种本原，对他虽有启发，但他并不同意。恩培多克勒认为，不能用单一的物质做万物的本原，应将这三种物质一同做万物本原，此

外再加上一种“土”。这样共有四种“元素”，即土、水、气、火，其中土、水、气代表物质的固态、液态和气态，火则代表颜色和温度等。

四种元素怎样形成万物的各种形态呢？米利都学派的学者们认为，元素是可变化的，可以变幻出各种物质。但恩培多克勒与此不同，他接受了毕达哥拉斯的说法，元素或本原本身是永恒的，因此他认为元素自身是不变的，它们的不同组合可以构成丰富多彩的物质世界。四元素之间的比例关系决定着物质的类别。同时恩培多克勒还说明了四元素相互结合的动力：爱与恨。

进入公元前4世纪，尽管希腊内部战争不断，雅典作为科学文化的中心，先后出现了苏格拉底（Socrates，约前470～前399）和柏拉图（Plato，约前427～前347）师徒，特别是柏拉图学园的建立，对希腊学术发展发挥了巨大的作用。然而在历史的进程中，这时的希腊正在进行政治、经济、军事上的统一，最终由马其顿的年轻君主亚历山大完成。同时，古希腊学派林立的科学与哲学学派也最终走向统一，而完成这一任务的是亚里士多德。

亚里士多德（Aristotle，约前384～前322）出生在希腊北部的一个城邦，靠近马其顿。17岁时就读于柏拉图学园，并在此学习与工作了20年之久。柏拉图死后，亚里士多德离开了学园，不久到了马其顿，任宫廷教师，教授王子亚历山大。公元前335年，亚里士多德回到雅典，创办吕克昂学园。亚里士多德的研究很广泛，建立了一个庞大的理论体系，也被称作“学术理论帝国”。他系统研究了逻辑学、政治学、伦理学、文学、天文学、物理学、生物学，著述甚丰，据说达到上千卷。

关于元素学说，亚里士多德对前人的研究进行了总结。他接受了恩培多克勒的四元素说，认为这些元素是构成世界万物的物质本原。但是，亚里士多德认为，冷、热、湿和干是更基本的“性质”，四元素是这四种性质两两组合而成的物质本原，湿与冷组合成水，湿与热组合成气，干与冷组合成土，干与热组合成火。这样，与恩培多克勒的学说不同，四元素不再是不变的，而是可以相互转变的，如加热水时，水中的冷为热所替代，水就变成气了。

亚里士多德还认为，天体与地上物体是由不同质料构成的。月层以下的物体皆由四元素构成，除了冷热湿干，它们还具有轻或重的性质，如土绝对的重，火绝对的轻，水与气的重只是相对的。在构成地球时，土居宇宙的中心，水与气分布其上，火则在最上。月层以上的天体则由第五种元素构成，这种元素叫做以太（“精英”）。

二、数的和谐思想

毕达哥拉斯（Pythagoras，约前560～前480）出生在萨莫斯岛，为躲避希波战争，他来到了希腊在意大利半岛的殖民城市克劳东。他在这里创建了一个学术团体——毕达哥拉斯学派。他制定了严格的戒律，研究成果不得私有，要惟一地归于学术团体，并

且不得将内部事务泄露到外界。

毕达哥拉斯学派在数学上的研究很广泛，并且取得了很大的成就。对于世界本原问题，米利都学派的元素观点是基于对感性世界的说明，毕达哥拉斯学派则发现了另一个世界。这是一个超越感性的世界，是一个“数”的世界。在这个世界中，正是数规定着感性的事物。数是世界万物的本原，是事物的实体和根基，数支配着世界，事物不过是“数”的和谐的表现。

毕达哥拉斯学派认为，有了一个一个的数目，才有了几何上的点，有了点才有线、面和立体，有了立体才有火、气、水、土等元素，进而构成万物。由这衍生的过程可以看出，数在物之先，数是事物的终极原因。此外，当时已发现 5 个正面体，毕达哥拉斯的门徒将此与四种元素相联系起来。火的基本形式为正四面体，气为正八面体，水为正二十面体，土为正六面体（即立方体），并将“以太”的基本形式定为正十二面体。对于天体，他们吸收并改造了阿那克西曼德的说法，认为球形是最完美的形状，天体的形状是球形的。毕达哥拉斯关于元素的结构差不多可被看做是古代结晶学的猜想。

除了天体的形状，关于天体的运动和数目，毕达哥拉斯学派根据数的和谐思想也提出了重要的观点。他们认为，宇宙是球形的，中心是一个火团，叫做“中央火”；宇宙中的各种天体都围绕着“中央火”做均匀的圆周运动；恒星处在天际最高处的圆顶，在圆顶下是水星、金星、火星、木星、土星、太阳、月亮、地球，它们都围绕“中央火”做圆周运动。由于“10”是一个特殊的数字，它为 1、2、3、4 的和，是一个完美的数字，因此天上也应有 10 个天体。这样他们设想还有一个叫做“对地”的星球。由于毕达哥拉斯学派曾研究过乐音和谐的规律，他们认为，10 个天体之间也存在一定的“和谐”关系，各个天体到“中央火”之间的距离，同和谐的乐音的弦长成整数比的规律是相似的，从而演奏出“天体的音乐”。此后，人们一直在探寻着“天体音乐”的规律，提示着宇宙的和谐，并成为后世研究天体物理学的一个指导原则。

三、原　子　论

在意大利南部另一希腊城邦爱利亚，兴起了一个新学派——爱利亚学派。在探讨物质本原的研究中，他们继承了毕达哥拉斯学派关于超感觉世界的思想，但是把“数”从这个世界中加以取消，代之以纯“存在”。巴门尼德（Parmenider，约前 540～前 470）认为认识的途径，一条为理智的途径，一条为感觉的途径。后来巴门尼德的学生芝诺（Zeno，约前 490～前 425）为论证老师的理论而提出了著名的“三悖论”，即“二分法”、“阿基里斯追不上乌龟”和“飞箭不动”，并借此否定运动的可能。

此后，芝诺的学生米利都的留基伯（Leucippus，约前 490～?）和留基伯的学生阿布底拉的德谟克立特（Democritus，约前 460～前 361）将毕达哥拉斯学派的观点和爱利亚学派的观点结合起来，提出并建立了原子论观点。

关于留基伯，现在对他的了解基本上是空白。德谟克立特喜欢旅行，先后到过巴比伦、波斯、埃及、埃塞俄比亚，甚至到过印度。他的研究范围很广，涉及哲学、伦理学、数学、音乐、技术等很多方面。在万物本原问题上，德谟克立特具有唯物主义倾向，但是他也认为，在感性世界背后，存在一个可凭借理智把握的超感性世界，并决定着感性的世界。

对于超感性的世界，德谟克立特部分接受了毕达哥拉斯学派的观点，不接受"数"的本原观点，但认为这个超感性世界的数学性质还是有意义的。他将微观的几何点同巴门尼德的"存在"结合起来，这种"存在"是"不可分的、不变的、球形的"；这种"存在"物太小了，以至于远非人的视力可及。他为这"存在"取名为"原子"，而其本义就是"不可分"。正是这些小小的原子可以形成某种几何结构，它们的排列组合形成了世界万物。这样，爱利亚学派的部分观点就被保留下来了。

德谟克立特原子论的大致要点是：

（1）宇宙间万物都是由原子构成的，而原子是不可分割、不可破灭的极小而结实的物质单元；

（2）宇宙间除了原子和虚空，不存在其他任何东西；

（3）原子从亘古以来就已存在，因为它既不能创造，也不能被毁灭，"没有一样东西是从无中来的，也没有一样东西在毁灭之后归于无"；

（4）原子在数量上是无限的，在形式上是多样的，他们在一个无限的虚空中永远处于涡旋运动之中，因此形成各种复合物。由于组成物体的原子在数量、形状（A与N）、次序（AN与NA）、位置（I与H）是不同的，所以物体彼此各异；

（5）原子在虚空中只有通过直接接触——压迫、撞击等，它们才能相互作用，超距作用是不可能的；

（6）任何事物都不是偶然发生的，"一切都遵照必然性而产生"，都是按照某种原因或规律进行的；

（7）灵魂也是由像光一样小的、光滑的和圆形的原子所构成的。

原子论学说认为，原子世界的对立统一是普遍存在的，如原子与虚空的对立统一，这是"存在"（原子）与"非存在"（虚空）的统一。虚空为原子的排列、组合与运动提供了必要的场所。此外，原子之间的碰撞是不可避免的，否则原子就保持原有的运动情况。

原子论在希腊科学与哲学发展中并未受到应有的重视。雅典的伊壁鸠鲁（Epicurus，前341～前270）还是发展了这一学说。伊壁鸠鲁认为，原子本身不仅有形状上的差别，而且还有大小和重量的不同；他实际上已经按照自己的方式知道了原子量和原子体积。此外，他还认为，原子在虚空中以同样的速度运动着，只要不遇到任何阻抗，它们就必然具有同一速度。但是，由于原子内部的原因，原子在运动中还会发生偏斜，

由于这种偏斜使原子产生涡旋运动。所以原子的运动不仅有必然性，也有偶然性，是必然与偶然的对立统一。他的这些思想是非常杰出的。此后，优秀的罗马科学家卢克莱修（Lucretius，约前 95～约前 55）也继承和传播了原子论。到 17 世纪，法国科学家伽桑狄（Pierre Gassendi，1592～1655）重新发现和传播了原子论。他们的研究与传播对道尔顿建立科学的原子论做了必要的准备和中介。

第二节　希腊时期经验物理学知识的积累

作为经验形态的物理学知识，早期的希腊人是不很重视的。到亚历山大时期，人们才对经验物理学知识的研究与积累重视起来，特别是托勒密王朝统治时期，随着亚历山大帝国的分裂，雅典的学术中心地位也被“分裂”。这时的雅典城依然是哲学中心，而亚历山大里亚城作为新兴的首府和世界贸易中心，与正在衰落的雅典形成了鲜明的对照，亚历山大里亚城已成为西方世界的科学中心。

亚历山大里亚城的科学家已不像先前的科学家和哲学家那样，一味地构造理想中的宇宙结构，凭借着直觉去判断事物变化的规律。亚历山大里亚的科学家要认真地观测，了解真实的天体运动；发现支配具体事物运动的规律，以指导解决各种实际问题。在这样的环境下，人们不断获得和积累经验形态的物理学知识，使带有实证色彩的物理学理论获得了快速的发展。

一、力　　学

在古希腊力学中，除了包含一些自然哲学的推论，对运动和力的现象也作了一些具体的研究。在这些研究中，亚里士多德做出了一定的贡献，但以叙拉古学者阿基米德（Archimedes，约前 287～约前 212）的功绩最为突出。

亚里士多德的力学研究主要集中在他的《物理学》一书。需要说明的是，这里的“物理学”并非现代意义上的物理学，其原意是“自然论”或“自然哲学”的意思。对于“运动原因”的探讨，主要是作为他的哲学原理的一种推论。

亚里士多德的力学理论具有动力学的性质。他将自然界的运动分为自然的和强迫的。自然运动是指重物垂直下落和轻物竖直上升的运动，这是由于物体在“内在目的”的支配下寻找其“天然位置”的运动，与物质所含的元素有关系。按照他的想法，每一物体都有其活动的自然领域或特定空间。例如，含土元素的重物的天然位置在地心，它是绝对的重；火元素的天然位置在天空，它是绝对的轻；气和水的轻重都是相对的。所以，重物下坠，烟气升腾，石头在水中下降，气泡在水中上升，都是一种自然运动。物体越重，下落得就越快；物体越轻，下降的倾向就越弱，其下落就必然要慢些。一般来说，物体下落的快慢与它的重量成正比。

强迫运动是借助推动者才能进行的运动，如果不推，物体就会停下来，处在静止的状态。亚里士多德断言，物体运动速度与施加的外力成正比，与在介质中受到的阻力成反比。那为什么射出的箭和抛出的石块在弓和推动者的作用早已结束后还会继续运动呢？亚里士多德的解释是：物体刚离开推动者时，由于它向前冲而排开部分介质，就在它的后面造成了一个虚空，自然界是不允许虚空存在的，所以周围的介质就立即填补这个虚空，这些介质对物体又形成了一个向前的推力，物体也因此而得以继续前进。那么它们的运动是怎样终止的呢？这或者是由于力逐渐减弱以至降为零，或者由于反作用，或者由于重力超过了这个力。这样，亚里士多德就把运动的根源放在事物之外，并把外力的作用与物体运动的速度直接联系起来了。

为什么下落的物体会越来越快呢？亚里士多德学派解释说，落体的加速运动与它接近自然位置的终点相关联，越接近终点，物体奔向天然处所的倾向就越强。在具体分析时，他们还提出另一种解释，即物体下落时，它上面的空气柱的重量越来越大，加强了强迫降落的作用，下面的空气柱则缩短，减小了对落体的阻力。

亚里士多德对数学、天文学和物理学（指现代意义下的物理学）的研究加入了过多的自然哲学内容，因此推导出了许多违背经验事实的结论，这些错误构成了亚里士多德理论体系中最薄弱的环节。当伽利略等人创建近代物理学时，自然就要向亚里士多德的运动理论发出攻击。

阿基米德是一位杰出的数学家和力学家。阿基米德的数学研究在欧几里得之后达到了那个时代的顶点。除了数学，阿基米德在物理学和工程学领域的贡献也很大。阿基米德年青时曾到亚历山大里亚学习数学、天文学和力学，由于发明“阿基米德螺旋提水器”和靠水力驱动的天象仪，阿基米德在当时获得了很大的名声。公元前 212 年，罗马攻陷叙拉古，阿基米德同时遇害。

阿基米德在力学上的主要成果是静力学中的杠杆平衡原理的论证和浮力定律的发现，这分别被载入他的《论平面的平衡》和《论浮体》。

在《论平面的平衡》中，阿基米德用演绎的方法探讨了物体的平衡。阿基米德提出了 7 条假设，并以此作为论证的出发点。在这些假设中，阿基米德说明和归纳了一些平衡或不平衡的情况或条件，以及一些平面图形中的重心位置或关系。从 7 条假设出发，阿基米德论证表述了 15 个命题，其中第 6 命题和第 7 命题表述了杠杆平衡原理，即“平衡时，距离与重量成反比”。在许多命题中，阿基米德还大量地讨论了一些规则或不规则的平面图形的重心位置或多个重心的关系。

阿基米德关于杠杆的研究具有很强的应用性，他声称：“给我一个稳定的支点，我就能把地球挪动。”在机械学研究中，阿基米德还发现了“黄金法则”，即用小力克服大力时，小力对应的距离长，大力对应的距离短。正是在这种理论的指导下，阿基米德发明了滑轮组。据说，阿基米德曾应国王的要求，利用机械装置将一艘巨船拖动。

在《论浮体》中，阿基米德提出了两条假设。假设一：“假定一种液体有这样的特

性：它的各部分都是均匀和连续的，推力较小的那部分液体被推力较大的那部分液体推开；如果流体沉入了任何物体[1]并受到任何别的物体压缩，则物体各个部分受到液体垂直方向向上的推力。”假设二：“假定物体在液体中受到向上的托力，这些力是沿着通过物体的重心的垂线（对液面）而向上的。”在此基础上，阿基米德提出了 9 个命题。

在这些命题中，阿基米德讨论了液面的形状，浮体受力情况。其中命题 5 和命题 6 讨论了漂浮时的“阿基米德定律”，命题 7 讨论了阿基米德定律的推论——“重于液体的固体置于液体中”的重量变化情况。其中“命题 7”的论证基本上就是判定王冠是否为纯金打造的实验。当然，也有人认为，阿基米德分测金块、银块和王冠排开水的体积，借此判定王冠的成色。后者的方法简单，但推理过程要复杂一些。

阿基米德定律的具体表述是：“如果把一个轻于液体的物体置于该液体内，则该物体应下沉到这样的程度，即被排开液体的重量正好等于该物体的重量”（命题 5）；“如果强行把一个轻于液体的物体浸于液体中，那么该物体将受到一个向上的托力，该托力等于液体重量与被该物体所排开液体的重量之差”（命题 6）。

阿基米德的力学研究方法具有“一般”的意义，特别是在几何学研究中，阿基米德将（力学的）实验与（几何的）推理结合起来，这就像在力学研究中，阿基米德将几何中的演绎方法引进一样。

阿基米德是如何将实验引入几何学研究中的呢？我们以阿基米德求取圆柱体与圆球体积之比为例。这项研究为阿基米德带来了极大的荣誉，阿基米德曾立下遗嘱，将此公式刻在他的墓碑上面。

这个圆柱体的高和圆截面直径都等于圆球的直径。它们的体积比是多少呢？在阿基米德的论证中，第一步是实际制作两个模型，由于质料相同，称其重量，发现圆球重量恰为圆柱体重量的 2/3，由此可知圆球体积为圆柱体体积的 2/3；第二步是从数学上证明（推论式的）结论。

这的确是一种有趣的和十分聪明的论证程序。正如他自己所说，“这种处理方法即便对定理自身的证明也不失其有用性”。由此可见，经验方法在阿基米德的论证中占据了十分重要的地位，这也同样可以说明，在物理学发展初期，经验方法也是十分重要的，也是论证程序的一部分。

二、光学知识

古希腊人对光现象的观察十分重视，欧几里得（Euclid，约前 330～前 275）就十分重视光学研究。欧几里得建立的优美的几何演绎体系，是古代数学乃至整个数学史上的最伟大成果之一。他还将几何学知识引入光学研究，并将光学看作几何学的一个

① 原译文如此，应为“物体沉入了任何流体”。——作者注

分支，所以我们将这部分光学称作几何光学。

在《反射光学》中他肯定了光是沿直线传播的经验现象，并从这个基本事实出发研究一些投影现象，指出光源大小与物体大小不同，会产生不同的投影现象。这种研究与中国先秦墨家的投影研究很相似。此外，关于视线的研究也是欧几里得光学的重要内容。欧几里得给出了关于视线的7个定义，其内容大致是："从眼球发出的光线以直线传播，视线之间有彼此离开的现象"（定义1）；"视线包围的图样是一个以眼球为顶点、以被看外围大小为底的圆锥体"（定义2）；"视线达到的范围则被看见，视线达不到的地方则看不见"（定义3）；等等。

关于反射现象的研究，欧几里得提出了反射定律，并将这个定律用于说明平面镜和球面镜的成像。他还知道凹面镜的聚焦作用，并假定其焦点在球心与球面之间。

关于反射定律，后来的希隆（Heron，前150～前100）利用另外的方法加以论证。这种方法是，以光程最短的原则为前提，光线从光源经镜面反射，达到一处形成像点，所经的路径是最短的。由此可以得到反射角等于入射角的结论。

关于折射现象，像苏格拉底和亚里士多德都有记述，但进行系统研究的是希腊天文学家托勒密（Ptolemy，100～170，也可能是埃及人）。他设计了一个巧妙的装置，其结构与今天实验室中作光折射实验的装置差不多。借此，托勒密测量了对应光线的入射角和折射角。他从这些数据得出，当入射角很小时，折射角近似正比于入射角；当入射角大时，二者是一非线性关系。

尽管当时的光学知识极其有限，人们还是试图发明一些技术，以应用之。传说阿基米德曾利用反射镜烧毁罗马舰船。

光学技术应用在天文测量上也有一些很好的例证。东西方科学家都试图利用光学测量的数据计算一些天文数据，例如测量日地距离与月地距离之比。这是著名天文学家阿里斯塔克（Aristarchus，约前310～前230）最先进行的。当月亮恰好为半圆（一半亮、一半暗）时，日月地构成的三角形为一直角三角形，其三边是：日地间的直线为斜边，月地间的直线为一直角边，日月间的直线为另一直角边。他测得月地边与日地边之间的夹角，进而得出，日地间的距离为月地间的距离的20倍（实际上为400倍）。这是第一个测量结果。

我们知道，在月食时，地球的影子会投射到月球上，阿里斯塔克根据这影子的大小，计算出月亮的大小（因为已知月地距离），得出月亮直径约为地球直径的一半（实际上为1/4），而太阳直径约为地球直径的10倍（实际上为100倍）。阿里斯塔克的研究是惊人的，其经验上的根据虽然还不够充分，但这足以使他提出一个更加大胆的假设——日心说，即地球围绕太阳旋转。当然，从光学上看，人们还不能观察到由于地球旋转引起的恒星视差现象，这使日心说陷入了困境。阿里斯塔克只得解释道，那恒星是无限远的。

在阿里斯塔克的计算中，测量问题未能解决得很好，这是他未能得到更好的数据

的症结所在。在这之后，阿基米德的好友、出生在北非的埃拉托色尼（Eratosthenes，前270～前196）做出了杰出的贡献。

在公元前240年，埃拉托色尼知道，在大约今天阿斯旺地区有一口深井。在夏至日的正午，太阳光是直射入井的，这时的太阳处在天顶。同时测量处在正南的亚历山大里亚城的太阳光线，这时太阳光线有一极小的倾斜，约为七度半，借助一简单关系，他算出地球周长约为39 000千米，与今测数据（40 000千米）相差无几。可惜的是当时无法验证之，过了1800年后麦哲伦实现环球航行后才得到证实。

埃拉托色尼的聪明才智当时盛名于世，据说他还在雅典学习时，就受到托勒密三世邀请，来管理亚历山大图书馆。埃拉托色尼到任后，还做了托勒密三世之子的家庭教师。

三、其他成就

希腊人对电和磁的了解是很少的。据说，泰勒斯知道琥珀被摩擦之后能吸引轻小物体，天然磁石能吸铁。到公元前30年，有人用铁矛去接触带电的鳗鱼，利用带电的铁矛电击患者的病灶，用以治疗痛风和慢性头疼。在一些文学作品中曾记载一牧人发现磁铁矿的故事。罗马时期的普林尼（Pliny，23～79）也记载了亚历山大里亚城一座建筑用磁铁矿建拱形屋顶，以便把皇后的铁铸像悬挂在空中。

对于磁石吸铁的解释，卢克莱修利用了原子论观点。他认为，磁体发射出细微的粒子流，撞击、驱散磁和铁之间的空气，形成为真空，铁原子则力求进入这些真空，因而它们之间就紧密地联系起来；至于其他物体，如金和木，则由于它们具有特殊的结构和性质，故不能被磁石所吸引。卢克莱修第一个论及磁铁的排斥作用，并用铁屑进行实验。他将铁屑放在铜盆内，当把天然磁石放在下面时，铁屑便在黄铜盆内“狂舞”。

亚里士多德把声音看做一种运动，他指出发声的物体碰撞空气使之在各个方面发生拉伸和压缩运动，从而传播开去；当它碰到障碍时，就像小球被反射一样产生回声。他还认为，如果管的长度加倍，管内的振动就要花两倍的时间。原子论者卢克莱修则把声音视为物质流，认为声音的多样性取决于声粒子本身的性质。

罗马建筑师从经验出发，提出了一些建筑上的声学问题，如声音的交混回响，回声和共鸣等。他们还把声音看成是沿无限膨胀的圆形向外发散，它同水波不同，可以向四面八方传播。

关于热现象，亚里士多德把热看成是先与物质元素的基本性质；而原子论者则认为热的感觉是物质流引起的，他们把火看成是由最轻、最滑、最活泼的粒子组成的。

在技术上，希隆制成一个“小涡轮”玩具，这是最早用蒸汽产生动力的装置。这是一个装有两个弯管喷嘴的中空的球，喷管与球的轴成直角，弯向相反的方向；当球

中的水被加热产生蒸汽，并经喷嘴喷出时，球体便绕轴转动。

总的来说，古希腊的物理学已经萌发，记录了一些经验知识，甚至还有像阿基米德那样的静力学体系。在研究方法上，人们主要是对自然界进行观察，并进行一定的抽象和推理，其理论带有猜测的特点。阿基米德和托勒密等人也开始进行一些严格的实验，将经验方法与几何学的研究结合起来。

第三节　中世纪阿拉伯和欧洲的物理学发展

公元前5世纪下半叶，在奴隶和隶农的不断起义、外部蛮族入侵的打击下，西罗马帝国终于灭亡，从此欧洲进入中世纪的时代。在罗马时代的晚期，亚历山大里亚的大批学者纷纷逃亡到雅典和君士坦丁堡，在此维护着希腊学术的余烬。此后，拜占庭帝国（中国古称为“大秦”）和阿拉伯帝国相继崛起，希腊文明一度流行，但并未有什么发展，他们只是保存了希腊文化，为欧洲的文艺复兴提供了有益的准备。

对于物理学，阿拉伯学者基本上是研究希腊人曾研究过的问题，提出了一些有价值的观点。这时的欧洲对希腊文化基本持否定态度。在公元后的第二个一千年开始后，实验科学开始复兴，古典科学知识也被人们重新认识。人们在重新研究运动学、光学、磁学时发现了一些新现象，并提出了一些新的见解。

一、阿拉伯人的研究工作

阿拉伯的物理学研究也像其他学科一样，普遍缺乏创新的动力，但是通过对古希腊知识的学习，还是掌握了许多旧知识。物理学研究工作中取得的主要成果是在光学和静力学上。

1. 阿勒-哈增的研究

阿勒-哈增（Al-Hazen，965～1038）出生在巴士拉（今伊拉克巴士拉）。据他自己说，他设计了一种机器，可以用于治理尼罗河的洪水。这引起了埃及哈里发的重视，并任命阿勒-哈增专门负责治水事宜。然而不幸的是，这位哈里发竟然要求阿勒-哈增马上造出这架机器，造不出来就要被杀头。因此，阿勒-哈增只得装疯，一直到这位哈里发去世为止。阿勒-哈增的主要兴趣是在光学上，并且在希隆和托勒密的基础上进行研究。

关于视觉，希隆和托勒密认为，人眼可以看到物体，是由于人眼可以发出光线的原因。阿勒-哈增的看法不同，他认为，光线是太阳或别的发光体发出的，然后照射到物体上才被人眼接收到这光线，并看到这些物体。此外，他还对眼睛的结构进行了研究，眼睛某些部位的名称，如“网膜”、“角膜”、“玻璃状体”、“前房液”等术语均出自于他。

关于反射实验，阿勒-哈增从希腊人那里知道了反射定律，并进一步指出，入射线、反射线和法线都在同一平面内。他还研究了球面镜和抛物柱面镜，发现平行于主轴的光线入射到球面镜时，会反射到这个轴上。他提出了著名的“阿勒-哈增问题”：在给定发光点和眼睛的位置的情况下，寻找球面镜、圆柱面镜或圆锥面镜上的反射点，这就是寻求物、像和镜的位置之间的关系。他对这一问题进行了详细复杂的讨论。他还了解了平凸镜的放大作用。

关于折射，阿勒-哈增重复了托勒密的实验。他使用的仪器是一个带有刻度的垂直放置的圆盘，其一半浸入水中，入射光线通过盘边小孔射入。此外，他讨论了简单的透镜问题（图 2-1）。

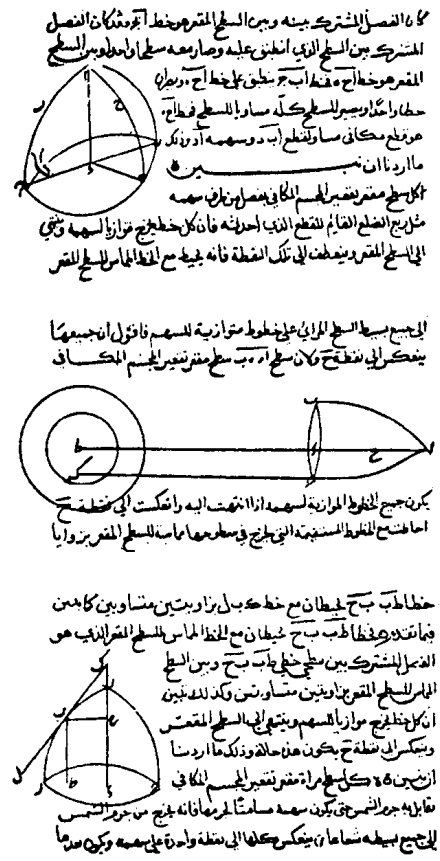


图 2-1　阿勒-哈增关于折射的研究

太阳与月亮接近地平线时，直径显著增大的现象引起了人们的注意。这个问题类似于中国古代的“小儿辩日”。阿勒-哈增认为，这是一种错觉，因为这时它们的大小是以距离较小的地面物体来作比较而估计的。他还研究了大气的折射现象，并断言黄昏的界限是在太阳从地平线到其下 10 度角的范围内，并由此推出大气层的厚度是52 000步。后来开普勒指出，此数据是不准确的。

2. 阿勒-哈齐尼的力学研究

阿勒-哈齐尼（Al-Khazini，12 世纪时人）发展了“比重”的概念，并做了实验测定，他使用一个带有向下倾斜的喷嘴的容器，把水灌入容器直到喷嘴口，然后把物体浸入容器中，同时量度溢出的水重，并与物体在空气中的重量比较，从而得出该物体的比重。应用这种方法，他确定了铸金、水银、铅、银、铸铜、锻铁、象牙、沸水和酒等一些物质的比重。

阿勒-哈齐尼在 1137 年写了《智慧秤的故事》，在书中描述了一根带有 5 个秤盘的杆秤。其中几个秤盘可以移动，可以用来测定在空气中和在水中物体的重量。他还发现空气也有重量，阿基米德定律在空气中同样适用。他指出，大气密度随高度的变化而变化，离地面越近，其密度越大。物体在不同的高度称量时，其重量也是不一样的。

这样，他就提出了一个重要的物理思想，物质的量与它的重量不是一回事，两者成正比关系。他还以路程与时间之比表示速度。

二、欧洲人的研究工作

阿拉伯在8～9世纪开始大量翻译希腊的经典著作。从10世纪中叶开始，欧洲一些学者将阿拉伯文的书翻译成拉丁文。到12世纪，翻译活动形成了更高的浪潮。这种翻译活动为后来的文艺复兴和科学革命准备了学术上的重要条件。此外，可与翻译活动相提并论的重要事件是大学的建立。12世纪，在欧洲建立了牛津大学、巴黎大学和波伦亚大学；后来人们仿照这三所大学又建立一些大学，同时在大学内又相继成立了一大批专门的学院，这些学院对中世纪晚期学术发展发挥了重大的作用。

1. 罗吉尔·培根的研究

罗吉尔·培根（Roger Becon，1214～1294）是13世纪杰出的科学人物。他出生在英国，曾在牛津大学学习和任教，后来又在巴黎大学工作。他深入钻研古希腊和阿拉伯的学术著作，同迷信和盲目崇拜权威进行了不懈斗争。他竭力主张通过科学实验来认识真理。他说："没有经验，任何东西都不可能被充分认识。""凡是希望对于在现象背后的真理得到毫无怀疑的欢乐的人，就必须知道如何使自己献身于实验。"他根据阿勒-哈增的书做过光学实验，并发明了暗室。他描述了光的反射定律和折射现象，研究了球面镜的作用和球面镜的像差，用光线在雨滴中的折射解释了虹的成因。他还根据平凸透镜的放大效应提出可以用这些镜片制成望远镜的设想。培根通过实验研究，发现了火药的成分。他还研究过蒸汽的作用，并预言可以造出不用人力桨的航船，不用马拉的自动行进的车，以及能在天上飞行的装置。可见，培根的思想远远超越了他的时代，并且写了很多著作。由于教会的禁止，这些书只能以一些手抄本的形式秘密传播。

约在1269年，皮埃尔·德·马里古特（Pierre de Maricourt）写了一本描述磁力实验的书。他认为，研究磁学的人必须"勤于动手"，以改正理智的错误。他把磁石做成一个圆球，用短铁丝研究它的磁性，从而发现了磁子午圈。他还了解到异性磁极相吸，同性磁极相斥；一根磁针断为两截，每一截又变成一根磁针；铁与磁石摩擦可以磁化。他认为磁针指向北极星，而不指向地球的北极，而且球形磁石能够自转。据说他还设计过永动机。

2. 冲力说

12～13世纪，欧洲人才从阿拉伯人的手中获得了亚里士多德的著作，并将这些书翻译成拉丁文，从而在欧洲又获得广泛的传播。许多人开始研究亚里士多德的运动学

理论，中世纪的欧洲人重新产生了对运动学的兴趣。

尽管人们对亚里士多德的权威表现出应有的敬意，但是，他关于运动的描述，关于维持运动的力、力的作用的论断，许多人还是表现出某些怀疑。其实这些疑问很早以前就有人提出。如6世纪时的斐劳波诺斯（Jahn Philoponus）曾注释希腊著作，斐劳波诺斯在分析亚里士多德运动理论时，批评了空气作为动力的说法，指出媒质作为强迫运动动因的不合理性，同时提出了一个“无形注入的力”，以取代作为动因的媒质。斐劳波诺斯的观点影响了其后的阿拉伯人和欧洲人，他们认为，媒质对于物体的运动只有阻滞的作用。然而，媒质是如何阻止物体的运动的，这是16世纪的伽利略等人才开始研究的。阿拉伯人研究斐劳波诺斯的理论后，他们称这种注入力为“倾向”。著名学者阿维森纳（Avicenna，980～1037）指出，倾向是一个永恒的属性，在无外阻力时，它永存物体内部。他还认为，假如虚空是存在的，物体作强制运动，它就会无限制地运动下去。这当然是难以想象的。因此阿维森纳也像亚里士多德一样，是否定虚空的存在的。阿拉伯学者的这种观点可能对欧洲学者产生了影响。

此外，当时人们也关心无阻力情况下物体的运动，或物体在真空中的运动，罗吉尔·培根和托马斯·阿奎那对无形的注入力是拒绝的。托马斯·阿奎那（Thomas Aquinas，1225～1274）认为，从理论上讲，真空中的运动应是有限的、连续的，这是因为空虚的空间至少跟填满物质的空间一样，是一个延展的、有维度的容积。虽然这种观点同亚里士多德的真空理论是不一样的，但对于真空中物体的运动是不是自然运动，仍是不明确的。14世纪的学者却接受了无形的力的说法，最初是巴黎学者开始研究这一说法，有的学者认为，这个无形的注入力在运动时是要消耗的，因此是个暂时的力；但在运动过程中，还保留着亚里士多德的部分影响，即周围的媒质（如空气）会接受这种无形的力，使空气在接受这种无形的力时，具有了一种对物体运动能起辅助作用的能力。

由于亚里士多德的运动理论是与他的元素理论相关的，但单元素物质只是一种假设，在自然界观察到的实际物体都是多种元素的混合，因此，物体运动通常应与物体中元素的混合比相关。亚里士多德已经注意到了这一点。但后世的哲学家讲得要更明确一些，他们认为，由于物体中重元素与轻元素的自然运动方向是相反的，如果物体下落，其中的重元素提供动力，轻元素提供阻力；反之物体上升时，轻元素提供动力，重元素提供阻力。

同样，人们也关注虚空中物体的运动，萨克森的艾尔伯特（Albert of Saxony）曾指出，两个大小不同因而重量不同的同质物体在虚空中将以同等速度下落。这与亚里士多德的理论很不同，艾尔伯特的理论已接近近代物理学的研究结论。这里的“同质”物体是导致以同一速度下落的关键，“重量”的因素是由于物体中不同元素物质的比决定的，一旦确定，具有这样元素比的物体就以同样速度下落，而不管这物体是更小些还是更大些。因此，下落速度大小只由物体内部因素确定。这样的落体速度就不

由总重量决定，而是由重元素与轻元素之比决定。200 年之后，伽利略在初步建立他的运动学理论时，也采用了类似的观点，但是伽利略用物体的比重取代了物体中不同元素比。对于虚空中物体下落是一种自然运动，或者自然运动只出现在虚空中，伽利略对此是默认的。

巴黎大学校长布里丹（John Buridan，1295～1358）发展了“无形力”思想，为建立“冲力”理论做出了贡献，甚至“冲力”一词也是由他提出的。布里丹把冲力想像成一个由初始推动者传给运动物体的力，它的强度用物体的速度与重量来量度。他认为，如果两个物体体积和形状一样，一个重而稠密的物体比一个轻而稀薄的物体具有更多的物质。借此他解释了一些运动现象，如形状和体积一样的一铁块和一木块以相同的速度运动，铁块运动的距离应大于木块的，这是因为越重的物体所具有的冲力越多，并能保持较长的时间，以克服外部的阻力。布里丹的这些研究与牛顿定义的动量已十分接近了。由于冲力是内在的力，这种观点与亚里士多德的观点是不同的，亚里士多德认为运动者皆有其外来推动者。

像阿维森纳一样，布里丹也认为冲力是永存的，但是，一旦推动者将冲力赋予运动的物体，它就会被作用于物体的阻力所消耗。布里丹暗示，如果能排除外部的阻力，物体将会永恒地运动下去。进而可以推断，这种永恒的运动可能是匀速直线运动，自然运动的倾向也难以改变它。这样，强迫运动的因素便被排除了，冲力可以使物体离开自然位置而做强迫运动。至于物体回到自然位置的倾向会受到加强还是削弱，布里丹是难以回答的。

布里丹的研究已涉及到惯性的思想，只是他也像亚里士多德一样，还不能设想一个永不停下来的直线运动。尽管如此，布里丹的惯性思想还是很有价值的，将惯性看做一种“内力”，这是后来牛顿也坚持的观点。

3. 运动学的研究

在分析落体运动时，布里丹也像其他学者一样，将重量作为分析运动的第一原因。由于在下落时物体的重量保持不变，下落的速度也应保持均匀；但由于重力可使冲力累增，而冲力可使物体加速。也就是说，重力可以使物体开始下落，同时也产生冲力的累积和增加；这种连续的增加，会导致物体速度的持续增加。由此可见，布里丹认为，重力可间接导致下落物体速度的增加，所以他的研究还未完全突破亚里士多德的范围。

注入力理论解释落体或其他物体的运动引起了极大的混乱。像布里丹、艾尔伯特和后来的达·芬奇都认为，加速下落的物体，下落时间越长，距离越长，速度也就越大；于是人们认为下落速度或是与时间有关，或者与距离有关，或者与二者都相关。甚至到了伽利略，他一开始也是将速度与距离联系起来。

14 世纪早期，在牛津大学的梅顿学院，也有一批学者开始对运动问题进行探讨，他

们定义了匀速运动和匀加速运动，后来伽利略就直接利用了这些定义。他们的匀速运动定义是，任何相等的时间间隔内通过相等的距离。对于变速运动，他们只定义了最简单的情况，即匀加速运动：在所有相等的任意长度的时间间隔内获得一个相等的速度增量。梅顿的学者还尝试定义瞬时速度。

利用这些定义，梅顿的学者提出了平均速度定理。这是中世纪物理学研究最重要的成果。他们写到，一物体或一个点，从静止开始均匀加速，在一定时间内会运行一段距离。如果同一物体在同一时间间隔内用等于它的匀加速时间间隔的中点的瞬时速度的速度作匀速运动，它将通过相等的距离。这是将一匀加速运动转变为一匀速运动进行计算。当时人们利用算术或几何的知识对这个定理进行证明之。

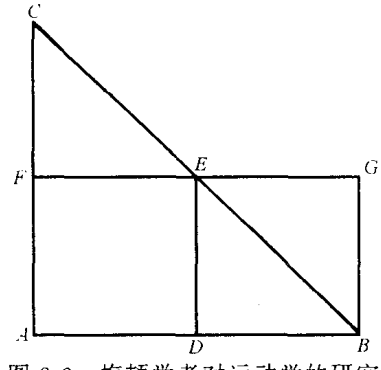


图 2-2　梅顿学者对运动学的研究

在这些证明中，巴黎的尼古拉·奥雷斯姆（Nicolas Oresme）的几何证明最为有名。在《论性质的构形》中，奥雷斯姆大约于 1350 年前后对平均速度定理给出了最完备的证明。如图 2-2 所示，奥雷斯姆用 AB 表示时间，用垂直于 AB 的线段表示物体的速度。物体从 B 开始运动，但 A 点时间内，速度均匀地增到 AC；而三角形 CBA 恰好是物体运行的距离。奥雷斯姆利用欧几里得几何的知识证明，三角形 CBA 与矩形 $AFGB$ 的面积相等。也就证明了平均速度定理。

奥雷斯姆的证明在 14～15 世纪的欧洲，尤其是在意大利是广为人知的。借助 15～16 世纪的版本，伽利略对奥雷斯姆的证明应是知道的，并且收入到《两门新科学》第三天对话中的第一个命题。从现在的研究来看，伽利略关于运动的一些最基本的概念和定理，与中世纪的研究是有联系的。甚至有些历史学家认为，过去认为在运动学上的创造都是伽利略提出和完成的，这种说法显然是过于夸大了伽利略的贡献。当然，这并非是否定伽利略作为近代力学的奠基者的地位。伽利略的工作主要是从中世纪那种“前科学”的状态走出来，使其语言规范化，并且将数学与运动学结合起来。尽管奥雷斯姆的研究是杰出的，但这与物体的真实运动无关，那只是他心灵中虚构的东西，而伽利略则着重于建立一个从逻辑上说是合理的有序整体，并且用于研究实际物体的运动。如匀加速运动并不只是一个纯粹的定义，而是可用于描述真实运动的理论的一部分。

总之，中世纪晚期的物理学研究已取得了很大的进步，并且为近代物理学的建立创造了一定的条件。

思　考　题

1. 简述古希腊元素论的发展，以及亚里士多德的见解。

2. 毕达哥拉斯学派是如何运用“数的和谐”思想来建立宇宙体系的？

3. 德谟克立特是如何建立原子论的？其要点是什么？伊壁鸠鲁对原子论的发展有何贡献？

4. 简述亚里士多德对物理学发展的贡献，他的学说对中世纪学者有何影响？

5. 阿基米德对物理学发展的贡献有哪些？

6. 古希腊的光学研究与应用有什么成就和特点？

7. 试比较纪元前西方和中国在物理学上取得的成就，并分析其原因。

8. 中世纪阿拉伯在物理学上取得了哪些成绩？

9. 简述罗吉尔·培根的物理学成就。

10. 冲力说的要点是什么？它对后世物理学的发展有何影响？

11. 牛津学者和巴黎学者在运动学的研究上有何贡献？他们的研究与伽利略有什么不同？

第二篇　经典物理学

第三章　科学革命和新科学观的诞生

第一节　资本主义的兴起与文艺复兴运动

经典物理学是在16世纪到17世纪中叶的近代科学革命中诞生的，它是由资本主义生产的发展以及资产阶级反对封建主义的政治、文化革命运动所推动的。

一、欧洲资本主义的兴起

在14、15世纪的欧洲，从封建社会内部逐渐形成和发展了资本主义的生产方式，在地中海沿岸一些城市中出现了资本主义的最初萌芽。资本主义发展商业、扩大市场、繁荣贸易的要求，直接推动了地理上的新发现和新航路的开辟。哥伦布（C. Columbus，约1446～1506）1492年首航巴哈马群岛；达·伽马（Vascoda Game，1469～1524）1497年绕过好望角抵达印度；麦哲伦（F. de Magellan 约1480～1521）的船队费时三年环球航行成功。地理上的新发现又促进了贸易和商品生产的发展，争夺市场和殖民地的战争也日渐激烈。贸易、航海、战争的需要，使欧洲的工业有了巨大的发展，同时也引起了生产技术上的一系列革命。14、15世纪已有了改良的脚踏纺车、脚踏织布机和水力、风力发动机。磨机和后来钟表的发展，逐渐产生了关于摩擦、动力测量、齿轮传动和匀速运动的理论。火药由中国传入欧洲后，射击武器得到发展，从而提出了枪炮构造、子弹弹道、空气对子弹的阻力以及抛射体运动的问题。采矿和其他生产部门的需要，推动了关于矿井通风、矿井排水、矿石碾碎和打击碰撞等方面的研究。造船业的发展，提出了船所受浮力、船的载重和坚固性等问题。13世纪兴起的眼镜业，为望远镜、显微镜的制造作了准备，并为光学的发展打下了基础。

这样，资本主义生产的发展，不仅提出了发展科学的需要和课题，也提供了科学发展所需要的大量可供观察的材料和制造实验仪器的物质技术条件。真正有系统的实验科学，这时才成为可能。

二、文艺复兴运动

在欧洲，资产阶级反封建的斗争矛头首先指向教会。因为天主教会是最有势力的封建领主，它是封建制度的精神支柱，严密地统治着社会生活和思想文化的各个方面。

1517 年，德国的马丁·路德（Martin Luther，约 1483～1546）举起“宗教改革”的旗帜，要求建立适合资产阶级需要的教会。这一运动极大地动摇了教会的精神独裁。

随着资产阶级政治运动的开展，在思想文化领域内也出现了一个反映新兴资产阶级的要求、反对封建思想统治和束缚的强大运动，这就是以恢复古代文化的面目出现的“文艺复兴运动”。这个运动首先出现于早先受到摧残、现在又逐渐恢复元气、资本主义最早得到发展的意大利，并且很快扩大到整个欧洲。在意大利北部，有闲知识阶层的城居生活，为文艺复兴的诞生提供了一个理想的环境。1453 年，君士坦丁堡的陷落，大批东罗马帝国的知识分子携带着古代希腊、罗马的书籍、手稿和文献流亡西欧各国，促使了这一运动的迅猛发展。

新兴资产阶级从古典文化中找到了可以用来反对封建文化的武器，即其中包含着的自由探讨的精神、明快的自由思想以及“古典学问”所带来的进行各种各样研究的动力。他们从古典文化中吸取养料，以创造资产阶级的新文化，为发展资本主义开辟道路。

他们宣扬“人文主义”，提倡人权，反对神权，提倡思想自由，要求把人的思想、感情和智慧从教会神学的束缚中解放出来；鼓吹尊重人、关心人，以人为中心，要求重视现实生活和个人的幸福。

人文主义重视人与自然的统一，积极倡导对自然的研究，要求用知识和教养去同愚昧和世俗的恶习斗争。总之，思想的解放，对实践经验的重视，成为当时科学起飞的思想基础和认识基础。

三、新文化精神的代表——达·芬奇

从 15 世纪起，用新的、进步的世界观去代替经院哲学世界观的必要性，越来越深入到先进人物的思想中，文艺复兴运动创造出了一种气氛，使个人的天才能够自由地充分发挥出来，从而使可与古希腊相媲美的伟大成就的出现成为可能。这是一个需要巨人而且产生了巨人的时代。达·芬奇就是这些巨人中的一位杰出的代表。

列奥那多·达·芬奇（Leonardo da Vinci，1452～1519）是个多才多艺的天才，14 岁时就开始学习绘画。他从结识的艺术家和学者那里受到人文主义思想的熏陶，积极投身到新文化运动中去。他把绘画艺术和科学研究密切结合起来，通过绘画深入研究人体解剖、动植物以及力学、光学、地质学、数学等多方面的知识，力求成为“认识自然和模仿（改造）自然的巨匠”。他是画家、雕刻家、音乐家、工程师、物理学家、数学家、生物学家和哲学家，在当时的每一学科领域里，他都取得了极高的成就。

达·芬奇把观察和实验当作科学的独一无二的真正方法，他认为“智慧是经验的产儿”，凡不是从经验里产生并受到经验检验的学问，都是虚妄谬误的。他同样重视数学和理论的作用，认为人类的任何探讨，如果不通过数学的证明，就不能说是真正的

科学。他说："热衷于实践而不要理论的人好像一个水手上了一只没有舵和罗盘的船，拿不稳该往哪里航行；实践永远应当建立在正确的理论上"。

达·芬奇从实用方面进行科学研究，这使他的研究工作富有现代精神。他对冲击过程进行过一些观察，初步表述了惯性原理。他研究过材料强度问题和抛射体的轨迹，提出了运动合成的概念。他运用虚速度方法证明了杠杆原理(图 3-1)：长为 L 的长臂被一个小重量 w 以速度 V 迅速地向下拉时，另一长为 l 的短臂就缓缓地以速度 v 把较大的重量 W 向上举；由于没有运动的得失，所以两端的重量和速度的乘积应相等，即

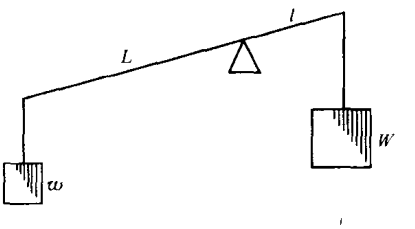


图 3-1　达·芬奇关于杠杆原理的证明

$$wV = Wv$$

由于 $V : v = L : l$，所以

$$\frac{w}{W} = \frac{l}{L}$$

即重量与臂长成反比。

达·芬奇重新发现了阿基米德的液体压力的概念，提出了连通器原理。他用染色的水，研究了液体的流动。他从水面波谈到空气中的波，并认识到光也有许多类似的特点，因而波的理论也可以应用于光。通过绘画实践，他研究过光和影的定律，研究过眼球的构造，并说明了像是如何在视网膜上形成的。

在机械学方面，达·芬奇绘制过许多机械图，研究过水力、热力动力机，并试图从减少摩擦力和减小机械部件的磨损来提高机械效率。他曾设计制造过一种永动机，但很快就得出了永动机不可能实现的正确结论。

此外，在天文学、地质学和生理解剖方面，达·芬奇都取得了很高的成就。他遗留下的手稿多达7 000余页，他是近代欧洲实验科学的先驱者之一。可惜他的手稿迟至18 世纪末才被整理出来，未能在当时充分发挥出推进科学发展的重大作用。

四、近代自然科学在斗争中诞生

资产阶级反对封建教会的政治、文化运动的一个重要成果，是近代自然科学的兴起。恩格斯指出："资产阶级为了发展它的工业生产，需要有探察自然物体的物理特性和自然力的活动方式的科学。而在此以前，科学只是教会的恭顺的婢女，它不得超越宗教信仰所规定的界限，因此根本不是科学。现在科学起来反叛教会了；资产阶级没有科学是不行的，所以也不得不参加这一反叛"。

由于自然科学证明了物质世界有其自身的客观规律，证明了创世说的荒诞无稽，所

以沉重地打击了宗教神学，因而受到教会的残酷镇压。近代自然科学历史的最初篇章，就是用坚持科学真理的自然科学家的生命和鲜血写出来的。布鲁诺（Giordano Bruno，约1548～1600）由于宣传地动说而遭监禁和折磨，最后被活活烧死；西班牙医生塞尔维特（Michael Servetus，1511～1553）即将发现血液循环过程时，被法国新教首领卡尔文（Jean Calvin，1509～1564）处以火刑；意大利思想家康帕内拉（T. Campanella，1568～1639）一生坐过30年死牢；伽利略（Galileo Galilei，1564～1642）由于宣传哥白尼学说而被判终身监禁；等等。这充分表明了宗教与自然科学的对立。所以，当时自然科学是在普遍的革命中诞生的，它要为争取自己的生存权利而斗争。

第二节　天文学的突破与科学革命的发生

16世纪中期，哥白尼提出了日心说。这是自然科学向神学的第一次严正挑战，标志着自然科学从神学中独立出来。

一、哥白尼的日心说的提出

尼古拉·哥白尼（Nikolaus Copernicus，1473～1543）是波兰伟大的天文学家。他生于托伦城一个商人家庭，18岁时入克拉科夫大学学习数学和天文学；1496年，到文艺复兴的中心意大利留学，阅读了大量古希腊学者的著作，受到了其中有关地球运动的思想启发，为他创立新的宇宙体系奠定了思想基础。哥白尼回到波兰后，在担任牧师职务期间坚持进行天文观测和新的宇宙体系的研究。由于担心教会谴责，他迟迟没有公开发表自己的见解。1530年，哥白尼才将他的学说写成一个小册子《纲要》，以手稿形式在友人中流传。直到1542年，在他生命垂危之际，才同意将他的主要著作《天体运行论》交付印行。1543年，在他病逝之前的病床上，他看到了这部巨著的印刷本。

哥白尼是一个深受毕达哥拉斯学派思想影响的人，他只想能够用尽可能少的匀速圆周运动的组合来构造一个宇宙体系，比托勒密体系更好地体现出古希腊天文学家提出的原则。在《天体运行论》的序言里他写道："我对传统数学在研究各个天体运动中的可疑之处思索了很长时间之后，对于哲学家们不能对造物主为我们造成的美好而有秩序的宇宙机构提出正确的理论而感到气愤。"他从古人的著作里发现，有人把周日运动归之于地球自身的运动，也有人把周年运动归之于地球自身的运动。哥白尼正是受到这种启发才开始考虑地球的运动，以便尝试一下"是否假定地球有某种运动能比假定天球旋转得到更好的解释"。

在《天体运行论》的第一卷中，哥白尼明确地把地球从宇宙中心的位置排除开去，把它降为普通行星的一员。他断言，地球自身有三种运动，第一种是"地球自西向东绕轴昼夜自转"；第二种是"地心同地球上的一切的周年旋转，在金星与火星轨道间的

黄道上从西向东运行”；第三种是“倾斜面的运动”，即赤道面或自转轴相对于日-地联线的运动。哥白尼认为，古人为了建立一种地球静止于宇宙中心的体系而把地球自身的三种运动加给了每一个天体，这使他们的宇宙体系人为地复杂化了。他质问道：“为什么不承认天穹的周日旋转只是一种视运动，实际上是地球运动的反映呢?”哥白尼正是依据地球的三种运动与各个天体固有的自身的运动，简单而统一地解释了从地面上观察到的天体的周日旋转，太阳和月亮运动的快慢变化，五大行星运动中的逆行、留和偏南偏北等复杂现象。

这样，哥白尼便提出了一个以太阳为中心的宇宙结构体系。在这个体系中，天体从远到近的顺序是：恒星天球，它本身是不动的；土星，30 年转一周；木星，12 年转一周；火星，2 年转一周；地球和同它一起的月亮一年转一周；金星 9 个月转一周；水星，80 天转一周。他还得出了各个行星到太阳的相对距离。

哥白尼所构造的无疑是个崭新的宇宙体系，但是它本身还是具有明显的缺陷的。哥白尼仍然把匀速圆周运动看作是最完美、最和谐的运动，因而坚持以偏心轮和均轮-本轮的组合来说明宇宙的结构，这使他的体系失去了更彻底的简单性。但是，同托勒密体系相比，哥白尼体系具有以下明显的优点：

第一，哥白尼体系有着内在的简单性。他将托勒密体系的 80 多个圆减少到 34 个，因而提供了用圆周和匀速运动解释天体现象的最简单的几何方案，从而也使天文学上的测算变得更加容易了。

第二，哥白尼体系具有一种内在的谐和性。这个体系把每个行星轨道的大小、运动的速率和排列顺序关联起来，形成一个紧密有序的整体，并且把中心位置给予了太阳这个最大、最亮的光和热的赠送者，从而使宇宙显示出一种令人赞叹的对称性。

最后，哥白尼体系还提出了许多重要的物理学问题。在谈到他的体系与托勒密体系的根本差别时，他清楚地表述了运动的相对性的思想。哥白尼的工作的最重要的意义，在于它为理解行星的运动开辟了一条新的途径——动力学的途径。这个体系启发了开普勒去发现行星运动的真实规律，进而又为牛顿引力理论的完成奠定了基础。

哥白尼的地动学说受到了意大利哲学家布鲁诺的热心支持和宣扬。布鲁诺提出“怀疑原则”来反对教会权威和神学教条，坚持通过经验和理性来获得科学真理。他完全抛弃了太阳是宇宙中心的观点，认为宇宙是无限的，在太阳系之外还有无数的世界。他的这些观点比哥白尼学说更为有力地冲击了宗教关于宇宙有限、人类中心、地球中心的教义，所以遭到教会的残酷迫害。他被开除教籍而流亡国外；1592 年，他被阴谋骗回意大利被宗教裁判所逮捕下狱，并在 1600 年 2 月 17 日被活活烧死于罗马鲜花广场。在听到判词后布鲁诺说：“你们心中的恐惧比我听到判词还要高出百倍，我愿为殉道而死!”

二、开普勒行星运动定律的提出

哥白尼的新体系在天文测算的精确度上，与托勒密体系并无多大的提高。近代早期最重要的天文观测工作，是由丹麦天文学家第谷·布拉赫（Tycho Brahe，1546～1601）进行的。

第谷出生于一个贵族家庭，少年时就对天文学产生了兴趣。1576 年，在丹麦国王的资助下，在哥本哈根海峡的一个小岛上修建了一座完善的天文台。第谷增大了观测仪器的尺寸并安装在坚固的基础上，给仪器进行了精密刻度，从而提高了仪器的精密度、稳定性和长期反复观测读数的可靠性。第谷还对大气的折射效应进行了修正，使他的观测的准确性远远超过前人的几十倍到上百倍。在 21 年的观测中，各个行星角位置的误差仅为 2′。第谷虽然了解哥白尼体系的优点，但是又认为地动思想是不能接受的，因此他的观测所依据的是一个折衷的宇宙体系。在这个体系里，除地球和围绕着它的月亮外，其他天体都绕太阳运转，太阳率领着众行星围绕着地球运转，地球是静止不动的。

1599 年，由于丹麦前国王的逝世而失去了资助的第谷，把部分仪器移到了布拉格。在这里，他得到了一位青年助手开普勒。他们共同进行观测，一直到 1601 年第谷逝世。

约翰·开普勒（Johannes Kepler，1571～1630）是德国天文学家，他为哥白尼体系的和谐所吸引，决心尽全部力量为它辩护，并最终完成日心说体系。在接受了第谷的全部天文观测资料之后，开普勒一方面在编制《卢道夫星行表》（1627 年出版），一方面进行着对行星运动的研究。

开普勒是一个深受毕达哥拉斯和柏拉图影响的数学家，坚信上帝是按照完美的数学原则来创造世界的，他以数学的和谐性来探索宇宙体系。在 1596 年出版的《宇宙的秘密》一书中，他用古希腊人早已发现的五个正多面体和当时已知的六颗行星的轨道的套叠，来解释为什么恰有六颗行星和为什么它们又按照这么大小的轨道运行。这个安排虽然表现出了开普勒的想像力和数学才能，却全然是偶然性的和带有数学神秘性的。

对火星轨道的研究，是开普勒重新研究天体运动的起点。与哥白尼不同的是，开普勒认为行星的轨道是真实的，而真实的运动必有某种真实的物理原因，因此本轮是不可取的。经过一年半之久的 70 次试验，他试图用一个偏心轮和一个等距轮的各种组合来符合火星的运动，并得出了一个接近的结果。这个结果在沿黄道的南面和北面的运动上偏差较大；而在沿黄道的东面和西面的运动上和第谷的观测数据之间存在有 8′角度的误差。他从这个误差中敏锐地觉察到行星的轨道不是一个圆周，而且没有这样一点，绕该点的运动是匀速的。这样，开普勒就大胆地抛弃了束缚人们头脑两千年之久的天体作“匀速圆周运动”的观念，转向用第谷的观测数据去确定行星的运行轨道。

由于第谷的观测数据是从运动着的地球上得出的，所以必须先弄清楚地球轨道的真实形状和它的运行方式，以便确定在观测火星的日子地球在什么位置。为此，他充分利用了每组火星年的观测数据。从太阳、地球、火星处于一条直线的时刻开始描绘，经过一个火星年（687天），火星又回到同一位置，相对于恒星天球可以分别绘出从太阳和火星到地球的两条视线，它们的交点就是地球在其轨道上的新的位置。经过若干组每相隔一个火星年的观测数据的处理，就可确定地球的轨道形状。开普勒发现地球的轨道几乎是一个圆周，太阳稍稍偏离圆心。根据每天太阳视位置的记录，就可以完全确定地球在轨道上的位置和沿轨道的运动速率。进而，开普勒再次利用了每隔一个火星年的观测数据，以确定火星的轨道。因为每经过一个火星年，火星总在同一个位置，而地球却处在自己轨道上的两个位置。从这两个位置绘出的指向火星的视线交点必是火星轨道上的一点。利用若干组这样的数据，就可以确定火星的若干位置，从而获得火星的轨道曲线。

开普勒立即看出，火星的轨道是一种“卵形线”。通过大量的复杂计算，开普勒终于发现这个曲线就是古希腊人早已研究过的椭圆；进而又发现每个行星都沿椭圆轨道运行，太阳就在这些椭圆的一个焦点上，这就是轨道定律。

开普勒发现，地球和火星在离太阳近时运动得快，而在离太阳远时运行得慢，通过计算他得出，行星到太阳的连线（矢径）在单位时间内扫过的面积都是不变的。虽然他仅仅计算了地球和火星在近日点和远日点其矢径扫过的面积，然而由于这个关系是如此美妙和简单，致使他坚信这个关系无论对于哪个行星和轨道上的哪个部分都是真实的，这就是所谓面积定律。

在1609年出版的《新天文学》中，开普勒发表了上述两个定律。但是他认为，只有在找到各个行星运动的统一关系之后，才能够构造一个太阳系的整体模型，从而揭示出宇宙的和谐与一致。开普勒怀着这种信念，长年累月地考察了许多因素的各种可能的组合。最后终于发现，行星公转周期的平方同它们到太阳的平均距离的立方成正比，这就是周期定律。在1619年出版的《世界的谐和》一书里，开普勒公布了这个重要发现。

开普勒的上述重要发现，为牛顿创立他的天体力学理论奠定了实验基础。值得指出的是，开普勒是用数学公式表达物理定律而且最早获得成功的人之一。从他的时代开始数学方程就成为表达物理学定律的基本方式。

三、伽利略捍卫哥白尼日心说的斗争

伽利略的英勇斗争，在新宇宙观的确立中起了重要的作用。他出生在意大利比萨一个没落贵族家庭。伽利略的父亲是一位音乐家，对数学也有一定的造诣；他希望才华出众的儿子成为一个收入丰厚的医生，所以在伽利略17岁时便送他入比萨大学学

医。善于独立思考的伽利略对医学并无兴趣，却把很多时间用于钻研古希腊的哲学著作，并对亚里士多德的物理学结论提出了怀疑。一个偶然的机会他听了一次数学演讲，立即对合理、严密的数学产生了兴趣，转而热衷于研究欧几里得、阿基米德的数学著作。1589 年到 1592 年，他受聘在比萨大学担任数学讲座。在这里，他进行了不少力学实验，由于他的新观点而受到敌视和排挤之后，伽利略又受聘到威尼斯公国的帕多瓦大学任教，直到 1610 年。这里罗马教廷的影响较小，自由思想的气氛较浓，使伽利略的科学研究工作达到成熟的阶段。

1609 年 5 月，伽利略在听说荷兰人用两块透镜做成一种能看到远处物体的“窥镜”之后，立即用一块平凸透镜和一块平凹透镜制成一个使物像放大 9 倍的望远镜，并因此获得了终身教授的职衔。经过进一步改进，伽利略制成了一具使物像放大约千倍的望远镜，并把它用于天文观测，以便为证实哥白尼的学说和推翻逍遥学派的观点寻找证据。在 1610 年初的几个星期内，伽利略便获得了几项重大发现，并在当年出版的《星界信使》的小册子里公布了这些发现。

伽利略首先发现，月亮表面也和地球表面一样是粗糙不平的，并不是平坦光滑的；他将望远镜指向天空的任何方向，都可以看到无数的星体；他发现，银河也是由千千万万颗暗淡的星星组成的。伽利略认为最重要的，是关于木星的 4 颗卫星的发现。这个发现既否定了古代关于游动的天体只有 7 个的断言，又表明地球并不是所有的天体绕之运转的中心，这是对哥白尼学说的重要支持。另外，伽利略还观察到了金星的周相变化，表明它是围绕太阳运转的。他还发现，太阳也不是光洁无瑕的，它的表面上有黑子，从黑子在太阳表面上的有规律的运动，他判断太阳以 27 天左右的周期转动。

《星界信使》的出版，使伽利略获得了极高的荣誉。1610 年 7 月，他被邀请到佛罗伦萨任宫廷数学家和哲学家。

1632 年，伽利略出版了他的伟大著作《关于两大世界体系的对话》，对哥白尼学说做出了理性论证。这本书采用了三个人对话的形式，全部内容由四天的对话组成。

第一天的内容是批判亚里士多德学派关于天体的组成和性质完全不同于地球的学说，论证了天体和地球在本质上是类似的。对话中列举了新星的出现，彗星的“生长”和“陨灭”，太阳黑子的变化等反证，驳斥了“不变”是高贵和完善的标志的传统观点，并提出了运动并不导致生长和毁灭的这一重要见解。

第二天的对话论证了地球的周日运动，驳斥了地球不动的观点。亚里士多德学派曾提出落体现象反驳地动学说，说如果地球在运动，从高塔上落下的石头将会落向塔的西边，因为塔随着地球的旋转向东移去了。在驳斥这个论点时，伽利略应用了惯性原理、运动叠加原理和相对性原理，说明在地球上进行的一切实验都不能证明地球是否运动。这一天的对话，为地动说奠定了物理基础。

第三天的对话论证了地球的周年运动。书中列举了大量的观测材料，揭露了托勒密体系的矛盾，证明了哥白尼体系的谐调和简明。伽利略还对宇宙有限和具有中心的

观点提出了怀疑。

第四天的对话叙述了伽利略的潮汐理论。伽利略以为地球的自转和公转使地球产生颤动，激荡海水而产生潮汐，因而潮汐现象是地球运动的一个证据。这个理论是错误的，因为现在我们知道，潮汐现象是由太阳和月亮的引力作用引起的。

这部伟大著作的出版，对于宣传哥白尼学说起到了巨大的作用，并尖锐地抨击了托勒密体系、亚里士多德学派的物理学和经院哲学，因而使教士们大发雷霆。在此之前，1616 年罗马教廷曾告诫伽利略不得宣传哥白尼学说，不然就要受到监禁。1633 年 2 月到 6 月，罗马宗教裁判所对伽利略进行了长达几个月的审讯和威胁，最后强迫伽利略在法庭起草的“悔罪书”上签字，当众表示“公开放弃、诅咒和痛恨地动说的异端邪说”。法庭的“判词”宣布了禁止出版和发行《关于两大世界体系的对话》一书，并把伽利略关进监狱，不久又改判为将伽利略在家中终身监禁。在精神恢复之后，伽利略重新继续他早年进行的力学研究工作，并花了 3 年时间写成了《关于力学和局部运动两门新科学的谈话和数学证明》一书，秘密送往荷兰于 1638 年出版。

1979 年，罗马教皇约翰·保罗二世提出为伽利罗恢复名誉。但是，教会对科学的干涉和对伽利略的迫害所造成的严重后果是无法挽回了。在伽利略之后，意大利的科学活动很快衰落下去，在很长一段时间里，没有再出现重要的科学家。这充分表明，没有思想的自由，科学就不能繁荣。

第三节　新科学观的诞生

近代自然科学的兴起，是同对经院哲学的批判和新的科学观的确立分不开的。

一、对宗教哲学的批判与自由探索精神的兴起

否定宗教教义是真理的来源，提倡思想自由和探索精神，大力推崇科学的意义，是近代自然科学兴起时期的一种重要思潮。

英国杰出的哲学家弗兰西斯·培根（Francis Bacon，1561～1626）认为，人应当是自然界的主人，而这取决于人们的知识的丰富程度，他提出了“知识就是力量”的口号，认为人们应当借助于科学发现和发明掌握驾驭自然的力量。在 1605 年出版的《论科学的进展》中他指出，印刷术、火药和指南针这三种东西的发明“改变了世界的面貌”，“没有一个帝国、没有一个宗教教派、没有一个显赫的人物能比这三种发明在人类的事业中产生更大的力量和影响”。

培根认为经院哲学对正确地研究自然是无用而有害的。他指出，有四种“幻象”蒙蔽着人们的智慧，即“种族的幻象”（这是人们错误地把自己的感觉看做事物的尺度），“洞穴的幻象”（这是由于每个人所特有的原因造成的），“市场的幻象”（这是不确切的

语词和概念所造成的混乱），“剧场幻象”（这是盲目轻信权威和流行的哲学教条而产生的）。培根对这些“幻象”的批判实质上是对经院哲学和迷信权威的否定。

法国杰出的数学家和哲学家笛卡儿（Renē Descartes，1596～1650）继续展开了向经院哲学的斗争。他反对信仰先于知识的宗教教义，认为必须创立为实践服务的世俗科学来代替经院哲学。

笛卡儿提出了“怀疑原则”作为创立真正的科学的出发点，他坚决主张必须怀疑包括经院哲学在内的那些过去被当作真理的一切东西，一切从最基本的东西开始，以保证认识的基础绝对可靠和没有错误。他的这个原则对于当时和后来的科学发展，都起到了解放思想的积极作用。

伽利略也坚决主张科学认识的自由，指出宗教在科学问题上是毫无意义的，他把那些盲目崇拜古代权威的经院哲学家斥为“奴才”和“书呆子博士”。

二、把认识的基础建立在经验和实验研究上

把认识建立在经验基础之上，这是近代科学革命中的一个鲜明特点。历史上存在于工匠传统和学者传统之间的障碍，到了16世纪就开始崩溃了，学者们开始注意工匠的经验和方法，并从这两种传统的结合中，逐渐产生出一种新的研究方法。

弗兰西斯·培根是最早意识到这种新科学方法的意义的人之一。他认为，经验、实验是真理的来源和检验标准；但是他指出那种简单的、自流的经验是不行的，真正的经验方法是从经过适当的安排和消化的经验开始，由此导出公理，进而又从公理导出新的实验。只有那种利用一定的设备，按照确定的程序，有规则地进行的实验，才能成为科学知识的可贵源泉。

笛卡儿也认为实验可以提供“原始前提的必要素材”，还能检验所得结论的正确性。伽利略同样认为，真正的科学就在“经常展示在我们眼前的这部最伟大的书中”，即宇宙、自然界，人们必须通过实验去阅读这部“自然之书。”

可以看出，当时的科学先驱们不仅强调了经验在认识中的意义，而且已经开始对实验方法进行研究，使这种方法臻于完善。事实上，把对自然的研究变为真正的科学的最重要的标志，就表现在系统的实验研究方法的产生和完善上。

三、理论概括方法的确立

从已经获得的经验材料到建立起理论体系，还必须解决如何进行理论概括的问题。

实验和数学演绎相结合的方法，16世纪已在意大利北部产生了。到了伽利略之后，这种方法才达到了成熟的阶段。伽利略很重视进行观察和实验，但又不满足于对事实的简单搜集和描述，他认为科学的真正目的是阐明客观现象的因果联系和规律，这就

需要对获得的材料进行确切的数学分析和数学概括，并在知识的最高阶段用简洁的代数形式把所得的结果表示出来。这种方法，为近代自然科学系统的、全面的发展开辟了广阔的前景。

关于自然科学中的逻辑方法，这一时期经培根和笛卡儿的总结，归纳法和演绎法趋于完善。

在《新工具》(1620) 这部书中，培根提出了经验归纳的方法。所谓经验归纳法，就是从大量搜集的个别经验事实中，概括出一般原理的方法。培根提出，必须防止草率的归纳，不要使理智从特殊的事例一下子跳到最高的普遍原理上去，而应该通过适当的阶梯，从特殊的事例、较低的公理、较高的中间公理一步步地上升到最普遍的公理。他说："决不能给理智加上翅膀，而毋宁给它挂上重的东西，使它不会跳跃和飞翔。"

培根制定了在搜集大量经验事实的基础上进行正确归纳的基本步骤。首先要把有关某一现象所有的"正面事例"即"积极的例证"列举出来，如在考察热的本质时，太阳光、火焰、摩擦生热等就是这种事例；然后，还要把"反面事例"即不存在这一现象的"消极的例证"列举出来，如热不存在于月光和水里；最后，还要进行"程度的比较"，如由于运动的强弱而产生不同程度的热等等。在进行了上述这些工作之后，就可以提出不同的假说，进一步通过实验做出选择和修正，最后得出科学的结论。培根就是用这种方法，得出了热的本质就是运动的结论。

在科学研究中，由于现象和事例是不可穷尽的，由此而归纳出来的结论也必然是有局限性的。所以，经验归纳法只能算作是一种不严密的、或然性的推理。特别是由于培根对于假说不够重视，使他的归纳法带有明显的缺陷，培根以为，只要对观测资料进行系统的整理，正确的假说自然就会显示出来，然而事实并不如此简单。

尽管培根本人没有真正投入到当时的科学实践中，但他的方法论思想具有深远的意义。他是科学实验的鼓动家，所起的作用就如同希腊瘸腿诗人第泰尔斯自己不能打仗，却写下了许多诗篇鼓舞士兵英勇作战一样。

笛卡儿从与培根不同的方面发展了自然科学的方法论。在 1637 年出版的《方法论》中，他提出了他的唯理论学说。他认为，在发展认识的过程中，起主要作用的不是经验，而是理论思维，即理性。笛卡儿对物理学中发展起来的数学方法很赞赏，认为一切科学都应该按照数学的形式建立起来，把理论思维作为知识的出发点。他认为，真理的不可缺少的标志，是思维的明确和清晰，是由"理性直觉"到没有任何可疑之处的观念的自明性，这种自明性是不需要经验和逻辑的证据的。他深信，从不容怀疑的和明晰确切的原理出发，通过逻辑的途径和类似数学的方法进行论证，就可以把自然界的一切显著特征演绎出来，得出科学的结论。在笛卡儿的这种方法论中，实验只具有检验理论结果的作用。

在当时的历史条件下，这种唯理论是有进步意义的。因为用理性代替经院哲学式的思辨，用逻辑证据代替权威崇拜的观点，就是当时先进的启蒙哲学和自然科学的最

重要的思想根源之一。笛卡儿对物理学中理论思维的发展和演绎方法的广泛应用产生了很大的影响。

培根的经验归纳法与笛卡儿的唯理论互为补充，为近代科学建立新方法论起到了打开通路的作用。不过，正如荷兰物理学家惠更斯后来指出的那样，培根不了解科学方法中数学所起的作用；而笛卡儿则忽视了实验和经验的作用。所以真正代表近代科学方法论精神的既不是培根也不是笛卡儿，而是伽利略和牛顿。

思 考 题

1. 说明近代自然科学产生的历史背景。
2. 达·芬奇在物理学上做出了哪些贡献？
3. 哥白尼是如何提出“日心说”的？
4. 开普勒是怎样得到行星运动的三条定律的？
5. 伽利略在天文学上做出了哪些发现？他的这些工作有什么重要意义？
6. 说明近代自然科学兴起时期新科学观的基本特征。

第四章　经典力学体系的建立

第一节　伽利略的力学贡献

16 至 17 世纪以来，在各门自然科学的发展中，居于首位的是以天体和地面上物体的机械运动为研究对象的经典力学。对于阿基米德静力学理论的继承和发展，对亚里士多德运动理论的检验和批判，成为这一发展的重要起点。

一、斯台文的力学研究

1586 年，比利时力学家斯台文（Simon Stevin，1548～1620）在他的著作《静力学原理》中，为阿基米德的杠杆原理作了简化的数学证明，并研究了滑轮组的平衡问题。他关于杠杆的实际应用的论述包含了关于平行力的平衡的完整理论；关于机械效率，他提出了“得于力者失于速”的著名论断。

在这本书的封面上画了一幅如图 4-1 所示的“斯台文链”：13 个重量相同的光滑小球等距地连成一链条，挂在光滑的直角三棱柱 ABC 上，棱柱的二直边与水平放置的斜边 AC 间的夹角分别为 r、l。初看起来，会以为两边由于重量不等，链条会持续地由右向左滑移，形成永恒的运动。斯台文断言这种运动是不可能的，链条必定处于静止不动的平衡状态。这意味着每个球所产生的沿斜面的下滑力随斜面与水平面间夹角的减小而减小。如果以 F_r，F_l 表示作用在每边每个小球上的下滑力，则有平衡条件

$$F_r \times AC = F_{l1} \times BC$$

即

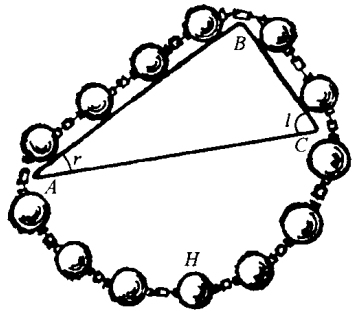


图 4-1　斯台文链

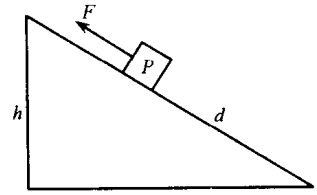


图 4-2　斜面上物体的平衡

$$\frac{F_r}{F_l}=\frac{\sin r}{\sin l}$$

于是，斯台文得出了下述斜面定律（图 4-2）：处于高为 h、长为 d 的斜面上重量为 P 的物体，为一个大小等于 $F=\frac{h}{d}P$ 而方向与斜面平行的力所平衡。

这样，斯台文就在二力互成直角的情况下，引进了力的三角形（或平行四边形）法则，不过他没有把这个法则推广到更一般的情况。

斯台文和他人合作，把重量之比 1∶10 的两只铅球从 30 英尺高处同时丢下来，证明它们同时落地，从而否定了亚里士多德的落体理论。

斯台文还推进了阿基米德关于流体静力学的研究。他得出，浮体的重心和它所排开的液体的重心处在同一竖直线上。他利用浮力定律解决了流体静力学的一个“佯谬”，得出结论说，液体对容器底面的压力与容器的底面积、液体的深度及液体的比重成正比，并不一定等于容器中液体的总重量。斯台文的工作使近代力学的发展和阿基米德的工作联系起来，推进了几何静力学的发展。

二、伽利略的运动理论

伽利略的运动理论，是经典力学的奠基性工作。早在 1589 年到 1591 年间，他就开始了这方面问题的研究，但逍遥学派和中世纪后期的传统自然哲学对他的影响还是明显的。他在比萨时期写的研究运动的手稿《论运动》中有这方面的明显痕迹。在实验困难和理论佯谬面前，他很快转向对这种传统思想的叛逆，致力于创立新概念的努力。1632 年出版的《关于两大世界体系的对话》和 1638 年出版的《关于力学和局部运动两门新科学的谈话和数学证明》（简称《两门新科学》），以确凿的实验事实，严密的逻辑推理和清晰的观点，批驳了亚里士多德的运动学说，阐明了他的运动理论。

1. 运动的描写和分类

经院哲学家主要关注的是“终极原因”，所以主要借助于质料、形式、目的、自然位置等模糊概念对运动作因果的和定性的描述，而且把运动分为自然运动和强迫运动。伽利略认为这种描述和分类方法，实际上是把运动的研究引入绝境。他所要研究的不是运动为什么发生，而是运动怎样发生。这就必须将自古以来就有的关于距离和时间的概念给予确切的数学表述，找出关于运动的时间与距离的关系的定律。自伽利略之后，空间和时间的概念在物理学中就具有了根本性的重要意义。

伽利略不相信自然运动和强迫运动的区别，他认为应该依据运动的基本特征量速度对运动进行分类。他由此提出了匀速运动和变速运动的新的分类方法，从而使运动理论的研究取得了重大进展。

伽利略首先定义了匀速运动：“我们称运动是均匀的，是指在任何相等的时间间隔内通过相等的距离。”他进而给出了瞬时速度的概念：物体在给定时刻的速度，就是物

体从该时刻起作匀速运动所具有的速度。这是对速度概念的一个重要扩展。

关于变速运动，伽利略是从落体运动的观察和研究入手的。他大胆假定，落体运动是匀加速运动，因为自然界“总是习惯于运用最简单的和最容易的手段”行动，所以应该相信自由落体运动速度的变化“是以极简单和为人们十分容易理解的方式进行的”。

如何找出一个符合自然落体运动的匀加速运动的定义呢？他一开始想到的就是某些量之间呈现简单的比例关系。他曾经以为落体的速度正比于所通过的距离，但很快就领悟到这个定义的逻辑错误：根据这个定义，物体通过某段距离的二倍所用的时间将和通过原来那段距离所用的时间相等，因为在两倍距离的情况下，其速度也是原来速度的两倍；另外，这个定义也不能描述落体从静止到运动的过渡。于是，伽利略转向了第二个假设，用速度的增量 Δv 和用去的时间 Δt 成比例来定义匀加速运动：“若一物体从静止状态出发，并且相等的时间间隔内获得相等的速度增量，则称该物体的运动为匀加速运动。”

2. 自由落体定律

在比萨大学任教时期，伽利略已经开始研究自由落体问题，但当时他认为落体的下落速度只在开始的很短时间内是增加的，随之加速度就逐渐减小，最终以匀速下落。到 1604 年，在致萨皮（F. P. Sarpi）的一封信中，他明确地得到了相等的时间间隔内下落的距离呈从 1 开始的奇数序列的规律。直到 1638 年，他才在《两门新科学》中系统地论述了这一研究成果。

他首先从由思想实验得出的一个佯谬入手，对亚里士多德的落体学说提出了反驳。他提出，如果亚里士多德的学说是正确的，即物体的下落速度与其重量成正比，重物的下落速度比轻物为快，那么就可以设想出一个简单的实验：把两个轻重不同的下落物体连接在一起，由于两个物体原来各自的下落速度不同而互相影响，它们连在一起后将以某个中间大小的速度下落；但两个连在一起时当然要比原来较重的物体更重一些，由此可以看出，我们可以从“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”，从而证明了亚里士多德的学说是错误的。

自由落体运动是否符合他所提出的匀加速运动的定义呢？伽利略认为应该通过实验做出检验。但要直接测定下落物体速度的增量与下落的时间是不是成正比，即 $\Delta v/\Delta t$ 是否为恒量，在当时是十分困难的，于是伽利略转向了数学。他期望能根据他的假设推导出某一便于直接测定的关系式。

伽利略利用如图 4-3 所示的图解方法求出了从静止开始的匀加速运动的距离 s 与时间 t 的关系。图中 AB 表示时间，横线表示各时刻的速度，面积 ABE 表示所通过的距离。显然

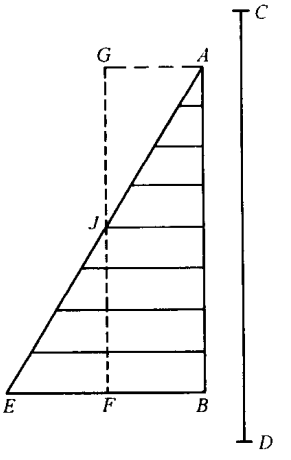


图 4-3　匀加速运动的图示

这个面积与矩形 $ABFG$ 的面积相等，FB 为末速度的一半，即平均速度。由此不难得出，匀加速运动通过的距离与时间的平方成正比，即

$$\frac{s}{t^2} = 常量$$

这里不包含任何瞬时值，只要直接测定 s 和 t 就行了。

但是，竖直方向的自由落体下落的速度还是很快，做定量的观测，特别是测得准确也是很不易的。于是，伽利略为了进一步“减缓”下落运动以得出精确的测量结果，他设计了“冲淡重力”的实验，即著名的“斜面实验”。他在一个板条上刻出一条直槽，贴上羊皮纸使之平滑，让一个光滑的黄铜小球沿直槽下落，并用水钟测定下落时间。伽利略在斜面成不同的倾斜角和铜球滚动不同距离的情况下作了上百次测定，发现“一个从静止开始下落的物体在相等的时间间隔经过的各段距离之比，等于从 1 开始的一系列奇数之比”，即为 1∶3∶5∶7…，从而完全证实了落体“所经过的各种距离总是同所用的时间的平方成比例。”

为了把斜面实验的结论推广到竖直情况下的自由落体运动，伽利略提出了“等末速度假设”，即静止物体不论是沿竖直方向还是沿不同斜面从同一高度下落，到达末端时具有相同的速度；这就是说，物体在下落中所得到的速度只由下落的高度决定，而与斜面的倾斜程度无关。他论证说，如果情况不是这样，那么只要把过程反转过来，物体就可以利用下落中得到更大的速度上升到比由之下落的更高的高度，而这是与我们的经验相违背的。

伽利略用一个单摆实验检验了这个假设。如图 4-4 所示，拉至 B 放开的摆球会升到对面同一水平高度上，如果在 E 或 F 处钉上小钉子，摆球仍然沿不同的圆弧上升到同一水平高度的各点。反过来，如果让摆球从这些点下落，它同样会升到原水平高度的 B 点。这说明，沿不同倾斜度的斜面（不同弧线）下落，其末速度是相等的。

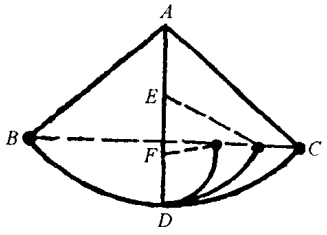


图 4-4　摆的升高实验

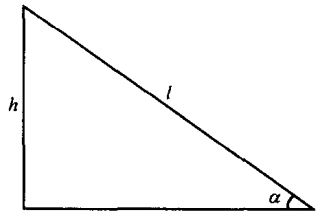


图 4-5　沿斜面方向与竖直方向下落的加速度的关系

根据这个假设，就可以得到沿斜面长度 l（下滑）的加速度 g_1 与沿斜面高度 h（自由下落）的加速度 g 之间的关系。如图 4-5 所示，物体自顶端沿斜面下滑和竖直下落所用的时间分别为 t_1 和 t，末速度同样为 v，则由

$$h = \frac{v}{2}t \qquad l = \frac{v}{2}t_1$$

得到

$\frac{t}{t_1}=\frac{h}{l}$；再由 $v=g_1t_1$ 和 $v=gt$，得到

$$\frac{g_1}{g}=\frac{t}{t_1}=\sin\alpha$$

由这个关系，就不难从斜面上的加速度 g_1 求出自由下落的加速度 g。不过，伽利略并没有给出加速度 g 的精确数据，他只是根据这个关系明确得出了自由落体作匀加速运动的结论。

3. 惯性原理

“等末速度假设”和单摆摆球的等高性实验，把伽利略引向另一个理想实验：如图 4-6 所示，一个光滑坚硬的小球从 A 点沿光滑斜面 AB 下落，它将以获得的速度沿任何对接斜面（BC、BD、BE 等）上升到 A 的同一水平高度。正如沿 DB 下落比沿 CB 下落具有较小的加速度，小球沿 BD 上升比沿 BC 上升也将有较小的减速度。所以随着斜面倾斜度的减小，小球上升的减速度也越小，小球运动的时间也越长。在水平面 BF 上，减速度将减小到零，小球将以恒定的速度永远运动下去。伽利略写道：“任何速度一旦施加给一个运动着的物体，只要除去加速或减速的外因，此速度就可保持不变；不过，这是只能在水平面上发生的一种情形。”这就是伽利略关于惯性运动的思想，早在《谈话》一书中，他已经表达过这个思想。不过，伽利略还不能想像不受重力作用的物体。正是为了避免重力对运动的影响，他才不得不把物体放在水平面上，这给他的结论带来很大的局限性。

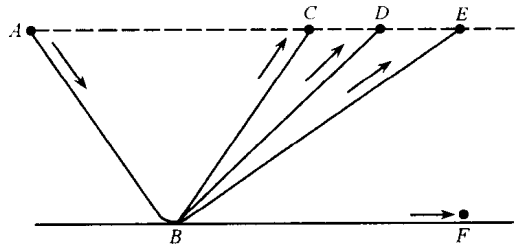


图 4-6　伽利略对接斜面的理想实验

在谈到小球从水平桌面边缘的下落时，伽利略指出这时小球将在它原来水平方向的匀速运动之上再增加一个向下的匀加速运动，他把重力的作用作为这个加速运动的原因。这样，伽利略就把力的作用同运动状态的变化联系起来，从而把动力学的研究引上正确的方向。

4. 抛体运动轨迹

《两门新科学》中第四天的谈话，详细研究了抛射体的运动。假设物体以某一水平初速度被抛出，伽利略指出这时物体将同时参与一个匀速的水平运动和一个匀加速的下落运动（如图 4-7 所示）。他假定这两个分运动“既不彼此影响、干扰，也不互相妨碍”，这就是运动的独立进行原理。物体的实际运动，将是这两个运动的合成。伽利略

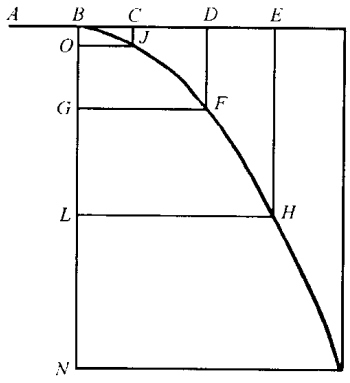


图 4-7　平抛运动的轨迹

立即看出，抛射体的轨迹是一条抛物线。在斜抛的情况下，轨迹将是对于通过最高点的垂线左右对称的抛物线。物体在上升和下落的时间内所通过的水平距离，就是抛射体的射程。伽利略把各种仰角下物体的射程一一计算出来作成表格，从而得出仰角 $\alpha=45°$ 时射程最大以及两个仰角 $\alpha'=45°\pm\beta$ 下射程相等的结论。在这之前，意大利数学家和力学家塔塔格里亚（N. Tartaglia，约 1506～1557）在 1546 年曾经根据经验得到仰角为 45°时射程最大，现在伽利略“仅用数学便得出如此严格的证明”，生动地表明了科学理论的解释、预言和指导作用。

5. 相对性原理

在捍卫哥白尼的地动学说，批驳那种认为倘若地球运动就会把地面上的物体抛到地球后面的谬论时，伽利略利用惯性原理指出，从行驶着的航船的桅杆顶上落下的石子，仍然会落到桅杆脚下，并不因为船的运动而落到桅杆后面。他借谈话人萨尔维阿蒂之口，精彩地描述了在匀速直线运动的船舱里所观察的力学现象。只要船的运动是均匀的，也不忽左忽右地摆动，人们所观察到的现象将同船静止时的完全一样，人们跳向船尾不会比跳向船头来得远；从挂着的水瓶中滴下的水滴仍会滴进正下方的罐子里；蝴蝶和苍蝇继续随便地四处飞行，决不会向船尾集中，或者为赶上船的运动而显出疲累的样子；香冒出的烟，也像云一样向上升起，而不向任何一边飘动。……这些现象表明，在船里所作的任何观察和实验，都不可能判断船究竟是在运动还是停止不动。这段描述表明，伽利略已经正确地理解了力学中的相对性原理，虽然他还没有做出明确的概括。这个原理的发现，是人类科学认识史上的一个重大飞跃。

6. 伽利略的研究方法

伽利略关于运动理论的研究工作，采用了一个对近代科学的发展很有效的程序，即对现象的一般观察→提出工作假设→运用数学和逻辑的手段得出特殊推论→通过物理的或思想的实验对推论进行检验→对假设进行修正和推广，等等。

伽利略是很重视观察的，因为从观察得到的感性经验会使人们认识到现象的特殊方面。在分析感性经验和借助于创造性想像的基础上，就可以提出工作假设。伽利略就是根据自然界单一效应的简单性的信念大胆假设自由落体是一种速度随时间成正比而增加的匀加速运动，他正是从假设入手讨论他所要研究的那种运动的定义和性质的。进而，在数学演绎阶段，从假设引出可检验的逻辑推论；在这里，数学成为他进行逻辑演绎和论证的有力工具。最后，通过特殊情况的实验，对由假设得出的结论进行检

验。在完成上述步骤之后，就可以建立理论，并把它的成果向更大的广度和深度推进。

伽利略实质上使用了把实验和逻辑（数学）结合起来的方法，从而有力地推进了人类科学认识活动的进展。他所发现的许多最基本的定理，都是通过了实验和逻辑的双重证明的。值得指出的是，在伽利略的著作里所描述的实验都是理想化的，他所写出的实验数据都同理论结论精确地符合，这很可能是因为他对数据进行了筛选。这表明伽利略并没有被实验的表面现象所束缚，能够正确地对待和解释实验误差。在他看来，实验结果与理想的简单规则之间的偏差，只是某些次要因素干扰的结果。比如，在实际的下落实验中，重球与轻球并不是同时落地的，伽利略认为这是由空气的阻力造成的，所以不应该由于这点误差而对亚里士多德学说的重大谬误提供辩护。又如在单摆实验中，摆球并不能完全回到原来的高度，伽利略把这点微小的偏差也归因于空气和绳子的阻力。

我们看到，无论是在动力学基本原理上，还是在动力学研究方法上，伽利略都做出了奠基性的重要贡献。爱因斯坦和英费尔德（L. Infeld）在《物理学的进化》中评论说："伽利略的发现以及他所应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。"

三、关于碰撞的研究

1. 笛卡儿的运动理论

笛卡儿的朋友、荷兰物理学家和数学家比克曼（Isaac Beeckman，1588～1677）曾经设想在宇宙中充满一种"微细物质"，他认为可用这种物质的流动说明落体、磁力和一些真空的现象。他还曾经进行过物体碰撞的研究，得出一些关于非弹性碰撞的法则。笛卡儿可能是在他的影响下展开物理学研究工作的。

笛卡儿认为客观世界是由物质和运动组成的，只要利用广延（物质）、运动、上帝这些"自明的"观念作为出发点，就可以运用演绎方法达到认识世界的目的。他把运动的终极原因归于上帝，得到了运动量守恒的结论。在1644年出版的《哲学原理》中写道："上帝在创造物质的时候，就赋予物质各部分以不同的运动，而且使所有物质保持创造出来的那个时候所处的方式和状态。所以，上帝也就使这些物质保持着原来的运动的量。"笛卡儿实际上是把动量作为运动的量度的，虽然他还没有对"质量"概念做出明确的定义。

为了能够确定自然事物发生的过程，笛卡儿认为还必须在运动量守恒这条根本规律之外，给出三条第二级的定律。第一条定律是说，如果没有外界作用，任何物质粒子的状态（包括它的大小、形状、位置和运动）不会有任何变化。第二条定律说："如果物质处在运动之中，那么如无其他原因的作用的话，它将继续以同一速度在同一直

线方向上运动，既不停下也不偏离原来的方向。”这是惯性定律的准确表述。

笛卡儿否定真空的存在，认为物体间的相互作用都只能通过挤压和碰撞发生，所以关于碰撞的研究在他的物理学中占有重要的地位。他的第三条定律就是关于碰撞的，这个定律指出，一个运动的物体不可能使一个处于静止的质量更大的物体运动起来；然而由于运动量守恒，运动的物体在碰撞后将保持它原来的速度而沿其他方向继续运动，如果运动物体的质量更大，就能够带动原来静止的物体一起运动，它所失去的那部分运动（动量）等于第二个物体所获得的运动。笛卡儿具体总结了七条碰撞规律，但由于他不了解动量的矢量性，也未能区分开完全弹性碰撞和完全非弹性碰撞，所以其中的五条是错误的。

2. 惠更斯的碰撞理论

由于碰撞的研究对于力学的发展具有明显的重要性，1668 年伦敦皇家学会悬赏征文，英国数学物理学家瓦利斯（John Wallis，1616～1703）、数学家和建筑师伦恩（Christopher Wren，1632～1723）和荷兰数学家、物理学家、天文学家惠更斯（Christian Huygens，1629～1695）提交了关于碰撞的论文。

瓦利斯在他的论文中明确阐述了冲量和动量的概念以及它们的联系，得出了非弹性碰撞的动量守恒结论。伦恩正确地叙述了计算弹性碰撞的规则，但没有给出证明。

惠更斯生于海牙，1655 年获得法学博士学位后即转入科学研究。在物理学方面，他解决了求物理摆的摆动中心问题，测定了重力加速度之值，改进了摆钟，得出了离心力公式，建立了光的波动理论；在数学和天文学上都有重要贡献。他先后被英国皇家学会和法国科学院接纳为国外成员。

惠更斯从 1652 年起，对笛卡儿的碰撞定律的正确性产生了怀疑。他对完全弹性碰撞作了详尽的研究，但这些结果并不是只凭实验得到的，还加上了一些原理和假设。实验和推理的结合，是惠更斯全部研究工作的重要特点。

惠更斯的碰撞理论是以下述三个假设作为出发点的：

（1）运动起来的物体，在未受到阻碍作用时，将以不变的速度沿直线继续运动。

（2）两个具有相同质量的物体，以相同的速度相向作对心碰撞后，两者都以相同的速度向相反方向运动。

（3）物体的运动以及它们的速度，必须看做是相对于另一些我们看做是静止的物体而言的，而不必考虑这些物体是否还参与另外的共同运动。

根据这些假设，惠更斯研究了两个质量相同的物体以不同的速度作对心碰撞的情形。他颇具匠心地运用了相对性原理（第三个假设），即在匀速运动的船上用两个质量相同的球以相同的速度（对船而言）作对心碰撞，根据第二个假设，它们将以相同的速度（对船而言）弹开。这个过程从岸上的人观察，则可以得出如下的结论：两个相

同的球以不同的速度发生对心碰撞后，将彼此交换速度。惠更斯还指出这种情形的一个特例是：一个运动着的球同一个质量相等的静止的球碰撞后，前者立即静止，后者则获得这一速度前进。惠更斯还研究了质量不同、速度不同的球对心碰撞的一般情形。

在关于碰撞过程的研究中，惠更斯还得出了许多重要的力学原理。他写道："两个物体所具有的运动量在碰撞中都可以增多或减少，但是它们的量值在同一个方向的总和却保持不变，如果减去反方向的运动量的话。"这是动量守恒定律的完善表述，因为它明确指出了动量的方向性。实际上这是把矢量概念引入物理学，为矢量力学的建立作了概念的准备。

惠更斯还发现："在两个物体的碰撞中，它们的质量和速度平方乘积的总和，在碰撞前后保持不变。"这里第一次提出了 mv^2 这个物理量；这个结论是完全弹性碰撞中机械能守恒定律的具体表现。

碰撞现象的研究和动量守恒原理的发现，为建立作用和反作用定律准备了一定的条件，从而完成了伽利略以来为建立力学体系而作的奠基性工作。

第二节　万有引力定律的发现

在古代对"引力"的思考都是思辨性的，真正对引力的科学研究是从 17 世纪开始的。

一、行星力的早期研究

17 世纪以来，试图从动力学的角度解释天体运动的思想普遍萌发出来。

英国医生吉尔伯特（W. Gilbert）从他的磁球实验猜测太阳系的所有天体是通过磁力维系在一起的。他从磁力模型中认识到，引力是物体间的相互作用；引力中心不是什么几何点，而是具体的物质；引力的大小必然与物质的多少以及距离有关。开普勒接受了吉尔伯特的影响，认为引力是和磁力类似的东西，是同性物体之间的相互感应；太阳发出的磁力流像轮辐一样在黄道面上沿太阳的旋转方向转动，从而推动着行星围绕太阳运转，其强度随离太阳距离的增大而减弱。1645 年，法国天文学家布里阿德（I. Bulliadus）提出一个假设：从太阳发出的力和离太阳距离的平方成反比而减小。

笛卡儿于 1644 年提出的"旋涡"假说，是牛顿以前最有影响的引力理论。他认为，宇宙空间充满一种稀薄不可见的流质"以太"，它们围绕各个天体形成大小、速度和密度不同的旋涡，带动天体（如太阳）周围的物体（如行星）绕转，并形成一个指向中心的作用，从而表现出引力现象。1669 年惠更斯以水碗中搅拌起的旋涡把涂蜡的砂石聚向碗心的实验来支持笛卡儿的学说。他把旋转的水比作以太旋涡，认为以太由于旋转而产生了力图离开中心的倾向，从而迫使不参与它的运动的物体向中心靠拢。旋涡

学说是把天体的运动归结为力学问题的一次尝试；特别是由于它把引力现象看做是物体间的接触作用，因而更容易被人们理解和接受。

1666 年，比萨大学教授、伽利略的学生玻列利（Alphonse Borelli，1608～1678）提出，引力是距离的幂的某种函数。他设想行星受到一个不变的向心力而趋向太阳，同时又由于自身的圆周运动而有一个可变的离开中心天体的趋向；当这两种作用相平衡时，行星就沿轨道绕太阳作稳定的转动。

二、摆的研究

关于摆的研究，对于解决向心运动问题有重要的意义。

伽利略曾经发现小振幅摆动的等时性，据说他是 1583 年在教堂祈祷时用脉搏测定吊灯的摆动得到这一发现的。后来通过实验他进一步确定，摆的振动周期与摆长的平方根成正比。

惠更斯对摆的研究取得了最突出的成果，他的工作是同解决精密钟表结构的问题联系着的。1659 年他已着手撰写一篇关于离心力的论文，这篇论文发表在 1703 年出版的遗著里。在 1673 年出版的《摆式时钟》的附录中也有关于离心力的陈述。他使用了固定在转动的轮子上的一个真正的可动的参照系，研究了固定在轮子上的物体的离心倾向，发现这个离心倾向等于该物体沿半径方向作匀加速运动；所以，从可动参照系来看，离心力是一种同重力一样真实的力。他得出离心力与物体的速度平方成正比，与圆周的半径成反比的结论。

在 1673 年的著作里，惠更斯提出了摆的数学理论。他推广了伽利略得出的沿有相同水平高度的斜面下落时斜面倾斜度越大下落越快的结论，导出了单摆的运动定律，即周期公式

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

l 为摆长，g 为重力加速度。他根据这一公式，在巴黎用一个周期为 2 秒的单摆，精确测出摆长，精确计算出重力加速度为30.166 6英尺/秒^2，约为 9.8 米/秒^2。

惠更斯还研究了物理摆的摆动中心问题，并由此自然地得出了惯性矩的概念。他指出，如果把摆的重量全部集中到摆的中心上，摆动周期不会变化。他还发现了物理摆的悬挂点与摆动中心的可互换性。

精密摆钟的发明，为发现重量与质量两个概念的差异提供了一个条件。1671 年，法国的里切尔（Jean Richer，1630～1696）到赤道附近的卡因岛作天文观测时，发现从巴黎带去的摆钟慢了，于是把摆长缩短了四分之五英寸；回到巴黎时，又发现这摆太短了。惠更斯认为这是因为赤道附近的物体受到更大的离心力所致；牛顿从这一现象中认识到，物体在赤道附近不仅所受的离心力增大，同时本身的重力也减少。同一个物

体在地球表面的不同地点其重力不同的事实，使重量概念与质量概念的差异变得明显了。

三、万有引力定律的提出

英国的胡克（Robert Hooke，1635～1703）、伦恩和年轻的天文学家哈雷（Edmund Halley，1656～1742）在引力问题的研究上都做出了重要贡献。

胡克已经觉察到引力和重力有同样的本质，他曾在山顶和矿井下进行实验，企图测定重力随离地心的距离而变化的关系，但没有得出结果。1674 年在一个演讲中他提出，引力随离吸引中心的距离而变化，“一旦知道这一关系，天文学家就很容易解决天体运动的规律了”。1680 年初，在给牛顿的信中，胡克提出了引力反比于距离的平方的猜测。他问道：如果是这样，行星的轨道将是什么形状？

哈雷和伦恩在 1679 年按照圆形轨道和开普勒第三定律以及匀速圆周运动的向心力公式，导出了作用于行星的引力与它们到太阳的距离的平方成反比。但是，他们还不能证明行星在椭圆轨道下也是如此。

1684 年，在胡克、伦恩、哈雷等人的一次聚会中，又提出了推动这一研究的问题。伦恩为此提供了一笔奖金，胡克声言他已解决了这一问题，但不肯立即公布他的证明。哈雷于 1684 年 8 月从伦敦专程到剑桥大学向牛顿请教，牛顿说他早已完成了这一证明，但当时没有找到这份手稿。在这一年的年底，牛顿将重新作出的证明寄给哈雷。在哈雷的热情劝告与资助下，1987 年出版了牛顿的名著《自然哲学的数学原理》，公布了他的力学研究的全部成果。

牛顿关于万有引力定律的发现过程可能是这样的：1665 年到 1666 年间，由于瘟疫流行，学校停课，牛顿回到家乡。他可能已从布里阿德的著作中了解到平方反比关系的思想。如果进行证明的话，也只是从“牛顿式离心力定律”和开普勒第三定律证明了圆轨道运动的平方反比关系。从 1666 年到 1684 年 8 月之前，他的研究似乎没有实质性的进展，这可能是因为，第一，他曾想根据平方反比关系对月球轨道运动的向心加速度和地面上物体的重力加速度作比较，但当时他所知道的地球半径的数值不精确，计算误差较大；第二，牛顿还未能证明在计算中可以把月球、地球看作其质量集中在中心的质点，这个困难直到 1685 年才解决。或许，他当时主要致力于微积分、光学和化学的研究，等等。1684 年 8～10 月，牛顿作了《论运动》的演讲，明确叙述了向心力定律，证明了椭圆轨道运动的平方反比关系。此后不久，又在一篇关于物体在均匀介质中的运动的论文中定义了质量概念，并探讨了引力与质量的关系，才把他引向完善的万有引力定律的发现。

牛顿是从直觉和猜测开始他关于引力的思考的。在《自然哲学的数学原理》第一部分关于向心力的定义的说明中，牛顿描述了从高山顶上平抛一个铅球的思想实验。他

设想，当发射速度足够大时，铅球将可能绕地球运动而不再落回地面。接着他指出，月球也可以由于重力或其他力的作用使其偏离直线形成围绕地球的运转。牛顿通过一个靠近地面的“小月球”的运动的思想实验，论证了“使月球保持在它轨道上的力就是我们通常称为‘重力’的那个力。”

接着，牛顿根据向心力公式和开普勒三定律推导了平方反比关系。牛顿证明，由面积速度定律可以得出物体受中心力的作用；由轨道定律可以得出这个中心力是吸引力；由周期定律可以得出这个吸引力与半径的平方成反比。他还反过来证明了，在这种力的作用下，物体的轨道是圆锥曲线——椭圆、抛物线或双曲线，这就推广了开普勒的结论。

牛顿通过同磁力的类比，得出“这些指向物体的力应与这些物体的性质和量有关”，从而把质量引进万有引力定律。

在《自然哲学的数学原理》第二部分的第三编中，牛顿叙述了著名的“月—地检验”，对平方反比关系的正确性，提供了一个有力的证明。牛顿把他在月球方面得到结果推广到行星的运动上去，并进一步得出所有物体之间都作用着万有引力的结论，这个引力同相互吸引的物体的质量成正比，同它们之间距离的平方成反比。他根据这个定律建立了天体力学的数学理论，从而把天体的运动同地面物体的运动纳入到统一的力学理论之中，这是人类科学认识史上的一次重大综合和飞跃。

四、牛顿引力理论的检验

牛顿所完成的万有引力定律，是经过科学实践的检验才得到普遍承认的。

关于地球的形状，是对牛顿理论的第一个重大考验。在运用万有引力定律解释岁差现象时，牛顿指出，每一个行星由于自身的旋转运动，赤道部分应该隆起，使星体成为两极扁平的扁球体。里切尔在卡因岛观察到摆钟变慢的现象，被牛顿看做是赤道处引力场变小，即地球是个扁球体的证据。因此，赤道隆起部分将一部分接近太阳和月亮，一部分远离太阳和月亮，它们受到的引力作用也不同，使太阳和月亮的引力摄动作用不通过地球中心，从而使地球的轴作一种缓慢的圆锥运动，造成了二分点的岁差现象，牛顿近似地估算出地球的扁率为 1/230。18 世纪 30 年代，当牛顿的学说传到法国时，他的这个结论立即受到巴黎天文台台长雅克·卡西尼（Jacques Cassini，1677～1756）等人的激烈反对，他们根据笛卡儿的旋涡假说和错误的纬度长度的测量，说地球是两极凸出的椭球体。

为得到更准确的大地测量结果，法国科学院于 1735 和 1736 年先后派出两个测量远征队，分赴赤道地区的秘鲁和高纬度的拉普兰德，分别在两地的经度圈上测量等角的一段弧长。测量结果基本上证实了牛顿的结论，拉普兰德队的领队莫泊丢（Pierre Louis Moreau de Maupertuis，1698～1759）和成员克雷洛（Alexis Claude Clairault，

1713～1765）都成为牛顿学说的支持者。

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

引力恒量的测定，从地面上的实验对万有引力定律提供了直接证明。1798年，英国物理学家卡文迪什（Henry Cavendish，1731～1810）把两个小铅球系在一根直杆的两端，用一根细线从中间吊起，然后用两只大铅球靠近小铅球，通过细线的扭曲测量了大球与小球之间的引力作用，从而得出了引力恒量之值，并计算了地球的质量和密度。

18世纪末19世纪初，人们对天王星的运动的观测和理论结果之间存在着明显的偏差。英国青年大学生亚当斯（John Couch Adams，1819～1892）在1843年到1845年，法国天文学家勒维烈（Urbain Jean Joseph Leverrire，1811～1877）在1845年，各自独立地根据牛顿理论进行了计算，预言了在天王星轨道之外的一个未知行星的质量、轨道和位置。勒维烈将他的计算结果写信告诉了柏林天文台的伽勒（Johann Gottfried Galle，1812～1910），伽勒于1846年9月23日夜间在预定的地点发现了一颗新的行星，这就是对天王星的运行产生规则的摄动作用的海王星。它的发现，被认为是牛顿引力理论的伟大胜利。

第三节　牛顿与《自然哲学的数学原理》

1687年，牛顿发表了《自然哲学的数学原理》，这是他科学创造的顶峰。在这本巨著中，牛顿概括了他的前人伽利略、笛卡儿、开普勒、惠更斯、胡克等人的研究成果以及他自己的创造，首次创立了一个地面力学和天体力学统一的严密体系，成为经典力学的基础，实现了物理学史上的第一次大综合。

一、牛顿的生平

牛顿（Isaac Newton，1642～1727），1642年12月25日（新历1643年1月4日）生于英格兰林肯郡的沃尔斯索普村。他少年时代天资平常，但很喜欢制作各种机械模型。在他的继父去世后，他曾辍学务农。后来在他舅舅和中学校长的支持下得以复学，并于1661年考入剑桥大学三一学院学习。在“卢卡斯数学讲座”第一任教授巴罗（Isaac Barrow）的引导下走上自然科学的研究。

1665年到1667年，牛顿在故乡躲避瘟疫的大约18个月内，做出了在万有引力、微

积分和光学的色散等方面的重大发现。1667 年牛顿返回剑桥大学当研究生，次年获得硕士学位，1669 年由于巴罗的推荐，接替了卢卡斯数学讲座教授的职务。1672 年，由于制造反射望远镜的成就被接纳为伦敦皇家学会会员，曾作为剑桥大学代表两次被选入议会。1696 年迁居伦敦，任皇家造币厂监督，三年后被任命为造币厂厂长。1703 年被选为皇家学会会长，一直连任到逝世。由于他在科学研究和币制改革上的功绩，1705 年被封为爵士。

牛顿终生未婚，在他的外甥女的照顾下度过晚年。1727 年 3 月 20 日因病逝世，在威斯敏斯特教堂为他举行了隆重的国葬。

牛顿完成了他的先辈们开始的近代科学革命，实现了物理学史上第一次大综合。他的科学成果对自然科学的发展产生了重大影响，他在近代自然科学发展史上占有里程碑式的独特地位。

二、《自然哲学的数学原理》的基本内容

《自然哲学的数学原理》的出版，标志着经典力学体系的建立。

《自然哲学的数学原理》共有两大部分。第一部分仿照欧几里得的方法，首先提出了定义和动力学原理，为建立力学的逻辑体系提供前提；第二部分是这些基本原理的应用，包括三编。

在“定义和注释”中，他提出了八个定义和四个注释。

定义 1. 物质的量是用它的密度和体积一起来量度的。

在这个关于“质量”的定义中，物质的密度在牛顿看来是比质量更简单、更基本的概念，它表示单位体积内充满物质的程度。另外，牛顿还明确地把质量与重量区分开来，前者是物体的固有属性，后者则决定于在一定位置所受地球的引力。

定义 2. 运动的量是用它的速度和质量一起来量度的。

牛顿把动量看成运动，并指出动量是一个可加量。

定义 3. 所谓物质固有的力，是每个物体按其一定的量而存在于其中的一种抵抗能力，在这种力的作用下物体保持其原来的静止状态或者在一直线上等速运动的状态。

牛顿在解释中指出“这种力总是同具有这种力的物质的量成正比的”，这就引入了质量作为物质惯性的量度这一通常的意义。

定义 4. 外加力是一种为了改变一个物体的静止或等速直线运动状态而加于其上的作用力。

另外四个定义是关于向心力的。

在“注释”中，牛顿阐明了自己的时空观以及他的相对运动和绝对运动的观点。他知道，在自然界里观察到的运动都是具有相对性的，但他认为“在哲学探讨中，我们

应该把它们从我们的感觉中抽出来，考虑事物本身”，他写道：

绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性而在均匀地、与任何其他外界事物无关地流逝着；

绝对的空间，就其本性而言，是与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的；

处所是物体所占空间的部分，因而像空间一样，它也有绝对和相对之分；

绝对运动是一个物体从某一绝对的处所向另一绝对的处所的移动；

真正的、绝对的静止，是指这一物体继续保持在不动的空间中的同一个部分而不动。

为了给“绝对运动”的存在寻找证据，牛顿提出了著名的“水桶实验”，认为水面的形状只决定于水本身的运动状态，可以作为表征绝对运动的“特有而恰当的效应”。

在“运动的基本定理或定律”中，牛顿总结出了机械运动的三个基本定律：

定律 1. 每个物体继续保持其静止或沿一直线作等速运动的状态，除非有力加于其上迫使它改变这种状态。

定律 2. 运动的改变和所加的动力成正比，并且发生在所加的力的那个直线方向上。

定律 3. 每一个作用总是有一个相等的反作用和它相对抗；或者说，两物体彼此之间的相互作用永远相等，并且各自指向其对方。

这就是著名的牛顿三定律。应该指出，在定律 2 中，牛顿只指出了力（F）的作用同动量（mv）的变化成正比即

$$F \propto \Delta(mv)$$

1750 年，欧拉（Leonhardt Euler，1707～1783）才指出应该把力同动量的变化率联系起来。

“作用和反作用”定律，可以说是牛顿对力学基本原理的一个最具有独创性的贡献。虽然笛卡儿、瓦利斯、伦恩、惠更斯在他之前已经通过碰撞的研究接触到这个定律的实质，但他们都未能达到这个发现。牛顿却从机械系统总运动量的不变中更深入一步地分析了系统内部动量传递的关系，从而发现了一个孤立的物体不能施力也不能受力，只当两个物体相互作用时才产生力的这一令人惊奇的事实。

紧接这三个定律之后，牛顿给出了六个推论，其中包括力的合成和分解以及运动的叠加原理，动量守恒定律和力学的相对性原理。

《自然哲学的数学原理》第二部分的第一编是讨论万有引力定律和有心运动问题的，其中包括了有心力场的保守性、二体运动问题以及两个较小物体围绕一个很大的物体在共同平面上运动的问题。最后一章是牛顿光学的力学基础，为解释光的折射，提出了光在密媒质中的速度比在疏媒质中更大的假设。

第二编讨论了物体在有阻力的介质中的运动。包括在与速度有关的阻力作用下的

运动，流体力学问题，液体和弹性介质中波的传播以及旋涡运动的规律等，对笛卡儿的旋涡学说提出了批判。

第三编的总题目是“论宇宙系统”，是牛顿的天体力学理论，其中包括行星、卫星、彗星的运动，地面上的落体运动和抛射体运动，岁差以及潮汐现象等。

《自然哲学的数学原理》以其宏大的篇幅、精湛的思想、严谨的体系和丰富的内容成为物理学发展史上一部光辉的经典著作。

三、牛顿的自然观和科学方法

作为一个有创见的物理学家，牛顿在从事自然科学研究工作时，具有自发唯物主义和某些辩证法思想。他承认物质的客观性质和世界的物质统一性；承认空间、时间的客观性质；承认自然界各种事物之间的联系和物质运动的规律性。牛顿力学体系的建立，成为机械唯物主义自然观的重要自然科学基础之一，它广泛地对人类的思想和文明的发展产生了深远的影响。

但是，牛顿的自然观也带有时代的局限性，表现出机械论的、形而上学的特点。

在物质观上，牛顿接受了古代唯物主义原子论的思想，认为物质是由不变的、不可入的、不可分割和具有惯性的原子组成的；他的“质量”概念在一定意义上肯定了物质的客观性和永恒性。但是，由于他断言物体的质量是不变的，使他的质量定义带上形而上学的原则性的缺陷。

牛顿关于“绝对空间”和“绝对时间”的概念，为他的运动理论提供了一个有效的时空框架。这种绝对时空观，在承认空间和时间的客观性质上是正确的，但由于把空间和时间看做是与物质运动无关的，因而具有很大的局限性。

牛顿所总结的运动定律，确立了严格的、用数值表示的机械运动的因果公式，根据初始条件，就可以准确地确定体系以往和未来任一时刻的运动状态。但是，牛顿却由此提出了一个机械决定论的命题，认为一切自然现象“都是和某些力相联系着的”，都服从力学原理，即都只能按照机械的必然性发生和进行。他的这个观点，对以后两百多年自然科学的发展产生了深刻的影响。

在科学研究方法上，伽利略首先走上以采用精确的数学分析和总结实验数据为特点的物理学研究道路。到了牛顿，则第一个大量地运用数学方法来系统地整理物理理论。他的《自然哲学的数学原理》，为以后各种物理学理论体系的建立树立了一个典范。

在《自然哲学的数学原理》第三编的开头，牛顿写下了“哲学中的推理法则”。其内容为：

> 除那些真实而已足够说明其现象者外，不必去寻求自然界事物的其他原因”；“自然界不作无用之事，只要少做一点就成了，多做了却是无用；因为自然界喜欢简单化，而不爱用什么多余的原因以夸耀自己；

对于自然界中同一类结果，必须尽可能归之于同一种原因；

物体的属性，凡既不能增强也不能减弱者，又为我们实验所能及的范围内的一切物体所具有者，就应视为所有物体的普遍属性；

物体的属性只有通过实验才能为我们所了解……在实验哲学中，我们必须把那些从各种现象中运用一般归纳而导出的命题看做是完全正确的，或者是非常接近于正确的。

这些推理法则中，第一条是“简单性原则”，第二、三条是“统一性原则”，第四条表明牛顿对于在观察、实验的基础上通过归纳而得出自然规律的这一方法的信念。

第四节　牛顿力学的完善与分析力学的创立

经典力学理论体系建立之后，对科学的发展产生了深刻的影响。但是，这一理论体系也面临着一些有待解决的问题。从17世纪后期到19世纪，一些物理学家和数学家做了更为深入的研究，他们不仅使一些概念得以清晰，而且发现了更普适的原理，建立了分析力学。

一、关于“运动的量度”的争论

17～18世纪，由于“力”的概念不是完全清晰的，人们在不同的意义上使用这一概念描述了力的各种效应，从而引起了笛卡儿学派和莱布尼学派关于物体“运动的力”的一场旷日持久的争论。

笛卡儿学派从运动量守恒的基本定律出发，认为应该把物体的质量和速度的乘积作为“力”或物体的“运动量”的量度。1687年，牛顿在他的《自然哲学的数学原理》中明确提出了动量的定义，并且通过他所总结的第二定律揭示出在物体的相互作用中，正是动量这个物理量反映着运动变化的客观效果。

1686年，德国数学家、物理学家和哲学家莱布尼茨（Gottfried Wilhelm Freiherr von Leibniz，1646～1716）在他的论文中，对笛卡儿学派的这个量度提出批判。他认为，动力不能用“物体”（质量）与速度的乘积来衡量，而只能由它所产生的效果来衡量，例如它能将一重物举起多么高；因此，应该用 mv^2 来量度物体运动的力。莱布尼茨从这个观点出发论证说，把质量为 m 的物体举高 h 的“力”将同样能把质量 m/n 的物体举高 nh；当这两个物体降落下来时其运动量必然相等。由计算可知，如果第一个物体落到地面时速度为 v，第二个物体的速度则为 $\sqrt{n}\,v$。按照笛卡儿的量度则有 $mv \neq \frac{m}{n} \cdot \sqrt{n}\,v$，表明它们的运动量不相等；按照莱布尼茨的量度，则有 $mv^2 = \frac{m}{n} \cdot (\sqrt{n}\,v)^2$，表明了二物体落下时有相等的运动量。莱布尼茨由此得出结论：笛卡儿的运动的量度

是同落体定律相矛盾的。莱布尼茨也看到笛卡儿提出的量度在某些情况下是适用的，所以于1696年指出，mv是“死力”的量度，即相对静止的物体之间的力的量度；而mv^2则是“活力”的量度，宇宙中真正守恒的东西正是总的“活力”。

两种量度的争论，持续了半个世纪之久，不少著名的数理学家都参加到争论中去。1743年，法国力学家达朗贝尔（J. R. d'Alembert，1717～1783）在他的《动力学论》的序言中，指出了两种量度的同样有效性。他认为，“运动物体的力”只能用物体克服障碍的能力来表示。在其阻抗足以使运动在一瞬间停止下来的障碍，即平衡的情况下，动量可用来作为“运动物体的力”的量度；而在障碍逐渐使运动停止的减速运动的情况下，活力可作为“运动物体的力”的量度。

达朗贝尔对这场争论所作的这个“最后的判决”，模糊地谈到了动量的变化和力的作用时间有关，活力的变化和力的作用距离有关，但是还没有完全澄清这一争论的混乱，恩格斯在1880或1881年所写的《运动的量度——功》一文中，根据当时自然科学的最新成就，揭示了两种量度的本质区别。他指出，在不发生机械运动和其他形式的运动的转化的情况下，运动的传递和变化的情况可以用动量去量度；但当发生了机械运动和其他形式的运动的转化的情况下，则应以动能（或活力）去量度。他说：“一句话，mv是以机械运动来量度的机械运动；$\frac{mv^2}{2}$是以机械运动转化为一定量的其他形式的运动的能力来量度的机械运动。”

二、三大守恒原理的确立

牛顿定律虽然原则上可以解决一切力学问题，但对多质点系和约束较多的情况，直接应用牛顿定律就十分繁难。为了解决这个困难，逐渐发展起了动量、动量矩和活力的三个运动定理以及在特定条件下的三个守恒定律，使经典矢量力学体系臻于完善。

1. 质心运动守恒定律

笛卡儿首先提出了运动量守恒定律的基本思想，惠更斯认识到动量的矢量性，并准确地表述了碰撞过程中系统的动量守恒以及系统共同质心的运动速度为常数的结论。牛顿在《自然哲学的数学原理》一书“运动的基本定律”之后作为一个推论，明确表述了“质心运动守恒定律”。他指出，系统的共同重心，不会因为系统内物体之间的相互作用而改变其原来静止的或等速直线运动的状态；当有外力作用时，共同质心就像一个质点那样发生运动变化，这就是“质心运动定理”。

2. 动量矩守恒定律

开普勒第二定律，实际上就是动量矩守恒定律。牛顿在《自然哲学的数学原理》中

把它推广到有心力运动的一切场合，指出一个质点在指向一固定点的力的作用下，其矢径在相等的时间内扫过的面积相等。1745 年，D. 伯努利（Daniel Bernoulli，1700～1782）和欧拉等以不同的方式分别提出这一个原理。与这个原理相应的动量矩定理指出：系统的总动量矩的时间变化率，等于所受的作用力的力矩之和。

3. 活力守恒定律

伽利略、惠更斯已经指出，落体、斜面运动和钟摆的速度，单值地与一定的高度相联系；下落物体依靠所得到的速度可以回到原来的高度但是不能再高了。惠更斯在完全弹性碰撞的研究中得到 $\sum m_i v_i^2$ 守恒的结论；莱布尼茨引进了“活力”概念，认为宇宙中“活力守恒”，并且发现力和路程的乘积与活力的变化成正比。直到科里奥利（Gaspard Gustave Coriolis，1792～1843）用 $\frac{1}{2}mv^2$ 代替 mv^2 之后，莱布尼茨的发现才得到准确的表述：所做的功等于动能的增加。

1738 年，D. 伯努利在他的《流体动力学》中引入了“势函数”这一概念，提出了实际的下降和位势的升高的等同原理。他把这一思想用于理想流体的运动，得出了著名的伯努利方程。这一系列发现，已经突破了“活力守恒”的局限，非常接近于后来所说的机械能守恒原理。

三、分析力学的发展

18 世纪中叶以来，力学家和数学家们致力于寻找一种比牛顿定律更广泛、更简便的普遍原理，从虚功原理、最小作用原理发展为数学上的变分方法；并且由于引入广义坐标和代数方法等，形成了一套独特的分析方法。分析力学的基本理论体系分为微分形式和积分形式两种等价的形式。

1. 微分形式

分析力学的微分形式，是由虚速度原理和达朗贝尔原理相结合而得到拉格朗日动力学普遍方程，进而推广为自由参数的一般动力学方程（拉格朗日方程）。

1715 年，J. 伯努利（Johann Bernoulli，1667～1748）在一封信中明确提出“虚速度”的概念，断言如果诸力平衡，各力与力的方向上的虚速度的乘积之和必定等于零。

这个原理的最终完成，是法国数学家和物理学家拉格朗日（Joseph Lagrange，1736～1813）于 1788 年作出的。他把虚速度原理看作是一个普遍原理，认识到全部静力学问题都可以用这个原理作出论证。在该年出版的名著《分析力学》中他写道：“如果某一由任意多个物体或质点组成的系统，受到某一引力或运动的作用而处于平衡中，且系统会有一不大的运动，因此，每一质点将占据无限小的空间范围（虚位移），那么，

作用在所有给定点上的力和点在力的方向上产生的位移量之积始终为零。在计算中规定，在力的方向上产生的位移为正，反之为负。”这个原理的提出，使静力学由“几何静力学”时期进入到“分析静力学”时期。1829 年在引入“功”的概念之后，这个原理就被称为“虚功原理”。

J. 伯努利的学生、瑞士数学家和力学家欧拉在 1752 年写的重要论文《流体运动原理》中，得到了流体动力学的“欧拉方程”，把速度势 S 引入流体动力学中。由于不可压缩流体的运动遵从连续性原理，欧拉求出函数 S 必满足方程

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 S}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 S}{\partial z^2}=0$$

1743 年，达朗贝尔在《动力学论》中引进了“惯性力”的概念，而将由牛顿第二定律表示的运动方程，看成是在每一瞬间的平衡力系，这就是“达朗贝尔原理”。这一原理的引入，使动力学问题可以化为静力学问题进行处理。

拉格朗日将虚位移原理和达朗贝尔原理结合起来，得到了质点动力学普遍方程：

$$\sum_{i=1}^{n}[F_i+(-m_i a_i)]\cdot\delta S_i=0$$

式中 F_i、$-m_i a_i$、δS_i 分别表示第 i 个质点所受到的外主动力、惯性力和可能位移。这个方程概括了整个力学体系，由它出发，可以推导出力学的其他定理和方程。

拉格朗日在引入了广义坐标 q_i（因而广义速度为 $\dot{q}_i$）、广义力 Q_i 之后，又将普遍方程变换成包含这些新变量的方程：

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right]-\frac{\partial L}{\partial q_i}=Q_i \qquad i=1,2,3,\cdots,n$$

这就是自由参数的一般动力学方程。式中 $L=T-V$，表示体系的动能与势能之差，称为拉格朗日函数，t 代表时间。

法国数学家、天文学家和力学家拉普拉斯（Pierre Simon Laplace，1749～1827）修改了拉格朗日的位函数方程，证明了位函数 V 总是满足微分方程

$$\nabla^2 V=\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}=0$$

1813 年，法国数学家泊松（Simeon Denis Poisson，1781～1840）给出了一个更一般的形式：

$$\nabla^2 V=-4\pi\rho$$

这个关系出现于数学物理的各个分支中。

2. 积分形式

分析力学的积分形式是从莫泊丢的最小作用量原理发展起来的变分原理，这是以“最小”观念为基础开辟的一个处理力学问题的全新途径。

“最小观念”可以追溯到公元初期。亚历山大里亚的希隆已经把光线取最短路径的

思想引入光的反射问题上。14 世纪的惟名论者奥卡姆的威廉也根据“经济原则”提出了“奥卡姆剃刀”。在近代物理学的发展中使用最小观念最早一个成功的例子是费马原理的发现。在牛顿总结的第一定律中，也表明物体的自然运动是直线的或最短距离的运动。这些例子似乎都暗示着可能存在着某一普遍原理。

1744 年，法国物理学家莫泊丢以极大的热情强调了适用于各种物理现象的“最小作用原理”，指出体系实际发生的运动，是使某一作用量取最小值的运动。不过，莫泊丢对这一原理所作的数学说明是粗糙的。大体说来，他是含糊地把质量、速度和所通过的距离的乘积作为作用量的量度的。在运用这一原理解决具体问题时，还要在每个问题中试探性地找出一个特殊的“作用量”，当它受到最小条件的支配时，会得到真实运动的结果。

拉格朗日很早就关心这一问题。1755 年，他最先把这个方法称为“变分方法”。1760 至 1761 年，他便开始发表这方面的研究论文。拉格朗日把这一原理推广到一切物体的运动上去，并明确地把“作用”定义为运动量的空间积分或动能的时间积分的二倍。

1834 至 1835 年，由英国的哈密顿（William Rowand Hamilton，1805～1865）作为公设提出的哈密顿原理，真正完成了由莫泊丢开始的尝试，成为牛顿之后力学理论发展的一个最大的飞跃。哈密顿利用了拉格朗日函数 $L=T-V$，其中系统的动能 T 为系统的广义坐标 q_i 和广义速度 $\dot{q}_i$ 的函数；系统的势能 V 是系统的广义坐标，或许还是时间 t 和广义速度的函数。哈密顿把作用量写为

$$\int_{t_0}^{t_1} L(q_1,\cdots,\dot{q}_n;q_1,\cdots,\dot{q}_n;t)dt$$

断言：系统在任意二时刻 t_0 和 t_1 之间所发生的真实运动，是使哈密顿作用量的数值比在 t_0 到 t_1 内作任何其他可能运动的哈密顿作用量的数值都要小或者都要大；这所有可能运动的初态和终态分别都是相同的。这就是哈密顿原理，它可表示为 $\delta\int_{t_0}^{t_1} Ldt = 0$。

哈密顿原理更深刻地揭示了客观事物之间的紧密联系，它把力学原理归结为更一般的形式。此外，哈密顿还利用广义坐标 q_i 以及与它“共轭”的广义动量 p_i 定义了哈密顿函数

$$H = \sum_{i=1}^{n} p_i\dot{q}_i - L(q,\dot{q})$$

得到了哈密顿正则方程：

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial H}{\partial q_i} &= -\dot{p}_i\\ \frac{\partial H}{\partial p_i} &= \dot{q}_i\end{aligned}\right\} \quad i = 1,2,\cdots,n$$

$H=T+V$，等于系统的总能量。哈密顿函数和哈密顿正则方程，对于量子力学中薛定谔方程的建立起到了桥梁作用。

变分原理的确立，为自然科学的发展提供了新的思路并把整个力学理论建立在崭新的基础之上。这一发展的主要特征是从具有较广泛意义的概念和较少的公设出发，运用数学手段把已有的力学知识组织成为一个更加严密、系统和抽象的逻辑演绎体系。这不仅给出了解决力学问题的统一观点和方法，而且成为新的科学研究的起点，对于推动物理学论的发展，起到了重要的作用。

思 考 题

1. 伽利略在力学研究上做出了哪些重要贡献？
2. 伽利略是如何得到落体定律、惯性定律和抛体运动轨迹的？
3. 伽利略的科学研究方法有什么特点？
4. 惠更斯碰撞理论的主要特点是什么？他得出了哪些主要结论？
5. 说明牛顿三定律基本思想的历史渊源。
6. 说明引力思想的历史发展以及牛顿在建立万有引力定律中的工作和思考过程。
7. 牛顿的科学研究方法有什么特点？他的机械论观点表现在哪些方面？
8. 关于运动的两种量度的争论是如何提出来的？
9. 简述分析力学的创立过程。

第五章　光学的发展

在物理学诸分支学科的发展中，光学也像力学和热学一样，是物理学中最早形成的学科，也是最活跃的学科之一。从17世纪开始，近代光学的发展主要经历了几何光学时期和波动光学时期。19世纪下半叶，随着麦克斯韦电磁场理论的建立，最终实现了电、磁和光的统一，使人类对光的认识达到了一个新的水平。到19世纪末，人们在研究光的产生、光与物质的作用时发现了光的量子特征，并且建立起光量子理论，开始了量子光学时期。

第一节　光学的早期发展

17世纪，光学的研究取得了转折性的进展，集中体现在光的折射研究上，并对光学仪器的制作产生了积极的作用；而有关光的波动现象的发现，又使人们开始了波动光学奠基性的研究工作。

一、折射定律的建立

古希腊科学家托勒密最先研究了光的折射现象，通过实验方法测定了入射角和折射角，以后阿拉伯人也进行过类似的测量，但都没有找到入射角与折射角之间的数学表达式。

17世纪初，望远镜和显微镜被发明出来，由于新式光学仪器对观测技术的改进，诱发了开普勒对光学的研究，并在1611年发表了《折光学》一书。在前人研究的基础上，开普勒对折射现象作了进一步的研究。他根据自己的测定，将折射光线分为两部分，一部分与入射角成正比，另一部分正比于入射角的余割；而当入射角小于30度时，入射角与折射角大致是一种正比关系。此外，开普勒还发现了玻璃中的全反射现象。总的来说，在托勒密之后的1400多年间，人们对光的折射现象的认识进步并不大。不过开普勒关于“余割”的看法是有价值的，对斯涅尔的研究有所启发。

折射定律的精确公式是荷兰数学家斯涅尔（Willibrod Snell，1591～1626）、法国数学家笛卡儿和法国业余科学家费马（Pierre Fermat，1601～1665）先后利用不同方法得到的。

斯涅尔经过实验发现，入射角的余割是一个固定值，并且表述为：“在不同的介质里，入射角和折射角的余割之比总是保持相同的值。”1626年，斯涅尔去世，他的折射

关系式才公开发表出来。

斯涅尔从实验中得到了折射定律，但并未做理论上的推导。此后，笛卡儿对折射定律作了推导。笛卡儿将光看成由无数微粒小球组成，并且服从力学规律；他提出三条假设，①光速在较密的介质中较大；②在相同的介质里光的速度对各种入射角都有相同的比率；③在折射时，平行于折射面的速度分量保持不变。现在看来，其中的假设①与③无疑是错误的。1837 年，他的《方法论》发表，有关光折射的研究就发表在此书的附录《折光学》中。笛卡儿的折射定律与斯涅尔的定律内容是一样的，但表现形式不一样，前者用正弦比表示成了现代的形式。

笛卡儿的推导引起许多人的兴趣，像后世的哈密顿与高斯都有所研究。1661 年，费马从一全新的途径进行光折射的研究。他像亚历山大里亚的希隆一样，认为光沿捷径行进。前人已证明，光在同一介质中行进的路径是直线和光的反射定律，都是光沿捷径行进的结果。费马认为，光的折射也不例外，即光在不同媒介中行进应沿最短路线行进。这就是费马原理。由此，费马在假设光在较密的媒质中速度较小下，证明了光从光疏媒质进入光密媒质必然要向法线偏折。同样，借助费马原理也可解释光沿直线传播和光反射路径问题。

这样，从托勒密开始，人们经过了 1500 年左右的时间终于得到了严格的折射定律，连同反射定律和光沿直线传播原理一起，为几何光学奠定了理论基础，同时几何光学理论体系的确立也为当时光学仪器的研制创造了良好的条件。

二、衍射现象与薄膜颜色的研究

17 世纪中叶，人们注意到一些新的光现象，这些现象同光的直线传播原理不完全符合。由此人们开始了完全不同于几何光学的研究。

1665 年，人们公布了意大利教授格里马第（Francesco Maria Grimaldi，1618～1663）记录的一些光现象。格里马第是一位擅长观察的科学家，他的研究主要涉及光学领域，但比起前人的研究要精深得多。

格里马第注意到，如果将一束窄光线（日光）引入暗室，在光的路径上放一小直杆，可以发现它投射的阴影并不是清晰的，而有一个模糊的边缘。他还发现，在影子的边缘呈现 2～3 个彩色条带；当光很强时，色带甚至会进入影子里面。格里马第还在不透明的板上挖一圆孔代替直杆，在屏幕上呈现一亮斑，这个亮斑的大小要比光线沿直线传播时稍微大一些。这些现象说明光不是严格地沿直线传播的，有时会绕过障碍物前进，他把这种光线绕过边缘的现象叫做“衍射”。格里马第虽然作了很好的实验，但由于他过早的去世，使他没来得及进行深入的研究。

关于颜色，人们大都承袭亚里士多德的观点，认为颜色是一种主观感觉，一切颜色皆由光明与黑暗、白与黑按比例混合而成；媒质具有让光通过的可能性，而光把透

明媒质物体的可见性变成现实。在颜色的研究中，彩虹是人们颇感兴趣的现象。笛卡儿已猜测到，“光和颜色的多种多样”是由于物体运动的不同方式引起的，不同颜色与粒子的不同旋转速度有关，那些旋转最快的粒子给出红色的感觉，较慢的粒子给出黄色，最慢的粒子则给出绿色和蓝色的感觉。英国科学家玻义耳也注意到颜色问题。他在1663年发表的文章中研究了这一问题，发表了与亚里士多德的观点类似的看法。他认为，物体颜色并不是属于物体的带实质性的性质，而是由于光线在被照射的物体表面上发生变异所引起的；能完全反射光线的物体呈白色，完全吸收光线的物体呈黑色。

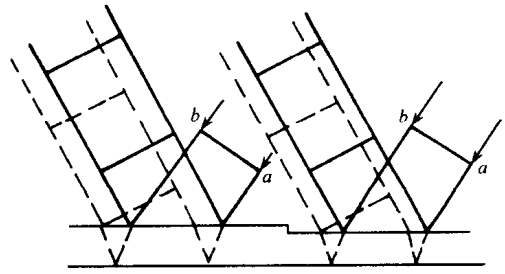


图 5-1　胡克对薄膜干涉的解释

另外一些科学家，也讨论了白光分散和聚集成颜色的问题。胡克等人主张红光是大大地浓缩了的光，紫光是大大地稀释了的光。胡克认为，“蓝色是视网膜上的一种倾斜的和混乱的光脉动的印象，其最弱的部分在前面、最强部分在后”；红色之中，最强的部分在前面、最弱的部分在后。胡克还注意到一些透明薄膜的颜色现象，这些薄膜如云母薄片、肥皂泡、珍珠母、水面上的油膜等。在研究云母性质时，胡克发现，薄片在一定厚度的范围内，可以产生类似彩虹的颜色。经过分析，胡克认为，薄片不同部位的颜色与该部位的厚度有关，这种厚度的变化使不同的颜色有规则地发生变化。此外，胡克还用两块玻璃板放在一起，中间夹一层空气膜。借此，胡克也发现了类似的光色效应。

在具体分析薄膜色彩的过程中，胡克认为，光落在一个透明薄膜上时，一部分光在上表面发生反射，另一部分光透过上表面、在下表面发生反射；前者较强，后者较弱，从而形成两个彼此平行但隔开一段距离的反射脉冲。这两部分反射光在人眼中可以产生不同的色觉，与光波的强弱和超前与落后有关。具体地说，“最弱的成分领先而最强的部分随后的斜向光脉冲的混合，在视网膜上引起蓝色的印象；最强的成分领先而最弱的成分随后的斜向光脉冲的混合，在视网膜上引起红色的印象”；其他居于中间的混合色则按其排列状况并引起其他的色觉。虽然这种说法并不正确，但胡克的解释考虑了两个反射面的作用，两部分反射光构成不同色觉的说法还是对的；他还模糊地接触到薄膜干涉的基本要素——前后表面上反射光的叠加，以及两束光的位相差的初步概念。此外，从图 5-1 中可以看出，胡克还创造性地确定了初步的作图法。但是，薄

膜厚度与所产生的颜色有什么关系，胡克并没有找到，他的研究为牛顿更精确的推导打下了基础。

1669 年，丹麦科学家巴塞林（Erasmus Barrtholinus，1625～1698）发现冰洲石晶体的双折射现象。他发现，通过冰洲石观察一个小物体，看到的是一个双重的像。1670 年，当巴塞林宣布他的发现后，惠更斯对此做出了解释，即光线通过晶体发生折射，形成了两条折射光线，一条是服从折射定律的寻常光线，一条是不服从折射定律的非寻常光线。但对于一条光线相继通过两个平行晶体所产生的现象，他还不能做出合理的说明。

三、牛顿的色散研究

在牛顿以前，对颜色的研究一直未取得很大的进展。据说在 13 世纪，德国的一位传教士曾在实验中模仿了彩虹现象，但他的解释仍未摆脱亚里士多德理论的束缚，他认为，阳光进入媒质（如水）的深浅不同，其折射的光色是不一样的。后来笛卡儿也进行了色散的实验。他用三棱镜使阳光折射，并投到屏上，发现并不像这位传教士所说的那样。但笛卡儿的屏离棱镜太近了，只能看到光带两端的红色和蓝色，中间的颜色并没有被展开。他解释说光受到折射时，光粒子的速度发生变化，加快的光导致红色的感觉，减慢的光导致蓝色的感觉。总的来说，在牛顿之前，色散理论显现得复杂而紊乱，由棱镜产生的折射被假定产生了色，而不是仅仅把已经存在的色分离开来。

牛顿的光学研究，在当时是一流的。还在读书期间，他就在光学研究上表现出强烈的爱好，尤其是他在 1665～1667 年间进行的日光色散实验，在前人的基础上，将实验研究推上了一个新的高度。由于他具有较高的光学研究水平，他在三一学院讲课也主要是讲授光学和数学，并开展了广泛的光学研究。1673 年，牛顿向皇家学会报告了“光学和颜色的新理论”，1675 年又报告了关于“牛顿环”的著名实验。此外，他的研究还涉及反射、折射、透镜成像、眼睛的作用、多种颜色光的组合、颜色理论、虹霓的解释，发明反射望远镜，等等。到 1704 年，牛顿将全部光学研究成果汇集在《光学》一书中，对他的实验研究进行了细致的描述。

《光学》一书分为三编，其结构类似《原理》。第一编分为两部分，第一部分给出了 7 个定义（如光线、反射、折射、入射角、反射角等），8 个公理（包括反射定律、折射定律等），8 个命题（其中包括 2 个问题、6 个定理）。此外还有 16 个实验，这些实验包括对日光色散的详细研究和反射望远镜的结构。第二部分包括 11 个命题和 17 个实验，以及 1 个定义。这部分内容包括按一定比例的各色光合成白光，以及对虹霓的颜色的解释等。

第二编分为四个部分，前两个部分主要论述“牛顿环”的观察，第三部分包括 20 个命题和 1 个定义，这个定义是关于“猝发”和类似波长的“猝发间隔”的说明。

第三编主要论述衍射现象，以及著名的31个“疑问”。“疑问”所讨论的有些问题已超出光学的范围，这是牛顿关于一般物理学问题思考的结果。

当牛顿还是一个大学生时，他听过巴罗（Isaac Barrow，1630～1677）教授的光学课，并帮助巴罗整理过《光学讲义》。他还亲自磨制镜片，作光学实验，并且装配过显微镜和望远镜。此外，牛顿还注意到笛卡儿和胡克的研究。特别是胡克关于颜色的研究。胡克认为，红色与蓝色都是原色，而别的颜色都是红与蓝的混合。对这些（包括巴罗的）理论，牛顿在早期的笔记中，提出了一些疑问，并动手做实验，以弄清这些问题。

最初，为了弄清色差的原因，他注意到玻义耳与胡克的实验。他对这些实验做了一些具有关键意义的改进，因为这样获得的光谱带可以分辨得很清楚，可以将不同色光相对的折射情况展示得很清楚，而以往的实验中所能看到的光谱只是两侧带颜色的光斑。牛顿在1872年将他的研究成果发表在《哲学杂志》上，这是牛顿发表的第一篇科学论文。

对整个实验过程，牛顿是这样描述的：

> 把我的房间弄暗，在窗板上钻一个小孔，让适量的日光进来。我再把棱镜放在日光入口处，于是日光被折射到对面墙上。当看到由此而产生的鲜艳而又强烈的色彩时，我起先真感到是一件赏心悦目的乐事；可是当我过一会儿再更仔细地观察时，我感到吃惊，它们竟呈长椭圆的形状；按照公认的折射定律，我曾预期它们是圆形的。

在实验中，棱镜要放置得当，这可使光谱展开的长度约为光束的5倍。在思考时，他想到各种解释，比如，光可能由于玻璃物质的不均匀使光束被散射开来；又如，光线在被折射后可能沿曲线行进了。但改进实验条件后，这些解释都被否定了。特别是在用另一个棱镜将一部分彩色光线再次折射时，他发现，不同颜色的光线的折射率是不同的（如图5-2）。他还套用F. 培根的话，称这个实验为“判决实验”。接着，他又做了一个补充实验，让光经过一个棱镜折射后在墙上形成一条竖直的色带，而后再让

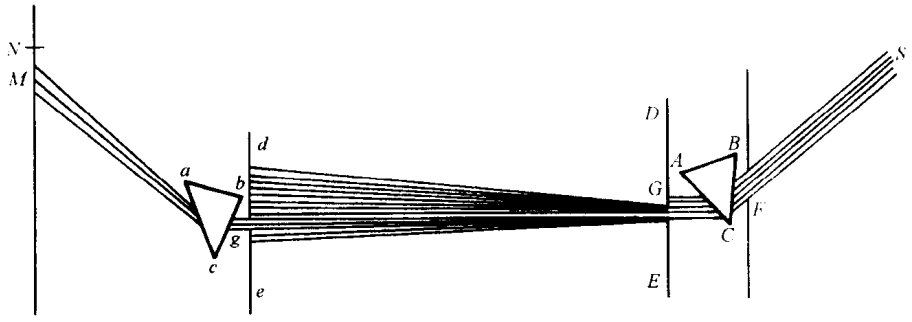


图5-2　牛顿的“判决实验”

光线经过第二个棱镜，后一个棱镜的轴垂直于第一个棱镜的轴。第二次折射并未使总的色带增宽，但光谱变得倾斜了，被第一个棱镜折射较大的颜色光线，在第二个棱镜后也折射得较大。这样，他的结论是：日光或一般的白光都是由某些颜色的光线组合而成的，这些颜色的光线具有原始的性质，并不是棱镜的折射造成的。一定的颜色具有一定的折射率，反之一定的折射率对应着一定的颜色。牛顿虽然不喜欢过分地宣扬自己的发现，但他在一封信中仍然指出：这个发现是“迄今为止大自然的作用中最为奇妙的发现，如果不是最重要的话”。

为了对太阳光谱成分看得更加清楚，即散射后的图像中各种颜色尽可能少的重叠，他又改进了实验条件，即在小孔后加一个透镜，使阳光会聚在焦点上，然后再将棱镜放在透镜后面的会聚光束中。这样，经棱镜折射后，所形成的光谱中每种颜色都清晰地显现出来。

为了证明适当的色光仍可以复合成白光，他又设计了一个实验（图 5-3）：使进入小孔的日光经棱镜散射，得到光谱；再经一个透镜聚焦，将这些光线聚焦于一个棱镜上，这个棱镜与第一个棱镜平行，所以可中和掉第一个棱镜和透镜的效应，形成了一条像日光的白光束；再将这束白光投射到第三个棱镜上，经折射后得到的光谱与单一棱镜的日光光谱是一样的。这说明，这些色光可以发生分离与复合，并导致颜色的变化。

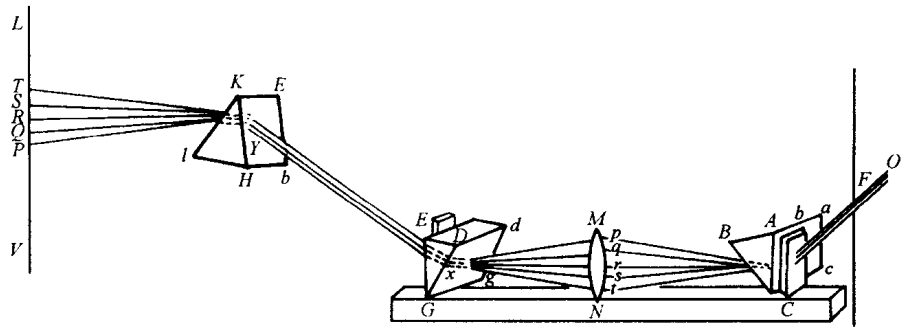


图 5-3　牛顿用三个棱镜的实验

关于色散实验，牛顿还从中归纳出一些带有规律性的结论。这大致是，颜色是光的固有属性，但可区分为两种，即原始的单色光和复合的复色光；光的颜色不同，其折射率也不同；从色散实验推广到大气光象研究，虹霓的形成也是一种光线经折射而产生的色散现象。此外，他还提出光是实体的观点，由于这种观点与光波的观点不相符合，在当时难免要引起争论。在“疑问”的论述中，他还重申了古代原子论，用以支持自己的粒子观点，并引申到引力的讨论。

牛顿在他的《光学》中，以大量篇幅描述他的观察与实验，详细描述了实验装置，以及实验的方法和观测结果。在光学实验中他仍坚持他的“不杜撰假说”的观点，甚

至在《光学》第一编第一部分一开始就明确指出："我的计划不是用假设来解释光的性质，而是用推理和实验来提出和证明它们。"牛顿对光学研究中的方法进行了深刻的总结，他指出："在自然哲学里，像在数学里一样，用分析方法研究困难的事物，应当总是先于综合的方法。这种分析包括做实验和观察，用归纳法去从中引出普遍结论，并且使这些结论没有异议的余地.除非这些异议是从实验或者其他肯定的事实得出的。因为在实验哲学中是不考虑什么假说的。尽管用归纳法来从实验和观察中进行论证不是普遍的结论的证明，可是它是事物的本性所许可的最好的论证方法，并且随着归纳的愈普遍，这种论证看来也愈为有力。如果在现象中没有出现例外，那么结论就可声称是普遍的。但是如果以后在任何时候从实验中出现了例外，那么就可以开始声称有这样的例外存在。用这样的分析方法，我们就可以进行从复合物到成分，从运动到产生运动的力这种过程的论证；一般地说，从结果而原因，从特殊原因而普遍原因，一直到论证终结于最普遍的原因。这就是分析的方法；而综合的方法则假定原因已经找到，并且已确立为原理，再用这些原理去解释由它们发生的现象，并证明这些解释。"

四、光的本性之争

随着光学的发展，关于光的本性的问题被许多物理学家所关注。人们先后提出了光的微粒说和波动说，并因此展开了长期的争论。

关于光是一种微粒的说法，早在古希腊就为毕达哥拉斯和德谟克立特等人所提出。他们认为，光是物体发射的一种微小的粒子，这种粒子进入人眼引起视觉。到 17 世纪，首先提出光是机械微粒观点的是笛卡儿。他在《屈光学》(1637) 中说到，"光仅仅是充塞其他物体孔隙的极其细微的物质"，这种"细微的物质"是一种弹性粒子，光反射就是这些粒子被弹性界面弹回而实现的，光折射现象也可以用这种粒子来解释。但是笛卡儿也将以太的思想引入到光学中，他认为光是一种压力，在完全弹性的、充满一切空间的媒质中传播。牛顿在早期的研究中是倾向于微粒说的，但还未完全肯定，他指出："可以设想光是一群难以想像的细微而运动迅速的大小不同的粒子，这些粒子从远处发光体那里一个接着一个地发射出来，但是在它们相继两个之间我们却感觉不到有什么时间间隔，它们为一个运动本原不断推向前进，开始时这种本原把它们加速，直到后来以太媒质的阻力和这本原的力量一样大小为止。"

由于对光的本性看法不一样，牛顿的解释不免要招来主张波动说的人的反对。在争论中，牛顿与胡克的分歧最为明显。牛顿认为，颜色是白光的组分；胡克认为，颜色是当光脉冲在折射中倾斜光线时，白光经受了变化后产生的。在回答胡克的质疑时，牛顿引用了胡克的观点，假定以太的振动是有周期的，其中最大的振动引起红色的感觉，最小的振动引起紫色的感觉，介于二者之间的振动形成红与蓝之间的颜色。最初 (1672)，牛顿的解释是将微粒说和波动说结合起来。他写道："如果假定光线是发光物

质向四面八方发出的微小物体，那么当这些微小物体碰撞任何折射或反射表面时，一定像石子抛入水中的情形一样，也必然在以太中激发振动。”到1675年，他开始拒斥纯粹的波动说，原因是这种理论无法解释光的直进现象，而且他也无法调和波动说与光的直进现象之间的矛盾。他坚持的以太说也主要是为了解释引力理论，在《光学》一书中就可以看出这一点。而当偏振现象被发现之后，似乎只有微粒说才能加以解释，这也促使牛顿转向微粒说，而以太只在《原理》中的思辨部分和《光学》的“疑问”中作过讨论。

1704年，牛顿出版《光学》一书时，他对光的本性的理论进行了总结。其中我们可以看到，除了更加倾向于光的微粒说之外，在一些“疑问”中，他也论述了光的波动说，并对光的波动说的困难进行了深入的剖析。

在“疑问28”中，牛顿问道：“把光设想为一种在流体中传播的挤压或运动的一切假说是否都错了呢?”他认为：“如果光仅仅是一种被传播的压力而没有实在的运动，那么光就不能把反射和折射它的物体激荡起来并使之发热。如果光是一种能在一个瞬间传播到一切距离的运动，那么在每一时刻在每一发光粒子中都要求有一个无限大的力，以产生该运动。而如果光是一种压力或运动，那么无论它是即时传播的还是需要时间的，它都应当弯到阴影中去。”他曾举声波的例子，即大炮声可传至障碍物之后，而光则不是这样。对于光的衍射，牛顿还进一步谈到，“这种弯曲不是向着阴影而是离开它，并且只有在光线通过物体旁边，与它相距很近时才有这种现象。一旦光线经过这物体之后，它就笔直前进”。

牛顿还注意到，在解释光的双折射现象时所遇到的困难。在“疑问25”中牛顿认为，除了现有的研究之外，光还应有一些尚未发现的“固有性质”，并指出，“反常折射是由于光线的原有特性而产生的”。他还在“疑问26”中详细叙述了这种性质，用今天的术语讲，这是“偏振现象”。所以，这种现象并非是什么“反常折射”，像牛顿所说，“那些属性是原来就存在于光线之中的”，并且“如果光仅仅是在以太中传播的压力或运动，那么这似乎也是解释不通的”。此外，牛顿还论及到力学中的以太问题，“用一种稠密流体来解释自然界中的现象是没有什么用处的，不要它倒更好地解释了行星和彗星的运动。它只能起到干扰和阻滞这些巨大天体的运动的作用，并使自然界的结构衰退；在物体的孔隙中它只能起到妨碍物体各部分的振动的作用，而振动正是它们的热和活性的由来。既然它毫无用处，只能妨碍自然界的行动，并使之衰退下来，那么由于它的存在是没有根据的，因而它应该被抛弃。而如果把它抛弃，那么光是在这样一种媒质中传播压力或运动的这种假说，也就和它一起被抛弃了。”

在“疑问29”中，牛顿试图回答“光线是从发光物质发射出来的很小的物体吗?”他认为，可以用光微粒与物体之间的机械作用来解释反射、折射和衍射现象，“对于产生所有各种颜色和不同程度的可折射性所必需的，只是认为光线是一些不同大小的物体，其中最小的可以带紫色这种最弱和最暗的颜色，并且较容易被折射面从直路上偏

转，其余的随着它们越来越大，可以形成更强和更明亮的颜色（蓝、绿、黄和红），而且越来越难以偏转。对于让光线处于易于反射和易于透射的猝发状态所必需的，莫过于认为光线是微小的物质，用它们的吸引力或某种其他的力在它们所作用的物质中激起振动，这些振动比光跑得更快，相继赶上光线并激荡它们，乃至轮流地增加或减小它们的速度，从而使它们处于那些猝发的状态之中。最后，冰洲石晶体的反常折射很像由某种吸引效能所造成，这种效能寓于光线的和晶体粒子的某些侧面中”。

虽然牛顿基本上是肯定微粒说的，但是在研究薄膜色彩和“牛顿环”时，他提出了与波动说很相近的“猝发”理论，以说明光现象中的“周期”性质。所谓“猝发”，牛顿认为，光微粒在折射面或反射面处将激起物质和媒质的振动，这种振动的传播速度比光线还要快，因而可以赶上和超过光线；每一光线由于受到这种降临到它的每一振动的作用而相继处于一阵容易透射、一阵容易反射的状态。他还写道：“每条光线在它通过任何折射面时都要进入某种短暂的组态或状态，这种组态或状态在光线行进中按相等的间隔复原，并且在每次复原时倾向于使光线容易穿过下一个折射面，而在两次复原之间则容易被它所反射。”他将“每一次复原和下一次复原之间光线通过的间隔”称为“猝发间隔”。这与“波长”的定义很相似，可见他对光的周期性是有所认识的。

关于光的本性，早期主张波动说的主要是格里马第、惠更斯和胡克，他们对此进行了研究与发展。

格里马第最早明确地提出光的波动说。当他发现光的衍射现象，即发现光线并不沿着直线传播时，他设想，光是一种作波浪状运动的精细流体，这种流体能以极大但有限的速度漫射，通过透明体；衍射现象中的色带就如同一块石头投入水中所形成的圆形波纹。此外，他对颜色和色觉的解释也都用到波浪式流动的流体的比拟。由于是波浪式的流体，影子的边缘就必然是模糊的和有影像的，就像水波碰到障碍物时会绕过去一样。

胡克的波动理论与他的颜色研究相关，认为光是类似水波的快速脉冲。在1665年出版的《显微术》中，胡克注意到金刚石受到摩擦、打击和加热时在黑暗中会发光的现象，并以此为根据认为，“光必定是一种振动”，并且是一种快速的小振幅的振动。关于光波扩散，胡克写道：“在一种均匀媒质中这一运动在各个方面都以相等的速度传播。所以发光体的每一脉动或振动都必将形成一个球面。这个球面将不断地扩大，就如同把一石块投入水中后在水面一点周围的环状波膨胀为越来越大的圆圈一样（尽管肯定要快得多）。由此可知，在均匀媒质中扰动起来的这些球面的一切部分都与射线成直角。”这样看来，光是由发光体的振动在媒质中引起的一系列与射线成直角的球形脉冲的扩散。这实际上已提出了波前或波面的概念。

在胡克之后，惠更斯对光的波动说做了有益的扩展。1678年，他向法国科学院提交报告《论光》（于1690年出版）。他认为，如果怀疑“光是某种物质的运动”，那是

无法想像的。他还明确地提出，光是发光体中微小粒子的振动，在弥漫于宇宙空间的以太中传播的波动过程。这样，他明确将“以太”概念引入光学研究中。以太作为一种媒质传输光脉冲，它是以极高和有限的速度传播的。当惠更斯首先计算出光速之后，又设想传输光的以太粒子应是极硬的和富于弹性的。为此他写道：“除非假设以太物质的弹性，它的微粒才会具有迅速恢复原状的性质，而不论它们是否或强或弱地被推开。因此，光将总是依照同一速度传播。”他还指出，光线之间可以各自传输而彼此间毫无影响，“当我们看到一个发光体时，光线不可能像射弹或箭穿过空气那种方式，由物质从发光体传给我们”。

惠更斯认为，光是波动，“传播波的物质的每一个微粒，应当不仅朝沿亮点出发的直线上的下一个微粒传递其运动，而且必定朝所有与它相邻和背向运动的微粒传递。因此可以得出，围绕每一个微粒，都有一个以该微粒为中心的波产生。”这就是著名的“惠更斯原理”。惠更斯还具体地说明了这一原理，他结合图 5-4 写道：“若 *DCF* 是以亮点 *A* 为中心发出的波，在球 *DCF* 内的微粒 *B* 发出其分波为 *KCL*，它将在由 *A* 发出的主波到达 *DCF* 的同时，与波 *DCF* 在 *C* 点相遇。显然，波 *KCL* 上的只有区域 *C* 才与波 *DCF* 相遇，即只在 *AB* 的联线上相遇。同样，球 *DCF* 内的其他微粒，譬如 *bb*、*dd* 等，也会产生它们自己的波。不过这些波中的每一个单独与波 *DCF* 相比起来，可能是极其微弱的，*DCF* 是由所有波的离中心 *A* 点最远的表面部分组成的。”从图中可见，由一点产生的光波的传输是以球面波的形式传输的，每个子波也都是下一个球面波的中心，而这些子波的波前的包络面就是点波源的新波前。

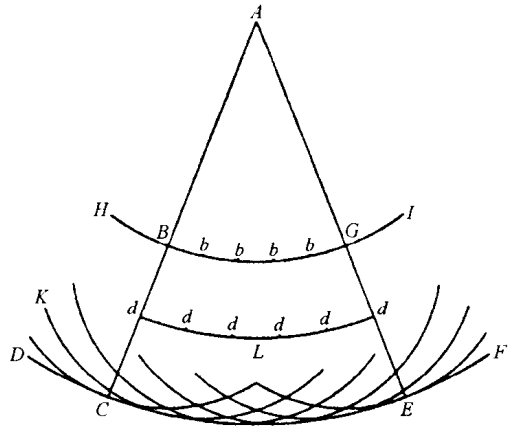


图 5-4　惠更斯原理的示意图

惠更斯还利用新的原理绘出了反射和寻常折射的图形，并导出了折射定律，以及光波在不同媒质中传输速度的比值。这个比值与费马的推导结果一致，但与笛卡儿和牛顿的结果不同。在解释光通过透明固体的现象时，他设想，“光波是由均匀地填充透明物体间隙的以太物质传递的。由于光波连续自由地穿过透明体，所以透明体始终充

满着以太”。因此，以太充满于固体微粒的孔隙，当光通过以太传播时，由于必须绕过固体微粒而比在自由空间传播慢得多，所以光在透明媒质中比在真空中行进要慢。

在解释双折射现象时，惠更斯认为，光通过以太微粒，同时也通过晶体物质微粒，以太微粒对光波的传输有影响，并形成一个球面波（即寻常光线）；而晶体中规则排列的微粒都是椭球体，它们也对光波的传输产生影响，并形成一个椭球面波（即非寻常光线）。这样，光波在方解石晶体中的传输形成了两个不同波阵面。但是，如果光波连续通过两个方解石晶体时，会产生 4 条光线；当两个晶体相互平行放置时，在第一块晶体中形成的双光线，在第二块晶体中这些光线并不进一步分开，而是平行地通过这块晶体；当相互垂直放置时，两个晶体中的寻常光线与非寻常光线会相互交换。适当放置第二块方解石，双折射现象还会消失，就只有一根射出。对此，惠更斯的波动理论是难以作出解释的。因此惠更斯写道：“看来似乎有必要在我刚才所作的假定之外，再作进一步的假定。经过这么多次的试验所证实了的假定，不会因此而失去它们的可行性。”（图 5-5）

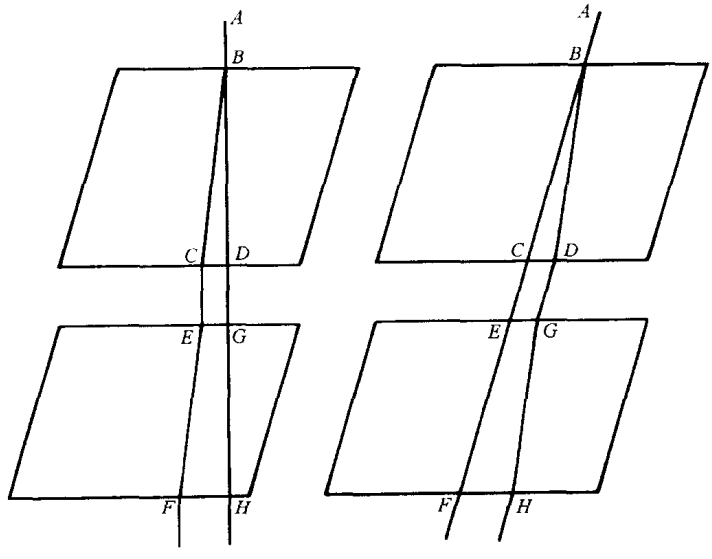


图 5-5　两方解石平行放置时所产生的现象

此外，对于影子边缘的色带和薄膜颜色，惠更斯也是难以作出解释的，因此波动说同微粒说相比就处在劣势的地位。作为波动说的主干——惠更斯的波动理论是有缺陷的，如他的波是纵波（不是横波），而且是脉冲波；惠更斯也未考虑干涉现象和颜色现象，特别是波动理论的数学基础还比较薄弱。

总起来讲，波动说的困难在于它难以解释光的直线传播这一基本事实；不能解释偏振现象，不能圆满地解释双折射现象；传输光波的以太物质也是值得怀疑的。在 18 世纪的光学发展中，由于牛顿力学的成功，而符合牛顿力学理论的光微粒在描述光现

象上逐渐占据了统治地位，波动说就无足轻重了。

第二节　光的波动说的复兴

在18世纪的光学发展中，牛顿提供的“范式”产生了极大的作用，细微的流质的观点影响着包括光学在内的物理学诸分支的发展。但是也有例外，那就是瑞士物理学家欧拉（Leonhard Euler，1707～1783），他将光看成是媒质的某种振动，不过这种观点并没有引起人们的注意。然而，我们也应看到，这种细微的流质模型对早期物理学理论的定量化是有助益的，只是到19世纪随着科学实验的发展，细微的流质模型才逐渐让位于更抽象和更数学化的模型。

一、托马斯·杨的研究

托马斯·杨（Thomas Young，1773～1829）幼年时就聪慧过人，尤其擅长语言，青年的托马斯·杨已会10多种语言。后来他攻读医学，但对物理学也有很大的兴趣。在研究听觉和视觉问题时，他注意到光的微粒说和波动说的争论。尽管当时在学术界占统治地位的是微粒说，但是在实验研究过程中，他注意到惠更斯的波动说的合理性，并借助这一学说解释了一些实验现象。

1800年，托马斯·杨在进行声和光的实验研究时，他认为光与声都是波，并且研究了声波叠加的现象，还提出了“干涉”概念。1801年，他在英国皇家学会宣读了关于薄膜颜色的论文。在这篇文章中，他扩展了惠更斯的波动观点，明确了光波的频率和波长的概念。托马斯·杨还圆满地解释了“牛顿环”现象，这是牛顿在《光学》第二编、第一部分“观察4”中作过详细描述，即

> 为了更好地观察当光线对空气倾斜越来越小时，从白色圆环中出现的颜色顺序，我取两个物镜，一个是14英尺望远镜用的平凸透镜，而另一个是用于约50英尺望远镜上的大型双凸透镜，将平凸透镜以其平的侧面朝下，放在双凸透镜上面，我慢慢地将它们挤压在一起，使颜色相继出现在圆环的中央，然后又缓慢地将上透镜从下透镜往上举起，使这些颜色相继在同一地方再度消失。通过将透镜挤压在一起而最后出现在其他颜色中央的颜色，在它最初出现时，看上去像一个从圆周到圆心颜色几乎是均匀的圆环，再进一步压紧透镜时这色环就不断变宽，直到一种新颜色出现在它的圆心，于是它变成一个包围着新颜色的圆环。更进一步压紧透镜时，这个圆环的直径会增大，而它的环道或周边的宽度则减小，直到另一种新的颜色出现在最后一个色环的圆心。如此进行下去，直到第三、第四、第五种以及别种后随的新颜色相继出现在那里，并且变成包围着最内层颜色的一组色环，最后一个是黑色斑点。

反之，将上透镜从下透镜举起时，圆环的直径就会减小，它们的环道宽度增大，直到它们的颜色相继到达圆心，这时它们的宽度相当大，我就较以前更容易认出和识别它们的色种了。

牛顿的成功不只是对所观察到的现象作了详尽的描述，他还进行了仔细的测量，并用级数表示亮环和暗环的变化规律。遗憾的是，牛顿更多地偏向微粒说，所以未能做出更加合理的说明。

托马斯·杨是从对水波的研究中得到“干涉”概念的。他写道：“设想有一组水波，它们以某个不变的速度沿平静的湖面运动，并进入一个狭窄的水道，水道是与湖相连通的。现在我们再设想，在某个因素的作用下形成了另一组同样的波，它与第一组波一样，以相同的速度到达该水道。这两组波并不相互干扰，它们的作用将结合在一起。如果它们到达水道时，一组波的波峰与另一组波的波峰相重合，那么将形成一组波峰更高的波。但如果一组波的波峰与另一组波的波谷相重合，那么波峰恰好填满波谷，水面将保持住平静。我假设，如果以与此相同的方式将两束光混合在一起，则每次都会出现类似的效应。我把这一现象称为光的干涉现象。”借助干涉原理，托马斯·杨对牛顿环做出了解释，即在透镜与玻璃之间形成一个空气层，光线在空气层的上下表面反射的两束光相互叠加就产生了干涉现象。具体地讲，“当有不同起源的两个振动运动，或者完全相同，或者在方向上很接近时，那么它们的共同作用等于他们每一个振动单独所发生的作用之和”，这就对干涉原理和相干条件作了较完整的表述。为了进一步说明干涉理论，他还用紫外线做实验。由于紫外线是不可见光，他让紫外光线反射在涂有氯化银溶液的纸上，结果出现了黑环，从而证明了他的干涉原理。

1801 年，托马斯·杨在《哲学杂志》上发表的论文中很完整地阐述了干涉原理，即“当同一束光的两部分从不同的路径，精确地或非常接近地沿同一方向进入人眼，则在光线的路程差是某一长度的整数倍处，光将最强，而在干涉区之间的中间带则最弱，这一长度对于不同颜色的光是不同的”。托马斯·杨还明确地指出，相互叠加的两部分光必须是发自同一光源。如果不能满足这个条件，干涉实验往往是失败的。

1802 年，托马斯·杨在英国皇家学会上讲演时讲述了自己所作的双缝干涉实验，并且强调说：“为使这两部分光在屏幕上引起的效果叠加起来，需要使来自同一光源、经过不同路径的光到达同一区域，而不使其相离散，如有离散，也能根据回折、发射或折射把光从一方或从两方重合起来，将它们的效果叠加。”接着他又描述了双缝干涉实验：“将平行光通过两个相距很近的针孔，针孔作为新光源，从那里发出了球面光波，照射到屏幕上，光的暗影对称地向两侧散开……这两部分光叠加后，屏幕上正对两小孔连线的中心处最明亮。两侧部分，光从两个小孔到达各点有一定的路程差，若路程差是光波波长的 1 倍、2 倍、3 倍……则屏幕上的这些地方为亮区，并且相邻的亮区间距离相等。另一方面，介于亮区中间的暗区，则对应于路程差为光波波长的$\frac{1}{2}$倍、1$\frac{1}{2}$

倍、$2\frac{1}{2}$倍……的地方。”此外，他还测定了光波的波长，“比较各次实验，看来空气中极红端的波的宽度约为$\frac{1}{36000}$英寸，而极紫端则为$\frac{1}{60000}$英寸”。这里的“波的宽度”就是波长，折合成现代的数据，约为7100埃（红光）和4200埃（紫光）。托马斯·杨首次实现了用实验方法测得可见光的波长。

在1803年的讲演中，托马斯·杨更明确地涉及到光的波动说与微粒说之争。他认为：“固执于牛顿的光的理论或现代光学专家的不太普遍的假说的人们，最好是对任何事物都要从他的自身的原理出发，提出实验的说明。并且，如果他的这种努力失败的话，他应该承认这些事实，至少应该停止目的在于反对这些事实及其所遵循的理论体系而发表的演讲。”他的说法是有针对性的，当时有一些人对他进行了猛烈的攻击，认为他所作的称不上是实验，“干涉原理”是极其荒谬的和不合逻辑的。尽管如此，托马斯·杨在1807年出版了他的论文和讲演集《关于自然哲学和机械工艺的讲演》。由于人们不理解他的研究，所以只卖出了一册，而他要反驳持微粒说的学者的文章也无处发表。然而，他并不灰心，正如他自己所说：“尽管我仰慕牛顿的大名，但我并不因此非得认为他是百无一失的。我……遗憾地看到他也会弄错，而他的权威也许有时甚至阻碍了科学的进步。”尽管托马斯·杨的理论在他的祖国并未被人们所理解，但却受到部分法国学者的重视。

二、菲涅耳与阿拉果的研究

在19世纪初，法国的一些学者和工程师也很重视对光的波动说的研究，并且大大地推动了光的波动说乃至整个光学的发展。

1. 新的发现和托马斯·杨理论的困难

托马斯·杨的干涉理论在光学发展中具有重要的意义，但还不足以使波动说完全取代微粒说。就当时来看，马吕斯和布儒斯特的新发现也使托马斯·杨的理论在解释偏振现象上遇到了困难，这种困难就像当年惠更斯在解释双折射时遇到的困难一样。

法国工程师、物理学家马吕斯（Etienne Louis Malus，1775～1812）偶然发现了反射光的偏振现象和平面偏振光通过晶体后的光强变化。1809年夏的一个傍晚，马吕斯用冰洲石晶体观看被玻璃窗反射的太阳光像时，他惊奇地发现，当在某一位置用晶体观察时，太阳的双像之一消失了。他想，这可能是光在大气中运行时发生某种变形。可是，在当天晚上，马吕斯又发现，蜡烛光以36度角落在水面上反射时，用冰洲石晶体也会看到类似的现象，即只有一个像；在其他的情况下，两个火焰像的明亮程度不同；当转动冰洲石晶体时，两个火焰像呈现出交替的明暗变化。

马吕斯对寻常光与非寻常光的反射作了进一步的研究，他发现，如果从冰洲石晶

体出来的这两束光同时以 36 度角落在水面上，寻常光被部分地反射，而非寻常光则完全未被反射，不被反射的光被折射后进入水中了，他由此提出了光的“偏振”的术语。他证明，寻常光线与非寻常光线的“偏振”方位是相互垂直的；折射光只是部分偏振光，其偏振状态与反射光的偏振状态恰成相反的分布。

1811 年，英国科学家布儒斯特（David Brewster，1781～1868）发现，光线射向两种介质的界面，当反射光线与折射光线恰好相互垂直时，反射光就成为平面偏振光。同年，法国物理学家阿拉果也发现了色偏振现象。

对于偏振现象，马吕斯与布儒斯特都坚持用微粒说来解释，并且反对波动说的解释。对于自己的新发现，马吕斯认为，他找到了光粒子有不同“侧面”的决定性的证据。然而，托马斯·杨并不这样认为，他坚持用波动说来解释。在给马吕斯的信中，他写道：“您的实验证明了我采用的理论（即干涉理论）有不足之处，但是这些实验并没有证明它是虚伪的。”

2. 菲涅耳的贡献

与托马斯·杨不一样，菲涅耳（Augustin Jean Fresnel，1788～1827）不是神童。据说，托马斯·杨在 2 岁时就能阅读，而菲涅耳直到 8 岁才开始认字，但他的才智随着年龄的增长而日渐卓越。菲涅耳的职业是工程师，但后来（1814）他转而对光学发生了兴趣，并且独立地做了托马斯·杨在 10 年前所做过的实验，并比托马斯·杨的实验有所进步。据说，阿拉果看到菲涅耳的报告之后，就转向了波动说，同时提醒菲涅耳注意托马斯·杨的实验。在阿拉果的鼓励下，菲涅耳加快了他的研究进度，并且最终为波动说提供了一个坚实的数学基础。

最初，菲涅耳将一根细直而光滑的线放在点光源发出的光束中，在屏上显现出彩色条纹。他精确测量了从光束轴线到诸条纹的距离，并且注意到，当通过细丝一侧的光在到达屏之前被别的物体挡住时，屏上影内的光带就消失了。正是这个实验使菲涅耳领悟到干涉原理，可是当时有许多科学家否认这与干涉有关，并用流行的观点来解释衍射现象。

1815 年 10 月，菲涅耳向科学院提交了关于衍射的研究报告。在这篇报告中，除了衍射的实验之外，他还提出了惠更斯-菲涅耳原理。为此，他写道：“在任何一点的光源振动可以看作在同一时刻传播到那一点上的光的元振动的总和，这些元振动来自所考察的未受阻拦的波的所有部分在它以前位置的任何一点的各个作用。”在菲涅耳的研究中，他采用了惠更斯的子波概念，并加以完善，使子波具有了频率、振幅和位相的内容，从而使光的衍射理论更加完善。

为了说明干涉原理，菲涅耳又设计了新的实验，即双光干涉实验。他使两个平面镜并接起来，交接的角度略小于 180 度。两面平面镜对一较小光源反射，便可得到两束相干光，在屏上产生了清晰的干涉条纹。由于完全避开衍射作用，使光的干涉得到

了充分的肯定。

双光干涉的研究是菲涅耳对光学发展的一个重要的贡献，得到阿拉果的支持，并使阿拉果成为法国学术界转而皈依波动说的第一人。

除了实验研究，菲涅耳也试图在数学推导上有所作为，但他最初的推导还不够严密，并且拉普拉斯和泊松等人对波动理论未予重视。这样，菲涅耳决心在实验与理论上作更精密的研究。

在计算衍射花纹时，菲涅耳提出了半波带法，结合惠更斯-菲涅耳原理，可以精确地计算出圆孔、直边等形状的衍射情况。此外，他还利用惠更斯-菲涅耳原理，克服了惠更斯关于子波形成包络的局限，成功地证明了光是沿直线传播的。这就成功地消除了波动说的一个极大的困难，对确立波动说具有重要的意义。

在马吕斯等人发现偏振现象之后，一开始托马斯·杨也不能解释。到1817年，托马斯·杨提出了新的观点，即光波与声波的不同之处在于，光波是像水波那样的横波。他向阿拉果表达了自己的观点，在给阿拉果的信中，他写道："波动说可以解释横向振动也在径向方向上以相等速度传播，但粒子的运动是在相对于径向的某个恒定方向上，而这就是偏振。"阿拉果将此信转告菲涅耳，菲涅耳很快就以横波观点为基础，推导出光的反射和折射的振幅比公式，即菲涅耳公式，并且与后来根据电动力学理论导出的公式完全一致。新的理论最重要的成就是解释了当时惠更斯不能解释的双折射现象，菲涅耳认为，双折射中的两道光线，一道光线在某个平面内振动，另一道光线在一个与前面的平面垂直的平面内振动；当这两道光线发生折射时，其折射角就不一样。也就是说，这两束光线的性质不同，所以发生的折射也不一样。菲涅耳公式是现代薄膜光学中最基本公式之一，因此这一公式的建立也是菲涅耳对光学的重大贡献之一。

光的波动说也像其他科学理论一样，除了解释现有的现象之外，还应具有某些"预测"的能力，借此以"判决"其理论的正确与错误。这样的判决发生在1818年，当时法国科学院悬奖以发展衍射理论，希望能用微粒说来解释衍射现象。尽管开始菲涅耳并没有多大兴趣，但在阿拉果和安培的鼓励下，菲涅耳向科学院提交了论文。菲涅耳的论文果然使评奖委员会的人员大吃一惊，他们没有想到一位不知名的学者竟然写出来如此好的文章。评审是很严格的，当时的著名学者泊松提出了一个"判决"式的问题，即是否按菲涅耳公式来推导，可以得到一个更令人大吃一惊的结果：在一个盘后的一定距离上放置屏幕，光线可在屏幕上形成的影子中心出现亮点。泊松认为，这样的结果是荒谬的，这是不可能的。菲涅耳和阿拉果接受了挑战，他们进行了精密的实验，结果泊松根据菲涅耳理论作出的"预言"被证实了。这个"预言"轰动了科学院，并且迎来了波动说的辉煌胜利。

1819年，菲涅耳与阿拉果合作进行了验证光是横波的观点的实验。他们将单色光射向杨氏双缝，其后的两条光路上各放置一个起偏器，观察屏幕上形成的干涉条纹变化情况。结果令人信服地证明，光是横波。

由于菲涅耳在光学研究上的成就，他被誉为“物理光学的缔造者”。在这一缔造过程中，我们也不应忽视阿拉果的作用，尽管他曾一度在光是横波的观点面前有过犹豫。正是他介绍了菲涅耳的研究工作，并使菲涅耳注意到托马斯·杨的研究工作；阿拉果还将托马斯·杨关于横波的观点及时地转告菲涅耳，并使他们建立了良好的合作关系。

第三节　光速的测定

光的传播速度极大，但是伽利略认为，光在传输时仍需要一定的时间。在《两门新科学》中，伽利略提出了最早的测量光速实验的设计。伽利略的实验大致是这样的，即先让两人各提一盏灯，在近距离上进行练习。当一人用手打开自己的灯光时，另一人看到时当即就挪开遮光的手。这样反复联系后，在一天夜里，两人分别站在距离约3意里（约4500米）的地方。只要利用他们的手遮住或打开灯光就能测量光行路程太小，伽利略认为还可挪至8～10意里远，并用望远镜观察遮住或打开灯光的动作。根据这个原理，伽利略还实际进行了操作。他选用的距离为1意里，“结果我未能确定地弄清楚对方传来的光是不是即时返回的”。这说明光速的确是很大的，而且是根据实验得到的结论。伽利略的失败并不奇怪，说明用简易的设备测量如此大的速度是不行的，因为光的快速远远超过寻常物体的运动速度。到19世纪初，托马斯·杨在研究干涉现象时指出，光在密度大的介质中的速度应比它在密度小的介质中的速度小。这与主张微粒说的看法正相反。如果能确定光在密度不同的介质中的速度，并与真空中的光速相比，就能确定波动说和微粒说中哪个是正确的。因此光速的测量和确定不只是一个物理常数了，而且成为关于光的本性争论中一个具有“判决意义”的实验研究。

一、天文上的测量

由于光速太大，在测时技术尚不发达的时代，只有加大光程了，早期在天文观测中实现光速测量就不足为怪了。

首先获得光速为有限的证据是丹麦天文学家罗默（Olaf Romer，1644～1710）。罗默年轻时跟随巴塞林研究天文学，后去巴黎天文台工作。罗默在观测木星卫星运动上有一定的名声，他精确测定了木星卫星公转的运行时间表，并可以准确预报木星的卫星食的时刻。他发现，一年之中，当地球在自己的轨道上朝向木星运动时，木卫食的时刻就逐渐提早；而背离木星运动时，木卫食的时刻就逐渐推迟（图5-6）。由此推断，这与光的速度有关，进而推断光的速度是有限的。这样，人们可以将伽利略设计的两个“山头”分别放在地球上一个、木星上一个，二者相距几亿千米。

1676年9月，罗默在法国科学院宣布，预计11月9日上午5时25分45秒发生的木卫食要推迟10分钟。对此，巴黎的天文学家都不以为然，有些人甚至嗤之以鼻，多

数人都想看看罗默的笑话。到了那一天清晨，木卫食果然推迟了 10 分钟。后来，惠更斯根据罗默的数据和地球轨道直径的数据，计算出科学史上第一个光速值，即227 000千米/秒，这是一个不错的观测值。

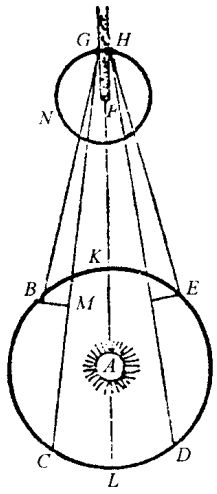


图 5-6　罗默测量光速的原理图

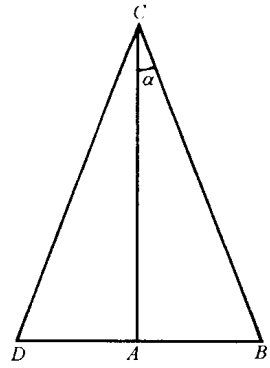


图 5-7　光行差原理图

当罗默掀起的轩然大波渐渐消退时，1728 年，英国天文学家布拉德雷（James Bradley，1693～1762）用一架长 60 多米的望远镜精心观测，发现在一年中，恒星会发生一个极小的椭圆形位移。这是怎么回事呢？据说，他在泰晤士河上航行时，偶然发现一种现象，当船转弯时，桅杆上的风向标会改变方向。这使得他联想到观测到的现象。这种椭圆的运动与此很像，他叫做“光行差”现象，与地球运动引起的视差完全不同。

因为光速并非无限，地球也有一定的速度，光行差就是两种速度叠加的结果（如图 5-7）。布拉德雷对此写道：“假想 CA 是一条光线，垂直地落到直线 BD 上，如果研究（指观察者）静止于 A 点，那么不管光的传播需要时间还是只需瞬间，物体必然出现在 AC 方向上。但是，如果眼睛（观察者）从 B 向 A 运动，而光的传播又需要时间，光的传播速度与眼睛（观察者）的速度之比等于 CA 与 BA 之比，则当眼睛（观察者）从 B 运动到 A 时，光从 C 传播到 A……”

可见利用光行差求出光速的原理是很简单的，但观测必须要很精确。经测量，他得到的光速值为301 000千米/秒。这样，人们不仅得到了更精确的光速值，而且也使人们回忆并重视起罗默的测量工作。

天文学上的精确测量使光速测量成为可能，但是仍存在一定的误差。尤其是在托马斯·杨提出“判决”实验之后，这样的数值离“判决”粒子说与波动说之争的要求还很远，所以仍需回到实验室来测光速。

二、菲索与傅科的测量

在18世纪，在实验室测光速仍是非常困难的，直到19世纪，由于实验技术的不断改进，才使在实验室内测量光速成为可能。

1834年，英国的惠斯通（Sir Charles Wheatstone，1802～1875；由于发明“惠斯通电桥”而出名）提出了测光速的新方法，他利用旋转镜观测火花，试图得到光速值。1838年，阿拉果从惠斯通的方法得到启示，认为这不仅可以得到光速值，而且可以“判决”关于光的本性的学说。

从图5-8上可以看出阿拉果装置的原理，从Ⅰ、Ⅱ同时放出电火花，对应的光线1、光线2被旋转镜反射。在侧面观察，应看到两个并列的火花。如果在光线Ⅰ的途中设置水管，按波动说，通过水管的光线1应迟到一些，这样得到的光线应稍微有些偏离。但阿拉果的实验因他的眼睛不好而未进行，他让菲索和傅科作这个实验。

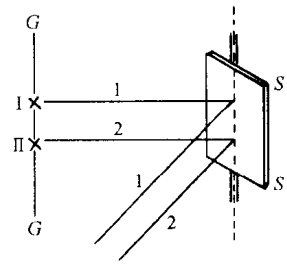


图5-8　阿拉果实验简图

1849年，菲索（Armand Hippolyte Louis Fizeau，1819～1896）首先在地面上测得光速值，其值为315 300千米/秒。他的装置和原理大致是：光从半镀银膜镜 m 反射后，经高速旋转的齿轮 W 投向反射镜 M，再沿原路返回。若齿轮转过一齿所需时间正好与光往返的时间相等，就可经半镀银膜镜观测到光，从而计算出光速值（图5-9）。为了延长光行的时间，菲索的旋轮装置放在一个山顶，反射镜 M 放在另一个山顶，二者相距8633米，光程超过17千米。

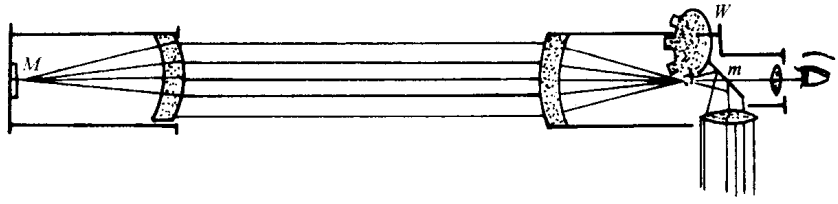


图5-9　菲索测量光速的原理

另一位法国科学家傅科（Jean Bernard Leon Foucault，1819～1868）采用与菲索不同的方法，而与10年前阿拉果的旋转镜方法相似。1850年，傅科利用旋转镜比较水中和空气中的光速。从图5-10中可以看出，光线经旋转镜 m 反射到 M 和 M'，T 管中装有水。一束光经空气折返，一束光经水折返。结果证明，光线通过水所用时间大于通过空气所用时间，即光速在水中变慢，这与托马斯·杨的预见相符合。

1862年，傅科改进了装置，用于直接测量光在空气中的行进速度。其装置与原理

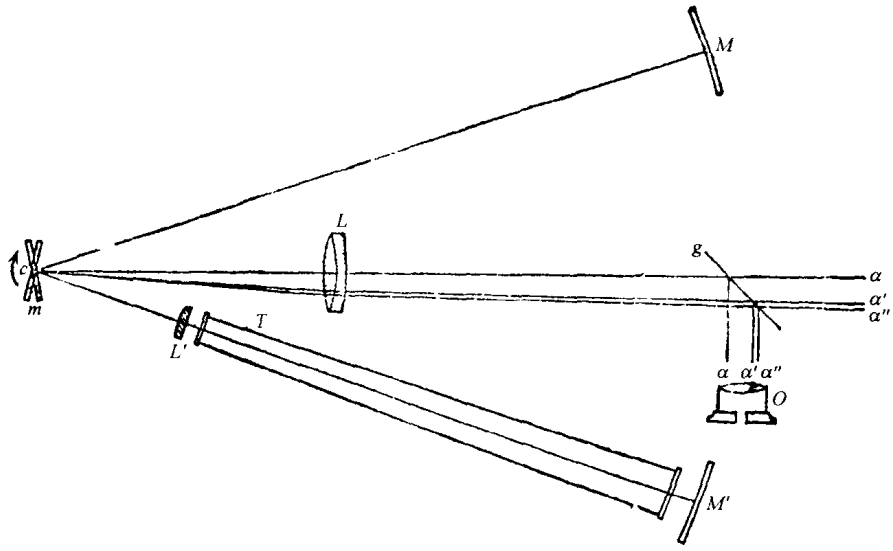


图 5-10　傅科比较光速的实验

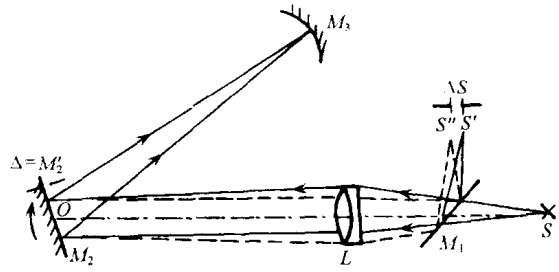


图 5-11　傅科测量光速的原理

从图 5-11 中可以看出，光从 S 发出，穿过半镀银膜 M_1 和会聚透镜 L，到达旋转镜 M_2，经反射到凹面镜 M_3，再沿原路返回。被 M_1 再反射并成像 S'；如果旋转镜 M_2 作高速旋转，则光线由 M_3 返回到 M_2 时，M_2 在这一段时间内有稍许偏转，由此引起的像 S'' 产生一个位置差 ΔS，借此可以算出光速值。

傅科用五架庞大的凹面镜，以延长光路，即使如此光程也只有 20 米，旋转镜转速为 400 转/秒，因此产生的位移只有 0.7 毫米，由此测得光速值为298 000千米/秒。1874 年，有人对傅科的装置作了改进，测量结果更为精确，约为299 990千米/秒。

这时，波动光学不但为人们广为接受，而且已进入全盛时期，傅科等人的测量工作还算是一个迟到的好消息。

三、迈克耳孙的测量

迈克耳孙（Albert Abraham Michelson，1852～1931）是一位优秀的美国实验物理

学家，对光速的测定做出了杰出的工作。他曾做过傅科的测光速实验，并且对测光速工作发生了兴趣。他发现傅科的测量光程太短，因此影响了测量的精度。于是，迈克耳孙就着手对傅科的装置进行改进，即在旋转镜 M_1 和反射镜 M_2 之间放置了一个聚焦透镜，旋转镜就在透镜的焦点附近，而反射镜可拉至较远的地方；另外，反射镜还可用平面镜取代大口径的凹面镜。

迈克耳孙从 1878 年开始进行实验，结果测得光速值为300 140千米/秒，误差小于万分之一。这样，迈克耳孙就成了第四位成功测得光速的人，并且显示出杰出的实验才能。

大约就在此时，美国航海年历局局长纽康（Simon Newcomb，1834～1906）也准备测量光速，并注意到迈克耳孙的测量工作。他写信给迈克耳孙，在信中很欣赏这个年轻人的才能，并进行了鼓励。在观看了迈克耳孙的装置之后，他决定调迈克耳孙到华盛顿来测量光速。不过在这之前，迈克耳孙的测量又有了新的进展，测得的光速值达到（2.99910±0.00050）$\times 10^8$ 米/秒。

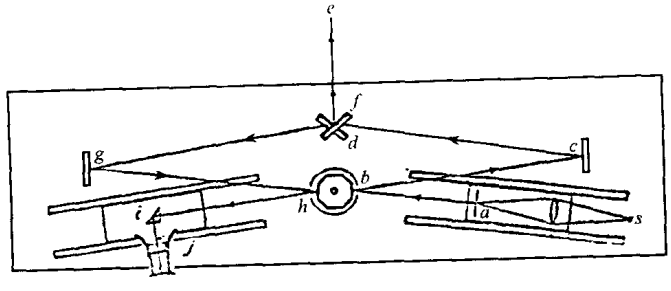


图 5-12　迈克耳孙测量光速的原理

1880 年，迈克耳孙在纽康的帮助下去欧洲学习，回国后于 1882 年又开始测量光速，得到的数值为（2.99853±0.00060）$\times 10^8$ 米/秒；这一年，纽康测得光速为（2.99860±0.00030）$\times 10^8$ 米/秒。迈克耳孙的值非常精确，这个值被作为国际标准沿用了 40 年之久。

由于迈克耳孙在光学精密测量和光谱学研究上的贡献，他获得了 1907 年的诺贝尔物理奖，成为美国历史上第一个获此殊荣的科学家。

1923 年，年过七旬的迈克耳孙要主持一次更大规模的测量光速工作，他回忆起 40 年前与纽康所讨论过的方案，并综合了菲索和傅科的方法，利用一个正八面旋转棱镜，以切断光路。在旋转过程中，这个棱镜间断地用相背的两面来反射光线，起发送和接受信号的作用。

迈克耳孙选定在海拔 5 800 米、相距 35 千米的威尔逊山和圣安东尼奥山之间进行实验。在两山头各放置一面凹面镜，光束从威尔逊山发出，经圣安东尼奥山返回。从设计中可以看出，迈克耳孙的装置避免了旋转齿轮法遮断时间不够精确，旋转镜法中

像的位移过小的缺点。此外，从图中可以看到，光线垂直于镜面入射可使光的强度增大，同时用镀银凹面镜作平行光管，可以增加光的亮度，并节省了费用。

整个实验规模庞大，光学设计合理，器具制作精良，但是还有一个关键因素——基线的精确程度。为此，迈克耳孙请有关部门精确测量了两凹面镜之间的距离，以降低光速值的误差。迈克耳孙的工作标准总是精益求精，他的这种精神深深地感染着参加测量工作的人员，特别是测量长度的工作人员，激励他们克服了一个又一个的困难，终于得到了精确的基线长度值。他们得到的基线长度误差只有 0.5 米，在大地测量史上达到了从未达到过的精确度，为光速的测量提供了一个良好的条件。此外，在旋转棱镜和照明器具的设计和研制上也达到了很高的水平。

从 1924 年到 1927 年的几年间，实验人员分别选用不同的旋转棱镜进行了 5 轮测量，最后得到光速值为 $(2.99796\pm0.00004)\times10^8$ 米/秒。在激光出现之前，在光电技术水平较低的条件下，利用纯光学方法得到这样的测量值已经达到非常高的水平了，这充分反映出迈克耳孙高超的实验方法和全部实验装置精湛的工艺水平。尽管如此，迈克耳孙仍不满足，他曾设想，选择距离威尔逊山 132 千米的另一座山峰，以继续加长基线长度；他还设想过屏除空气的干扰，在真空中进行测量。遗憾的是，这些测量还未完成他就去世了。

第四节　光谱学的发展

光谱学的历史应从牛顿的色散实验开始，由于牛顿的精湛技术，使人们对白光的认识和对颜色的认识大大深入了。这是光谱学研究早期的重要成就。但是，需要指出的是，牛顿并未观察到光谱谱线。据说，牛顿曾指示他的助手，用狭缝取代圆孔来重新观察太阳光的色散情况。遗憾的是，这位助手并未领会牛顿的意思，因此丧失了一次重大发现的机会。

1752 年，英国的梅耳维尔（Thomas Melvill，1726～1753）报告了他对多种物质产生的火焰光谱进行的研究，发现了包括纳谱线在内的一些谱线。梅耳维尔的发现是牛顿色散研究以来的重要进展。19 世纪初，赫歇尔（William Herschel，1738～1822）和里特（Johann Wilhelm Ritter，1776～1810）先后发现了在人的视觉范围之外的射线，即红外线和紫外线。

1802 年，英国科学家沃拉斯顿（William Hyda Wollaston，1766～1828）发现太阳光谱中的 7 条暗线，但是并未深入研究，并且错误地认为，这些暗线是光谱颜色的分界线。这种错误的结论对人们认识太阳的奥秘产生了消极的意义。

一、夫琅和费谱线的发现

德国物理学家夫琅和费（Joseph von Fraunhofer，1787～1826）少年时跟随父亲磨制玻璃镜片，长大后到一家光学研究所供职。由于夫琅和费制作技术精良，用他制作的仪器观察到一些新的现象。

最初，夫琅和费研究玻璃对各种颜色光的折射率，他偶然发现了灯光光谱中的橙黄色双线。为了确认双线的普遍性，他换了多种光源，但这双线都精确地出现在固定的位置上。当然，所以总有这一对黄色双线出现，是由于微量的杂质钠作怪。这一发现具有重要的意义，并在当时还提供了一个非常有用的测折射率的标准。

1814 年，夫琅和费在观测中用太阳光替换了灯光，试图在太阳光光谱中找到那明亮的双线。然而，他发现的是许多暗线，这些暗线比明亮的背景要暗得多，因此显得极清晰。同时，夫琅和费也观察了一些星光谱线，发现在金星光谱中有一些太阳光谱中的谱线，在金星和天狼星的光谱中还有一些特殊的谱线。夫琅和费将这些黑色谱线中最显著的 8 条用 A、B、C、D、E、F、G、H 等字母命名，这些谱线也被叫做“夫琅和费线”。

夫琅和费的方法对后人产生了很大的影响，赫歇尔研究通过颜色玻璃的光，发现了不连续的吸收光谱。后来布儒斯特也观察过经过气体的吸收光谱，并与太阳光谱作比较，证明太阳大气中含有亚硝酸气。这是首次用光谱分析方法确定星体中的组成成分。

对于太阳的组成成分与光谱之间的关系，夫琅和费并未做出什么断言，但他意识到二者是有一些关系的，并且排除了仪器的影响。布儒斯特则明确地认识到，暗线是由于吸收的作用，并指出地球大气也有吸收作用。他还意识到，由于太阳光谱和火焰光谱中的 D 线相符合（还找到了别的事例），这表明，这两类现象中一定存在某种规律性的联系。

值得注意的还有，傅科于 1849 年对吸收光谱和发射光谱的关系的研究，他发现碳极间的电弧光光谱中橙黄色部分的明亮双线与夫琅和费谱线中的 D_1 和 D_2 位置恰好一致。他还发现太阳光通过电弧光时，电弧光中的 D 线由明线变成了暗线。为此他猜测，电弧光产生 D 线，但若 D 线是从别的光源产生的，电弧光就加以吸收。

二、光栅的发明

1822 年，夫琅和费发明了衍射光栅。他用钻石刻刀在玻璃上刻成透射光栅。刻线的宽度达 0.04～0.6 毫米，刻线间隔达 0.0528～0.6866 毫米。借此他测得钠 D 线波长为 0.00058877 毫米，这是一个非常精确的数值。夫琅和费是第一位用衍射光栅测量波

长的科学家，他被誉为光谱学的创始人。为了纪念他在光谱学上的贡献，人们在他的墓碑上写下了这样的话："他使星球靠近了我们。"

虽然光栅有许多优点，如光栅色散率很均匀（克服了棱镜色散率不均匀的缺陷），对光的吸收很有限等，但是对制作技术要求极高，使它的普及十分困难。后来人们改进了刻制技术，制得优质的光栅，为以后埃格斯特朗编制详细的太阳光谱图奠定了基础。

1863年，有人设计出精密的刻线机，可在一英寸宽的基片上刻画出30 000条线。但是由于刻线不够均匀，使光谱中往往夹杂着一些所谓的"鬼线"干扰图像。针对这个问题，美国物理学家罗兰（Henry Augustus Rowland，1848～1901）进行了深入的研究。罗兰不仅对物理学问题有很深的理解，而且实验技术高超、工艺娴熟。对刻线的问题，他发现重要的是丝杆的精密度，这个部件是带动附有光栅基片的驱动元件——螺杆。如果丝杆误差较大，一定会影响被加工的零件，这是产生"鬼线"的主要技术原因。

在具体操作技术上，罗兰找到了非常简单的方法，解决了光栅中出现周期性误差的问题。他研制的用于刻线机的精密丝杆，可以生产出优质的和精密的光栅。1882年，罗兰研制出平面光栅和凹面光栅，借此获得了极其精密的太阳光谱，其中的谱线多达20 000多条。新编制的"太阳光谱波长表"被作为国际标准，使用长达30年之久。

三、光谱分析方法的确立

对夫琅和费谱线，德国物理学家基尔霍夫（Gustaf Robert Kirchoff，1824～1887）和本生（Robert Wilhelm Bunsen，1811～1899）做出了正确的解释。1859年，基尔霍夫对光的吸收和发射之间的关系进行了深入的研究，并且发现了定量的关系，即在同一温度下，所有物体对同一波长的光线，其发射本领和吸收本领之比是一常数。这就是基尔霍夫定律。这条定律在热辐射研究中是一条基本定律。他与本生还研究了各种火焰光谱和火花光谱，先后发现了两种新元素：铯（Cs）和铷（Rb）。这说明光谱分析方法在分析和鉴定物质的化学成分上有重要的作用，同时使光谱分析研究工作获得了快速的发展。光谱分析方法用于地球上物质元素的研究，主要是由本生完成的；而用于天体物质的构成的研究，主要是由基尔霍夫完成的。

在光谱分析的初期研究中，由于没有统一的波长标准，所得到的观测结果较为混乱。这就对研究人员的交流产生了障碍。1868年，瑞典物理学家埃格斯特朗（Anders Jonas Angstrom，1814～1874）发表了"标准太阳光谱"图表，记载了上千条夫琅和费谱线的波长，为光谱学研究提供了有价值的标准。在此之前，埃格斯特朗在太阳光谱研究中取得了一些成果，如在太阳光谱中发现了氢和其他元素，他还研究了极光光谱。在波长单位的选取上，他不像基尔霍夫那样随意，而是以百亿分之一米为单位，借此

来标度各种波长。1905 年，为了纪念埃格斯特朗而将“埃”即 10^{-12}米定为波长的单位。

到 19 世纪 80 年代，光谱学研究有了很大的进展，然而对谱线规律的认识还是很有限的。

四、光谱规律的探索

在寻找光谱规律的工作中，科学家局限于习惯使用的力学方法，所以很难有什么进展。有些人甚至悲观地认为，在目前的精度内，要找到谱线的数量关系是极其困难的。在光谱研究上能够另辟蹊径的是一位瑞士数学教师，他叫巴耳末（Johann Jokeb Balmer，1825～1898），他在氢光谱研究上取得了突破。

关于氢光谱，埃格斯特朗首先在气体放电的光谱中获得，他找到了 H_α 线系。这就是夫琅和费太阳谱线中的 C 线。后来又发现了几条在可见光范围的氢谱线，他还精确地测量了它们的波长。1880 年，哈金斯（Sir William Huggins，1824～1910）和沃格尔（Hermann Larl Vogel，1841～1907）还成功地拍摄了恒星光谱，发现这几条氢光谱可以扩展到紫外区，并组成了一个谱线系。尽管看上去排列得很有规律，但却无法解释。

巴耳末曾在巴塞尔大学代课，在此受到一位物理教授的鼓励，希望他在氢光谱的研究上有所作为。

1884 年，巴耳末找到了一个简单的氢光谱公式，即

$$\lambda = bm^2/(m^2 - n^2)$$

对应 4 条谱线，其中分子可相应取 3、4、5、6，而分母与分子差数为 4，即

$$\lambda = bm^2/(m^2 - 4)$$

这个公式的精确度很高，人们就将在可见光范围内的这个谱线系叫做“巴耳末系”。

1871 年，斯通尼曾尝试用波长的倒数表示光谱线，叫做波数。后来，人们发现用波数表示光谱线时，可使所有三重线的谱线系表示成等间距的形式，如锌光谱、铊光谱和铝光谱等。1890 年，瑞典物理学家里德伯（Johannes Robert Rydberg，1854～1919）用波数表示光谱线系，得到了一个公式。在得知巴耳末的研究之后，他就用波数表示巴耳末公式，并完全符合自己的公式。1908 年，瑞士物理学家里兹提出了组合原理，把每条谱线表示成两个谱线的波数差。为此他还预言在氢光谱 H_α 与 H_β 之间（即“之差”）可得到一个新的谱线系，后来德国物理学家帕邢（Friedrich Paschen，1865～1947）果然在氢光谱中间发现了这个新谱线，叫做“帕邢系”。

尽管巴耳末、里德伯和里兹的研究大大推进了光谱学的发展，但对一些基本问题仍没有什么进展，如光谱的成因、光谱规律的解释，以及光谱与物质构造的关系，这些都有待于进一步的研究。也正是这些问题，为推进关于物质微观结构的研究工作指明了探索方向。

思 考 题

1. 简述17世纪几何光学的主要成就。

2. 截止到17世纪，人们关于颜色的看法有什么新进展？

3. 牛顿是如何进行色散实验的？这个实验的意义是什么？

4. 光的微粒说与波动说各自的主要论点是什么？

5. 试述托马斯·杨对光学的主要贡献。

6. 惠更斯对双折射的研究有什么贡献？马吕斯对双折射的进一步研究说明了什么问题？他们对光的本性的认识有什么意义？

7. 菲涅耳对于干涉和衍射的研究有哪些特点？

8. 菲涅耳与夫琅和费对光的衍射的研究，从方法上各有哪些特点？

9. 略述光速测定的演变过程。

10. 试述19世纪对太阳光谱研究的主要进展。

第六章　热力学和统计物理学的发展

第一节　关于热现象的研究

蒸汽机的发明和不断改善及其在工业上的广泛使用，促使人们对各种物质热性质和热运动的规律作深入的研究。18世纪初开始建立了系统的计温学和量热学。在此基础上人们对热现象的研究从经验向科学转化，走上了实验科学的道路，热学成了物理学中新发展起来的一门分支学科。

一、蒸汽机的早期发展

第一部活塞式蒸汽机是1690年法国人巴本（Denis Papin，1647～1714）在德国发明的。巴本的蒸汽机是由一直径约2.5英寸，装有活塞和连杆的竖式管子构成的。管子下部盛水，加热使水变成蒸汽，蒸汽推动活塞向上运动。活塞上升到顶部时，被插销固定住，移去热源，蒸汽冷凝，汽缸内形成真空。拔去插销，上部大气压迫活塞，使它向下运动，并通过杠杆提起重物。竖式管子完成了锅炉、汽缸和凝汽器三重功能。他认为这种机器可以用于排除矿井积水，推进船只等。巴本第一个应用蒸汽在汽缸中推动活塞，并指出了蒸汽机的工作循环，为以后活塞式蒸汽机的发展开辟了道路。

17世纪末，英国皇家工程队的军事工程师塞维利（Thomas Savery，1650～1715）进行蒸汽泵的研制。蒸汽泵在结构上去掉巴本活塞式蒸汽机的活塞，直接依靠真空把水吸上来，再用蒸汽压力把水挤出去。1698年他取得这项发明的专利。塞维利蒸汽泵在一些矿井、私人供水和磨坊里的工作上得到应用。但是因为蒸汽压力不够，用于排除深井积水时遇到了困难，因此不能在矿山上普遍推广。然而塞维利机是人类历史上可以实际应用的第一部蒸汽机。

英国铁匠托马斯·纽可门（Thomas Newcomen，1663～1729）综合了塞维利和巴本机的优点，发明了空气蒸汽机，并于1712年有效地应用于矿井排水和农田灌溉。这是一个用一只活塞的封闭的圆筒汽缸，活塞借一根杆系于一根摇动的横杆的一头，横杆的另一头连着排水泵。低压的蒸汽先引进汽缸，然后喷洒少量的水使其冷凝，这样就在汽缸里造成局部真空，使大气压作用于活塞，活塞就把摇动横杆向下拉而使排水泵动起来。这部机器是一具广义上的把热变为机械力的原动机，但是和塞维利机一样

都有耗煤量大、效率低、只能作往复直线运动的缺点。

对纽可门机进行全面研究和改进的是英国工程师斯米顿（John Smeaton，1724～1792）。他改进了锅炉和点火燃烧的方法。由于斯米顿的努力，把纽可门的空气蒸汽机的效率几乎提高了一倍。然而，由于把汽缸又用作凝汽器造成热的大量浪费，它的效率仍然很低，只有1%左右。

英国格拉斯哥大学的仪器修理工瓦特（James Watt，1736～1819），对纽可门机进行了根本性变革。1763年格拉斯哥大学从伦敦买回一部纽可门机的模型，运转不灵。瓦特着手修理这部机器，这实际上是他的创造活动的开始。他专门仿造了几部纽可门机，研究它的优缺点。他还查阅了许多关于蒸汽机发展历史的书籍。通过分析和实验，他发现纽可门机为了产生真空，每一冲程都要用冷水将汽缸冷却一次，造成热量的巨大损失，这正是机器效率很低、运转不好的主要原因。为了减少热量的损耗、提高效率，瓦特想出把主汽缸始终保持在同一高温上，而用一个保持低温的冷却器来冷凝蒸汽，这样每次动作就用不着重新加热汽缸而损失热量。

瓦特发明冷凝器是运用了当时萌芽的热学理论。由于蒸汽机的出现和应用，热学受到人们的重视。1756年格拉斯哥大学化学教授布莱克（Joseph Black，1728～1799）首先提出比热概念，并发现了熔化、沸腾的“潜热”，形成了量热学的基础。当时，瓦特和布莱克在同一所大学中工作，并为布莱克制造仪器，两人交往甚密。在瓦特发现了纽可门发动机的弊病之后，布莱克就用他的潜热学理论作了解释。1765年瓦特终于研制成了分离冷凝器，这对于蒸汽发动机的发展起了关键性的作用。瓦特改进后的蒸汽机的效率已提高到3%。

为了使动力输出从单纯的往复运动变成为转动。1781年瓦特的助手默多克（William Mardook）设计了“太阳和行星”齿轮系统，瓦特蒸汽机采用了这种齿轮系统。1782年瓦特又将发动机从单动变为双动，这样可以将汽缸的功率增加一倍。为了充分利用蒸汽的膨胀作用，瓦特还使活塞在运动到1/2冲程时，即停止输入蒸汽，以后的1/2冲程完全利用蒸汽的膨胀来作功，这样又大大节省了蒸汽的消耗。1787年，为了在负荷变化的情况下保证发动机速度相对稳定，瓦特又安装了离心式调速器，去控制进气管的蝶形阀。这样，瓦特的双动旋转式蒸汽机已成为近代蒸汽机的雏形（图6-1）。以后的发明大都属于机械结构上的完善，效率的提高和适应各生产部门的专门要求所作的各种改进。

18世纪中后期以蒸汽机的使用为主要标志的技术革命，使西欧资本主义生产关系的发展达到了一个新的转折点。这一技术革命也直接推动了自然科学尤其是热学的发展。蒸汽机的发明和利用为能量守恒与转化定律的发现创造了最基本的物质基础。为了满足对动力日益增长的需要，提高蒸汽机的效率成为科学研究的重要课题。热机效率问题的研究则导致了热力学第二定律的发现。

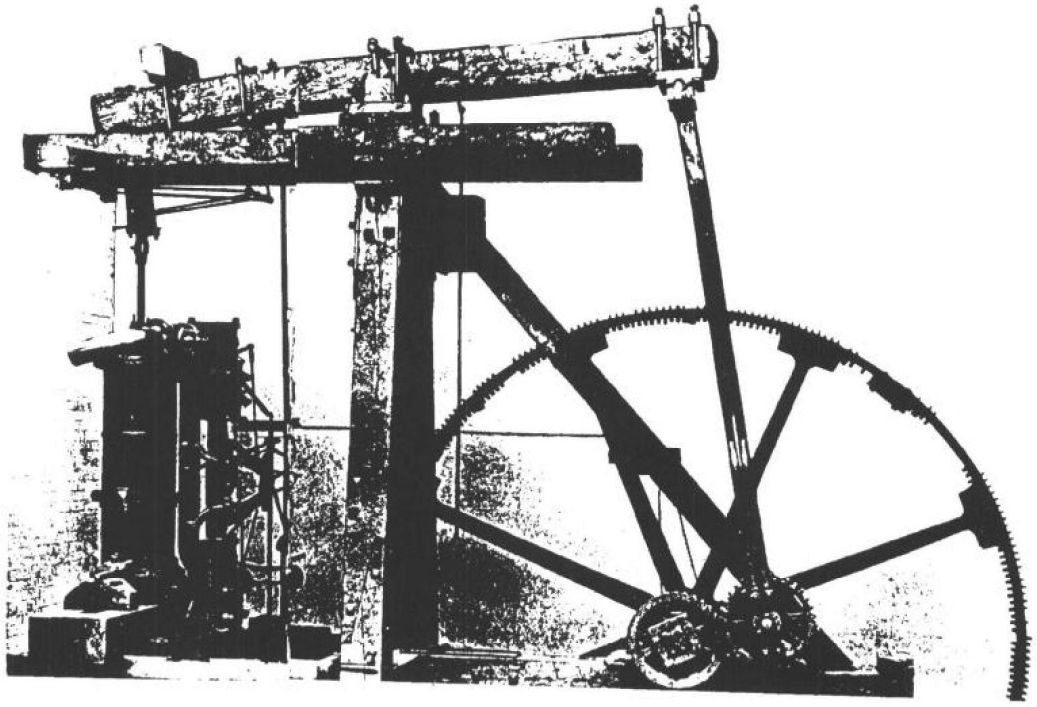


图 6-1　瓦特的蒸汽机

二、计温学的发展

对热现象的实验研究是从测量物体冷热程度——温度开始的。测量温度的第一个科学仪器是伽利略在 1593 年发明的验温器（图 6-2）。他用了一只颈部极细的玻璃长颈瓶来测量温度。瓶中装了一半有颜色的水，并把它倒过来放在碗里，碗里也有带同样颜色的水。随着温度的变化，瓶泡中所包含的空气会膨胀或收缩，颈中的水柱就会上下运动。法国化学家詹·雷伊（Jean Rey，1582～1630）对伽利略的验温器作了改进，他将验温器的长颈瓶倒过来，用水的膨胀来表示冷热程度。这是一种液体温度计，1632 年被介绍出来。但是由于管子未封口所以会因水的蒸发而产生误差。在雷伊之后约 25 年，意大利佛罗伦萨的院士们用蜡封了管口，在玻璃泡里装上酒精，并把刻度附在玻璃管上。这在结构上已接近于后来温度计的样子。1659 年巴黎天文学家伊斯梅尔·博里奥（Ismael Boulliau）制造了第一个用水银作测温物质的温度计。



图 6-2　伽利略的验温器

以后，温度计的制作和改进主要从两方面进行，从而也促进了对热现象的研究。第一、为了定出温标，需要确定一些“定点”。这就导致人们对冰和其他物质的熔解和凝固温度的研究，发现了在一定条件下这些温度是恒定不变的；第二、找出合适的测温物质，从而促进了对物体热膨胀的研究。

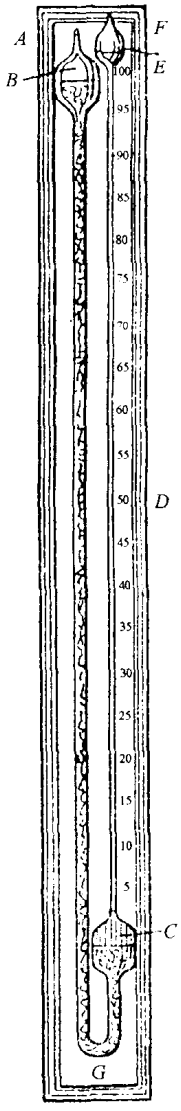


图 6-3　阿蒙顿的温度计

德国的格里凯（Otto von Guericke，1602～1686）选择马德堡地区初冬和盛夏的温度为定点温度。佛罗伦萨的院士们选择严寒时下雨或结冰的气温与牛或鹿的体温为定点温度。他们发现了冰的熔点是不变的。1688 年，达伦斯（Joachim Dalence，1640～?）提出用冰冻时的温度和黄油熔解的温度为定点温度。

1702 年，阿蒙顿（Guillaume Amontons，1663～1705）改进了伽利略的验温器。他将一个球连接到一个 U 形管上，管中装有水银，并保持球内空气的容积不变，用 U 形管两臂水银面的高度差来测量球内空气的温度。他用水的沸点和冰的熔点作为温度计的定点温度。

第一支实用的温度计是迁居荷兰的吹制玻璃的工匠华伦海特（Gabriel Danile Fahrenhert，1686～1736）制成的。1709 年，他开始制作一个酒精温度计。1714 年他知道了阿蒙顿在水银热膨胀方面的研究后，就开始制造水银温度计，并且发明了净化水银的方法，使水银能在温度计中普遍使用。他把冰、水、氨水和盐的混合平衡温度定为 0℉，冰的熔点定为 32℉，而人体的温度 96℉。1724 年后，他又把水的沸点划在 212℉上。他做过一系列实验，发现每一种液体都像水一样有一个固定的沸点，后来又注意到沸点随大气压的变化而变化，这一发现对精密的计温学是个很大的贡献。华伦海特把 0℉和 212℉作为基本点的刻度法，至今还在美国和美洲采用，被称为华氏温标。

法国人列奥默（René Antoine Firchault Réaumur，1683～1757）认为水银的膨胀系数小，所以致力于制造酒精温度计。他通过实验发现，酒精（和 1/5 的水混合）的体积如果在水的冰点时为 1000 单位，当它达到水的沸点时体积变为 1080 单位。因此，1730 年他制作的酒精温度计是采用水的冰点为零度（0°R），水的沸点为 80°R，在这两个固定点中间分成 80 等份。列氏温标曾较多地为德国人采用。

1742 年瑞典天文学家摄尔修斯（Anders Celsius，1701～1744）又提出一种新的温度计。他采用了百分刻度法，用水银作测温质，以水的沸点为零度（0℃）。冰的熔点定为 100℃。这样一来温度越高，度数越低，使用起来不大方便。8 年之后摄尔修斯接

受了他的同事施特默尔（Marter Stromer）的建议，把两个定点的标值对调过来，最后确立了现在使用的摄氏温标。摄氏温标曾在法国占据优势，并长期为科学界所采用。

在18世纪的前半期制造出一些实际应用的温度计，为定量研究热现象迈出了重要的一步。

三、量热学的建立

在蒸汽机的设计中，显然要涉及汽化、凝结以及蒸汽的压力等问题。此外，在冶金和化学工业方面的工作也涉及到燃烧、汽化、熔解、凝固以及吸热等各种物理和化学反应，使得人们注意在这些反应中热的作用和影响，从而促进了量热学的发展。量热学首先是从确定混合物的温度开始的。温度计的发明和改进为测量温度的变化提供了便利。

从17世纪起，意大利的科学家们通过实验发现，在同一温度下具有相同重量的不同液体分别与冰混合时，冰被融化的数量各不相同，这表明不同物质的放热能力不同。起初有人认为，物质的这种能力可能与它们的密度有关，密度越大的物体吸收或放出热的能力越大。可是华伦海特通过实验发现，水银的吸热能力仅仅是同体积水的2/3，这就打破了上述猜想。

彼得堡科学院院士里赫曼（Г. В. Рихман，1711～1753）是量热学的奠基人。他认为，热是按照体积均匀分配，并取质量和温度的乘积作为物体中热量的量度，当时他没有区分温度和热量这两个概念。1744年里赫曼提出以他的名字命名的量热学方程，公式形式为：

$$t = \frac{m_1t_1 + m_2t_2 + m_3t_3 + \cdots}{m_1 + m_2 + m_3 + \cdots}$$

式中 m_1、m_2、m_3…为均匀液体的质量。t_1、t_2、t_3 为这些物体的起始温度，t 为混合温度。里赫曼还指出，在检验这个公式时，必须注意到容器的质量和温度、周围空气的温度、实验进行的时间和其他情况。

同年，彼得堡科学院院士 Г. В. 克拉弗特（Крафт）在科学院会议上作了一个关于热和冷的报告，他在报告中建议按公式

$$x = \frac{\gamma am + \delta bn}{\gamma a + \delta b}$$

来确定冷热液体混合的温度。这里 a 和 b 是它们的质量，m、n 是它们原来的温度，γ、δ 是某种系数。他似乎已经考虑到了热容量这一因素，但是他却错误地通过一个实验就定下 γ 和 δ 的值分别是11和8，这使他的公式降低了价值。

1757年前后，英国化学家布莱克重新审查了里赫曼等人的工作，他主张将热和温度两个概念分别称为“热的份量”和“热的强度”，并用32°F的一块冰和172°F的同等

重量的水的混合验证里赫曼公式，发现平均温度不是102℉，面是32℉，布莱克由此做出结论：在冰的熔解中，需要一些为温度计所不能觉察的热量。他把这不表现为温度升高的热叫做“潜热”。大约在1760年，布莱克做了如下的实验：把温度为150 ℃的金与同重量的50℃的水相混合，它们达到的平衡温度是55℃。这时金的温度下降了95 ℃，而水的温度只升高了5℃。这个实验说明物质的吸热与放热能力与它们的密度并不是成比例地变化。布莱克通过实验比较了各种物质与同重量但不同温度的水混合达到热平衡后的温度变化，从而推算出这些物质每升高或降低一度时它们吸收或放出的热量是不相等的。他把物质在改变相同温度时的热量变化叫做这些物质的“对热的亲和性”或“接受热的能力”。后来他的学生伊尔文（Irvine）引进了“热容量”概念。

布莱克的工作由拉瓦锡（Antoine Laurent Lavoisier，1743～1794）和拉普拉斯等人加以发展。他们把一磅水升高或降低一度（摄氏）时所需要的热作为热量的单位，称作卡。拉瓦锡和拉普拉斯于1777年提出了那时最精确的测量热量的方法，并制造了一个量度热量的经典仪器——冰量热器，用这个量热器测定了各种物体的热容量。约在1783年他们测定了一些物质的比热，同时还给出了求比热的一般公式。他们还发现，物质的比热并不是不变的，在不同温度下略有差别。

这样，在18世纪80年代，量热学的一系列基本概念——温度、热量、热容量、比热、潜热等等都已经形成了。同时，量热学的进展还导致了热量在几个物体之间重新分配时总量恒定不变的观念的建立，量热学中的热平衡方程正是这种观念的具体体现。

四、传热现象的研究

在量热学取得成就的同时，关于传热现象的研究也取得了不少成果。牛顿确立了传热现象的第一个定量的规律——冷却定律：

$$-\frac{dQ}{dt}=\lambda(T-T_0)$$

式中dQ是物体单位表面上在时间dt内所损失的热量，T为物体在时刻t的温度，T_0为周围介质的温度，λ为某一系数。后经杜隆（Pierre Louis Dulong，1785～1838）和珀替（Alexis Petit，1791～1820）检验，指出这个定律只在温度差较小时才适用。

兰伯特（Johann Heinrich Lambert，1728～1777）是企图对热传导进行定量研究的第一批学者之一。他讨论了一根棒上在稳定状态下的温度分布，这个问题直到19世纪初才最后解决。

热传导的数学理论是在温度概念和热量不灭的概念的基础上于1804年由毕奥（Jean Baptiste Biot，1774～1862）建立的，并在1807和1811年由傅里叶（Joseph Fourier，1768～1830）最终完成。傅里叶是一个出色的数学家，他认为：“对自然界的深刻研究给数学的发现以丰富的泉源”。1807年他向巴黎科学院呈报了一篇关于热传导的

基本论文，1811 年作了修改。1822 年发表了经典文献之一《热的分析理论》。这本书是他在数学物理这个领域内多年研究的总结。

书中总结的基本问题就是在介质中热流的传播问题。傅里叶认为可以从三个方面来说这个问题，即热容量、热传导（内部热传导）和散热系数（外部热传导）。傅里叶提出，向外的散热等于热辐射和向周围介质的热传导之和。

散热系数是以物体温度为 1℃，而周围介质温度为 0℃时，在稳定流动的情况下，物体单位表面积在单位时间内所散出的热量来说明的。傅里叶确定出：热辐射的强度与其方向有关，它正比于射线同包围辐射点的表面元所成的角的正弦值。

关于内部热传导问题，傅里叶给出一个经验定律：通过厚为 dx 层的物体，每单位时间传导的热流量 dQ/dt，正比于层界面上的温度差 dT 和层的面积 S，反比于层的厚度 dx，即

$$\frac{dQ}{dt} = KS\frac{dT}{dx}$$

式中 K 是依赖于导热物质性质的导热系数。

傅里叶认为，在吸收或释放热的物体内部，温度分布是不均匀的，在任何点上都随时间而变化，所以温度 T 是空间和时间的函数。函数的准确形式依赖于物体的形状、密度、材料的比热、温度的初始分布以及保持于物体表面上的条件。傅里叶首先研究了在均匀和各向同性的物体内作为 x、y、z、t 的函数的温度 T，并证明了 T 必须满足偏微分方程，

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = K^2\frac{\partial T}{\partial t}$$

这就是三维空间的热传导方程。其中 K^2 是一个常数，其值依赖于物体的质料。

傅里叶根据上述方程解决了在稳定状态下一根棒、无界杆、球、环和立方体的温度分布，并且将他的成果用于研究地球的热学问题。

他通过求解找到的把周期函数展开为级数（傅里叶级数）并借助于（傅里叶）积分表示函数的方法，在技术和物理学（其中包括现代的量子力学）的不同领域内都有巨大意义。傅里叶提出的热传导方程，不仅具体解决了热量改变与温度变化的关系问题，而且也发展了解偏微分方程的数学方法。这是物理学研究推动数学发展的典型事例之一。

傅里叶的方法立即被泊松所吸取。泊松是 19 世纪最大的分析学家之一，又是第一流的数学物理学家。他从事于热的理论方面的工作，又是最先提出把引力位势理论移植到静电学和磁学的人之一。大约从 1815 年起泊松本人解决了许多热传导问题，并表述在他的《热的数学理论》一书中。

五、关于热的本性的争论

热是什么？自古以来就有不同的看法。不过，古代对热的不同看法还停留在思辨、猜测的水平上，还不能做出科学的证明。

15 世纪以后，热的本性的问题又引起了注意。培根从摩擦生热等现象中得出，热是一种膨胀的、被约束的而在其斗争中作用于物体的较小粒子之上的运动。这种看法影响了许多科学家。波义耳（Robert Boyle，1627～1691）指出热是物体各部分发生的强烈而杂乱的运动。笛卡儿把热看做是物质粒子的一种旋转运动。胡克用显微镜观察了火花，认为热并不是什么其他的东西，而是物体各个部分的非常活跃和极其猛烈的运动。牛顿也认为热不是一种物质而是组成物体的微粒的机械运动。18 世纪时罗蒙诺索夫（M. B. Ломоносов，1711～1765）根据摩擦、敲击能生热，物体受热熔化以及物体的发芽、腐烂过程都受热而加快、受冷而减缓的现象得出结论，认为热的充分的根源在于运动；而由于没有物质就不可能发生运动，所以热的充分根源在于某种物质的运动。

总的说来，上述这些热的唯动说虽然是正确的，但是尚缺乏足够的实验根据，所以还不能成为科学理论被普遍接受。

18 世纪认为热是某种特殊的物质——热质说的观点却占了上风。

拉瓦锡和拉普拉斯等人认为热是渗透到物体的空隙当中的所谓“热质”构成的；拉瓦锡甚至把“热质”列入化学元素表中。热质被看作是一种不可称衡的“无重流体”，它的粒子彼此排斥而为普通物体的粒子所吸引。

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

热质说之所以占上风是有其历史原因的。一则是因为 18 世纪是对各种物理现象分门别类地进行研究的时期，人们把热现象与其他物理现象孤立起来加以研究，尚未注意到它们之间相互联系和转化的关系。再有就是热质说能够简易地解释当时发现的大部分热学现象。例如认为物体温度的变化是吸收或放出热质引起的；热传导是热质的流动；摩擦或碰撞生热现象是由于“潜热”被挤压出来以及物质的比热变小的结果。在热质说观点的指导下，瓦特改进了蒸汽机；19 世纪初傅里叶还据此建立了热传导理论；卡诺从热质传递的物理图像及热质守恒规律得到卡诺定理。热质说的成功，使人们相信它是正确的。热质说在把一系列实验事实和个别规律用一个统一的观点联系起来加以系统化方面起了一定的积极作用。

随着物理学的发展，逐渐发现了许多与热质说相矛盾的事实。这时，热质说就失

掉了它的积极作用，变成阻滞物理学发展的障碍。

18 世纪末，热质说受到了严重的挑战。1798 年，英籍物理学家伦福德（Count Rumford，即 Benjamin Thompson，1753～1814）在一篇题为《关于用摩擦产生热的来源的调研》中报道了他的机械功生热的实验。他曾在慕尼黑军工厂用数匹马带动一个钝钻头钻炮膛，并把炮筒浸在 60℉的水中。他发现，经过一小时后，水温升高了 47℉，两个半小时后，水就开始沸腾。伦福德看到的现象是，只要机械作功不停止，热就可以不停地产生。最后他形成这样一种思想：热是物质的一种运动形式，是粒子振动的宏观表现。他相信热质说和燃素说将一起被埋葬在同一个坟墓中。

1799 年，英国科学家戴维（Humphrey Davy，1778～1829）进行了这样的实验：在一个同周围环境隔离开来的真空容器里，使两块冰互相摩擦熔解为水，而水的比热比冰还高。在这里“热质守恒”的关系不成立了，戴维由此断言，热质是不存在的。

伦福德和戴维的实验都支持了热的唯动说的正确观点，并为物理学的发展开辟了道路。

第二节　能量转化与守恒定律的确立

能量守恒原理是物理学中一个具有普遍意义的原理，它的建立，是生产技术、哲学和自然科学长期发展的结果。

一、思想渊源与科学背景

在中国古代和古希腊的哲学家那里，运动不灭的思想已经被提了出来。近代自然科学产生以来，笛卡儿和莱布尼茨都从不同的角度明确提出了宇宙中运动量不灭的光辉思想，对近代自然科学的发展产生了深远的影响。

对能量守恒原理的具体认识，是从力学的研究开始的，一直被称为“活力守恒定律”。伽利略、惠更斯、莱布尼茨和 D. 伯努利等人对这一定律的建立都做出过自己的贡献。到了 18 世纪后半叶，欧拉已经认识到，在有心力作用下从一个定点开始运动的质点，在它通过任意途径到达离辏力中心有同样距离的任何位置时，其活力都是相等的。

随着动力学的发展，人们逐渐形成了“功”和“能”的概念。伽利略将力与路程的乘积称为“矩”；莱布尼茨把与重量和高度的乘积等值的运动作为基本量来考察运动的量度——“活力”。不过，活力这个概念提出之后，并没有受到普遍的重视；更多的人则是采用力与路程的乘积这个更具有力学直观性的物理量。从 1820 年起，在法国出版的一系列工程技术论著中，“功”这个概念逐渐被确立为一个重要概念。特别是在分

析机器的运转中，功被看做为一个基本参数，显示出了它的重要性。法国工程师卡诺（S. Carnot）以重物与升高的高度的乘积来评价机器的功效，他把这个量称为“作用矩”。法国数学家蒙日（Comte de Péluse Monge，1746～1818）把功称为“动力效应”。1829 年，法国物理学家科里奥利坚决主张活力应表示为$\frac{1}{2}mv^2$，因为这样一来它在数值上就会等于它所能做的功。法国工程师彭塞利（Jean Victor Poncelet，1788～1867）可能是受到科里奥利的影响，在同年明确地推荐了“功”这一术语，并提出了机械过程中的能量守恒原理：功的代数和的二倍等于活力的和；任何时候都不能从无中产生功或活力，功或活力也不能转化为无，而只能组成无。这样，“功”这一概念就从机械效率的研究中引入了物理学。至于“能量”这一概念，最早是由英国物理学家托马斯·杨于 1807 年提出的。他在他的《自然哲学讲义》中写道：“应该用能量一词来表示物体的质量或重量与速度的平方的乘积。”不过，他的这个意见并未引起人们的重视，直到 1853 年才被 W. 汤姆孙（W. Thomson）所采用。

在动力学中引进的另一个重要概念是“力函数”或“势函数”。1783 年，D. 伯努利首先引进了“位势”概念。1755 年，欧拉在关于流体力学的研究中最先引进一个函数，并得到了位势理论的“欧拉-拉普拉斯方程”。后来经过拉格朗日、拉普拉斯、泊松、格林等人的工作，明确形成了这一概念。1843 年，哈密顿也引进了“力函数”以表示只与相互作用着的粒子的位置有关的力，并把后来所说的“势能”称为“张力之和”，把动能称为“活力之和”。到了 19 世纪 40 年代，“势”的概念得到了普遍的应用。

这样，到了 19 世纪 40 年代，建立能量守恒原理所必需的基本概念，大体已齐备了。

永动机之不可能实现，是导致能量守恒原理确立的另一重要线索。

很早以来，不少有杰出创造才能的人，付出了大量的智慧和劳动，企图制造出这样一种理想的机械，它在不消耗任何燃料和动力的情况下，不断地进行有效的工作。

早期一个很著名的永动机设计方案，是 13 世纪一个名叫亨内考（Villard de Honnecourt）的法国人提出来的。他在一个轮子的边缘上等距地安装 12 根活杆（图 6-4），杆端装以重球。他设想当轮子转动起来后，由于右侧的重锤距轮心更远些，就会压使轮子永不停息地沿箭头方向转动下去，至少要转到轮轴磨坏时为止。但实际上轮子转动一两圈后就停了下来。

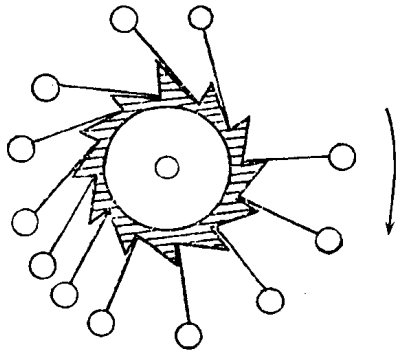


图 6-4　亨内考的“永动机”模型

后来，列奥那多·达·芬奇也制造了一个类似的装置进行实验，同样得到失败的结果。列奥那多敏锐地由此得出结论：永动机是不能实现的。16 世纪以后，人们又提出过各种各样的永动机设计方案，但都

在科学的严格审查和实践的无情检验下一一失败了。斯台文、惠更斯等都认识到了用力学方法不能制成永动机。法国科学院在1775年针对愈来愈多的投送审查的设计方案发表声明，不再审查有关永动机的任何设计。

形形色色永动机方案的失败，从反面启示人们想到，自然界是否存在着某种普遍的规律，制约着人们无论用什么方法，都不能不付出代价地创造出可供利用的有效动力。

二、各种自然现象之间相互转化的普遍发现

18世纪末到19世纪前半叶，自然科学上的一系列重大发现，广泛地揭示出各种自然现象之间的普遍联系和转化。

古代早已发现的摩擦生热现象，直接表明了机械运动向热的转化。伦福德和戴维的实验进一步证实了这种转化。17、18世纪蒸汽机的发明和改进，为热向机械运动的转化做出令人信服的证明。19世纪中期，蒸汽机得到了进一步的改进，高压蒸汽机也被制造出来，其功率达到3万马力以上。无数烟囱的黑烟，宣告了蒸汽时代的来临，为能量守恒原理的诞生创造了社会生产技术的物质条件。在理论方面，1824年卡诺关于热机效率的研究已经触及到了“热功当量”的问题了。

关于热和电之间的转化，首先是由德国物理学家塞贝克（Thomas Johann Seebeck，1780～1831）于1821年实现的。他将铜导线与铋导线连成一个闭合回路，用手握住一个结点使两个结点间出现了温差，他发现导线上出现了电流；用冷却一个结点的方法可以产生同样的效应，这就是“温差电”现象。1834年，法国的珀耳帖（Jean Charles A. Peltier，1785～1845）发现了它的逆效应，即当有电流通过时，结点处可以发生温度变化。1840年和1842年，焦耳和楞茨分别发现了电流转化为热的著名定律。

古人早已发现的摩擦生电的现象，是机械运动转化为电的过程。17世纪以来，人们根据这一现象制造了摩擦起电机以获得大量的电荷。1821年，法拉第制成的“电磁旋转器”则是电流产生机械运动的过程。这样，机械运动和电运动之间的转化完成了循环。

19世纪前半叶物理学上最重大的成就之一是电与磁之间联系和转化的发现。1820年奥斯特关于电流的磁效应的发现和1831年法拉第关于电磁感应现象的发现，使电与磁之间的相互转化完成了循环。

继意大利学者伽伐尼关于“动物电”的发现之后，伏打于1800年制成了“伏打电堆”，这是化学运动向电的转化。人们很快就利用伏打电流进行电解，又实现了电运动向化学运动的转化。

拉瓦锡在18世纪就已经了解化学反应中的热现象的重要性。德国化学家李比希（Justus Liebig，1803～1873）通过对发酵和腐烂过程中热的来源的进一步探讨，得出了

它们可能来自化学变化的结论。1840 年，彼得堡科学院的黑斯（G. H. Hess，1802～1850）提出了关于化学反应中释放热量的重要定律。这个定律指出，在一组物质转变为另一组物质的过程中，不管反应是通过哪些步骤完成的，释放的总热量是恒定的。这个定律已经接触到化学反应中的能量守恒原理。

此外关于紫外线的化学作用的发现（1801），用光照金属板极的办法改变电池的电动势的发现（1839），光的偏振面的磁致偏转现象的发现（1845），都从不同侧面揭示出各种自然现象之间的联系和转化。

自然科学上的这类发现，在哲学上也得到了反映。德国哲学家黑格尔（G. F. W. Hegel，1770～1831）提出了各种自然现象之间联系和转化的思想。谢林（F. W. J. von Schelling，1775～1854）进一步断言，磁的、电的、化学的、甚至有机现象都会被编织成一个综合体系；他还指出，光、电等现象都不过是同一种力的不同形式。这种观点，为发现能量守恒原理提供了有利的哲学环境。

总之，到了 19 世纪 40 年代前后，欧洲科学界已经普遍蕴含着一种思想气氛，以一种联系的观点去观察自然现象。正是在这种情况下，以西欧为中心，从事七八种专业的十多位科学家，分别通过不同的途径，各自独立地发现了能量守恒原理。

三、迈尔的工作

罗伯特·迈尔（Robert Mayer，1814 ～1878）是德国的一位青年医生。1840 年，迈尔在一艘从荷兰驶往东印度的船上当随船医生。在船驶近爪哇时，他发现患病船员的静脉血比在欧洲时红一些，在拉瓦锡的燃烧理论的启示下，他想到在热带高温的情况下人体只需从食物中吸收较少的热量，这使人体中食物的氧化过程减弱，因而在静脉血中留下了较多的氧。这个现象促使迈尔去思考各种自然力之间的相互转化。

1841 年航行结束后，迈尔将自己的发现写成一篇论文寄给德国权威性刊物《物理学和化学年刊》。由于缺少精确的实验根据以及迈尔在数学和物理学知识上的缺陷，这篇论文没有获得发表。这激励迈尔发奋自学了数学和物理学，并重新写成了《论无机界的力》，被发表在《化学和药学年刊》1842 年 5 月号上。在这篇论文中，迈尔从“无不生有，有不变无”和“原因等于结果”的哲学思考得出了“力就是不灭的、能转化的、无重量的客体”的结论。他所说的“力”在当时就是指“能量”。迈尔以“下落力”（重力势能）、运动的“力”（动能）和热的转化具体论证了力的转化和守恒。在这篇论文的结束处，迈尔提出了确立不同的力之间数值上的当量关系的必要性，并根据当时气体比热的测定数据，对热的机械当量进行了计算。

1854 年，迈尔自费出版了《论有机运动与新陈代谢》，在这篇论文中，他首先肯定了力的转化与守恒定律是支配宇宙的普遍规律。接着迈尔考察了 5 种不同形式的“力”，即“运动的力”、“下落力”、“热”、“电”和“化学力”，描述了运动转化的 25 种

情况，做出了否定热质和其他无重流质的结论。他根据当气体的温度发生确定的变化时，定压过程中吸收的热量大于定容过程中吸收的热量的事实，计算出热功当量的数值为 J=365 千克米/千卡，相当于 J=3.48 焦耳/卡。这个计算方法实际上就是后来所说的迈尔公式 $C_p-C_v=R$ 的另一种形式。

迈尔还把自然力的转化与守恒原理推广到生物机体中，指出了在机体内发生着化学力转化为其他自然力的复杂过程，并说明地球上的各种力都是太阳供给的，如植物把太阳的光和热转化为化学力，动物通过消化食物又把这种化学力转化为体热和肌肉运动的机械力。

迈尔的工作不仅没有得到应有的评价，反而遭到了粗暴的、侮辱性的中伤。加上他两个孩子的夭亡，迈尔在 1849 年曾经跳楼企图自杀，留下终生残疾，但他还是在 1851 年写成了《论热的机械当量》一文，总结了他的工作，回答了对他的攻击。

四、亥姆霍兹的《论力的守恒》

德国科学家亥姆霍兹（Hermann Helmholtz，1821～1894）是从生理现象入手展开这一探索工作的。在他还是一个大学生的时候，就对当时流行的施塔尔（G. E. Stahl，1660～1734）关于生物机体中“存在着一种内在的生命力或活力”的学说产生了怀疑。通过深入的思考他认识到，这个学说“对每一个生物体都赋予了永动机的性质”。但是，亥姆霍兹认为永动机是不可能的。他从这一观点出发提出了这样的问题：“如果永动机是不可能的话，那么在自然界的不同的力之间应该存在着什么样的关系呢？而且这些关系实际上是否真正存在呢？”这个问题把他引导到能量守恒原理的发现。

1847 年，亥姆霍兹自费出版了《论力的守恒》这一著名的著作，从物理假设和已有的物理理论出发，导出可与经验相比较的结论，论证了这一基本原理。

在“导言”中，亥姆霍兹首先提出了建立这一原理的两个出发点：“或者从不可能借自然界物体的任何组合的作用而获得无限量作功的力这一原理出发；或者假定自然界中一切作用都可以归结为引力和斥力，其强度仅取决于相互作用的质点间的距离。”

亥姆霍兹认为自然科学的基本任务就在于“把自然界种种现象归结为固定不变的吸力或斥力，它们的强度取决于距离。”他把这种中心力看做自然界种种变化的“始终不变的终极原因”，并证明了这种力的保守性，指出：“某质点在有心力作用下位移时，其活力的增加等于与它距离的改变相对应的张力的总和。”他证明了这种力的保守性同永动机的不可能实现彼此是同一的，并得出了更普遍的“力的守恒原理”：“当自由质点在引力和斥力（它们的值取决于距离）的作用下而运动的一切场合，所具有的活力和张力的总和是守恒的。”在这一部分的论述中亥姆霍兹概括了以下三点结论：

1. 当自然界中的物体在既与时间无关、又与速度无关的引力和斥力的作用下时，系统中的活力和张力的总和是始终不变的；因此，可以获得的最大

功是确定的和有限的。

2. 相反，如果自然界的物体间作用着与时间和速度有关的力，或者作用力的方向与连结两个物体的直线不相吻合，例如转动力，在这种情况下，力或者会无限地消失掉，或者会变成无穷大。

3. 假如除中心力外还存在着另外的力，那么自然界的物体就不需要任何其他物体的参与，而能自动地运动起来。

在第一点结论中，指出在中心力作用下能量是守恒的，这是正确的；但在后两点结论中，认为在非中心力的作用下能量必然会创生或消灭，这是不正确的。后来亥姆霍兹也认识到了这个错误，对自己的理论进行了修改。

亥姆霍兹具体研究了能量守恒原理在各种物理、化学过程中的应用，指出，在万有引力作用下产生的一切运动（包括天体的运动和地球上有重物体的运动），用不可压缩的固体或液体传递的运动（如由简单机械所传递和改变的运动），完全弹性固体或液体的运动（包括菲涅耳用活力守恒定律导出光的折射和偏振），波的吸收和辐射热等，都符合“力的守恒原理”。亥姆霍兹通过非弹性碰撞、摩擦等过程研究了“热的力当量”，指出在这些情况下，如果发生了活力的损失，那就会产生其他形式的“力”，首先是热。因此，“热的数量可以通过机械力来使之增加，因此，热现象不可能用一种物质推论出来，不可能以这种物质的存在为条件，而只能从某些熟知的有质体的变化和运动中，或者是从无质体如电或以太的变化或运动中推论出来。”

关于化学反应中热的产生，亥姆霍兹指出黑斯定律是力的守恒原理的一个特例。他还分析了电和磁的现象，得出了不同情况下能量的表达式；并从力的守恒原理出发，否定了长期以来引起激烈争论的关于伽伐尼电流的来源的“接触说”。在论文的最后一部分，亥姆霍兹讨论了把力的守恒原理应用到生物机体中去的可能性。

这样，赫尔霍茨就系统地证明了力的守恒定律“与自然科学中任何一个已知现象都不矛盾”，他确信“这个定律的完全证实将是不远的未来物理学家们的基本任务之一”。

五、焦耳关于热功当量的测量

焦耳（Janes Prescott Joule，1818～1889）关于热功当量的测量，为能量守恒原理的确立奠定了坚实的实验基础。

焦耳是曼彻斯特一个富有的酿酒商的儿子和业余科学家，很早就关心各种物理力的转化问题。当时正值电磁力和电磁感应现象发现不久，磁电机刚刚出现，这些成果已使人们相信电力终将代替蒸汽机成为更加有效的新动力。所以，研制、改进、使用各种磁电机，关注提高磁电机的功效和电力的应用前景，成为当时一股热潮。

1837 年，焦耳在他父亲的工厂装配了用电池驱动的磁电机，并对它进行了多方面

的实验测试。

在测试中焦耳注意到电机和电路中的发热现象，他想到这和机器中的摩擦生热一样，都是动力损失的来源，这促使他对电流的热效应进行了定量研究。他在玻璃管中装入水银，通以强弱不同的电流，测出一定时间内相应的温度变化，从而发现了导体的发热量与电流强度的平方成正比。他又利用不同尺寸的导体进行实验，发现一定的电流在一定的时间内产生的热量与导体的电阻成正比。在1840年写出的《论伏打电所产生的热》的论文中，他得出了“在一定时间内伏打电流通过金属导体产生的热与电流强度的平方和导体电阻的乘积成正比”的结论。1841年他又写了《电解时在金属导体和电池组中放出的热》一文，得出结论说，电路中所放出的热量和电池中化学变化所产生的热量正好相等；电流的机械动力和产生热的能力都与电流强度有相同的比例关系，所以二者成正比。这里焦耳已经接近了热、电、化学能的等价性的概念。

焦耳想到，磁电式发电机的感生电流应该与来自化学电源的电流一样地产生热效应。他使一个线圈在电磁体的两极之间转动产生感应电流，线圈放在量热器内。这个实验完全证实了热可以由磁电机产生。焦耳从这个实验立即领悟到热和机械功可以互相转化，在转化过程中遵从一定的当量关系。这样，“探求热和失去或得到的机械功之间是否有一个恒定的比值，就成了十分有意义的课题”。焦耳在磁电机线圈的转轴上绕两条线，跨过两个定滑轮后挂上几磅重的砝码，由砝码的重量和下落距离可以计算出所做的功。他共做了13组实验，得出了一个平均结果：“能使1磅水的温度升高华氏1度的热量，等于（并可转化为）把838磅重物提升1英尺的机械功”这个值相当于460千克米/千卡。这个结果被总结到他1843年8月21日宣读的《论磁电的热效应和热的机械值》论文中。

1844年，焦耳又做了测定空气在压缩和膨胀时产生的热量变化的实验，求得了热功当量的平均值798磅码/英热单位。

1847年6月，在牛津举行的英国科学促进协会的会议上，焦耳争取到了简单介绍他的最新实验的机会。焦耳报告了他用砝码下落带动铜制的翼轮分别搅动水、鲸脑油和水银的实验，测得热的机械当量分别为781.5磅码/英热单位、782.1磅码/英热单位和787.6磅码/英热单位。这个报告由于受到当时已很有名气的青年物理学家W. 汤姆孙（W. Thomson）从热质说观点提出的质询而引起了人们的注意。后来，焦耳继续进行摩擦生热的实验。1849年6月21日，他通过法拉第把论文《论热的机械当量》送交皇家学会。在这篇论文中，焦耳全面地整理了他用摩擦水、水银和铸铁的方法测定热功当量的实验结果，最后得出两个重要结论：

“第一，由物体（不论固体或液体）的摩擦所产生的热量总是与所消耗的力之量成正比；

第二，要使1磅水（在真空中和55℉～60℉时称量）的温度升高1℉，需要消耗相当于使772磅的重物下落1英尺的机械力。”

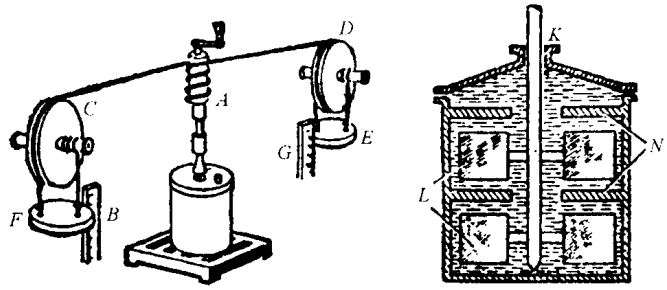


图 6-5　焦耳测热功当量的一种装置

焦耳测定热功当量的工作一直进行到 1878 年，先后采用不同的方法做了 400 多次实验，以精确的数据为能量守恒原理提供了无可置疑的实验证明。1850 年，焦耳当选为英国皇家学会会员。

除迈尔、亥姆霍兹和焦耳之外，这一时期还有不少人进行了同一问题的探索。S. 卡诺在 1830 年已经认识到热质说的错误，认识到热是“改变了形式的运动”，热的损失必定有动力的产生。他由此得出一个普遍的命题：在自然界中存在的动力，在量上是不变的。他还给出热功当量的数值：370 千克米/千卡。卡诺的这个发现的遗稿在 1878 年才被公布。

英国律师格罗夫（William Robert Grove，1811～1896）于 1842 年从电的研究中认识到一切物理力，甚至包括化学力，在一定的条件下都可以相互转化而不发生任何损失。丹麦工程师柯尔丁（Ludwig August Colding，1815～1888）于 1843 年也提出了他用摩擦实验测定热功当量的报告，他同样得到了力的守恒的结论。

这样，从 19 世纪 30 年代到 50 年代，许多人彼此独立地以不同的形式提出了能量守恒的思想。这一重要发现，生动地表明了科学的发展受到社会生产发展和科学内在逻辑发展规律的制约。

1853 年，W. 汤姆孙重新恢复了“能量”概念，并给予它一个精确的定义：“我们把给定状态中的物质系统的能量表示为：当它从这个给定状态无论以什么方式过渡到任意一个固定的零态时，在系统外所产生的用机械功单位来量度的各种作用的总和。”这样，格拉斯哥的力学教授兰金（William John Rankine，1820～1872）就首先把“力的守恒原理”改称为“能量守恒原理”，大约到了 1860 年左右，这个原理才得到普遍承认，而且很快成为物理学和全部自然科学的重要基石。

在能量守恒定律的发现过程中，热和机械功的转化与守恒关系的研究起到了直接和关键性的作用。在迈尔和焦耳的对热功当量的研究之后，物理学家主要展开了两个方面的工作。一方面是继续测定和计算热功当量；另一方面则是从热功转化和守恒关系出发，深入研究热功转化的机制与规律性。德国物理学家克劳修斯（R. E. Clausius，1822～1888）着眼于热功转化过程中介质（主要是空气和水蒸气）的做功，即从功的

角度进行研究。

1850 年，克劳修斯在《物理和化学年鉴》上，发表了“论热的动力和可由此推导热学本身的定律”的论文。在热力学史上极为重要的这篇论文中，他第一次明确地提出了热力学第一定律和第二定律作为热力学的两个基本定律的主张。他从热是物质的粒子的一种运动的观点提出热功转化过程中，一部分热量可转化为机械功，并可用力学原理进行推导和计算；另一部分热量由热体向冷体传导，而使冷体的温度升高。前一部分的热量消失，以机械功的形式表现出来；后一部分的热量并未消失，而是传导到冷体上去了。通过这样的分析，他在热转化为机械功的基础上建立了热力学第一定律：在一切热作功的情况中，产生的功与消耗的热量成比例。反之，通过消耗同样大小的功，将能产生同样数量的热量。

1850 年，克劳修斯在《论热的动力和由此得出的热学理论的普遍规律》论文中，从热是运动的观点对热机的工作过程进行了新的分析。他把迈尔、焦耳关于热功当量的结论和卡诺关于热机效率的结论看做热学理论的两个基本定律。他根据第一个基本定律指出，在热机做功过程中，一部分热量被消耗了，另一部分热量从热物体传到了冷物体，这两部分热量和所产生的功之间存在如下的关系：

$$dQ = dU + dW$$

dQ 表示传递给物体的热量，dW 表示所做的功；U 是克劳修斯第一次引入热力学的一个新的函数，“它包括添加的自由热和变成内功所耗去的热”，是体积和温度的一个函数，并由变化过程的初态和终态完全确定。实际上，克劳修斯在提出热力学第一定律后的十多年中，对 U 的真正物理意义并不十分清楚。直到 1865 年，他才同意 W. 汤姆孙和亥姆霍兹的意见，称之为内能。

能量守恒定律把各种自然现象用定量的规律联系起来，指出了机械运动、热运动、电磁运动和化学运动等，都不过是同一的运动在不同条件下的各种特殊形式，它们在一定条件下可以相互转化而不发生量上的任何损耗。任何一种科学理论，都必须经受住能量守恒原理的检验。不过，这一重要原理的发现者们都只是从量上强调了能量的“守恒”。1885 年，恩格斯首先指出了这种表述的不完善性，他把这个原理改述为“能量转化与守恒定律”，准确而深刻地反映了这一定律的本质内容。

第三节　热力学第二定律的建立

19 世纪以来，蒸汽机得到了越来越广泛的应用，如何进一步提高蒸汽机的效率，成为人们非常关注的问题。

一、卡诺的热机理论

法国年轻的工程师萨迪·卡诺（Sadi Carnot，1796～1832）首先以普遍理论的形式研究了“由热得到运动的原理”。

萨迪·卡诺是法国大革命中“胜利的组织家”拉萨尔·卡诺的儿子。他从小从他父亲那里学习了数学、物理、语言和音乐等方面的知识，后来先后进入巴黎多科工艺学院和工兵学校学习，1816 年因其父亲被流放而退役，专心研究热机理论。1832 年 8 月 24 日因霍乱病逝。

1824 年，卡诺出版了《关于火的动力的思考》，总结了他早期的研究成果。他给自己提出的实际任务是，阐明热机工作的原理，找出热机不完善性的原因，以提高热机的效率。

当时卡诺还信奉热质说，他认为蒸汽机的工作过程总要伴随着热质的流动和重新分布。这使他把蒸汽机和另一种原动机水车相比。正像水车是靠水从高处流向低处而做功一样，蒸汽机是靠热质从高温加热器流向低温冷凝器而做功的。这个类比使卡诺得到一个正确的结论：蒸汽机至少必须工作于一个高温热源和一个低温热源之间，“凡是有温度差的地方就能够产生动力”。至于蒸汽机中的工作物质，卡诺指出蒸汽不是惟一可被采用的，所有那些随着加热和冷却可以发生体积变化的物质，都可以用于这一目的。这样，结构最简单的热机至少有一个高温热源和一个低温热源；因此，这个热机必然是由两个等温过程（当工作物质与两个热源接触时）和两个绝热过程（当工作物质与两个热源脱离时）所组成的一个循环。这就是所谓“卡诺热机”。卡诺据此得出了一个基本结论：热机必须工作于至少两个热源之间，热机的效率仅仅取决于热源的温度差，而与采用什么工作物质无关。

卡诺知道，一个实际热机的效率，与它的结构、加热器和冷凝器的温度、工作物质的性质等因素都有关系；但理想热机的效率则只取决于加热器和冷凝器的温度。这种理想热机（循环）的理想性在于：它的一切过程都可以逆方向进行；当严格地按照相反的顺序实现了热机中原来的过程所进行的各项操作之后，系统和外界都恢复原状。卡诺断言，在相同温度的高温热源和相同温度的低温热源之间工作的一切可逆的卡诺热机。不论工作物质是什么，它们的效率都相等。

卡诺根据热质守恒思想和永动机不可能制成的原理，进一步证明了这样一个结论：在相同温度的高温热源和相同温度的低温热源之间工作的一切实际热机，其效率都不会大于在同样的热源之间工作的可逆卡诺热机的效率。他论证说：如果存在有比他的理想热机更加有效的利用热的方法，即从同等数量的热质的转移中能够得到更多的功，“则只需要运用这个动力的一部分就可以把热质由物体 B 送到物体 A 去，即从冷源送回到热源，于是，起始的状态就得以复原。这样，又可以重新开始类似的操作并如此

地继续下去。这就将不仅是一种永恒的运动，而且将不消耗热质或其他工作物质而无限制地创造出动力来。这是跟公认的思想以及力学规律和健全的物理学相矛盾的，这是不允许的”。卡诺由此得出：理想的可逆卡诺热机所能得到的最大动力，也就是利用任意方法所能得到的最大动力；热机的效率有一个极大值的限制，这个值仅由加热器和冷凝器的温度决定，一切实际热机的效率都低于这个极值。

在这一研究工作中，卡诺出色地运用了类比和建立理想模型的方法。他撇开了热机工作过程中那些次要因素，通过同水车的类比，构思了一部理想的热机。这种热机虽然不可能制造出来，但它却揭示了热机中热向机械运动转化的本质过程。在实践上，卡诺的工作为提高热机效率指明了方向；在理论上，他的结论已经包含了热力学第二定律的基本思想，只是由于热质观念的阻碍，使他未能完全探究到问题的底蕴。

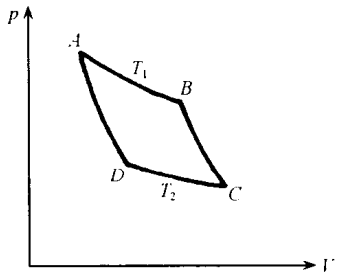


图 6-6　克拉贝龙对卡诺循环的图示

卡诺的工作的价值，没有被人们所理解，很快就被遗忘了。只是由于法国工程师克拉贝龙（B. P. E. Clapeyron，1799～1864）在 1843 年的重新研究和发展，卡诺的理论才被人们所注意。克拉贝龙将卡诺循环在图 6.6 中表示出来，并且证明了，卡诺热机在一次循环中所做的功，其数值正好等于循环曲线所围成的面积。克拉贝龙的工作，为卡诺理论的进一步发展创造了条件。

二、热力学温标的建立

根据卡诺的理论，一切理想热机在同样的热源与冷源之间工作时，其效率都相等，与使用的工作物质无关。W. 汤姆孙由此提出了一种热力学温标，从理论上解决了各种经验温标不相一致的问题。

威谦·汤姆孙（William Thomson，1824～1907）是英国著名物理学家。10 岁时进入格拉斯哥大学学习，17 岁又进入剑桥大学。1854 年毕业后到法国留学，1846 年回国后就被选为格拉斯哥大学自然哲学教授，1951 年被选为法国科学院院士，1890 至 1895 年间担任皇家学会会长，1904 年出任格拉斯哥大学校长。由于装设大西洋海底电缆成功，1866 年被封为爵士，1892 年又被封为开尔文勋爵（Lord Kilvin）。他对电磁学和热力学的发展都做出了重要贡献。

1848 年，在《建立在卡诺热之动力论基础上和由卡诺的观察结果计算出来的一种绝对温标》的论文中，汤姆孙提出了这样的问题：有没有能够据以建立一种绝对温标的任何原则？他接着回答说：“在我看来，卡诺关于热之动力的学说使我们可以给出一个肯定的回答。按照卡诺所确立的动力与热之间的关系，在由热的作用得到的机械功的数量关系中，只包括热量和温度间隔的因素；又因为我们有独立地测量热量的确定

的方法，所以就为我们提供了温度间隔的一个量度，根据它可以确定绝对的温度差。”汤姆孙具体指出了这种温标的特点，他说：“这一温标系统中的每一度都有同样的数值；也就是说，只要一单位热从温度为 T 的物体 A 传至温度为 $(T-1)$ 的物体 B，则不论 T 是什么数值，都将给出同样的机械效应。这样的温标应当称为绝对温标，因为这个温标的特点是它完全不依赖于任何特殊物质的物理性质。”

1852 年，在汤姆孙与焦耳合作的一篇论文中，专门用一节讨论了“基于热的机械作用的一种绝对温标”。他们利用摄氏温度 t 和气体膨胀系数 E，把温度 T 定义为

$$T=\frac{1+Et}{E}$$

汤姆孙当时利用了 $E=0.003665$ 这个数值，得出 $T=272.85+t$。

三、热力学第二定律的物理表述

在能量守恒原理确立之后，卡诺关于热质在两个热源之间“降落”而产生机械动力的看法当然是不能成立了。1849 年，W. 汤姆孙在《关于卡诺学说的说明》中指出，卡诺关于热只在机器中重新分配而并不消耗的观点是不正确的，但是如果抛弃了卡诺关于热转化为功的条件的结论，那就会碰到不可克服的困难；因此，热的理论需要从根本上进行改造。

1850 年，克劳修斯在迈尔、焦耳关于热功当量的结论和卡诺关于热机效率的结论在基础上，提出了热力学第一定律：$dQ=dU+dW$。

关于卡诺定理，克劳修斯指出，卡诺的证明是错误的，因为他所依据的出发点是热机工作过程中“热量维持不变”，而实际上热的传递和热的消耗是同时发生的。克劳修斯指出，为了证明在同样温度的高温热源和低温热源之间工作的一切热机都不可能高于可逆卡诺热机的效率，只需依据热的一个一般特性就可以了。这个特性就是：“热总是表现出这样的趋势：它总是从较热的物体转移到较冷的物体，使存在的温度差消失而趋于平衡。”1851 年，W. 汤姆孙把克劳修斯所揭示的这一热的特性改述为：“一台不借助于任何外界作用的自动机器，把热从一个物体传到另一个温度比它高的物体，这是不可能的”。后来克劳修斯也重新把它表述为“热从冷的物体传向热的物体不可能无补偿地发生”。

W. 汤姆孙几乎与克劳修斯同时进行了这一课题的研究。1851 年，他以《论热的动力理论》为总题目发表了三篇论文。在引言中他说明，他在论文中要解决的主要任务就是要采取与卡诺信奉的热质说相反的热的动力说，以修改卡诺的理论。他明确提出以下两个命题作为全部热的动力理论的基础。

命题 I（焦耳）：当不论借助于什么方法从单纯的热源得到机械效应，或有等量的机械效应变成纯粹的热效应而消失，则有等量的热消失或产生出来。

命题Ⅱ（卡诺与克劳修斯）：如果有这样一部机器，当它反过来运转时，它的每一部分的物理的和力学的动作全部逆转过来；那么，它将像具有相同温度的热源和冷凝器的任何热机一样，由一定量的热产生同样多的机械效应。

为了给命题II的证明提供一个正确的依据，他提出了下述公理："借助于非生物的物质机构，通过使物质的任何部分冷却到比周围物体的最低温度还要低的温度的方法而得到机械效应，是不可能的"这个原理后来被表述为："从单一热源吸取热量使之完全变为有用的功而不产生其他影响是不可能的。"德国物理化学家奥斯特瓦尔德（Wilhelm Ostwald，1853～1932）把这一原理表述为第二类永动机是不可能的。汤姆孙指出，他所提出的这个公理与克劳修斯的表述是完全一致的。

四、熵增加原理

由于热质观念的束缚，卡诺本人也未能充分理解自己工作中所包含的深刻思想。但是，克劳修斯却从可逆卡诺循环中引出了新的物理概念。

克劳修斯对可逆卡诺循环进行了深刻的分析：一个靠热来产生动力的循环，在某一定量的热"转化"为功的同时，另外一些数量的热就从高温状态"转化"为低温状态。如果把这一循环反过来，在功转化为热的同时，就可能将热从低温传向高温。这就是说，如果使热转化为功的过程逆向进行的话，就可以消除热从高温状态向低温状态的转化。这就意味着，在可逆循环中，这两种转化是等价的，或者说它们是彼此均衡或等效的。克劳修斯着手按照这条途径建立一个定量的变换理论，以确定两种转化的等效值。他希望这个等效值能够以一个新的自然规律的形式表示这个均衡条件或他称的"补偿条件"。

通过深入的数学上的分析，并依据热力学第一定律和理想气体状态方程，克劳修斯得出：在循环中发生的所有转化的等效值是积分 $\oint\frac{dQ}{T}$。他指出，对于可逆循环过程，这个值趋于零；对于不可逆循环过程，这个积分总为负值，即

$$\oint\frac{dQ}{T}=0，\text{可逆循环过程}$$

$$\oint\frac{dQ}{T}<0，\text{不可逆循环}$$

这表明，在可逆循环中，过程中的所有转化是互相抵消或互相补偿的；在不可逆循环中，总有一些转化无法得到补偿。这部分讨论是克劳修斯在1854年的论文《论热的动力理论的第二原理的另一形式》中做出的。

1865年，在《论热的动力理论的主要方程的各种应用形式》中，克劳修斯指出，在可逆循环中，由于积分 $\oint\frac{dQ}{T}$ 为零，所以 $\frac{dQ}{T}$ 必为一个物理量的全微分，这个量只同系统

的状态有关，而与达到这个状态的过程无关。如果用 S 表示这个物理量，则可规定

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

由于 S 是一个态函数，所以 dS 沿任意可逆过程的积分，等于 S 的末态与初态之值的差，即

$$\int_1^2 dS = S_2 - S_1$$

克劳修斯把他引入的这一新的函数 S 称为系统的的“熵”(entropie)，表示系统的“转变含量”(transformation content)，即对热的转化程度的测度。

利用这个新的函数，克劳修斯证明了，任何孤立系统，它的熵的总和永远不会减少，或者说，自然界里的一切自发过程，总是沿着熵不减小的方向进行的，这就是“熵增加原理”，它是利用熵的概念所表述的热力学第二定律。

W. 汤姆孙和克劳修斯把这个定律外推到整个宇宙，得出了宇宙会走向“热寂”的结论。1852 年，汤姆孙从他所提出的原理得出结论说，自然界中占统治地位的趋向是其他能量转变为热，并使处处温度趋于平衡，最终导致所有物体的工作能力减小到零。1865 年，克劳修斯也提出：“如果在宇宙发生的全部状态变化中，沿一个方向的变化在量上总是超过沿相反方向的变化，那么宇宙的全部状态必定愈来愈多地按前一个方向变化，因而宇宙必定不断地趋于一个终态。”根据这一思想，他把热的动力理论的两个基本定律概括为：“宇宙的能量恒定不变”；“宇宙的熵趋于一个极大值”。

“热寂说”引起了一些物理学家的异议。他们认为，把在有限的时空范围内得到的原理推广到整个宇宙，这是很不适当的。对这个问题的讨论，一直持续到今天。

第四节　分子运动论的发展

17 世纪，随着近代自然科学的诞生，物质原子论的思想得到复兴；热与物体内部粒子的运动有关的思想，也被不少学者以不同形式提了出来。

一、原子论的复兴

1638 年，法国学者伽桑狄 (Pierre Gassendi，1592～1655) 以极大的热情重新发掘和宣传了古代的原子论思想。他假设各种物质都是由大量在各个方向运动的坚硬粒子所组成；各种不同物质粒子的不同形状，使它们以不同形式进行结合并表现出不同的特性。他用这个假说对物质三态的区别提出了解释：在固体内部，硬粒子结合得很紧密，粒子之间强大的力使它们保持着特定的规则排列；在液体内部，相距较近的粒子之间的力使它们不易分散开来；在气体中，相距很远的粒子之间不存在相互作用力，各

个粒子作自由运动。

伽桑狄的论述重新引起了人们对原子论的注视，不少科学家接受了原子论的思想。波义耳由气体的压缩、液体的蒸发、固体的升华弥散以及盐块的溶解等现象断言，物质是由无数微粒构成的。他通过一系列关于空气压力的实验，发现了一定质量的气体的压强和它的密度成正比。他把这种空气的“弹力”现象归因于气体粒子本身，设想空气粒子像小弹簧、羊毛毡片或小海绵一样地挤压在一起，它们“挣脱压缩的努力”产生了空气的压强。这是从气体内部结构对气压现象进行解释的一种有意义的尝试。

这种解释受到胡克的怀疑。胡克不相信气体粒子是密集地挤压在一起的。他在1678年提出，空气是由大量快速运动的粒子组成的，它们对四壁的频繁碰撞，形成了空气对器壁的压力。牛顿在《自然哲学的数学原理》中假定，气体粒子之间可能存在着一种与距离成反比的排斥力，以此对波义耳定律提出了解释。

上述这些思想，虽然还很粗糙，也没有为人们普遍接受，但却为物理学的研究从宏观走向微观指出了一个方向。

二、D. 伯努利的气体运动论

1738年，瑞士物理学家丹尼尔·伯努利（Daniel Bernoulli，1700～1782）在他出版的《流体动力学》中继承了胡克的思想，对波义耳定律做出了定量解释，指出气体的压强是气体的粒子与器壁碰撞的结果。他考虑了由无数粒子组成的气体对一个气缸活塞的作用（图6-7），假设气体粒子的速度在活塞压缩气体前后是相同的，当活塞由 EF 移到 ef 时，它所受的压力由于以下两个因素而增大：首先，气体粒子的数密度增大了，因而活塞所受到的粒子的碰撞增多了；其次，就每个粒子来说，它对活塞的碰撞也更频繁了。设活塞的移动使气体的体积减小到原先体积 V 的 S 倍，即 $V_S=SV$，则气体的表面积减小到原来的 $S^{2/3}$ 倍；因此由于第一个原因压强将增加到原来的 $S^{-2/3}$ 倍。对于第二个原因，伯努利指出碰撞将随粒子间距离的减小而更频繁地发生，“碰撞次数与粒子表面之间的平均距离成反比”。设粒子中心之间的距离为 D，粒子的直径为 d，则压缩将使粒子的碰撞次数增加

$$(D-d)/(S^{1/3}D-d)$$

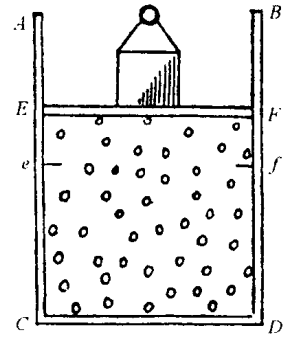


图6-7　D. 伯努利的气体模型

由于以上两个原因，气体的压强将增加

$$\frac{D-d}{(S^{1/3}D-d)\cdot S^{2/3}}=\frac{1-d/D}{S-S^{2/3}d/D}$$

由于 $S=V_S/V$，并且 $d\ll D$，取 $\frac{d}{D}=0$，则由上式可得

$$\frac{P_S}{P}=\frac{V}{V_S}$$

这就是波义耳定律。伯努利指出，这个定律肯定可以“适用于比正常密度低的空气”。对于高压下的更稠密的空气，当必须考虑气体粒子本身的大小时，就要通过实验来确定 d/D 的值，以便对定律进行修正。

伯努利还讨论了气体压强随温度的变化，他说：“气体的压强不仅随体积的减小而增大。正如人们所熟知的，热随着内部粒子运动的加剧而增强。因此任何体积固定的气体的压强的增大都意味着气体粒子的更剧烈的运动”。伯努利明确地指出，在体积不变的情况下，压强将正比于粒子速度的平方而变化，这是因为随着速度的增加，碰撞的次数和强度都同样地增加。

D. 伯努利的气体模型，无疑是走向分子运动论的重要一步，他的工作显示了分子运动论的优越性；但是，这个学说却没有为他的同代人所接受，并很快被遗忘了。

18 世纪 40 年代，俄国学者罗蒙诺索夫在《关于热和冷的原因的思索》和《试论空气的弹力》两篇论文中，也提出热是物质内部看不见的微小粒子的运动产生的，这种运动是杂乱无规则的；热的传递是由于高温物体中的微粒把运动传给低温物体中的微粒造成的。

三、分子运动论的复兴

18 世纪初，随着化学原子论的确立，分子概念也被提了出来。

英国化学家道尔顿（John Dalton，1766～1844）通过对大气的成分、性质以及气体的扩散和混合现象的研究而走向新原子论的观点。1801 年，道尔顿发现气体的压力随温度的升高而增大。为了解释这一现象，他设想气体的原子是由一个硬核和包围着核的一层“热雾”所组成。由于这种热雾的作用使原子间相互排斥；对气体加热时这种热雾增多，原子间的排斥就增强。为了解释一种气体能够向其他气体中扩散以及混合气体的压力问题，道尔顿假设同一化学物质的原子互相排斥，不同化学物质的原子则不互相排斥，他根据这个假设解释了他所发现的气体分压定律。

对于各种物质元素在物理性质和化学性质上的差异，道尔顿是用它们的原子在化学个性上的差异来说明的。在 1803 年 9 月 6 日的笔记里，写下了他的新原子学说的基本要点。他认为，一切化学元素都是由不可分割的原子组成的；各种元素的原子以简单整数的比例相结合而形成各种化合物的原子。

当时尚未提出“分子”的概念，道尔顿也把不同原子组成的分子称为“复杂原子”。这使他的原子论在解释气体化合时的体积之比、确定化合物中原子的组成以及原子量的测定等问题上遇到不可克服的困难。这些矛盾，导致了阿伏伽德罗“分子”假说的提出。

阿伏伽德罗（Amedeo Avogadro，1776～1856）是意大利科学家，他在1811年引入了“分子”概念，并把它与原子概念相区别。他认为原子是参与化学反应的最小粒子，分子是游离状态下的单质或化合物的能够独立存在的最小粒子；单质的分子是由相同元素的原子组成的，化合物的分子则由不同元素的原子所组成。他指出，在气态物质的体积和组成气态物质的分子数目之间的关系上，惟一容许的假设是“相同体积中所有气体的分子的数目相等”。

阿伏伽德罗的假说受到了包括道尔顿在内的化学权威们的反对；当时原子论的支持者们也都不希望使原子论复杂化。但是，对“分子”学说的拒绝，却使原子论陷入愈来愈严重的混乱状态。只是到了1860年，由于意大利化学家康尼查罗（S. Cannizzaro，1826～1910）在一次国际化学会议上的热情阐发和论证，才为阿伏伽德罗的学说争得了它应有的历史地位和普遍的承认，并支持了物理学中分子运动论的发展。

在道尔顿提出他的原子论后，英国物理学家赫拉帕斯（J. Herapath，1790～1868）重新发现了伯努利的工作，在1816至1821年间，写出了几篇有关分子运动论的论文。1821年，他明确提出了这些假设：组成物质的原子是不可穿透的刚性小球；气体的原子以很大的速度在各个方向作直线运动；热是由原子的运动引起的，并且正比于原子的动量（速度）。这就不确切地把温度与原子的运动速度联结起来。赫拉帕斯还推导了气体定律，并根据他的假设定性地解释了物质的相变和扩散现象。他的结论大多是不确切的，他的工作也受到科学界的冷漠。

另一位英国物理学家瓦特斯顿（J. J. Waterston，1811～1883）在1845年间写过一篇题为《论由运动着的弹性分子组成的媒质的物理学》的手稿，阐述了他的气体分子运动理论。瓦特斯顿在这里首次提出了“弹性球分子模型”，认为物质微粒“像玻璃和象牙一样是完全弹性的”，它们在容器内的每一方向上自由地作直线运动，直到它们彼此碰撞或与器壁碰撞；在这些过程中，粒子的全部活力永远保持不变。他计算了分子以速度 v 连续碰撞器壁的平衡条件，得出了气体的压强正比于分子的数密度 n 和速度的平方 v^2 的结论。瓦特斯顿根据分子的完全弹性碰撞得到了能量均分定理的一个特殊情形，即在混合气体中各种气体分子速度的均方值反比于分子的重量，或者说各种分子的平均动能都相等。在推导中，瓦特斯顿实际上已经引入了取统计平均值的思想。他的这篇重要论文中只被刊登了一个摘要，同样没有引起注意。

1848年10月，焦耳提出了一个报告，根据热与机械力的相互转化而把热归结为物体内部粒子的动能以及粒子间的势能；他根据赫拉帕斯关于气体粒子直线运动的假设，计算了在0℃和1个大气压下氢粒子的速度，并得出了粒子的速度与温度的平方根成比例的结论。

19世纪50年代对于复活分子运动论做出最有影响的工作的是德国物理学家克仑尼希（August Karl Krönig，1822～1879）。1856年，他发表了《气体理论原理》，确认热是运动的一种形式。他提出理想气体模型：分子都是弹性小球，它们在没有相互作

用时作匀速直线运动，只在发生碰撞时才有相互作用。他假设了气体分子都以相同的速度 v 在长方形容器中分别沿 x、y、z 三个方向运动，每次碰撞时作用于器壁的冲量为 mv，由此求出了气体压强公式

$$p = \frac{1}{6} N m v^2 \frac{1}{V}$$

N 为容器内气体的分子数，V 为容器的体积。

克仑尼希的工作在内容上并没有超出赫拉帕斯的工作，但是由于“热是运动”的观点当时已得到普遍的承认，进一步探索热的微观本质已成为物理学家们的迫切任务，所以他的论文立即引起了普遍的重视，大大推进了分子运动论的研究工作。

四、克劳修斯对分子运动论的贡献

克劳修斯在研究热力学第二定律的同时，也从微观上对分子运动论理论进行了探讨。他在 1857 年发表的《论热运动形式》一文中，对分子运动论的基本思想作了重要的发展。

克劳修斯以分子对器壁的碰撞说明了气体压强的形成。他指出，虽然分子每一次单独的碰撞作用是微不足道的，但是最小的表面元在单位时间内所受到的巨大数目的碰撞，也会使我们感觉到器壁似乎受到某种由中心指向四周的不变的力的作用。

在推导气体压强公式时，克劳修斯明确地引进了统计概念。他指出，单个分子的碰撞是由大量不同条件、错综复杂的因素的组合决定的，要精确确定每个分子的详尽过程是不可能的，也是无意义的；因为影响系统的宏观性质的只是大量分子运动的平均效果。

克劳修斯说明了气体的压强与气体的分子数密度 n 以及分子的运动速度 v 的关系。他指出，单位时间内分子对器壁的碰撞次数与 n 成正比，而分子速度的变化则产生两个方面的影响，一是使碰撞次数变化，一是使每次碰撞的强度变化，所以压强正比于 v^2。在论文的附录里，克劳修斯推导出了气体压强公式：

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

m 为分子的质量。

克劳修斯还由此提出了理想气体分子运动模型，这个模型指出：分子本身的体积与气体所占的整个空间相比是无限小的；分子每次碰撞经历的时间比起两次碰撞之间的时间隔是无限小的；分子力的作用是无限小的。他指出，当这些条件得不到满足时，就超出了理想气体定律的适用范围。

克劳修斯在说明固体和液体中分子运动的特点时，还研究了蒸发和沸腾过程。过去人们认为，蒸发是由于液体内部某种均匀连续的力的作用的结果，克劳修斯则认为

蒸发是由于个别分子的运动速度偏离它们的速度平均值的涨落造成的。在液体表面发生的这种涨落，使个别分子可以摆脱邻近分子的吸引作用而逸出液体；同时蒸汽分子同样也会被吸引而回到液体内，并最终在液体与蒸汽之间建立起动态平衡。关于沸腾现象，克劳修斯认为这是由发生在液体内部的分子速度的涨落造成的，这种涨落会在液体内部形成一些气泡空间，液体分子将不断蒸发到气泡内并产生蒸汽压力；当气泡内的蒸汽压力与压缩气泡的外部压力达到平衡时，则发生沸腾。由此不难说明，当液体所受的压强增大时，沸点也将升高。

在这篇论文中，克劳修斯还为气体热容量的经典理论奠定了基础。他指出，不能先验地认为在任何情况下都可以把分子看做刚性小球。在比热问题上，除了要考察分子整体的平动之外，还应估计到分子内部各部分之间的相对运动，因为化学上已发现大多数气体分子都是由两个或更多的原子组成的。他证明了气体分子的平动动能 K 只是全部内能 U 的一个部分，其比值为

$$\frac{K}{U}=\frac{3}{2}\left(\frac{c'}{c}-1\right)$$

c 和 c' 分别为气体的定容比热和定压比热。此式表明，气体分子的平动动能是全部内能的一个确定部分。对于单原子气体，由于没有分子的内部运动，所以 $K=U$，并且 $\frac{c'}{c}=\frac{5}{3}$；对于多原子气体，分子中的原子越多，比值 $\frac{K}{U}$ 越小。

克劳修斯的另一个重要贡献，是引进了气体分子的平均自由程概念。

根据压强公式和理想气体状态方程，可以得到气体分子的平均动能与温度之间存在下述关系：

$$\frac{1}{2}mv^2\cdot N=\frac{3}{2}\nu RT$$

R 为气体普适常数，ν 为气体的质量数，克劳修斯根据这个公式计算出，在 0℃时，氧分子的均方根速度为 461 米/秒，氮为 402 米/秒，氢为 1844 米/秒，这是一个完全出乎人们意料的结果。1858 年有人指出：如果气体分子有如此巨大的运动速度的话，那么气体的扩散也应该以很大的速度进行，但事实上气体的扩散与此相比是非常缓慢的。

克劳修斯意识到这个问题对于分子运动论是一个严重的挑战，在 1858 年的《关于气体分子运动的平均自由程》论文中，对这个问题做了回答。克劳修斯认识到，单个分子的运动速度和大量分子组成的气体的扩散速度之间的矛盾，来源于对分子大小的估计不符合实际，他在 1857 年的论文中把分子当作数学上的点来处理的假定需要做出修改。克劳修斯指出，尽管分子很小，但还是有一定的大小，这是因为分子之间存在着分子力的相互作用："当两个分子相接近时开始作用着的是吸引力，在分子间处于某个距离时引力变得很显著，随着分子间距离的减小而增大着；但是当分子处于直接接触时，就产生了使分子力求离开的排斥力。"因此，可以设想存在着某个平均距离 σ，当

分子间的距离小于 σ 时，它们就相互排斥而离开。如果把分子看做是弹性球，它的直径就是 σ。根据这一模型不难理解，分子只在前后相邻的两次碰撞之间，才走过一段直线路程，称为分子的自由路程。迅速运动的分子球由于同别的分子球之间的频繁碰撞而不断改变自己的运动路径，使其运动轨迹成为非常复杂的连续折线，这种运动称为“无规行走”。由于这个原因，分子在某一特定方向上的移动速度就不可能很大了。

克劳修斯根据一些附加假设，计算出气体分子的平均自由程为

$$l = \frac{3}{4}\frac{1}{n\pi\sigma^2}$$

n 为分子的数密度。这个距离是远小于分子在单位时间内飞过的路程的。于是，前面提到的关于气体扩散速度的疑难也就解决了，扩散过程与其说是取决于分子的运动速度，不如说是取决于分子的平均自由程。

五、范德瓦尔斯方程的建立

D. 伯努利早已指出，在考虑到分子本身的大小时，气体定律应该做出修正，即在体积项中应减去一个数值，1863 年，法国的赫恩（G. A. Hirn）把气体状态方程写为 $(P+\phi)(V-b)=RT$，并指出 ϕ 是体积的函数。

在安德鲁斯发现了二氧化碳的液化过程存在一个临界温度之后，开尔文的哥哥 J. 汤姆孙（James Thomson，1822～1892）对这一发现作了进一步的补充，指出在临界温度下气液两态应作连续的过渡，等温线呈“∽”的形状。荷兰物理学家范德瓦尔斯（J. D. van der Waals，1837～1923）对理想气体状态方程做出的修正，使这个问题得到了澄清。

1873 年，范德瓦尔斯在他的博士论文《论液态与气态的连续性》中，提出了他著名的实际气体方程。

范德瓦尔斯首先讨论了对压强的修正，他指出，这是由于分子间相互作用力的存在引起的。他考虑了边界上厚度为分子作用半径的一薄层气体分子所受到的指向内侧的作用力。他指出，这个作用力应该正比于薄层内侧能够对薄层中的分子施加吸引力的物质之量，即正比于其密度；它同时也正比于薄层内被吸引的分子的密度。所以，“吸引力与密度的平方成正比，或与体积的平方成反比”。

范德瓦尔斯进而根据一定条件下压缩气体可以把气态变成液态的事实指出，在应用气态方程时，还必须考虑气体分子本身所具有的体积；不过，不能认为容器的容积（外部体积）和全体分子的体积之差就是分子运动的自由空间，而应该减去分子体积的四倍。他根据平均自由程解释说：“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从球的中心到墙的距离，其实自由路程是这段距离再减去球的半径。所以考虑到分子的直径，自由路程减小了，碰撞次数增加了，于是压强也就相应地增大了。”

如果把分子看做是直径为 σ 的小球，且设分子都排成立方阵，分子间的平均距离为 λ，碰撞都发生在分子球的连心线上，则克劳修斯所得到的平均自由程 l_1 将减小一个距离，其大小等于相接触的两个分子中心间的距离，即 σ。于是

$$l_2 = l_1 - \sigma;$$

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

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

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

由于 $\sigma/2$ 是分子球的半径，$n\lambda^3$ 等于一个单位体积 V，$4\pi\sigma^3 n/3$ 是这些分子体积的 8 倍，所以

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

式中 b_1 为这些分子的体积。

范德瓦尔斯进一步指出，实际上碰撞通常并不是对心的，所以应重新考虑自由程的修正值。他写道："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，如果是对心碰撞，运动分子的中心到这一平面的距离最大；在中间的那些情况，运动分子的中心处于半球面上的其他各点。路程所减去的值应是运动分子的中心到这一平面的距离，所以平均路程所减去的平均值应是半球面的平均坐标。"设半球面上小面元 dw 的坐标（距平面的距离）为 z，则半球面各点的平均坐标为

$$\int z dw / \int dw$$

这是半球面重心的坐标，其值为分子球半径的一半，所以自由程的缩短应该是 $\sigma/2$，而不是 σ。因此

$$l_2 = l_1 - \frac{\sigma}{2}$$

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{V - 4b_1}{V}$$

所以，分子自由活动的空间应该比容器的容积 V 减少 $b = 4b_1$。

这样，范德瓦尔斯就得到了非理想气体的状态方程

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

从理论的角度看来，这个方程的推导过程并不是无懈可击的。后来不少人对这一方程进行了修正，得到了一些半经验性的公式。但这个方程的物理思想十分明确，对安德鲁斯等人的实验结果，也做出了令人满意的定量解释；从这个方程还能求出临界

点的各个状态参量：

$$T_k = \frac{8a}{27bR}$$

$$V_k = 3b$$

$$P_k = \frac{a}{27b^2}$$

所以，范德瓦尔斯的这一工作很快就得到了科学界的注视，他也因此获得了1910年度的诺贝尔物理学奖。

第五节　统计物理学的建立

从D. 伯努利到克劳修斯，人们在处理分子运动的问题时，常常简单地假定一切分子都以同样的速度运动。19世纪中期，麦克斯韦发现了气体分子速度分布律，开创了对热现象的统计研究方法。

一、麦克斯韦的工作

1859年9月，英国物理学家麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831～1879）在论文《气体动力论的说明》中（1860年发表）突出了分子热运动的无规则性，在几率概念的基础上运用严格的统计方法，对气体分子运动的问题进行了处理。

麦克斯韦在论文中提出并解决了著名的速度（速率）分布问题，他指出，气体中大量分子的频繁碰撞，并非使它们的速度趋于一致；气体中各个分子的速度的大小和方向是千差万别并时时变化的，分子的速度分布在一切可能值上；不过，在一定的宏观平衡条件下，处于各种不同速度范围内的分子数在总分子数中所占的比率却是一定的，即呈现出某种规律性的分布。如果知道了任意时刻分子速度的分布规律，则气体的大部分可观测的宏观性质，都可以严格地运用统计方法精确地计算出来。

在推导这一分布定律时，麦克斯韦把气体看做是由“数量极大的、非常微小的、完全弹性的、只在碰撞时才有相互作用的坚硬小球所组成的系统”。他补充了以下三个假设：两个分子相碰撞时，在一切方向上的反冲几率相等；速度在x、y、z三个方向上的分量的分布彼此独立；速度分布不受外界影响。

从这些假设出发，麦克斯韦进行了具体的推导。设以N表示气体的总分子数，dN_v表示分布在速度间隔v与$v+dv$之间的粒子数，则dN_v/N表示分布在速度间隔v与$v+dv$之间的分子在总分子数中所占的比率。引入待定函数$f(v)$，使$\frac{dN_v}{N}=f(v)\,dv$，麦克斯韦求出

$$f(v) = \frac{4}{\alpha^3\sqrt{\pi}} v^2 e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}}$$

这就是著名的麦克斯韦速度（速度）分布律，式中的 α 就是最可几速度。

后来麦克斯韦发现，他所提出的单个分子的速度分量是统计无关的这个假设“可能靠不住”。1866 年他重新假定了两个相碰撞的分子的速度是统计无关的，结合无外力作用时能量守恒，重新推导出了分子速度分布函数 $f(v)$。

在重新考察克劳修斯关于分子运动平均自由程的推导时，麦克斯韦指出，必须考虑分子的相对运动。他求出这个相对速度为一个分子速度数值的$\sqrt{2}$倍，因而平均自由程应改为

$$l = \frac{1}{\sqrt{2}\, n\pi\sigma^2}$$

麦克斯韦关于输运过程、特别是关于内摩擦现象的研究，开辟了非平衡态研究的新领域。按照气体分子运动论，内摩擦现象是由于具有不同平移速度的各层分子相互迁移所产生的平移动量的交换引起的。麦克斯韦以下述两个假设作为出发点：一个分子的碰撞频率取决于平均自由程 l；在一次碰撞后，分子就能够获得发生碰撞地点的特征速度，即所谓“一次同化”假设。他由此得到内摩擦系数为

$$\mu = \frac{1}{3}\rho l v$$

ρ 为气体密度，l 为平均自由程，v 为分子的速度。

由于平均自由程 l 与气体的密度 ρ 成反比，所以麦克斯韦从上述结果直接得出了“内摩擦系数与密度无关”这样一个“出色的结论”。他也认为：“从数学理论导出的这个结论是极其令人莫名其妙的。”在 1866 年发表的关于气体的黏滞性的论文中，他列出了用扭摆在气体中的阻尼振动测定的多组数据，证明了 μ 与压强（因而与密度）无关的结论，这个工作为气体分子运动论提供了一个有力的支持。从上述公式还可得出 μ 与温度 T 的平方根成正比，但实验表明 μ 与 T 成正比。1866 年，麦克斯韦修改了把气体分子看做弹性小球的假定，而把它们看做是“一些微小的物体或一些较小的分子群，它们彼此以沿连接分子重心方向的力相互排斥，其大小近似地为重心距离的某一函数”，并根据他的实验结果，得出“斥力反比于距离的五次幂”，从而得出 μ 正比于 T 的结果。

麦克斯韦在推导气体内摩擦系数时所作的两个假设，后来都被别人作了一些修正，因而麦克斯韦所得到的结果也被作了相应的修正。根据麦克斯韦的内摩擦系数公式，只要测定出气体的内摩擦系数和密度的值，就可以确定平均自由程的长度，于是人们的认识便进入到分子世界。1865 年，奥地利物理学家洛喜密特（Joseph Loschmidt，1821～1895）根据平均自由程估计了分子的大小，得出分子的直径约为 1.18×10^{-6}毫米，并进而得出在 0℃和 1 个大气压下 1 立方厘米气体内的分子数约为 2.7×10^{19}个，这

就是“洛喜密特常数”。

二、玻耳兹曼的工作

奥地利杰出的物理学家玻耳兹曼（Ludwig Boltzmann，1844～1906）在1868年到1871年间，把麦克斯韦速度分布定律推广到有外力场作用的情况，得出了粒子按能量大小分布的规律。他撇开了有关分子碰撞的任何假设，只简单地假定有限个分子之间分布着一个恒定的总能量；能量的所有组合大致相等，即经过足够长的时间，系统将取遍相应于这一总能量的所有可能分布，这就是后来所称的“各态历经假说”。这样，他就得到了玻耳兹曼分布律，并进而得出了气体分子在重力场中按高度分布的规律；用这个结果很好地说明了大气的密度和压强随高度的变化。

玻耳兹曼想到，麦克斯韦和他所得到的分布律 $f(v)$，只反映了气体平衡态下的情况，其中没有时间因子。他试图建立起非平衡态分布函数 $f(v,t)$ 的运动方程，$f(v,t)$ 表示在时刻 t 气体分子按速度 v 的分布；如果能够解出这个方程，就可以统一地解决各种输运过程问题。1872年，他建立了这一运动方程，即著名的玻耳兹曼积分一微分方程。这个方程式非常复杂，要得到它的精确解是很困难的；但玻耳兹曼却从一个特殊情况中发现，一旦建立起麦克斯韦分布之后，这个分布就不会因为分子的碰撞而破坏，即麦克斯韦分布律所表示的是一种最可几、因而最稳定的分布状态，它满足关系式

$$\frac{\partial f(v,t)}{\partial t}=0$$

玻耳兹曼由此发现了一个与 $f(v,t)$ 有关的特殊函数 H，它被表示为

$$H(t)=\int f(v,t)\cdot \ln f(v,t)\cdot dv$$

玻耳兹曼证明，这个函数永远不能随时间而增大，即

$$\frac{dH}{dt}\leqslant 0$$

在没有达到平衡时，H 函数的值随时间持续下降，即 $\frac{dH}{dt}<0$；在达到由麦克斯韦分布律所表示的平衡态时，H 函数取极小值，即 $\frac{dH}{dt}=0$，这就是著名的H定理。可以看出，这个定理与热力学中的熵增加原理是相当的，都指示出热力学过程由非平衡态向平衡态转化的不可逆性。

H定理从微观分子运动角度表现了自然过程的不可逆性，从而引出了所谓的“可逆性佯谬”，这是开尔文和洛喜密特在1874年和1876年先后提出的。这个佯谬指出，单个分子的运动是服从牛顿力学原理的，因而是完全可逆的；但由大量分子组成的宏观系统的热力学过程，却表现出不可逆性，二者是相互矛盾的。

1877年，玻耳兹曼提出了对这个佯谬的解答。他把熵 S 和系统的热力学状态的几

率 W 联系起来，得出 $S\propto\ln W$；1900 年，普朗克引进了玻耳兹曼常数 k，把这个关系表示为 $S=k\ln W$。通过这个关系，玻耳兹曼就把分子的力学过程和系统的热力学过程统一起来，指出，函数 S 和 H 都是同热力学状态的几率相联系着的；孤立系统自发过程的方向性，正相应于系统从热力学几率较小的状态向热力学几率较大的状态过渡；平衡态是热力学几率最大、亦即 S 取极大值和 H 取极小值的状态。这样，玻耳兹曼就揭示了热力学第二定律的统计本质，指出，熵自发减小或 H 函数自发增加的过程不是绝对不可能的，只是几率非常小而已。

三、吉布斯的系综理论

我们已经讲到，克劳修斯第一次明确地把统计概念引入分子运动论，这种概念的基本精神在他关于气体压强公式的推导中得到了体现。虽然他所运用的是一种非常简化的统计方法，但这一工作却表明，统计概念和方法是把个别分子的无规则运与观测的宏观现象联系起来的桥梁。

麦克斯韦第一次借助几率概念建立了分子运动的速度分布律，从而找到了由微观量求统计平均值的更确切的途径。

玻耳兹曼发展了这一思想，极其深刻地阐明了熵与热力学几率的联系，揭示出统计规律性根植于体系中巨大数目粒子的随机运动。

但是，在统计方法的初期运用中，纯粹力学观点的痕迹还到处可见，在具体推导各种物理量的关系时，对于微粒的结构及它们之间的相互关系还需做出种种假设，其结论也只适用于气体。随着研究的进展，人们逐渐提出适用于各种体系（气态、液态、固态）的一般规律的统计理论的要求。

19 世纪 70 年代，玻耳兹曼和麦克斯韦首先接触到研究宏观平衡性质的这种新的几率统计法的思想，1871 年，玻耳兹曼在《多原子气体分子行为的定律同雅可比的尾乘子原理之间的关系》这篇论文中，对大量粒子系统及其在相中的分布和变化作了考察，首次提出了系综概念。系综统计法的要点是：宏观量是对处在一定的客观条件下的系综的平均；即把整个体系作为统计的个体，而研究体系在相空间中的大量分布。1878 年，麦克斯韦在《论玻耳兹曼的质点系能量均分定理》一文中，也指出不必直接考察由质点组成的系统，而最好把注意力集中于某给定时刻处于某个相的系统的数目。他也接触到了系综概念，但还未找到适当的数学方法以处理某一相中系统随时间变化的问题。

1902 年，美国理论物理学家吉布斯（Josiah Willard Gibbs，1839～1903）出版了《统计力学的基本原理》一书，大大改进和发展了麦克斯韦、玻耳兹曼的统计方法，建立了完整的系综理论，使统计物理学成为一门原则上可以应用于任何物理系统的独立的统计力学学科。

在麦克斯韦和玻耳兹曼的分子运动理论中，不得不对分子结构和分子间的相互作用做出具体的假设，他们的处理方法是先把整体分为各个部分，然后再进行综合。吉布斯却一开始就从整体进行考察，他把一个系统作为系综的一个部分来考察，从而避开了关于系统的内部结构以及关于统计权重的种种困难，并且比麦克斯韦和玻耳兹曼的方法具有了更大的普遍性。

吉布斯同样采用广义坐标 q_i 和广义动量 p_i 描述系统中分子的状态，采用相空间描述系统的状态，考察系统在相中的分布。他导出了相密度守恒原理（又称刘维定理）：

$$\dot{D}+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial D}{\partial p}\dot{p}_i+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial D}{\partial q_i}\dot{q}_i=0$$

这个原理表明，组成系综的体系的点在相空间里的运动，就像不可压缩的流体一样，既不能收缩，也不能扩张，只能改变形状，这是统计力学的基本方程，吉布斯利用这个方程解决了热力学体系的平衡态问题。

吉布斯提出了三种稳定系综：正则系综（与外界有能量交换的系统），微正则系综（能量不变的孤立系统），巨正则系综（与外界有粒子交换的系统）。他通过对这三种系综的研究，提出并发展了统计平均、统计涨落和统计相似三种方法。他运用一套完整的相似理论，按照严密的逻辑程序从力学推出了热力学的全部结论，为温度、熵、自由能等热力学量找到了统计力学中的相似物。依照相似理论，找到自由能的形式，再从自由能对各个参量求导数，便可得到各个热力学量和状态方程、平衡条件等，这就把统计力学与热力学结合起来，成为统计热力学。统计力学在吉布斯这里实现了它的体系化，其他各个结果都被容纳到这个理论体系之中。

把这些统计方法和一般理论应用到各种具体问题上，就可以使各种热学问题获得解决。吉布斯还从微正则系综和正则系综的统计平衡条件，推导出了经典的能量按自由度均分定理以及重力场中质点系密度按高度的分布定律。

四、涨落理论和布朗运动的研究

玻耳兹曼研究了由正则系综所求得的平均值的涨落偏离，导出了计算涨落的普遍公式：

$$\overline{(u-\bar{u})^2}=\overline{u^2}-(\bar{u})^2$$

他进而得出了理想气体能量的相对涨落公式和压强的相对涨落公式。

在吉布斯引进了巨正则系综概念之后，从中发现了新的涨落，即分子数 N_i 的涨落，这种相对的涨落公式为

$$\frac{\overline{(N_i-\bar{N}_i)^2}}{\overline{(N_i)^2}}=\frac{1}{\bar{N}_i}$$

这表明 $\bar{N}_i$ 的涨落是很小的。奥地利物理学家斯莫路霍夫斯基(Marian von Smoluchows-

ki，1872～1917）提出了计算涨落的准热力学方法，并计算出密度涨落公式。

涨落现象在光的散射中很容易被观察的，英国物理学家丁铎尔（John Tyndall，1820～1893)最先观察了光受到悬浮在气体或液体中的杂质的影响而发生的散射现象。但在没有杂质的物体中也存在着散射现象，这就是分子散射。1881 年，瑞利用分子散射解释了天空呈蓝色的原因。他证明在透明物质中，假如没有分子密度的涨落，就不会有分子散射，所以分子散射是一种涨落现象。

19 世纪末叶，奥地利物理学家马赫（Ernst Mach，1838～1916）和德国物理化学家奥斯特瓦尔德分别从实证论和“唯能论”观点出发，对原子-分子理论提出怀疑和批判。而对布朗粒子运动的研究，最终证实了分子和原子的真实性。

1827 年，英国植物学家布朗（Robert Brown，1773～1858）用显微镜观察到水中的花粉或其他微小粒子在不停地做无规则运动。这种运动后来被称作“布朗运动”。在 1828 年出版的《植物花粉的显微观察》一书中，布朗写道：“在经过多次重复的观察以后，我确信这些运动既不是由于液体的流动也不是由于液体的逐渐蒸发所引起的，而是属于粒子本身的运动”。这种永不衰减的运动确实是很神秘的，所以有人曾设想这是一种生物现象。但是布朗用无机物、包括研细的石粉末做试验，同样观察到了这种现象。布朗和当时的科学家们都无法对这种运动提出解释。直到 50 年之后，才有人指出这是由于粒子受到周围水的分子不均衡的冲击造成的。

1905 年，爱因斯坦和斯莫路霍夫斯基发表了他们对布朗运动的理论研究结果。他们证明，布朗粒子的运动是由于液体分子从四面八方对它们的撞击引起的。这种撞击的不规则性和偶然性，使得来自不同方向的作用一般地说并不互相完全抵消；由于布朗粒子非常小（线度约为 10^{-4}厘米），周围分子不均匀碰撞所产生的不平衡力的作用足以使它发生运动。所以，布朗运动与不可见的分子运动是紧密相关的，对布朗运动的精确研究会使人们对物质分子运动有一个更深刻的理解。

在通常的情况下，每个布朗粒子在液体中所受分子的碰撞约 10^{21}次/秒，因此粒子的瞬时运动是无法观测的；人们只能每隔一定时间（如 20 秒、30 秒）记录一次它的位置，这种位移只是一种剩余涨落。如果每次观测相隔的时间为 t，从理论上可以求出布朗粒子在 t 时间内的位移在 X 轴上的投影 x 的方均值：

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

k 为玻耳兹曼常数，T 为绝对温度，η 为液体的黏滞系数，r 为布朗粒子的半径。这是爱因斯坦关于布朗运动理论的一个重要公式。

1908 年，法国物理学家佩兰（Jean Baptiste Perrin，1870～1942）用实验测定了布朗粒子的平均质量和平均半径，并观测了布朗粒子在每隔 30 秒的位移平方的平均值，得出了与爱因斯坦的理论相一致的结果。

对布朗运动进行的理论和实验的研究，完全证实了布朗粒子作为巨分子的热运动，

同时也间接地证实了分子的存在及其永不停息的杂乱运动，这是对原子-分子理论和分子运动论的正确性的有力支持。就在佩兰做出实验证实的这一年，奥斯特瓦尔德宣称："原子论的物质理论，是有实验确证的。"

五、量子统计的建立

1900年普朗克提出的"能量子"概念，修改了能量连续的概念；1925至1926年又建立起研究微观粒子运动的量子力学理论。这就为统计物理学提供了新的力学基础，发展起了量子统计法。这种新的统计方法，以间断性的量子态代替经典物理中连续态的概念；并且由于相同粒子的全同性，相同粒子的交换并不产生新的量子态，于是就产生了与经典统计法完全不同的两种量子统计法，即玻色统计法和费米统计法。

1924年，印度物理学玻色（S. N. Bose）发现了光子所服从的统计法则。爱因斯坦把它推广为自旋是整数的所有微观粒子所遵从的统计法则，即玻色-爱因斯坦统计法。这种统计法的特点是：可以有不止一个的粒子据有同一个量子态。

1924至1925年，奥地利的泡利（W. Pauli，1900～1958）提出不相容原理。1926年，意大利的费米（E. Fermi，1901～1954）和英国的狄拉克（P. A. M. Dirac，1902～1984）各自独立地发现了自旋为半整数的微观粒子所服从的统计法则，即费米-狄拉克统计法。这种统计法的特点是：不能有一个以上的粒子据有同一个量子态。狄拉克还发现了这两种统计法与波函数的对称性的关系：服从玻色统计法的粒子的波函数是对称的，服从费米统计法的粒子的波函数是反对称的。量子统计物理学从此迅速建立起来。

思 考 题

1. 说明能量守恒原理建立的科学渊源。
2. 迈尔、亥姆霍兹和焦耳各自是通过什么途径达到能量守恒原理的？
3. 卡诺是如何得出他的热机理论的？
4. 克劳修斯和W. 汤姆孙是如何提出热力学第二定律的？
5. 克劳修斯是如何得到熵概念和熵增加原理的？
6. 在分子运动论和统计力学的建立中，克劳修斯、麦克斯韦、玻耳兹曼和吉布斯分别做出了哪些重要贡献？
7. 范德瓦尔斯是如何对气体方程做出修正的？
8. 对布朗粒子运动的理论研究有什么重要意义？

第七章　电学与磁学的发展

第一节　静电学与静磁学的建立

一、电学和磁学的早期研究

对电、磁现象进行比较系统的研究，是从文艺复兴时期才开始的。英国科学家 W. 吉伯（William Gilbert，1540～1603）做出了第一批系统的研究工作。1600 年，吉伯系统总结他长期研究的成果，出版了他的巨著《磁石》，这是英国诞生的第一部科学著作。吉伯反对虚妄的臆测，他认为科学应该带来益处，为此就必须把科学建立在实验的基础上。吉伯是把用实验方法探索自然和从理论上解释自然这两者结合起来的典范。

吉伯做了许多揭示电和磁性质的实验。如图 7-1，他用天然磁石磨制成一个大磁石球，用小铁丝制成小磁针放在磁石球上面，结果发现这些小磁针的行为与指南针在地球上的行为完全一样。因此，他设想地球是一块巨大的磁石，许多磁现象和这块大磁石有关。通过实验，他还发现，磁石吸引铁块的力与磁石的大小成正比。为了检验物体是否带电，吉伯制作了第一个实验用验电器（如图 7-2）。他用一根极细的金属棒，中心固定在支座上可以自由转动，当摩擦后的带电体靠近它时，金属棒便被吸引而向带电体方向转动。通过大量细致的实验，吉伯发现不仅摩擦后的琥珀

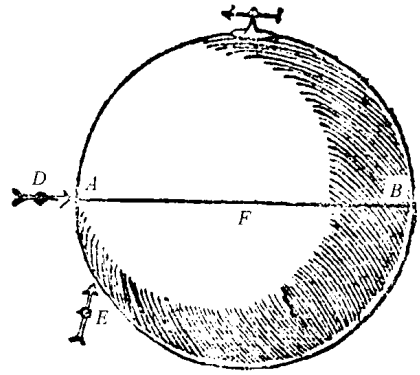


图 7-1　吉伯的磁球实验

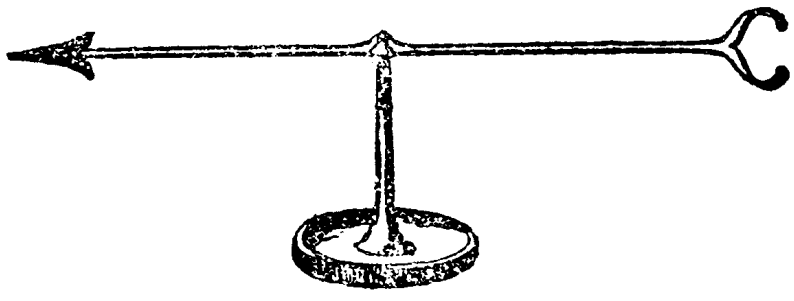


图 7-2　吉伯发明的验电器

有吸引轻小物体的性质，还有一系列其他物体如金刚石、蓝宝石、水晶、硫磺、明矾、树脂等等也有这种性质，他把这种性质称为电性。吉伯把电现象和磁现象进行比较，他认为电和磁是两种截然无关的现象。这个结论对后来的电磁学发展产生了重大的影响。

1660 年左右，德国科学家格里凯（Otto von Güericke，1602～1686）发明了能产生大量电荷的摩擦起电机。它是用带有转动轴的硫磺球放在一个支架上制成的。一手转动硫磺球，一手放在硫磺球上与转动的球发生摩擦，结果人体和硫磺球都带上了电。

1729 年，英国科学家格雷（Stephen Gray，1670～1736）仔细研究了电沿某些物体传播的事实，并引入了导体的概念。他把物质分为两类：一种是非电性物体，然而它是导体；另一类是电性物体，却又是非导体。随后，格雷还发现了导体的静电感应现象。格雷用一根实心的和一根空心的橡木管子，通过实验证明了它们带电后的性能是一样的，从而做出了在电的现象中只有带电体的表面起作用的结论。

1733 年，法国科学家杜菲（Charles Francois Du Fay，1698～1739）发现绝缘的金属也可以通过摩擦的办法起电，他认为所有的物体都可以摩擦起电。他甚至用自己的身体，即所谓“非电的”物体，作带电实验。通过实验，杜菲区分出两种电荷，并且发现同种电互相排斥，而异种电互相吸引。



图 7-3　莱顿实验

德国物理学家克莱斯特（Ewald Georg von Kleist，1700 以后～1748）和荷兰物理家穆欣布罗克（Pieter wan Musschenbrock，1692～1761）于 1745、1746 年几乎同时发明了莱顿瓶。克莱斯特有一次用传导方法使装在玻璃瓶内的铁钉带电，当他一手拿着玻璃瓶，另一只手接触到铁钉时，他感到臂膀和手臂受到一下猛击。穆欣布罗克试图用起电机使装在玻璃瓶内的水带电，在实验中他感受到了莱顿瓶放电产生的强烈电击（如图 7-3）。穆欣布罗克得出结论：把带电体放在玻璃瓶内可以把电保存起来。莱顿瓶的发明为静电研究提供了一种储存电的有效方法，为进一步深入研究提供了一种新的强有力的实验手段，对电学知识的传播和应用起到了重要作用。

1746 年，在美国费城的富兰克林（Benjamin Franklin，1706～1790）通过一位英国朋友得到了莱顿瓶等电学实验仪器，开始了他近 10 年的电学研究。富兰克林利用从雷云中收集的电荷给莱顿瓶充电而得到电火花，从而证明了闪电是一种电现象，证明天电和地电的一致。富兰克林还发现了电荷守恒定律，使电学的研究开始从单纯的现象观察迈进到精密的定量描写。1747 年富兰克林进行了这样的实验：他让 A 和 B 二人分别站在绝缘的箱子上，A 用手摩擦 B 拿着的玻璃管，结果两人分别带电，都能在碰到站在地上的第三人 C 时引起火花。但是，如果 A 和 B 在相互接触的情况下摩擦玻璃管，则两人都不会带电。此外，如

果以上带了电的 A 和 B 两人互相接触，那就会产生比 AC 和 BC 接触时更强的火花，而且，在 AB 放电之后，两人又都恢复了不带电的状态。1750 年，富兰克林正式发表这一结果。为了解释这种现象，他提出了“单流质”假说，设想存在一种没有重量的电流质，弥漫于整个空间并渗透到各种物体之中。当物体内部的电流质的密度同外面相同时，物体就显示电中性；在起电过程中，一定量的电流质由一个物体转移到另一个物体中，电流质密度大于外部的物体就带正电，用“＋”号表示；电流质密度小于外部的物体则带负电，用“－”号表示。“电荷”、“正电”和“负电”的术语，就是由富兰克林创造的，这使人们有可能开始用数学方法来表示和研究带电现象。富兰克林还认为“电不因摩擦玻璃管而创生，而只是从摩擦者转移到了玻璃管，摩擦者失去的电与玻璃管获得的电严格相同”。这就是著名的电荷守恒原理。它指出，在任一封闭系统中，电流质的总量是不变的，它只能被重新分配而不能被创生。

二、库仑定律的建立

定量的“电荷”概念的提出，自然引发了这样一个问题：电荷之间的作用力，满足什么样的规律？

1755 年，富兰克林曾做过一个有趣的实验。他让一个空银桶带上电，然后用丝线把一个小软木球吊放到银桶的里面，发现软木球并没有受到金属桶电性的任何影响；而且，当使软木球接触过桶内壁再取出来以后，发现它一点也没有带电。富兰克林由此认识到，电荷只分布在导体的表面，而在导体内部是没有静电效应的。1766 年，富兰克林把有关的发现写信告诉他的朋友，英国化学家和电学家普列斯特利（J. Priestley，1733～1804），并且请他重复验证和作出解释。普列斯特利在 1766 年底进行实验证明了富兰克林的结果之后，马上由此得出正确的推论。他在 1767 年出版的《电的历史和现状》一书里写道：“我们可不可以由这一实验推断出，电的吸引遵从与万有引力相同的定律，即按距离的平方而变化；因为容易证明，如若地球是一层球壳的形状，则在它里面的一物体所受到一侧的吸引力不会大于另一侧。”虽然，在此之前亦有人从同万有引力的比拟中猜测过电力也满足反平方律，而且有文献表明，德国的埃皮努斯（F. U. T. Aepinus，1724～1802）和瑞士的 D. 伯努利（D. Bernoulli，1700～1782）先后在 1759 年和 1760 年都曾经有过类似的想法；但是，真正从实验结果出发进行科学论证而提出电力反平方律的，确实以普列斯特利为第一人。不过，他也没有对电的斥力做出猜测。

1769 年，英国爱丁堡大学的 J. 罗宾森（John Robison，1739～1805）用直接的实验推测了反平方关系，他确定了同种电荷的斥力反比于电荷间距的 2.06 次幂；异种电荷的吸引力反比于电荷间距的小于 2 次幂，由此他推测到正确的关系应反比于距离的 2 次幂。不过，他的这项工作直到 1801 年发表之后才为人所知。

静电力的平方反比关系，是经过法国军事工程师库仑（C. A. Coulomb，1736～1806）的实验测定，才得以流传于世的。在库仑之前，1750 年，剑桥大学的米切尔（J. Michell，1724～1793）出版了《人造磁体论》一书，在书中他记述到，把一块磁铁用线悬起，再用另一块磁铁推斥它，从线的扭转程度他测定了磁极间的斥力的大小遵从平方反比关系。库仑重新发现了米切尔的扭秤方法。他通过法国科学院悬赏课题——“船舶用罗盘的最佳结构”的研究，开始注意到材料的强度，特别是抗扭转力的问题。他利用长短粗细不同的金属丝做实验，总结出了扭转公式，发现扭转力同扭转角成正比。正是由于有关扭转力的论文使他于 1781 年当选为法国科学院院士。

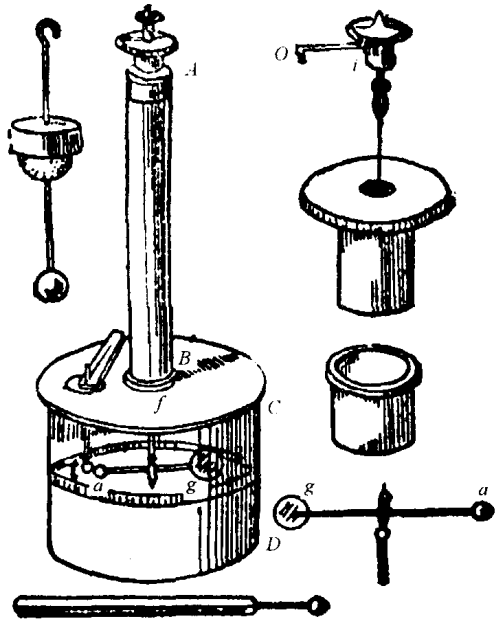


图 7-4　库仑扭秤

1785 年至 1789 年间，库仑在法国皇家科学院备忘录中，发表了四篇关于电学研究的论文。前三篇论文论述了他用两个实验得出的电力作用的平方反比定律。其中一个实验就是人们熟悉的库仑扭秤实验。1785 年，库仑利用自己的有关扭转力方面的知识，设计制作了一台精密的扭秤，进行了测定电力作用的实验。如图 7-4，他在一个直径和高均为 12 英寸的玻璃圆缸上端安一银质悬丝，悬丝下挂一横杆，杆的一端为木质小球，另一端贴一小纸片，作配平用。圆缸上有 360 个刻度，悬丝自由放松时，横杆上的小木球指到 0。他先使另一个相同小球带电，然后使它与杆端小球相接触后分开，以便两小球均带同种等量的电荷，互相排斥。当达到平衡时，在这一位置上扭力的大小与电排斥力是相等的。库仑分别使小球相距 36 个刻度、18 个刻度和 8.5 个刻度，大体上按缩短一半的比例来观测，结果悬丝分别扭转了 36 个刻度、144 个刻度和 575.5 个刻度。这表明间距为 1∶1/2∶1/4，而转角为 1∶4∶16。最后一个数据由于漏电的缘故而有些偏差。从这样的实验中，库仑得出了“带同类电的两球之间的排斥力，与两球中心之间距离的平方成反比”的结论。

在接着的第二篇论文里，库仑研究了两个异类电荷之间的吸引力。在这种情况下，扭秤方法遇到了麻烦。因为，当活动电荷在扭力为零的位置同固定电荷的位置之间运动时，扭力随与一侧的距离线性变化，而电吸引则随与另一侧的距离的反平方关系变化，两者之间即使能够达到平衡，也是一种不稳定的平衡。库仑写道，即使能达到平衡，最后“两球也往往会相碰，这是因为扭秤十分灵活，多少会出现左右摇摆的缘故。”然而，尽管如此，库仑声称他还是首先使用了扭力同电吸引力平衡的方法进行了测量，

并说他由此得到了电吸引力亦满足反平方律的结论。

从这篇文章看来，库仑首先使用扭秤法测量的电吸引力随距离的变化，结果必定相当粗糙，因此，要想出第二种测量方法来补救。这种“与原先绝对不同的方法”完全用不着扭秤，它测量的是在带电的摆球受到外界异类电荷吸引力的情况下，两个电荷之间的距离同摆动周期之间的关系，这就是著名的“电摆实验”，这个实验是在牛顿万有引力定律的启示下提出的。库仑意识到，在地球对物体的作用力遵从平方反比规律的前提下，必然存在地面上的单摆的摆动周期正比于摆锤离地心的距离，即 $T \propto r$ 的结果。这是因为单摆的周期 $T=2\pi\sqrt{\dfrac{L}{g}}$，若重力即万有引力，则存在

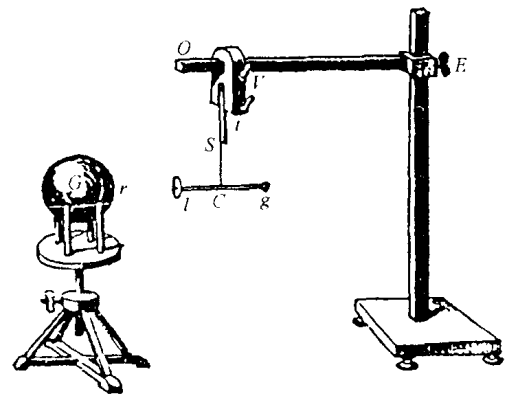


图 7-5　库仑的电摆实验

$$mg \approx G\frac{mM}{r^2}$$

把后式代入前式，得

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{GL}{M}} \cdot r$$

库仑把电的吸引力同地球对物体的吸引力进行类比，设计了他的电摆实验。为了消除重力的影响，库仑的实验是用一端带有电荷的一根平衡悬置的杆来做的，研究的是水平面上的小摆动。实验的装置如图 7-5 所示：G 为绝缘金属球，lg 为虫胶制成的小针，悬接在 7～8 英寸长的蚕丝 SC 的下端，l 端放一镀金小圆纸片。G、l 间的距离可调。实验时，使 G 和 l 带异号电荷，小针则由于受到异号电荷的引力而摆动。测量出 G、l 在不同距离时，小针摆动同样次数的时间，从而计算出每次的振动周期。

库仑记录了三次实验。在这三次实验中，纸片与球心距离之比为 3∶6∶8，三次的振动周期之比为 20∶41∶60。如果电引力符合平方反比定律，当距离之比为 3∶6∶8 时，电摆的振动周期应为 20∶40∶53，因此，实验测定和理论计算之间存在差异。库仑对实验结果进行了分析，认为漏电是产生误差的主要原因。他发现，在最佳的情况下，实验过程中，每分钟因漏电损失总电量的 1/40，而整个实验需时 4 分钟。经过对漏电原因的修正，实验值和理论计算值基本符合。于是他得出结论：“正电与负电的相互吸引力，也是与距离的平方成反比的”。可见，关于异类电荷吸引力的平方反比定律的确凿实验证据，最早并不是来自扭秤实验，而是来自库仑的电摆实验；而像富兰克林或者普列斯特利做过的那一类实验，则只适用于同类电荷之间的排斥力。

在同篇论文里，库仑还分别通过扭秤法和摆动法来测定磁力，也得出了同距离平方成反比的规律。值得注意的是，在用摆动法测量磁力时，库仑是在扣除了与不加外磁力的自由振动相对应的地磁本底之后，再对数据进行分析的。这种处理方法本来也可以用于有地球重力参加的电吸引力或者电排斥力所引起的摆动，只要照样把重力本底的效应扣除就可以了。所以，库仑本来也是可以用他的摆动法发现电排斥力的平方反比定律的。

库仑还根据对称性利用相同的金属球互相接触的方法，巧妙地获得了各种大小的电荷，得出了电荷间的作用力与它们所带电量的乘积成正比的关系，从而完整地得出

$$f = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

这就是现在所说电相互作用力的库仑定律。实际上，在库仑的时代，人们还没有掌握规定电量大小的方法。半个世纪之后高斯（C. F. Gauss，1777～1855）于1839年左右最早提出，应当由库仑定律本身来定义电荷的量度，即两个距离为单位长度的相等电荷之间的作用等于单位（或指定数值的）力时，它们都具有单位电量。

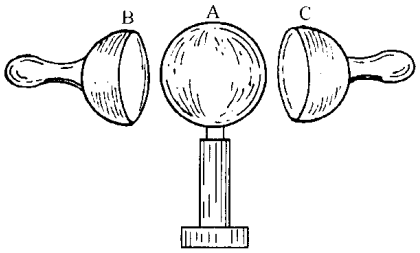


图 7-6　检验导体上电荷分布的实验

在第四篇论文中，库仑对导体上电荷的分布进行了研究。他做过一个如图7-6所示的经典实验，A是一个绝缘的金属球，B、C是装有绝缘把的二金属半球壳。先把A、B、C套在一起（接触），然后使整个系统带电，再把B、C移开，发现此时A球不带电，而B、C外表面带电。如果开始时使A球带电，然后把B、C套在A上（接触），再移开B、C，发现同样A不带电，B、C外表面带电。这个实验表明电荷有分布在导体表面的特性。实际上这是电力遵从平方反比定律的必然结果，而当时库仑并没有明确指出它们之间的关系。

特别应该提出的是，早于库仑的工作十几年，英国物理学家卡文迪什（H. Cavendish，1731～1810）已经研究了电荷在导体上的分布问题。1771年，他在向皇家学会提交的论文《用一种感性流体来解释电学基本现象的尝试》里，已由电荷只分布在带电体表面的事实，推测出电吸引力或排斥力"很可能反比于电荷间距离的平方"。他的论证和几年前普列斯特利的基本相同，但却更为严谨详细。

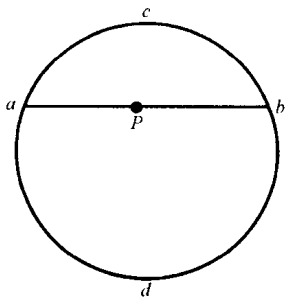


图 7-7　卡文迪什的论证

如图7-7所示，卡文迪什的论证思路是这样的：设想有一带电导体球面 *abcd*，用 *ab* 平面把它分为两半 *acb* 和 *adb*，*P* 点的电荷既受上半球电荷的作用，也受下半球电荷的作用。虽然 *acb* 部分的电荷比 *adb* 部分的电荷少，但是上部分离 *P* 点的距离比下部分要近些。如果元电荷的作用力正比于 r^{-2}，

则上半球对 P 点的作用将准确地补偿下半球对它的作用，所以 P 点的电荷没有移动，在静电平衡时，P 点不带电。如果电力作用正比于 r^{-n}，而且 $n\neq 2$，就会出现另外的情况。如果 $n<2$，则下半球的作用将大于上半球的作用，正电荷要从 P 点流向上半球，使 P 点带负电；如果 $n>2$，P 点将有负电荷流向上半球，使 P 点带正电。因此当研究了球内 P 点的电状态后，就能确定公式 $f(r)=\frac{k}{r^n}$ 中的 n 值。

卡文迪什的实验和库仑晚些时候的实验稍有不同，其装置如图 7-8 所示：两个同心球壳固定在支架上，外球壳由两个可以开合的半球壳组成。当外球壳合上时，可以通过其上的小孔用导线连接二球壳。使整个系统带电后，取走导线，移开外壳，用木髓球作为验电器，检查内外壳带电的情况，发现内球不带电。根据这一实验，卡文迪什得出 $n=2\pm\frac{1}{50}$，即指数偏差不超过 0.02。

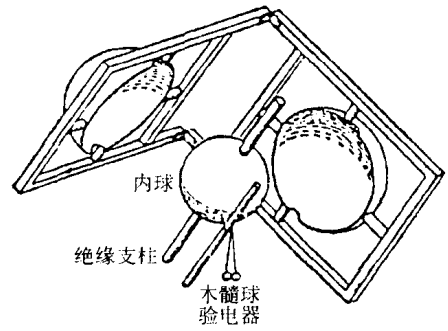


图 7-8　卡文迪什的实验装置

卡文迪什是一位贵族，他很富有，也很聪慧，被称为“最富有的学者，最有学问的富翁。”但他对财富和荣誉都看得很轻，他进行科学研究的目的好像主要是为了满足个人的求知欲，绝大部分研究成果都没有发表。直到 19 世纪中叶，开尔文勋爵才在他的遗稿中发现了一些极有价值的资料，诸如平方反比关系，电势，电容，用导线连接起来的圆盘和半径相同的圆球所带电荷的正确比值等。在这些方面卡文迪什都进行过富有成果的先驱性研究。1879 年，麦克斯韦整理出版了题为《尊敬的亨利·卡文迪什的电学研究》的书，才把卡文迪什的工作公布于世。麦克斯韦在书中说：“这些论文证明，卡文迪什几乎预料到了电学上所有的重大事实，这些重大事实后来通过库仑和法国哲学家们的著作而闻名于科学界。”不过卡文迪什的工作由于未能及时发表，对于电学研究的历史发展没有起到实际的作用。

关于静电力的平方反比定律的实验验证工作，一直以不断提高的灵敏度继续进行着；而所使用的原理，基本上仍然是当初卡文迪什所做的对封闭导体腔的屏蔽效应的检验。1971 年测量出的电力负幂次指数同 2 的差值约小于 3×10^{-16}。

为什么这一检验工作如此受到重视呢？这是因为平方反比力是三维空间里最简单的力，它遵从的是最简单的方程。与此同时，传递反平方电磁力的场量子——光子是无静止质量的。如果电力的负幂指数不是刚好等于 2，电屏蔽就不会是完全的，光子静质量也不再等于零。这样一来，整部电磁学包括电动力学都要重写。应当庆幸的是，到目前为止所进行的实验检验都表明，电磁力和万有引力这两种仅有的长程力都满足平方反比定律，不需要我们去研究太复杂的宏观力场。

库仑定律是电磁学中的一个基本定律，它的建立使电磁学进入了定量的研究，从而使电磁学真正成为一门科学，为继续发展电动力学奠定了基础。从 18 世纪末到 19 世纪初这一段时期，由于数学的应用，有关静电学和静磁学的分析理论取得了十分有意

义的进展。所谓静电学和静磁学的分析理论，就是借助引力理论所建立起来的势函数的理论来表述静电学和静磁学的数学方法。我们知道，通过欧拉、拉格朗日和拉普拉斯等人的工作，位函数 v 已被证明满足下述微分方程：

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}=0$$

法国数学家泊松（Simeon D. Poisson，1781～1840）于 1813 年用数学方法严格证明了处于静电平衡的导体内部的任何带电粒子所受的力为零，否则导体内部就会有电荷的流动。他卓有见解地指出，由于万有引力定律和库仑定律都遵从平方反比关系，所以万有引力的数学分析方法也可以用来分析静电现象。因此泊松认为在静电学中同样可以找出与万有引力情况相似的函数 v 来解静电学问题，并证明在静电学中的拉普拉斯方程为

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}=4\pi\rho$$

其中 ρ 为电荷的密度。1828 年英国数学家格林（George Green，1793～1841）提出了“势”的概念，认为泊松所说的函数 v 就是势函数。格林还提出了格林定理，推出了静电学的不少重要结果，如关于静电屏蔽现象，他写道：“若有一中空的导体壳，在壳外及壳内各放一些带电体，壳的内表面及壳内的导体组成内部体系，壳的外表面与壳外导体组成外部体系，那么，内表面就如同一个与地球接触的理想导体，内部体系的有关吸引、排斥、密度等有关电现象与外部体系不存在时一样；外表面就相当于一个带有原来导体壳上全部电量和腔内带电体全部电量之和的理想导体，外部体系的电行为与内部体系不存在时完全一样。”静电势理论的进一步发展，是由德国数学家高斯作出的。他首先注意到库仑定律不能用任意的尺度和测量的方法获得，不然将在等式中出现一堆复杂的数值和单位的转换因子。基于这种考虑，他第一次为电量确定了一个单位（如前所述），并进而创建了第一个合理的电磁单位制。1839 年，高斯还得出了电通量的高斯定理，即

$$\oiint E\cdot dS=\frac{I}{\varepsilon_0}\sum q$$

对静电学现象所进行的这一系列数学研究，使静电学有了系统的数学理论，开拓了一条通向理论电学的道路。

第二节　电磁联系的发现

一、电流的发现

18 世纪末，意大利解剖学家伽伐尼（A. Galvani，1737～1798）关于电流的发现，把电学的研究工作从静电推进到动电的领域，奏响了电磁学辉煌发展的序曲。

伽伐尼在做出这一重大贡献之前，致力于研究动物神经对刺激的感受。在1791年发表的《论肌肉运动中的电力》一文中，他叙述了10年前的发现。他写道："在1780年的一天，我解剖了一只青蛙，并把它放在桌上，在不远的地方有一架起电机，当我的一个助手用一把解剖刀触及青蛙内侧的神经时，青蛙的四肢立即剧烈地痉挛起来"。"帮助我做电学实验的另一个人回忆说，他注意到这时在起电机上发生了一个火花，我自己当时正在从事另一件工作。但当他使我注意到这一现象时，我很愿意自己试一试，以发现其中的道理，于是我也在别人引出一个火花的同时，用刀尖去触动这一条或那一条神经，并且跟以前完全一样，同一现象又重现。"①

经过多次的实验之后，伽伐尼基本上弄清楚了用绝缘体或单一导体的刺激并不能引起肌肉的收缩；只当使用两种连接起来的金属导体的两端分别与肌肉和神经接触时，才会引起青蛙四肢的痉挛。与莱顿瓶通过导体放电相类似，伽伐尼设想这是由神经传到肌肉的一种特殊电流体所引起的，金属起着传导的作用。伽伐尼把这种来自青蛙身上的电流体称为"动物电"。

伽伐尼的发现引起了意大利物理学家伏打（A. Volta，1745～1827）的极大兴趣。1792年春天，他成功地重复了这一实验，并且用锡和银接触舌的不同部位，使它构成一个回路，产生了酸味的感觉。在随后发表的论文中，伏打逐渐远离了生物电理论，转向了效应的物理解释。他认为，关键在于两种不同金属的连接。只要将相连接的两种金属浸在液体或潮湿的物质中，就会出现电的效应。他通过实验决定了一个金属接触的序列：锌、锡、铅、铁、铜、银、金等，当任选两种金属接触时，在这序列前面的金属总呈负电性，后面的则呈正电性。在1795年和1796年写给朋友的信中，伏打把金属称为第一类导体即干导体，把潮湿物体称为第二类导体；指出必须有这两类导体同时参加，才能使电流体发生运动。

1800年春，伏打在递送给英国皇家学会的信件中，公布了他所发明的"电堆"。伏打在一块锌片和一块铜片之间，夹上浸透了盐水或碱水的厚纸板、布片或皮革等潮湿物质的夹层，再把几十个这样的单元叠置起来，或者再将几个这样的"堆"连接起来，便可以在其两端引出强大的电流，甚至可以引起像莱顿瓶放电时所感到的电击。此外，伏打还尝试用许多个非金属杯，里边插上锌棒和铜棒，并且浸着盐水或碱液，再把它们串接起来，也能得到与电堆相同的效果。伏打的电堆能够提供莱顿瓶无法给出的持续而强大的电流，把电学的研究引入动电的途径。

二、电流的磁效应的发现

吉伯在正确地区分了电力和磁力的同时，把它们视作截然无关的两种现象。在这个论断的影响下，200多年的时间里，电和磁的分立性一直成为物理学家们的一个普遍

① 转引自 A. Whittaker, History of the Theories of Aether and Electricity, pp. 67～68.

认识。例如，库仑虽然确立了电力和磁力的平方反比定律，但他却从电荷可以从一个物体传到另一个物体，而磁荷似乎永远固着于磁极上的现象断言，电流体和磁流体是两种完全不同的实体，它们不可能相互转化。法国物理学家安培（A. M. Ampère，1775～1836）在1802年宣称，他愿意去“证明电和磁是相互独立的两种不同的实体”；托马斯·杨也在1807年的《自然哲学讲义》中写道：“没有任何理由去设想电与磁之间存在任何直接的联系”。直到1819年，实验物理学家毕奥（J. B. Biot，1774～1862）还坚持说磁作用和电作用之间的独立性“不允许我们设想磁与电具有相同的本质”。

但是实际上，电和磁之间相互联系的现象早就引起了人们的注视。1735年，在一份科学刊物上就记载了雷电使刀、叉、钢针磁化的现象；1751年，富兰克林也发现了用莱顿瓶放电的方法可以使钢针磁化或退磁。当时关于闪电改变钢铁物件磁性的报道时有所见，这不能不引起人们的思考。1774年，巴伐利亚电学研究院提出一个有奖征文题目：“电力和磁力是否存在着实际的和物理的相似性？”磁力和电力都遵从平方反比关系的发现和伏打电堆的发明，进一步刺激了上述关系的探索。

1802年，意大利的罗迈诺西（G. D. Romagnosi，1761～1835）企图用实验找出伏打电堆对磁针的影响，但由于设想的只是电堆的二极与磁体的二极之间的类似性以及电堆与磁体之间的静力作用，所以并没有意识到他所观察到的现象正是电流的磁效应。1805年，德国的哈切特（J. N. P. Hachetle，1769～1834）和笛索米斯（C. B. Desormes，1777～1862）用一根绝缘绳将伏打电堆悬挂起来，企图观察它在地磁作用下的取向，没有得出实验结果。英国科学家戴维（H. Davy，1778～1829）在这一时期也观察到磁铁能够吸引或排斥电极炭棒之间的弧光，并使弧光平动地旋转。这些早期实验虽然都未能得出重要的成果，但却摸索到了一个正确的研究方向。

1820年，丹麦物理学家奥斯特（H. C. Oersted，1777～1851）关于电流磁效应的发现，使电磁学的研究进入到一个迅速发展的时期。

早在大学时期，奥斯特就受到了康德批判哲学的深刻影响。在1799年的博士论文《论外部自然的基本的形而上范畴》中，就阐述了康德哲学思想对科学的指导作用。1801年到1803年他在旅游德国和法国时，又深入地研究了德国的自然哲学，并结识了坚信化学现象、电流和磁之间有相互联系的德国青年化学家里特（J. W. Ritter，1776～1810），还参加过里特为寻找这种联系而进行的一些实验。康德关于“基本力”可以转化为其他各种具体形式的力的观点，以及里特的实验探索，都影响了奥斯特早就形成了自然界各种现象相互联系的观点，并激励他去探索电与磁的联系。1803年奥斯特说过：“我们的物理学将不再是关于运动、热、空气、光、电、磁以及我们所知道的任何其他现象的零散的罗列，我们将把整个宇宙容纳在一个体系中。”[①] 在伏打电池发明的

① R. C. Stauffer, Isis, Vol. 48 (1957), p. 33.

推动下，奥斯特开始了电化学的研究，1812 年他发表了《关于化学力和电力的同一性的研究》，总结了他关于电、伽伐尼电流、磁、光、热及化学亲和力的研究成果，表明他已经将自然力的统一的思想运用到物理学和化学的研究中去了。他从电流流经直径较小的导线时导线会生热的现象推测，如果通电导线的直径再小一些，就有可能发出光来；当导线的直径进一步缩小到一定程度时，电流或许就会产生磁效应，这就是他关于电流纵向磁效应的设想。他指出："我们应该检验电是否以其最隐蔽的方式对磁体有所影响"。寻找这两大自然力的联系的思想，一直萦绕在他的脑际。

由于教学任务繁重，特别是由于错误地设想电流的磁效应是纵向的，所以他的猜想一直未能实现。1819 年冬到 1820 年春，他在为一批已具有相当的物理学基础的学者们讲授关于电学、伽伐尼电流和磁学的课程时，才有充分的时间来深入考虑电和磁的联系，并使他原来的"对电和磁力的同一性的信念越发澄清起来"。他从许多人沿着电流的方向寻找磁效应都未获成功的事实中受到启示，抛弃了 1812 年的设想，猜测到如果电流能够产生磁效应的话，这种效应很可能像电流通过导线时产生的热和光那样向四周散射，是一种侧（横）向作用，所以应当把磁针放在载流导线的上下左右来观察。

1820 年 4 月，奥斯特安排了这样一个实验：用一个小的伽伐尼电池，让电流通过直径很小的铂丝，铂丝下放置一个封闭在罩中的小磁针，这个实验由于一个意外事故未能在课前进行。而在当晚的课堂上，他突然感到实验有很大成功的把握，于是就把导线与磁针都沿磁子午线方向平行放置，毫不犹豫地接通了电源，果然小磁针向垂直于导线的方向偏转过去。这个现象虽然没有给听众留下什么深刻的印象，但却使奥斯特激动万分，伟大的发现就这样得到了。通过 3 个月 60 多个实验的深入研究，终于在 1820 年 7 月 21 日以《关于磁体周围电冲突的实验》为题，发表了他极为简短的实验报告，叙述了他在友人参与下所作的实验的结果。报告上记载："在自由悬挂着的磁针上方，由北向南流动的伽伐尼电，把磁针的北端推向东，而在相同的方向上，在磁针下面流过的伽伐尼电，把磁针的北端推向西"。

奥斯特在实验中发现，使用不同种类的金属导体，如铂、金、银、黄铜、铁、铅丝、锡或水银，通电后都能使磁针偏转，只有程度上的差别；将玻璃、金属、木头、水、树脂、陶器、琥珀和石块等非磁性物质置于导线和磁针之间，效应不受影响。奥斯特把导体中及其周围空间发生的这种效应称为"电冲突"（electric conflict）得出结论说："电冲突只能对磁性粒子起作用。所有非磁性体看来都能让这种电冲突通过，但磁性物质或磁性粒子则阻抗这种电冲突通过，因而它们就为冲突所产生的冲力带动而发生运动。"[①] 奥斯特特别指出，"电冲突不是封闭在导体里面的，而是同时扩散到周围空间"。观察还表明，"这种冲突呈现为圆形，否则就不可能解释这种情形：当连接的导线的一段放在磁极的下面时，磁极被推向东方；而当置于磁极上面时，它则被推向西方。其

① 威·弗·马吉编，《物理学原著选读》，商务印书馆，1986 年，第 460 页。

原因是，只有圆才具有这样的性质，其相反部分的运动具有相反的方向。此外，沿着导线长度方向连续前进的圆形运动必然形成蜗线或螺旋线。”

奥斯特的发现与牛顿力学的基本原理是尖锐矛盾的。因为在牛顿力学里，自然界的力只能是作用于物体连线上的吸引或排斥，即直接推拉性质的“中心力”，而奥斯特所发现的却是一种“旋转力”。他所说的“螺旋线”，实际上就是关于磁的横向效应或电流所引起的涡流磁场的直观描述。他关于这种效应扩散到很大空间范围的看法，正是后来发展起来的“场”思想的开端。电流磁效应的发现，也打破了电与磁的无关性的传统信条，猛然打开了电磁联系这个科学中长期被闭锁着的黑暗领域的大门，为物理学的一个新的重大综合的实现，开辟出一条广阔的道路。

三、奥斯特发现的连锁反应

奥斯特的新发现的消息首先传到德国和瑞士，被邀赴日内瓦访问的阿拉果（D. F. J. Arago，1786～1853）立即携带这一新闻返回法国，在1820年9月4日法国科学院的例会上宣读了奥斯特的论文，9月11日又作了实验演示，使一直囿于库仑关于电与磁毫无联系观点的法国物理学家们大为震惊。安培、阿拉果、毕奥、萨伐尔（F. Savart，1791～1841）等人都对此做出了最迅速的反应，全力以赴地投入了这一课题的研究。

在9月18日、9月25日和10月9日的例会上，安培接连报告了他的重要实验发现，为磁性的本质是电的运动提供了确实的证据。

在9月18日安培向法国科学院提出的第一篇论文中，他提出了著名的确定磁针偏转方向的右手定则；还提出了地球的磁性是由从东向西绕地球作圆周运动的电流所引起的这一思想。根据这一看法，磁铁类似于有电流流通的线圈。他在用实验证明了这种线圈对磁铁有作用之后，进而又考察了线圈之间的相互作用。在发现圆电流的相互作用后，安培转而研究线电流的相互作用。

9月25日，安培向法国科学院提交了第二篇论文，阐述了二平行载流导线之间的相互作用，指出电流方向相同时相互吸引，电流方向相反时互相排斥。他把这一现象称为“电动力学现象”。

在10月份提交的报告中，安培总结出电流之间的吸引和排斥作用与静电作用有以下的区别：像在电解过程中一样，当导电回路被断开时，这种作用就停止；在静电情况下，同名电相斥，异名电相吸，但是对于电流之间的作用来说恰好相反；当吸引作用够强以致使二导体互相接触，它们依然互相吸引，而不像带有异名电荷的二导体那样在接触后又彼此分开；两个电流在真空中的相互吸引和排斥作用跟在空气中相同。

为了把一切磁的现象都归结为电流间的相互作用，安培提出了著名的分子电流假说。既然螺线管的表现就像一根磁棒那样，安培就设想磁铁表面存在一层电流的环流。他的朋友菲涅耳提醒说，磁铁是非良导体，宏观电流将使磁铁发热，而且使电流很快

消耗殆尽。接受了菲涅耳的建议，安培改而假设在磁性物质内存在无数微小的“分子电流”，它们永不衰竭地沿着闭合的路径流动，从而形成一个个小磁体，以此作为物体宏观磁性的内在根据。安培把这些电流当作基本的实体，从而否定了独立的“磁流体”存在的必要性。

安培的分子电流假说虽然有深远的意义，却是同当时的物理学原理相违背的。不仅宏观的电流会受电阻消耗；而且电荷的圆周运动会通过辐射而损失能量，因而不可能靠它来提供永恒的分子电流。到20世纪初，才明确认识到安培的分子电流无法容纳在经典物理学的框架之内，只有在量子理论的基础上才能得到解释。所以，安培的分子电流是一种超越了他的时代的假说。

这样，安培就把电磁学分为“静电学”和“电动力学”两部分，而把磁学视为电动力学的一个分支，把磁相互作用归结为圆电流的相互作用。此外，安培还提出了“电压”（电动力）和“电流”的概念，并且指出所谓“电流的方向”，都是指正电而言的。

同安培一起进行研究的阿拉果发现，载流导线能吸引铁屑，钢针通过电流则被磁化。在安培的建议下，他做了用通电螺旋管使其中的钢针磁化的实验。

在10月30日的会议上，毕奥和萨伐尔报告了他们发现的直线电流对磁针作用的定律，这个作用正比于电流的强度，反比于它们之间的距离，作用力的方向则垂直于磁针到导线的连线。拉普拉斯假设了电流的作用可以看作为各个电流元单独作用的总和，于是把这个定律表示为微分形式。

在英国，当时的皇家学会会长沃拉斯顿（W. H. Wollaston，1766～1828）在获知奥斯特的发现之后，提出了“电磁转动”的设想，认为通电螺旋管会使附近的导线绕它的轴旋转，他的实验没有成功。从1821年才开始进行电磁学研究的法拉第（M. Faraday，1791～1867）为奥斯特的发现所吸引，决心深入挖掘电磁效应的新的内容。在得知沃拉斯顿的实验之后，他想起奥斯特的“电冲突”是在载流导线周围呈圆形分布的，就决定使磁铁和导线隔开一段距离，互相绕着运动试试看。1821年9月，法拉第在一个盛着水银的容器中间铅直地固定着一根磁棒，在它上方悬起一根硬导线，导线斜着浸入水银液内，然后将导线接通电流，结果发现导线下端绕着磁棒缓慢地作圆周运动。在这个装置的另一侧，法拉第又在盛水银的容器中间固定一根载流导线，而在水银液内倾斜地系着一根磁棒，也观察到磁棒绕中心导体的转动。实际上，这些就是最早的旋转电动机的雏型。1822年，英国物理学家巴罗（P. Barlow，1776～1862）运用相同的原理制成了著名的“巴罗轮”。这是架在水平轴上的一个铅直的活动铜盘，下方浸入一个水银槽，一侧夹在一块

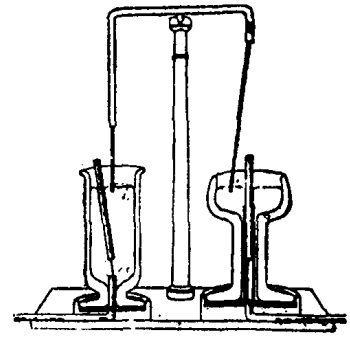


图7-9　法拉第的电磁转动实验装置

马蹄形磁铁中间。当通过轴心和水银槽供给电流的时候，铜盘就会转动起来。这就更像是一台直流电动机了。

四、欧姆定律的建立

德国物理学家欧姆（Georg Simon Ohm，1789～1854）在研究导线中电流所遵从的规律时，发现了后来以他的名字命名的重要定律。

欧姆出生在德国埃尔兰根一个锁匠家庭，1805 年进入埃尔兰根大学学习，1811 年获得博士学位。欧姆先后在多所中学、军事学校教书，他是一位优秀的教师。欧姆在科学上很有抱负，在困难中始终坚持科学研究工作，在电学、声学和光学上都有建树。

欧姆 1817 年开始电学研究，欧姆从傅里叶建立的热传导理论受到很大启发。傅里叶假设导热杆中两点之间的热流的大小与这两点的温度差成正比，然后用数学方法建立了热传导定律。欧姆认为电流现象和热流现象相类似，他猜想导线中两点之间电流的大小也可能正比于这两点之间的某种驱动力，他把它称为“验电力”（electroscopic force），即今天所说的电势差。欧姆做出很大努力对这个设想进行验证。起初他使用伏打电堆作为电源进行实验，由于电流不稳定，未能得到理想结果。

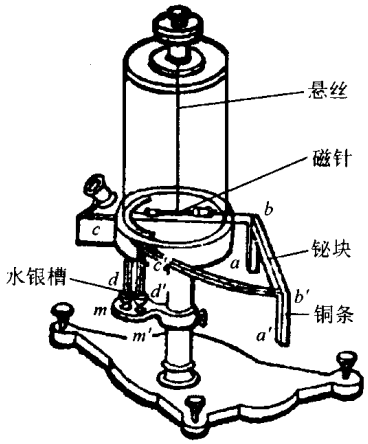


图 7-10　欧姆的实验装置

1822 年德国物理学家塞贝克（Thomas Johann Seebeck，1780～1831）发现了温差电现象。1826 年，欧姆接受波根道夫（J. C. Poggendorff，1796～1877）的建议，用铜和铋制成了一个温差电池，才得到了稳定的电源。

如何测定电流强度，在当时是一个尚未解决的难题。开始欧姆想用电流的热效应，通过热胀冷缩效应来测定电流的强度，但这种方法很难得到精确的结果。后来他创造性地把奥斯特发现的电流磁效应和库仑的扭秤法结合起来，设计了一个电流扭秤，才得到了理想结果。

1826 年，欧姆在他发表的论文中叙述了他的实验装置。如图 7-10 所示，一根用悬丝挂着的磁针和导线沿着子午线方向平行放置；铋-铜温差电池的一个结端插在沸水里，另一个结端插在碎冰雪里，两根铜条的自由端浸在充当电池两极的水银杯中。当两个水银杯与导体连接成回路时，回路中就产生了电流，电流产生的磁场将会引起磁针的偏转。欧姆假定了磁针的偏转角与导线中电流的强度成正比，于是就把电流强度这个电学量变成力学量来测量。

欧姆选用八根粗细相同、长度不同的铜丝，分别接入电路，测出每次的磁针扭转角。通过对实验数据的分析，欧姆得出关系式：

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

式中 a 和 b 依赖于激发力（如温度差）和电路其余部分结构的两个参数。实际上在欧姆所确定的公式中，X 对应于电流的强度，a 对应于电源电动势，x 和 b 分别对应于外电路的电阻和电源的内电阻。上式实际上就是全电路的欧姆定律。欧姆继续用不同尺寸的黄铜线，改变温差电池两端的温度，多次重复进行实验，都得到了与上述公式同样的结果。此外，欧姆还得出了电阻与导线的长度成正比，与导线的横截面积成反比的结论，从而为物体的电导率概念建立了基础。

1827 年，欧姆出版了《伽伐尼电路的数学研究》一书，对他所发现的重要定律从理论上进行论证，并把这个定律表示为

$$X = \frac{a}{l'}$$

他明确表示说：在伽伐尼电路中，电流的大小与总电压成正比。

欧姆定律提出以后，遭到了一些有权威的人的反对。当时德国的电学家们正热衷于接触电动势的起因的论争，没有对欧姆的工作给予足够的重视。最先接受欧姆定律的是一些年轻的实验物理学家，如楞次在 1832 年研究磁棒对载流螺线管的作用时，韦伯和高斯在 1832～1833 年间研究地磁和制造精密仪器时，都用到欧姆定律。1841 年，英国皇家学会授予欧姆科普利奖章后，欧姆的工作才引起德国科学界的重视。直到 1852 年欧姆才成为德国慕尼黑大学的教授，遗憾的是两年以后他就逝世了。

1845 年，德国物理学家基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff，1824～1887）扩展了欧姆的理论，提出了计算分支电路中电流、电压和电阻的著名法则。

第三节　法拉第的电磁学研究

一、电磁感应现象的发现

奥斯特关于电流的磁效应的发现，揭开了关于电与磁联系的研究的序幕，普遍引起了这种对称的思考：能不能用磁体使导线中产生出电流来？在奥斯特公布他的发现之后不久，菲涅耳就宣称他把磁铁放在螺旋线圈里，已经成功地由磁产生出电。这个报告虽然被别人的重复实验所否定，却启发了安培于 1821 年着手于这方面的探索。他将一个多匝线圈固定在竖直平面上，在这个线圈内部的同一竖直平面悬挂一个可以转动的闭合线圈。他设想，当固定线圈中通以强电流时，悬挂的闭合线圈中也会产生某种电流而出现磁性；这时如果用一个强磁铁接近它，就会使中间的可动线圈转动起来。由于他只是在稳态情况下进行实验，所以未能探测到这种效应。

阿拉果和塞贝克分别于1824年和1825年发现了所谓“衰减”现象。阿拉果用一个磁针作成单摆，让它在静止的金属盆上面按一定频率摆动，发现它的运动像受到阻碍作用一样很快衰减下来。1825年他又发现，如果转动磁针下面的金属盆，磁针就会发生偏转，甚至连续转动。同年，塞贝克也用一块磁铁作成单摆，观察到了它在金属物体附近摆动时的衰减现象。他还用一个铜块作成单摆，发现它在磁铁上方摆动比它作自由摆动时振幅衰减要快得多。这些发现虽然引起了广泛的兴趣，但没有得到进一步的解释。

19世纪电磁学领域中最伟大的实验物理学家法拉第也同样开始了这一探索工作。法拉第出生在一个贫穷的铁匠家庭，从小只受到一点读、写、算的初步教育。13岁时到伦敦一家书店当装订书的学徒，这使他有机会接触到各类书籍，他从阅读科学书籍中获得了丰富的知识。1813年，法拉第成为著名化学家戴维的助手，从此走上科学研究的道路。1821年，法拉第成为皇家学院实验室主任，1824年当选为皇家学会会员，1825年成为皇家学院教授。

电磁转动效应实验的成功，大大鼓舞了法拉第在这一领域里继续进行深入探索的信心，并引导他同样想到奥斯特发现的逆效应是否存在的问题。在1822年的日记里他写下“由电产生磁，由磁产生电”的大胆设想，并着手于后一个转化的艰苦探索。

电磁转动的研究工作，使法拉第直觉地意识到环绕着载流导线有一个圆形的作用“线”；他设想这是当电流通过导线时在导线内的分子和周围的媒质中引起的某种“紧张”状态，这种状态是从张力的源——载流导线向周围传播开去的。是否可以合理地猜想，如果这种张力能够加强和集中，它将能在邻近的导线内引起同样的紧张状态呢？

在1821年到1831年间，法拉第曾经由于冶炼不锈钢、改良光学玻璃和研究气体的液化而常常中断这一探索，但还是不时回到这个课题上。起初，他试图用强磁铁靠近闭合导线或用强电流使邻近的闭合导线中产生出稳定的电流，但都一次次地失败了。他探寻使磁体产生最大张力的最好形状是什么，最后得出结论说，可能是很厚的环。于是就在一个7/8英寸厚、外径为6英寸的软铁圆环上绕上两个彼此绝缘的线圈A和B，B的两端用导线连接成闭合回路，在导线的下面放置一个与导线平行的小磁针；A和一个电池组相连接在一个开关上。

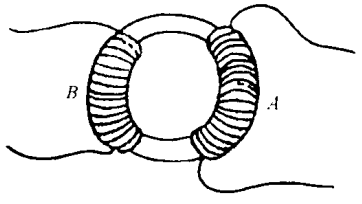


图7-11　法拉第发现感应电流的实验

1831年8月29日法拉第在进行这一实验时偶然发现，当开关合上有电流通过线圈A的瞬间，小磁针发生了偏转，随后又停在原来的位置上；当开关断开切断电流时，磁针又发生了偏转。这表明，一个电流通过铁环介质而感应出了另一个电流。法拉第把这一现象称为“伏打电感应”。这个实验通常被称为电磁感应的发现，但事实上并不完全如此。因为法拉第虽然想到了这就是他寻找了将近十年的由磁产生电流的现象，但还没有明确地领悟到这一现象的

暂态性的本质特点。

在这个发现之后，法拉第立即想到，铁环和线圈 A 是不是产生这一效应的必要条件，他很快就用实验找到了答案。10 月 17 日他在一个圆纸筒上绕了多层线圈，将一个圆柱形的磁棒插入线圈的一端。然后把磁棒迅速地塞入螺线圈中，这时线圈所连的电流计的指针动了；抽出磁棒时，指针又动了，但偏转的方向相反。每次把磁棒塞进或抽出时，这种效应都会重现，这就是所谓“磁电感应”现象。

最后，10 月 28 日，法拉第把巴罗轮反过来运行。他转动一侧夹在马蹄形磁铁当中的铜盘，便可以在铜盘轴心和周缘两处引出电流，这实际上就是最早的发电机的雏形。考虑到电流的磁效应，这项发现也给阿拉果和塞贝克的衰减实验提供了解释。

至此，法拉第不仅实现了由永久磁体产生电流的设想，而且完全弄明白了这种转化的暂态性，这是他能够宣布已经证明了奥斯特发现的逆效应的确切日期；1831 年 11 月 24 日，法拉第在向皇家学会提交的一个报告中，把这种现象定名为“电磁感应”，并概括了可以产生感应电流的五种类型：变化着的电流，变化着的磁场，运动的稳恒电流，运动的磁铁，在磁场中运动的导体。

开始的时候，法拉第把上述的“伏打电感应”和“磁电感应”看做两类独立的现象。后来，他用导体切割磁力线的概念，统一了包括随时间变化的电流，在空间中运动的电流，以及磁铁和导体的相对运动等所产生的感应现象，统称之为电磁感应。法拉第又在 1851 年写出论文《论磁力线》，系统地阐述了他所用到的概念，总结了电磁感应定律。

应该指出，关于电磁感应的探索，在当时是具有国际性的。除了菲涅耳、安培和法拉第之外，日内瓦年轻的科拉顿（Jeans Deniel Colladon，1802～1892）在 1825 年曾试图用一块磁铁在螺线管中移动使线圈中产生出感应电流。为了排除磁铁移动对灵敏电流计的影响，他用很长的导线把连接于螺线管的电流计放在另一个房间内，他在两个房间里跑来跑去进行实验和观察，这当然是观察不到感应电流的，他同样没有想到效应的暂态性。

美国物理学家亨利（J. Henry，1799～1878）在这一时期同样提出了磁能不能产生电的问题。1829 年他在实验电磁铁的提举力并用这种装置进行电报机的早期实验时，意外地发现了通电线圈在断开时所产生的强烈的电火花。1830 年 8 月，他继续对这一现象进行研究。他将一个线圈连接到电流计上，把线圈放在电磁铁的两端之间，发现在电磁铁接通和断开电流时，电流计的指针都会突然发生偏转。由于繁重的教学工作，他的实验一度停顿下来。直到 1832 年 7 月他才发表了一篇论文，叙述了他在听到法拉第的工作以前和以后所作的实验。

关于感应电流的方向，法拉第只是有过一些零碎的叙述。俄国物理学家楞茨（H. F. E. Lenz，1804～1865）在获悉法拉第的发现之后，很快考察了电磁感应现象的全过程。1832 年 11 月，他得出了感应电动势与绕组导线的材料和直径无关，也与线圈的直径无关的结论。1833 年 11 月，他又得出了著名的“楞茨定律”，明确提出了确定感生

电流方向的基本法则。这个定律表明，感生电流所产生的磁场的作用，总是补偿施感磁场的变化，即阻碍磁体的运动。1847 年，亥姆霍兹（H. Von Helmholtz，1821～1894）揭示出，楞茨定律正是电磁现象符合能量转化与守恒定律的具体表现。

二、“力线”和“场”的初步思想

奥斯特的发现，在欧洲大陆导致了有精美数学形式的超距论电动力学的发展；而在英国，却以物理直观的形式，发展起了近距作用的场论思想，孕育出物理学观念和理论的一场重大革命。这个理论是由学徒出身的物理学家法拉第首先创立的。

奥斯特效应和电磁转动效应的发现，在法拉第场思想的形成上，产生了最重要的直接影响。1821 年法拉第写道：“我发现通常小磁针被导线的排斥和吸引只是一种假象，针的运动不是吸引也不是排斥，也不是任何引力和斥力的结果，而是由于导线中的力的结果，这种力并不吸引或排斥磁极，而是使磁极绕着一个闭合的圆周运动。”① 在法拉第看来，这种圆周力是非常简单和优美的，而且能够用于电磁现象的解释。这里已经表现出法拉第对安培的超距作用中心力理论的怀疑。

1831 年 11 月和 1832 年 1 月，法拉第相应于他所发现的“伏打电感应”和“磁电感应”现象，提出了“电紧张态”和“磁力线”两个新概念。法拉第认为，“电紧张态”是由电流或磁体产生的存在于物体和空间中的张力状态，这种状态的出现、变化和消失，都会使处于这种状态中的导体感应出电流来。他说：“一旦导线受到伏打电流或磁的感应，它就显出一种特殊状态，因为它阻止其中电流的形成。”②

“磁力线”则是法拉第为了对磁体和螺线管之间的相对运动产生感生电流的现象进行解释而提出的一个概念。但是他很快就把这个概念扩大到伏打电感应的情况，认为电流的变化也会引起磁力线的变化，因而磁力线也就成了对“电紧张态”作定量描绘的一个工具。磁力线的多寡表示这种状态的强弱，磁力线数量的变化表示这种状态的变化，这就为感生电流找到了一种量度方法，并通过磁力线概念把“伏打电感应”和“磁电感应”统一起来，用“切割磁力线产生电流”对电磁感应定律做出了物理的概括和解释。“磁力线”概念的提出成为他发展自己的力场理论的立足点。

1832 年，法拉第通过对电磁感应过程实验现象的思考，意识到了磁力线的传播是需要时间的。在 1832 年 3 月 8 日的日记里，他从运动导线穿过恒定均匀磁场时也能产生出感应电流的现象想到，这种效应只能是由于导线一侧与另一侧紧张状态的程度不同引起的，这就意味着产生紧张状态的力或磁力线的传播是需要时间的。③ 或者说，从载流导线向四周散发出来的力线只能以有限的速度向空间传播，而不可能是瞬时的。不久，他又引入了“电力线”的概念，设想电力也像磁力一样是通过力线传播的。

---

① N. J. Nersessian, Faraday to Einstein, Dordrecht (1984), p. 40.

② H. Bence Jones, The Life and Letters of Faraday, Vol. II, p. 7.

③ Thomas Martin(ed.), Faraday's Diary, London (1932), Vol. I, p. 424.

关于电解过程的研究，使他取得了一个有革命意义的发现。从伏打电池发明以来，电化学家们一直认为电路的正端和负端像中心力的力心那样起作用，这个力通过一定的距离作用在电解质中的分子上而使分子中的不同成分“扯离”开来，这是一种超距作用的效应。法拉第通过研究指出，电解产生于电解质内部分子的作用和变化，而不是外部电极超距的吸引作用引起的。电流的通过使分子中由电的张力激起的化学亲和力的形式发生改变，使得对于分子中的每种成分而言，化学亲和力在一个方向的作用比在另一个方向的作用强，因而使分子中的两种成分形成一种极化状态并随之分解开来，每种成分又和邻近分子中的另一成分结合成分子。通过溶液中分子发生的一连串分解和复合的过程，不同成分向相反方向移动，最后在端点处被析出。

1837 年他在研究介质如何影响电力时发现：用一块绝缘材料隔开的两个导体板组成的电容器，比由真空隔开的电容器能够容纳更多的电荷量；而板间所夹的物质不同，电容器容纳的电量也不同。他把夹有绝缘材料时和真空时电容器所容电量的比值称为该材料的电容率（即介电常数）。为了解释这个现象，他假设在绝缘体中进行着与电解质中相同的过程，介质中的分子产生了某种极化状态；二金属板上的电荷并不是超越它们之间的空间直接发生作用的，而是借助于两板之间的电介质内相互邻近的极化分子的作用逐点传递过去的，中间介质在这种相互作用中起着重要的作用。法拉第很自然地把介质分子的这种极化状态推广到真空中的以太粒子的形变上，这种形变是沿曲线传播的，由此明确引入了“力线”的概念。他设想，在电容板之间的绝缘介质中，电力线要比真空中稠密一些，其稠密程度与材料的电容率成正比，因此就在电力线尽头的电容板上容纳较多的电荷。

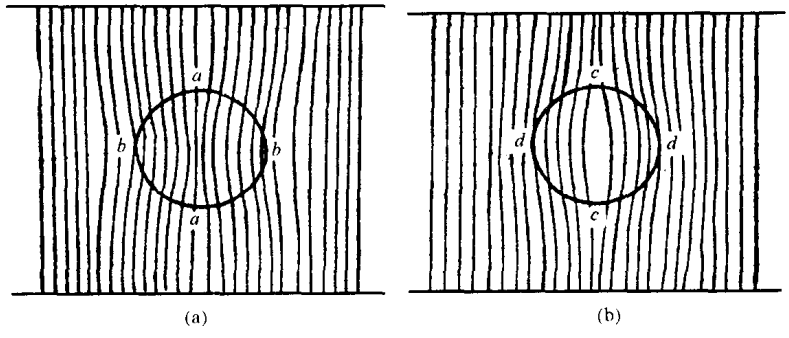


图 7-12　磁力线在顺磁体（a）中密集，而在抗磁体（b）中则离散

1845 年 9 月，法拉第所做的磁力通过重玻璃而使光的偏振平面发生偏转的实验，使他领悟到磁力不能被局限于铁、镍、钴等少数物质，而应能够对所有物质发生作用。1845 年 11 月，他用强电磁铁进行实验发现，物质对磁力的作用类似于介质对电力的作用。当把各种材料的物质做成条形时，多数物质（如重玻璃、铜棒、铋条、木块、橡皮等）转向与磁力线交叉（即垂直）的方向，并且移向磁力较弱的地方；只有铁、镍

等物质，则取与磁力线一致的方向，并移向磁力最强的地方。他把前者称为“抗磁体”，后者称为“顺磁体”。对于这个现象，大多数物理学家是根据“磁流质”假设以“极分子”的存在去作解释的。他们认为，磁体在抗磁体中引起的磁感应与顺磁体中的恰好相反，从而使抗磁体的极性与磁体发生排斥。法拉第对这种解释是怀疑的，他相信，在顺磁体和抗磁体中都不存在作为磁力线的终点的“磁极”，而只是对磁力线的不同的反应。磁力线很容易通过磁性物质，所以在顺磁体中是密集的；而抗磁体则是磁力线的不良导体，所以磁力线趋于绕过抗磁体，使其中的磁力线变得稀疏。但是，无论是在顺磁体或抗磁体中，磁力线都是连续的曲线，不存在作为“极”的力线的终点。

所有这些工作，都使法拉第更加坚信，电和磁的作用不是没有中介地从一个物体传到另一个物体。他设想，在带电体、磁体和电流周围的空间存在着某种由电或磁产生的像以太那样的连续介质，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作为近距作用的“场”的概念。

1851 年 12 月，法拉第提出了《论磁力线》一文，他类比于流体场，对场的物理图像作了直观的描述。他提出，场是由力线组成的，许多力线组成一个力管，它们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场强的方向，力线的疏密程度则表示不同点场强的大小。力管有纵向收缩的趋势和横向扩张的趋势，他以力管的这种机械性质解释了异性相吸和同性相斥的现象。因此，法拉第认为，力线具有物理实在的性质，它是场的表象。他在一张纸上撒上铁屑，用磁棒在其下面轻轻振动，铁屑就清楚地连接成规则的曲线，法拉第以此来证明力线和力管的实在性。

这样，法拉第就从带电体和磁体周围媒质的作用，也就是从电场和磁场的观点出发去考察一切电磁作用过程。他关于力线和场的概念，对传统的科学观念是一个重大突破，把近距媒递作用观念引进了物理学中，对于电磁学以及整个物理学的发展都产生了深远的影响。所以劳厄（Max von Laue，1879～1960）把法拉第誉为“正确理解电磁现象的带路人”。

第四节　超距论电动力学理论的建立

一、安培定律的提出

为了解释奥斯特效应，安培把磁的本质归结为电流，认为所有电磁作用都是电流与电流的作用，他把这种作用力称为“电动力”。为了把当时已发现的电磁作用定律综合成一个系统的理论体系，安培像牛顿把质量分解为无数质点那样，把电流设想为无数电流元的集合，认为只要找到电流元之间相互作用力的关系式，就可以通过数学方法推导出所有电磁现象的定量结果。安培十分欣赏牛顿把一切质体的运动都归结为万

有引力的效应的这种高度简化的方法，从一开始就决心严格地参照牛顿力学的全套方法处理电磁现象。他在1827年出版的《直接由实验导出的电动力学的数学理论》中，对他所用的这种方法作了说明："首先观察事实，尽可能地变换条件以精确的测量来实现这一步，以便推导出以经验为惟一基础的一般定律，并独立于所有关于产生现象的力的性质的假说来推导这些力的数学值，也就是获得表示它们的公式。这就是牛顿所走过的道路，也是对物理学做出重大贡献的法兰西学术界近年普遍遵循的途径。同样，它也引导着我全力投入到电动力学现象的研究中。"[1]

他所说的"牛顿所走过的道路"，即从观察运动现象入手，通过精确的实验研究以找到关于力的规律，然后再以这些力的规律对有关自然现象作出解释和预测。所以安培认为最核心的概念应该是与质点相对应的实体"电流元"以及它们之间超距作用的有心力，他把这种理论称之为"电动力学"。

从1820年10月开始，安培花了几年的时间，全力去寻找"电流元"之间的作用力公式。能不能找到一个已有的力学公式，将它做适当修改而推广应用到电流元之间的电动力的情形呢？早在半个世纪之前，卡文迪什在研究静电力的作用时已经这样做了。卡文迪什首先假定了电荷之间的静电力与距离的n次方成反比，即$f \propto 1/r^n$，然后通过理论的分析和实验的检验，最后又回到了牛顿的引力公式上。现在安培也准备运用这套方法去构筑电动力学的理论大厦。

不过，与牛顿把万物都划分成一颗颗体积可以忽略的、具有力性质的质点不同，电流元是不独立存在的，因而也不可能对这种设想的实体的作用力进行直接的实验测定；而只能在"电流元"假设的基础上，通过理论分析得出一些可供实际检测的结论，尽可能变换条件地去进行测量，然后再用这些实验结果去确证或修改原来的假设，直至建立起能与观察结果相符合的基本定律。这样，安培就以高超的数学才能和实验技巧设计了四个天才的"示零实验"。所谓"示零实验"是指两个电流同时作用于第三个电流而产生平衡的效果，或者两个电流不发生某种力的作用，从而揭示出两个电流之间相互作用力的某种特性。

第一个"示零实验"是"在一根固定的导体中，先让电流在一个方向通过，然后在相反方向通过，它们对方向和距离都保持不变的物体所产生的吸引力与排斥力绝对值相等。"在实验时安培是用一个"无定向秤"检验一个通电对折导线的作用力，得到了零结果，从而证明了电流反向时它所产生的作用也反向。这个结果使安培排除了电流产生的吸引力与排斥力不相等的可能性，可以用一个公式统一表示两种力。于是他假设两个电流元ids和$i'ds'$的相互作用力遵从$\rho\frac{ii'dsds'}{r^n}$，r表示连接两个电流元中点的直线距离，ρ是决定于两个电流元与r的夹角θ、θ'和二电流元与r所构成的两个平面

① 宋德生，《安培和他在科学上的贡献》，《自然杂志》1984，(4)。

间的夹角 ω 的函数，n 为一待定常数。

对于相互平行且与连线相垂直的两个电流元，公式将取最简单的形式。那么是不是可以将电流元的作用简化为两两平行的简单情形，即电流元的作用是否像一般矢量一样。可以在坐标轴上作投影处理呢？为了解决这个问题，安培作了第二个“示零实验”：同样用无定向秤检验一个通电对折导线的作用，对折导线的一边是直的，返回的一边则绕成螺旋线或任意波折线，实验同样得出零结果。这就证明了直导线电流与波状导线电流产生的电动力相等，表明电流元的作用具有矢量性质。

但是，在对电流元的电动力进行坐标投影分解时，除两两平行的部分外，还有相互垂直的部分，这些互相垂直的电流元之间是否存在电动力呢？安培用第三个“示零实验”回答了这个问题：在两个通电的水银槽上放置一段与水银有良好接触的弧形导体，导体与一个可绕固定端旋转的绝缘柄连结，以保证弧形导体不发生横向移动。用其他通电线圈在附近对弧形导体产生作用，结果载流弧形导体并不沿电流方向运动，从而表明作用于电流元上的电动力只存在于垂直于它们的方向上，因而可以不必考虑相互垂直的电流元的作用。

最后，为了惟一地根据实验结果来确定 n 值，安培进行了第四个“示零实验”：将三个单匝圆形线圈 A、B、C 摆开，使它们的圆心位于同一直线上，两头的线圈 A 和 C 固定，中间的线圈 B 可动；线圈的长度 L 之比与 AB、BC 间距之比相等，即 $L_A : L_B = L_B : L_C = m$ 及 $AB : BC = m$。则当给三个线圈通以大小相等、方向相同的电流后，中间的线圈 B 并不运动，表明二端的线圈 A 与 C 对 B 的电动力的合力为零。这个结果说明各个电流的长度和相互距离增加同样倍数时，电动力不变。从这个结果不难得出 $n=2$。

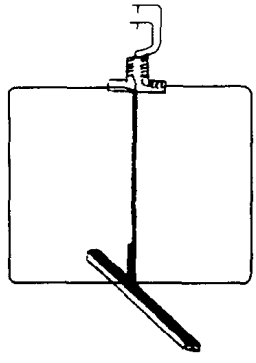
这样，安培就从这四个“示零实验”得出了二电流元相互作用的电动力公式

$$f = \frac{i \cdot i' \cdot ds \cdot ds'}{r^2}[\sin\theta \cdot \sin\theta' \cdot \cos\omega + k\cos\theta \cdot \cos\theta']$$

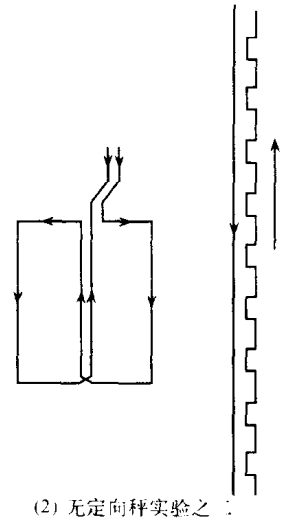
k 为一常数。直到 1827 年，安培才通过数学推导得出 $k=1/2$。这就是著名的安培定律，它是一个类似于质点引力公式的、建立在超距作用基础上的电动力的平方反比关系式。

安培的理论不是没有受到异议的，关于磁的本质是电的运动的观点，就受到当时多数物理学家的拒绝。同样，安培关于电动力作用的基本公式，也因为实验上无法分离出独立的“电流元”这种实体而受到责难。另外，就安培公式本身而言，虽然在形式上也与距离的平方成反比，但只有在经过积分之后才能解释有限长电流的相互作用，而这种相互作用则与距离的一次方成反比。这就反映出安培定律与万有引力定律的根本差异。不过，在安培看来，“电流元”之间的相互作用只是一个数学模型，只要能够利用这个模型对所有的电磁现象提出解释，就说明它是正确的，而由它得到的公式也就“永远是事实的真实的描述”。

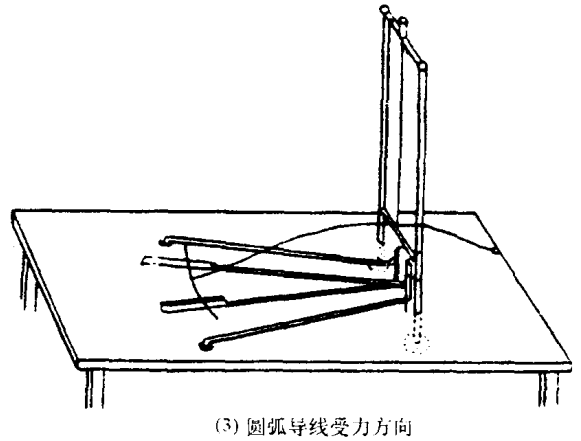
麦克斯韦把安培称为“电学中的牛顿”。赞誉说：“安培借以建立电流之间机械作用定律的实验研究，是科学上最辉煌的成就之一。”“整个的理论和实验看来似乎是从



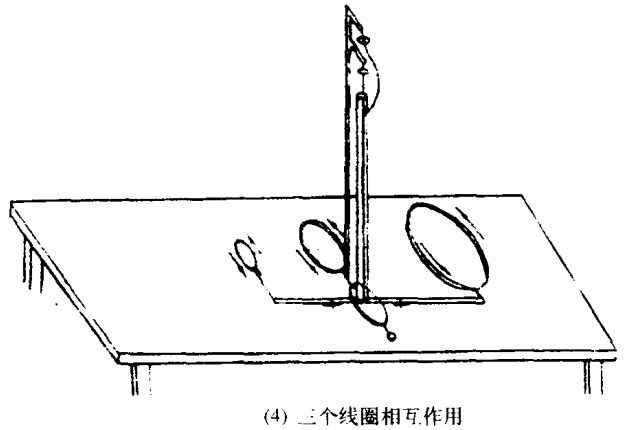
(1) 安培的无定向秤
(下方是一根对折导线)



(2) 无定向秤实验之二



(3) 圆弧导线受力方向



(4) 三个线圈相互作用

图 7-13　安培的四个“示零实验”

这位‘电学中的牛顿’的头脑中跳出来的并且已经成熟和完全装备完了的，它在形式上是完整的，在准确性方面是无懈可击的，并且它汇总成为一个必将永远是电动力学的基本公式的关系式，由之可以导出一切现象。”

二、德国电动力学派的建树

安培的超距电动力学理论在19世纪40年代被德国物理学家韦伯（W. Weber，1804～1890）和诺伊曼（F. E. Neumann，1798～1895）继承和发展。

安培的电动力学在用超距有心力的作用来说明当时已知的电磁现象上，是相当出色的。但在法国科学家们的一系列发现，特别是在英国的法拉第1831年发现电磁感应现象之后，仍然用仅仅依赖于粒子之间的距离的中心力来做出统一的解释是远远不够了。例如，安培的理论是在电流元已经存在的情况下来描写它们之间的相互作用的，而电磁感应现象中首先要说明的却是电流元本身是如何产生的。为了解决这些问题，1846年韦伯补充和发展了安培的理论，提出了一个“电的力学的一般法则”，把库仑的静电力、安培的电动力和法拉第的电磁感应力统一于一个公式中，使他的理论能够包括所有这些方面的现象。韦伯采纳了费竭纳（G. T. Fechner，1801～1887）于1845年提出的假设，把电流看做是由数量相等的正负两种电荷在同一导线上沿相反方向以同一速度运动构成的，各电流元的电流强度与电荷 e 同速度 v 的乘积成正比。于是他指出，两个电荷之间沿它们的连线方向的作用力不仅取决于它们之间的距离，而且还与它们的相对速度和相对加速度有关，这个力遵从公式

$$f=\frac{ee'}{r^2}\left[1-\frac{1}{c^2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+\frac{2r}{c^2}\cdot\frac{d^2r}{dt^2}\right]$$

e 和 e' 是两个电荷的电量，r 为它们之间的距离，c 是电量的电磁单位和静电单位的比值。显然，该式的第一项就是库仑静电力，第二、三项与电荷速度和加速度有关，综合体现了安培电动力和电磁感应力。例如，对于两根平行载流直导线来说，如果电流方向相同，二导线中的正电液体以相同的速度沿同方向运动，它们的相对速度为零，因而只显示静电斥力；二导线中的负电流体的情况也是如此，只有静电斥力。但是，二导线中符号相反的电流体之间则是互相吸引的。这样，两组排斥力与两组吸引力正好抵消。剩下的只有二导线中不同符号的电流体的相对运动所形成的相互吸引力，这是与安培公式所得结果完全一致的安培力。

关于电磁感应现象，韦伯指出，当两个电流元相对运动时，运动电流元中的电荷除沿导线运动外，还随导线运动。后一种运动使被感电荷受到附加作用力，这就是感应电动势的根源。具体来说，当考虑初级电流的正负电荷作用于次级电路中一个静止电荷上的力时，上述公式中的第一、二项将因初级电荷正负的不同而取相反的符号互

相抵消；但公式中的第三项将会随初级电荷正负的不同而同时改变加速度的符号，总的效应则会相加而不会抵消；另外，次级电路中符号相反的电荷受力的方向也相反，因而变化的初级电流在次级电路中就感应出电流。

另外，韦伯的法则还包含了电流是运动的电荷的假定；特别是由于它包含了两个电荷的相对运动速度和加速度的因素，实际上已经突破了经典力学的中心力概念，不过韦伯却仍然把他的理论建立在超距观点的基础之上。但是，由于韦伯理论引入了依赖于速度和加速度的力，很早就被认为是违反能量守恒定律的。亥姆霍兹与韦伯因此展开了一场长达数十年的争论。这场争论的效果是在欧洲大陆降低了韦伯理论的威信，为麦克斯韦的电磁理论被欧洲大陆物理学家所接受创造了有利的局面。

诺伊曼在1845～1848年也在超距作用力的基础上运用安培的电动力学，发展了电磁感应理论，第一次给这个定律确定了数学形式。

考虑两个载流线圈 l' 和 l，l' 为施感（初级）电流线圈，l 为被感（次级）电流线圈。当施感电流线圈运动时，二载流线圈间的相互作用势能将发生变化。诺伊曼将安培的分子电流假说推广到宏观载流线圈的情况，假定被感电流线圈中的感应电动势 ε 与二线圈相互作用势能的变化率成正比。根据楞次定律加一负号，于是

$$\varepsilon = -\int \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{l}$$

$i' d\boldsymbol{l}$ 为被感电流的线元，积分沿被感电流回路 $\boldsymbol{l}$ 进行。式中 $\boldsymbol{A}$ 为诺伊曼引进的一个电流的位置函数，其定义为

$$\boldsymbol{A} = i' \int_{l} \frac{d\boldsymbol{l}'}{r}$$

$I' d\boldsymbol{l}'$ 是施感电流与线元，r 是 $d\boldsymbol{l}'$ 与 $d\boldsymbol{l}$ 之间的距离，积分沿施感电流回路 $\boldsymbol{l}'$ 进行，$\boldsymbol{A}$ 称为电动力学势。不难看出，诺伊曼的感生电动势公式完全是法拉第电磁感应定律的数学概括。不过，诺伊曼是一个超距论者，他完全没有场的概念，他力求使电磁现象按力学模式理论化。所以他所提出的矢量势 $\boldsymbol{A}$ 表示的是超距力学性的一种势，就像静电势或静磁势一样。不同之处只在于 $\boldsymbol{A}$ 是一种具有方向性的矢势，而不是标势。

这样，由安培首创的大陆派超距电动力学理论，就由于韦伯和诺伊曼等人的发展而更加完善了。

第五节　经典电磁场理论的建立

一、W. 汤姆孙关于电磁场的类比研究

法拉第虽然有高超的实验技巧和丰富的想像力，而且提出了“力线”和“场”这

样深刻而伟大的思想，但由于数学能力的限制，所以未能把他的成果用数学术语概括为精确的定量理论，他的形象直观的表述也被科学界看做是缺乏理论的严谨性。只有W. 汤姆孙（开尔文）对它表示赞赏，并以理论物理学家的素养，对法拉第的理论进行了类比研究和数学概括，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（J. C. Maxwell，1831～1879）电磁学数学理论的研究提供了方向性和方法论的启示。

1842年，汤姆孙在《论均匀固体中热的均匀运动和它与电的数学理论的联系》一文中，分析了热在均匀介质中的传递与法拉第电感应力在电介质中的传递两种现象的类似性，指出两种现象中热源与电荷、等温面与等势面、热流分布与电力分布的对应性：热从温度高的地方流到温度低的地方，电力从高电位经介质传到低电位。通过这种类比，汤姆孙认为法拉第的电力线与热流线的性质是类似的，因而就可以借助傅里叶（J. B. J. Fourier，1765～1830）的热分析方法和拉普拉斯的引力势概念，将法拉第的静电感应理论与泊松等人的静电势理论结合起来，开拓了热与电的数学理论的对比研究。

1846年，汤姆孙研究了电现象与弹性现象的相似性，指出表示弹性位移的矢量的分布可与静电体系的电力分布相似。1847年，他又在不可压缩流体的流线连续性基础上，论述了电磁现象和流体力学现象的类似性。在1851年发表的《磁的数学理论》[①] 中，给出了磁场的定义，并把磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 与具有通量意义的 $\boldsymbol{B}$ 区别开来，还得到了 $\boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}$ 的关系；1853年，他又得到了静磁场能量密度公式 $\frac{\mu H^2}{8\pi}$。1856年，汤姆孙根据光的偏振面的磁致旋转效应，认为磁具有旋转的性质。结合1858年赫姆霍兹关于涡旋运动的研究，流体力学的许多定理和研究方法就可以被移植到电学的研究中。这些工作，为麦克斯韦建立电磁场理论提供了重要的启迪。

二、麦克斯韦关于法拉第力线的数学表述

麦克斯韦在着手研究电磁学时，深入钻研了法拉第的三卷论文集《电学实验研究》，立即就被法拉第深刻的物理学思想所吸引，意识到法拉第的“力线”和“场”的概念正是建立新的物理理论的重要基础。正如他在1873年出版的电磁场理论的经典著作《电磁通论》的“前言”里所概括的那样：“法拉第心目中看到的是贯穿整个空间的力线，而数学家们在那里看到的只是超距吸引力的中心；法拉第看到的是媒质，而数学家们在那里除了看到距离还是距离；法拉第认为现象是发生在媒质内的真实作用，而

① W. Thomson, A Mathematical Theory of Magnetism, Phil. Trans., 141 (1851), pp. 243～285.

数学家们则只满足于发现作用于电流体上的超距作用力。"[1] 虽然他也看到了法拉第定性表述的弱点，但是他说："当我开始研究法拉第时，我发觉他考虑现象的方法也是数学的，尽管没有以通常的数学符号的形式来表示；我还发现，它们完全可以用一般的数学形式表示出来，而且可以和专业数学家的方法相媲美。"[2] 于是他抱着给法拉第的这些观念"提供数学方法基础"的愿望，决心把法拉第的天才思想以清晰准确的数学形式表示出来。

1855～1856 年，麦克斯韦发表了电磁学的第一篇论文《论法拉第力线》。论文的开头麦克斯韦评论了当时电磁学的研究状况，认为必须把已有的研究成果"简化概括成一种思维易于领会的形式"。

在这篇论文的第一部分，麦克斯韦把 W. 汤姆孙富有成效地运用的类比方法发展成为研究法拉第力线的出发点。他对这种方法写道：

"为了不运用物理理论而得到物理思想，我们就应当熟悉物理类比的存在。所谓物理类比，我认为是一种科学定律与另一种科学定律之间的部分相似性，它使得这两种科学可以互相说明。这样，所有数学的科学都是建立在物理定律和数的定律的关系上，因而精密科学的目的就是要把自然问题简化为通过数的运算来确定各个量。"[3]

麦克斯韦指出，表示不可压缩流体运动的流线可以为静电的力线提供类比对象，即可以找到静电场的势方程和热流方程之间的数学相似性。

考虑一块各向同性的无限大的均匀介质，在介质中镶嵌一个流体源（有质流体源或无质流体的热源）。根据不可压缩流体的性质，在距流体源为 r 处的任意一点流体压力为

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

Q 为单位时间通过包围流体源的任意封闭曲面的总流量，k 为与介质性质有关的系数。麦克斯韦认为，电学中的势 $V(r)$、流体力学中的压力 $P(r)$ 和热力学中的温度 $T(r)$ 具有某种类似性，因为电、流体和热分别都趋向于从势、压力和温度较高的地方流到较低的地方，因而就可以把上述力学公式搬入静电场。以 Q 表示总的电通量，以势 $V(r)$ 代替 $P(r)$，根据电场强度的定义得到

$$\boldsymbol{E} = -\nabla V(r) = -\nabla P(r) = \frac{kQ}{4\pi r^3}\boldsymbol{r}$$

如果以 $D = Q/4\pi r^2$ 表示球面单位面积上的电通量，就可以得到 $\boldsymbol{E} = k\boldsymbol{D}$。对于磁场和电

---

①，② J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, (1873), 3rd ed., Clarendon, London, Vol. 1 (1904), ix.

③ W. D. Niven (ed), The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, Paris, Vol. I (1927), p. 156.

流，同样也可以得到类似的公式 $\boldsymbol{H}=\frac{1}{\mu}\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{E}=\rho\boldsymbol{j}$。

麦克斯韦从这些关系中看出两类不同性质的矢量，他分别称之为“量”(quantites) 和“强度”(intensities)，后来改为“通量”(fluxes) 和“力”(forces)。对于静电场，$\boldsymbol{D}$ 属于“量”，$\boldsymbol{E}$ 属于“强度”；对于磁场，$\boldsymbol{B}$ 属于“量”，$\boldsymbol{H}$ 属于“强度”；对于电流，电流密度 $\boldsymbol{j}$ 属于“量”，电动力 $\boldsymbol{E}$ 属于“强度”，这两类矢量之间存在着线性关系。麦克斯韦的论述不仅使电现象和磁现象的描述中两类矢量的区分变得非常明晰，而且也得到了物理场的清晰图像：从空间的“通量”来显示“力”，表明只当存在着“通量”时才能产生“作用”。

在论文的第二部分，麦克斯韦试图为法拉第提出的“电紧张态”找到一个数学表述。他指出，在电磁感应现象中，感生电动势起源于磁或电流“状态”的变化，这种“状态”就是法拉第所说“电紧张态”。他强调说：“电紧张状态是电磁场的运动性质，它具有确定的量，数学家应当把它作为一个物理真理接受下来，从它出发得出可以用实验检验的定律。”但是，如何去寻找这样一个函数呢？他再次使用了类比方法，从电紧张状态的变化产生电磁感应现象想到这与力学中动量的变化产生力是很类似的，因而电紧张态也具有力学中的“动量”的特征，他把它称为“电磁场动量”。于是类比于力学中

$$\boldsymbol{F}=\frac{d\boldsymbol{p}}{dt}$$

而把电磁感应定律表示为

$$\boldsymbol{E}=-\frac{d\boldsymbol{A}}{dt}$$

$\boldsymbol{E}$ 是感生电场强度，具有力的特征，$\boldsymbol{A}$ 便是“电磁场动量”。麦克斯韦很快辨明，$\boldsymbol{A}$ 就是诺伊曼所定义的“电动力学势”。不过在诺伊曼的理论中 $\boldsymbol{A}$ 不具有场的性质，而且只是运算中的一个辅助量，没有明确的物理意义；而在麦克斯韦这里，$\boldsymbol{A}$ 是个场量，而且是表征电磁场运动性质的一个最基本的量。从这个基本量出发，麦克斯韦重新概括了已经发现的六个电磁学基本定律，用现在通常的表示方法表示出来，即

(1) 闭合环路中矢势的线积分等于穿过该闭合环路所围成的曲面上的磁通量，即

$$\oint\boldsymbol{A}\cdot d\boldsymbol{l}=\Phi$$

(2) 磁感应强度等于磁场强度与磁导率的乘积，即

$$\boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}$$

(3) 闭合环路中磁场强度的线积分等于穿过该环路所围成的曲面上的电流，即

$$\oint\boldsymbol{H}\cdot d\boldsymbol{l}=\sum I$$

(4) 导体中的电流密度与电场强度成正比，即

$$j = \sigma E$$

(5) 电磁系统的总能量与电路中的电流和感应所生的磁通的乘积成正比，即

$$W = \oint j \cdot A dl$$

(6) 磁场变化所引起的电场强度等于矢势对时间的导数的负值，即

$$E = -\partial A / \partial t$$

可以看出，矢量函数 A 的提出为确立普遍的磁作用、电磁感应以及闭合电流之间相互作用的方程式提供了一个基本物理量。方程 (2) 和 (4) 表示了强度与通量之间的线性关系；方程 (1) 和 (3) 表示出矢量场中力 (强度) 的环路积分不再是力，而是一个通量；方程 (6) 表示导体任意基元上的电动力用该基元上电紧张强度的变化率量度。这就使电磁感应现象的物理意义变得十分明晰了：通过曲面的磁力线数的变化，决定了周界上的电动力，从而引起感应电动势。

三、麦克斯韦的“以太涡旋模型”和“位移电流假设”

在第一篇论文发表后不久，麦克斯韦就认识到对于各种力线的类比，只能对各种物理现象的共性做出几何学的抽象，它很容易掩盖起电磁场的特殊性质。例如，根据伯努利方程，流线最密的地方压力最小；而根据法拉第的假设，磁力线有纵向收缩和横向扩张的趋势，因而磁力线最密的地方胁强最大。麦克斯韦还从电解质的运动认识到电的运动是平移运动，而从光偏振面的磁致旋转现象认识到磁的运动好像是介质中分子的旋转运动。因此，电磁现象有别于流体力学现象，电与磁也各有其特殊的性质。

在 1861～1862 年发表的第二篇电磁学论文《论物理力线》中，麦克斯韦开始从物理的角度去研究法拉第力线，并取得了对电磁现象认识的决定性突破，为最终创立电磁场理论奠定了基础。麦克斯韦希望从某种媒质的结构以及它所产生的张力和运动，来说明观察到的电磁现象。

麦克斯韦从 1856 年 W. 汤姆孙关于磁具有旋转的性质的思想中受到启发，借用了“分子涡旋”(molecular vortices) 概念，将磁旋转假设从普通的介质引申到以太，结构了一个场的力学模型——“电磁以太模型”：充满空间的媒质在磁作用下具有旋转的性质，即规则地排列着许多分子涡旋 (在真空中则是涡旋以太)；它们以磁力线为轴形成涡旋管，涡旋管转动的角速度正比于磁场的强度 H，涡旋媒质的密度正比于媒质的磁导率 μ。

在论文的第一部分“应用于磁现象的分子涡旋理论”中，法拉第关于力线的应力性质得到了很好的说明：涡旋管旋转的离心效应，使管在横向扩张，同时产生纵向收

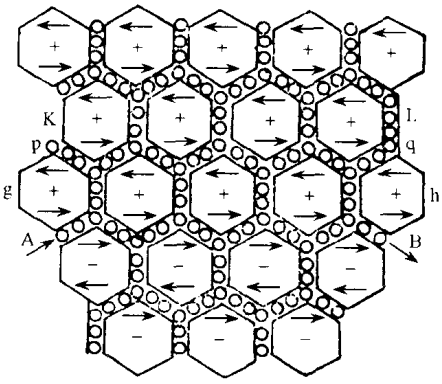


图 7-14　麦克斯韦的电磁以太模型

缩。因此磁力线在纵向表现为张力，即异性磁极的吸引；在横向表现为压力，即同性磁极的排斥。

在论文的第二部分“应用于电流的分子涡旋理论”中，揭示了电场变化与磁场变化之间的关系。这里首先要解决模型的一个缺陷：相互紧密邻接的涡旋管的表面是沿相反方向运动的，因而必然会互相妨碍对方的运动。所以麦克斯韦设想相邻涡旋管之间充填着一层起惰轮或滚珠轴承作用的微小粒子。它们是些远比涡旋的线度小、质量可以忽略的带电粒子。粒子和涡旋的作用是切向的，粒子可以滚动，但没有滑动；在均匀恒定磁场、即各个涡旋管转动速度相同的情况下，这些粒子只绕自身的轴自转，但当二侧涡旋管转速不同时，粒子的中心则以二侧涡旋管边缘运动的差异情况而运动。

对于非均匀磁场，即随位置不同磁力的强度不同，因而涡旋管的转速也不同的情况，涡旋管间的粒子则发生移动。根据涡旋理论可以计算出，单位时间通过单位面积的粒子数即涡旋的流量 $\boldsymbol{j}$ 与涡旋管旋转的切线速度 $\boldsymbol{H}$ 的旋度成正比，即

$$\boldsymbol{j}=\frac{1}{4\pi}\nabla\times\boldsymbol{H}$$

此处 $\boldsymbol{j}$ 对应于电流，$\boldsymbol{H}$ 对应于磁场，所以方程即电磁场的运动方程，它说明电粒子的运动必然伴随分子的磁涡旋运动，这也就是电流产生磁力线的类比机制。

对于磁场随时间变化的情况，麦克斯韦计算出涡旋运动引起的媒质中的能量密度为 $\mu\boldsymbol{H}^2/8\pi$。涡旋运动的能量变化（因 $\boldsymbol{H}$ 变化）必然受到来自粒子层切向运动的力（亦即涡旋管与粒子的相互作用力），这个力 $\boldsymbol{E}$ 满足关系

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\mu\frac{\partial\boldsymbol{H}}{\partial t}$$

其中 $\partial\boldsymbol{H}/\partial t$ 是涡旋的速度变化率，$\boldsymbol{E}$ 为作用于粒子层的力。由于 μ、$\boldsymbol{H}$ 分别为磁导率和磁场强度，因而上式即为电磁场的动力学方程。它说明磁介质中不稳定的磁涡旋运动，势必引起电的运动，这种电运动也是涡旋的。由于 $\mu\boldsymbol{H}=\boldsymbol{B}=\mathrm{curl}\boldsymbol{A}$，所以上式可变为

$$\boldsymbol{E}=-\frac{\partial\boldsymbol{A}}{\partial t}$$

$\boldsymbol{E}$ 对应于该点上的感应电动势，它表示了“电紧张态”的变化率，所以这正是电磁感应现象的类比机制。从麦克斯韦的以太涡旋管模型来看，这实际上是说明无论是由于磁场的变化还是由于电流的变化，都会引起涡旋管转动速度的不均匀变化，从而推动涡

旋管之间粒子层的定向移动，这就产生了感生电流。利用这个模型，麦克斯韦还有效地说明了电流或磁体运动以及导体运动时的感应现象。

在论文的第三部分“应用于静电的分子涡旋理论”中，麦克斯韦把他的涡旋模型类比推广到静电现象。由于这时 $\boldsymbol{H}=0$，所以媒质由具有弹性的静止的涡旋管和荷电粒子层组成。当粒子层受到电力 $\boldsymbol{E}$ 作用而发生位移时，就给涡旋管以切向力使之发生形变，形变的涡旋管则因内部产生弹性张力而对粒子施以大小相等、方向相反的作用力。当引起粒子这种“电位移”的力 $\boldsymbol{E}$ 与弹性力平衡时，粒子处于静止状态，粒子的位移量与外力成正比 $\boldsymbol{E}=k\boldsymbol{D}$，这样，带电体之间的力便可归结为弹性形变在媒质中贮存的势能，而磁力则归结为贮存的转动能。

麦克斯韦由此迈出了决定性的一步，引出了一个惊人的假设：对于受到电力作用的绝缘介质，它的粒子将处于极化状态，虽然它的粒子不能作自由运动，但电力对整个电介质的影响是引起电在一定方向上的一个总位移 $\boldsymbol{D}$，它意味着荷电粒子的弹性移动，这已经非常接近于电流概念了。“这种电位移还不是电流，因为当它达到一个确定的值时，就会保持不变。然而它却是电流的开始，它的变化可以随着位移的增减而构成正负方向的电流。”[①]这就是说，电位移对时间的微商 $\partial\boldsymbol{D}/\partial t$ 也一定具有和电流相同的作用，这就是成为麦克斯韦理论的重要特征的“位移电流”假设。于是，先前得出的电流与磁力线的关系，也可以存在于绝缘体，甚至也可能存在于充满以太的真空中了，于是就可得出

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=4\pi\boldsymbol{j}+\frac{1}{c^2}\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}$$

这样，在媒质中某一点产生的电粒子的振动，就以涡旋磁力线的形式在媒质中扩展开去。麦克斯韦对媒质的性质作了适当的假设，计算出了扰动的传播速度 v。因为对于横向振动，波速为

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

k、ρ 分别表示媒质的弹性模量和密度。麦克斯韦把电磁场看做动力学介质，计算出介质的密度为 $4\pi\mu$，而电磁场介质的弹性模量可由 $\boldsymbol{E}=k\boldsymbol{D}$ 给出。由于 $D=Q/4\pi r^2$，$E=c^2Q/r^2$，因此 $k=4\pi c^2$。于是介质中电磁扰动的传播速度为

$$v=\sqrt{4\pi c^2/4\pi\mu}=c/\sqrt{\mu}$$

真空条件下 $\mu=1$，故 $v=c$。而由 $E=c^2Q/r^2$ 可知，c 是电量的电磁单位与静电单位的比值。1856 年，科尔劳施（R. Kohlrausch）和韦伯测得这个比值为 3.11×10^8 米/秒，与裴索（A. Fizeau）于 1849 年测得的光速值 3.15×10^8 米/秒极为接近，麦克斯韦认为这

① 威·弗·马吉编，《物理学原著选读》，商务印书馆，1986 年，第 551 页。

绝不是偶然的一致，于是他大胆地断言："我们不可避免地得出结论：光是产生电磁现象的同一媒质的横向波动。"

不难看出，在这篇论文中，麦克斯韦利用他所构造的电磁以太力学模型，不仅说明了法拉第磁力线的应力性质，还建立了全部主要电磁现象之间的联系；特别是从这个模型中产生出来的"位移电流"和"电磁扰动传播"的概念，更是迈向电磁场理论的重要阶梯。但是，麦克斯韦也清醒地认识到这个模型的暂时性质，他仅仅把它看做是一个"力学上可以想像和便于研究的、适宜于揭示已知电磁现象之间真实的力学联系"的模型。所以，在理论的进一步发展中，麦克斯韦便放弃了这个模型。

四、麦克斯韦的电磁场方程组

1864～1865 年，麦克斯韦发表了著名的论文《电磁场的动力学理论》。他完全去掉了关于媒质结构的假设，只以几个基本的实验事实为基础，以场论的观点对自己的理论进行了重建。

在引言中，麦克斯韦写道："我所提出的理论可以称为电磁场理论，因为它必须涉及到带电体和磁性物体周围的空间；它也可以叫做动力学的理论，因为它假定在该空间存在着正在运动的物质，从而才产生了我们所观察到的电磁现象。"①

他指出，"电磁场就是包含和围绕着处于电磁状态的物体的那一部分空间"。注意到电磁场既可存在于普通物体中，也可以存在于真空中，因而对于电磁现象也要像对光和热那样，应该肯定是以同样的以太作为媒质的。"我们有理由相信，这种以太媒质可以弥散于空间并渗入物体"，它以很高的然而并非无限的速度将运动从一个部分传到另一部分；"这种媒质的各个部分之间是相互关联的，某一部分的运动有赖于其他部分的运动；同时由于运动的传递不是瞬时的，而需要占用时间，因而这种关联便形成一种弹性作用。"②从这些引述可以看出，麦克斯韦的电磁场理论是试图从具有力学性质的媒质的状态变化来理解电磁作用，是建立在动力学基础之上的，这就揭示了电磁场的物质性和运动性。

麦克斯韦假定，这种动力学以太有一定的密度，并由于电流和磁所引起的各部分的运动而存在着两种不同形式的能量。它的动能$\frac{\mu H^2}{8\pi}$体现着磁的性质，它的势能$\frac{1}{2}\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}$体现着电的性质。结合着关于电磁感应的讨论，麦克斯韦再次论述了描述电紧张态的量$\boldsymbol{A}$，通过力学现象与电磁现象的类比，找到了对应的量和形式相同的数学公式，指出："我称为电磁动量的量是与法拉第所说的电路的电紧张状态相同的量。它的

①、②威·弗·马吉编，《物理学原著选读》，第 551，552 页。

各种变化显示了电动力的作用，正好像动量的变化显示了机械力的作用一样。”

在论文的第三部分，麦克斯韦直接根据电磁学实验事实和普遍原理，给出了电磁场的普遍方程组，这些方程表示：

（A）电位移、真传导和由两者构成的总电流之间的关系。

（B）磁力线和由感应定律导出的电路感应系数之间的关系。

（C）按照电磁单位制算出电流强度和它的磁效应之间的关系。

（D）由物体在场中的运动、场本身的变化以及场的一部分到另一部分的电势变化所得出的物体的电动力值。

（E）电位移和产生它的电动力之间的关系。

（F）电流和产生它的电动力之间的关系。

（G）任一点上自由电荷数与其附近电位移之间的关系。

（H）自由电荷的增减与其附近电流之间的关系。

这里总共有 20 个方程，包括 20 个变量[①]。

根据这些方程，麦克斯韦广泛地讨论了各种电磁现象，如场对运动载流导体、磁体以及带电体的机械作用力，静电效应的测量，电容器的静电容，电介质的介电常数；特别是从他的方程组直接推导出磁干扰传播的波动方程，证明了磁扰动的横波性质，并再次证明了这个传播速度就等于韦伯实验中的数值，它表示一个电磁单位所含的静电单位数。他写道：“这个速度与光的速度如此接近，因而我们有充分理由得出结论说，光本身（包括热辐射和其他辐射）是一种电磁扰动，它按照电磁定律以波的形式通过电磁场传播。”[②]

1873 年，麦克斯韦出版了《电磁通论》这部巨著，更彻底地应用拉格朗日方程的动力学理论，对电磁场理论作了全面、系统和严密的论述，以场作为基本概念使接触作用思想在物理学中深深地扎下了根，引起了物理学理论基础的根本性变革；这部著作的出版，继牛顿的《原理》之后，在物理学发展史上树立了又一座伟大的丰碑。

五、电磁波的检验

麦克斯韦理论所包含的深刻和新颖的思想，一时还难以被物理学家们所理解。要人们接受它，还需要有更强有力的证据。1870 年以后，亥姆霍兹尝试着去统一当时已有的诺伊曼、韦伯和麦克斯韦的电磁理论。通过几年的研究他发现，关键的问题是需要证明“位移电流”的存在。1879 年，柏林科学院以“用实验建立电磁力和绝缘体介

① 同上，第 556～557 页。

② 参看《物理学原著选读》，第 558 页。

质极化的关系”为题，设立了有奖征文，要求证明以下三个假设：①如果位移电流存在，必定会产生磁效应；②变化的磁力必定会使绝缘体介质产生拉移电流；③在空气或真空中，上述两个假设同样成立。这次征文，成为赫兹进行电磁波实验的先导。

赫兹（Heinrich Hertz，1857～1894）是亥姆霍兹的学生。在老师的影响下，他对电磁场理论作了深入的研究，认识到麦克斯韦的理论比起各种超距作用理论来说是更具优势的。所以，在柏林科学院奖设立之后，他一直在思考如何证明位移电流的存在。

在此之前不少人已经在这个方面作了一些工作。亥姆霍兹早在1847年已经得出结论：莱顿瓶的放电具有振荡的性质；1853年，W. 汤姆孙对这个现象给予了数学处理，建立了计算振荡频率的公式。1858年至1862年，费德森（B. Wilhelm Feddersen，1832～1918）通过放电火花在旋转镜里的像来观察这种振荡，1870年，贝佐尔德（Wilhelm von Bezold，1837～1907）用一个带有火花隙的线圈连接到有一个自由端的长导线上，导线上面放着一块均匀撒着石松子的玻璃，观察了导线上的电流驻波。他用莱顿瓶放电的方式给线圈输入振荡电流，经过线圈的选频再输入长导线，在导线中形成电流驻波。在驻波的影响下，玻璃上的石松子则形成疏密相间的图案，1883年，英国物理学家菲茨杰拉德（George Fitzgerald，1851～1901）根据W. 汤姆孙1853年的工作指出，放电的电容器可以作为电磁波的波源。但是，只是到了赫兹的手里，这些装置才成为研究自由空气空间中的电磁波的手段。

1885年，赫兹利用一个具有初级和次级两个绕组的振荡线圈进行实验，偶然发现当初级绕组中输入一个脉动电流时，次级绕组两端的狭缝中间便会产生电火花。调整两个绕组的相对位置，火花的大小也随之变化，在某些位置下次级绕组则不产生火花。赫兹立即想到，这可能是一种电磁共振现象；既然初级绕组中的振荡电流能够激起次级绕组的电火花，那么它就也能在邻近的介质中产生振荡的位移电流，这个位移电流又会反过来影响次级绕组的电火花发生的强弱变化。

1886年，赫兹设计了一种直线型开放振荡器：两根短直导线接近的内端形成火花隙，外端分别焊上金属板以增加电容。赫兹利用这个装置代替前述初级绕组，于同年12月成功地显示了直线电流引起的共振现象。

1887，赫兹在直线振荡器的基础上设计出了“感应平衡器”。他把一根导线弯成环状（如图7-5*C*所示），两端之间留有间隙，把它放在直线振荡器*AB*附近作为感应器。当将脉动电流输入*AB*并在间隙处跳过火花时，在*C*的间隙中也产生火花。

实际上这就是电磁波的产生、传播和接收的过程。赫兹将*C*的位置调整到它的火花隙不产生火花，这时再将一块金属*D*移近感应平衡器。由于*D*中感应出来的振荡电流产生一个附加电磁场作用于感应器*C*，使*C*的“平衡”状态遭到破坏，又重新在它的间隙处出现电火花。赫兹想到，直线振荡器中的振荡电流既然能使附近的金属产生

振荡的感应电流，那么按照麦克斯韦的理论，它也应当能使附近的介质交替极化而形成变化的位移电流，这种位移电流也可以反过来影响“感应平衡器”的平衡状态。赫兹利用沥青、纸、木头、硫磺、石蜡等绝缘物质进行实验，果然得到这种效应，从而确证了麦克斯韦的“位移电流”的存在。1887 年 11 月 5 日，赫兹以《论在绝缘体中电扰动所引起的电磁效应》为题，总结了这个重要发现，并获得了柏林科学院奖。

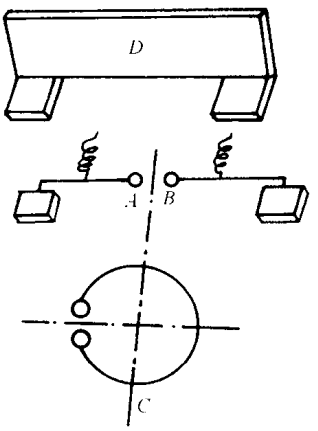


图 7-15　赫兹实验

赫兹的这一工作，解决了柏林科学院提出的前两项任务，并且实际上已经证明了电磁波的存在。但是赫兹却认为，第三条假设，即空气或真空中存在着极化和位移电流则更能体现出麦克斯韦电磁场理论的精华和实质，因此应该把目标放在对它的验证上。赫兹想到，只要证明了电磁波与光波的一致性，这个问题就得到了最后的解决。

1888 年 3 月，赫兹首先对电磁波的速度进行了测定。由于直接测定电磁波的速度是十分困难的，赫兹就利用电磁波形成的驻波测定相邻两个波节间的距离（半波长），再结合振荡器的频率计算出电磁波的速度。他在一个大屋子的一面墙上钉上一块锌皮，用来反射电磁波以形成驻波。在相距 13 米的地方用一个直线振荡器作为波源。赫兹用一个感应线圈作为检验器，沿驻波方向前后移动，在波节处检验器不产生火花，在波腹处产生的火花最强。赫兹利用这个方法测出了两个波节之间的长度，从而确证了电磁波的速度等于光速。这一成果载于他的论文《论空气中的电磁波和它们的反射》中。

接着，赫兹又成功地用金属面使电磁波作了 45°角的反射，用金属凹面镜使电磁波聚焦，用金属栅使电磁波发生偏振，以及通过用非导体材料制成的大棱镜使电磁波发生折射等等，从而证实了麦克斯韦光的电磁理论的正确性。

赫兹的工作给予麦克斯韦的理论以决定性的证明，这个理论至此才得到了人们的承认，麦克斯韦也被人们公认是“自牛顿以后世界上最伟大的数学物理学家”。

赫兹检验电磁波以后，电磁波的实用价值引起一些工程界人士的兴趣。经过多年的试验，俄国科学家波波夫（A. C. Попов，1859～1906）首先获得成功。1896 年，在一次科学会议上，他和助手一起表演了传送莫尔斯电码的无线电通讯实验，他们传递的电文是：“海因里希·赫兹”，通讯距离是 250 米。1899 年，意大利青年发明家马可尼（G. Marconi，1874～1937）后来居上，超过了波波夫。他成功地实现了英法海峡两岸之间的通讯。马可尼还开发了电磁波的商业应用，在海上救护等方面，无线电通讯显示了巨大的威力。1901 年，马可尼又成功地实现了跨越大西洋的无线电通讯，电磁波传递的莫尔斯电码清晰地在 3600 千米以外的大西洋彼岸被接收到。马可尼由于在

无线电通信技术方面的贡献获得了1909年的诺贝尔物理学奖。

电子管的发明使无线电技术得到飞跃性的发展，它们成为无线电通讯中的主要元件。1910年，美国出现了无线电广播。

六、麦克斯韦理论的发展

19世纪初光的波动说的复兴，为光以太学说的发展带来了新的生机。在发展电磁场理论时，麦克斯韦又提出了“电磁以太学说”，把具有力学性质的以太媒质看做是光和电磁现象的共同载体。赫兹关于电磁波存在的实验的成功，更被人们理解为是彻底证实以太媒质存在的决定性实验。这样，以太和原子便被列为宇宙组成的基本要素。于是，在赫兹实验之后，一些物理学家就纷纷提出各种各样的以太力学模型，试图以以太的某种力学结构，导出观察到的电磁现象。这些模型虽然不乏精巧之处，但大都具有一些令人难以理解的奇特性质，而且没有一个能够一以贯之地对各种物理现象做出首尾一致的正确解释。所以到了1900年前后，人们便渐渐认识到不能把以太理解为具有普通物质一般特性那样的东西，于是以太的力学理论便很快衰落下去，麦克斯韦理论所引进的电磁以太被逐渐看做是宇宙中的基本实体。

麦克斯韦理论形式的完备性问题，也引起了人们的讨论。他在1864年提出的电磁场方程组中，场量除了有 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{B}$ 之外，还包括了矢量势 $\boldsymbol{A}$ 和静电势 φ，他的第四个方程即“电动力方程”就是

$$\boldsymbol{E} = \mu[\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{H}] - \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} - \operatorname{grad}\varphi$$

这个公式表明，矢量势 $\boldsymbol{A}$ 是在时间中变化的，而标量势 φ 的传播似乎却是不需要时间的。所以在他的理论中，虽然矢量势 $\boldsymbol{A}$ 满足波动方程，它的变化是以有限的速度传播的，而标量势 φ 却是服从泊松方程的，它的变化是瞬时传播的。这样，公式就出现前后矛盾，存在着不相协调的地方。而且在这个理论体系中，$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{H}$ 等与 $\boldsymbol{A}$、φ 的地位也是不等同的，这带来了混乱。鉴于这种情况，赫兹在1884年，亥维赛（Oliver Heaviside，1850～1925）在1885年，分别对麦克斯韦方程组进行了简化，得到了与现在教科书上所写的十分相近的四个较为对称的矢量方程式。

1884年，赫兹在《论麦克斯韦电磁学基本方程组与对立的电磁学基本方程组之间的关系》一文中指出，麦克斯韦与力学中的动量概念进行类比而提出的“场论”概念“电磁场动量”，与诺伊曼超距论的“源论”概念矢量势 $\boldsymbol{A}$ 是等价的；不过诺伊曼的矢量势只是“电流”的函数。赫兹设想，如果麦克斯韦的电磁场理论与“源”的性质无关，那么从对称性的角度考虑，无妨也可以提出一个“磁流”的矢量势；如果能够从这两种矢量势推导出麦克斯韦方程组，那就可以把“场论”与“源论”统一起来。于

是赫兹依照诺伊曼的方法，依照“电流密度”概念引入了“磁流密度”概念，定义了一个形式上与“电矢势”$\boldsymbol{A}$相似的“磁矢势”$\boldsymbol{A}_m$，[①] 通过数学推导并消除公式中出现的两个矢量势，便得到了四个方程

$$\frac{1}{c}\frac{d\boldsymbol{H}}{dt} = -\nabla \times \boldsymbol{E}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{H} = 0$$

$$\frac{1}{c}\frac{d\boldsymbol{E}}{dt} = -\nabla \times \boldsymbol{H}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = 0$$

这四个方程比起麦克斯韦的八个方程来，形式上更为简洁，也更加突出了电与磁的对称性；这个结果还从“源论”的角度证明了电磁场的电动力学性质与“源”无关，因而更加显示出“场论”观点的正确性。

亥维赛对电与磁之间的对称性抱有坚定的信念，他希望通过对麦克斯韦方程组的修改，清晰地反映这种对称性。这就要求把麦克斯韦引入的电磁场动量$\boldsymbol{A}$从方程组中消去，只剩下基本的场量电场强度$\boldsymbol{E}$和磁场强度$\boldsymbol{H}$，以及与他们成线性关系的电位移矢量$\boldsymbol{D}$和磁感应强度$\boldsymbol{B}$。1885 年他引进了旋度 curl、散度 div、梯度 grad 等符号和用黑体字母表示矢量的方法，根据对称性考虑得出了两个完全对称的散度方程[②]

$$\mathrm{div}\boldsymbol{D} = 0$$

$$\mathrm{div}\boldsymbol{B} = 0$$

在麦克斯韦方程组中，两个旋度方程是不对称的，因为在磁场强度的旋度方程中存在一个传导电流项j。为此亥维赛在电场强度的旋度方程中也加进了一个磁流项j_m。于是两个旋度方程便可写为

$$-\mathrm{curl}\boldsymbol{E} = j_m + \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

$$\mathrm{curl}\boldsymbol{H} = j_e + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}$$

引入“磁导流”（magnetic conduction current）纯粹是一种形式化的东西，就连亥维赛本人对它的存在也抱怀疑态度，他也没认真讨论消去矢量势$\boldsymbol{A}$这件事的重大意义。但亥维赛的工作，却把纷繁杂多的电磁学量简化为电力和磁力，并在整个电磁学领域里显示了电和磁的二重性，使所有的方程对称起来。

赫兹在他 1890 年的论文《静止物体的电动力学基本方程组》中，批评了麦克斯韦理论中超距作用论的残余，诸如“电势”概念的混乱以及力$\boldsymbol{E}$的存在引起媒质中的电位移$\boldsymbol{D}$等。他认为，法拉第和麦克斯韦等人的工作，都是建立在对以太构造的某些推测的基础之上的，这是缺乏根据的。因此他认为最好是把麦克斯韦方程式本身作为理

---

① 宋德生、李国栋，《电磁学发展史》，广西人民出版社，1987 年，第 323～324 页。

② O. Heaviside, Electrical Papers, Macmillan, London, Vol. 1 (1892), pp. 429～449.

论的出发点，正如他后来所说："所谓麦克斯韦理论就是麦克斯韦的一组方程式。"[1] 这样，他便在他 1884 年工作的基础上，吸收了亥维赛的思想，把 E 和 H 作为基本量，把它们的两个散度方程和两个旋度方程作为公理规定为四个基本关系式。这样，麦克斯韦方程组的最简单的微分对偶形式基本上便确定下来；麦克斯韦理论完美的对称性质——电场和磁场的对称性，空间和时间的对称性——在美学上也充分显示了出来。

思 考 题

1. 静电力作用的平方反比定律是如何建立的？
2. 伽伐尼-伏打电流是如何发现的？
3. 欧姆定律是如何建立的？
4. 电流磁效应的发现有什么重要意义？
5. 安培是如何得到安培定律的？
6. 简述法拉第电磁学研究的主要成就。
7. 麦克斯韦建立电磁场理论的基本思考线索是什么？

---

[1] 广重彻，《物理学史》，上海教育出版社，1986 年，第 282 页。

第三篇　现代物理学

第八章　实验上的新发现与现代物理学革命

到19世纪末，历经近300年的发展，经典物理学已达到了完整、成熟的阶段。由于经典物理学的巨大成就，当时不少物理学家产生了这样一种思想：物理学的大厦已经建成；物理学上的基本的、原则的问题都已经解决；剩下来的只是进一步精确化的问题，即在一些细节上作些补充和修正，使已知公式中的各个常数测得更加精确一些。正当物理学家们为庆贺物理学大厦的落成啧啧叹赏之际，19世纪末，在实验上却发现了一系列经典物理学无法解释的事实。这些事实与经典物理学的基本概念以及一系列基本规律产生了尖锐的矛盾，从而引起了物理学的一场伟大的革命，导致了现代物理学的诞生。

第一节　从阴极射线研究到电子的发现

在19世纪末和20世纪初的一系列新发现中，电子的发现、X射线的发现和放射性现象的发现具有根本的意义，被人们称为世纪之交物理学的三大发现，而它们的发现起源于对阴极射线的观察与研究。

一、阴极射线的研究

阴极射线的发现可以追溯到18世纪对电现象的认识和19世纪对放电现象的研究。18世纪中叶，人们曾提出过“电流质说”；18世纪末、19世纪初动电发现后，“电流质说”已为人们所普遍接受，即认为电流是一种没有机械重量的流质；在麦克斯韦电磁场理论建立之后，人们又把电现象看做是连续以太中的应变产生的；液体和气体导电现象的研究，促进了对电本质的认识。

早在1834年，法拉第已发现了电解当量定律。尽管法拉第本人坚持电的流体说，但是，这个定律却是基本电荷存在的有力证据，使不少物理学家受到启示，产生了电的“原子性”的观念。

1853年，希托夫（Johann Wilhelm Hittorf，1824～1914）在研究离子迁移率时，就运用了电的原子性观念；1874年，斯通尼（G. J. Stoney，1826～1911）根据法拉第电解定律，主张把电解中的一个氢离子所带的电荷作为一个“基本电荷”，并认为任何电荷都是由一些“基本电荷”组成的。

1881年，德国物理学家亥姆霍兹在一次演讲中提到法拉第电解定律的意义时说：

“法拉第定律最令人惊异的结论也许是这样：如果我们接受元素物质由原子组成的假说，就不可避免地要做出结论说，电，不论是正电或负电，都可分成单元，其行为如同电的原子一样。”

在此之前，1871 年，德国物理学家韦伯在解释安培的分子电流假说时，曾提出一个很接近现代观点的原子结构模型。1878 年后，拉摩（Joseph Larmor，1857～1942）和洛伦兹（Hendrik Antoon Lorentz，1853～1928）在创立的“电子论”中，也曾赋予物质中电荷的负荷体以一个基本的电量。1890 年，斯通尼引入“电子”（electron）来表示负的基本电荷的负荷体。

应该指出的是，此时，人们还并不清楚电的物质基础。

低压气体放电的研究进一步促进了对电的本质的认识。低压气体放电现象早在 17 世纪就被观察到了，直到 19 世纪，为了解决新的电光源问题，促进了真空技术的发展，为气体放电的研究创造了条件。1838 年，法拉第发现，“空气的稀薄极其有利于辉光现象”，在阴极和阳极辉光之间“总有一个暗区”（这个暗区后来被称为法拉第暗区）。由于法拉第当时所能获得的真空只有千分之七个大气压，所以他没有能做出更多的发现。

真空放电现象研究的实质性进展是由普吕克（Julius Plücker，1801～1868）于 1858 年做出的。他利用盖斯勒放电管研究气体放电时发现了阴极射线。盖斯勒（Heinrich Geissler，1814～1879）利用托里拆利真空原理制造了水银真空泵，并制造出了可达万分之一个大气压的低压气体放电管。早在 1821 年，戴维曾发现电弧光焰受磁场偏转的现象。普吕克由此得到启发，他将磁铁靠近真空管进行试验。1859 年他报告说，在放电管对着阴极的管壁上看到了绿色荧光，在磁铁的影响下，荧光光斑的位置会发生移动。1869 年，普吕克的学生希托夫进一步将真空管的真空度提高到十万分之一个大气压。用点状的阴极发出阴极射线，并在阴极和阳极之间放置障碍物进行试验，在产生荧光的管壁上就会出现障碍物的清晰的影子，这就证明了阴极射线是直线传播的。1871 年，瓦莱（Cromwell Fleetwood Varley，1828～1883）根据阴极射线为磁场偏转的事实，提出阴极射线是由带负电的“粒子”组成的假说。

1876 年，德国物理学家哥尔德斯坦（Eugen Goldstein，1850～1930）用各种材料做成各种形状、大小的阴极进行实验，证实这种射线是从阴极表面垂直发出的，阴极射线的性质与材料无关。他把这种射线命名为“阴极射线”。哥尔德斯坦还认为，阴极射线和紫外线没有什么区别，他把阴极射线看成是以太的某种振动。他所以得出这样的结论，是由于他曾做了这样一个实验：他把阴极做得很大，而在阴极和阳极间放置的障碍物又很小，结果发现管壁上出现了障碍物边缘模糊的阴影。因此，他认为辉光似乎是阴极射线的光的散射效应。

1879 年，英国的克鲁克斯（William Crooks，1832～1919）制成了高真空的“克鲁克斯管”，其真空度达到了百万分之一个大气压。他利用这种真空管做了一系列实验，首次批判了阴极射线是以太振动的观点，支持和发展了瓦莱的带电微粒说。他在真空

管的阴极和与它相对的玻璃壁之间，放置一个用云母片做成的“马耳他十字架”，通电后在玻璃壁上可观察到边界清晰的十字架的阴影；他把一块磁铁移近真空管，十字架阴影就会发生移动；他还在真空管中安上一水平玻璃轨道，并在轨道上放置一个插有云母翼片的风轮，当用阴极射线照射风翼时，轮子就会转动起来。克鲁克斯根据这些事实认为，阴极射线是由带负电的“分子流”（molecular current）组成，是管中残留气体分子碰到阴极上，从阴极得到了负电荷而形成的“分子流”。他称这种带电的“分子流”为物质的第四态。

1894 年，德国的勒纳德（Philipp Lenard，1862～1947）发表了他的“铝窗”实验。在最初研究阴极射线时，勒纳德曾经设计实验，观察阴极射线是否能像紫外线一样通过放电管壁的石英窗。他发现阴极射线不能穿过。后来，受到赫兹的一个实验的启发，他想到用来封闭放电管的石英板可以用一块铝箔代替，铝箔的厚度要可以使管内保持真空，但又要薄到能让阴极射线通过。这样就能研究阴极射线在放电管外引起的荧光现象。勒纳德发现，阴极射线在空气中传播的距离大概是几厘米的量级。

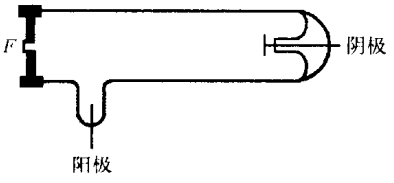


图 8-1　勒纳德的“铝窗”

“阴极射线到底是什么?”这个问题引起了科学家们的很大兴趣，围绕这个问题出现了一场争论。有趣的是，这场争论几乎是以国界划分的。在德国以赫兹为首的多数物理学家（亥姆霍兹除外）都认为阴极射线是一种电磁波，即类似于紫外辐射的“以太的某种表现”。哥尔德斯坦、韦德曼（Gustav Heinrich Wiedemann，1826～1899）、勒纳德等都支持这种观点。在英国和法国以英国物理学家克鲁克斯为主的大多数物理学家则坚持认为阴极射线是带电的粒子流，瓦莱、开尔文、佩兰（Jean Baptiste Perrin，1870～1942）、J. J. 汤姆孙等人都支持粒子说。这一争论持续了一二十年，促使人们进行了许多很有意义的实验，推动了物理学的发展。

二、X 射线的发现

X 射线的发现起源于对阴极射线的研究。

德国物理学家伦琴（Wilhelm Konrad Röntgen，1845～1923）为了探明阴极射线的性质，重复做了赫兹、勒纳德等人的实验。1895 年 11 月 8 日晚，为了防止外界对放电管的影响，同时也不使管内的可见光线漏出管外，他用黑纸板把放电管完全包了起来，房间也是完全遮光的暗室。实验时，他意外地发现在一米以外的涂有亚铂氰化钡的荧光屏发出了微弱的荧光。这一现象使他十分惊奇。他全神贯注地继续进行实验：把屏反转过来，使没有涂氰化钡的一面朝着管子，屏仍然发出荧光；将屏逐渐移远，即使移到远离管子两米以外，仍有荧光，只是稍弱一些而已。那时已经查明，阴极射线在

空气中只能穿过几厘米，而在远离管子两米以外的屏上仍有荧光，所以，伦琴确信这种现象是无法用阴极射线的性质来解释的。

伦琴确信他已经发现了一种新的射线，为了进一步研究这种射线的性质，他连续6个星期吃住在实验室，废寝忘食地用各种方法反复进行实验。他发现，这种射线能穿透千页的书、2～3厘米厚的木板、几厘米厚的橡胶板、15毫米厚的铝板等等。这表明这种人眼看不见的射线具有很强的穿透能力，但对不同物质的穿透程度是不同的。1.5毫米厚的铅片几乎就能完全把这种射线挡住。当他进一步用铅片进行实验时，又意外地发现了自己手的骨骼的图像。12月22日，伦琴的夫人到实验室来，伦琴为她拍摄了一张戴着戒指的左手的照片。

1895年12月28日，伦琴将他一个多月悉心研究得到的结果写在《论一种新的射线》的论文里，递交给了维尔茨堡物理学医学学会。文章记述了实验的装置及方法，并初步总结出新射线的以下性质：

新射线来自于被阴极射线击中的固体，固体元素越重，产生出来的新射线越强；

新射线是直线传播的，不被棱镜反射和折射，也不被磁场偏转；

所有物体对新射线几乎都是透明的；

新射线可使荧光物质发光，使照相底片感光，能显示出装在盒子里的砝码、猎枪的弹膛和人手指骨的轮廓。

1896年元旦，伦琴将他的论文和用X射线摄制的第一批照片的复制件寄给了著名物理学家玻尔兹曼、开尔文、庞加莱等人。1月4日，沃伯格（E. Warburg）在柏林物理学会的一次会议上展出了几张照片。1月5日，维也纳《新闻报》第一个做了报导。

X射线这个名称是伦琴最先采用的。他在给孔特（August Kundt，1839～1894）的信中说："我终于发现了一种光，我也不知道是什么光……无以名之，就把它叫做X光吧。"后来，人们为了纪念他，又称为"伦琴射线"。1901年，伦琴成为第一个诺贝尔物理学奖的获得者。

伦琴发现X射线是有一定的偶然性的，但是，只有有心而细心的观察者，才可能利用这种偶然性做出重大的发现。在伦琴之前，克鲁斯克、勒纳德等人都曾碰到过阴极射线管附近的照片底片感光或物体发出荧光的现象，但是，他们都没有抓住发现的"机遇"。

三、天然放射性的发现

X射线的发现很快导致了天然放射性现象的发现。

由于当时发现X射线来自于玻璃管壁的荧光部分，因而就使一些物理学家产生了这样的想法：X射线可能来源于荧光或磷光物质。首先进行这项实验的是法国物理学家贝克勒尔（Henri Antoine Becquerel，1852～1908）。1896年1月21日，他开始研究有

哪些荧光物质能产生X射线，做了一些实验，但没有得出什么结果。1896年1月30日，庞加莱（Henri Poincaré，1854～1912）在法国《大众科学杂志》上发表了的一篇关于X射线的文章，文章提出“是不是所有荧光足够强的物体，不管它的荧光起因如何，都能发射可见光又发射X射线?”贝克勒尔再次进行实验。他恰巧选择了硫酸钾铀酰做实验材料，他用两张厚黑纸包住照相底片，在纸包上放一层磷光物质——铀盐，再放在日光下曝晒几小时，然后把底片取出来进行冲洗。他发现了“磷光物质在底片上的黑色轮廓”。他又在磷光物质和纸之间放一块玻璃，继续进行实验，也得到了同样的结果。于是，贝克勒尔在2月24日向科学院作报告说：“磷光物质射出能穿透不透光的纸的辐射”。

会后，贝克勒尔继续进行实验，正巧遇到一连几个阴天，他只好把准备好的铀盐和底片一起放进抽屉。3月1日，他本想预先检查一下底片质量是否完好再进行实验，但冲洗后，发现底片上已明显感光，有一个很深的黑色的铀盐的影子。面对这一情况，贝克勒尔很快得出结论，这种使照相底片感光的射线与磷光无任何因果联系，而是铀盐本身发出的一种神秘的射线。第二天，他在科学院举行的例会上公布了这一重大发现。他说：“因为太阳几天都没露面，所以我在3月1日才把照相底片显影，本指望看到非常微弱的影像。但恰恰相反，一个极深的黑色轮廓出现了。我立刻想到这一反应可能在黑暗中也能进行。”

贝克勒尔集中精力对铀元素和铀的化合物进行研究，进而发现，铀盐所发出的射线不仅能使照相底片感光，它还能像X射线一样穿透几乎一切物质，能使气体电离。他还发现，温度的变化、放电等对放射现象都没有影响，各种铀的化合物都具有这一性质，纯铀所产生的辐射比他所用的硫酸铀盐的辐射强3～4倍。于是，在1896年5月18日，贝克勒尔宣布：发射穿透射线的能力，是铀的一种特殊性质，而与采用哪一种铀化合物无关，它完全不受外界条件的影响，它的强度似乎也不随时间衰减。贝克勒尔认识到这是一种与X射线不同的、穿透力很强的另一种辐射，他称为铀辐射，别人把它称为“贝克勒尔射线”。

居里夫妇将贝克勒尔的工作推向深入。皮埃尔·居里（Pierre Curie，1859～1906）是一位有成就的物理学家和化学家。他和他的兄长一起研究晶体物理，发现了压电效应，后来他们利用压电石英发明了一种进行很小电量绝对值测量的仪器，他还创制成非常灵敏的非周期天平。这些仪器在居里夫妇研究放射性的工作中都起了重要的作用。他还对物体在不同温度下的磁性做了大量系统研究，得到了关于物质磁性的“居里定律”，在现代磁学发展中具有划时代的意义。

玛丽·斯可罗多斯卡·居里（Maria Sklodowska Curie，1867～1934）原是波兰人，1891年到法国巴黎求学。她生活贫穷简朴，由于刻苦学习，成绩特别优秀，获得奖学金才得以继续完成学业。1892年取得了物理学硕士学位。1894年，皮埃尔·居里与玛丽·斯可罗多斯卡（就是后来的居里夫人）相识，于1895年结为夫妻。

1897 年，居里夫人决定选择贝克勒尔射线作为博士论文研究课题。在对铀盐的放射强度进行测量之后，居里夫人提出了一个有重要意义的问题：是否还有别的元素也具有这种性质。于是，她系统地研究了当时已知的各种元素和化合物。在放射性的测量中，她采用了居里兄弟创制的石英晶体压电秤等精密测量仪器，测量放射性物质使空气电离产生的微弱电流，代替贝克勒尔用验电器来测量的方法，获得了大量物质放射性相对强度的准确数据。1898 年，在贝克勒尔的发现 2 年以后，居里夫人发现钍也具有和铀同样的性质，德国科学家施米特（G. C. Schmidt，1856～1949）在德国也做出了同样的发现。居里夫人建议把这种性质叫做“放射性”。

在对铀和钍的混合物进行测量时，居里夫人观察到有些铀和钍的混合物的放射性辐射强度比其中铀和钍的含量所应发射的强度高很多。她认为这些矿石中必定含有少量还没有被发现的化学元素，而且这种元素是具有放射性的。皮埃尔·居里意识到这一研究的重要性，放下自己的研究课题，和居里夫人一起投入到寻找新元素的艰巨的化学分析工作中。后来他们的实验结果证实，沥青铀矿中确实含有新的放射性元素，但是它们的含量甚至还没有达到百万分之一！他们所采用的研究方法，是建立在放射性基础上的一种新的化学分析方法。首先用普通的化学分析法将组成沥青铀矿的各种物质分开，然后在适宜的情况下，测量已经分开的各种物质的放射性，用这种方法可以观察到要寻找的放射性元素的化学特性。因为随着分离过程的进行，这种元素会逐渐浓缩起来，因而放射性就会变得越来越强。1898 年 7 月，他们宣布发现了一种放射性元素，为了纪念玛丽·居里已被俄国占领的祖国波兰，他们将这种元素命名为钋。1898 年 12 月，他们又宣布了镭的发现。钋是和铋伴随在一起的，而镭是和钡伴随在一起。

要让化学家承认这两种新元素的存在，必须将它们分离出来。然而，居里夫妇所得到的最具放射性的物质中（放射性比铀强几百倍），所含的钋和镭的成分还是极其稀少的，要完成分离工作必须拥有大量的沥青铀矿，要有一个合适的工作地方，还要进行大量繁重的提取分离工作和精细的测量工作。在维也纳科学院的帮助下，他们以优惠的价格从奥地利购得了几吨沥青铀矿残渣。在皮埃尔·居里当时工作的巴黎理化学院的院子里，有一个遗弃的储藏室，他们就在这里开始了提炼工作。到 1902 年，经过 45 个月艰苦繁重的劳动，在数万次的提炼之后，他们从几吨沥青铀矿渣中提炼出了 0.12 克的氯化镭，初步测定了镭的原子量是 225，它的放射性比铀强 200 多万倍。

1903 年，贝克勒尔和居里夫妇因在发现天然放射性现象方面所做出的重大贡献而分享了这个年度的诺贝尔物理奖。

后来，居里夫人又用 3 年的时间，成功地提炼出了纯镭，从而确信无疑地证实了镭元素的存在。居里夫妇对放射性射线的作用，如发光作用，化学作用和生物医学作用进行了研究，还研究了磁场对镭射线的作用等。纯镭是一种发亮的金属，它能不断地自发释放热量，使近旁的空气电离，使许多物质发出荧光，透过黑纸使照相底片感

光，还能杀死细菌和某些纤维植物。居里夫人用实验测知，1 克镭 1 小时内能发出 567 焦的热量，远大于普通化学反应释放的能量。1911 年，由于“发现化学元素镭和钋；确定了镭的特性并分离出纯金属镭；最后，研究了这个著名元素的化合物”，居里夫人赢得了诺贝尔化学奖。

镭的发现进一步促进了人们对放射性现象的研究。1899 年，贝克勒尔使用居里夫妇提供的镭样品，发现镭发射出的射线能被磁场偏转；卢瑟福(Ernest Lord Rutherford，1871～1937) 等人通过实验发现，天然放射性的射线是由几种不同的射线组成的，其中有两种带电的射线：一种是带正电的射线；一种是带负电的射线。卢瑟福把它们分别命名为 α 射线和 β 射线。1900 年，法国化学家维拉德 (Paul Villard，1860～1934) 又发现，镭还有不带电的第三种射线，它被叫做 γ 射线。

从 1902 年冬到 1903 年春，卢瑟福和索第 (Frederick Soddy，1877～1956) 在实验基础上形成了这样的观念：“任何一个放射性过程都伴随着元素的蜕变”。放射性元素的蜕变使传统的元素不变的观念受到了巨大的冲击。

四、电子的发现

关于阴极射线是以太的振动还是粒子流的争论，最后由 J. J. 汤姆孙做出了正确回答，1897 年，他发现了电子。

J. J. 汤姆孙 1856 年出生于英国的曼彻斯特，1880 年在剑桥大学取得学士学位，并获得第二个数学荣誉学位，同年成为剑桥大学三一学院的研究生。1883 年任该院的讲师，第二年接替瑞利 (Lord Rayleigh，1842～1919) 任卡文迪什实验室教授。这个实验室在他的领导下，成了引人注目的世界物理实验中心，世界各地的科学家常到这里来开展研究工作，先后有七位获得诺贝尔奖。

1886 年，汤姆孙开始对气体放电和阴极射线进行划时代的探索。1897 年，他完成了著名的实验，测定了阴极射线的电荷与质量的比值 e/m (后来被称为电子的“荷质比”)。

1895 年，佩兰曾用如图 8-2 所示的实验装置进行实验，支持阴极射线是带电的粒子流。阴极射线从阴极 C 射出，经过小孔 H 进入到阳极内的金属筒 (法拉第筒) F 上，再用静电计检测电量及其正负，实验证明是负电。对于这个实验，坚持阴极射线是以太振动说的人认为，即使阴极发出的是带负电的微粒，但它同阴极射线路径相同的证据并不充分。

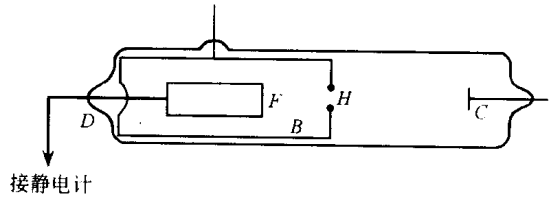


图 8-2　佩兰测量阴极射线电荷的装置

1897 年，汤姆孙对佩兰的上述实验装置作了改进，他把阴极和金属筒 (法拉第筒) 分别放在各自的玻璃管内，只在两个玻璃管的接合处留一狭缝 (图 8-3)。不加磁

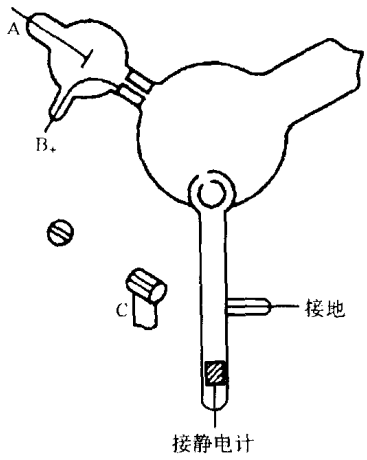


图 8 3　J. J. 汤姆孙改进佩兰实验的装置

场时，没有电荷进入金属筒，当加上磁场并达到某一量值时，金属筒接收到的电荷将猛增。由此证明了阴极射线和带负电荷的粒子在磁场作用下遵循同样的路径，即证明了阴极射线是带负电的粒子组成的。

1897 年，汤姆孙采用以下两种方法，测定了阴极射线“微粒”的速度和荷质比 e/m。

第一种方法是：让阴极射线通过一条狭缝进入法拉第筒，测算电量、能量，并用磁场使其偏转，测算轨道半径，以求得“微粒”的速度和它的荷质比 e/m。

设微粒的质量为 m，微粒的速度为 v，微粒所带的电量为 e，N 为一定时间内进入法拉第筒内的微粒数。显然，法拉第筒所获得的电量为

$$Q = N e$$

若进入法拉第筒内的微粒的动能因碰撞全部转变成热能，则微粒流的动能的大小可由温度计温度变化测算得到，并且其量值应为

$$W = N \cdot \frac{1}{2} m v^2$$

然后，用磁场使射线偏转，以 R 表示微粒轨道的曲率半径，则有

$$Hev = m v^2 / R$$

由以上三式不难得到

$$\frac{e}{m} = \frac{2W}{H^2 R^2 Q}$$

J. J. 汤姆孙用这样的方法测得：

$$v \sim 5 \times 10^9 \text{厘米/秒}$$

$$e/m \sim 2 \times 10^7 \text{电磁单位/克}$$

第二种方法是：利用静电场和磁场使阴极射线发生偏转。先加上一定强度的电场使射线向一方偏转；然后再加一垂直磁场，使射线向相反方向偏转，调节磁场强度使光斑回到原来的位置，通过测算即可求出 v 和 e/m。

1893 年，赫兹曾试图利用静电场使阴极射线发生偏转，但未成功。汤姆孙发现，这是由于真空管的真空度不够高，引起管内残余气体电离，静电场建立不起来所致。汤姆孙得到了工艺师埃佛勒特（E. Everett）的帮助，提高了放电管的真空度，用图 8-4 所示的装置进行实验，获得了成功。他用这样的方法测得

$v \sim 2.7 \times 10^9$ 厘米/秒

$e/m \sim 0.8 \times 10^7$ 电磁单位/克

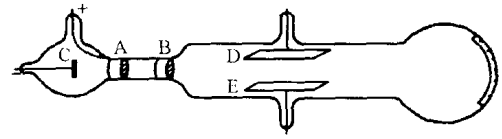


图 8-4　J. J. 汤姆孙测量荷质比的实验装置

在诺贝尔奖演讲《负电的载荷者》中，汤姆孙总结了他的研究和思考过程。[1] 他指出：通过对实验结果的认真的分析，对于粒子的速度，可以得到，“在真空度极高的管子中，粒子的速度可能是光速的1/3，或大约是60 000英里/秒；如果真空度不很高，速度不会大于50 000英里/秒。但是不论怎样，在真空管中产生的阴极射线，其速度要比我们已知的任何其他运动物体的速度都大得多，例如，比氢分子在常温或在任何能实现的温度下运动的平均速度大数千倍。”对于粒子的e/m，“不论射线是怎样产生的，对射线中的全部粒子来说，我们得出相同的e/m。例如，改变放电管的形状和管中气体的压力，我们可使粒子的速度发生很大变化，但是e/m值不变。”汤姆孙还给放电管分别充以各种气体，并用铅和铁等不同金属做电极进行实验，所得e/m值都大致相同。

这样，汤姆孙就大胆指出：“粒子是广泛分布的，但不论在何处发现，它总是保持其个性，e/m值总是等于某一常数。不论物质所处的条件是多么不同，看来粒子是各种物质的组成部分。因此粒子很自然地被认为是建造原子的基砖。”

于是，汤姆孙得出结论说：阴极射线是由同样的带电微粒组成，而这种微粒是一种小粒子，它是各种原子的组成部分。这样，J. J. 汤姆孙做出了电子的发现。1897年8月，J. J. 汤姆孙把他的发现写成长篇论文《阴极射线》，10月发表在《哲学杂志》上。

为了证实基本电荷的存在，在测出e/m之后，还要测出e值。J. J. 汤姆孙的研究生汤森德（J. S. Townsend）、H. A. 威尔逊、C. T. R. 威尔逊等和其他一些人都做出了重要的贡献。对e值最有说服力的测定是罗伯特·密立根（Robert Millikan，1868～1953）在1912～1917年间利用油滴实验做出的。

密立根早在1906年重复H. A. 威尔逊的实验时，就测得了$e\approx 4.03\times 10^{-10}$静电单位。1913年，他利用油滴实验测得$e=(4.774\pm 0.009)\times 10^{-10}$静电单位。后来，他又不断改进和重复进行测量，1917年公布的结果为$e=(4.770\pm 0.009)\times 10^{-10}$静电单位。于是，由荷质比可求得电子的质量为

$$m_e = 1/1830\ m_H$$

即为氢原子质量的1/1830倍。

第二节　“以太漂移”的探索

一、以太观念的兴起

在物理学思想的发展中，“以太”（ether）是作为一种特殊物质被引进物理学的。17世纪，法国科学家笛卡儿为了解释物体之间的作用力，特别是万有引力现象，最先赋

---

① J. J. 汤姆孙著，宋玉升等译，负电的载荷者，见《诺贝尔奖获得者演讲集　物理学（第一卷）》科学出版社，1984年，第132～139页。

予了以太以某种力学性质。在他看来，空间被以太这种连续的媒质所充满，物体之间的所有作用力都是通过以太的应变和运动来传递的，不存在任何超距作用。当胡克和惠更斯提出光的波动说时，以太又充当了光波的载体。因为按照当时的力学理论，任何波动都是某种媒介物质的力学振动的传播。由于光可以在真空中传播，因此以太必然是充满全部空间的，包括真空和对于光是透明的各种物体之中。

19 世纪初以来，随着光的波动说的复兴，作为传播光波的媒质，以太又成为物理学所不可或缺的一种“客观实在”。法拉第把以太看作是力线的荷载体；而麦克斯韦则设想用以太的力学运动对电磁现象作出解释。他所提出的光的电磁理论，又把产生电磁现象的媒质和光以太统一起来。在电磁波以光速传播的预言被证实后，以太的存在便在物理学界获得了广泛的承认。

为了解释光和电磁现象，必须赋予以太一些奇妙的性质。在 19 世纪，人们提出了各种各样的以太模型，但都无法摆脱以太的神秘色彩。仅仅从参照系的观点看来，如果光是在以太中的传播过程，相对于静止的以太，光或电磁波的传播速度必是各向同性的。事实上，在麦克斯韦的电磁学方程组里就出现一个常数 c，它表明电磁波在真空中总是以不变的速度 c 向各个方向传播，是各向同性的。但是按照经典的速度合成法则，相对于以太静止和相对于以太运动的两种参照系，或者更广义地说在不同的惯性系中，光或电磁波沿不同方向的速度就会出现明显的差别，不会是都等于 c 的。若如此，就应该存在一个特殊的参照系，在这个参照系里，麦克斯韦方程组才取标准形式，而对于其他参照系，麦克斯韦方程组都不应成立。这就是说，对于电磁现象的研究，可以定义一个最优惯性系，即相对于以太静止的参照系。人们认为，这实际上就是牛顿的“绝对空间”，而且利用在静止以太中以恒定速度传播的光信号，又可以确定出在宇宙中一切地点都同步的“绝对时间”。这样，充满整个宇宙的绝对静止的以太，就成了牛顿绝对时空观的物质框架。因而通过“以太漂移”的实验探索以太的存在状态，就成了非常重要的问题。

二、“以太漂移”的早期观测

既然以太是充满整个空间和物体之中的，那么运动物体是否对以太有影响，也就是说以太是否会被运动物体所拖曳，是全部拖曳、部分拖曳还是根本不拖曳？在“以太漂移”的观测和研究中，产生了许多令人困惑的难题 。

1728 年英国天文学家布拉德雷（J. Bradley，1693～1762）所发现的“光行差”现象，可以看做是关于“以太漂移”的早期观测。他发现从地球上观测一颗遥远的恒星，在地球的绕日公转周期内，望远镜的方向也作相同周期的改变。只要简单地把地球公转的速度 v 和光速 c 作矢量加减，便可得出恒星实际方位和视在方位的角度差别，即望远镜应向地球运动的方向倾斜一个角度 α，而且

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{v}{c}$$

这个计算结果与实际观测完全符合。光行差现象意味着，太阳相对于以太是静止的，地球则以绕日公转速度 v 在以太海洋中穿行，丝毫不对以太有拖曳作用。因为如果以太被地球拖曳着一起运动，那么望远镜镜筒里装着的将是相对静止的以太，望远镜也就不需要沿地球运动的方向倾斜了，光行差现象也就不会出现了。

但是，如果以太完全不被地球拖曳，运动着的地球就应当感到有“以太风”，这种以太风将会对从不同方向射到地球的星光产生不同的影响，这些速率不同的光线就会在通过望远镜的玻璃透镜时呈现出不同的折射率。从这种考虑出发，1810 年法国科学家阿拉果用望远镜观察来自不同方向恒星光线，企图发现由“以太风”的作用而产生的这种效应，却意外地得出了否定的结果。

1818 年，菲涅耳在得知阿拉果的结果后，写信给阿拉果提出了部分拖曳假说。他指出，只要假设以太有确定的一部分被运动物质曳引，就可以同时使布莱德雷和阿拉果的实验得到解释。他假设，整个宇宙空间的以太是静止着的，在以太中运动着的透明物体，本身并不拖曳着与真空中密度相同的这部分以太一起运动。但是，透明物质按其折射率 n 的大小，吸收了比真空中更稠密的以太，超过真空密度的这部分以太，将被透明物质拖曳着一起运动。菲涅耳假设，介质内的以太密度同它的折射率 n 的平方成正比，因此，介质内超出真空的那部分以太的密度应该同 n^2-1 成比例，这超出部分占介质内以太总数的份额便是

$$\frac{n^2-1}{n^2} = 1 - \frac{1}{n^2}$$

这就是菲涅耳的“曳引系数”。因此，对于以速度 v 运动的、折射率为 n 的介质中的光速 c'，就有菲涅耳公式

$$c = \frac{c}{n} \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v$$

$\frac{c}{n}$ 为静止介质中的光速，后一项即“曳引”项，在真空中，由于 $n = 1$，曳引系数为零，就回到了布莱德雷的条件。菲涅耳还指出，即使在望远镜中装满了水，从而使望远镜内光速的大小改变了，也不会影响到所观察的光行差的数值。1871 年，英国天文学家艾里（G. B. Airy，1801～1892）用充水的望远镜测量了光行差，证实了菲涅耳的预言。

1851 年，法国物理学家菲索（A. H. L. Fizeau，1819～1896）设计了一个实验，用干涉方法测定流水中的光速，以检验光在运动的透明物体中的速度是否发生变化。他让一束单色光经半镀膜玻璃片的反射与透射分为两束相干光，让它们沿相反方向被反射镜反射沿一闭合路线再会聚到一起产生干涉条纹。在行进中一束光穿过同向流动的水，另一束光则逆向穿过这同一水流。实验开始时令水速为零，两束光由于光程相同而形成明亮干涉条纹。然后让水流速度逐渐增大，确实观察到了干涉条纹发生了明暗

交替的变化。菲索在论文中写道："假如水流的速度为 2 米/秒时，就可以明显看到干涉条纹的位移，所以让水流速度在每秒 4～7 米的范围内变化，测得准确的条纹位移是不成问题的。"他测得曳引系数为 0.46，与菲涅耳的理论值 0.40 很接近。他说："如果考虑到水速的测量不十分准确，再加上水在管中的流速不十分均匀，实验的结果还是可靠的。"所以，菲索的实验以及后来的改进型的实验，都证实了菲涅耳的以太部分拖曳假说。

由于实验中物体的运动速度 v 比真空光速 c 过小，所以菲涅耳当时就断言，只在 v/c 的一阶效应范围内，任何实验都不可能发现物体相对于以太的运动速度，即感觉不到"以太风"。这样一来，本来在以太模型里相对于以太静止的优越参照系的特殊性，却在 v/c 一阶效应范围内被湮没了。因而光学现象只与物体的相对运动有关，即各个惯性系对光学现象的描述都是等价的这一"光学的运动相对性"，竟是由于以太的特别性质而偶然造成的，并不具有像力学的相对性原理那样的原则意义。

与菲涅耳相反，英国物理学家斯托克斯（G. G. Stokes，1819～1903）却不相信物体可以在以太中自由穿行而不生扰动。他于 1845 年提出了以太被运动物体全部拖曳的假说。他认为，地球将把贴在它表面上的那层以太完全拖曳走，离地面愈高，这种拖曳就愈减弱，直至很远处的以太完全不受影响而静止不动。不难想到，这个模型很可能受到他曾经研究过的物体在黏滞流体中的运动的理论的影响。他能够用这个模型推导出菲涅耳的曳引系数。但为了避免使来自恒星的光穿过一层层运动速度不同的以太时会受到偏折并使其速度发生改变，斯托克斯不得不对以太的性质和运动附加一些特别的假设，才能解释有关的光学现象。而这些假设又是与力学定律相矛盾的，这使他的全部拖曳假说遭遇了无法克服的困难。

关于光学多普勒效应的实验，也表明在 v/c 的一阶效应范围内，光学多普勒效应也仅取决于观察者和光源之间的相对运动，发现不了以太风的存在。

总之，到 19 世纪后期，关于以太风是否存在的问题，必须在测定出与 $(v/c)^2$ 成比例的二阶效应的情况下才能做出判定。但当时可利用的最大速率就是地球的周年绕日轨道速率，即 30 千米/秒；它只为光速的 10^{-4}，所以 $(v/c)^2$ 的二阶效应的数量级就是 10^{-8}。连麦克斯韦在《大不列颠百科全书》的有关条目里也表示，"考虑到等于地球轨道速度的相对于以太的速度所引起的传播时间的增量，将只有全部传播时间的一亿分之一，因而是全然觉察不到了。"

三、迈克耳孙-莫雷实验

1879 年 3 月，麦克斯韦由于得到美国航海年历局的托德（C. P. Todd）寄给他的一份有关木星的天文表，写信向托德致谢。信中同时询问了通过在地球运动轨道的不同部位所进行的木卫食的观测数据，是否有足够的精确度来确定太阳系相对于以太的绝

对运动速度 v。他具体设想，利用半个地球年的两个位置，分别测出两个木卫食的时间，然后把太阳系的速度考虑进去，得到两个时间差值计算式，再根据地球运动轨道的直径值就可以算出太阳系的绝对速度。托德在回信中说，由于天文数据的精确度较差，进行计算是无意义的。不过麦克斯韦在信中还指出，是否可在地面上进行某种实验，测出地球相对于以太的速度。这种实验所观测的相对时间变动可由下式计算：

$$t = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} \approx \frac{2L}{c}\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)$$

这是一个 v/c 的二阶效应。他在信中写道："地面上一切测量光速的方法，都是使光沿同一路径返回，所以测不出地球相对于以太的速度；只有地球运动速度和光速之比的平方，才会对往返的时间产生影响，但这个量是极小的，无法观测出来。"

麦克斯韦关于地面上双程光路实验不可能检测到 $(v/c)^2$ 这样微小的效应的这段话，引起了托德的年轻同事迈克耳孙（A. A. Michelson，1852～1931）的强烈兴趣，他决心实现麦克斯韦提出的通过二阶效应来测定以太漂移速度的想法。

迈克耳孙 1852 年出生于德国，四岁时就随父母移居美国。1873 年以优异成绩毕业于美国海军军官学校，被聘为该校理化教官，并开始从事光速测定的研究工作。1878 年他改进了傅科测光速的方法获得了良好的结果，因而被调入美国航海年历局从事光速测量工作。1880 年到 1882 年，他赴柏林、海德堡、巴黎等地进修深造。在亥姆霍兹实验室工作期间，发明了后来以他的姓氏命名的干涉仪，并于 1881 年春天，进行了以太漂移的第一次观测。

实验的原理是这样的：如果地球穿行于静止以太中，按照经典速度合成法则，在地球上沿不同方向发射的光对于地球将有不同的速度。将这些光叠加起来，就会产生干涉条纹；改变光的方向，干涉条纹也将移动。按照当时迈克耳孙的计算，在将干涉仪整个转过 90°，使它的两臂先后交替地平行和垂直于地球运动的方向时，预期干涉条纹将可移动 0.08 个条纹，这是这台仪器完全可以测出来的。但结果却出乎意料，只看到比预期值小得多的不规则移动。迈克耳孙由此做出结论说："对这些结果的解释是：干涉条纹并未发生移动；所以，静止以太的假设是不正确的。"①

这是第一次对二阶效应给出的明确结果，但由于实验数据比较粗糙，没有引起多少注意。在回到美国俄亥俄州担任克利夫兰应用科学院物理学教授之后，迈克耳孙又同他的朋友莫雷（E. W. Morley，1838～1923）合作，于 1886 年重复了菲索 1851 年的实验，更为精确地验证了菲涅耳的曳引系数。同年，物理学家洛伦兹发表文章，提出了一种把菲涅耳和斯托克斯两种以太理论揉合起来的新模型。他设想，在高空，以太的速度有类似斯托克斯所言的逐层分布，而在地球表面处，以太只部分地被拖曳。这就既与迈克耳孙和莫雷新近得到的曳引系数相一致，又可减小"静止以太"模型所预

① A. A. Michelson, Am. J. Sci., 22 (1881).

期的以太漂移，以接近迈克耳孙 1881 年干涉实验的误差量级。他还指出，迈克耳孙 1881 年的论文里对垂直于地球速度一臂的光程计算中，忽略了地球移动的影响。若考虑这种影响，干涉条纹只移动 0.04 个条纹；如果以太只是部分地被拖曳，这个值还要减小一大半，那就可能淹没在误差范围内观测不出了。①

英国物理学家瑞利在看到洛伦兹的文章后，写信给迈克耳孙鼓励他重做这个实验。迈克耳孙回信说："你的来信再次燃起了我的热情，并促使我立即开始这项工作。"迈克耳孙和莫雷对原来的实验做了重要的改进：考虑了地球的运动对垂直臂光线路径的影响；经过来回 8 次反射，使一臂的光路长度从原来的 1.2 米增加到 11 米；将整个装置浮架在水银池中，既避免了机械扰动，又易于旋转。于是，实验的精确度大为提高，预计可望达到 0.4 个条纹的移动。

1887 年 7 月，他们完成了测量工作，结果发现："实际观测到的［干涉条纹的］位移肯定小于预期值的二十分之一，或许还小于四十分之一。由于这个位移与速度的平方成正比，地球相对于以太的速度也许小于地球轨道运动速度的六分之一，肯定小于四分之一"。这就是历史上著名的以太漂移实验的"零结果"。从那以后许多人不断提高精确度运用这种类型的实验，去探测地球相对于以太的速度，都得到否定的结果。运用现代的激光技术，测量到"以太漂移"的速度上限约为 1 千米/秒，最新的不同实验测得的这一上限达到 1 米/秒的数量级。这一结果使菲涅耳和洛伦兹的理论都受到巨大的冲击。迈克耳孙对这个结果感到十分失望，原来打算在不同季节继续实验的想法也取消了。后来他就用这套仪器转向长度的精密测量工作，特别是进行了用原子光谱线的波长定义长度单位米的工作。

应该指出，在相对论理论变得广为人知之前，不仅迈克耳孙本人，而且科学界也不很重视迈克耳孙和莫雷所做的以太漂移实验。事实上，1907 年迈克耳孙是由于发明了"光学精密仪器以及他用这些精密仪器进行的精确计量和光谱学的研究工作"而获得诺贝尔奖的。在瑞典皇家科学院的授奖致词和迈克耳孙的获奖演讲中，都没提到这个实验。

必须注意的是，在爱因斯坦创立狭义相对论之前，人们对布莱德雷到迈克耳孙的一系列实验所作的讨论与论证，都是以经典力学的速度合成法则为基础的。若采用狭义相对论中光速在不同惯性系中保持不变的原理，迈克耳孙－莫雷实验的零结果就自然地得到解释；运用狭义相对论的速度合成公式去计算运动介质中的光速，在低速运动的近似下，也能得出含有相同曳引系数的菲涅耳公式，而无需构造任何具体的以太模型。菲索关于流水中光速的实验结果也可由相对论原理作出解释。这个例子生动地表明，同一个实验结果，却可以先后为互相对立的两个理论，提供同样有力的支持。

---

① A. I. Miller, Albert Einstein's Special Theory of Relativity, Addison Wesley (1981), pp. 18～40.

第三节　黑体辐射的实验和理论研究

一、黑体辐射的经验定律

1800年，天文学家赫歇尔（Friedrich William Herschel，1738～1822）在用滤色片观察太阳光透过的热效应时发现，在红外区有一种产生明显热效应的辐射，由此他得出了光谱线中存在不可见射线（指红外线）的结论。第二年，里特（Johann Wilhelm Ritter，1776～1810）和沃拉斯顿发现了紫外辐射。以后，许多物理学家对热辐射的性质、辐射能量与辐射源的关系、辐射能量随波长的分布曲线等进行了大量的研究，使人们认识到光谱、热辐射、光辐射是统一的。但是，直到19世纪50年代，这种研究基本上仍然停留在定性和积累资料的阶段。19世纪后半叶，人们对热辐射的规律性，尤其是对黑体辐射能量按波长的分布函数产生了浓厚的兴趣。这是因为那时为了城市照明的改善，人们在探求新的光源，寻找最有效的发光方式。同时，由于对星体表面测温和工业上高温测量的需要，有必要对辐射能量按波长分布的函数曲线与温度的关系进行详尽的研究。在光的电磁理论建立以后，人们开始系统地探索这些波的全部频谱，发现全新的辐射形式。由于欧洲和美国日益增长的工业发展的需要，促进了热辐射测量技术的发展，一些专门的国家研究机构和实验室也应运而生。在这些研究机构中首推柏林的物理技术研究所，它成立于1887年，得到了西门子电力公司的创立者的资助，到19世纪快结束时，在这个研究所里发展起来了各种各样的精确测量热辐射的实验方法。

大约从1849年起，许多物理学家注意进行物体发射光与这个物体对光的吸收之间的关系的研究。这是由于当时人们已经知道，太阳光谱中D暗双线的波长和某些火焰光谱中的明黄双线波长一致，这需要从理论上做出说明。这可以认为是对平衡辐射的性质进行理论探索的开始。

1859年是对热辐射性质取得划时代成果的一年。在这一年年底，基尔霍夫（Gustay Robert Kirchhoff，1824～1887）向普鲁士科学院呈送了两篇辐射问题的论文。一篇是讨论吸收光谱线与发射光谱线的关系，为光谱学奠定了基础；另一篇是讨论发射本领与吸收本领之间的关系，他得到了如下的著名定律：物体的发射本领$e(\lambda, T)$跟吸收本领$\alpha(\lambda, T)$的比值，等于物体处于辐射平衡时的表面亮度$E(\lambda, T)$，即

$$\frac{e(\lambda,T)}{a(\lambda,T)} = E(\lambda,T)$$

他还指出，“发射本领和吸收本领之比(e/a)，对所有物体都是一样的”。也就是说，$E(\lambda, T)$是一个与物体性质无关的普适函数。

1860年，基尔霍夫引入了绝对黑体的概念。所谓绝对黑体是在任何温度下都能全部吸收落在它上面的一切辐射的理想物体。显然，当吸收本领$\alpha=1$时，物体的发射本

领就是辐射的普适函数。在平衡辐射中，绝对黑体的表面亮度 $E(\lambda, T)$ 又可以用平衡辐射时的能量密度 $\rho(\lambda, T)$ 来表示。$\rho(\lambda, T)$ 是波长在 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 之间的单位体积内的辐射能量。于是，有：

$$E(\lambda,T) = \frac{c}{8\pi}\rho(\lambda,T)$$

这样，在实验和理论上探求普适函数 $E(\lambda, T)$ 或 $\rho(\lambda, T)$ 的具体形式就成为物理学家解决热辐射问题面临的关键了。

二、维恩定律的建立

1879 年，德国物理学家斯特藩(Joseph Stefan，1835～1893)根据丁铎尔(John Tyndall，1820～1893)和杜隆-珀蒂的实验结果总结出了一条经验规律：黑体表面单位面积上在单位时间内发射出的总能量与它的绝对温度的四次方成正比，即

$$W = \sigma T^4$$

式中 σ 称为斯特藩-玻尔兹曼常数。1884 年，玻尔兹曼根据电磁学和热力学的理论，利用统计方法的结果（压强等于能量密度的 1/3），从理论上导出了这一结果。这是继基尔霍夫后热辐射研究的又一重大进展。

1893 年，德国物理学家维恩（Wilhelm Wien，1864～1929）采纳并发展了玻尔兹曼的把电磁学和热力学理论用于热辐射的思想，根据多普勒（Doppler）效应和斯特藩-玻尔兹曼定律，推导出了维恩位移定律：

$$\lambda_m \cdot T = 常数$$

它表明，黑体辐射能量强度最大的波长 λ_m 和绝对温度 T 成反比。

1895 年，维恩首先指出，绝对黑体可以用一个带有小孔的辐射空腔来实现。第二年，卢默尔（Otto Lummer，1860～1925）和普林斯海姆（Ernst Pringsheim，1859～1917）实现了辐射空腔，为黑体辐射强度进行准确的定量测量提供了重要手段。

1896 年，维恩通过半理论半经验的方法，得到了一个辐射能量分布公式，以频率表示就是：

$$\rho(\nu, T) = B\nu^3 e^{-a\nu/T}$$

这就是著名的维恩分布定律。

维恩的推导并不是无懈可击的。普朗克（Max Planck，1858～1947）认为，这个定律可以用更少一些的假设推导出来。他把电磁理论用于热辐射和谐振子的相互作用，并通过熵的运算，于 1899 年得到了同样的结果。这样，就使维恩分布定律获得了普遍性的意义。

按照维恩分布定律，辐射强度将随着频率的减小而按指数规律减少。1899 年 2 月 3 日，卢默尔和普林斯海姆在一份报告中说，他们把空腔加热到 800K～1000K，得到的能量分布曲线一般与维恩分布公式是相符的。但是，他们在这一年 11 月 3 日的报告中又指出："在理论和实验之间确有系统性的偏差。"他们指出，这个公式只在波长较

短、温度较低时才与实验结果相符，而在长波区域则系统地低于实验值。

三、瑞利-金斯定律和“紫外灾难”

1900 年 6 月，瑞利发表了一篇关于黑体辐射定律的论文。瑞利看到维恩的文章后，对维恩辐射定律进行了研究，从而试图推导出一条新的定律来消除维恩定律与实验之间的偏离。瑞利在推导过程中用了两个假定：空腔内的电磁辐射形成一切可能形式的驻波，其节点在空腔壁处；系统处于热辐射平衡时，根据经典统计物理的能量均分定理，每个驻波平均具有的能量应为 kT（k 为玻尔兹曼常数）。他根据这两个假定推导得到一个辐射定律。他推导得到的公式错了一个因子 8，后被金斯（Jams Hopwood Jeans，1877～1946）于 1905 年所纠正。这就是：

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

这个式子称为瑞利-金斯辐射定律，式中 c 是光速。后来有人考证，这个公式爱因斯坦（Albert Einstein，1879～1955）在金斯之前就已导出。所以，这个式子又叫做瑞利－金斯－爱因斯坦定律。

当频率较低时，瑞利－金斯定律的理论值与实验结果符合得是比较好的，但是，当频率较高时，就与实验结果表现出很大的差异。从公式中也不难看出，由于辐射能量与频率的平方成正比，所以当频率极高时，必出现趋于无穷大，即在紫色端发散。对于由经典物理学解决热辐射问题导致的这一结果，后来被埃伦菲斯特（P. Ehrenfest，1880～1933）称为“紫外灾难”。

由于瑞利-金斯公式的推导是以经典物学的基本理论为根据的，且在推导过程中思路是很清楚而明确的，方法也是正确的。所以，这一定律的失败说明将经典物理学理论应用于热辐射问题上的失败并不是什么局部的失败，它揭示出了整个经典物理学面临的严重困难。

第四节　现代物理学革命的序幕

一、层出不穷的新发现

19、20 世纪之交，人们还发现了许多新的实验事实，它们从不同方面显示出了与经典物理学原理的矛盾。

布朗于 1827 年发现的悬浮在液体中的细小微粒永不停息的无规则运动（“布朗运动”），曾经引起广泛的注意。1905 年，爱因斯坦和斯莫卢霍夫斯基（M von Smoluhowski，1872～1917）发展了建立在分子热运动基础之上的布朗运动理论。庞加莱指出，布

朗运动所揭示的几率极小的可逆过程的存在，是对卡诺原理或热力学第二定律的冲击。

1887 年，赫兹在实验上证实了电磁波的存在，并证明了电磁波是以有限的光的速度传播。而电磁作用以有限速度传播，使得两个电子（荷电体）之间的作用违反了建立在瞬时超距作用基础上的牛顿第三定律。

1887 年，赫兹首先观察到了光电效应。1899～1902 年，勒纳德对光电效应进行了系统的研究，他得到了“特征截止频率”以及逸出电子的最大速度与入射光的强度无关等实验规律，这与光的电磁本性的理论明显不符。

1903 年，居里夫妇发现的镭的永恒发热现象。同一年，卢瑟福和索迪发现了放射性元素的衰变规律。1901 年，考夫曼发现电子的质量随速度增加。这些新发现都与经典物理学的基本观念是矛盾的。

二、两朵“乌云”

1900 年 4 月 27 日，开尔文在英国皇家学会发表了题为《19 世纪热和光的动力理论上空的乌云》的长篇讲话，他认为经典物理学是万里晴空，但又说：“动力学理论断言热和光都是运动的方式，可是现在，这种理论的优美性和明晰性被两朵乌云遮蔽得黯然失色了。第一朵乌云是随着光的波动理论而开始出现的。菲涅耳和托马斯·杨研究过这个理论，它包括这样一个问题：地球如何通过本质上是光以太这样的弹性固体而运动呢？第二朵乌云是麦克斯韦-玻尔兹曼关于能量均分的学说。”①

迈克耳孙-莫雷关于以太漂移实验的“零结果”，使得一些物理学家感到震惊。因为，1728 年，布拉德雷所做的光行差的实验表明以太是静止的；1851 年菲索所做的实验，也得到同样的结果，而迈克尔逊-莫雷实验却以精确度更高的实验表明根本不存在“以太风”。从这个事实当然也可以断言以太被地球的运动全部拖曳。事实上，早在 1845 年，斯托克斯就曾提出过以太被运动物体全部拖曳的假定；他还假定以太的运动将随远离地球而逐渐减弱，直到最后处于绝对静止状态。为了使来自恒星的光避免在静止的以太和随地球一起运动的以太之间传播可能产生的偏折和速度的改变，斯托克斯还作了其他的一些附加的假定，而这些假定与力学的基本定律是不相容的。因而，以太被运动物体全部拖曳的假定也是不能成立的。可见，只要认为以太是电磁波或光传播的介质，就不可能同时圆满地解释上述一系列的实验事实。

应该着重指出的是，上述实验和解释都是以牛顿的绝对时空观为基础的。按照经典的速度合成法则，在不同的惯性系中，光或电磁波的传播速度就不应总等于 c；而麦克斯韦方程组又表明，应该存在着一个特殊的惯性参照系，正是在这个惯性系里，麦克斯韦方程组才取标准形式。长期以来，物理学家们认为，这个特殊的参照系就是相对于以太静止的参照系。现在，通过光运动测定地球对于以太的绝对运动的失败，即

① 魏凤文、申先甲，《20 世纪物理学史》，江西教育出版社，1994 年，第 23～24 页。

寻找特殊参照系的企图的失败，意味着经典物理学赖以建立的牛顿的绝对时空观遇到了严重的困难。因此，开尔文把“以太漂移”的“零结果”看做是一朵“乌云”，而且认为这一朵“乌云”“是非常稠密的”。

能量均分定理的困难首先在固体比热问题中表现出来。19 世纪末，虽然分子运动论和统计物理学取得了一系列成果，但也存在着一些无法解决的困难，以至于成为许多物理学家拒绝接受原子论的理由。其中，最突出的是固体比热问题。早在 19 世纪初期，已经从实验上发现，固体物质的克分子热容量具有普适的确定数值，这就是杜隆-珀替定律，虽然有少数固体的比热有一些偏离，但没有造成严重困难。到 19 世纪末，随着低温技术的发展，从实验上发现，固体比热随着温度的降低而普遍减小，当降到极低温度时有接近于零的趋势。

1871 年，玻尔兹曼根据分子运动论，由理论推导出，作谐振动的由束缚原子组成的单原子固体的克分子定容比热是一个常数，这就从理论上说明了通常温度下的固体比热，解释了杜隆-珀替定律，理论和实验获得了一致的结果。但是，另一方面，玻尔兹曼的工作也说明，对于低温下固体的比热，分子运动论是不能解释的，这就对分子运动论的基本假设提出了挑战。杜隆-珀替定律的理论推导过程中，玻尔兹曼运用的主要理论依据是“能量均分定理”，按照这一定理，只根据分子的运动和它的内部自由度就可以决定比热。气体比热也有类似的问题。因此可以说，在低温下固体比热的研究中，能量均分定理遇到了困难。

与此相关的一个问题是，已经发现的每一种原子和分子都会发出数目众多的光谱线。按照当时得到普遍承认的振动理论，由于共振效应，每发出和吸收一种频率的振动，辐射源就具有等于该频率的一种振动模式，而每一种振动模式对应一个独立的自由度。这就要求甚至最简单的原子或分子都有非常多的运动自由度，这在当时是无法理解的。

正因为如此，能量均分学说在世纪之交遇到了困难，开尔文称它是经典物理学的“第二朵乌云”，确实是抓住了经典物理学当时遇到的主要困难，表现出了惊人的洞察力。

三、“危机”和出路

19～20 世纪之交，在经典物理学的理论基础受到严重冲击时，物理学家们表现出十分复杂的心态。当时许多物理学家由于受机械论的影响很深，不懂得绝对真理与相对真理的关系，面对新发现与经典物理学的一系列尖锐矛盾，他们思想上产生了严重的混乱。例如，著名的理论物理学家、经典电子论的奠基者洛伦兹为了解释迈克耳孙-莫雷实验，竟提出了十一个特殊的假设仍不能自圆其说。这使他陷入了失望之中，他哀叹说：“在今天，人们提出了与昨天完全相反的主张，这就无所谓真理的标准了，我真后悔没有在这些矛盾出现的五年前死去。”再如，普朗克虽然首先提出“量子”假说，

但他到1914年都一直企图用连续性的经典观念去修改他自己的理论，想把“量子”概念纳入经典物理学的框架。

也有一批具有批判眼光的物理学家，既承认危机的存在，又立意进取，表现出对物理学未来发展前景的信心。法国著名物理学家庞加莱就是其中最有影响的代表人物。他对物理学所面临的严重形势做出了全面、深入的分析。

庞加莱在1905年出版的《科学的价值》一书，第八章的标题就是“数学物理当前的危机”。他认为，物理学的新发现已经推翻了物理学过去建立起来的基本原理。他说，放射性和镭的永恒发热的发现，推翻了能量守恒定律；电子电磁质量随速度而变化的发现，推翻了质量守恒定律；“以太漂移”实验的否定结果，推翻了伽利略相对性原理；电磁作用以有限速度传播，使电荷体之间的相互作用违反了牛顿第三定律，等等。因此，庞加莱认为，物理学发生了“严重的危机”，“物理学有必要重新改造”。他卓有远见地指出，这种“危机”并非凶兆，而是吉兆；他还把镭称作是现代物理学的“伟大革命家”。

庞加莱充满喜悦地说，我们已经发现了阴极射线、X射线、铀射线和镭射线，但一定还会有“不速之客”接踵而来，“过去的收获已经不少，未来的收获将会更多”。在谈到数学物理学的未来时，他说：“在这个疑云重重的时期，我们可以充分发挥我们的能动性。”“也许我们将要建立一种全新的力学，我们已经成功地瞥见到它了。”

在19、20世纪之交的几年里，物理学在实验上的新发现，都突破了经典物理学的框架。使曾被人们认为是“永恒真理”的经典物理学理论陷入危机四伏之中，并随之产生了巨大的革命性的转变，这对整个自然科学和哲学的发展都发生了深刻的影响。

一系列新发现的重大意义在于：第一，破除了物理学已经臻于完善的思想，敞开了通往微观高速领域的大门，发现了物理学发展的生长点；第二，暴露了经典物理学的局限性，冲击和动摇了经典物理学中的一系列基本概念和基本规律，如质量、能量的概念，质量与运动的关系，质量与能量的关系等等，揭开了物理学革命的序幕；第三，给当时占统治地位的形而上学机械论的自然观以巨大的冲击，引起了人们自然观的巨大变革。

思 考 题

1. 伦琴是如何发现X射线的？

2. 简述天然放射性现象发现的主要过程。

3. 电子是如何发现的？

4. 迈克耳孙-莫雷实验的目的是什么？为什么说这一实验结果是经典物理学晴空中的一朵“乌云”？

5. 简述黑体辐射规律的探索过程，说明维恩和瑞利-金斯公式各遇到了怎样的困难？

6. 19、20世纪之交物理学在实验上有哪些新发现？这些新发现有什么重要意义？

第九章　相对论的建立

第一节　狭义相对论的诞生

狭义相对论是关于时间、空间和物质运动的理论，它是20世纪初以来物理学发展的重大成就之一；它和量子力学一起，构成了现代物理学以及当代高技术发展的基础。狭义相对论的创立，对人类的时空观、物质观、运动观、因果观和宇宙观，都有重大影响。

一、绝对时空观的困难

“运动是时间和空间的本质”。时间和空间是物质存在的基本形式，物质又存在于运动之中。所以，一定的运动观总是与一定的时空观相联系的。

17世纪，牛顿总结了机械运动的三个基本定律和万有引力定律，建立了经典力学理论体系。全部经典力学的出发点是“惯性”和“惯性运动”。“惯性运动”是指物体在不受外力时或者“绝对静止”，或者做“匀速直线运动”。这就对作为物体运动的“舞台”的空间与时间的属性提出了要求：物体的“绝对静止”是以一个绝对不动的统一空间为其场所的；而“匀速直线运动”，则要求空间绝对“平直”，时间节奏绝对“均匀”，而且整个宇宙的空间与时间是“等同”的；空间与时间又是独立存在的，它限制和容纳着物体的运动，而不受物体及其运动的影响。于是，牛顿在他的《原理》中就引入了绝对空间和绝对时间，来决定他的动力学生效的参照系：

> 绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性而在均匀地、与任何其他外界事物无关地流逝着，它又可以名之为‘延续性’；相对的、表观的和通常的时间是延续性的一种可感觉的、外部的、通过运动来进行的量度。
>
> 绝对的空间，就其本性而言，是与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的。相对空间是绝对空间的可动部分或量度。我们的感官通过绝对空间对其他物体的位置而确定了它，并且通常把它当作不动的空间看待……

可以看出，牛顿是把绝对空间以及对于绝对空间做匀速直线运动的参照系，作为他的运动定律能够成立的参照系。牛顿的绝对时空观，继承了人们自古以来认为空间和时间同物质及其运动相互独立而无关的直觉。无论从直观的意义上，还是从牛顿力

学运动规律的表述的要求上来说，似乎都是很自然的。但是，仔细推敲起来，人们就会发现，这种绝对空间、绝对时间是与伽利略相对性原理不相容的，因为相对性原理是不承认绝对静止的，当然也就不存在某种绝对的参照系；另外，既然绝对时间与绝对空间是“与外界任何事物无关”的，完全封闭的，又怎么能够通过某些过程被人们测定和认识到呢？这不能不说是牛顿绝对时空观的一种固有矛盾。按照爱因斯坦的说法：“牛顿自己比他以后许多博学的科学家都更明白他的思想结构中固有的弱点。”① 可能是出于这个原因，牛顿在绝对时间与绝对空间之外，又引入了相对时间与相对空间用以具体描述物体的运动，这种相对运动是满足相对性原理的。

为了证明以绝对空间为背景的绝对运动的存在，牛顿还提出了著名的“水桶实验”：使一盛水的水桶从静止开始旋转，当水与桶的相对运动最大时，水面还是平面；尔后当水也旋转，水与桶的相对运动减小时，水面却呈凹面；当水桶渐渐停止转动时，水却仍在旋转而使水面呈凹面。因此，水面的形状只决定于水本身的运动情况，而与它同桶之间的相对运动无关。牛顿断言，水的这种离开旋转轴的倾向，可以作为表征绝对运动的“特有而恰当的效应”。

牛顿的绝对时空观，作为物体低速机械运动的时空关系的抽象，是与当时力学运动的实验事实相符合的。但由于其自身所固有的弱点，从一开始就受到了他的同时代人的批判。莱布尼茨坚持空间概念来自于并存着的各个物体之间的关系，拒绝任何与物质客体相分离的空间概念。惠更斯则第一个以明确的物理观念提出了相对空间的观点。针对牛顿的“水桶实验”，他指出转动也是各部分之间的相对运动，这些部分趋于沿不同的方向走开，只是它们被约束物制住了。这表明，惠更斯实际上是提出了动力学相对性思想。1710 年，英国主教贝克莱（G. Berkeley，1684～1753）在他出版的《人类知识原理》中，从“存在就是被感知”的唯心主义哲学命题出发，对牛顿的绝对时空观进行了批判。他指出：“绝对空间的各个部分既是我们的感官所感不到的，那么，我们就不得不用它们的可感的尺度，依据一些我们所认为不动的物体来决定场所和运动。”② 他断言：“运动不论是实在的或假象的，都是相对的。不过牛顿虽然如此说，我却看不出能够有任何不是相对的运动。因此，我们要设想运动，至少应想到有两个物体的距离和位置是有了变化的。因此，如果只有一个物体存在，则它干脆就不能运动。”“在我说纯粹空间时，人们不要以为空间一词表示着一个异于物体和运动并离开它们还能想像的观念。”③ 贝克莱还针对牛顿的“水桶实验”指出，如果考虑到地球的周日和周年运动，桶中水的“真实运动”就不是圆周运动。

奥地利物理学家和哲学家马赫（E. Mach，1836～1916）在他 1883 年出版的《力学：

---

① 《爱因斯坦文集》，第一卷，商务印书馆，1976 年，第 226 页。
② 贝克莱，《人类知识原理》，商务印书馆，1973 年，第 70 页。
③ 贝克莱，《人类知识原理》，第 74 页。

其发展的历史和批判的说明》中，对牛顿的绝对时空观及其论证做出了最强有力的批判，并提出了他的很有影响的相对时空观。他指出："时间宁可说是我们从事物的变化中所得到的一种抽象，因为一切都是相互联系着的……我们没有理由说有一个与变化无关的'绝对时间'，它可以不与运动相比较而测度出来。所以，它既无实用价值，也无科学价值。没有一个人会说他对它有什么了解，它是一个无用的形而上学的概念"。针对牛顿的"绝对空间"、"绝对运动"的观念，马赫指出，我们的一切力学原理都是关于物体的相对位置和相对运动的经验知识；当把这些经验性的原理推广到超出经验的界限之外时，这些原理的正确性就无法得到保证，因而也是无意义的。他举例说："一种运动，只能相对于另一种运动说来是匀速的，而一种运动自身是否匀速的问题，是毫无意义的。"运动总是相对于其他物体而言的，关于选择哪一个物体，本质上都是一样的。因而作为"特定"参照物的绝对空间，完全是一种虚构。

关于牛顿的"水桶实验"，马赫指出，水面的平凹当然跟水与桶的相对运动无关，但这并不表明在水桶之外有什么绝对空间，而只是因为桶壁的质量太小了，它还不足以引起水面的凹曲。如果设想桶壁变得非常厚，以至于它和天体具有相同的质量，那么水与水桶之间的相对运动对水面的形状就不可能不起作用了。实际上马赫认为，水面的凹曲，正是由于巨大质量的遥远天体的作用引起的。他甚至设想，当把水桶固定而使恒星天球转动，在这种情形下水也会受到离心力作用而使水面呈凹曲状。因此马赫断言，只存在着相对运动和相对空间。马赫关于牛顿"水桶实验"的这些深刻的思考，导致了他把惯性定律看成是整个宇宙物质的质量的总效应；这个思想后来被称为"马赫原理"，它对后来爱因斯坦创立广义相对论有很大的启发。正是在广义相对论建立之后，牛顿的绝对时空观才完全失去了他的自然科学的根据，完成了它在近代物理学的建立和发展中的历史作用。

否定了牛顿的绝对空间，那又怎样去确定动力学在其中生效的参照系呢？1885 年，朗格（L. Lange，1863～1936）提出，应当运用牛顿的惯性定律本身去确定使动力学生效的这种"惯性参照系"，以代替"绝对空间"那种"鬼魂"式的概念。他建议，可以取在其中的三个（非共线运动的）孤立质点都做匀速直线运动的参照系作为惯性系。在这样规定的参照系里，任何其他孤立质点的运动必然都是符合动力学规律的。他认为："物理学定义它的参照系，是从它应当实现的目的出发的；因此，从同一个观点看来，它也是时间量度的基础。"朗格的"惯性时间标度"确实也包括在惯性系的定义里面，这就消除了"绝对时间"的需要。朗格还用天文学的观测数据，检验了恒星参照系，肯定它是一种精确度很高的惯性参照系①。实际上，不仅惯性参照系，而且空间和时间的量度本身，归根到底都是由动力学定律决定的。或者说时空几何学的选择，必须使惯性定律和动力学的其他基本定律采取我们已经认识到的那种简单的形式。在相对论理

① M. Jammer, Concepts of Space, Harvard University press . 1954.

论的发展过程中，空间和时间概念的动力学意义的这一内涵才得到充分的揭示。

二、收缩假说和洛伦兹电子论

由于光现象和电磁现象在本质上的统一，所以当把麦克斯韦的电磁场方程推广到运动物体时，同样存在着穿行于以太中的物体在多大程度上携带以太一同前进的问题。麦克斯韦虽然没有明确论述过这一问题，但由于在他的方程组中出现的真空中的光速 c 是由真空磁导率 μ_0 和电容率 ε_0 决定的常数，即 $c=1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ 这表明电磁场方程仅对相对于以太静止的惯性系才有效。这意味着麦克斯韦的理论隐含着物质和以太一起运动的假定。

1890 年，赫兹把麦克斯韦的电磁场方程做出整理并推广到包含运动物体的情形中。他继承了麦克斯韦的思想，第一个明确地把以太全部被运动物质拖曳的假说应用于电磁场方程。由于斯托克斯的全部拖曳假说在光学领域里已经遇到不少困难，所以赫兹也很清楚地意识到这只是一种权宜之计。但是，由于这个假说的简单性，即它不要求把以太的运动和物质的运动加以区别，所以引起了他做进一步研究的兴趣。赫兹的假说对运动的导体里的各种感应现象作出了正确的描述，但在描述运动的介质在电场和磁场中的一些效应时却遇到了困难。早在 1885 年伦琴就让一个绝缘体平板在电场中（充电电容器之间）运动，平板中将有电场 $\boldsymbol{E}$，并感应出电位移 $\varepsilon\boldsymbol{E}$，它垂直于板平面，结果在平板的两个界面上产生了等量电荷，其密度 δ 正比于电位移 $\boldsymbol{D}$，$\boldsymbol{D}$ 由以太的位移和物质本身的位移两部分组成。根据赫兹的观点，如果平板以速度 $\boldsymbol{v}$ 运动，它里面的以太将全部被带走，密度为 $\delta=\varepsilon\boldsymbol{E}/4\pi$ 的电荷也将被带走。于是界面上的运动电荷将产生相当于 $\frac{\varepsilon\boldsymbol{E}}{4\pi}\times a\boldsymbol{v}$ 电流大小的磁场，a 为平板的宽度。实验结果，磁针偏转的程度比赫兹理论值要小。这意味着，如果有以太的话，它不像赫兹所设想的那样全部被运动物质所拖曳，表现出来的只是一种部分曳引的效应。不过，赫兹由于假定以太同物体总是相对静止的，牛顿力学中的相对性原理也可以推广到麦克斯韦的电磁场理论中。赫兹的这一理论由于其本身的困难和赫兹的早逝而未得到发展。

荷兰物理学家洛伦兹于1892年提出的经典电子论，标志着以太论发展到最后阶段。他把电磁场中的物质看做由弥散在以太中的带正电和负电的粒子组成；他希望由物质中带电粒子的运动与和它相关联的电磁场的相互作用，导出物质的电磁性质。鉴于菲涅耳光以太理论的成功，洛伦兹做出了与赫兹相反的假定，即以太在空间中是静止的，完全不被运动物质所拖曳。也就是说，洛伦兹认为只有静止以太系才是麦克斯韦方程组成立的参照系。这样，洛伦兹的以太就起着像牛顿的绝对空间相同的作用。洛伦兹在1892年的论文《麦克斯韦的电磁理论及其对运动物体的应用》中，第一次采用麦克斯韦的有限速度传播的电磁场理论，由有源的电磁场方程组来描写空间中各点的以太的状态；

同时，物质中的带电粒子则经受着以太作用的电磁力（即后来所说的“洛伦兹力”），由带电粒子的振动同电磁场的相互影响，洛伦兹算出了透明介质的色散公式以及运动介质中的光速公式，在后一公式中给出了菲涅耳的曳引系数。这样，洛伦兹理论没有求助于以太被物质拖曳的假说，初步解释了电磁现象。但是，对于洛伦兹理论来说，它只是证明了在 v/c 的一次项时电磁现象与光现象仅与物体的相对平动有关，因为以太是绝对静止的。而对于1887年迈克耳孙和莫雷所做出的涉及到 v/c 的二次方的实验，洛伦兹的新理论还不能做出解释。

为了解决这个困难，洛伦兹在1892年晚些时候发表的《论地球和以太的相对运动》中，提出了著名的“收缩假说”。在他之前，1889年爱尔兰物理学家菲兹杰拉德（G. Fitzgerald，1851～1901）就已提出过相似的设想。菲兹杰拉德认为，如果物质是由带电粒子组成的，相对于以太静止的量杆的长度将由粒子间取得的静电平衡决定；当量杆相对于以太运动时，组成量杆的带电粒子将会产生磁场，从而改变粒子之间的平衡间隔，量杆就会缩短；缩短的程度将取决于物体运动速度与光速的比，即 $\sqrt{1-v^2/c^2}$。现在洛伦兹也独立地提出，“只要假定处于地球运动方向的那个臂比另一臂缩短 $\frac{L}{2}\frac{v^2}{c^2}$……则迈克耳孙实验就能够得到圆满的解释。”同时他还描述了收缩的物理过程：“只要我们假定分子力也像电力和磁力那样是通过以太传递的，那么平移很可能影响两个分子之间的作用，其方式有点类似于荷电粒子间的吸引和排斥。”“分子位移自然会引起分子的自动重新分布，从而导致在运动方向上按 $1:1-\frac{v^2}{2c^2}$ 比例收缩。”在运动方向上的这种长度收缩，适足抵消由经典的速度合成公式计算出来的时间延迟，这就解释了以太漂移实验的零结果。

不过，洛伦兹的收缩假说只涉及到 $\frac{v^2}{c^2}$ 的这种二阶效应，对菲涅耳早就得出的在 v/c 的一阶效应范围内不可能发现以太风的结果无法作出解释。1895年，洛伦兹在《运动物体中电现象和光现象的理论研究》的著作中，对无源麦克斯韦方程组施加一种修改的伽利略变换，其中的时间 t 变为“当地时间” $t'=t-(v/c^2)x$，同时电场 $\boldsymbol{E}$ 和磁场 $\boldsymbol{B}$ 变换为 $\boldsymbol{E}'=\boldsymbol{E}+\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}/c$，$\boldsymbol{B}'=\boldsymbol{B}-\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{E}/c$，结果发现麦克斯韦方程组的形式保持不变。由此证明了，准确到 v/c 的一阶范围，用运动物体的光学或电磁学实验都无法检测到物体相对于静止以太系的速度。在洛伦兹的这个理论中，通过变换得到的 t' 被看做是非物理的“当地时间”，而真实的时间仍然是 t；$\boldsymbol{E}'$ 与 $\boldsymbol{B}'$ 也不是真实的物理量，只是某种辅助量。另外，一阶效应不出现是用新提出的一种对速度 $\boldsymbol{v}$ 线性相关的变换不变性来解释的，而二阶效应不出现则完全撇开这种不变性，需要回到伽利略变换，再引进收缩假说才能得到解释。这种人为性和逻辑上的不自洽性，使这套理论显得很不自然。法国科学家彭加勒就提出批评说，收缩假说完全是为了解释迈克耳孙-莫雷实验的零结果而提出的一种“特设假定”，难道将来实验做到 v/c 的更高阶次时，又要做出新的什么假定

吗？

塞曼效应和电子的发现，给洛伦兹理论的发展带来了新的转机。1896年，洛伦兹的学生塞曼（P. Zeeman，1865～1943）发现了在外磁场中钙原子光谱线的三重分裂。洛伦兹从物质中带电粒子的弹性振动受到磁场的影响，算出有与磁场方向平行的一种振动以及与磁场方向垂直的两种振动，解释了原来的单频率分裂为三重频率。并且，由计算出的裂距同实验数据比较而定出的带电粒子的荷质比 e/m，又与 J. J. 汤姆孙当时测定的电子荷质比相符合。这个成功肯定了介质里参与同电磁场相互作用的就是“电子”，因而就为洛伦兹进一步发展他的“电子论”提供了根据。

在1889年发表的“简化理论”和1904年发表的《以小于光速的任意速度运动的系统的电磁现象》的论文里，洛伦兹把他的收缩假说进行数学处理并做出系统和严密的阐述。他假设说，当电子在以太中运动时，电子将从圆球变为短轴沿运动方向的椭球。对于电荷体系来说，相对于以太的运动将会改变各电荷间的电相互作用，使电荷间的纵向距离减小；在不带电粒子之间以及不带电粒子和带电粒子之间作用着的力，也会由于相对于以太的运动而有所改变。因此，由上述各类粒子组成的一切物体，都会发生沿运动方向的收缩。他发现，只要假设有相对运动的参照系之间存在一定的数学转换关系，麦克斯韦方程组的形式对于静止的参照系和对于匀速运动的参照系就会保持不变。具体地说，就是在他原先提出的“修改的伽利略变换”里的 x 和 t 的变换公式里，加上一个因子

$$\beta = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

即

$$x' = \beta x, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t}{\beta} - \beta \frac{v}{c^2} x$$

同时对电场和磁场的变换式也作了相应的修改。于是，麦克斯韦方程组的形式就可基本上保持不变。洛伦兹指出，根号因子的加入，正好相当于在解释迈克耳孙-莫雷实验的结果时所作的收缩假说。他宣称，根据这一变换，不仅能解释 v/c 的二阶效应，而且能解释任意阶的以太漂移实验的零结果。这一组时空坐标变换式，就是著名的“洛伦兹变换”，它统一了洛伦兹以前对一阶效应和二阶效应分别作出的特定解释，因而更具有普遍性了。根据洛伦兹的理论，静止时为球形的电子，运动时在纵向经受收缩，由此可计算出电子的纵质量和横质量：

$$m_L = \frac{2}{3} \frac{e^2}{Rc^2} \frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}}$$

$$m_T = \frac{2}{3} \frac{e^2}{Rc^2} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

式中 e 为电子的电量，R 为假设的电子半径。在此之前，人们千方百计地用以太的力学模型来导出电磁现象；现在却反了过来，居然从电磁学得到了电子的力学质量，而且

完全是一种电磁质量；特别是洛伦兹得到的横质量公式的形式，同后来定义的相对论质量相同。这表明，洛伦兹的电子论确实取得了不少重要的成果。但是，他却坚信绝对参照系的存在；他关心的只是从这个假想的静止以太坐标系出发得出坐标变换，以保证麦克斯韦方程组形式上的不变；变换到新坐标系里的“有效坐标”x'和“当地时间”t'也不具有真实的意义，只是一些假想的辅助概念。所以，洛伦兹所坚持的仍然是类似于牛顿的绝对时空观；在他的理论中，坐标变换的意义是不清楚的，而且带有人为穿凿的明显痕迹。

三、庞加莱的卓见

在通向新力学的进程中，法国科学家庞加莱提出过许多极有远见的论断。惠特克（E. Whittaker）在他的名著《以太和电学的历史》中对比了庞加莱和洛伦兹在这个方面的贡献。他说：“通常认为，庞加莱主要是一个数学家，而洛伦兹主要是一个理论物理学家。但是，当涉及到他们对相对论的贡献时，情况正好相反：正是庞加莱提出了一般的物理学原理，而洛伦兹却提供了许多数学表达式。”

早在1895年，庞加莱就对当时的以太漂移的实验研究表示不满。在《谈谈拉摩先生的理论》一文中，他就反对洛伦兹等人针对每一个新的实验事实而引入一个孤立的假设的作法，他认为人们应当采纳一个更为普遍的观点。他相信，用任何物理实验，不论是力学的、光学的或电学的，都不可能检测到地球的绝对运动。他所说的普遍的观点，实际上就相当于这样一个普遍的物理定律：“不可能测出有质物质的绝对运动，或者更明确地说，不可能测出有质物质相对于以太的相对运动。人们所能提供的一切证据就是有质物质相对于有质物质的运动。”[①]这表明，庞加莱已经萌生了相对性原理的思想。在这篇文章中，庞加莱还指出了洛伦兹的绝对静止以太假说意味着以太作用于物质，而物质对以太毫无作用，因而违背了作用与反作用原理，他对此深感不安。

在1898年发表的《时间的测量》一文中，庞加莱明确提出了光速不变公设。他说，光具有不变的速度，特别是它的速度在一切方向上都是相同的，“这是一个公设，没有这个公设，就无法测量光速。这个公设从来也不能直接用经验来验证；如果各种测量的结果不一致，那么它就与经验相矛盾。我们应当认为我们是幸运的，因为这样的矛盾没有发生。”[②]在这篇文章中，庞加莱明确地把定义同时性的问题与定义时间的问题区分开来。他提出，当“两个事件的相继次序”可以交换时，这两个事件就可以定义为“同时的”。但他立即指出，这个定义只能是地方同时性，它不适用于相距很远发生的两个

---

① C. 斯克里布纳，《昂利·庞加莱和相对性原理》，转引自李醒民《论狭义相对论的创立》，四川教育出版社，1994年，第33页。

② 转引自《论狭义相对论的创立》，第34～35页。

物理事件，因为对于这种事件，我们不能理解这种可逆性是什么，而且“相继次序”本身也必须首先加以定义。庞加莱尖锐地揭示了“同时或居先”这些通常使用的概念的循环论证，讨论了科学家们“隐含地假定了的”同时性的定义。他指出1849年菲索在用旋转齿轮法测定光速的实验中实际上已作了两个心照不宣的假定：往返的光速相等，光传播的空间各向同性。他还分析了单路双钟实验的缺陷，因为它包含了借助于速度来定义时间的假定。他指出，在没有测量时间的情况下，是无法测量光速的，因而同时性的定性问题注定要依赖于时间的定量问题。

1899年，庞加莱在巴黎大学讲演时，又一次提到，“光现象很可能只依赖于物体的相对速度……当实验变得越来越严密，这一原理也变得越来越精确。”在这次讲演时，庞加莱还指出，对于在地面上相距不太远的两个钟来说，洛伦兹的地方时间 t' 和真实时间 t 之差可以忽略不计。另外，他还讨论了两个相对静止，但相对于以太做惯性运动的观察者如何通过交换光信号来同步他们的钟，从而读出真实时间。第二年，在巴黎举行的物理学会议上，庞加莱表示：“我不相信……除了物质的相对位移之外，更严密的观察会使其他东西明显起来。对于所有各阶都必须找到同一解释。”他把这个普遍定律称作“相对运动原理”。

1902年，在他出版的《科学与假设》中，庞加莱第一次使用了“相对性原理”一词。在讲到经典力学时，他首先提出了几条原则：①没有绝对空间，我们能够设想的只是相对运动；②没有绝对时间，说两段时间相等是毫无意义的；③我们不仅没有关于两段时间相等的直觉，甚至没有关于发生在两个不同地点的两个事件的同时性的直觉；④力学事实很可能要使用非欧几里得空间来描述，这种空间虽然使用起来不很方便，但它却像我们通常的空间一样合理[①]。

1904年9月，在美国圣路易国际技艺和科学大会的讲演中，庞加莱把相对性原理作为物理学六个普遍原理之一说道：“根据这个原理，物理现象的定律应该是相同的，不管观察者处于静止还是处于匀速直线运动状态。因而，我们没有，也不可能有任何方法来辨别我们是否在做这种运动。”他用迈克耳孙实验的结果来支持这个原理，并坚信不论将来地上和天文实验的精确度如何提高，这个原理都会被证明是可靠的。这时庞加莱已经看到了洛伦兹1904年的工作，正是在这个讲演中，他引用了洛伦兹变换，并且深邃地洞察到了新力学的重要特征。他说：“也许我们将要建造一种全新的力学，我们已经成功地瞥见到它。在这个全新的力学中，惯性随速度而增加，光速成为不可逾越的极限。原来的比较简单的力学依然保持为一级近似，因为它对不太大的速度还是正确的。因而在新力学中还可以找到旧力学。”[②]

可以看出，最迟到1904年，庞加莱已经掌握了建立新力学的基本素材。他所预见到

---

① 庞加莱著，李醒民译，《科学的价值》，光明日报出版社，1988年，第73～74页。

② 同上，第308页。

的新力学的特征，后来都无一例外地在爱因斯坦的相对论里得到实现，但他毕竟没有找到一个适当的方案来实现自己的预见。他的主要努力仍然是把洛伦兹的电子论完善化。在1904年后期到1905年中，庞加莱给洛伦兹写了三封信，在第一封信里，他提出了如何修正洛伦兹1904年的论文中的某些方程。在第二封信里，庞加莱说他重新解决了关于纵质量的问题，而且与洛伦兹的“出色工作”完全一致。在第三封信里，他证明了连续两次洛伦兹变换的结果，等价于一次新的洛伦兹变换。从数学上讲，就是所有不同相对速度的洛伦兹变换形成一个群。作为这一证明的必然产物，庞加莱实际上已经得出了后来相对论里的速度（即洛伦兹群的群参数）合成公式。

这些成果，都被总结到庞加莱的经典论文《论电子的动力学》中，这篇论文的缩写本于1905年6月5日发表在《汇报》上，全文于1906年发表。在陈述了“相对性公设”和提出应该利用光线比较长度之后，庞加莱成功地把电子纵质量的计算问题同可变形电子的平衡联系起来。他用一个关于引起电子形变的外压力的假设，补充了运动电子的纵向收缩假说。庞加莱补充了对电荷密度和电流密度的变换式，使有源的麦克斯韦方程组精确地保持形式不变。庞加莱纠正了洛伦兹1904年论文里的某些技术性错误，把经过他整理的现今形式的变换式正式命名为“洛伦兹变换”，再次证明两个相继的洛伦兹变换能够用一个洛伦兹变换来代替，洛伦兹变换“形成一个群”。庞加莱指出，洛伦兹变换联系的是不同参照系里测量到的空间和时间的坐标，所以是一种真实的变换。于是，长度收缩不再是为了解释某一实验而引起的特设假定，而是满足物理学的相对性原理的结果。

在问题的数学分析部分，庞加莱走得非常远，在某些方面比爱因斯坦还要远。在论文的最后一节“关于引力的假设”中，他指出，洛伦兹变换形成一个四维流形中的一个群。引进虚时间坐标，即在时间坐标上乘上虚数单位 i 和光速 c（即 ict），于是得到一个四维的时空连续统，在这个四维连续统中，时间坐标和空间坐标起着同样的作用，它们以一种对称的方式进入四维的几何关系中。庞加莱将洛伦兹变换看做是四维时空中的转动，并写出了这种变换下的不变量——四维时空间隔 $x^2+y^2+z^2+\tau^2$，其中 $\tau=ict$。庞加莱还利用相对性原理作为通向引力理论的向导。在他的引力论中，力方程在洛伦兹变换下保持它的形式不变，引力以光速传播。

在《论电子的动力学》中，庞加莱讨论了当时已有的三种电子模型，即阿伯拉罕（M. Abraham，1875～1922）的刚性小球模型、洛伦兹的可变形电子模型以及朗之万（P. Langevin，1872～1946）等提出的可变形但体积不变的电子模型。庞加莱证明了在这三种电子论关于电磁质量的理论中，只有洛伦兹的电子论合乎相对性原理。的确，当时只有洛伦兹的电子论能够同时解释以太漂移的零结果、菲涅耳的曳引系数、质量随速度的变化以及在不同惯性系中光速的各向同性等，这些效应都被归因于组成物质的电子同静止的以太相互作用的结果。再加上庞加莱以高超的数学技巧进行了加工整理，使洛伦兹的电子论具有更简洁的表述形式，致使许多物理学家都把洛伦兹的电子论看做

是最有希望打开通向物质的统一的场论描述的突破口，开辟了把力学纳入电磁学的新途径，是电磁世界图景的基石。

当庞加莱的论文的缩印本刚刚发表不久，一个当时正在瑞士伯尔尼专利局工作的青年技术员爱因斯坦（A. Einstein，1879～1955）的论文《论动体的电动力学》，送到了德国《物理学杂志》的编辑部。我们看到，在20世纪初，大量的实验和理论研究，使狭义相对论的产生已经具备了充分的条件和必然性。正如后来爱因斯坦在一封信中所说："毫无疑问，要是我们从回顾中去看狭义相对论的发展的话，那么它在1905年已到了发现的成熟阶段。洛伦兹已经注意到，为了分析麦克斯韦方程，那些后来以他的名字而闻名的变换是重要的；庞加莱在有关方面甚至更深入钻研了一步"。①

四、爱因斯坦创建狭义相对论的基本思路

正当洛伦兹的电子论和庞加莱对它的改进取得物理学界的公认之际，1905年9月在德国《物理学杂志》上，发表了爱因斯坦划时代的论文《论动体的电动力学》，宣告了狭义相对论的诞生。这是一篇用简明朴素的语言写成的文章，通篇没有征引任何参考文献，仅有的几个脚注也只是说明性的，在致谢段里只提到他的一位朋友，不为人知的青年工程师贝索（M. Besso，1873～1955）。这种情况表明，爱因斯坦当时远离学术界，未曾同任何一位物理学大师有直接的交往，也不甚了解最新的物理学研究进展。也许正是由于这种状况，使他得以超脱传统的和流行的思想的束缚和影响，凭着自己的独立思考，创立了崭新的革命性的物理学理论。

爱因斯坦是如何创立狭义相对论的？我们试图根据他的《论动体的电动力学》②这篇原始论文，他在晚年写的学术回忆录《自述》③（1946），1922年12月在日本京都大学所作的讲演《我是如何创立狭义相对论的》④以及其他一些资料，对他的创造思路作一些追溯。

早在中学时代，爱因斯坦就从伯恩斯坦所著多卷本《自然科学通俗读本》中了解了整个自然科学领域里的主要成果和方法。在这部几乎完全是定性的描述的读物中，伯恩斯坦用引人入胜的提问引导着读者去理解深奥的自然科学知识。这本书第一卷的开头部分，就论述了有关光速以及光和距离的内容。这使爱因斯坦无意中想到了一个奇特的"追光悖论"。在《自述》中他写道："这个悖论我在16岁时就已经无意中想到了：如果我以速度 c（真空中的光速）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

① M. 玻恩，《我这一代的物理学》，商务印书馆，1964年，第232页。
② 《爱因斯坦文集》，第二卷，商务印书馆，1977年，第83～115页。
③ 《爱因斯坦文集》，第一卷，商务印书馆，1976年，第1～42页。
④ A. Einstein, How can I Created the Theory of Relativity, Phys. Today, Aug (1982), p. 45.

克斯韦方程，看来都不会有这样的事情。从一开始，在我直觉地看来就很清楚，从这样一个观察者的观点来判断，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的一些定律进行。因为，第一个观察者怎么会知道或者能够判明他是处在均匀的快速运动状态中呢？”

这种不同常人的思考，不仅显示了爱因斯坦深邃的思考和高超的才智，同时也已经包含了狭义相对论原理的萌芽。正是基于对这个问题的思考，使他后来又萌生了一个想法：既然光在以太中传播，地球又在以太中运动，地球的运动就应当对光速的测量产生影响，也就是说会发现以太风。在1922年的讲演中他说：“当我有这种想法时，我并没有怀疑以太的存在，也就是说没有怀疑地球相对于以太的运动。于是，我设想了这样一个实验：利用几个平面镜，使发自光源的光线在不同方向上被反射，其中一束光与地球运动的方向相同，另一束则相反。如果两束反射光的光强不同，则可用两个热电偶把它们的热量测量出来。尽管这个实验的设计思想与迈克耳孙的实验相似，我却没有进行实验检验。”

经过对诸如此类问题的10年沉思，其间他又阅读了洛伦兹1895年的专著，逐一取得了观念上的突破，终于在1905年6月创建了惊世骇俗的狭义相对论理论。

在《论动体的电动力学》的一开头，爱因斯坦写道：“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。”他举例说：“设想一个磁体同一个导体之间的电动力的相互作用。在这里，可观察到的现象只同导体和磁体的相对运动有关，可是按照通常的看法，这两个物体之中，究竟是这个在运动，还是那个在运动，却是截然不同的两回事。”这里所说的“通常的看法”，就是指麦克斯韦的电动力学理论。的确，无论磁体或导体谁在运动，导体中都会有相同的感生电流；然而按照麦克斯韦理论，如果是磁体在运动，它的周围就会出现一个具有一定能量的电场；如果是导体在运动，静止磁体周围就没有电场，只是导体中产生电动势，这种电动势本身并不相当于能量，却也会引起电流。这个简单的例子，清晰地揭示了运动物体电动力学中的“不对称”。这里所说的“不对称”，就是指统一性遭到破坏。因为伽利略相对性原理表明，所有的惯性系对于表述力学规律都是等效的，或者说运动总是相对的，用任何力学实验都无法判断坐标系本身的绝对运动状态。但是，在经典力学中普遍成立的这种运动的相对性，现在在以“以太”为背景的麦克斯韦电动力学中却不成立了。或者说，在讨论运动物体的电磁现象时，就要放弃运动的相对性，爱因斯坦认为，这种不对称性似乎不应该是电动力学现象所固有的。这样，爱因斯坦一开始就把讨论引入到实质性问题的思索。

爱因斯坦把这种不对称与“企图证实地球相对于光媒质运动的实验的失败”联系了起来，直接提出了一种原理式的猜想：“绝对静止这概念，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。”这个猜想就是相对性原理。他说：“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。”在日本京都的讲演里爱因斯坦说道：“在我还在读书时期，当我思考有关相对论的问题时，我逐渐了解到迈克耳孙-莫雷实验的奇特结果。接着，我得出这样的结论：如果认为迈克耳孙实验的零结果是事实的话，那么我们关于地球相对以太运动的想法就是不正确的。这就是把我引导到狭义相对论的第一条思路。”

可以看出，追求对称和统一，正是爱因斯坦创立狭义相对论的根本指导思想，或如他所说的“第一条思路”。这条思路的形成，一方面借助于“企图证实地球相对于‘光媒质’运动的实验的失败”的事实，另一方面借助于他对“以太”这个使绝对时空观借尸还魂的躯壳的尖锐批判。1920年5月5日，爱因斯坦在荷兰莱顿大学所作的报告《以太和相对论》[①]中，他指出：“以太假说对引力理论和物理学的确完全没有带来任何一点进步，以致人们养成了一种习惯，把牛顿的引力定律当作不可再简约的公理来对待。”“至于洛伦兹以太的力学性质，人们可以带点诙谐地说，洛伦兹给它留下的惟一的力学性质就是不动性。”在对人们赋予以太的各种令人费解的奇特性质作出分析之后，爱因斯坦宣称：“面对着这种情况，人们可以采取的最近便的观点似乎是认为以太根本不存在。认为电磁场不是一种媒质的状态，而是一种独立的实在，正像有重物质的原子那样，不能归结为任何别的东西，也不依附在任何载体之上。”“从狭义相对论的观点来看，以太假说首先是一种无用的假说。在电磁场方程中，除了电荷密度外，只出现场的强度。真空中电磁过程的进程看起来好像完全取决于那条内在的定律，丝毫不受其他物理量的影响。电磁场是以最终的、不能再归结为别的东西的实在的身份而出现的，再假定一种均匀的、各向同性的以太媒质，而那些电磁场必须理解为是它的状态，这就尤其显得是画蛇添足了。”在《论动体的电动力学》中爱因斯坦断言：“‘光以太’的引用将被证明是多余的，因为按照这里所要阐明的见解……不需要引进一个具有特殊性质的‘绝对静止的空间’。”这表明，爱因斯坦是从物理学的背景知识转换，即从对传统观念的突破的高度上去探究以太漂移实验的零结果，从而形成了“相对性原理”的伟大猜想，并把它提升为公设，作为他的理论的出发点。而在洛伦兹那里，运动的相对性则表现为满足一些特定假设的动力学所导出的运动学效应，两人的思路是大相径庭的。

在《论动体的电动力学》论文中，谈到把“相对性原理”提升为公设之后，爱因斯坦紧接着写道：“还要引进另一条在表面上看来同它不相容的公设：光在空虚空间里总是以一确定的速度 V 传播着，这速度同发射体的运动状态无关。”这就是光速不变原理。

经典力学中另一个与相对性原理相联系的是速度相加原理。如果说爱因斯坦的狭

① 《爱因斯坦文集》，第一卷，第120～129页。

义相对性公设是他推广了经典力学中的伽利相对性原理而得到的话，那么狭义相对论的第二个公设——光速不变公设则是由于推广了速度相加原理的结果。这是爱因斯坦创建狭义相对论的第二条思路。

同以前的研究者不同，爱因斯坦不是牵强附会地去解释企图证实地球相对于“光媒质”运动的实验的失败，而是把它看做自然界某些普遍规律的表现。一方面他从中领悟到这正是相对性原理在力学领域和电磁学领域普遍成立的证明；另一方面他又从中概括出了光速不变原理。在日本京都大学的演讲中他回忆说：“我有幸读到1895年洛伦兹的专著。在其中他讨论并在一级近似的范围内解决了电动力学的问题，这时他忽略了 v/c 的高次项，其中 v 是物体的运动速度，c 为光速。然后我假定，关于电子的洛伦兹方程不仅在洛伦兹原先讨论的真空参照系中成立，而且也应该在运动物体的参照系中成立。我试着用这一假定去讨论菲索实验。在那时，我坚信麦克斯韦和洛伦兹的电动力学方程都是正确的。此外，如果假定这些方程对运动物体参照系也成立，就会得出光速不变性的概念。不过，这一概念同力学中的速度相加法则相矛盾。”

为什么会出现这两个概念之间的相互矛盾呢?他在上述报告中讲道：“我觉得这个问题很难解决，我花了整整一年的时间，试图仿照洛伦兹的设想来解决这个问题，但是徒劳无益。我是偶然间在伯尔尼的朋友贝索的帮助下获得了答案的。那是一个晴朗的日子，我带着这个问题访问了他，我们讨论了这个问题的每一个方面，忽然我领悟到了这个问题的症结所在。第二天我告诉他，我完全解决了这个问题。这个问题的答案来自对时间概念的分析。不可能绝对地确定时间，在时间与信号传播速度之间有着不可分割的联系。利用这一新观念，我第一次彻底解决了这个难题。”就这样，在不到五个星期的时间内，爱因斯坦就写好了那篇历史性的论文《论动体的电动力学》，创建了狭义相对论理论。

可见，爱因斯坦是把考察“时间”的物理意义作为解决前述两个概念之间矛盾的突破口的。用爱因斯坦的话说：“直到最后，我终于醒悟到时间是可疑的!”

在《论动体的电动力学》中，爱因斯坦从操作的根据详细讨论了“时间”的物理意义。他指出：“凡是时间在里面起作用的我们的一切判断，总是关于同时的事件的判断。比如我说‘那列火车7点钟到达这里’，这大概是说：‘我的表的短针指到7同火车的到达是同时的事件’”。用这种办法，在空间不同地点（如 A 处和 B 处）放置的钟就可以测定或定义这些不同地点的时间，如“A 时间”和“B 时间”。为了定义对 A 和 B 是公共的“时间”，可以利用光信号的不变性对两地的钟进行校准，使两只钟达到“同步”，从而解决了两地事件的同时性问题。但是，爱因斯坦指出，这种用静止在静止坐标系中的钟来定义的时间只是“静系时间”。现在考虑一个杆沿 AB 方向运动，同动杆一起运动的观察者也采用光信号来核对原先静止于 A、B 的两只钟是否同步。由于光速不变原理在动杆坐标系里同样成立，“因此，同动杆一起运动着的观察者会发现这两只钟不是同步运行的，可是处在静系中的观察者却会宣称这两只钟是同步的。”爱因斯坦由此得出

了同时性或时间的相对性的概念。论文中写道："由此可见，我们不能给予同时性这概念以任何绝对的意义；两个事件，从一个坐标系看来是同时的，而从另一个相对于这个坐标系运动着的坐标系看来，它们就不再被认为是同时的事件了。"

通过对时间概念物理意义的分析而得到时间或同时性的相对性的新观念，以此为突破口解决了光速不变原理与经典力学中的速度相加法则的矛盾，充分显示了爱因斯坦异乎常人的审视与批判的能力，他善于从人们认为极普通、极平凡、没有疑问的概念中发现矛盾；同时也反映出他在做出科学决断和创新时的伟大魄力。他晚年在普林斯顿，德国物理学家弗朗克（J. Franck）问他是怎样创立相对论的，他回答说：空间、时间是什么，别人在很小的时候早就已搞清楚了；但我智力发育迟，长大了还没有搞清楚，于是一直在揣摩这问题，结果也就比别人钻研得深一些[①]。这个回答很有启发意义。这种对事物穷根究底的探索态度，使他对自然界的事物总有一种"惊奇感"，永不满足于人类知识的现状，敢于突破旧的思想的束缚，义无反顾地走上"离经叛道"的创新之路。

这样，爱因斯坦就提出了狭义相对论的两个基本原理：

（1）物理体系的状态据以变化的定律，同描述这些状态变化时所参照的坐标系究竟是用两个在互相匀速移动着的坐标系中的哪一个并无关系。

（2）任何光线在'静止的'坐标系中都是以确定的速度 V 运动着，不管这道光线是由静止的还是运动的物体发射出来的。

应该指出，只是在经典观念上，这两条原理才被认为是互不相容的。但事实上，光速不变原理由于断言了光的传播定律在所有惯性系中的等同性，所以它与相对性原理有着内在的一致性。爱因斯坦提出的惯性系的等效性和真空光速 c 值的普适性，是物理学思想发展史上的一个巨大飞跃，标志着人类的认识已进入高速领域，促进了牛顿以来时空观上的一场巨大变革。

在《论动体的电动力学》论文的"§3. 从静系到另一个相对于它做匀速移动的坐标系的坐标和时间的变换理论"中，在他的两个公设的基础上，极其自然和简练地得到了不同惯性系（假定它们以相对速度 v 沿 x 方向做相对运动）的各个时空坐标之间确定的数学关系，用现代常用的表述形式即：

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

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

① 《纪念爱因斯坦译文集》，上海科学技术出版社，1979年，第379页。

这就是现今所说的“洛伦兹变换方程”。洛伦兹在1904年曾经提出了这种变换关系。不过，由于洛伦兹没有摆脱绝对时空观念，为了得出这组变换竟提出了11个特殊的假设。现在爱因斯坦独立地得出了它，他事先并不知道洛伦兹1904年的工作。而且，在爱因斯坦这里，这组变换只是两个基本原理的必然结果，这是符合爱因斯坦关于理论的简单性的信念的。他认为，自然界是和谐而简单的，因而简单性也应该是判定一个理论的完善性的重要原则。还应指出，爱因斯坦得到的这个变换方程组的形式，与洛伦兹原来的形式也并不相同。对于爱因斯坦的形式，$x^2+y^2+z^2-c^2t^2$是一个不变量；而在洛伦兹原来的变换式中，$x^2+y^2+z^2-c^2t^2$却不是一个不变量。所以后来人们都采用爱因斯坦的形式。特别应该注意的是，和洛伦兹不同，爱因斯坦认为，这种变换并不是仅具纯粹形式意义的假象，而是时空内在量度的变化。这种变换一方面要求每一个普遍的物理定律对这种变换具有协变性，另一方面又表明，从不同的参照系，即从不同的物质关系去看时空，时空应当有不同的特点。这组变换的提出，为进一步研究时空特性提供了重要工具。

关于爱因斯坦是如何创立狭义相对论的，有一个问题需要作些澄清。在某些教科书和通俗读物里，常说爱因斯坦是由迈克耳孙-莫雷实验推出了光速不变原理，或者说这个实验否定了以太模型，使经典理论遭遇到困难而导致狭义相对论的产生。1982年用英文发表的爱因斯坦1922年在日本京都大学的演讲中，也提到他在学生时期就知道迈克耳孙的实验结果，并由此相信“地球相对于以太的运动”是不可能用任何光学实验测出来的。

但是，令人费解的是，在爱因斯坦1905年的文章《论动体的电动力学》中，却没有明确提到迈克耳孙-莫雷实验，只是笼统地写道“企图证实地球相对于‘光媒质’运动的实验的失败”。而且爱因斯坦晚年也多次表示迈克耳孙实验对他的工作是无足轻重的。1954年2月9日，在给达文波特（F. G. Davenport）的信中，爱因斯坦写道：“在我自己的思想发展中，迈克耳孙的结果并没有引起很大的影响。我甚至记不起，在我写关于这个题目的第一篇论文时（1905），究竟是不是知道它。对此的解释是：根据一般的理由，我深信绝对运动是不存在的，而我的问题仅仅是这种情况怎么能够同我们的电动力学知识协调起来。因此人们可以理解，为什么在我本人的努力中，迈克耳孙实验没有起什么作用，至少是没有起决定性的作用。”[①]在1950年2月4日同香克兰（R. S. Shankland）教授的谈话中[②]，爱因斯坦说他是通过洛伦兹的著作知道迈克耳孙-莫雷实验的，“但是只有在1905年以后它才引起他的注意”，他还说：“对他影响最大的实验结果，是对星的光行差的观察和菲索对流水中光速的量度。”他说：“它们已足够了。”在1952年纪念迈克耳孙诞生100周年的贺信里，爱因斯坦对迈克耳孙及其工作作了高度的

---

① 《爱因斯坦文集》，第一卷，第617～618页。

② 《爱因斯坦文集》，第一卷，第489～490页。

评价，但他同时指出："著名的迈克耳孙-莫雷实验对我自己思考的影响倒是间接的。我是通过洛伦兹关于动体电动力学的决定性的研究（1895）而知道它的，而洛伦兹这一工作在建立狭义相对论以前我就已经熟悉了"。"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。但是我也受到了菲索实验结果以及光行差现象的指引。"[①]

爱因斯坦晚年的这些回忆，与1922年在日本京都大学的演讲中的说法是不一致的。1987年，在为纪念迈克耳孙-莫雷实验100周年而发表的一组文章中，对这个问题进行了讨论。专门研究相对论史的米勒（A. I. Miller）在一篇通信中指出，爱因斯坦1922年的演说是用德语讲的，然后用日文追记再译成英文，由于语言方面和其他方面的原因，难保没有失实之处[②]。更早一些，1969年，美国科学史家霍尔顿（G. Holton）也指出："迈克耳孙-莫雷实验对爱因斯坦理论的产生所起的作用是微小的、间接的，以致人们可以设想，即使没有做这个实验，对爱因斯坦的工作也不会产生什么影响。"[③]还有人说爱因斯坦的1922年演讲是他人伪造的。

现在看来，爱因斯坦在1900年前后，如果没有直接读过迈克耳孙的文章的话，也应当从洛伦兹和别人的著作中了解到了迈克耳孙-莫雷的实验。不过，这一实验结果的确没有在爱因斯坦创立狭义相对论的思考中起到重要的作用。爱因斯坦是通过对光行差现象和菲索实验，也包括他自己曾经设想过的一两个实验对以太漂移问题进行深入思考的；但他主要则是出于对对称与统一的追求，出于深信绝对运动不存在，出于对静止以太假说的否定而走上创建新力学的道路的。他当时关心的并不是对具体的实验事实的解释，而是麦克斯韦电动力学应用到运动物体时所引起的一些不对称。所以在1905年6月的论文的一开始，就详细论述了一个磁体与一个导体之间的电动力的相互作用这一思想实验所揭示出的不对称性，而对企图证实地球相对于"光媒质"运动的具体实验却一笔带过。正是因为他的理论并不是从具体的实验事实中归纳出来的，而是"根据一般的理由"，从少数普遍性公设出发进行逻辑演绎建立起来的，所以愈到晚年，他所能记起的也只有这一条创建思路。至于1922年在日本京都大学的演说，其基本内容还是可靠的，不能说是伪造。这个演说是用德语进行的，是由东北大学埃施瓦雷（J. Ishiware）教授作的翻译。埃施瓦雷在1912～1914年间曾在德国索末菲手下进行研究工作，对德语是熟悉的。这份记录于1923年在月刊 Kaizo 上发表，如果是伪造的，应当早被揭穿了。可能的情况是，在讲到他创建狭义相对论的第一条思路，即提出相对性公设时，方便地举出当时已广泛地为人们所知的迈克耳孙-莫雷实验的结果做出说明，这在一个连底稿都没有的通俗性讲演中是完全可能的。这个讲演中对他创建狭义相对论的

---

① 《爱因斯坦文集》，第一卷，第566页。

② A. I. Miller, Einstein end Michelson-Morley, Phys. Today, 40 (1987), No. 5.

③ G. Holton,《爱因斯坦、迈克耳孙和'判决'实验》, Isis, 60 (1969), pp. 133～197.

基本思路的揭示，还是可信的。

五、相对论时空效应的发现

狭义相对论的创立，引起了人类时空观的一次重大变革，将伽利略和牛顿以来的动力学时空观发展到相对论的时空观。牛顿的绝对时空观把空间和时间看作是独立的本体，物体的长度（空间两点间的距离）、两个事件之间的时间间隔以及两事件的同时性都与参照系的选择无关，是绝对的。

但是，狭义相对论却把空间和时间的测量同一种基本的物质运动形态——光的传播规律联系起来，从而揭示了空间和时间特性的相对性，指出空间间隔和时间间隔的量度并不具有不变性，而是随着物质运动状态的变化而变化。

在《论动体的电动力学》的第四节“关于运动刚体和运动时钟所得方程的物理意义”中，爱因斯坦首先论述了空间的“收缩效应”：“我们观察一个半径为 R 的刚性球，它相对于动系 k 是静止的，它的中心在 k 的坐标原点上。这个球以速度 v 相对于 K 系运动着，它的球面方程是：

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = R^2$$

用 x，y，z 来表示，在 $t=0$ 时，这个球面的方程是：

$$\frac{x^2}{\left(\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}\right)^2} + y^2 + z^2 = R^2$$

一个在静止状态量起来是球形的刚体，在运动状态——从静系看来——则具有旋转椭球的形状了，这椭球的轴是：

$$R\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}, R, R$$

这样看来，球（因而也可以是无论什么形状的刚体）的 Y 方向和 Z 方向的长度不因运动而改变，而 X 方向的长度则好像以 $1:\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}$ 的比率缩短了。v 愈大，缩短得就愈厉害。对于 $v=V$，一切运动着的物体——从‘静’系看来——都缩成扁平的了。对于大于光速的速度，我们的讨论就变得毫无意义了；此外，在以后的讨论中，我们会发现，光速在我们的物理理论中扮演着无限大速度的角色。”

爱因斯坦的论述中所写的 V 即光在真空中的速度 c。用现在教科书中通常的例子来说，若有一根杆沿 x' 方向静置于坐标系 k 中，坐标系 k 以速度 v 沿 x 方向相对于坐标系 K 运动，从洛伦兹变换式即可得出，杆在两个坐标系中的长度 l 与 l' 呈以下关系：

$$l = l'\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

这表明：在同杆相对静止的坐标系（k）中测量时，杆有最大的长度；而当杆运动时（从 K 系观察），杆的长度则沿运动方向缩短，运动速度越大，沿运动方向的长度缩短得越厉害。“长度缩短”效应说明空间两点之间的距离不是绝对的，而是相对的，它随运动状态的改变（即随参照系的选择）而不同。

接着，文章对时间延缓效应作了论证：

“进一步，我们设想有若干只钟，当它们同静系相对静止时，它们能够指示时间 t；而当它们同动系相对静止时，就能够指示时间 τ，现在我们把其中一只钟放到 k 的坐标原点上，并且校准它，使它指示时间 τ，从静系看来，这只钟走得快慢怎样呢？

在同这只钟的位置有关的量 x，t 和 τ 之间，显然下列方程成立：

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}}\left(t - \frac{v}{V^2}x\right), x = vt$$

因此，

$$\tau = t\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2} = t - \left(1 - \sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}\right)t$$

由此得知，这只钟所指示的时间（在静系中看来）每秒钟要慢$1-\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}$秒，或者——略去第四级和更高级的（小）量——要慢$\frac{1}{2}$ $(v/V)^2$秒。

从这里产生了如下的奇特后果。如果在 K 的 A 点和 B 点上各有一只在静系看来是同步运行的静止的钟，并且使 A 处的钟以速度 v 沿着 AB 联线向 B 运动，那么当它到达 B 时，这两只钟不再是同步的了，从 A 向 B 运动的钟要比另一只留在 B 处的钟落后$\frac{1}{2}tv^2/V^2$秒（不计第四级和更高级的（小）量），t 是这只钟从 A 到 B 所费的时间。”①

爱因斯坦的这段论述表明，在狭义相对论中两个事件之间的时间间隔在不同的惯性系中也是不相同的。同一事件在相对静止的参照系 k 中所测的时间间隔设为 T'，而在 K 系中测得的时间间隔设为 T，则它们之间的关系为

$$T = T'\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

所以，两个事件之间的时间间隔不是绝对的，它随着运动状态的改变（即随参照系的选择）而不同。任何观察者都会看到，相对于他做匀速直线运动的所有过程都比相对于他静止的相同过程进行得慢了，这就是所谓“时钟延缓”效应。

---

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第96页。

同样可以证明，不同地点所发生的两个事件之间的时差是相对的，在某一惯性参照系内是“同时发生”的事件，从别的惯性系观测则是不同时的。

前述这些效应表明了空间距离、时间间隔和同时性的相对性，它们的测量依赖于参照系的选择。这就深刻地揭示了空间和时间与物质运动的密切联系。

狭义相对论在指出时间和空间量度的相对性的同时，也指出了时空整体的绝对性。虽然从不同的惯性系看来，两个事件之间的空间间隔和时间间隔分别都是相对的，但是，由于真空中的光速 c 的不变性，却使空间和时间的某种结合的“间隔”具有了绝对性。

我们曾提到，庞加莱已经提出了关于四维连续统的几何关系的理论，他已经认识到四维欧几里得“间隔”的不变性。1907年到1908年，立陶宛出生的德国数学家闵科夫斯基（H. Minkowski，1864～1909）也阐述了这一理论。

闵科夫斯基是爱因斯坦大学时的数学老师，曾因爱因斯坦不注重正规的功课常陷入独立思考而不喜欢这个学生。但爱因斯坦所建立的相对论，却使闵科夫斯基大为赞赏。1908年，在科隆举行的第80届自然科学与医生大会上，闵科夫斯基作了《空间与时间》的著名演讲，以他所精通的几何学知识，用抽象的代数方法重新整理了相对论的基本原理，给爱因斯坦理论以一个非常美妙的表述形式。他指出，洛伦兹变换乃是空间-时间四维坐标的变换。因为，如果把时间看成第四维，它就可以同三维的普通空间结合成一个抽象的四维空间，于是，他在三个空间坐标 x，y，z 之外，又引进第四个坐标，以虚数 $i=\sqrt{-1}$ 表示，以它与光速和时间的乘积 ict 为其值。这样就可以直接用准欧几里得四维空间的几何图形来表示事件及其变化规律。一个事件，即一组 x，y，z，t 称为一个“世界点”；所有可以设想的数组 x，y，z，t 的全体，称为“世界”；粒子的运动和历史则相应于其中的一条“世界线”。在没有外力的情况下，一个粒子的运动轨迹就是短程线。闵科夫斯基证明了，在这个准欧几里得空间中，空间距离和时间间隔两者各自独立的不变性不再存在了，但两者的结合则是不变的。在某一惯性系中，两个事件之间的空间距离为 h，时间间隔为 T，那么在这个四维世界中的长度的平方则可表示为

$$S^2 = h^2 - c^2T^2$$

这是一个洛伦兹变换的不变量，S 称为两个事件之间的“时空间隔”，它是四维时空中的绝对量。在这个演讲的一开头，闵科夫斯基声言“我向你们提出的空间时间观念，是在实验物理学的土壤中产生出来的。从今以后空间和时间本身都消失在阴影中了，只有两者的一种统一体才仍然是一种独立的实在。”他把“空-时”统一体的客观的、绝对的存在这一观点叫作“绝对世界的假设”。

闵科夫斯基的工作在当时看来并没有包含新的物理实质的原理，只是从数学形式上改造了狭义相对论。但这一形式对物理的几何化有决定性的影响。正如希尔伯特在纪

念闵科夫斯基的讲演中所说，这一发展形式“能够揭示出自然规律的内在的简单性和真正的本质”。爱因斯坦开始时并不赞赏闵科夫斯基的工作，以为这是数学家把物理问题搞复杂化了。他觉得过分细致的数学形式会掩盖物理内容。但他很快又认识到这种鲜明的几何观点，是他进一步发展相对论理论的重要方向；他最终相信，所有自然规律都应是涉及时空的几何命题。实际上，闵科夫斯基第一次清楚地揭示出爱因斯坦理论所包含的普遍意义。他的四维表示式，以及他对新理论的推崇，对把物理学家争取到新理论方面来，对阐明新理论的革命意义，都起到了重要的作用。

六、狭义相对论理论体系的完成

从1905年到1907年，爱因斯坦接连发表了关于相对论的三篇重要论文，把狭义相对论的原理和方法推广到整个物理学领域，建立了相对论物理学体系，这三篇论文就是《论动体的电动力学》(1905年6月)，《物体的惯性同它所含的能量有关吗?》(1905年9月)，《关于相对论原理和由此得出的结论》(1907)。我们对这个物理学体系的主要内容作一概括性的说明。

1. 新理论对光学现象的应用

在《关于相对论原理和由此得出的结论》的第五节[①]中，爱因斯坦推导出相对论的速度加法定理。

设一个质点相对于参照系 S' 按照下列方程做匀速运动

$$x' = u'_x t'$$
$$y' = u'_y t'$$
$$z' = u'_z t'$$

利用洛伦兹变换方程，把 x'，y'，z'，t' 用它们的 x，y，z，t 的表示式代替，即可得到质点相对于参照系 S 的速度分量 u_x，u_y，u_z，设

$$u^2 = u_x^2 + u_y^2 + u_z^2$$
$$u'^2 = u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2$$

并以 α 表示参照于 S' (u') 的 x' 轴 (v) 和质点的运动方向间的夹角，则可得出

$$u = \frac{\sqrt{(v^2 + u'^2 + 2vu'\cos\alpha) - \left(\frac{vu'\sin\alpha}{c}\right)^2}}{1 + \frac{vu'\cos\alpha}{c^2}}$$

如果两个速度 v 和 u' 是同一方向，就可得到

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第161～163页。

$$u = \frac{v + u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$$

“从这个方程得出：两个小于 c 的速度相加，合成的速度总是小于 c”；并可进一步得知，“光速 c 同一个小于光速的速度相加，得到的结果仍等于光速 c”。爱因斯坦指出：“从速度加法定理还可以进一步得出一个有意思的结论，即不可能有这样的相互作用，它可用来做任意的信号传递，而其传递速度大于真空中的光速。”这就修正了经典速度合成法则，断言了光在真空中的传播速度 c 是一切物体运动的极限速度，无限大速度的瞬时信号是不存在的。

应用相对论性速度加法定理很容易解决诸如菲索实验的光在运动介质中的传播问题。并会看到，长期困惑物理学界的“拖曳系数”是作为相对论理论的一个必然结果出现的。设介质的折射率为 n，光相对于该介质的速度为 c/n。假如介质以速率 v 平行于光的方向运动，利用速度相加定理将有

$$V = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + v/nc}$$

对于 $v \ll c$，可将上式展开为 v/c 的级数，并略去高于一次的项可得：

$$v = \frac{c}{n}\left(1 + \frac{vn}{c}\right)\left(1 + \frac{v}{nc}\right)^{-1} = \frac{c}{n}\left(1 + \frac{vn}{c}\right)\left(1 - \frac{v}{nc} + \cdots\right)$$

$$\cong \frac{c}{n}\left(1 + \frac{vn}{c} - \frac{v}{nc}\right) \cong \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v$$

可见，毋需任何额外的假定，仅利用相对论性速度相加定理，即能导出菲涅耳的那个必须借助于光受到介质拖曳的假定才能解释的结果。

作为相对论理论的应用，爱因斯坦还以简洁的方式首次得出光行差和多普勒效应的精确解；而在洛伦兹的理论里，对这两个问题只给出准确到 v/c 的一阶的近似公式。而且在相对论里，这两种效应纯粹是运动学问题，完全摒除了相对于以太的速度等考虑。

2. 新理论对电动力学现象的应用

在《论动体的电动力学》的第六节“关于空虚空间麦克斯韦-赫兹方程的变换。关于磁场中由运动所产生的电动力的本性”，第九节“考虑到运流的麦克斯韦-赫兹方程的变换”，以及《关于相对论原理和由此得出的结论》的第七节“麦克斯韦-洛伦兹方程的变换”中，爱因斯坦论述了新理论对于各种电动力学现象的应用。爱因斯坦先后导出了在洛伦兹变换下保持形式不变的无源和有源的麦克斯韦-赫兹电磁场方程组，证明了本来只适用于静止坐标系的麦克斯韦方程组，经过空间、时间坐标变换后，同样也适用于做任何运动的惯性系。这就是说，麦克斯韦-洛伦兹方程对于洛伦兹变换是协变的。他得

出结论说："麦克斯韦-洛伦兹理论的电动力学基础符合于相对性原理。"

爱因斯坦对电场和磁场以及电荷密度和电流密度，都施行了相应的变换；并且指明了，在电磁场中运动的点电荷上的作用力，如何可通过将场变换到相对于电荷静止的坐标系中而简单地计算出来。他得出结论说："电场强度或磁场强度本身并不存在，因为在一个地点（更准确地说，在一个点事件的空间-时间附近）是否有电场强度或磁场强度存在，可以取决于坐标系的选择。"他针对在《论动体的电动力学》一文开头就提出的那个关于一个磁体同一个导体之间电动力的相互作用问题做出回答说："电力和磁力都不是独立于坐标系的运动状态而存在的"，"那种在考查由磁体同导体的相对运动而产生电流时所出现的不对称性，现在是不存在了。"可以看出，在新理论中，电场和磁场都是相对量，与坐标系的选择有关。如果在一个参照系内只有电场或只有磁场，则在另一个相对于它做匀速运动的参照系内，则既有磁场也有电场。

在这两篇文章中，爱因斯坦还简单地证明了，"电荷是一个同参照系的运动状态无关的量。因此，如果一个任意运动的物体的点电荷从随之运动的参照系看来是守恒的，那么，它对任何其他参照系也是守恒的"。

3. 质量的相对论性效应的发现

1876年，美国物理学家罗兰（H. A. Rowland，1848～1901）用实验证明，一个静电荷当它快速转动起来后，对磁针会产生影响。在电子论出现以后，人们由罗兰实验想到，既然带电体的运动会产生磁场，因而要使带电体运动，比让不带电物体运动需要做更多的功。这就好像存在着某种和电荷的场连在一起的"附加惯性"。这种由于电磁作用而产生的"附加"质量，被称为"电磁质量"。在电子的存在得到证实之后，关于电子的电磁质量问题，随之成为物理学界普遍关心的问题。

1901年，德国物理学家考夫曼（W. Kaufmann，1871～1947）用放射性镭盐发出的β射线（速度可达0.8c）通过电场和磁场进行实验，对电子的荷质比 e/m 和速度 v 做出测量，结果发现电子的质量随其运动速度的不同而变化了。"当速度达到光速时，它将变成无限大。"1902～1903年，考夫曼的同事阿伯拉罕建立了第一个粒子的场论模型。他假设电子是一个半径为 r_0 的均匀带电的刚性小球，给出了电子"电磁质量"公式。在与运动方向相平行和相垂直的方向上，分别表现为纵质量 m_L 和横质量 m_T：

$$m_1 = \frac{e^2}{2r_0\beta^3c^2}\left[\frac{2\beta}{1-\beta^2} - \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)\right]$$

$$m_T = \frac{e^3}{4r_0\beta^3c^2}\left[(1+\beta^2)\ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)\right]$$

式中 $\beta=v/c$。阿伯拉罕认为，考夫曼的实验结果，与他的横质量公式相符合。1904年，洛伦兹根据他的收缩假说，也计算出了电子的纵质量和横质量（见前文）。由于当时的实验数据不够准确，还无法区分阿伯拉罕和洛伦兹的公式哪一个近于实际。除此之外，德

国的布雪勒（A..H. Bucherer，1863～1927）在1904年根据电子在收缩时保持体积不变的模型，也提出了他的电子质量公式。

在《论动体的电动力学》的第十节“（缓慢加速的）电子的动力学”中，爱因斯坦讨论了这个问题。他从运动方程出发，经过洛伦兹-爱因斯坦坐标变换，得出了一组结果；然后保持“质量×加速度＝力”的方程形式，通过比较而导出了电子的纵质量和横质量

$$m_L = \frac{m_0}{\left(\sqrt{1 - v^2/c^2}\right)^3}$$

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

式中 m_0 为物体的静质量。爱因斯坦所得到的纵质量 m_L 随速度变化的关系与洛伦兹的结果相同，而横质量 m_L 与前述三种理论都不相同。看来，爱因斯坦对这一结果并不喜欢，因此他立即声明，“当然，用另一种力和加速度的定义，我们就会得到另外的质量数值。由此可见，在比较电子运动的不同理论时，我们必须非常谨慎。”

情况正如爱因斯坦所觉察的那样，问题出在对力所下的定义上。普朗克在1906年著文指出，如果将力表达成动量随时间的变化率，即 $\frac{d}{dt}(mv)$，再将动量分解成质量 m 乘以速度 v，则得到相对论质量公式

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

形式上与洛伦兹的横质量相同，不过现在只有一个质量，不再出现纵和横的两种质量。1909年，刘易斯（G. N. Lewis，1875～1946）等考虑了两个球体的弹性碰撞，利用相对论的速度相加定理和动量守恒定理，也得到了这一质量公式。普朗克还证明了，从这种表达方式便于建立相对论力学的哈密顿-拉格朗日形式。普朗克的这种做法具有根本的意义。我们知道，在经典力学里，运用以牛顿定律表示的力形式，和运用以哈密顿-拉格朗日方程为代表的能量-动量形式，在处理问题上是完全等价的。现在，在相对论里，按照普朗克的意见，如要需要力和质量的概念的话，它们必须从动量和能量的表达式中定义出来；而不是像在牛顿力学里那样，先有力和质量的概念，然后才有动量和能量。于是，“力的表象”和“能量-动量表象”两者不再等效，在相对论里第一次揭示了只有能量和动量才是基本的力学量，而质量和力的概念则退居到从属地位。

这样，相对论的动量表达式则可写为

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

于是，在相对论范围内，物体的动量和速度之间不再是简单的正比关系。据此，就可以将相对论范围内的牛顿方程写成相对论动量随时间而变化的规律：

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right]=F$$

这一方程对洛伦兹变换为不变式，因而满足相对性原理的要求。此外，由

$$F=\frac{d}{dt}(mv)=v\frac{dm}{dt}+m\frac{dv}{dt}$$

可知，对一个持续的恒力来说，v 越大 m 也越大，而加速度 dv/dt 反而越小。所以对一个已接近光速的粒子来说，受到外力作用时，与其说是增加速度，莫如说是增加质量。如果把质量看做是惯性阻力的话，也可说：不可能借助于作用力而使物体以大于光速的速度运动，因为它的惯性阻力将阻挠物体达到光速，从而极其自然地解释了考夫曼实验。

4. 相对论质能关系的提出

在《论动体的电动力学》一文的最后，爱因斯坦导出了电子动能公式

$$W=\mu V^2\left\{\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}}-1\right\}$$

μ 为电子的质量，V 为真空中的光速，这个结果与我们今天使用的公式相同。他由这个公式得出“当 $v=V$，W 就变成无限大。超光速的速度——像我们以前的结果一样——没有存在的可能。”

在1905年9月发表的第二篇关于相对论的论文《物体的惯性同它所含的能量有关吗?》中，爱因斯坦继续了这一研究工作，并再一次证明了洛伦兹不变性原理所具有的启发性力量。他利用洛伦兹变换和相对性原理发现，“如果有一物体以辐射形式放出能量 L，那么它的质量就要减少 L/V^2。”①

爱因斯坦由此得出结论说：“物体的质量是它所含能量的量度；如果能量改变了 L，那么质量也就相应地改变 $L/9\times10^{20}$，此处能量是用尔格来计量，质量是用克来计量。”所以，“在发射体和吸收体之间，辐射在传递着惯性。”②

这就是关于质能关系的首次推导和论述。不过，在这篇论文中，爱因斯坦的论述还只涉及到一个过程的初末态能量的差值与质量变化的关系。

在1907年《关于相对论原理和由此得出的结论》的第十一节“关于质量对能量的相依关系”中，爱因斯坦对上述关系作了推广。他证明了一个处在外部电磁场中的物理体系，在一个以速度 v 相对于它运动的参照系里，其能量 E 等于

---

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第118页。
② 《爱因斯坦文集》，第二卷，第118页。

$$E=\left(\mu+\frac{E_0}{c^2}\right)\frac{c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

其中 μ 为系统原来的惯性质量，E_0是系统在静止系中的能量。他接着指出："所考察的物理体系的情况就像是一个质量为 M 的质点，其中 M 按照下列公式同体系的内能发生关系：①

$$M=\mu+\frac{E_0}{c^2}$$"①

爱因斯坦写道："这个结果具有特殊的理论重要性，因为在这个结果中，物理体系的惯性质量和能量以同一种东西的姿态出现。同惯性有关的质量 μ 相当于其量为 μc^2的内能。既然我们可以任意规定 E_0的零点，所以我们无论如何也不可能明确地区分体系的'真实'质量和'表观'质量。把任何惯性质量理解为能量的一种储藏，看来要自然得多。"②

这样，质量的力学概念就被大大扩充，同时充当了能量的量度。另外，由于质量和能量是密切联系着的，所以从封闭系统的质量守恒定律中，也可以得到能量守恒的结论，反之亦然。他写道："按照我们的结果来看，对于孤立的物理体系，质量守恒定律只有在其能量保持不变的情况下才是正确的，这时这个质量守恒定律同能量原理具有同样的意义。"③所以，在狭义相对论中，存在着统一的"能量-质量守恒定律。"在经典物理学中原来彼此独立的这两个基本的自然定律，现在被发现是同一个自然规律的不同侧面，这也反映出了物质和运动的不灭性的完全一致性。

后来，在1948年为《美国人民百科全书》所写的条目《相对性：相对论的本质》一文中，爱因斯坦声称，狭义相对论最重要的成就之一，是"它把动量守恒和能量守恒这两条定律统一成一条定律，并且指出了质量同能量的等效性。"④这里又显示出"闵科夫斯基四维空间"的实质性意义。因为，采用闵科夫斯基的准欧几里得几何，能量和动量可联合成一个四维矢量，即"能量-动量矢量 $\boldsymbol{P}$"，用 $\boldsymbol{P}_k$（$k=1, 2, 3, 4$）表示它的投影，则有

$$\boldsymbol{P}_1=m_0v_1=\frac{m_0v_x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\boldsymbol{P}_x$$

$$\boldsymbol{P}_2=m_0v_2=\frac{m_0v_y}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\boldsymbol{P}_y$$

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第184页。
② 《爱因斯坦文集》，第二卷，第185页。
③ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第185页。
④ 《爱因斯坦文集》，第一卷，第458页。

$$\boldsymbol{P}_3 = m_0 v_3 = \frac{m_0 v_z}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \boldsymbol{P}_z$$

$$\boldsymbol{P}_4 = m_0 v_4 = \frac{i m_0 c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

不难看出，前面三个四维矢量投影，构成一个三维的相对论动量矢量 $\boldsymbol{P}$；而投影 $\boldsymbol{P}_4$ 则可变换成

$$\boldsymbol{P}_4 = \frac{i}{c} \cdot \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{i}{c}\boldsymbol{E}_0$$

因此，四维矢量的第四个投影代表粒子的总能量乘上系数 i/c，即 $\boldsymbol{E}=mc^2$。所以可以说，动量是“能量-动量矢量 $\boldsymbol{P}$”的空间分量，能量则是它的时间分量。这样，原来在经典物理学中是互相孤立的动量守恒定律和能量守恒定律，在相对论中则结合成为一个统一的“能量-动量守恒定律。”

我们知道，动量守恒与空间的均匀性有关，能量守恒与时间的均匀性有关。所以狭义相对论仍然坚持了空间的均匀性和时间的均匀性，并表明了两者的统一性。

我们还可认为，采用“闵科夫斯基空间”所作的这一论证，是首次严格推出能量等于质量乘光速平方的公式，清晰地揭示了能量与质量的等当性。这样，质能关系就意味着，可以通过适当的核反应所减少的质量而获得相等当的能量；后来还发现了像正负电子对“湮没”为光子对的过程，其中初态粒子的静质量所对应的能量，全部变成末态光子的动能，更加令人信服地证实了相对论质能关系的深刻意义。

第二节　广义相对论的创立

在狭义相对论建立之后，爱因斯坦并没有停止他科学创造的步伐。1907年，当绝大部分物理学家还没有理解狭义相对论所带来的物理学思想的重大革命意义时，爱因斯坦却远远超过了他同时代的物理学家，发现了狭义相对论的根本性缺陷，开始了新的理论构想。

一、狭义相对论的局限性

爱因斯坦发现，“在古典力学里，同样也在狭义相对论里，有一个固有的认识论上

的缺点，这个缺点恐怕是由E.马赫最先清楚地指出来的。”[1]马赫的问题就是：“为什么惯性系在物理上比其他坐标系都特殊，这是怎么一回事？”[2]的确，按照狭义相对论理论，许多物理定律在洛伦兹变换下都具有协变性，因而物理定律在各个惯性系里都成立。或者说对物理学定律而言，各个惯性系是彼此等效的；而对于非惯性参照系，这种协变性失效。但是，无论是古典力学，还是狭义相对论，都不能说明为什么只有惯性系才有这种特殊优越的地位？惯性系又是什么？按牛顿力学，凡是与做惯性运动物体相固联的参照系就是惯性系。但是如何确知物体在做惯性运动，最终又需仰仗一个“不动的绝对空间”。许多人，包括爱因斯坦本人都对这个问题产生了怀疑。1922年，他在京都大学访问期间所作的《我是如何创立相对论》的讲演中[3]，谈到1907年他对狭义相对论的想法时，他说：

> 当时，我对狭义相对论并不那么满意，因为它被严格地限制在一个相互具有恒定速度的参照系中，它不适用于一个做任意运动的参照系，于是我努力地把这一限制取消，以使这一理论能在更为一般的情况下讨论。对于坚信因果关系的普遍性的爱因斯坦来说，当然不能容许惯性系与非惯性系之间这种内在不对称性情况的存在。如何来解决这个难题呢？其最根本、最自然的作法，就是扩大狭义相对性原理的物理范围和内容。

除了惯性系这一限制外，狭义相对论的另一严重困难来自于引力，即狭义相对论与牛顿的引力公式和引力势方程不相容。

自狭义相对论提出后，许多人曾致力于检验各种物理定律在洛伦兹变换下的协变性，他们都获得了成功，但是包括爱因斯坦本人在内，都发现当把牛顿的引力理论纳入到相对论理论之中时，却遇到了明显的矛盾。

爱因斯坦的一个重要观点，是相信世界的内在和谐，追求理论的逻辑统一。运用狭义相对论理论，爱因斯坦已经把电场与磁场、质量和能量统一起来，并使牛顿力学与麦克斯韦电磁场方程协调起来。接着，爱因斯坦就想把引力现象纳入到狭义相对论的理论体系中去。为了做到这一步，首先必须用场的表达式来描述引力现象。因为狭义相对论既然取消了绝对同时性观念，那么引力的超距作用也就不可能继续保留了。

开始，爱因斯坦认为寻找一个描述引力场变化的结构定律也许并不难。他设想：“最简单的做法当然是保留拉普拉斯的引力标量势，并且用一个关于时间的微分项，以明显的方式来补足泊松方程，使狭义相对论得到满足。引力场中质点的运动定律也必须适应狭义相对论。”[4]然而，爱因斯坦很快就发现研究的结果是令人怀疑的。因为，依照古典力学，物体在竖直引力场中的竖直加速度，同该物体的速度的水平分量无关。因而

---

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第280页。
② 《爱因斯坦文集》，第一卷，第28页。
③ A. Einstein，How can I Created the Theory of Relativity . Phys . Today ， Aug (1982)，p. 45.
④ 《爱因斯坦文集》，第一卷，第320页。

在这样的引力场里，一个力学体系或者它的重心的竖直加速度的产生，同它内在的动能无关。但是在1905年爱因斯坦根据狭义相对论已经得出："物体的质量是它所含能量的量度。"根据这个结论，物体的惯性质量将随其能量而改变，因此落体的加速度将同它的水平速度或者该体系的内能有关。"这不符合这样一个古老的实验事实：在引力场中一切物体都具有同一加速度。"[①]这一段尝试使爱因斯坦相信："在狭义相对论的框子里，是不可能有令人满意的引力理论的。"[②]关于这一认识，爱因斯坦在京都大学的演讲中说："一个最不令人满意的事是，尽管惯性与能量之间的关系在狭义相对论中已经明确地解决了，但是惯性与重量或引力场内的能量关系并不清楚。我感到这个问题不可能在狭义相对论的框架中得到解决。"

值得称道的是，对狭义相对论提出上述两点基本质疑的，正是提出并建立狭义相对论的爱因斯坦本人。他以敏锐的洞察力及坚持不懈的探索精神，抓住了这两个致命的环节，一个更为深刻与普遍的广义相对论理论由此诞生。

二、两个基本原理的提出

当爱因斯坦认识到在狭义相对论理论框架中容纳不下引力理论时，就决心突破狭义相对论的局限，寻找解决引力问题的新途径。在1907年发表的论文《关于相对论原理和由此得出的结论》中，就初步提出了作为广义相对论基础的两个基本原理：等效原理，广义相对性原理（广义协变原理）。广义相对论的全部理论建立在等效原理的基础上，而等效原理的提出又使狭义相对论的两个致命问题一揽子得到了解决。

爱因斯坦思考问题的方式既朴实又奇特。狭义相对论两个难题的解决，是从一个物体下落问题开始的。一个广为人知的古老实验事实是，在引力场中的任一点上，一切物体都具有同一加速度。爱因斯坦注意到，这一现象正是反映了惯性质量与引力质量的等效性。这一等效性正是作为广义相对论理论基础的等效原理的一种表述。

其实，牛顿早已注意到了这两种质量的等效性。为了验证它们的等同，牛顿设计并完成了一个定量的实验。他利用两条摆线长都是3米的单摆，摆锤都是木盒子。其中一个装满木头，另一个放置同样重量的金子。然后，使它们以同样摆角摆动起来。实验证明，它们的周期完全相同。当把金子替换成重量相同的其他物体时，情况也全相同。就这样，牛顿在千分之一的精度内，验证了两个质量的等同性。

1896年，匈牙利物理学家厄缶（Baron Roland von Eötvös，1848～1919）用扭秤做了一个精确的实验，证明了对于各种物质，引力质量 m_g 和惯性质量 m_i 的比值在 10^{-9} 精度内是一个常数。厄缶实验如图所示：40cm 长的横杆两端分别挂以重物 A 和 B，杆

① 《爱因斯坦文集》，第一卷，第320页。
② 《爱因斯坦文集》，第一卷，第29页。

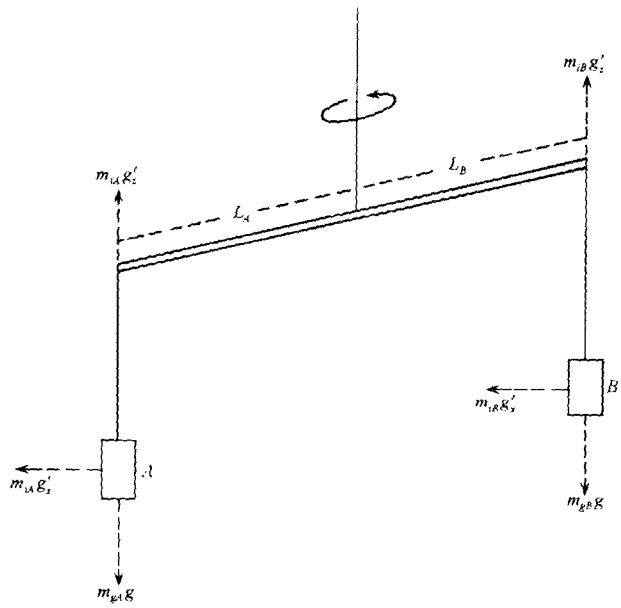


图9-1　厄缶实验示意图

的中点悬在细金属丝上。平衡时

$$L_A(m_{gA}g - m_{iA}g'_z) = L_B(m_{gB}g - m_{iB}g'_z)$$

式中 g 为重力加速度，g'_z 是由地球自转而引起的惯性离心加速度的垂直分量，L_A 与 L_B 分别为物体 A、B 到悬点的力臂。另外，由地球自转产生的惯性力还可能引起扭秤绕竖直轴转动，其转矩为

$$T = L_A m_{iA}g'_x - L_B m_{iB}g'_x$$

式中 g'_x 为惯性离心加速度的水平分量。利用前述平衡条件，可导出

$$T = L_A m_{iA}g'_x\left[1 - \left(\frac{m_{gA}}{m_{iA}}g - g'_z\right)\left(\frac{m_{gB}}{m_{iB}}g - g'_z\right)^{-1}\right]$$

由于地球上 $g'_z \ll g$，所以可得：

$$T = L_A m_{gA}g'_x\left[\frac{m_{iA}}{m_{gA}} - \frac{m_{iB}}{m_{gB}}\right]$$

可见，转矩 T 由两种质量的比值 m_i/m_g 决定。如果 $\frac{m_{iA}}{m_{gA}} = \frac{m_{iB}}{m_{gB}}$，则 $T=0$，扭秤就不转动。厄缶对于木制和铂制的两种物体进行实验，在10^{-9}精度内未发现扭秤转动，可见惯性质量与引力质量之比在10^{-9}精度内是一个常数。适当选取单位，一个物体的惯性质量就等于引力质量。

关于两个质量的相等，爱因斯坦认为不是偶然的巧合，在其背后，必然有重要的

原因尚未被人察觉。1933年6月20日，爱因斯坦在英国格拉斯哥大学作了《广义相对论的来源》的报告，他说："在引力场中一切物体都具有同一加速度。这条定律也可以表述为惯性质量与引力质量相等的定律，它当时就使我认识到它的全部重要性。我为它的存在感到极为惊奇，并猜想其中必定有一把可以更加深入地了解惯性和引力的钥匙。甚至在我还不知道厄缶的令人钦佩的实验结果之前——如果我没有记错，我是到后来才知道这些实验的——我也未曾认真怀疑过这定律的严格可靠性。"[1]

有了这把钥匙，使爱因斯坦找到了解决问题的线索。1922年，他在京都大学所作的《我是如何创立相对论的》报告中说："这个难题的突破点突然在某一天找到了。那天，我坐在伯尔尼专利局办公室里，脑子里突然闪出一个念头：如果一个人正在自由下落，他决不会感到他有重量。我吃了一惊，这个简单的想像给我的印象太深了。它使我由此找到了新的引力理论。"

爱因斯坦通过这一假想实验判断，在自由下落的升降机里，由于升降机以及其中所有的仪器都在以同一个加速度下落，因而无法判断引力场的效应。在自由下落的升降机中，惯性力和引力彼此抵消，由于消除了引力，内部的观察者将可以应用狭义相对论原理讨论任何物理问题。由此，在引力与惯性力局域等效的前提下，爱因斯坦考察了两个彼此做加速运动的参照系 $\sum_1$ 与 $\sum_2$，令 $\sum_2$ 静止，$\sum_1$ 以加速度 γ 相对 $\sum_2$ 运动。此时 $\sum_1$ 处在强度为 γ 的均匀引力场中。两个参照系内的物理定律完全相同，没有任何方法判断它们是否在相对做加速运动。由此爱因斯坦终于得出"引力场同参照系相当的加速度在物理上完全等效"这一著名的等效原理。

爱因斯坦对等效原理的认识，也有一个不断加深和完善的过程。在1907年的论文《关于相对论原理和由此得出的结论》中，他还只称它为"假设"，表述为"引力场同参照系的相当的加速度在物理上完全等价"。[2]直到1912年，他才把它正式称为"等效原理"（equivalence principle），并将它进一步推广到非匀加速运动中去。

但是1907年对等效原理的阐述是不够精确的，因为它只是试图用一个均匀加速参照系来代替一个均匀的引力场，而任何真实的引力场都是非均匀的。鉴于上述问题的存在，1913年爱因斯坦将等效原理进一步精确化，他在与 M. 格罗斯曼（M. Grossmann，1878～1936）合写的论文《广义相对论和引力理论纲要》中，把等效原理阐述为"在物理学上，（在无限小的体积中均匀的）引力场完全可以代替加速运动的参考系。"[3]对等效原理的这一阐述明确了等效原理在空间上的局域性。这显然比1907年的阐述前进了一步，加深了对等效性的认识。然而这种说法容易把等效原理的区域性误解为牛顿空间的

---

1. 《爱因斯坦文集》，第一卷，第320页。
2. 《爱因斯坦文集》，第二卷，第286页。
3. 《爱因斯坦文集》，第二卷，第224页。

区域性，同时也易于和经典力学中的达兰贝尔原理混淆。所以爱因斯坦在1916年的论文《广义相对论的基础》中又引入了下述假定："对于无限小的四维区域，如果坐标选择得适当，狭义相对论是适合的。"接着他又写道："为此，必须这样来选取无限小的('局部的')坐标系的加速状态，使引力场不会出现；这对于无限小区域是可能的。"[1]这两段叙述的基本思想是：等效原理适用于四维无限小区域；在这样的一个无限小区域内，可以取一个加速参照系消除引力场的影响。这样一个参照系后来就称为局部惯性系。

爱因斯坦特别强调了等效原理的重要性，1918年他在《关于广义相对论的原理》的论文中指出：等效原理构成了整个理论的出发点。他写道："无疑，只要人们坚持理论体系的基本思想，就不能抛弃它。"[2]可见等效原理在广义相对论中的重要地位。

爱因斯坦所提出的等效原理，将惯性系自然地推广到加速系，这就需要推广相对性原理。1907年的论文《关于相对性原理和由此得出的结论》中，爱因斯坦写道："迄今为止，我们只把相对性原理，即认为自然规律同参照系的状态无关这一假设应用于非加速参照系。是否可以设想，相对性原理对于相互相对做加速运动的参照系也仍然成立？"[3]而在提出"引力场同参照系的相当的加速度在物理上完全等价"的假设之后，紧接着他就指出："这个假设把相对性原理扩展到参照系做均匀加速平移运动的情况。"[4]必须指出的是，爱因斯坦在这篇论文中对相对性原理的推广，还局限在"均匀加速平移运动"的情形，还不能算作是广义协变原理。广义协变原理要求在任意坐标系变换下，物理定律都具有相同的形式。实际情况是，直到1913年，爱因斯坦尚未明确地坚持广义协变原理，但又觉得应该有广义协变原理。正是这种矛盾状态促使爱因斯坦进行了更深入的研究。到了1916年，在他发表的关于广义相对论的第一篇完整的总结性论文《广义相对论的基础》中，爱因斯坦明确提出："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。"[5]还说："普遍的自然规律是由那些对一切坐标系都有效的方程来表示的，也就是说，它们对于无论哪种代换都是协变的(广义协变)。"[6]

广义协变原理提出之后，关于它的物理意义就一直存在着争论。克累奇曼(Kretschmann)当时就提出，广义协变原理绝不是关于物理实在(即关于自然规律的内容)的表示，而只是关于数学形式化的一个要求。爱因斯坦在1918年发表的《关于广义相对论的原理》的论文中，列出了作为广义相对论基础的三个原理：a) 相对性原理；

---

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第224页。
② 《爱因斯坦文集》，第二卷，第365页。
③ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第198、199页。
④ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第198、199页。
⑤ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第281页。
⑥ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第284～285页。

b）等效原理；c）马赫原理。然后反驳克累奇曼说："在两个都同经验相符的理论体系中间，应当偏爱那个从绝对微分学观点看来是比较简单和明了的体系。如果人们有朝一日赋予牛顿引力力学以（四维的）绝对协变方程的形式，那么人们必然会相信，原理a）虽然不是在理论上但必定在实际上排斥这个理论。"[①]这里爱因斯坦明确指出，如果有两种理论，一个简单明确而广义协变，另一个是繁琐含糊而又不协变，当你选择理论体系的时候，当然应该选择前者而不是后者。正因为爱因斯坦坚持物理方程都必须是广义协变的，才使他逐步地建立起广义相对论的宏伟大厦。所以广义协变原理在广义相对论形成过程中绝不是可有可无的一个原理。

三、光线的引力偏折与引力红移的预言

根据等效原理和广义相对性原理的思想，爱因斯坦通过纯理论的方式，初步考察了引力场的性质，得出了原来人们意想不到的结果。他的思路是这样的：先假定已知惯性系 K 中一物理过程的时空进程，根据广义协变原理，由于物理规律的不变性，即可推知相对 K 作加速运动的参照系 K' 中的物理过程的时空进程，再根据等效原理，K' 中相当于存在有一个引力场。因此，可以利用从理论上考察那些惯性系中的物理过程，获得关于引力场中物理过程的进程。这样，引力场对物理过程的影响就全部弄清楚了。

1907年，爱因斯坦提出等效原理之后，立即注意到引力场对时钟速率的影响并做出了引力红移的预言。他根据引力场与惯性力场等效的思想得出，一个处在引力场中的时钟，当所在点引力势为 Φ 时，它所指示的当地时间读数将是与它调准的不处在引力场中的同样时钟读数的 $\left(1+\frac{\Phi}{c^2}\right)$ 倍。"在这个意义上我们可以说，在过程发生的地点的引力势愈大，在时钟中所发生的过程——一般说来是任何物理过程——也就进行得愈快。"[②]由此，他进一步得出结论，"来自太阳表面的光是从这样一种发射源发生的，这种发射源所具有的波长要比地球上同类物质所发出的光的波长大约大两百万分之一。"[③]

继1907年的论文之后，1911年爱因斯坦进一步探讨了引力场对光波传播的影响。在论文《引力对光传播的影响》中，爱因斯坦由等效原理出发，讨论了匀加速参照系 K' 中从 S_2 射向 S_1 的辐射。如果 S_2 处钟的频率为 ν_2，当光到达 S_1 处的钟时，频率不再是 ν_2，而是一个较大的 ν_1，其第一级近似值为

$$\nu_1 = \nu_2\left(1+\frac{\gamma \cdot h}{c^2}\right)$$

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第365页。
② 《爱因斯坦文集》，第二卷，第203页。
③ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第204页。

式中 γ 为 K' 的加速度，h 为 S_1、S_2 间的距离，c 为光速。接着，爱因斯坦又引入匀速参照系 K_0，并在光从 S_2 发射时，K' 相对 K_0 静止，那么在辐射到达 S_1 时，S_1 相对于 K_0 具有速度 $\gamma(h/c)$。再根据等效原理，上述方程对均匀引力场中的静止参照系 K 也同样有效。由此爱因斯坦推导出频率公式

$$\nu_1 = \nu_2\left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right)$$

式中 Φ 为 S_2 中的引力矢量的势。这一关系表明，日光谱线与地球上的光源对应的谱线相比较，必须稍微向红端移动，移动的相对总量是：

$$\frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = -\frac{\Phi}{c^2} = 2 \times 10^{-6}$$

式中 Φ 是太阳表面同地球之间的（负的）引力势差，爱因斯坦据此指出："要在一个相对于坐标原点具有引力势 Φ 的地方量时间，我们必须使用的钟——当它移到坐标原点时——要比在坐标原点上量时间所用的那只钟慢（$1+\Phi/c^2$）倍。"①

在1911年的这篇论文中，爱因斯坦从等效原理出发，根据光的频率与引力势间的关系，并结合波传播的惠更斯原理，得出结论说，光在经过引力场时，光的传播方向将发生偏折，偏折的方向朝向引力势减小的一侧，因而是朝向天体的那一边，偏转角的大小是

$$\alpha = \frac{1}{c^2}\int_{\theta=-\frac{\pi}{2}}^{\theta=+\frac{\pi}{2}} \frac{kM}{r^2}\cos\theta \cdot ds = \frac{2kM}{c^2\Delta}$$

此处 k 表示引力常数，M 表示天体的质量，Δ 表示光线同天体中心的距离。爱因斯坦根据这个公式，计算出"光线经过太阳附近因此要受到 $4\times10^{-6}=0.83$ 弧度秒的偏转。"②尽管这个预言比建立完整的广义相对论后的预言小了一倍，但它在物理学发展史上却是首次提出引力场对光线传播的影响的惊人预言！在同一篇文章中，爱因斯坦还提出了检验这一预言的途径："由于在日全食时可以看到太阳附近天空的恒星，理论的这一结果就可以同经验进行比较"。③他热切地呼吁："迫切希望天文学家接受这里所提出的问题，即使上述考查看起来似乎是根据不足或者完全是冒险从事。"④

四、时空"柔性"度规概念的建立

从1907年提出等效原理和广义相对性原理的思想，到广义相对论的最终大功告成，前后共花了八年时间。为什么要这么长的时间呢？究其根源，仍然是时空最基本的一些

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第220页。
② 《爱因斯坦文集》，第二卷，第222页。
③ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第222页。
④ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第222页。

概念使爱因斯坦感到“困惑”，正如同时性的绝对性长时期阻碍过他创建狭义相对论一样。在1946年发表的《自述》中爱因斯坦曾谈到困难产生的原因，他说：“其主要原因在于，要使人们从坐标必须具有直接的度规意义这一观念中解放出来，可不是那么容易的。”[①]1912年7月，爱因斯坦在布拉格工作期间写的一篇论文中，有下面一段不寻常的话：“对时-空变换的简单物理解释一定会失去，而且目前尚不知道一般时-空变换方程会是什么样的形式。我请求所有的物理学家全力以赴解决这个重要问题！”

1933年，爱因斯坦在格拉斯哥大学所作的报告中，也谈到过当时的困难：“不久我看出，接受了等效原理所要求的非线性变换，对于坐标的简单物理解释，无可避免地是致命的——那就是说，不能再要求：坐标差应当表示那些用理想标尺或理想时钟所测得的直接量度结果。我被这一点知识大大困惑住了，因为它使我花了很长时间才看清坐标在物理学中的意义究竟是什么。”[②]

所谓坐标“必须具有直接的度规意义”，指的是坐标差等于可量度的长度和时间，空间坐标差与可量度的空间间隔 ds 相对应，时间坐标差（时钟上的读数差）与可量度的时间间隔 τ 相对应，它们可表示为

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

$$\tau = t_2 - t_1$$

这种可直接量度的时空观是奠基于欧几里得几何基础上的物理学自古以来的传统观念；或者说，空间是欧几里得几何学的空间，时间是均匀流逝的时间。这里实际上包含着一个默认的假定：时空是“平直”的。因为只有在一个平直的空间里，才能建立一组正交坐标系。狭义相对论虽然克服了同时性的绝对性以及时间间隔、空间间隔的测量与参照系运动状态无关的传统观念，但仍然承认在同一参照系中有统一的时间、空间的测量标准，即具有“刚性”的尺和“同步”的钟，空间长度、时间间隔的测量，仍然是与坐标差相对应的，其时空是均匀的和各向同性的。

然而根据等效原理以及加速度的相对性，对于物理定律来说，不能再满足于洛伦兹变换的协变性（因为它对应于速度的相对性），而应扩大为更普遍的非线性变换的协变性（这对应于加速度的相对性以及加速度与引力场之间的等效性）。1909～1912年间，当爱因斯坦在苏黎世和布拉格大学讲授理论物理学的时候，他一直在思考这个问题。

在1916年所写的《广义相对论的基础》这篇总结性的文章里，爱因斯坦讲到一个转动的刚性圆盘的假想实验。[③]当刚性圆盘转动时，在处于中心轴处的观察者看来，就不存在静止的刚性尺和同步的钟，因为在不同的半径处，由于旋转的线速度不同，放在不同地点的尺子收缩的程度不同，钟的变慢程度也不同，时空就失去了均匀性和各

① 《爱因斯坦文集》，第一卷，第30页。
② 《爱因斯坦文集》，第一卷，第321页。
③ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第283～284页。

向同性，也即失去了“刚性”而具有“柔性”结构，从而其坐标差也就失去了直接量度的物理意义。爱因斯坦写道：“我们因此得到这样的结果：在广义相对论里，空间和时间的量不能这样来定义，即以为空间的坐标差能用单位量杆直接量出，时间的坐标差能用标准钟量出。”坐标失去了直接量度性后，就只剩下“时空连续区”这一概念具有可观测性质，而坐标只能起到记录物理事件的时空连续区的作用了。

根据等效原理，转动圆盘的惯性力与引力等效，由此，爱因斯坦认识到，在引力场中欧几里得几何学不严格成立。就这样，爱因斯坦看到了引力与时空几何的关系，或者如他所称，他找到了他的理论与高斯曲面的“接触点”，从而发现了使他长期感到困惑的问题的答案。这就是在引力场中必须放弃惯用的、仅只适用于平直时空的欧几里得几何学，寻找一种适用于类似转动圆盘时空特性的几何学。

1912年，当爱因斯坦到苏黎世工业大学任教时，他已很接近于解决这个问题了。“在这里，海尔曼·闵科夫斯基关于狭义相对论形式基础的分析显得很重要。”[①]在1916年所写的《广义相对论的基础》中，爱因斯坦也说：“用了闵科夫斯基所给予狭义相对论的形式，相对论的这种推广就变得很容易；这位数学家首先清楚地认识到空间坐标和时间坐标形式上的等价性，并把它应用在建立这一理论方面”。[②]可见，1908年闵科夫斯基所提出的四维时空的数学表示形式，成了从狭义相对论的数学原始表示走向广义相对论数学表示的一个桥梁。

闵科夫斯基把四维时空（x，y，z，t）中的线元 ds 的平方表示为

$$ds^2 = c^2dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

这种四维世界，是一种准欧几里得空间，它存在着一个准欧几里得度规，这种度规是不依赖于坐标的常数，即是一种“刚性”度规，从而使坐标差直接与可量度的空间间隔、时间间隔联系起来；它对应着线性的洛伦兹变换。爱因斯坦想到，这种准欧几里得度规应该推广使之具有普遍的形式，对应于非线性变换，即适应于非惯性系或引力场中的物理现象。于是，四维时空中两相邻事件的四维间隔（线元 ds）的平方应表示为[③]

$$ds^2 = \sum_{\mu=1}^{4}\sum_{\nu=1}^{4} g_{\mu\nu}dx_\mu dx_\nu$$

式中 $g_{\mu\nu}$ 为四维度规张量，是四个坐标的函数，亦即 $g_{\mu\nu}$ 是一种“柔性”度规。由于此时不再存在“刚性”的尺和“同步”的钟，不同坐标点的尺和钟的标准都不同，坐标差就不直接与可量度的空间间隔、时间间隔发生联系，坐标的微分只当与度规 $g_{\mu\nu}$ 联系起来考虑，才具有量度的物理意义，因此，研究 $g_{\mu\nu}$ 的数学性质和物理意义，就成为解决引力问题，推广狭义相对论，建立更广泛、更普遍的新理论的关键。

---

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第284页。
② 《爱因斯坦文集》，第一卷，第47页。
③ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第278页。

在1913年与格罗斯曼合写的著名论文《广义相对论和引力理论纲要》中，爱因斯坦首次提出了推广的四维线元公式，指出$g_{\mu\nu}$是四维时空中的二阶反对称张量，共有10个独立函数。因此，一个引力场要用10个空间-时间函数来描写。粒子在时空中的运动将满足最小作用原理，即

$$\delta\{\int ds\} = 0$$

代入所属引力场的时空度规张量，就可以得到粒子在引力场中的运动方程，并可从中看到引力场对粒子运动的影响。爱因斯坦再次强调，dx_1、dx_2、dx_3、dx_4本身没有直接的度量意义，“只有在那些规定引力场的量$g_{\mu\nu}$都是已知的情况下才是可以量度的。这也可以这样表达：引力场以完全确定的方式给测量工具和时钟以影响。”①

五、引力场方程的建立

到1912年，爱因斯坦已引入“柔性”度规的概念，并明确了度规张量$g_{\mu\nu}$依赖于引力场。他进一步考虑的问题是：对于$g_{\mu\nu}$来说是否存在一个非线性坐标变换能保持不变的微分方程呢?于是下一个决定的步骤是寻找一个对于时空度规张量$g_{\mu\nu}$是广义协变的微分方程。也就是说如何用$g_{\mu\nu}$及其导数来构造一个广义协变的微分方程。这不仅是一个物理问题，而且对爱因斯坦来说也是一个完全陌生而重要的数学问题。爱因斯坦1946年在《自述》中回忆说：“我头脑中带着这个问题，于1912年去找我的老同学马尔塞耳·格罗斯曼，那时他是（苏黎世）工业大学的数学教授。这立即引起他的兴趣……”“他查阅了文献并且很快发现，上面所提的数学问题早已专门由黎曼（B. Riemann，1826～1866）、里奇（G. Ricci-Curbastro，1853～1925）和勒维-契维塔（Tullio Levi-Civita，1873～1941）解决了。全部发展是同高斯的曲面理论有关的，在这理论中第一次系统地使用了广义坐标系。”②爱因斯坦所说的就是半个多世纪以前由德国数学家高斯和黎曼建立的曲面几何，以及后来由意大利数学家里奇和他的学生勒维-契维塔发展起来的张量分析。其中，黎曼的贡献是最大的。他曾指出，现实的物理空间究竟是欧几里得空间，还是别的空间，这是不能先验地确定的，必须靠经验和天文观测来确定。他的曲面几何理论表明，曲率为零的空间，就是通常的欧几里得空间；曲率为负的空间，称为罗巴切夫斯基空间；曲率为正的空间，称为黎曼空间。二维的球面，就是一个黎曼空间。在黎曼空间里，由三条最短程线围成的球面三角形其内角之和一般大于180°。不过，当它的面积趋于零时，它就趋于平面三角形，其内角之和也趋于180°。这就意味着对于无限小的区域，黎曼空间趋于欧几里得空间，可以用欧几里得几何处理。可以看出，黎曼几何是完全适合于广义相对论的。因为，按照等效原理，一个局部空间的引力作用，可以

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第231页。
② 《爱因斯坦文集》，第一卷，第48～49页。

用一个加速系加以消除，这局部的小范围，可看做一个严格的惯性系，是一个准欧几里得时空；但是，对应于不同局域的局部惯性系之间却可以有相对加速度。所以有真实引力场存在的时空连续区，不再是一个准欧几里得连续区，而是弯曲的黎曼空间。这就是说，在任何一个局域惯性系内，引力作用消失了，但在这些局域惯性系的相互关系中，引力作用却表现出来，引力的本质就在于各个局域惯性系之间的这种联系。所以，爱因斯坦指出："广义相对论所需要的数学工具已经在'绝对微分学'中完全具备，这种'绝对微分学'以高斯、黎曼和克里斯托菲关于非欧几里得流形的研究为基础，并由里奇和勒维-契维塔建成一个体系……"①

在格罗斯曼的帮助和合作下，爱因斯坦把黎曼张量运算引入物理学，把平直空间的张量运算推广到弯曲的黎曼空间。在1913年二人共同署名的《广义相对论和引力理论纲要》中，提出了第一个引力场方程，在这里，爱因斯坦依据对应性原则，巧妙地运用了科学的推广方法。对应性原则要求从一个旧理论推广建立起一个更为全面的新理论后，新理论的极限情况应过渡到旧理论。在这篇论文中，他们以牛顿引力论的标量引力势的泊松方程（万有引力定律的另一表述）

$$\Delta\varphi = 4\pi k\rho$$

为出发点，把标量势 φ 推广为度规张量势 $g_{\mu\nu}$，把 $\Delta\varphi$ 用一个由张量场 $g_{\mu\nu}$ 及其二阶导数所构成的克里斯托菲张量 $\Gamma_{\mu\nu}$ 来代替，把质量密度 ρ 推广为物质系的能量张量 $\Theta_{\mu\nu}$，保持引力常数 k 不变，于是得到一个与泊松方程相对应的方程

$$\Gamma_{\mu\nu} = k\Theta_{\mu\nu}$$

从牛顿-泊松定律看来，这个方程应该是关于 $g_{\mu\nu}$ 的二阶微分方程，并且要求在极限情况下能过渡为泊松方程。当时爱因斯坦对引力场方程是否一定具有上述形式并没有十分把握，所以在论文中他犹豫地写道："我们所求的方程十之八九应当具有下列形式。"②还说："最终的准确的引力微分方程对于任意变换都可以是协变的。然而在我们关于引力场的物理性质的知识现状下，这种可能性的讨论也许还为时过早。所以我们不得不仅限于二阶方程，因而不去寻求对于任意变换都是协变的那种引力方程。"③他非常明确，"我们所求的方程应当只对于一个确定的、而我们暂时还不知道的变换群才是协变的。"④究竟是怎样的变换群，他没有给出肯定的回答。而实际上，量 $\Gamma_{\mu\nu}$ 只是相对于任意线性变换的张量。所以，这个引力场方程不是普遍协变的，它只对线性变换才保持协变关系。爱因斯坦对这个缺陷是有所觉察的，在论文最后的附注中，他写道："在写出这篇论文时，我们认为理论的不足之处在于，关于引力场我们未能找到普遍协变方程，也

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第278页。
② 《爱因斯坦文集》，第二卷，第234页。
③ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第234～235页。
④ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第235页。

就是对于任意变换协变的方程。"[①]这段话表明，爱因斯坦并未停止寻找新的引力场方程的研究步伐，1913年后，他继续向寻找广义协变的引力场方程的目标前进。

实际上，1913年格罗斯曼就曾建议爱因斯坦用黎曼曲率张量来构造引力方程，以满足广义协变的要求。但是当时爱因斯坦以为这样会导致物理因果性的破坏，所以没有采纳，这不能不说是一个科学上的失误。但爱因斯坦毕竟是一位执着地追求科学真理的伟大科学家，经过一年多的探索，1915年3月25日在普鲁士科学院的报告中，他首次宣读了对于度规张量行列式等于1的任何变换下都是协变的引力场方程。1915年11月25日，爱因斯坦在《引力场方程》一文中，保留了"对泊松方程推广"的原有方法，并认识到泊松方程中的 ρ 应对应于引力源体系的质量、能量、动量及全部有关部分，由此提出了引力场方程的完整形式为

$$R_{\mu\nu} = -k\left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T\right)$$

这与第一个引力场方程相比有两个显著的不同：

(1) 以时空几何量黎曼曲率张量 $R_{\mu\nu}$ 取代了 $g_{\mu\nu}$ 的二阶导数的一般张量 $\Gamma_{\mu\nu}$，保证了广义协变性之满足。

(2) 增加了 $\frac{1}{2}g_{\mu\nu}T$ 一项，以保证能量动量守恒。式中 T 为 $T_{\mu\nu}$ 的标量。至于 $T_{\mu\nu}$ 的意义与原式中的 $\Theta_{\mu\nu}$ 仍相当，代表物质的能量动量张量。

这样，引力场方程就将引力场时空的弯曲性质与引力源物质体系联系起来，以物理原理为基础的认为引力场时空是准四维黎曼时空的观点，以完美的理论形式建立起来了。于是，狭义相对论给出的"刚性"时空不见了。过去认为物体是通过引力来对其他物体的运动发生影响，现在则认为是一个物体影响其他物体在其中运动的时空的几何。于是，物理学问题就转化为几何学问题，自然规律成为一种涉及时空性质的几何命题。在传统的物理学场论方法中，认为场量与时空几何性质是无关的，而广义相对论则把引力场完全几何化为黎曼空间，场量 $g_{\mu\nu}$ 就是黎曼空间度规张量。因此研究四维准黎曼空间的几何性质就是研究引力场的性质，而引力场的性质是完全由物质及其运动决定的。因此，物质-引力场-黎曼空间构成了一个完美的引力场理论。把场量作为几何量来处理，这是物理学史上的伟大创举，这一观点不仅建立了广义相对论完整而又优美的理论体系，而且给物理学的研究开辟了新的理论研究领域。

1915年可以说是爱因斯坦的一个丰收年。除建立了完整的引力场方程外，在同年11月的题为《用广义相对论解释水星近日点运动》的论文中，"找到了这种最彻底和最完全的相对论的一个重要证明；因为它显示了，这个理论用不着根据任何特殊的假说，就

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第266页。

既定性又定量地解释了勒维烈所发现的水星轨道在轨道运动的意义上的长期旋转，它在100年内大约转45秒。"[1]这一结果是牛顿理论所解释不了的。同一篇论文中，还在一级近似下发现了引力场对光束的影响与他1911年的论文中的结果有些不同。通过简单的计算可以求得，"一条离太阳距离△穿过的光束发生的偏折角为$\frac{2\alpha}{\Delta}$，而过去的计算得到的值为$\frac{\alpha}{\Delta}$……。一条在太阳表面穿过的光束应当发生1.7″（而不是0.85″）的偏折。"[2]

六、广义相对论的实验验证

根据广义相对论理论，爱因斯坦提出了三个可供实验验证的推论，即水星轨道近日点的反常进动，光线在引力场中的偏折和光谱线的引力红移。这三个理论预言，都极其漂亮地相继被实验所证实。

水星是靠近太阳的一颗行星，它的椭圆轨道偏心率大约是0.205，这个偏心率是相当大的。天文观测表明，水星近日点相对于空间固定方位不断缓慢变化，这种进动每百年大约为5600″。1859年，法国天文学家勒维烈（U. J. J. Leverrier，1811～1877）通过观测与计算发现，水星近日点每百年的进动量比牛顿引力理论计算值大约多出40″。他根据自己的经验提出这种反常进动是由于受到一颗尚未发现的行星的影响造成的，他称这颗行星为"火神星"，但是始终未能在观测中发现这颗行星。1882年，美国天文学家纽科姆（Simon Newcomb，1835～1909）对水星的进动又做了更为详细的计算。在水星的百年进动值中，由于地球相对于天文坐标的旋转而产生的非惯性效应占5026″；其他行星的引力摄动效应占531″；尚且剩余43″无法解释，成为牛顿引力理论的一个悬案。

1915年，爱因斯坦用他1913年建立的引力场方程，把水星绕日运动当作在太阳引力场（弯曲空间）中的短程线运动，采用牛顿近似，从理论上推出行星近日点进动公式

$$\varepsilon = 24\pi^3 \frac{a^2}{T^2c^2(1-e^2)}$$

式中a为轨道半长轴，e为椭圆偏心率，T为行星绕转年周期。当把水星年折合成地球年以后，计算得出"对于水星，近日点每一百年前进43″，而天文学把45″ ±5″说成是观测结果和牛顿理论之间的无法解释的差额。而这里的结果是[同观测结果]完全一致的。"[3]

---

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第268页。
② 《爱因斯坦文集》，第二卷，第271～272页。
③ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第277页。

关于光线在引力场中偏折的实验确证，当时曾轰动了全世界。

牛顿在他所著的《光学》一书的附录中曾经提出一个思考性问题：物体对遥远的光不起作用吗?难道它的作用不能使光线弯曲吗?

1801年，德国的索耳德纳（J. G. von Soldner，1776～1833）考虑到光是一种微粒，也有其自身的质量，因而在引力场中也会受到作用而发生偏转。20世纪以来光的量子性的证实，人们得知光子的质量近似为 $h\nu/c^2$，所以它在引力场中被偏折是可以理解的。按照牛顿的引力论，可以计算出光子经过太阳表面时的偏转角

$$\theta = \frac{2GM_{日}}{c^2 R_{日}} = 0.87''$$

式中 G 为引力常数，$M_{日}$ 和 $R_{日}$ 分别为太阳的质量和半径。1911年，爱因斯坦根据等效原理也做出预言光线经过太阳边缘要偏转0.83″，并提出希望天文学家们在日全食时进行观测。但是一年以后，爱因斯坦就由广义相对论引力方程计算出偏转值为这个数值的二倍。这是因为在狭义相对论中空间的度规是平直的，计算出的偏转数值只有0.87″；但在广义相对论中，这个数值恰为平直时空情况下的二倍。这个结果引起人们的极大兴趣，它是对新理论的最严峻的考验。

当时担任英国皇家天文学会秘书的爱丁顿（A. S. Eddington，1882～1944）对这个结论极感兴趣。他认为，广义相对论是一场对物理学、天文学和哲学的深刻的思想革命，所以立即为1919年日食时的考察积极筹划。第一次世界大战一结束，英国皇家学会和皇家天文学会就派出两支观测队分别到西非几内亚湾的普林西比岛和巴西的索布拉尔，准备对1919年5月29日的日全食进行观测。爱丁顿和克劳姆林（C. D. Crommelin）分别担任两支观测队的领队。因为日全食时太阳附近的恒星变得可见并能被拍照下来，把这个照片和在夜晚间同一个星区的照片比较，某颗星的表观方位的改变就会被发现，从而证实星光被太阳的偏折。

1919年11月6日，两处的观测结果由英国皇家学会会长 J. J. 汤姆孙公布，前者得到的偏转角数值为1.61″ ±0.30″，后者为1.98″ ±0.12″，它证实了爱因斯坦的理论预言。J. J. 汤姆孙激动地说："这是牛顿时代以来所取得的关于引力论的最重要的成果，它已不是发现一个外围的岛屿，而是找到了整个科学思想的新大陆，它与爱因斯坦密切相关，所以应该在皇家学会的会议上宣布。这个结果是人类思想史上最伟大的成就之一。"几周以后，汤姆孙又补充说："物质使光偏斜，是牛顿提出的第一个疑难问题。提出疑问本身就是一项十分重要的成就。当观测的数值支持了爱因斯坦的引力定律时，它就更加重要了。"实验成功的消息不胫而走，引起世界的震惊。11月7日，伦敦的《泰晤士报》以《科学上的革命/宇宙的新理论/牛顿的思想被推翻/"空间"弯曲了》为标题，刊载了这一成功的消息。11月9日，《纽约时报》报导说："天上的光线全弯斜了/星球不在那看上去所在之处，但不必担心。"11月11日，《纽约时报》说"这是一个与众不同的令人震惊的消息，人们甚至会对乘法表也表示担心了。"11月29日，又以《难以理解

的爱因斯坦》为题，报道了《泰晤士报》所反映的公众的激动情绪。此时，爱因斯坦已成为世界著名的人物。

广义相对论提出的另一个可供验证的推论是：在强引力场中，时钟的节奏减慢，因此，当光在引力场中传播时，它的频率或波长会发生变化。1907年，爱因斯坦就做出了来自太阳表面的光比地球上同类谱线的波长大百万分之一的预言。1911年他又计算出了日光谱线同地球上光源对应谱线的红移相对量为

$$\frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = -\Phi/c^2 = 2 \times 10^{-6}$$

ν_0为太阳上物质发射光的频率，ν为地球上接收到的频率。爱因斯坦指出，这一结果与1909年由法布里（C. Fabry，1867～1945）和泊依松（Boisson）由观测谱线精细结构测出的谱线红移的数量级相同。但是，他们当时却误认为这是由于大气吸收层的压力的影响造成的。

1925年，美国威尔逊天文台的亚当斯（W. S. Adams，1876～1956）观测了天狼星伴星天狼A，这是一颗白矮星，其密度比铂大两千倍。它所发出的光谱线的相对频移同理论预计值基本一致。在60年代，对太阳引力红移观测的最好结果是理论预言值的1.05±0.05倍。白矮星的引力场很强，其引力红移量要大得多，但是如何确定白矮星的引力势却十分困难。1971年，格林斯坦（J. L. Greenstein）等人利用衍射技术，测出天狼星伴星A的红移量

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = (30 \pm 5) \times 10^{-5}$$

而理论值为$(28\pm1)\times10^{-5}$，相对偏差小于7%。以上利用天文观测引力红移的方法，始终存在着一个困难，这就是由于引力红移量往往要比由相对运动产生的多普勒频移小，致使两者混在一起，难以用观测法区分。

1957年，德国物理学家穆斯堡尔（R. L. Mössbauer，1929～）把发射低能γ射线的原子核嵌在大块的晶体的晶格中，这样，由于反冲质量大大增加，从而降低了由反冲引起的γ射线能量的降低，于是就可以得到频带极窄的γ射线。这就可以以很高的精确度来测定低能γ射线的频率变化，从而使在地面上进行引力频移的实验成为可能。1959年后，美国的庞德（R. V. Pound）和雷布卡（G. A. Rebka）应用穆斯堡尔效应设计了一个在地面上观测引力红移的实验。这一实验的设计思想是：地面上的引力频移与重力势有关，若将发光源放在地面上高度为h处，射到地面上引起的频移将为：

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gh}{c}$$

式中g为重力加速度。当h在几十米范围时，相应的频移量虽然极小，用穆斯堡尔效应还是可以观测到的。庞德等把^{57}Coγ放射源放在哈佛大学杰佛逊物理实验室的22.6米高塔上，把^{57}Fe的吸收体和闪烁计数器放在底层，预计引力频移不大于2.5×10^{-15}，比^{57}Fe的14.4keV的γ辐射频宽1.13×10^{-12}要窄得多。为了测量这一微小的效应，他们在放

射源上加一简谐驱动，使放射源以声频做上下方向的简谐振动，使微小的引力频移与较大的多普勒频移叠加，再从计数器的变化中，求出引力频移。他们得到的结果是

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = (2.57 \pm 0.26) \times 10^{-15}$$

与理论值2.46×10^{-15}的比值是1.05 ± 0.10。

后来，庞德等人又改进了上述实验，他们加设了恒温装置，增进了控制系统和电子系统的稳定性，加大了放射源的强度。他们在1965年发表的测量结果为理论值的0.9990 ± 0.0076，偏差小于1%。

广义相对论的三大实验验证，即水星近日点进动、光线的引力偏折和光谱线的引力红移，都是爱因斯坦在建立的广义相对论理论中提出来的。广义相对论的深刻思想和完美形式，虽然为人们所赞赏，但在它建立之后长达半个世纪的时间里，对它所做的进一步的实验验证却极为稀少。从20世纪30年代起，渐渐失去了人们对它的兴趣。进入20世纪中叶以后，随着实验技术和物理学理论的进步，情况才发生了变化。

继庞德等人的观测之后，1964年至1968年间，美国麻省理工学院的沙皮罗（I. I. Shapiro）完成了广义相对论的“第四个实验验证”——雷达回波的延迟。从地面上用雷达发射一束电磁波脉冲，这些电磁波碰到其他行星后再反射回地球，被雷达所接收。若电波来回的路程远离太阳，太阳的影响可以不计；若电波来回的路程经过太阳附近，则会受到太阳引力场的作用，电波的路径就要弯曲，使传播时间延长。例如地球和水星之间雷达波的最大延迟时间可达240微秒。观测结果与理论预言是一致的。

1918年，爱因斯坦发表了论文《论引力波》，探讨了引力场的传播问题，他对场方程

$$R_{\mu\nu} = -8\pi G\left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T\right)$$

做了弱场近似处理，取

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

其中$\eta_{\mu\nu}$是洛伦兹度规，而$|h_{\mu\nu}|\ll1$。这样就可以得到关于$h_{\mu\nu}$的方程。在适当选取坐标系的情况下，$h_{\mu\nu}$的微分方程是线性方程，与经典电动力学的达朗贝尔方程类似。因为经典电动力学的达朗贝尔方程存在波动解，从而预言了电磁波的存在。类似地，引力场方程的弱场近似方程也存在波动解，据此，爱因斯坦预言有引力波从物质发出，并以光速传播。许多做加速运动的物体都可以发射引力波。

尽管人们从理论上承认引力波存在的预言，但由于引力辐射太弱，对引力波的观测与检验异常困难。宇宙间大质量天体的运动，是较强的引力波源。双星是一种典型的引力辐射源，引力辐射把双星的能量一点点带走，结果会使双星的绕转周期越来越短，这个性质叫做引力辐射阻尼。1974年底，美国射电天文学家泰勒（J. H. Taylor，

1941～　)和他的学生胡尔斯（R. A. Hulse，1950～　）对新发现的射电脉冲双星PSR1913+16，开始进行了连续四年的观测，使许多观测参数的精度达到百亿分之几。他们发现了这颗双星的周期在稳定地变短，每转一周减小3×10^{-12}，与引力波辐射而损失的能量的理论预言值相符合。这被看做是引力波存在的一个令人信服的间接证据，它再一次证明了广义相对论的正确性。他们二人也获得了1993年度的诺贝尔物理学奖。

这一时期，广义相对论在天体物理学和宇宙学上的成功应用也日益引人瞩目。特别是60年代以来关于类星体、脉冲星、3K 宇宙微波背景辐射的发现，给广义相对论宇宙学说提供了有力的支持。因此，广义相对论重新成为理论物理学界的重要研究内容。

思 考 题

1. 绝对时空观的主要困难是什么？
2. 洛伦兹是如何解释以太漂移实验的零结果的？这种解释的根本缺陷是什么？
3. 在通向狭义相对论的进程中，庞加莱提出过哪些卓越见解？
4. 爱因斯坦创立狭义相对论的基本思考线索是什么？其思想的独特性表现在哪些方面？
5. 简要说明狭义相对论取得的主要成果。
6. 爱因斯坦是如何得到和提出广义相对论的两个基本原理的？
7. 时空“柔性”度规概念是如何形成的？这个概念的重要意义是什么？
8. 为什么说广义相对论是一种新的引力场理论？
9. 简要说明广义相对论实验检验的概况。

第十章　量子力学的建立

为了解决经典物理学理论运用于黑体辐射现象遇到的困难，量子论产生了，在此基础上很快建立和发展了量子力学。这一理论的建立，使人们的认识实现了由宏观到微观领域的飞跃。

第一节　量子论的初期发展

一、量子概念的提出

由经典物理学理论导出的公式都不能很好地说明黑体辐射的实验规律，这个问题引起越来越多的物理学家的关注。1900 年，普朗克（Max K. E. L. Planck，1858～1947）首先取得了突破。

普朗克是一位德国物理学家，他 1858 年出生于德国的基尔，父亲是基尔大学著名的法律学教授。普朗克先后在慕尼黑大学和柏林大学学习，曾经在著名物理学家基尔霍夫等人的指导下学习，1879 年获得博士学位。1880 年，普朗克成为慕尼黑大学物理学讲师，1885 年，被基尔大学聘为理论物理学特约教授。1889 年，在基尔霍夫逝世后，普朗克回到母校柏林大学继任了老师的职位，成为柏林大学的教授，他在该校一直工作到 1926 年退休。1894 年，普朗克被选为普鲁士科学院院士，1926 年，被英国皇家学会吸收为会员。

普朗克早年的研究工作是在热力学方面，发表过关于熵、热电学以及溶液理论的文章。1894 年后，普朗克开始积极投入黑体辐射理论研究。当时，德国是黑体辐射研究的重要中心之一，有一大批实验物理学家从事黑体辐射的精确测量工作，理论工作可以很快与实验结果进行比较，对他的研究工作十分有利。

1894～1899 年，普朗克对黑体辐射问题进行了系统的理论研究，发表了多篇论文和研究报告。1899 年 5 月在题为《关于不可逆辐射过程》的研究报告中，根据经典电动力学理论，使谐振子平衡时的发射率与吸收率相等，普朗克得到振子平均能量 U 和具有同一频率的入射辐射能密度之间的关系

$$\rho(\nu,T)=\frac{8\pi\nu^2}{c^3}U$$

由于当时普朗克不熟悉，而且拒绝热的统计理论，所以他没有使用能量均分定理导出的公式 $U=kT$，不然他就会在瑞利之前得到瑞利-金斯辐射公式。

普朗克是带着对不可逆问题的浓厚兴趣转向黑体辐射问题研究的，因此他在研究中把熵增加原理置于考虑的首位，这体现了普朗克处理辐射问题的特色。普朗克认为热力学第二定律适用于自然界一切过程，一切物体，所以，他寻求“振子的能量和熵之间的合适关系”，而不把振子的能量和温度联系起来。他用热力学理论对振子能量U的形式进行探讨，研究了熵与振子能量U的关系。

1899年9月，实验物理学家卢默尔等人发表实验报告指出，维恩定律仅在短波波段与实验相符，而在长波范围内则有明显的偏离。普朗克很快了解到这个实验结果。1899年10月7日，德国实验物理学家鲁本斯（H. Rubens，1865～1922）告诉普朗克，实验发现，在长波波段，分布函数趋于正比于绝对温度T。这使普朗克受到启发，他立即尝试用“内插法”去寻求新的辐射公式。

普朗克依据熵对能量二阶导数的两个极限值进行内插推导辐射公式。其中一个极限值对应于热辐射谱短波段，由维恩公式确定，熵对能量的二阶导数与能量成正比。对于辐射谱的长波波段，他是根据鲁本斯等人的测量结果得到的。实验发现，在这个波段黑体辐射强度与温度成线性关系。普朗克吸收这一实验结果，在计算中确定，熵对能量的二阶导数与能量的平方成反比。由这两个极限值，为了得到普适的情况，可以令熵对能量二阶导数的倒数等于能量U的一个一次项与一个二次项之和，对小能量和短波，一次项起决定作用；对大能量和长波，二次项起决定作用。

鲁本斯拜访普朗克的当天，普朗克就得到了他的辐射公式：

$$\rho(\nu,T)=\frac{c_1\nu^3}{e^{c_2\nu/T}-1}$$

很快，鲁本斯把普朗克的公式与实验数据进行了比较，发现与实验结果“令人满意地相符”。1900年10月19日，普朗克在德国物理学会发表论文，报告了他找到的这个新的辐射公式。

鲁本斯深信在普朗克公式中包含着极其重要的涵义，决不可能是一个偶然的巧合。普朗克也立即意识到，紧接着的和更为基本的任务，就是为他的辐射公式提出理论基础，这个任务引导他提出了能量子假设。

普朗克后来说，他“经过一生中最紧张的几个星期的工作”，很快发现，他所心爱的热力学的普遍理论是不可能解决这一问题的。出于无奈，他转而求助于从前厌恶的热力学统计观点，尝试使用玻耳兹曼的方法，接受熵的几率解释，后来，他把自己的这一转变过程称作“孤注一掷的行动”。30年后，1931年在给友人的一封信中，普朗克回忆当时的心情说：“我已经为辐射和物质之间的平衡奋斗了6年（从1894年开始），仍然没有成功。我知道这个问题对整个物理学是至关重要的。我已经找到了确定能量谱分布的那个表达式；因此，无论花多大的代价我也必须为它找到理论上的解释。我非常清楚经典物理学是不能解决这个问题的，因为按照它所有的能量最终都会从物质化为辐射。为了避免这一点，就需要有一个新的常量来保证能量不会分解。”他说，除了

热力学的两条基本定律，他准备牺牲以前对物理定律所抱的任何信念。

早在1877年，玻耳兹曼就提出了熵的统计解释，指出一个系统的任意状态的熵和该状态的热力学概率的对数成正比，即 $S \propto \ln W$。这个概率被认为是对应于宏观状态的微观状态数。每种微观状态表示能量在分子中的一种分配方式，这种方式称为配容，每种配容出现的概率相等。而宏观态指的是能量份额的一种分布，即只要知道包含能量为 0，ε，2ε，$\cdots$，$M\varepsilon$ 的相应的分子数，并不要求具体知道是哪个分子。所以每一宏观态包含若干个微观态，而热力学平衡态是最概然的状态，是包含微观态数最多的宏观态。然而值得注意的是玻耳兹曼并没有把 ε 看做是不可再分的，他只是把“实际”连续可变的能量分成分立的份额。所以，对于玻耳兹曼来说，ε 只不过是使计算成为可能的技巧而已。

普朗克当时的任务是寻找确定一组谐振子配容数目 W 的方法，只有把能量分成一份一份的才能计算出确定的微观态数目。

普朗克设想空腔内有数目很多的振子，它们是辐射着的物质中心，能够与周围电磁场交换能量。在这个系统中频率为 ν 的振子数目 N，总能量为 E，每一个振子的能量只能取一些分立的值，它是有限能量元的整数倍。因为微观态数是分立的、有限的，这就要求 E 只能作有限的划分，例如只能划分为 P 个相等的小份额，即

$$E = P\varepsilon$$

这些能量元 ε 在振子中可以按不同比例 $n\varepsilon$（$n = 0, 1, 2, \cdots P$）分配给单个振子。每个振子的能量只能取一定的分立值，它们是能量 ε 的整数倍，ε 是能量的最小单元，它就是能量子。根据排列组合法则，配容的数目应当是

$$W = \frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)!P!}$$

由于 N 和 P 都是很大的数，可以去掉 1，并利用斯特林公式

$$\ln x! = x\ln x - x$$

于是得

$$\ln W = (N + P)\ln(N + P) - N\ln N - P\ln P$$

因为 N 个谐振子系统的熵 S_N 是一个振子的熵 S 的 N 倍，

$$S_N = NS$$

利用公式

$$S_N = k\ln W$$

以及对 N 个振子求平均能量

$$U = \frac{P\varepsilon}{N}$$

则可以得出

$$S = k\left[\left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right)\ln\left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \left(\frac{U}{\varepsilon}\ln\frac{U}{\varepsilon}\right)\right]$$

从热力学公式

$$\frac{1}{T}=\frac{ds}{dU}$$

得

$$\frac{1}{T}=\frac{ds}{dU}=\frac{k}{\varepsilon}\left[\ln\left(1+\frac{U}{\varepsilon}\right)-\ln\frac{U}{\varepsilon}\right]$$

于是得出

$$U=\frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/kT}-1}$$

黑体辐射公式则为

$$\rho(\nu,T)=\frac{8\pi\nu^2}{c^3}\frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/kT}-1}$$

现在这个通过熵与概率相联系而推得的辐射公式应该与普朗克以前得到的符合实验的辐射定律相一致，必须令

$$\varepsilon=h\nu$$

h 是以比例常量出现的，它是一个与振子特性无关的常量，数值为 6.55×10^{-27} 尔格·秒。它的意义十分重大，它说明不同频率的振子具有不同的能量子，能量子与振子频率之比总要等于恒量 h，人们称 h 为普朗克常量。由于它的量纲等于能量与时间的乘积，也就是作用的量纲，所以普朗克把它称为作用量子，而 $h\nu$ 则称为能量子。将 $\varepsilon=h\nu$ 代入上面得到的公式，最后得到的黑体辐射公式为

$$\rho(\nu,T)=\frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{\varepsilon}{e^{h\nu/kT}-1}$$

1900 年 12 月 14 日，普朗克在德国物理学会上宣读了论文《关于正常光谱的能量分布定律的理论》，提出能量子假定并导出了上述辐射公式。这一天被看做是量子论的诞生日。普朗克强调："我们采取这种看法——并且这是整个计算中最重要的一点——认为能量 E 是由一些完全确定的，有限而又相等的部分组成，而对于这个有限而又相等的部分，我们应用了自然常数 $h=6.55\times10^{-27}$ 尔格·秒。"

普朗克量子概念的提出，冲击了经典物理学长期信奉的一切自然过程都是连续的这条原理，使人类对微观领域的本质有了新的认识，对现代物理学的发展产生了革命性的影响。"因为发现能量子而对物理学的发展做出杰出贡献"，普朗克获得了 1918 年的诺贝尔物理学奖。

二、光子概念的建立

1. 爱因斯坦光量子假说的提出

在普朗克的论文发表以后的几年中，科学界没有充分认识这个理论的深远意义。当

时大多数物理学家只是把普朗克公式看做是一个局限于辐射问题的“经验公式”。1905年6月，爱因斯坦在德国《物理学杂志》上发表论文《关于光的产生和转化的一个启发性观点》[①]，发展了普朗克的量子概念，为研究辐射问题带来了崭新的观点。1906年3月和11月，他发表了《论光的产生和吸收》[②]、《普朗克的辐射和比热理论》[③]的论文，1909年9月，又在德国自然科学协会上作了相关的报告。爱因斯坦的这一系列工作，发展了普朗克的量子概念，展示了这一概念的重要意义，使量子论为人们普遍关注。

爱因斯坦很早就对热辐射问题发生了兴趣，普朗克的工作问世不久，他就读到了它。爱因斯坦所关心的问题是，根据辐射公式能够得出关于辐射结构甚至还有关于物理学的电磁基础的什么样的普遍结论？[④]

在1905年的论文中，爱因斯坦从处理辐射问题入手开始讨论。他总结了光学发展中微粒说和波动说长期争论的历史，揭示了已有理论的困境，并通过提出光量子概念来摆脱理论的困境。他在论文的开始指出：“光学观测都同时间平均值有关……当人们把用连续空间函数进行运算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矛盾。”“确实现在在我看来，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的观察，如果用光的能量在空间中不是连续分布的这种假设来解释，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。”

爱因斯坦对麦克斯韦的连续场理论的这一改造，是从对黑体辐射的考察开始的。爱因斯坦认为，在普朗克的推导里，对谐振子取分立的能量值，而同时又对辐射场采取连续的分布，本身就是一个矛盾。爱因斯坦从对维恩公式有效的范围内辐射的熵的研究结果，对照普朗克-玻耳兹曼公式的意义，就得出结论：“如果现在（密度足够小的）单色辐射，就其熵对体积的相依关系来说，好像辐射是由大小为 $R\beta\nu/N$ 的能量子所组成的不连续的媒质一样，那么，接着就会使人想到去研究，是否光的产生和转化定律也具有这样的性质，就像光是由这样一种能量子所组成的一样。”

在这篇文章中爱因斯坦没有提到 h，所以他没有将能量子写成 $h\nu$，而写成 $R\beta\nu/N$，R是理想气体常数，N 是克当量的“实际分子”数，β 为一常数。1917年，爱因斯坦根据他的相对论理论，在《关于辐射的量子理论》一文中，第一次给出了光子的动量为

---

① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第37～57页。
② 《爱因斯坦文集》，第二卷，第130～136页。
③ 《爱因斯坦文集》，第二卷，第137～147页。
④ J. 梅拉，H. 雷琴堡著，戈革等译，《量子理论的历史发展》第一卷第一分册，科学出版社，1990年，第137页。

$$p = h\nu/c = h/\lambda$$

上式和 $\varepsilon = h\nu$ 一起称为爱因斯坦关系。

爱因斯坦对普朗克思想的发展在于，普朗克认为能量只有在吸收和辐射时是不连续的，而爱因斯坦进一步假设，能量在传播中，以及在与物质的相互作用中也是不连续的，即是量子化的。光不仅在发射中，而且在传播过程中和与物质的相互作用中，都可以看成能量量子。爱因斯坦称这个“能量量子”为“光量子”。1926 年美国物理学家刘易斯（G. N. Lewis，1875～1946 ）将它命名为“光子（photon)”。

2. 光电效应的实验研究

有了光子概念以后，爱因斯坦把它应用于解释光致发光和“固体通过辐射而产生阴极射线”——光电效应等现象。

光电效应现象是赫兹在 1887 年首先发现的。当时赫兹在做证实麦克斯韦的电磁理论的火花放电实验，他在实验中偶然发现了光电效应现象，后来这一现象成却了突破麦克斯韦电磁理论的一个重要证据。赫兹用两套放电电极做实验，一套产生振荡，发出电磁波；另一套作为接收器。他意外发现，如果接收电磁波的电极受到紫外线的照射，火花放电就变得容易产生。赫兹的论文《紫外线对放电的影响》发表以后，引起物理学界广泛的注意，许多物理学家进行了进一步的实验研究。1888 年，德国物理学家霍尔瓦克斯（Wilhelm Hallwachs）证实，这是由于在放电间隙内出现了荷电体的缘故。1899 年，J. J. 汤姆孙用巧妙的方法测得产生的光电流的荷质比，获得的值与阴极射线粒子的荷质比相近，这就说明产生的光电流和阴极射线一样是电子流。这样，物理学家就认识到，这一现象的实质是由于光（特别是紫外光）照射到金属表面使金属内部的自由电子获得更大的动能，因而从金属表面逃逸出来的一种现象。

1899～1902 年，勒纳德（P. Lenard，1862～1947）对这一现象进行了系统的研究，并首先将这一现象称为光电效应。为了研究光电子从金属表面逸出时所具有的能量，勒纳德在电极间加可调节的反向电压，直到使光电流截止，从反向电压的截止值，可以推算电子逸出金属表面时的最大速度。他选用不同的金属材料，用不同的光源照射，发现对反向电压的截止值都有影响，即对逸出电子的能量有影响，但是逸出电子的能量却与光的强度无关。勒纳德的这一实验结果是经典理论无法解释的。因为根据经典电磁理论，应该是光越强能量越大，电子吸收光的能量获得的动能也就应该越大。

进一步的实验发现，光电效应的实验规律与经典电磁场理论还有其他矛盾，例如：实验发现只有当光的频率高于某一定值时，才能产生光电效应，频率低于这一临界值，无论光有多强，也不会产生光电效应。根据经典电磁理论，光强决定光的能量，电子的能量应该随光的强度变化，与光的频率无关，应该没有频率限制。另外，实验发现，光照射到金属表面，光电流立即就会产生，而根据经典理论，能量要有一个积累过程。

实验的发现已经暴露了经典理论的缺陷，但是许多物理学家还是企图在经典电磁

理论的框架内解释光电效应的实验规律。勒纳德在1902年提出触发假说，假设在电子的发射过程中，光只起触发作用，电子原本就是以某一速度在原子内部运动，光照到原子上，只要光的频率与电子本身的振动频率一致，就发生共振，电子就以其自身的速度从原子内部逸出。勒纳德认为，原子里电子的振动频率是特定的，只有频率合适的光才能起触发作用。勒纳德的假说在当时很有影响，被一些物理学家接受。但是，不久，勒纳德的触发假说就被他自己的实验否定。当时，还有一些物理学家试图把光电效应解释为一种共振现象。

3. 爱因斯坦对光电效应的理论解释

爱因斯坦利用他的光量子假设很容易地对光电效应做出了清晰的说明。他指出，射向金属表面的光，实质上就是具有能量为 $\varepsilon=h\nu$ 的光子流，如果照射光的频率过低，即光子流中每个光子的能量较小，当他照射到金属表面时，电子吸收了这一光子，它所增加的 $\varepsilon=h\nu$ 的能量仍然小于电子脱离金属表面所需要的逸出功，电子就不能脱离开金属表面，因而不能产生光电效应。如果照射光的频率高到能使电子吸收后其能量足以克服逸出功而脱离金属表面，就会产生光电效应。此时电子的能量 $\frac{1}{2}mv^2$、光量子的能量 $h\nu$ 和逸出功 A 之间的关系可以表示成

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

这就是爱因斯坦给出的光电方程。因此光电效应中光电子的能量决定于照射光的频率，而与照射光的强度无关。当光照射到金属表面时，其强度越大表明光量子数越多，它被金属中的电子吸收的可能性就越大，因此就可以解释为什么被打出的电子数只与光的强度有关而与光的频率无关。

爱因斯坦的光量子假说，并不是简单地回复到牛顿的光的微粒说，也不是对波动说的全部否定。1909年，爱因斯坦在维尔茨堡会议上讲过这样一段话："不可否认的是，有关黑体辐射的实验说明，光所具有的一些基本性质从牛顿的微粒说去理解要比从波动说去理解容易得多。因此我认为，在理论物理发展的下一阶段，将会出现一种关于光的理论，根据这种理论，光可以被看做是波动和微粒说的融合；我们关于光的本性和光的结构的看法有一个深刻的改变是不可避免的了。"

这样，爱因斯坦就第一次提出了光的波粒二象性的概念，它揭示了微观客体的波动性和粒子性的对立统一。

爱因斯坦用光量子理论对光电效应提出理论解释后，最初科学界的反应是冷淡的，甚至相信量子概念的一些物理学家也不接受光量子假说。[①] 尽管理论与已有的实验事实并不矛盾，但当时还没有充分的实验来支持爱因斯坦的定量关系式。直到1916年，

① ［西德］阿尔明．赫尔曼著，周昌忠译，《量子论初期史（1899～1913）》，商务印书馆，1980年，第57页。

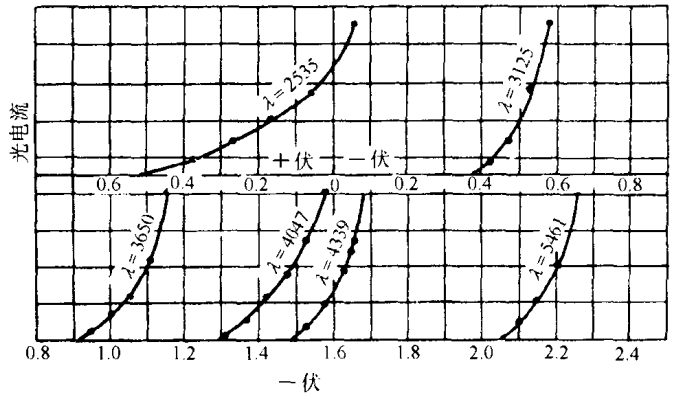


图 10-1　密立根的钠的截止电压与频率关系曲线

光电效应的定量实验研究才由美国物理学家密立根做出。

密立根对光电效应进行了长期的研究，他的实验非常出色，有效地排除了表面接触电位差等因素的影响，获得了比较好的单色光。1916 年密立根发表了他的精确实验结果，他用 6 种不同频率的单色光测量反向电压的截止值，进一步得到反向电压截止值与频率关系曲线关系，这是一条很好的直线，从直线的斜率可以求出的普朗克常数，结果与普朗克 1900 年从黑体辐射得到的数值符合得很好。

爱因斯坦“由于在理论物理方面的贡献和发现光电效应定律”获得了 1921 年的诺贝尔物理奖。1923 年，密立根“因测量基本电荷和研究光电效应”获得诺贝尔物理学奖，瑞典科学院诺贝尔物理学奖委员会主席高斯特兰发表致词，在谈到密立根的光电效应研究时说：“如果密立根的研究得出了不同的结果，那么爱因斯坦定律就会没有价值，玻尔的理论也会失去了支持。在密立根取得成果之后，爱因斯坦和玻尔分别荣获了前年和去年的诺贝尔物理学奖。”①

密立根在题为《从实验观点看电子和光量子》的诺贝尔演讲中说：“从一开始我就致力于从实验上精确测量电子的发射能量，有时是作为温度的函数测量，有时是作为波长的函数测量，有时是作为材料的函数测量（与接触电动势的关系）。经过 10 年之久的试验、改进和学习，有时甚至还遇到挫折，出乎我自己的预料，这项工作终于得到了结果，1914 年第一次用实验证明了爱因斯坦方程是精确成立的，并首次对普朗克常数 h 作了直接的光电测量，精确度大约是 0.5％（在实验误差范围内），这在当时可以说是很好了。”②

① 宋玉升等译，《诺贝尔奖获得者演讲集　物理学》第二卷，科学出版社，1984 年，第 44 页。
② 同上，第 52 页。

4. 康普顿效应的发现

光照射在自由带电粒子上，散射光发生波长改变的现象，称作康普顿效应。观测发现，在散射辐射中，既存在有原来的入射波波长 λ，也有向长波方向偏移的新波长 λ'，波长偏移值 $\Delta\lambda=\lambda'-\lambda$ 随散射角的增大而增大。美国物理学家康普顿（A. H. Compton，1892～1926）对这一现象进行了实验和理论研究，他的研究工作发展了光量子论。

1919～1920 年，康普顿到英国剑桥大学卡文迪什实验室学习，主要从事 γ 射线研究。他以精湛的实验技术，精确地测定了 γ 射线的波长。在研究 γ 射线的散射特性时，康普顿得到了比别人更明确的结论。但是，在对散射问题进行分析时，他完全从经典理论出发，理论解释没有获得成功。他曾经采用一种假说：可能发生了某种新的荧光辐射，其强度与性质均随角度变化，与散射物质无关。

1920 年秋，麦克基尔大学的格雷（G. A. Gray）用 X 射线代替 γ 射线，首先观察到 X 射线经散射后波长的改变，然而，为了把实验结果纳入经典电磁理论的轨道，他假设 X 射线是由不同的脉冲组成的，认为如果这些脉冲有傅里叶频谱，就会随角度发生波长的变化；如果是单色波列，则在散射过程中就不会发生波长的变化。

这时康普顿已经从卡文迪什实验室回到了美国圣路易斯的华盛顿大学，他立即用 X 射线检验他在卡文迪什实验室用 γ 射线做的散射实验所得到的结果。1921 年，康普顿在《自然》上发表论文《二次 X 射线的软化》，报告了他的研究结果。康普顿错误地认为，二次 X 射线的软化，即散射后的 X 射线的波长变长，是由于辐射的性质发生了变化。他写道：

“很多实验工作都注意到这样的事实：一束 X 射线或 γ 射线穿过任何物质时，激发产生的二次射线要比入射射线具有较差的穿透力。……格雷教授和我都曾经证明，这个软化现象……是由于辐射的性质发生了变化。我的结论是，这一变化激发了某种荧光射线，其波长略大于入射射线。”①

康普顿多年从事 X 射线的实验研究，他改进实验装置，为研究散射设计制作了特殊的 X 射线管，使散射体处的 X 射线强度大大提高，为选用当时普遍使用的标准形式的 X 射线管的 125 倍。这就使他在实验上的结果比别人丰富和精确了许多。然而，他这时的理论解释却是不正确的。以后，康普顿还根据经典电磁理论尝试过多种模型，在探索中走了不少弯路。许多年以后，1961 年，康普顿曾经回忆说：“从 1917 年开始，我花了 5 年时间，企图调和 X 射线散射强度分布实验和 J. J. 汤姆孙关于这一现象的电子理论，但都没有成功。”

1923 年，康普顿终于将光量子论运用到散射问题，他在美国《物理评论》上发表

---

① 郭奕玲、沈慧君，《吴有训的科学贡献》，鹭江出版社，1997 年，第 98～109 页。

的论文《X 射线受轻元素散射的量子理论》，成功地解释了他的实验发现。康普顿认为 X 射线是能量为 $h\nu$ 的光子束，光子在散射体中与自由电子发生类弹性碰撞而失去部分能量，“反冲光子”的能量减少而波长增大。

他根据能量守恒和动量守恒，考虑相对论效应进行推导。他把 X 射线量子的动量表示为 $h\nu/c$，导出波长偏移与散射角 θ 的关系式

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

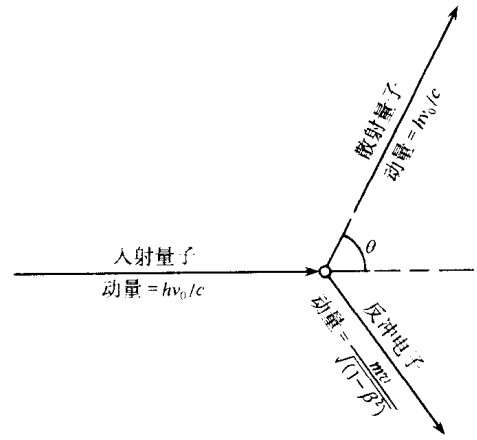


图 10-2　康普顿效应

m 为电子的静止质量。利用上述物理图景对偏移值 $\Delta\lambda$ 随 θ 的变化和不变波长的存在做出了很好的解释，公式与实验观察完全相符。

康普顿在论文中宣称：由于光量子假设在解释康普顿效应上的成功，使他放弃了最初的观念，“几乎不再怀疑伦琴射线是一种量子现象。……验证理论的实验令人信服地表明，辐射量子不仅具有能量，而且具有一定方向的冲量。”

1923 年在康普顿效应发现不久，康普顿转到芝加哥大学，接替密立根任教授职务。他在芝加哥的最初五年，跟一些研究生一起，继续对康普顿效应进行实验，其中包括对 X 射线经许多元素散射的详细研究，既涉及康普顿变线，这主要是由于自由电子的散射引起的；也涉及不变的汤姆孙散射，这依赖于原子中所有电子的分布。这个时期围绕康普顿效应出现了一些学术上的争论。我国著名物理学家吴有训此时正在芝加哥大学学习，他配合康普顿，对康普顿效应进行了大量研究，1925 年以题为《康普顿效应》的论文获得了博士学位。随后，他在芝加哥大学继续进行研究，以精心的实验和严密的分析为康普顿效应的确认做出了贡献。吴有训证明了康普顿效应的普遍性，驳斥了对康普顿效应的各种否定，发展了 X 射线的散射理论。他测定了不同物质对 X 射线的散射中变线和不变线的相对强度比随原子序数的变化关系，全都证实了康普顿理论的预言。

康普顿效应的实验发现和理论研究，进一步为光的粒子性提供了令人信服的证据。康普顿效应比光电效应更前进了一步，在解释康普顿效应时不但要考虑能量守恒，还要考虑动量守恒，就为光的波粒二象性提供了进一步的实验证据，这样也就促使物理学家们确认了光量子图景的实在性。1925 年，德国和美国两组物理学家分别以实验肯定了光量子论和微观过程中能量守恒定律和动量守恒定律完全成立，使光量子论终于得到普遍承认。

爱因斯坦高度评价康普顿效应的发现，说“他发现了以他的名字命名的康普顿效

应，它是我们对于辐射性质知识的里程碑。”[①] 康普顿由于发现康普顿效应获得了1927年的诺贝尔物理学奖。

康普顿的成功首先归功于他高超的实验技术和长期不懈的探索，同时我们也可以看到，康普顿对辐射本性认识的转变，也是他取得成功的关键一步。在几经挫折之后，他对辐射的认识从经典观点转向量子论，才使他有可能正确解释散射波长的变化。与康普顿同时代的多位有成就的物理学家，也对X射线和γ射线的散射进行了大量实验研究，但认识和理论解释却局限在经典理论。科学观念的转变是科学创造过程中取得突破的重要环节，转变观念实现科学突破的基础是实验和理论的深入研究。

密立根的成功和康普顿有共同特点。密立根不因为自己在实验上的成就而忽视理论，而是在实验中学习，转变自己的观点。1923年，密立根在他的诺贝尔演讲中说：“科学是在用理论和实验这两只脚前进的。有时是这只脚先迈出一步，有时是另一只脚先迈出一步，但是前进要靠两只脚；先建立理论然后做实验，或者先在实验中得出了新的关系，然后再迈理论这只脚并推动实验前进，如此不断交替进行。”

密立根十分形象直观地说明了他对理论和实验关系的看法，20世纪物理学有了长足的发展，研究领域越来越远离人们的现实生活经验，理论越来越体系化和公理化，物理学内部分支越来越细，出现了偏向于实验研究的实验物理学家，和偏向于理论研究的理论物理学家，但是，对科学发展前沿的最新成就和突破的关注却必须是全面的。

第二节　原子物理学的发展

电子的发现使人们认识到原子是有结构的。因为原子是电中性的，而电子是带负电的，原子内部必有带正电的部分。原子结构模型要解决原子中正电荷部分的性质，正、负电荷在原子中的分布，正、负电荷之间的相互作用以及原子的稳定性、元素周期性、原子光谱的规律和放射性等问题。

一、早期的原子结构模型

1. 勒纳德的动力子模型

勒纳德在1902～1903年所做的阴极射线透过金属箔的实验表明，金属中的原子并不是相互紧靠着的刚性物质球，其中存在着大量的空隙，刚性物质大约只占全部空间的10^{-9}。于是他设想，原子内部的每个电子与相应的每个正电荷组成了一个中性的“刚性配偶体”，他取名为“动力子”，无数“动力子”漂浮于空旷的原子太空内。

① A. 派斯著，陈崇光等译，《上帝是微妙的——爱因斯坦的科学与生平》，北京科学技术文献出版社，1988年，第627页。

2. 长冈半太郎的土星型模型

1904 年，长冈半太郎（Hantaro Nagaoka，1865～1950）根据麦克斯韦的土星卫环理论推测原子的结构，提出了一个“土星型模型”。他在文章中写道：“我要讨论的系统，是由许多质量相同的质点，连接成间隔角度相等的圆，互相间以与距离平方成反比的力相互排斥，在圆的中心有一大质量的质点，它对其他质点以同样定律的力吸引着。如果这些互相排斥的质点以几乎相同的速度绕着吸引中心旋转，只要吸引力足够大，则即使有小的干扰，这系统一般仍将保持稳定。”

这一模型，实际上已提出了原子内有个中心（即核的意思）及原子内部存在着相互作用的库仑力、电子绕着中心旋转的概念。只是对于核大小的数量级及原子的稳定性等问题，尚未予以明晰地阐述。

3. J. J. 汤姆孙的实心带电球模型

1904 年，根据开尔文提出的实心球的想法，J. J. 汤姆孙发表了题为《论原子构造：关于沿一圆周等距分布的一些粒子的稳定性和振荡周期的研究》的论文。他设想原子是由带负电荷的电子与另一部分带正电荷的主体组成的。为了解释电子质量远小于原子质量的事实，他设想带正电荷部分的主体像流体一样均匀地分布在球形的原子体积内，而带负电荷的电子，则像分布于“面包”中的“葡萄干”一样“浸浮”在球体内某些固定的位置上。电子一方面受正电荷的吸引，一方面又要相互排斥，因此，必然有一种状态可使电子平衡。他证明这些电子必然组成球，然而 6 个以上的电子不能稳定在一个环上，数目更多就要组成二个以上的环。汤姆孙还借助磁棒吸引水面上漂浮的磁针，用模拟实验方法证明自己理论的正确性。另外他假设，原子光谱是由于在固定位置上的电子受到正电荷的作用力作简谐振动的结果。汤姆孙试图用他的原子模型探明原子内电子的数目，为此他设计了 X 射线和 β 射线的散射实验。

汤姆孙模型的重要意义在于：它指出了原子内部是有结构的，打破了原子内部带正、负电荷的物体互相对称的概念，标志着原子科学的一个新时代的开始。因此人们称他是“一位最先打开通向基本粒子物理学大门的伟人。”但是，从汤姆孙的模型中只能算出一个特征频率，这与氢原子光谱中观察到的存在许多频率的谱线的事实是矛盾的。

二、卢瑟福的行星模型

卢瑟福是 J. J. 汤姆孙的学生，为了通过实验验证汤姆孙模型的正确性，他进行了 α 粒子的散射实验。1909 年，他指导他的助手盖革（Hans Geiger，1882～1947）和马斯顿（Ernest Marsden，1889～1945）进行实验时，发现了意想不到的事实，观察到 α

粒子产生的大角度散射的百分比远比由汤姆孙模型中计算得到的要大得多。实验测得的散射角大于90°的散射的比例是1/8000。根据汤姆孙的实心带电球模型，α粒子的大角度偏折是多次小偏折的积累造成的，根据概率论算出，发生大角度散射的概率只有$1/10^{3500}$。

α粒子的大角度散射的实验结果使得当时习惯于用汤姆孙模型思考的物理学家们大为惊讶。为了解决这一矛盾，卢瑟福认为应当放弃汤姆孙模型。他利用长冈半太郎的土星模型进行计算，得出的结果与实验值基本相符。于是，在1911年，他发表了题为《物质的α和β粒子的散射和原子结构》的论文，提出了原子的有核模型或称行星模型，他在这篇论文中写道："经过思考，我认为反向散射必定是单次碰撞的结果，而当我作出计算时看到，除非采取一个原子的大部分质量集中在一个微小的核内的系统，是无法得到数量级的任何结果的，这就使我后来提出原子具有很小而质量很大的核心的想法。"

通过对α粒子散射实验结果的分析和计算，卢瑟福得出结论："一切原子都有一个核，它的半径小于10^{-12}厘米，原子核带正电，它的电荷是+Ze，原子的半径为10^{-8}厘米，电子的位置必须扩展到以核为中心、以10^{-8}厘米为半径的球内或球面上；为了构成平衡，电子必须像行星一样绕核旋转着。"这就是卢瑟福的原子有核模型或行星模型。

1911～1913年，盖革和马斯顿在卢瑟福指导下继续做了一系列α粒子的散射实验。他们在1913年的论文中写道："整个实验记下了100 000次以上的闪烁，我们所有的研究结果都与卢瑟福教授的理论符合得很好，为下述假说提供了有力的证据，即：原子中心有很强的电荷，这个中心比原子直径要小得多。"

然而，卢瑟福的有核模型与经典物理学的理论是根本矛盾的。首先，根据经典电磁理论，电子绕核运动，它要向外发射电磁波，能量将逐渐减少，因而电子绕核旋转的频率也将逐渐改变，这样它将向外发射连续光谱，这与原子的线光谱相矛盾。其次，由于原子能量的逐渐减少，电子绕核运动的半径将逐渐减小而很快落到核上，计算表明，原子的"寿命"将仅有约10^{-12}秒的时间。这与原子是一个稳定的系统的事实是根本矛盾的。这些矛盾的存在，不仅表明这一模型还不完善，而且又一次预示着，对原子世界的认识需要有一个不同于经典物理学的新的理论。

三、玻尔的原子结构理论

尼尔斯·玻尔（N.Bohr，1885～1962）是丹麦著名物理学家，早年在哥本哈根大学攻读物理学，1911年到剑桥大学学习和工作，1912年，玻尔曾在卢瑟福的实验室工作了四个月，其时正值卢瑟福发表有核原子理论并组织对这一理论进行检验。玻尔参加了α粒子散射的实验工作，他坚信卢瑟福的有核原子模型是符合客观事实的。他也很清楚这一理论所面临的困难。玻尔首先将原子现象和原子核现象区分开来，他认为放

射性辐射起源于原子核，而元素的化学和物理特性则取决于核外电子。玻尔认为：要解决原子的稳定性问题，“只有量子假说是摆脱困难的惟一出路”。

1912 年 7 月，玻尔回到了哥本哈根。1913 年初，玻尔的好朋友、光谱学家汉森（H. M. Hansen，1886～1956）在拜访玻尔时问：原子结构和光谱学中的谱线有什么关系？玻尔不熟悉光谱学，并认为光谱学太复杂，不可能从原子结构的基础上作出解释。汉森向玻尔详细解释了巴尔末的发现，以及谁也无法解释巴尔末的经验公式。这年 2 月玻尔曾注意到德国物理学家斯塔克（J. Stark，1874～1957）在《原子动力学原理》一书中写过的话：“一个光谱的全部谱线是由单独一个电子造成的，是在这电子从一个（几乎）完全分离的状态逐次向势能最小的状态跃迁的过程中辐射出来的。”这里已经有了电子跃迁的思想，并把它与光谱线联系到一起了。这样，玻尔才突然领悟到，他可以用他的理论解释长久使人迷惑不解的巴尔末经验公式了！玻尔曾说过：“我一看到巴尔末公式，整个情形就一下子弄清楚了。”①

此后，玻尔的研究工作进展十分顺利，很快写出了《原子结构和分子构造》的著名论文，经卢瑟福推荐发表在 1913 年《哲学杂志》上。论文把卢瑟福、普朗克、爱因斯坦的思想结合起来，创造性地将光的量子理论引入到原子结构理论中来，克服了经典理论解释原子稳定性的困难。这是原子物理学的划时代的文献。

在文章的开头，玻尔写道：“近年来对这类问题的研究途径发生了根本的变化，由于能量辐射理论的发展和这个理论中的新假设从实验取得了一些直接证据，这些实验来自各不相同的现象，诸如比热、光电效应和伦琴射线等等。从这些问题讨论的结果看，人们一致公认经典电动力学并不适用于描述原子规模的系统的行为。不管电子运动定律作何变动，看来有必要引入一种与经典电动力学不同的量到这些定律中来，这个量就是普朗克恒量，或一般所说的基本作用量子。引入这一物理量后，原子内电子的稳定性结构问题就发生了根本性的改变。”

在这篇文章中，玻尔通过两个著名的假说“定态假设”和“频率假设”将基本作用量子引入原子系统。1922 年，玻尔在接受诺贝尔奖时所作的演讲中谈到这两个假设时说：

> 1913 年我用两个假定的形式提出了这样一种表述，下面我来讲一下：
>
> （1）在原子系统的设想的可能运动状态中存在着所谓的‘稳定态’。在这些状态中，粒子的运动虽然在很大程度上遵守经典力学规律，但这些状态的独特的稳定性不能用力学来解释，原子系统的每个变化只能是从一个稳定态完全跃迁到另一个稳定态；
>
> （2）与经典电磁理论相反，稳定原子不发生辐射，只有在两个定态之间跃迁才产生电磁辐射。辐射的特性相当于以恒定频率作谐振动的带电粒子按经

① 杨仲耆、申先甲，《物理学思想史》，湖南教育出版社，1993 年，第 657 页。

典规律产生的辐射，但频率 ν 与原子的运动不是单一关系，而是由下面的关系来决定：

$$h\nu = E_n - E_m$$

式中 h 是普朗克常数，E_n 和 E_m 是原子在两个稳定态，即辐射过程中的始态和末态的能量值。反之，用这种频率的电磁波照射原子时，可引起吸收过程，使原子从后一稳定态跃迁回前一个稳定态。

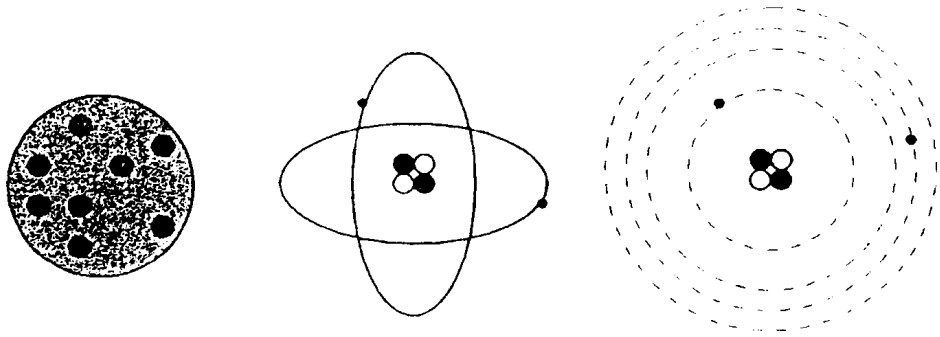
通过运用经典力学的计算和引入量子条件，玻尔推出了原子的玻尔半径大小 $a=h^2/4\pi^2e^2m$，并得到了定态能量

$$E_n = -\frac{2\pi^2me^4Z^2}{n^2h^2}。$$

由 $h\nu=E_n-E_m=hR\left(\frac{1}{n^2}-\frac{1}{m^2}\right)$ 推出原子的里德伯常数 R，同光谱实验已经知道的数值符合得很好。

在 1913 年的论文中，玻尔解释了 25 年来未能解释的氢原子光谱规律，预言了氢和氦的一些新谱线的存在。玻尔理论的一个最重要的成果还在于建立了经典概念与量子概念之间的对应原理。

玻尔的理论发表后，由于观点特别新颖，以致当时不少物理学家难以接受。但是不久，玻尔的定态能级理论就为弗兰克-赫兹（James Frenck-Custav Hertz）新的实验事实所进一步证实。



(1) 汤姆孙模型　(2) 卢瑟福模型　(3) 玻尔模型

图 10-3　原子模型理论的发展

索末菲对玻尔理论进行了全面推广，其中包括椭圆轨道理论和相对论修正。索末菲首先把氢原子中电子的开普勒运动看成是二维问题，后来又把这个问题看成是三个自由度的体系，提出了“空间量子化”，可以相当满意地描述塞曼效应和斯塔克效应；将相对论用于电子的周期运动，得到能量的相对论修正，可以从理论上解释氢谱线的精细结构。

限于历史条件，玻尔理论没有从根本上脱离经典物理学的理论框架，对量子化条

件的引进也没有从理论上给以适当的解释，因此被人称之为“普朗克的量子观念与经典力学的混合”。但是，正是由于这一“混合”打破了经典物理学一统天下的局面，开创了揭示微观世界基本特征的前景，为建立描述微观世界运动规律的量子力学理论体系的诞生奠定了基础。

四、X 射线谱与原子壳层结构

J. J. 汤姆孙的模型已经有了电子在原子内的排列有壳层结构的初步思想，X 射线谱的研究促进了这一思想的发展。

自 1895 年伦琴发现 X 射线后，当时有许多物理学家都迅速转向对 X 射线性质的研究，直到 1912 年，不少物理学家都认为 X 射线是一种粒子流。1912 年，劳厄（Max von Laue，1879～1960）用晶体作光栅得到 X 射线的衍射图样，证明了 X 射线是从原子内部辐射出来的波长较短的电磁波，同时证明了晶体具有空间点阵。劳厄因此获得了 1914 年度诺贝尔物理奖。1908 年，巴克拉（Charles Glower Barkla，1874～1944）发现了各种物质受到 X 射线照射后会发出特有的“标识”谱线，这种“标识”谱线与照射的 X 线和元素所处的物理、化学状态无关。巴克拉因此而获得了 1917 年诺贝尔物理奖。1913 年，莫塞莱（H. G. J. Moseley，1887～1915）通过大量的实验，准确地测出了各种金属元素的“标识谱线”，并且得到了一个重要的规律：各种元素的 K 线系有着相似的结构，只是其波长按元素在周期表中的排列而递减，利用这一规律，能准确确定各元素在周期表中的位置（即序数）与它的核电荷数的相等性。

1914 年，西格班（K. M. G. Siegbahn，1886～1978）对 42 种元素的 K 系作了新的研究，对其中 27 种元素确定了四条主线，对较轻的元素，还作出了八条弱线的数据表，L 系列有 28 条线，M 系列有 24 条线。西格班的工作对于揭示原子内电子壳层结构状况有着重要的作用，他因此而获得了 1924 年度诺贝尔物理奖。

五、泡利不相容原理和电子自旋的提出

1. 塞曼效应和反常塞曼效应

20 世纪 20 年代，对于反常塞曼效应的实验规律，玻尔原子理论还不能做出令人满意的说明，成为一个令人关注的问题。

塞曼（Piter Zeeman，1865～1943）是一位荷兰物理学家，1896 年按照他从前的老师洛伦兹的建议，塞曼研究磁场对光源的影响。他发现在磁场中发射光谱的每一条谱线都会发生分裂，即塞曼效应。塞曼注意到，当试样放在垂直于光路的强磁场中时，某些元素的光谱分裂成 3 条线，当试样放在平行于光路的强磁场中时，光谱线则分裂成

两条。洛伦兹根据他的经典电子论，认为原子内电子振荡产生光，而磁场又影响电子振荡，从而影响发光的频率，造成谱线的分裂。塞曼效应的发现正好确证了洛伦兹的猜想。由于“研究磁力对辐射现象的影响取得优异成就”，洛伦兹和塞曼分享了1902年的诺贝尔物理学奖。

然而不久以后人们发现，光谱线在磁场中不是简单地分裂，还产生了3条以上的分裂谱线。这就是所谓的“反常塞曼效应”，是经典电磁理论难以解释的。如：置于弱磁场内的火焰中的两条钠黄线，其中D1分裂为4重线，D2分裂为6重线。这些多重线排列紧密而有规则。

1903年，塞曼在他的诺贝尔演讲《磁场中的光辐射》中说：“大自然给了我们大家一个意外的袭击，其中包括对洛伦兹教授。我们发现，谱线三分裂的规律有许多例外。德国物理学家考纽（Cornu）可能是最先发现此现象与原来的理论不符。他看到有时出现4分裂。在某些情况下，还可能分裂成5条线、6条线甚至9条线。在由很多谱线组成的铁光谱中，我们能看到一系列不同的分裂形式。”“我发现，不同系列的谱线有很大差别，而且在相同的磁场中谱线的分裂与基本假设相矛盾，表现在振荡频率的间隔上。”

玻尔的量子原子理论建立以后，索末菲和德拜于1916年分别发表文章解释了正常塞曼效应，但是对反常塞曼效应的情况却始终没有能够从理论上给予说明。

1921年，朗德在解释反常塞曼效应方面首先取得突破，他从索末菲的内角量子数出发，推导出谱线分裂公式，但是，对公式中的分裂因子不能以适当的力学模型给以说明。

海森伯在建立矩阵力学前，曾经发表过几篇关于塞曼效应的论文。他的主要观点是在解释反常塞曼效应时，对原子中的电子和原子实都采取半整数的量子数。1923年，朗德试图推广他和海森伯的原子实模型来说明多重线。他采取了玻尔的提示，在描述多重谱线能量时采用四个量子数，主量子数、角量子数、内角量子数和原子实的量子数，由此得到的公式与实验数据符合得很好。但是朗德的结论与玻尔原子理论在很多方面不符，如引入了玻尔原子理论无法解释的半整数量子数，违反了通常的角动量合成规则等，反常塞曼效应的问题使当时的量子物理学家更加困惑。

2. 泡利不相容原理

1922年，泡利（Wolfgang Pauli，1900～1958）开始对反常塞曼效应进行全面深入的研究。泡利不同于朗德和海森伯的观点，他不喜欢原子实模型，认为原子实模型原则上是经典力学的，他坚持那些玻尔认为在原子理论中必不可少的原理。1923年，为了符合实验数据，泡利也引入了半整数量子数，但是泡利对研究工作并不满意。1923年夏，泡利正在哥本哈根玻尔领导的研究所工作，他在给索末菲的信中说：“反常塞曼效应的理论及包含一个以上电子的情况是非常糟糕的。”许多年以后，泡利回忆道：

“反常类型的磁分裂很难被理解，因为用经典理论及量子理论得到的关于电子的普遍假设总是导致相同的三线，对这一问题的更进一步考察使我感到难以接近……”

1924 年，泡利计算了电子速度的相对论修正对塞曼效应的影响，这种研究和计算使泡利对原子实模型更加怀疑。

1924 年，泡利通过计算发现，满壳层的原子实应该具有零角动量，因此他断定反常塞曼效应的谱线分裂只是由价电子引起，而与原子实无关。这就意味着特别是在碱金属元素的情况下，原子的角动量和它们在磁场中的改变仅仅是由于价电子的关系。泡利引入 4 个量子数来描述电子行为。通过观察光谱线的事实，泡利注意到这样一种情况，一些量子数的组合在自然界中不能发生。

1925 年 1 月，泡利得到了结论：“在一个原子中，决不能有两个或两个以上相同的电子，对它们来说，在外场中它们的所有量子数 n、k_1、k_2、m（或 n、k_1、m_1、m_2）都是相等的。如果在原子中出现一个电子，它的这些量子数（在外场中）都具有确定的值，那么这个态就说是已被占据了”。这就是不相容原理。

不相容原理的提出，给反常塞曼效应的合理解释以及另外一些现象的理解带来了新的光明。泡利清楚地意识到，不可能把这样一条原理归结为在此以前已经表述出来的那些力学规律和量子法则的逻辑推论，它是一条全新的、独立的“基本公设”。由于不相容原理的发现，泡利获得了 1945 年的诺贝尔物理学奖。

3. 电子自旋概念的提出

玻尔理论比较成功地解决了单电子问题，但是，人们也发现电子态的数目是玻尔理论期望值的两倍。海森伯为这种倍增起了一个专门的名称，称为双倍性。这实际上就是赋予电子以第四个自由度。然而第四个自由度的物理意义究竟是什么，物理学家还说不清楚。

这时，来自美国的物理学家克罗尼格（Rolph. L. Kronig）对泡利的思想产生了兴趣，并试图提出一个物理模型。他认为，可以把电子的第四个自由度看成是电子具有固有角动量，电子围绕自己的轴在作自转。他还进行了初步的计算，得到的结果竟和用相对论推出的结论相符。克罗尼格急切地与泡利讨论，但是他的电子自转模型遭到了泡利的反对。泡利说：“你的想法的确很聪明，但是大自然并不喜欢它。”泡利不相信电子会有本征角动量，他早就考虑过绕轴自转的电子模型，由于电子的表面速度会有可能超过光速，违背了相对论，所以放弃了这种尝试。另外，泡利不希望在量子理论中保留经典概念。克罗尼格受到泡利如此强烈的反对，也就没有把自己的想法写成论文发表。

半年以后，荷兰年轻的物理学家乌伦贝克（George E. Uhlenbeck，1900～1988）和古兹密特（Samuel. A. Goudsmit，1902～1978）在不了解克罗尼格工作的情况下，提出了同样的想法。他们就此与导师埃伦费斯特进行了讨论，得到导师的支持。埃伦费

斯特认为他们的想法非常重要，当然也可能完全错了，建议他们写成论文发表。于是，他们写了一篇只有一页的短文请埃伦费斯特推荐给《自然》杂志。接着他们两人又去找荷兰物理学界老前辈洛伦兹请教。洛伦兹热诚地接待了他们，答应想一想再回答。一周后，他们再见到洛伦兹时，洛伦兹给他们一叠稿纸，上面写满了计算公式和数字。洛伦兹告诉他们，如果电子围绕自身轴旋转，其表面速度将达到光速的十倍。这个结果当然是荒唐的，于是他们立即回去请埃伦费斯特还给他们那篇论文，承认自己犯了错误。可是，埃伦费斯特已经把论文寄走，可能就要发表了。乌伦贝克和古兹密特感到十分懊丧。

乌伦贝克和古兹密特的论文发表后，海森伯立刻来信表示赞许，并认为可以利用自旋-轨道耦合作用，解决泡利理论中所谓“二重线”的困难。不过，乌伦贝克和古兹密特当时还不能解释双线公式中多出的因子 2。正在此时，爱因斯坦来到莱顿大学讲学，爱因斯坦向他们提供了关键性的启示：在相对于电子静止的坐标系里，运动原子核的电场将按照相对论的变换公式产生磁场，再利用一级微扰理论可以算出两种不同自旋方向的能量差。

1926 年，英国物理学家托马斯（L. H. Thomas）解决了因子 2 的困难。

玻尔很欣赏乌伦贝克和古兹密特的工作，他没有想到困扰物理学家多年的光谱精细结构问题，用“自旋”这一简单的力学概念就可以解决。但是泡利始终反对利用力学模型来进行思考。泡利对玻尔争辩说：“一种新的邪说将被引进物理学。”两年以后，泡利终于把电子自旋纳入了量子力学的体系，实现了自己的目标。不久，狄拉克（Paul Adrien Maurice Dirac，1902～1984）建立了相对论性量子力学，在他的理论中可以自然地得出电子具有内禀角动量这个重要结论。

电子的自旋角动量与经典力学中刚体的绕自身轴转动的角动量有本质的区别。电子的自旋角动量与电子的时空运动无关，是电子的固有性质。其他所有微观粒子也有自旋角动量，只是大小不一样。

泡利不相容原理的提出和电子自旋的发现，使对原子内部电子的分布和运动有了更深入的认识，使光谱的精细结构、反常塞曼效应和斯特恩-盖拉赫实验等得到了理论的说明。

第三节　矩阵力学和波动力学的建立

一、德布罗意波的提出

1923 年，年轻的法国物理学家德布罗意（Louis de Broglie，1892～1987）创立了物质波理论，开创了现代量子力学的时代。

1. 思想背景

德布罗意是在1910年获得历史和法律的学士学位以后才转向物理学的学习与研究，他对科学有浓厚的兴趣，在哥哥莫里斯的影响下自学了物理学大师们的著作，钻研了物理学当时的最新成果，对一些前沿领域存在的问题有了深刻的认识，同时德布罗意还在他哥哥的实验室里参加过实验研究工作。德布罗意的物质波思想在1922～1924年形成，这个时期德布罗意正在准备他的博士学位论文。

德布罗意在谈到关于波粒二象性思想的起源时，这样写道："在我年轻时代，也就是在1911～1919年间，我满腔热情地钻研了那个时期理论物理的一切新成果。我了解庞加莱、洛伦兹、朗之万……的著作，也了解玻尔兹曼和吉布斯关于统计力学方面的著作。但是，特别引起我注意的是普朗克、爱因斯坦、玻尔论述量子的著作。我注意到爱因斯坦1905年在光量子理论中提出的辐射中波和粒子共存是自然界的一个本质现象。在随我哥哥莫里斯作了X射线谱的研究后，我觉察到电磁辐射的这种二重性具有十分重要的意义。在研究了力学中的哈密顿-雅可比理论后，我进一步在其中发现了一种波粒统一的初期理论。最后，在深入地研究了相对论后，我深信它一定是一切新的假设的基础。"①

1929年德布罗意在接受诺贝尔物理奖时作的《电子的波动性》的演讲中较详细地谈到了他提出物质波的思考过程。②他首先指出："是物质结构和辐射机理的奥秘把我吸引到理论物理学中来的。1900年，普朗克在研究黑体辐射时引入了新奇的量子概念，这个概念不断地渗入到整个物理学领域，使得物质结构和辐射机理的奥秘更加深邃。"早在1922年，德布罗意曾借助于热力学、气体动力学和电子理论的方法，采用光的量子假说，导出了维恩位移定律，从这时起他就开始考虑把物质的波动方面和粒子方面统一起来。

他在演讲中回顾了自普朗克提出量子论思想以来所产生的一些重要结果（爱因斯坦光子论的提出、光电效应的解释、康普顿效应、玻尔原子理论等等）后说：

> 人们无法理解，为什么对于光来说，需要有两种相互矛盾的学说，即波动说和粒子说，为什么原子中的电子只有可能进行某些运动，而按经典概念它应有无穷多种运动。这就是我重新开始理论物理研究时物理学家所面临的哑谜。
>
> 当我开始思考这些困难时，主要有两个问题吸引我。第一个问题是，不能认为光子理论是令人满意的，因为它是用 $w = h\nu$ 这个关系式来确定光微粒的能量的，其中包含着频率 ν。可是纯粹的粒子理论不包含任何定义频率的

① 向义和，《物理学基本概念和基本定律溯源》，高等教育出版社，1994年，第278页。

② L. 德布罗意著，宋玉升等译，《电子的波动性》，见《诺贝尔奖获得者演讲集　物理学》第二卷，科学出版社，1984年，第211～221页。

因素。对于光来说，单是这个理由就需要同时引进粒子的概念和周期的概念。

另一个问题是，确定原子中电子的稳定运动涉及到整数，而至今物理学中涉及整数的只有干涉现象和本征振动现象。这使我想到，不能用简单的微粒来描述电子本身，而应当赋予它们以周期的概念。

于是我得出指导我进行研究的全部概念，对于物质和辐射，尤其是光，需要同时引进微粒概念和波动概念。

1923 年夏天，德布罗意已经形成了这样一种思想：把波粒二象性加以推广使物质粒子（特别是电子）也包括在内。

2. 物质波假设的提出

德布罗意于 1923 年 9 月到 10 月在《法国科学院报导》上连续发表了三篇文章，题目分别为《波和量子》、《光量子、衍射和干涉》和《量子、气体运动理论和费马原理》，提出了现在称为德布罗意波的雏形，后在 1924 年的博士论文《关于量子理论的研究》中，详细阐述了他的物质波思想及其各种应用。这篇文章发表在 1925 年法国《物理杂志》第一期上。

德布罗意在 1923 年 9 月 10 日的《光和量子》的文章中，考虑了一个静止质量为 m_0 的粒子的相对论效应，显然它应具有能量 m_0c^2。他把这一能量与量子现象联系起来得到 $h\nu = m_0c^2$。于是他提出一个大胆的设想："一般的"物质也具有波粒二象性。在这篇文章中，他用波的观念分析了玻尔的量子化条件，并认为这种波的干涉是玻尔量子化条件的物理基础。

在 9 月 24 日的论文《光量子、衍射和干涉》中，他在讨论衍射现象时预言："从很小的孔穿过的电子束能够呈现衍射现象，这或许是人们能借以寻找关于我们的想法的实验证据的方向。"在这篇文章中还讨论了他所要寻找的"新力学"和以往的"旧理论"（包括牛顿和爱因斯坦的动力学）之间的关系，他认为这个关系正好像是波动光学和几何光学之间的关系。德布罗意最后声称："经过对此深思熟虑，可以看出，我们所提出的这种综合就是在与 17 世纪光学和动力学的类比中发展完成的。"

在 10 月 8 日的《量子、气体运动理论和费马原理》的论文中，他再次详细地阐述了这种类比。他在给出费马原理和莫泊丢变分原理的相似性表示后说："联结几何光学和动力学的两大原理的基本关系由此得以完全明朗。"后来，在他的博士论文中，德布罗意进一步指出："我们认为几何光学和动力学的这两个重要原理之间的深刻关系的这个思想，可以作为将波和量子综合起来的重要指导思想。"

三篇论文发表以后，德布罗意开始撰写博士论文，根据他的回忆："在 1923 年我写出了博士论文，为了得到博士学位我想把它寄出去。我将论文复制了 3 份，将其中一份寄给了朗之万，以便他决定是否可以作为博士论文接受。朗之万也许对我的新思想的新奇有点感到惊异，又向我要了一份寄给爱因斯坦，请爱因斯坦评定。爱因斯坦读

完以后就宣布，在他看来我的思想是很有趣的。这促使朗之万接受我的论文。”[①]爱因斯坦对德布罗意的论文大加赞赏，认为他揭开了“自然界巨大面罩的一角”。1924 年 11 月 25 日德布罗意的博士论文通过答辩。

德布罗意的博士论文共分七章。第一章详细阐述了他在以前发表的几篇论文中已经提出的量子领域中所有实物粒子都具有波动性的假设。他把这种量子波称为相位波。论文的余下各章是相位波在物理学各领域中的具体应用，包括在统计力学中的应用。在这篇论文中还得到了以后以他的名字命名的波长与动量的关系式

$$\lambda = h/p$$

这个式子和 $E=h\nu$ 一起，就是我们熟知的爱因斯坦-德布罗意关系式。

3. 物质波假设的实验检验

德布罗意是通过理论研究得到他的重要结果的，经过爱因斯坦的推荐人们开始重视对物质波理论的研究，但是这个假设还需要实验观察上的支持。德布罗意在论文中曾经预言了电子束在穿过狭缝或小孔时会像光一样，产生衍射现象。在德布罗意的博士论文答辩时，会议主持人佩兰曾问：电子的波动性可以用什么方法检验？德布罗意回答说，电子通过晶格时，可能会出现干涉、衍射图样。这是德布罗意早已考虑过的方案，并曾经向他哥哥莫里斯的同事、后来成为著名天体物理学家的道维耶（Dauviller）提出实验建议，但是由于道维耶正在忙于其他实验而搁置下来。[②] 道维耶在纪念德布罗意六十诞辰的一篇短文中写道：“用以证实电子的这些性质的第一个实验结果是否定的。在这个实验里使用的阴极射线（电子束）太软（即能量太低）。因此高真空中的云母晶体拾取了寄生电荷。”由于道维耶当时对物质波的存在和通过实验进行检验并无信心，他没有认真从实验上分析失败的原因，而是放弃了实验。事实上，当时物理学界并不仅仅是道维耶一个人对物质波的实验检验信心不足，道维耶代表了多数物理学家的态度。

1925 年，美国实验物理学家戴维孙（C. J. Davisson，1881～1958）在研究镍对电子的散射时，因实验事故使靶氧化，他通过长时间加热清理镍靶后再重做实验，发现电子被散射后出现类似光的干涉、衍射图样。这是由于长时间的热处理使镍靶由原来的微小晶体所组成变成了大块晶体的缘故。戴维孙这时还不了解德布罗意的物质波理论，因此对观察到的新现象没有给予重视。1926 年夏天，戴维孙到英国访问，获悉了德布罗意的理论，他立即想到，自己一年前所观察到的现象可能就是德布罗意波。回到美国以后，他和革末一起重做实验，1927 年发表实验结果，完全证实了德布罗意的理论。

---

① 何祚庥、侯德彭主编，《量子力学的丰碑——纪念德布罗意百年诞辰》，广西师范大学出版社，1992 年，第 3 页，274 页。

② 向义和，《物理学基本概念和基本定律溯源》，高等教育出版社，1994 年，第 277～300 页。

几乎同时，英国剑桥大学的G. P. 汤姆孙在观察电子束通过金箔时也观察到圆环条纹，尽管这一实验也不是为验证德布罗意理论而设计的。汤姆孙的发现为德布罗意的物质波理论提供了又一实验证据，使物理学家对德布罗意的理论更加信服。1929年，诺贝尔物理学奖的桂冠落到了德布罗意的头上，获奖原因是由于发现了电子的波动性。德布罗意是第一位因学位论文而获得诺贝尔物理学奖的。1937年，戴维孙和G. P. 汤姆孙也由于发现晶体对电子的衍射作用而获得了诺贝尔物理学奖。

一切物质（包括光和实物粒子）都具有波粒二象性这一概念的确立，揭示了物质世界所具有的普遍属性，启示人们在对微观粒子进行研究时，不能再局限在经典物理学的框架，这就为建立一门研究具有波粒二象性的微观粒子运动规律的新理论扫清了思想障碍，使得新理论在短期内得以建立起来。

1929年，德布罗意在他的诺贝尔演讲中强调了物质波理论的意义，他说："可见，描述物质的性质也像描述光的性质一样，要同时涉及波和微粒。不能再认为电子是电的单个粒子，它应当是和一个波缔合的，而且这个波并非虚构，它的波长可以测量，它的干涉现象可以预言。因此，有可能预言实际上还未被发现的所有现象。自然界的波粒二象性概念表述起来多少有些抽象，但它已成为整个现代理论物理学发展的基础，而且也将是这门科学未来发展的基础。"

二、矩阵力学的建立

矩阵力学是1925年由海森伯首先提出，后来由M. 玻恩、约当等人共同完成的。它的建立标志着物理学一个新时代的开始，随后几年量子物理有了一系列新的进展和成就。

海森伯（Werner Karl Heisenberg，1901～1976）是著名德国物理学家，他的主要科学贡献有是创立矩阵力学和提出不确定关系，他对原子结构、物质铁磁性理论、宇宙射线、粒子物理问题也做了深入研究。

1920年，海森伯进入慕尼黑大学，在索末菲、维恩、普林斯海姆等著名科学家的指导下攻读理论物理学。1923年获得博士学位。1924～1926年间，海森伯先后在格丁根的M. 玻恩和哥本哈根的N. 玻尔的指导下研究量子论。对于自己的科学成长，海森伯后来曾经说："在索末菲那里学了物理，玻恩那里学了数学，玻尔那里学了哲学。"[①] 所以他在学术上的成长过程，也就是不断在慕尼黑、格丁根和哥本哈根三地之间穿梭的过程。1925年7月，海森伯完成一篇有历史意义的论文——《关于运动学和动力学关系的量子论的新解释》，为矩阵力学的建立奠定了基础。

矩阵力学可以认为是玻尔理论的一个自然的发展。玻尔理论建立以后，取得了许

① 王福山，《20年代的海森伯》，见《近代物理学史研究》，复旦大学出版社，1983年，第51页。

多惊人的成果，到20世纪20年代初，元素周期律以及各个元素的物理化学性质，都在这个理论的基础上得到了比较满意的说明。但是，对于稍微复杂一些的原子，如仅有两个外围电子的氦原子，光谱的能级和频率却无法计算。这个理论虽然适用于单周期和多周期系统，而对非周期系统却很难应用。特别是在同经典理论的关系上，玻尔理论一方面使用坐标、动量等经典理论的概念描述电子的轨道，引进经典轨道的绕转频率，即用经典力学的办法来处理电子的运动，同时又完全不管经典物理规律，而假设处于某些定态的轨道是稳定的，对电子轨道半径以及光的吸收与发射等，又使用量子条件和量子频率。这种方法被称为半经典的量子论方法，量子概念似乎是勉强附加上去的，暴露出理论的不一致性。在解决具体问题时，这个理论要用对应原理与经典理论进行比较，但对于不同的问题，对应原理的运用又没有统一的规则。对于这种情况，布拉格曾经幽默地说，我们好像应当每星期一、三、五引用经典规律，而在每星期二、四、六引用量子规律。

海森伯对玻尔理论进行了仔细的研究。在研究中，有两个观点逐渐明确，成为他建立量子力学的基本思想，这就是对应原理的普遍意义的认识和可观察性原则的确立。

对应原理的思想是玻尔最早提出的，随着量子物理的发展，这个原理的内容不断丰富和发展。通过1913年的工作，玻尔在人们面前展示了一个无比广阔的有待仔细勘察的理论新世界。当时发展原子理论所依赖的主要是光谱学方面的资料。这种资料很丰富、精确，同时也很复杂。要根据这样复杂的资料反推回去，来求得发射着光谱的那些原子的结构，确实是十分艰巨的任务。玻尔曾经比喻说，一个五彩缤纷的蝴蝶翅膀，当然是按照生物学规律生长而成的，但是大概谁也不会梦想根据一只蝴蝶翅膀来推知生物学的基本规律。[①] 尽管如此，玻尔等人勇敢地进行了开拓性的探索，工作卓有成效。1920年，玻尔明确提出对应原理，成为他的探索工作的有力武器。玻尔认为，在量子论和与之相应、采用经典理论形象图景的模型之间存在着一个细致的类比。玻尔说："对应原理表达出在量子论的系统发展中，利用经典理论的每一个特色去做出合理而又适合量子假定与经典理论之间的基本对照的换译倾向。"[②] 利用对应原理玻尔处理了许许多多的原子结构和原子光谱方面的问题，特别是光谱线的相对强度问题。但是，对应原理的应用需要很多的经验和技巧，要设计原子结构模型、运用经典分析力学理论求近似解、利用量子条件得到定态、还要诠释结果并同实验数据进行比较，等等。在每一步成功的应用中，都包含着许多试探性的猜测和直觉上的判断，而不是一种逻辑的必然。这一原理是玻尔研究工作的强有力的武器，当时许多原子物理学家把它看做是最重要的指导原则，但是初学者却很难运用自如。[③]

海森伯认为，对应原理作为原理应当一开始就以严格的形式提出，而不应只是作

① 戈革，《史情实文帚——科学史与科学哲学文集》，中国工人出版社，1999年，第442页。
② 卢鹤绂，《哥本哈根学派量子论考释》，复旦大学出版社，1984年，第10页。
③ 戈革，《史情实文帚——科学史与科学哲学文集》，中国工人出版社，1999年，第447页。

为一种解决问题的手段。

可观察量原则的确立是海森伯建立矩阵力学的一个基本观点。可观察量指的是系统或客体能够被测量到的物理属性。海森伯特别强调原子理论应该建立在可观察量的基础上，通过实验观察到的只是光谱线的频率和强度，而不是电子的位置和速度。实际上没有任何实验证明电子按一定的轨道运动，因而电子轨道的概念很可能是虚构的。他认为应该仅仅以那些原则上可观察的量之间的关系为依据来建立新的理论。海森伯在后来回忆量子论的历史时说："在玻尔理论中，计算出来的电子轨道频率和发射出来的辐射频率的不相符，必须解释成电子轨道概念有其局限性。这个概念从一开始就有点值得怀疑。"①

海森伯受到玻尔对原子理论不倦探索精神的影响，正是玻尔常常说到的"应当运用合适的概念去适应于实验情况"的思想激励着他。② 应该指出的是，在这方面，爱因斯坦建立相对论的思路对海森伯起着重要的启示作用。爱因斯坦在建立相对论时认为，绝对时间的概念是不必要的，因为它无法用实验观测到，只有运动的参照系中的时钟的读数才同时间的确定有关。爱因斯坦的同时性的操作定义，明确地去除了不可观察的因素。海森伯曾经说过，他的"观察量的概念实质上取自爱因斯坦的相对论"。

海森伯在上述论文中说："本文试图仅仅根据那些原则上是可观察的量之间的关系来建立量子力学的理论基础。""众所周知，在量子论中用来计算可观察量（例如氢原子的能量）的形式法则是应该受到严厉批判的。其理由是这些形式法则作为基本要素包含着一些在原则上显然是不可观察量之间的关系，例如包含着电子的位置及绕转周期。因此，这些法则缺乏一个明显的物理基础。"

海森伯的理论由三部分组成。第一部分给出了量子论的运动学表述式；第二部分给出了量子论的动力学表述式；第三部分讨论了一个简单非谐振子的应用例子。他的论述过程贯穿着对应原理的指导。

海森伯用经典力学中分析力学的方法，通过傅里叶积分和傅里叶变换，把坐标 X 用振幅 A 和频率 ω 表示：

$$X(n,t)=\sum_{\alpha=-\infty}^{\infty}A_{\alpha}(n)e^{i\omega(n,\alpha)t}$$

再用量子论两定态能量决定的跃迁频率 $\omega_{n,n'}=\frac{1}{h}(E_n-E_{n'})$ 利用对应原理，根据经典量振幅和频率与量子论量振幅和频率的对应关系，即可得出：

$$X(t)=\sum_{\alpha}A_{n,n'}e^{j\omega_{n,n'}t}$$

海森伯提出用数集$\{A_{n,n'}e^{j\omega_{n,n'}t}\}$表示坐标 $X(t)$，这样，如果用 A 表示 $X(t)$，B 表示

① 海森伯著，范岱年译，《物理学和哲学》，商务印书馆，1981 年，第 9 页。

② 关洪，《物理学史选讲》，高等教育出版社，1994 年，第 325 页。

$Y(t)$，那么 $X(t)$和 $Y(t)$的乘积 C 与 A、B 的关系就是：

$$C_{n,n'} = \sum A_{n,n'} B_{n,n''}$$

这个关系被称为海森伯乘法规则。海森伯进而讨论了原子中电子的运动，推导出了托马斯-孔（Thomas-Kuhn）求和规则。

海森伯的这套数学方法当时物理学家们并不熟悉，海森伯自己也没有把握。他在得到泡利的鼓励之后，才把论文稿送给玻恩，并请他决定有无发表的价值。玻恩立即认识到海森伯论文的重要性，后来他回忆说："当时海森伯的乘法规则使我不安，经过八天的冥思苦想，我回忆起在布莱斯劳大学时我从老师罗森斯（Rosanes）教授学到过的代数理论。"这就是 70 多年前已被创立的矩阵演算，所以海森伯的理论就被称为"矩阵力学"。

在这篇论文的结束语中，海森伯希望通过对数学方法的更透彻的研究，来决定他的这种"利用可观察量之间的关系"建立起的量子力学"在原则上是否令人满意"。

1925 年 9 月，玻恩和约丹完成了长篇论文《关于量子力学 I》。在这篇论文中，他们不仅采用海森伯的方式，把坐标 q 用矩阵表示，而且进一步把动量 p 也用矩阵表示，首次给矩阵力学以严格的表述。他们从量子化条件出发，利用对应原理，得到 q 和 p 的对易关系

$$pq - qp = \frac{h}{i} I$$

式中的 I 是单位矩阵。他们称这个关系为"准确量子条件"。随后他们把它当作理论体系的基本出发点，运用它去处理谐振子和非谐振子的有关问题，得到了与海森伯相同的结果。

1925 年 11 月，海森伯、玻恩和约丹合作完成了论文《关于量子力学 Ⅱ》。在这篇文章中，他们将以前所得的结果推广到多自由度和有简并的情况，系统地论述了本征值问题，建立了定态微扰和含时间微扰的基础，讨论了角动量、谱线强度和选择定则，奠定了以矩阵形式表示的量子力学的基础理论。

海森伯在结束工作后不久去了英国剑桥大学，在那里作了关于他的工作的报告，这时狄拉克（Paul Adrien Maurice Dirac，1902～1984）得知了新的量子力学，几个星期以后发表了多篇文章，用他新的观点丰富了这个理论。狄拉克利用他熟悉的哈密顿力学，从而发现量子力学中的对易关系形式上与经典力学中的泊松括号相当。在 1925 年 11 月发表的题为《量子力学的基本方程》的论文中，狄拉克运用对应原理，很简单地把经典力学方程改造为量子力学方程。1926 年 1 月，在论文《量子力学和氢原子的初步研究》中，狄拉克建立了一种代数方法，并将它用于氢原子光谱，推导出了巴尔末公式。

与此同时，泡利成功地用矩阵力学的方法解决了氢原子能级，得到了巴尔末公式和斯塔克效应，并求出旧量子论无法解决的交叉电场中氢原子光谱的问题。

三、波动力学的建立

在海森伯、玻恩、约当等人创立矩阵力学的同时，薛定谔通过另一条途径创立了波动力学。

薛定谔（Erwin Schrödinger，1887～1961）于1887年出生于奥地利首都维也纳。1906～1910年，薛定谔在维也纳大学物理系学习，在此期间他曾深入研究过连续介质物理中的本征值问题，这对他以后创立波动力学有重大影响。1910年薛定谔获得博士学位。1920年他到耶拿大学协助维恩工作，1921年受聘任苏黎世大学数学物理学教授，在那里工作了6年，从事理论物理学各种课题的研究，他的论文涉及固体比热、热力学和原子光谱等问题，波动力学就是在这一期间创立的。

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，在马达伦学院任访问教授。1936年，薛定谔回到奥地利，任格拉茨大学理论物理学教授。不到两年，奥地利被纳粹吞并后，薛定谔于1936年流亡到爱尔兰首都都柏林，就任都柏林高级研究所所长，从事理论物理研究。在此期间，薛定谔还进行了科学哲学和生物物理学研究，出版了《生命是什么》一书，试图将量子物理应用于生物学研究，以阐明遗传结构的稳定性，促进了分子生物学的诞生。1956年，薛定谔回到奥地利，被聘为维也纳大学理论物理教授。奥地利政府给了他极大的荣誉，设定了以他的名字命名的、由奥地利科学院颁发的国家奖金，他是第一名获奖者。

薛定谔的工作是在德布罗意物质波理论影响下发展起来的。他在1926年发表的一篇波动力学的论文中曾写道："这些考虑的灵感主要得自德布罗意先生的独创性的论文。"

薛定谔能够后来居上创建波动力学与爱因斯坦有密切关系。当朗之万把德布罗意的博士论文送给爱因斯坦评定的时候，爱因斯坦正在研究气体理论，刚完成了一篇题为《单原子理想气体的量子理论》的论文，文中存在一个令人迷惑的悖论。他收到德布罗意的博士论文后，发现他文中的悖论可以用德布罗意的理论很好地解决，于是爱因斯坦又续写了一篇论文《单原子理想气体的量子理论Ⅱ》，于1925年发表，文中对德布罗意的博士论文予以极高评价。爱因斯坦接连发表的这两篇论文，标志着玻色-爱因斯坦统计的建立。薛定谔当时也在研究气体理论，他开始时对爱因斯坦的论文很不理解，认为有错，于1925年2月5日写信给爱因斯坦进行讨论。此后，到发表波动力学之前，薛定谔同爱因斯坦通信共9封。

爱因斯坦在回信中建议薛定谔仔细研究德布罗意的博士论文，这促使薛定谔对德布罗意物质波思想的极大注意，并迅速掌握了德布罗意的新思想，使他"突然面对德布罗意观念的正确性。"薛定谔在1925年11月3日给爱因斯坦的回信中说："几天前，

我怀着极大的兴趣拜读了德布罗意的独创性论文，并且终于掌握了它。有了这篇论文，我就第一次清楚理解了您的论文中第八节的内容。……按我个人的意见，德布罗意在数学技巧上的处理和我过去的工作差不多，只是稍微正规些，却并不那么优美，更没有作出普遍的说明。德布罗意能从一个巨大理论的框架上全面地思考问题，这一点确实比我高明，那是我过去所不知道的。”

在1926年4月23日给爱因斯坦的信中他又说：“如果不是你的关于气体简并的第二篇论文把德布罗意的思想摆在了我的面前，单靠我个人的力量，这个波动力学是根本无法建立起来的。”

这就表明，薛定谔已经认识到德布罗意理论为理解光的波粒二象性、理解原子理论所遇到的困难提供了新的理论框架；同时，他认为德布罗意的工作还没有从普遍性上说明问题，这一理论有待发展，这一认识为他进一步的工作明确了方向，成为他新工作的起点。

薛定谔认为玻尔理论是不能令人满意的，因而他尝试用新观点去研究原子结构问题。1925年12月25日，薛定谔发表了题为《论爱因斯坦的气体理论》的论文，他明确表示，除了认真考虑由德布罗意提出，并得到爱因斯坦支持的运动粒子的波动理论之外，再没有解决问题的其他出路。他在论文中写道：“按照德布罗意-爱因斯坦波动理论，运动的粒子不过是宇宙基波中物质辐射上的泡沫。”文中薛定谔第一次运用德布罗意的相波思想，把理想气体作为相波谐波来处理。他证明不仅把玻色方法应用于光量子可以得到普朗克公式，而且把玻尔兹曼方法应用于德布罗意的相波，同样可以得到普朗克公式，关键是对物质波本性的理解。这篇论文表明薛定谔已经接受了德布罗意的理论，而且已经运用这一理论来研究自由粒子的运动。

1925年，在著名物理学家德拜（Peter Debye，1884～1966）主持的一个物理学定期讨论会上，薛定谔被指定报告德布罗意的工作。在报告之后，德拜指出，讨论波动而没有波动方程，太幼稚了。几个星期之后，在另一次报告会上，薛定谔说：“我的同事德拜说要有一个波动方程，好，我找到了一个。”1926年上半年，薛定谔以《作为本征值问题的量子化》为总题目，连续发表了6篇论文，系统地阐明了他的新理论。薛定谔的这一系列论文涉及了量子物理、原子模型、物理光学、哈密顿光学-力学相似性、光谱学、微扰理论等众多物理学领域，运用玻尔原子理论、矩阵力学、爱因斯坦波粒二象性思想和德布罗意物质波理论的内容，致力于用波函数来描述微观客体在时空中的定态运动变化，建立相应的波动方程，并求解得到与实验相符的结果，创立了波动力学体系。

1926年1月完成的第一篇论文中，薛定谔从哈密顿-雅可比方程出发，引入波函数Ψ，利用变分原理，建立氢原子的定态方程，得出量子化是本征值问题的结论。他得到的不含时间的氢原子的波动方程为：

$$\nabla^2\Psi + \frac{2m}{K^2}\left(E + \frac{e^2}{r}\right)\Psi = 0$$

上式中取 $K=h/2\pi$ 时，则得到

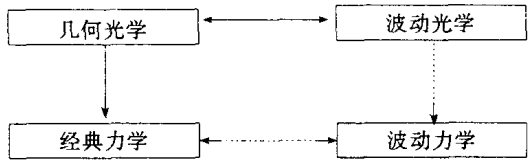
$$\nabla^2\Psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}\left(E + \frac{e^2}{r}\right)\Psi = 0$$

薛定谔在这篇文章中给出了上述方程的解，得出了当时大家熟悉的氢原子的能级公式，这样量子化就成为这一方程的必然结果，从而取代了原来的玻尔-索末菲的人为规定的量子化条件。他写道：

“当然，函数 Ψ 可以和原子中一个振动过程联系起来，而这种振动过程比之今天时常对之怀疑的电子轨道要更接近真实并且清楚得多了。我原先有这个意图，想用这种更直观的方式来建立量子法则的新见解，但最后还是不偏不倚的数学形式，因为，它能把本质的东西清晰地揭露出来。在我看来，本质的东西似乎在于量子法则中不再出现神秘莫测的‘整数性要求’，而是把这个要求向前更推进一步，它的根源在于某个空间函数的有限性和单值性。”“通常的量子化规则可以由另一个条件来代替，这里的‘整数’一词不再出现。更确切地说，整数性是这一方法的自然结果。”

在1926年2月提出的第二篇论文中，薛定谔从经典力学和几何光学的类比及物理光学到几何光学的过渡的角度，阐述了他建立波动力学的思想，并建立了一般的含时薛定谔方程。

薛定谔在论文的一开始就指出：“哈密顿理论和波传播的过程之间的内在联系完全不是一个新的概念，这个概念不仅哈密顿本人是熟知的，而且还是他力学理论的出发点。”我们可以用下图表示薛定谔建立波动力学的基本思路：



在当时，几何光学与经典力学的对应关系（费马原理-哈密顿原理）已有完善的理论；几何光学到波动光学之间的过渡关系（波长的长短）也已十分清楚；薛定谔根据德布罗意物质波思想（同时具有波和量子的二重性质），进一步发展了哈密顿的几何光学和经典力学的类比，提出微观力学过程是波动过程的论断，形成波动力学的概念。他从波动光学与波动力学的物理相似性出发，实现了波动光学向波动力学的过渡。他建立了与光的波动方程类似的物质波波动方程：

$$\nabla^2\Psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - U)\Psi = 0$$

1926年5月提出的第三篇论文中，薛定谔详细叙述了与时间无关的薛定谔微扰理论及其应用，第一次提出了“波动力学”一词。他把经典力学的限度和几何光学的限

度作了类比，提出了存在波动力学的猜测，以及如何寻找波动力学的问题。他还论述了在微观领域中粒子的路径没有意义。在6月的第四篇论文中，进一步建立了含时间的微扰理论，并详细地计算了色散问题。

薛定谔的论文发表后，欧洲学术界反响强烈。爱因斯坦和普朗克都支持波动力学。普朗克说："薛定谔方程奠定了近代量子力学的基础，就像牛顿、拉格朗日和哈密顿创立的方程在经典力学中所起的作用一样。"爱因斯坦认为："薛定谔的著作的构思证实着真正的独创性。"

这样，在差不多同时，对于同一个研究领域出现了两种形式上完全不同、但同样有效的量子理论。最初这两个理论的提出者相互缺乏了解，但是薛定谔没有拒绝海森伯的理论，认真钻研了海森伯等人的论文。在1926年2月的论文《量子化和本征值问题》（第二部分）中他写道："这里我愿意提及海森伯、玻恩、约当和其他一些著名的学者正在深入进行的一项排除量子困难的研究工作，这些研究已经取得了如此值得注目的成就。因此它不容置疑地至少含有一部分真理。从这一理论的发展趋势看，海森伯的意图十分接近于现在我们已经论述的这一工作，他们的方法是完全不同的，我还没有找到二种方法之间的联系，我抱有明确的希望，这两个进展将不会互相冲突。相反，正由于它们的出发点和方法截然不同，它们可以互相补充，取长补短。海森伯方案的力量在于它能给出谱线的强度，这个问题我们还没有接触到。"1926年4月，薛定谔发表了题为《关于海森伯-玻恩-约当的量子力学和我的波动力学之间的关系》的论文。在论文中，薛定谔证明了矩阵力学与波动力学的等价性，指出了这两种理论在数学上是完全等价的，可以通过数学变换从一种理论转换到另一种理论。这两种理论都是以微观粒子具有波粒二象性这一实验事实为基础，通过与经典物理的类比方法建立起来的。后来，波动力学与矩阵力学合在一起，统称为量子力学。量子力学还有Q数和路径积分等表示，它们也都是等价的。

波动力学所用的数学工具是偏微分方程，人们对这种数学方法比较熟悉和容易掌握。正如玻尔所说："波动力学的简单明了，大大超前了以前的一切形式，代表着量子力学的巨大进步。"薛定谔的波动力学被认为是量子力学的一般通用形式。

海森伯由于"创立量子力学，而这种力学的应用导致了许多发现，包括氢的同质异形体的发现"获得了1932年的诺贝尔物理学奖。薛定谔与狄拉克"因创立原子理论的新形式"而共同获得1933年诺贝尔物理学奖。

第四节　玻尔与爱因斯坦
关于量子力学完备性的争论

量子力学建立以后，对于量子力学的物理解释和哲学意义，一直存在着严重的分歧和激烈的争论。许多著名的物理学家、哲学家乃至实验物理学家、数学家等都卷入

了这场争论。争论之深刻、广泛，在科学史上是罕见的。在这其中，以玻尔和爱因斯坦之间的争论最为世人所瞩目。

一、量子力学的“正统”解释

玻尔于1921年在丹麦哥本哈根大学创建了理论物理研究所，1965年为纪念玻尔的贡献改名为尼尔斯·玻尔研究所。这个研究所创建后，在玻尔的领导下，很快成为当时国际上公认的物理研究中心，并逐渐地形成了一个以玻尔为核心的、以哥本哈根的名字命名的学派。这个学派对量子力学的创立和发展做出了杰出的贡献，其中以玻尔、海森伯、泡利和玻恩等的工作最为出色。海森伯的“测不准关系”和玻尔的“互补原理”构成了量子力学哥本哈根学派诠释的两根主要支柱。自1927年后，逐渐为大多数物理学家所承认和接受。因此被人们称为量子力学的“正统”解释。

这个“正统”解释的要点可以大致概括于以下四个方面。

(1) 可观察量是建立理论的基础和依据。人们无法直接观察到原子、电子、光子的行为，而只能在人工安排的特殊条件下对微观客体的行为和特性做出实验观测，从而得出各种观测结果之间关系的规律。但是在人们用特意安排的实验仪器观察微观客体时，就不可避免地要产生干扰，因而可观察量表现出的正是实验环境中的客体的行为和性质。这使量子现象具有主体与客体的不可分性。

(2) 量子跃迁是量子力学的最基本概念。它赋予微观客体过程一个实质性的不连续性，这种不连续性构成了人们对微观客体认识的极限。在量子力学中，人们无法同时准确地知道一个微观粒子的位置和动量，它们遵循“测不准关系”。可以证明对于物理学中的其他“共轭”变量，例如能量与时间，也同样遵循“测不准关系”。同时精确地测定一对共轭正则变量是不可能的，因为原则上所能达到的精确度受到了作用量子的限制。

(3) 描述微观客体的波函数是一种几率波，粒子出现的几率由波幅的平方所决定。因此，在微观领域里，力学的因果律和决定论都遭到了破坏。根据量子力学理论，在同样的实验条件下，可以发生各种不能预期的个体量子过程，因而观测的结果也可能是各种各样的。每次测量都会由于观测仪器与微观客体之间不可控制的相互作用而引进新的初始条件，使通常意义下的因果链被打断。所以在量子力学中，人们必须放弃力学意义上的因果律和决定论，而把几率性看成是本质的。

(4) 从实验中所观测到的微观现象，只能用通常的经典语言做出描述。微观客体的“波粒二象性”，即它的波动性和粒子性，正是用经典语言描述微观客体的结果。这两种图像既互相排斥，又必须同时用于对微观客体的统一性质的描述，所以它们又是互补的。这种互补的概念适用于整个物理学，甚至超越了物理学界而成为有普遍意义的一个哲学原理。

二、爱因斯坦的观点

哥本哈根学派的观点，引起了爱因斯坦、薛定谔、德布罗意等一些著名的物理学家的质疑，其中以爱因斯坦的观点最具代表性。

爱因斯坦是对量子理论的发展作出贡献的物理学家，但是，他对哥本哈根学派的观点始终存有异议。早在1920年1月27日，爱因斯坦针对泡利反对连续区理论的观点表示了他自己对“完全的因果性”的信念。他写道：“关于因果性问题也使我非常烦恼。光的量子吸收和发射究竟能以完全的因果性要求的意义去理解呢？还是一定要留下一点统计性的残余呢？我必须承认，在这里，我对自己的信仰缺乏勇气。但是，要放弃完全的因果性，我会是很难过的。”1924年4月29日爱因斯坦给玻恩夫妇的信中，他又针对玻尔关于辐射的波动在本性上是几率波的假设而评论说：“玻尔关于辐射的意见是很有趣的。但是，我决不愿意被迫放弃严格的因果性，将对它进行更强有力的保卫。我觉得完全不能容忍这样的想法，即认为电子受到辐射的照射，不仅它的跳跃时刻，而且它的方向，都由它自己的自由意志去选择。”爱因斯坦还对把量子力学理论建立在可观察量的基础上持有异议。在1926年春天，他与海森伯的一次长时间谈话中，提出了“是理论决定我们能够观察到的东西”的观点。他还进一步阐述道：“只有理论，即只有关于自然规律的知识，才能使我们从感觉印象推论出基本现象。当我们宣称我们能够观察某种新事物时，我们实际上应当是说：虽然我们就要提出同旧规律不一致的新的自然规律，可是我们仍然假定，这些现存的规律——包括从现象到我们的意识这整个途径——以这样的方式起作用，使我们可以依靠它们，从而才可以谈论‘观察到的结果’。”

从爱因斯坦的这些观点可以看出，围绕着对量子力学理论的理解和解释，一场论战是迟早会发生的。

三、论战的爆发

1926年9月，薛定谔应玻尔的邀请，到哥本哈根介绍他的波动力学。在结束时，薛定谔提出应该放弃量子跃迁的概念，而代之以三维空间的波来描述微观客体的行为。这实际上是以传统的连续性观念，代替量子力学理论中的间断性观念。薛定谔的这一想法一提出来，就遭到了玻尔的强烈反对。他们的争论可以看做是爱因斯坦与玻尔争论的序幕。

1927年9月，在意大利科摩召开了一次纪念意大利科学家伏打逝世一百周年的会议。在会上，玻尔第一次公开了他提出的互补原理。他作了题为《量子假定及量子理论的最近发展》的讲演，这篇演说不仅是用物理学语言，而且还用了大量的哲学语言

来阐述他的互补原理，这使到会的科学家们感到震惊。薛定谔和劳厄并不赞成玻尔的观点，尤其是不同意把物理学建立在测不准关系或其他不确定的统计解释上。

几个星期以后，1927 年 10 月在布鲁塞尔召开了第五次索尔维会议，会议的主题是“电子与光子”。爱因斯坦、玻尔、薛定谔、玻恩、德布罗意、海森伯、洛伦兹、康普顿等都出席了这次会议。会议的议程如下：布拉格报告了 X 射线反射的实验；康普顿作关于电磁辐射的理论和实验的偏差的报告；德布罗意关于导波理论的讲演，这是德布罗意关于物质波思想的进一步发展；薛定谔报告关于真实空间中的波动理论，这是他的波动力学的继续。在德布罗意、薛定谔发言之后，玻恩和海森伯做了关于矩阵力学的报告，他们在报告的最后提出：“我们主张量子力学是一种完备的理论，它的基本物理假说和数学假说是不能进一步被修改的。”这番话无疑是向不同意见提出了挑战。会议主席洛伦兹认为几率概念是一种理论考虑，而不应当是一种先验的公理，他说：“人们是不是可以相信决定论？难道非决定论是在原则上不可避免的吗？”接着，洛伦兹请玻尔阐述他的互补原理，玻尔发言重复了他在科摩会议上的观点。爱因斯坦没有出席科摩会议，他在这次会议上是第一次听到玻尔亲自阐述互补原理和对量子力学的诠释。由于爱因斯坦一直对量子力学的统计解释感到不满，他曾在 1926 年 12 月写信给玻恩：“量子力学固然是堂皇的。可是有一种内在的声音告诉我，它还不是真实的东西。这理论说得很多，但是一点也没有真正使我们更接近这个‘恶魔’的秘密。我无论如何深信上帝不是在掷骰子。”正是由于爱因斯坦的这种观点，所以人们更急迫地想知道他对玻尔观点的反应。但是，爱因斯坦一直没有发言，直到玻恩直接问到爱因斯坦的意见，他才起来发言。爱因斯坦表示赞同量子力学的系综几率解释，而不赞成把量子力学看成是单个过程的完备理论的观点。在当时大多数人都赞成量子力学几率解释的情况下，爱因斯坦的发言掀起了波浪，从而引发了他和玻尔之间就量子力学诠释问题的公开争论。

在争论中，玻尔极力想把爱因斯坦争取过来。但是，爱因斯坦坚信“有一个离开知觉主体而独立的外部世界，是一切自然科学的基础。”因此，他对测不准关系和量子力学的几率解释极为不满，认为这是由于量子力学主要的描述方式不完备所造成的，从而限制了对客观世界的完备认识，所以只能得出不确定的结果。爱因斯坦提出了一个“单缝衍射”的理想实验，来说明自己的观点。如图 10-4 所示，一束电子射向遮光屏 S，通过屏上的小孔 O 在屏后的半球面胶片 P 上得到衍射图像。他说，可以有两种不同的观点来解释实验结果。按照第一种观点，同德布罗意-薛定谔波相对应的，不是一个电子，而是一团分布在空间中的电子云；量子论对于任何单个过程是什么也没有说的，它只给出关于一个相对说来无限多个基元过程的集合的

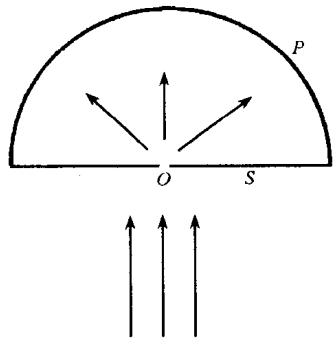


图 10-4　单缝衍射实验

知识。按照第二种观点，量子论可以完备地描述单个过程，落到遮光屏上的每个粒子，不是由位置和速度来表征而是用德布罗意-薛定谔波束来描述，这些描述概括了全部的事实和规律性。爱因斯坦在会上的发言，是他第一次在公开场合下对量子力学的发展表示不满。他批评的主要目标，是薛定谔的高维空间中真实的物理波。爱因斯坦接着宣称德布罗意的方向是“对的”，并说这是他惟一能赞同的量子理论形式。在经过一番论证之后，爱因斯坦表示：“我认为德布罗意先生在这个方向上的探索是对的。仅就薛定谔波而言，第二种解释我认为是同相对性假设相矛盾的。”虽然他在会上没有直接批驳哥本哈根学派对量子力学的诠释，但是爱因斯坦的态度还是明朗的。显然，他不能同意玻尔、海森伯等人的观点。

玻尔对爱因斯坦的意见是非常重视的，经过认真的思考，玻尔指出不能避免在测量时仪器对电子不可控制的相互作用，即电子与狭缝边缘的相互作用。尽管爱因斯坦对玻尔的分析提不出反驳，可是他的内心深处是不服气的。很快，爱因斯坦又想出了一个类似当年托马斯·杨所做的“双狭缝干涉实验”。如图 10-5，A 为有一条狭缝 K 的壁障，B 是有分别为 M 和 N 两条狭缝的壁障，C 为荧光屏。如果让大量电子通过这两个壁障，会在屏 C 上出现明显的干涉条纹。若控制电子枪 O，让它一个一个地发射电子，屏 C 上就只会出现一个一个的亮点，并可测出它的位置。如果分别关闭 M 或 N，就可以准确地知道电子是通过 M 还是通过 N 而到达屏 C 的，从而可测出电子的准确径迹，显示出电子的粒子性。这样，也就可以准确地计算出电子通过 A 壁障时传给狭缝 K 边缘的动量，从而克服了单缝实验时测不准的困难。

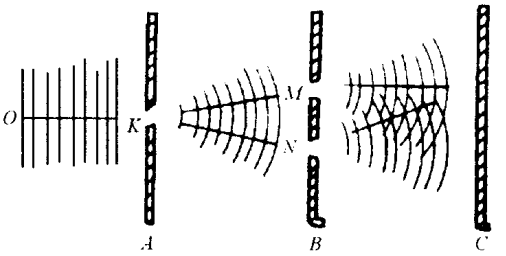


图 10-5　双缝衍射实验

对此，玻尔经过仔细地思考反驳说，如果我们关闭狭缝 M 或 N 中的任何一个，实验状态就完全改变了，在双狭缝同时开启时出现的干涉现象将不再出现，实验则回到了单狭缝的情况，只不过是先后通过了两条单狭缝，等于多了一次与狭缝相互作用的不确定因素。更重要的是这个实验明确显示出，电子的行为依赖于壁障上究竟有没有另一条狭缝，即依赖于我们对实验的安排。当双狭缝开启时，哪怕是让电子一个一个地发射出来，最终仍会在屏 C 上形成干涉条纹；如果轮流只开启一条狭缝，虽然可以得知每个电子是从哪条狭缝通过的，但却不会再形成干涉条纹。这样，玻尔就把爱因斯坦用来反驳互补原理的理想实验，反而变成了用互补原理来说明波粒二象性的例子。

玻尔十分尊重爱因斯坦的这些“发难”，他认为：“爱因斯坦的关怀和批评，很有价值地激励着我们所有的人来再度检验和原子现象的描述有关的形式的各个方面。对于我来说，这是一种很可欢迎的刺激，迫使我进一步澄清测量仪器所起的作用。”爱因斯坦也并不因为他提出的质疑不断地被玻尔所化解，而改变自己的看法，他曾说过一

句充分表达内心信念的名言："你相信掷骰子的上帝，我却相信客观存在的世界中的完备定律和秩序。"

四、争论的高潮

第五届索尔维会议之后，争论并没有平息。1929 年，玻尔特意将他关于量子力学的方法与爱因斯坦的相对论做了比较，希望以此来改变爱因斯坦的观点。玻尔在论文中分析道，普朗克发现作用量子而使我们面临着一种与发现光速的有限性一样的形势。在宏观领域，由于物体运动速度小，可以把时间概念和空间概念截然分开；而普朗克作用量子也很小，可以使我们在通常的宏观现象中能对时空和因果关系同时做出描述。在高速的情况下，以信号不能超越光速传递来保证相对论的逻辑无矛盾性；在微观领域里，测不准关系的限制保证了量子力学的无矛盾性。玻尔和海森伯一样都认为，爱因斯坦否定牛顿的绝对时间是因为没有任何关于绝对时间的实验操作；同样，量子力学的共轭变量之间的测不准关系，也是基于在任意精确度上不可能对这些变量进行同时的测量。这说明量子力学与相对论在认识论和方法论上，有很大的类似性。据说，曾经有人把玻尔的论文拿给爱因斯坦看，但是爱因斯坦始终没有改变他的看法。不过，这却启发爱因斯坦从新的角度去论战。

在 1930 年 10 月召开的第六届索尔维会议上，爱因斯坦与玻尔等人就量子力学问题的争论达到了一个高潮。本来这次会议的主题是"物质的磁性"，不过关于量子力学的讨论成了实际上的主要内容，起因是爱因斯坦又提出了一个新的理想实验，试图从能量和时间这一对共轭变量的测量来否定测不准关系。这个理想实验称为"光子箱"实验。如图 10-6 所示，一个由理想镜面构成的箱子悬挂在固定底座上，它不消耗辐射能。箱壁上开一个小孔，并设有用计时装置控制的快门。箱子下面挂一个重物，整个箱子的重量可以由装在箱子外侧的指针测定。爱因斯坦指出，在从快门打开到闭合的时间 Δt 里，只让一个光子飞出；Δt 可以通过计时装置精确地测定；由于飞出一个光子而引起的整个箱子的质量改变 Δm 也可以精确地测定，并由质能关系式 $E=mc^2$ 计算出箱内的能量变化 ΔE。这样一来，Δt 和 ΔE 就可以同时测定，测不准关系不再成立。

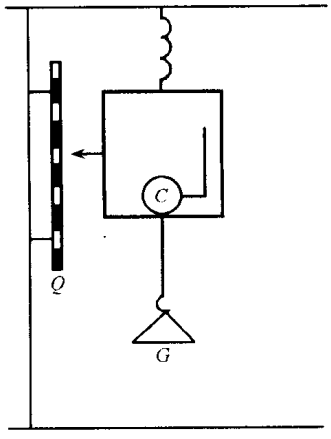


图 10-6　爱因斯坦"光子箱"

据说当玻尔听到爱因斯坦关于"光子箱"的发言之后，大为吃惊，"面色苍白，呆若木鸡"。面对这一相当严重的挑战，玻尔经过一个不眠之夜的思索，还是找到了爱因斯坦诘难的疏漏之处；第二天，玻尔在会议上做了一个漂亮的回答。他指出，如果光子箱的

重量是用弹簧秤来测定的，那么当光子飞出去而引起箱子的重量发生变化时，箱子必沿重力方向发生运动。这时即使第二次重量的测量是准确的，但是由于箱子在重力场中发生了位置变化，箱内时钟的快慢也将因广义相对论的红移效应而发生改变，从而使时间的测量产生一个不准确量。玻尔由此得出结论：用这种仪器作为精确测定光子能量的工具，就将不能控制光子逸出的时间。由于玻尔的回答采用了爱因斯坦自己创立的广义相对论，使得爱因斯坦不能不承认玻尔的结论是无可指责的。爱因斯坦精心设计的“光子箱”理想实验非但没有难倒玻尔，反而成了测不准原理的一个绝好例证。

第六届索尔维会议之后，爱因斯坦承认了海森伯的测不准原理和量子力学理论在逻辑上的自洽性，但是他仍然坚持认为量子力学是不完备的。1935 年 5 月，爱因斯坦和美国物理学家波多尔斯基（B. E. Podolsky ，1896～1966）、罗森（N. Rosen，1909～ ）合作发表的《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗?》一文，对量子力学理论的完备性提出了有力的反驳，这就是著名的以三位作者的姓的第一个字母简称的“EPR 佯谬”。文章认为，首先要合理地澄清“实在”和“完备”的明确意义。所谓“完备”理论的必要条件应是：物理实在的每一要素在理论中都必须具有对应的部分；而要鉴别“实在”要素的充分条件应是：不干扰这个体系而能够对它做出确定的预测。爱因斯坦等人认为，这是判断一种物理学理论成功与否的两个判据。但在量子力学中，由于测不准关系的结果，一对共轭的物理量，精确地知道了其中一个量就排除掉另一个量的精确认识。而且任何一种想在实验上测定后者的企图，都将改变体系的状态，这又使前者的知识受到破坏。根据上述“完备”和“实在”的明确意义，对于这一对共轭的物理量在下述两个判断中只能选择一个：或者认为量子态 Ψ 对于实在的描述是不完备的；或者对应于这两个不能对易的算符的物理量不能同时具有物理的实在性。在论文的第二部分，他们设想了一个理想实验。鉴于以前所设想的理想实验都由于与仪器之间发生了不可避免的干扰而失败，这次就设想了一个对物理体系不进行任何干扰的测量方法。总之，爱因斯坦等人通过他们所提出的理想实验的讨论而得到结论：量子力学的波函数只能描述多粒子组成的体系的（系综）的性质，而不能准确地描述单个体系（如粒子）的某些性质；但是一个完备性的理论应当能描述物理实在（包括单个体系）的每个要素的性质，所以不能认为量子力学理论描述是完备的。

玻尔对 EPR 的批评立即做出回答，他认为不可能以毫不含糊的方式来确定 EPR 所指的那些物理量，因为物理量本来就同测量条件和方法紧密联系着，确定物理量的这些条件使 EPR 所作的关于“实在”的定义在本质上含糊不清了。玻尔认为任何量子力学测量结果的报道给我们的不是关于客体的状态，而是关于这个客体浸没在其中的整个实验场合。这个整体性特点就保证了量子力学描述的完备性。

五、没有结尾的尾声

由于第二次世界大战，爱因斯坦与玻尔之间的论战平息了一个时期。直到20世纪40年代，他们才有机会再次重申各自的观点。1948年，爱因斯坦对EPR佯谬又做了一次深入的讨论。1949年，玻尔在纪念爱因斯坦70寿辰的文集——《爱因斯坦：哲学家-科学家》一书中发表了《就原子物理学的认识论问题和爱因斯坦进行的商榷》的长篇论文，全面系统地阐述了自己的观点，总结了他和爱因斯坦的论战。爱因斯坦在于同一年写的《对批评的回答》一文中，针对玻尔的文章做了回答，批评了哥本哈根学派的实证主义倾向。但是，这些纪念文章，更多地像是一种“各说各的”历史追述，而不是像以前那样的针锋相对的论战了。

回顾这两位科学巨人之间争论的历史，给予我们许多宝贵的教益。这是一场真正的科学论战，双方都是非常认真地提出自己的论据，而且也非常认真地思考对方的观点。爱因斯坦完全承认，统计性的量子理论为理论物理学带来了极其重大的进展；这个理论也是迄今为止惟一能把二象性以逻辑上令人满意的方式统一起来的理论。玻尔更是这样，据他的助手回忆在每一个重大问题上，玻尔习惯上总是先考虑爱因斯坦是怎么想的；1962年11月18日玻尔逝世时，人们在他工作室的黑板上发现了两张草图，这是玻尔11月17日晚间所作的最后一遍检查，其中之一就是爱因斯坦的光子箱。爱因斯坦与玻尔之间持续了多年的争论，使得量子力学的意义不断地得到澄清，一次次争论也就是一步步地深入地揭示了量子力学的本质含义。可以说，这场争论也是量子力学理论发展的一个组成部分。在深层次上，这场争论是两位物理学大师的哲学思想的交锋。这里的一个中心论题就是科学规律本质上应是因果性的，抑或是概率性的？还特别应该提到的是，争论并没有使这两位伟大的科学家之间产生什么不愉快。他们相互尊重，保持了友谊，为后人树立了榜样。像爱因斯坦和玻尔之间的这样一场论战，是不能以简单的胜负判决作结论的。正如当代物理学家惠勒（J. A. Wheeler）所说：“我确实不知道哪里还会再出现两个更伟大的人物，在更高的合作水平上，针对一个更深刻的论题，进行一场为时更长的对话。我向往有一天，诗人、剧作家、雕塑家将会表现这一题材。”

思 考 题

1. 普朗克是如何提出量子假说的？

2. 简述光子概念的建立和确证过程。

3. 玻尔是如何提出他的量子化原子结构模型的？这一理论的建立对量子理论的发展有何重大意义？

4. 德布罗意是怎样提出物质波理论的?
5. 海森伯等人建立矩阵力学的基本思考线索是怎样的?
6. 简述薛定谔建立波动力学的主要过程。
7. 玻尔与爱因斯坦关于量子力学完备性的争论主要是围绕哪些问题进行的?

第十一章　核物理学与粒子物理学的发展

第一节　原子核结构的探索与核裂变的发现

关于核结构的实验，实际上从19世纪末就已经开始了。这就是贝克勒尔关于放射性的发现，以及居里夫妇和卢瑟福对射线的研究。

一、α、β、γ射线的发现和α射线本质的确定

1898年，卢瑟福对“贝克勒尔射线”进行分析。他将铀盐放置在电容器的两平行板之一的上面，加电压于电容器上，从串接在电容器的静电计读取游离电流值。从数据中分析，卢瑟福认为“贝克勒尔射线”具有两种不同的射线，即α射线和β射线。

1899年，贝克勒尔利用居里夫妇分离出的镭盐样品进行实验，他发现磁场可使镭辐射的射线偏转。他还利用电场和磁场测量了β射线的荷质比，得到的数量级为10^{11}库仑/千克，与阴极射线的数量级相同。

1900年，法国物理学家维拉德（P. Villard，1860～1934）研究阴极射线的性质，并与含镭的氯化钡相比较，看看二者有何区别。当维拉德把镭源放入铅管中，在铅管一侧开有一个6毫米宽的长方口，一束射线由此射出。射线经过磁场后用照片进行记录。照片用几层黑纸包裹，并用一层铝箔挡着。这样，β射线的偏折将会被记录，而α射线则会被铝箔阻挡。但从照片记录的情况看，在正中的方向上有曝光的痕迹。后来又加上0.2毫米的铅箔，射线仍能穿透，但肯定不是α射线。维拉德认为，“在镭发出的不受偏折的辐射成分中，含有贯穿力非常强的辐射，它可以穿过金属箔片，用照相法显示出来。”

卢瑟福为这种新发现的射线起名为γ射线。1902年11月，卢瑟福总结道，以镭为例，它放出的辐射可分为3种：

（1）α射线，很容易被薄层物质吸收。

（2）β射线，由高速的负电粒子组成，从所有方面看都很像真空管中的阴极射线。

（3）γ射线，在磁场中不受偏折，具有极强的贯穿力。

对于α射线的本质，斯特拉特认为，它可能是带正电的快速粒子，由于质量太大在磁场的偏折不易显示出来。卢瑟福也认为，判决性的实验是能否显示α射线在磁场中的偏折。

卢瑟福于1901年开始对α射线进行实验研究，他使电磁场尽可能的大，但直到1903年才获得成功。借助精心设计的装置，从α射线在磁场中的偏折可以判断α射线带正电；从电场与磁场的联合作用，卢瑟福初步测出其荷质比与氢离子同数量级，速度为光速的1/10。这样，卢瑟福初步断定α射线是一种带正电的粒子流。此后于1908年还证实了α射线是氦原子核。

二、质子的发现和人工核反应的实现

人们最初发现的最小的原子核就是将氢原子电离之后所剩下的核。氢原子核所带的正电荷，与电子所带的负电荷大小恰好相等，但质量比电子大得多。1914年，卢瑟福提出，氢核应该是正电荷的基本单元，他把氢原子核叫做“质子”。

卢瑟福是英籍新西兰物理学家，曾获得1908年诺贝尔化学奖。1871年8月30日，卢瑟福出生于新西兰纳尔逊城的一个英国移民后裔家庭。卢瑟福少年时期学习成绩一直优秀。1893年毕业于新西兰大学的坎特伯雷学院，1895年到英国卡文迪许实验室，成为J.J.汤姆孙的研究生和助手。1898年，在汤姆孙的推荐下，27岁的卢瑟福被聘为加拿大马克居耳大学的物理学教授。1907年卢瑟福回到英国，任曼彻斯特大学教授。1919年接替汤姆孙，担任了剑桥大学卡文迪什实验室主任。1925年至1930年，卢瑟福担任英国皇家学会会长。1931年被封为男爵。1937年10月19日，卢瑟福逝世于剑桥，终年66岁。

1895年，卢瑟福到剑桥后，正值X射线和放射性现象被发现，在汤姆孙的指导下，他开始从事这方面的研究，并取得了一系列重大成果，包括他发现的元素钍。1902年在加拿大期间，他与英国化学家索迪（Frederic Soddy，1877～1956）合作，在研究铀的放射性过程中，提出了原子自然蜕变的理论。这种理论开始使人们认识到，原子并不是不可分的。为了揭示原子的结构，1911年，卢瑟福根据α粒子散射实验，发现了原子核的存在，提出了原子结构的“卢瑟福模型”。1913年，卢瑟福的学生盖革与马斯顿用实验证实了卢瑟福模型。1920年，卢瑟福预言了中子的存在。

为了纪念卢瑟福的伟大贡献，以他的名字命名了放射性强度的单位：当一定量的放射性物质每秒有10^6个原子发生衰变时，则它的放射性强度规定为1卢瑟福。

1914年，卢瑟福和马斯顿一起观察α粒子在空气中的射程，他们注意到，α粒子在空气中的射程一般只有7厘米，但也观察到有的粒子射程达40多厘米。经反复的验证和思考，卢瑟福认为，这是空气中氢离子受到α粒子的撞击所致，因为α粒子的质量是氢离子质量的4倍，因此α粒子撞击氢离子，氢离子的速度要大许多。

在这个现象的启发下，从1917年开始，卢瑟福进行了α射线轰击氮原子核的实验。实验装置如图11-1所示，其中A是一个密封的黄铜罐，从活栓可以抽出或灌进气体。D是α射线源，放在可左右移动的支架上；B是刻度尺，以显示D的位置。S是显示

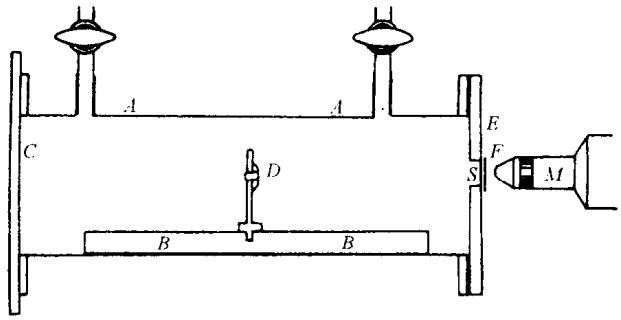


图 11-1　卢瑟福用 α 射线轰击氮核的实验装置

屏，利用显微镜 M 观察显示屏的粒子闪烁。当充入氮气后，卢瑟福发现，放射源距显示屏的距离超过 α 粒子射程很多时，仍有闪烁可见，射程的长度与氢离子的射程差不多；当充入氧气后，却没有长射程的现象发生。经过 3 年的反复实验研究，卢瑟福终于搞清楚，氮原子在 α 粒子的轰击下发生了核嬗变，即从氮核释放出了氢核（质子）。

1919 年，卢瑟福明确表达了 α 粒子轰击氮核产生氢核，并使氮转化为氧 17 的反应，即

$$^{14}N_7+{}^{4}He_2\rightarrow{}^{17}O_8+{}^{1}H_1$$

为了进一步了解被轰击出的粒子的性质，在实验装置里加进电场和磁场，并根据粒子在其中的偏转，测出了它的质量和电荷，从而确定了该粒子就是氢原子核（质子），此后，质子就逐渐被人们接受了。

三、探测器与加速器的发展

加速器的发展与核物理的研究密切相关。利用加速器加速各种粒子，可使科学家得到粒子的能量更高、种类更多，也更便于控制。探测器的制造还要早一些，在放射性研究的初期就获得了很大的发展。

1. 早期的探测器

（1）云室

在各种探测仪器中，云室是使用比较早的一种探测仪器。经过不断的改进和完善，在粒子探测中发挥了重要的作用。

这种柱子是由英国物理学家查尔斯·威尔逊（C. T. R. Wilson，1869～1959）发明的。

1894 年暑假期间，威尔逊志愿到本尼维斯山气象站参加观测活动。清晨，他站在高山之巅欣赏着周围的美景，特别是山顶很容易形成的一种奇特的雾景——云雾效应，

这使他对云雾的形成机制发生了浓厚的兴趣。他想能不能在实验室复现这种奇特的景观呢？

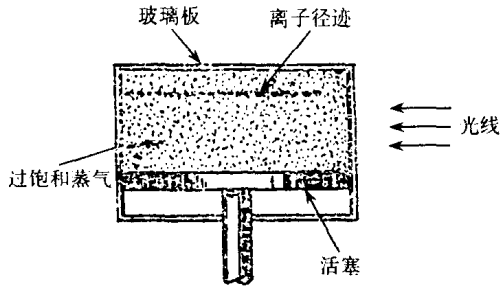


图 11-2　云室的结构

在实验室中，威尔逊使潮湿的空气在密闭的容器中膨胀，由于与外界隔绝，膨胀时空气的温度降低了，因此部分湿气（小水滴）就凝聚成雾或云。但若充入容器的是无尘埃的空气，云就不能形成了。这样，威尔逊就利用无尘的潮湿空气，并使它处于过饱和的临界状态，当有离子进入时，就会在离子周围凝聚成小水滴；而普通的中性分子则不能具有这种凝聚的作用。

又经过了 10 年的实验与改进，他终于研制成功一种新的装置。高速行进的带电粒子或高能辐射一旦进入容器，借助这种装置就可以观测到它们的踪迹。这是由于这种高速行进的粒子所产生的离子不会造成大片的云雾，而只形成一串小水滴，这串小水滴恰好显示出粒子运动的轨迹。由于这是利用小水滴（云雾）显示粒子的径迹的，所以就叫它“云雾室”或“云室”。又由于这是威尔逊发明的，所以它也被称为“威尔逊云室”（图 11-2）。

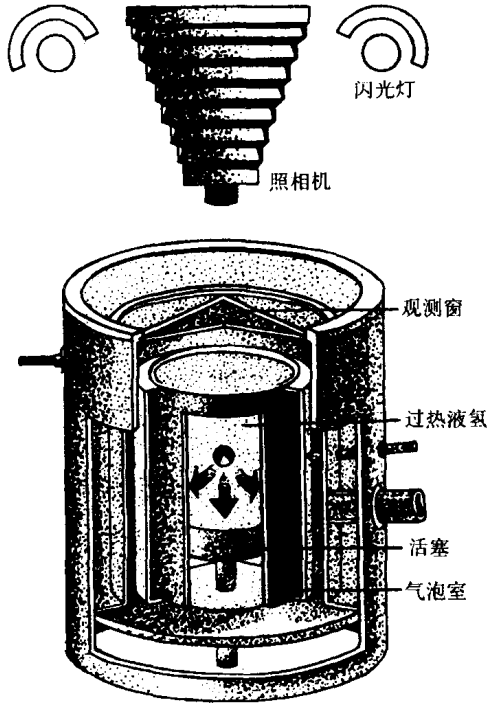


图 11-3　气泡室的结构

这样，在原子核物理的研究中，威尔逊为人们发明了一种有效的工具，他也因此获得了 1927 年度的诺贝尔物理奖。后来，英国的布莱开特（Lord P. M. Blackett，1897～1974）对云室进行改进，将盖革计数器与云室结合起来，研制成一种新型云室，大大提高了云室的灵敏度。

（2）气泡室

云室在早期核物理研究中发挥了重要的作用，但云室也有缺陷。由于云室中的气态物质非常稀疏，带电粒子进入云室只能形成少量离子。如果进入云室的粒子是一些寿命很短的粒子，它就很难形成径迹，或因为径迹极短而被忽略掉。特别是在与大型加速器配合使用时，云室的缺陷就使它的适用范围受到了极大的限制，因此要对探测器进行一次彻底的革新。完成这次革新的是美国物理学家唐纳德·格拉泽（Donald A. Glaser，

1926～　)。

格拉泽于 1949 年在加州理工学院获得博士学位后，就去密执安大学任教。格拉泽很注重实验研究，在改进实验技术上下了很大的功夫，他先后发明了一些新型的云室和平行板火花计数器。这些研究也为后来发明气泡室创造了条件。与云室不一样，他设想的新型装置是，让过热的液体在粒子周围汽化，在大量液体中形成汽滴。也就是说，在粒子经过的地方，产生大量气泡，从而显示粒子的径迹。

1952 年，格拉泽制成第一个气泡室（也叫“气室”），它的直径仅有几英寸，室内充有乙醚（后来又改用液态氢）。气泡室的构造比云室要复杂得多，造价也高得多。它们的工作原理非常相似，只是云室内充满的是气体和少量的水蒸气，而气泡室内采用的是液体。当气泡室的液体处于过热状态，由于这种状态是不稳定的，一旦遇到扰动，液体会立即沸腾起来。假如有粒子闯入，就会在粒子行进的路径上产生一串依稀可见的小气泡，气泡室也因此而得名（图 11-3）。

2. 加速器

从 20 世纪 30 年代开始，由于加速器技术的产生和发展，使研究人员能得到能量不断增加的粒子，为核物理学的发展提供了一种有效的手段。

1919 年，卢瑟福进行首次人工核反应。在这个反应中，卢瑟福使一种元素（$^{14}N_7$）变成了另一种元素（$^{17}O_8$）。20 世纪 20 年代，美国和法国的一些研究人员尝试研制可以加速带电粒子的装置。1931 年，美国物理学家范德格拉夫（R. J. Van de Graaff，1901～1967)研制成功高压装置，它可以演示“人工闪电”，更重要的是可以加速带电粒子，是核物理和高能粒子研究的重要装置。

1932 年，在卢瑟福的指导下，瓦尔顿（E. T. S. Walton，1903～1995）和考克饶夫（S. J. D. Cockcroft，1897～1967）设计了一架加速质子的装置。他们用这个装置加速的高速质子轰击金属锂，锂俘获了能量为 30 万电子伏特的质子形成一个原子量为 8 的不稳定原子铍，很快就分裂为原子量为 4 的氦原子（动能为 860 万电子伏特），即

$$^{7}Li_3+{}^{1}H_1\rightarrow\ (^{8}Be_4)\ \rightarrow{}^{4}He_2+{}^{4}He_2$$

反应后多出的 1690 万电子伏特能量来源于原子核中的能量。

大约与此同时，美国的劳伦斯（E. Lawrence，1901～1958）与他的学生一起研制了最初的回旋加速器模型，这种加速器是圆形加速器中的第一种。最初的回旋加速器直径只有十余厘米，但电压可达上千伏特，甚至几万伏特。1932 年，劳伦斯的新装置可以得到能量达 125 万电子伏特的质子，从而轻而易举地实现了瓦尔顿等的锂转变实验，显示出了这个“微型”装置（直径不到 30 厘米）重要的应用前景。

此后，劳伦斯还用一台直径 27 英寸（68.6 厘米）的 D 型电极加速器加速氘核。在强电场作用下，氘核中的中子和质子分解开，而中子的穿透性极好。因此可以通过加速氘核进行人工核反应。1934 年，约里奥-居里夫妇发现人工放射性后，劳伦斯也用他

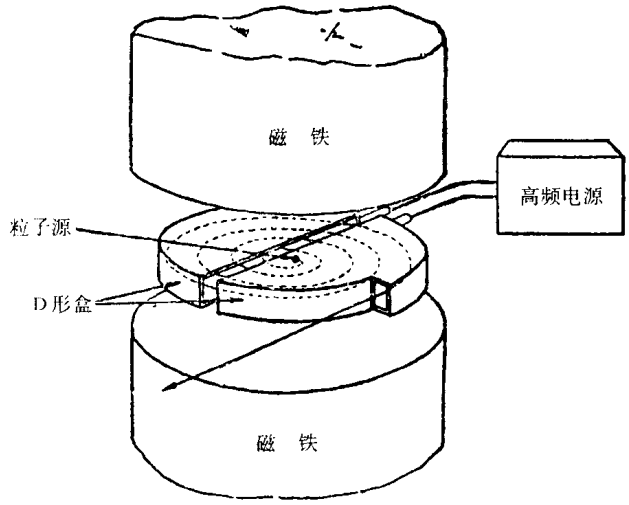


图 11-4　回旋加速器的结构

的回旋加速器获得了各种放射性同位素。

1936 年，劳伦斯制造了更大的加速器（直径近 100 厘米），使粒子能量达 6 兆电子伏特，可以测量中子磁矩，并且制取成功第一个人造元素——锝（Tc）。1939 年，劳伦斯建成新型加速器（直径超过 150 厘米）。借助它加速粒子，以轰击原子，引起了许多核衰变。这台新型加速器的能量已超过天然放射性元素辐射的能量，现在的加速器与这台加速器没有多大区别，只是能量要大得多，个头儿也大得多，直径已达几十米了。利用新型加速器，麦克米伦（E. M. McMillan，1907～1991）和西博格（G. T. Seaborg，1912～1999）发现了一系列超铀元素。

由于劳伦斯在加速器技术的研究上做出了重要的贡献，他获得了 1939 年度诺贝尔物理学奖，麦克米伦和西博格也因发现超铀元素获得了 1951 年诺贝尔化学奖。

在第二次世界大战后，劳伦斯和麦克米伦又设计出能量更高的加速器——电子同步加速器（直径 467 厘米）和质子同步加速器（能量达 6.4 吉电子伏特），这些加速器大大“加速”了粒子物理学的发展。

四、中子和人工放射性的发现

中子的发现对原子核的认识具有重要的意义，而人工放射性的发现为获得放射性物质开辟了有效的途径，在放射化学和核能技术上有重要的作用。

1. 中子的发现

α 粒子的散射实验，是原子有核模型的实验依据。几年后原子核中包含氢原子核

(即质子)的观点已为物理学界所接受，当时人们认为原子核为带负电的电子和带正电的质子所构成，这就是质子-电子核模型。如原子序数为Z的原子，其原子量为A，核内应有A个质子和(Z－A)个电子。但是，人们很快就发现，这个模型存在着电子在核中的存在状态问题，并且与量子力学中多体统计与自旋理论相矛盾。进而人们猜测，原子核内可能存在其他的粒子。

卢瑟福在实现了人工核嬗变后，就敏锐地意识到原子核必定有其内部结构。他认为，核内不仅有质子，还应有电子。为了圆满解释电子为什么能稳定地存在于核内，他提出，可以把质子和电子作为一个复合体，看成是单独的一个中性粒子。1920年6月，卢瑟福预言：原子核内可能存在着质量与质子质量相同的中性粒子。1921年，美国化学家哈金斯将它命名为“中子”。

1930年，德国物理学家博特(W. W. G. F. Bothe，1891～1957)和他的合作者贝克尔(H. Becker)用天然放射性元素钋(Po)放出的α粒子去轰击铍(Be)，发现从铍发射出一种穿透力极强的射线。经过对射线进行测试后，发现这种射线在电场和磁场中都不会发生偏转。在穿透两厘米厚的铅板之后，强度只减弱30%。根据当时的知识水平，由被轰击物质产生的各种形式的辐射中，惟一能够贯穿厚铅层的是γ射线。所以，他们认为得到的是高能量的γ射线。

1932年1月，法国物理学家约里奥-居里夫妇(Frédéric Joliot-Curie，1900～1958；Irene Joliot-Curie，1897～1956)重复了博特和贝克尔的实验，对这种射线进行了研究。他们在铍板和测量仪器之间放置各种物质。结果发现，把石蜡板插入后，仪器所记录到的效应要比插入前强得多；而且记录到的是质子。没有石蜡板时，是不带电的射线。这表明石蜡在这种“铍射线”照射下，会发射出大量质子。当时，约里奥-居里夫妇把这种现象当成是一种强γ射线造成的“康普顿效应”。他们报道说，发现了γ射线能够产生一种新的作用。这使他们错过了发现中子的机会。

当约里奥-居里夫妇的实验结果被报道出来后，立即引起了卡文迪什实验室的查德威克的注意。

查德威克(James Chadwick，1891～1974)是英国物理学家，1935年诺贝尔物理学奖金的获得者。他生于曼彻斯特，曾就读于曼彻斯特大学、柏林大学和剑桥大学，获得剑桥大学的哲学博士学位。1914年，查德威克在柏林大学学习时，第一次得到了放射性物质所产生的β粒子的能谱，并开始致力于放射性问题的研究。1919年，他与卢瑟福合作，用氮第一次测到了核蜕变效应。1920年，他通过对α粒子散射所进行的绝对测量，第一次测得了原子核的电荷。第二次世界大战期间，查德威克还参加过美国的原子弹实验研究和制造工作，他是奥本海默领导的洛斯·阿拉莫斯实验室的重要成员之一。

对于约里奥-居里夫妇的实验，他认为不能用“康普顿效应”解释这个现象。在铍辐射的研究中，他用这种射线先后辐照轻重不同的几种元素，结果发现射线的性质与

通常的γ射线有所不同。当这种射线轰击氢原子和氮原子时，打出了一些氢核和氮核。由此，他断定这种射线不可能是γ射线。因为通常的γ射线照射到物质上时，物质密度越大，对γ射线吸收得越厉害，而这种射线性质刚好相反，密度越小的物质越容易吸收它。当查德威克用这种射线轰击氢原子核时，发现它被反弹回来，说明这种射线是具有一定质量的中性粒子流。通过对反冲核的动量测定的结果，再利用动量守恒定律进行估算，确定出这种射线中性粒子的质量几乎与质子的相同。查德威克这时才意识到原来博特和贝克尔最先观察到的这种辐射应当就是卢瑟福所提出的质子-电子复合体。他沿用了哈金斯的“中子”这个名称作为对这种粒子的正式命名，并在1932年的《自然》杂志上发表了《中子可能存在》的论文。

中子是人们发现的一种重要的基本粒子，是原子核的组成部分。中子的发现澄清了原子核的基本结构，为核模型理论奠定了基础，加速了原子核物理的长足发展。中子的发现还标志着原子核研究开始了新的时代。

2. 人工放射性的发现

1934年1月，约里奥-居里夫妇用α粒子轰击铝，发现当放射源撤走后，还可测到放射性；化学分析表明，他们得到了自然界并不存在的放射性同位素磷-30，即

$$^{27}Al_{13}+{}^{4}He_{2}\rightarrow{}^{30}P_{15}+{}^{1}n_{0}$$

磷-30经过β衰变放出正电子变成稳定元素硅

$$^{30}P_{15}\rightarrow{}^{30}Si_{14}+{}^{0}e_{1}$$

后来，他们又用α粒子轰击硼和镁，得到放射性同位素氮和硅。这样，约里奥-居里夫妇因人工放射性的发现而获得1935年诺贝尔化学奖。他们的工作为核物理的研究开辟了新的道路。

约里奥-居里夫妇在原子核物理学的研究中做出了贡献，也为人类利用原子能开辟了广阔的道路。1932年，约里奥-居里夫妇合作，用放射性钋所产生的α粒子轰击铍，发现了前所未有的穿透性很强的不带电粒子。这是最早关于中子的实验，导致了查德威克发现中子（图11-5）。

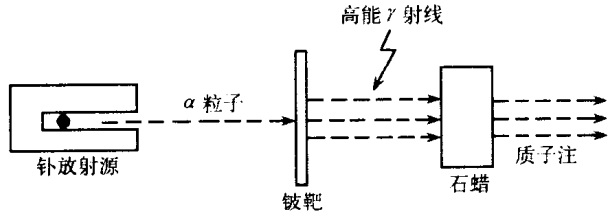


图11-5　约里奥-居里夫妇发现质子流的实验

约里奥-居里夫妇的新发现激励许多人寻找更多的人工放射性同位素。然而，人们很快就发现，虽然用α粒子轰击轻元素能够得到放射性同位素，但是用α粒子轰击重元

素却未能奏效，费米对这个问题进行了思考。当时其他人只注意如何提高α粒子的速度和强度，而费米却认为，重元素原子核所带的正电荷较大，与α粒子作用时的库仑斥力很大，已很难使α粒子产生轰击效果，所以他选用中子做轰击重元素的“炮弹”。他认为：“与α粒子相比，中子有明显的缺点：可供利用的中子源所发射的中子数比较少。实际上，中子是作为核反应的产物而放出的，中子的产额很少有超过10^{-4}的。然而，下面这个事实弥补了它的缺点：中子不带电，它们不需要克服由核周围的库仑场形成的势垒，所以能够到达所有的原子核。此外，中子实际上与电子没有相互作用，所以它们的射程很长，核碰撞的机会要比α粒子或质子轰击的大得多。”

1934 年上半年，费米小组按元素周期表的顺序，从氢开始，用中子轰击，从第 9 个元素——氟开始得到放射性同位素。只花了几个月的时间，费米小组就得到了 37 种放射性同位素，他们开辟了获取放射性同位素更加有效的途径。

五、慢中子效应和核裂变的发现

1. 慢中子效应的发现

1934 年 10 月，费米小组在实验中偶然发现，在入射粒子束与金属（银）之间放置其他物质会影响人工放射性物质的放射强度。费米建议用石蜡试一试，结果所激发出的放射强度增加了 100 倍。费米对此进行了分析，他认为，由于石蜡中含有大量的氢，中子进入石蜡时与氢原子核发生碰撞而失去了一部分能量，它的速度减慢而变成慢中子。慢中子经过氢原子核的时间变长了，因此增加了中子被俘获的机会，这种中子也进而具有更强的激发核反应的能力。费米的这个发现非常重要，因为使用慢中子可以大大提高制造人工放射性物质的效率，使人工放射性物质完全可以替代价格昂贵的天然放射性物质，同时也为核能的开发提供了必要的手段。因此，人们将慢中子及其效应的发现看做“核时代的实际起点”。

费米是美籍意大利物理学家。1901 年 9 月生于罗马的一个铁路工人家庭。费米的童年时期和少年时期是在罗马度过的。1912 年考入比萨大学高等师范学院，1922 年以研究 X 射线的论文获得博士学位。此后不久，他赴德国格丁根大学，成为玻恩的学生，1924 年回到意大利任教。由于他的卓越才能，很快成为新成立的罗马大学物理研究所的核心人物。他的妻子是犹太人，为了躲避法西斯的迫害，1938 年费米借领诺贝尔奖金之机，携家移居美国，在哥伦比亚大学任教。1942 年，他到新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯参加“曼哈顿工程”的研究工作。1946 年，费米回到芝加哥大学任该校物理研究所教授。1954 年 1 月由于胃癌逝世于芝加哥。

费米是一位成就卓著的现代理论物理学家和实验物理学家。他是意大利科学院院士，并先后获得许多大学的名誉学位。1950 年获美政府的 25 000 美元巨额奖，这后来

成了费米奖章的基金。费米的贡献是多方面的，他根据泡利不相容原理（与狄拉克各自独立地）导出了费米子的量子统计法——费米-狄拉克统计法。1934 年他建立了 β 衰变定量理论，成为现代基本粒子相互作用理论的创始人。费米对中子引起的核反应进行大量研究，提出了中子扩散理论。他提出了慢中子效应，奠定了原子核反应堆的实验基础。费米和他的合作者在用中子轰击铀时，错误地认为得到了“超铀元素”。1938 年，德国科学家哈恩（Oto Hahn，1879～1968）和斯特拉斯曼（F. Strassman，1902～　）才纠正了费米小组结论的错误，并发现了核裂变现象。

1942 年费米被委派负责生产可控的自持链式核反应的工作，设计并领导建成了世界上第一座核反应堆，同年 12 月实现第一次自持链式核反应。战后，他的主要精力转到教学方面，领导建立了芝加哥学派，培养了大批优秀物理学家。费米的成就是理论和实验结合的体现，他善于运用数学知识来解决实际问题，并善于观察实验中的每一微小变化，这些都导致了他在理论和实验上的成功。为了纪念他所做出的突出贡献，原子物理中以他的名字命名了长度单位“费米”；在固体物理中有“费米面”、“费米能级”；原子序数第 100 位的元素被命名为“镄”，美国原子能委员会设立了费米奖章。

2. 核裂变的发现

在超铀元素的研究中，德国和法国的科学家都按照已知的核反应规律（元素受中子轰击生产原子序数增加 1 的新元素）推断，“确认”了第 93 号元素和第 94 号元素的发现。但这时化学家诺达克夫人（T. Noddack，1896～　）却提出了不同的看法。他们从 20 年代就在寻找天然的超铀元素，为此积累了丰富的经验。诺达克夫人认为，“可以想像，当重核被中子轰击时，该核可能被分裂成几大块，这些裂片无疑将是已知元素的同位素，而不是被辐照元素的近邻”。遗憾的是，费米并没有认真对待诺达克夫人的批评，他认为，能量不大的中子难以击破如此坚固的原子核。当时的放射学权威哈恩认为诺达克夫人的观点“纯粹是谬论”。这种看法使费米更相信自己的看法是对的，因此也就丧失了一次重大发现的机会。而诺达克夫人也只是提出了一种猜测，并未亲自动手去做实验。

1938 年，伊伦-居里和南斯拉夫的沙维奇（P. Savitch）进行有关超铀元素的分离和分析的实验。他们用中子轰击铀，产生了半衰期为 3.5 小时的放射性元素，其性质接近于镧（后来证实是镧-141），这同铀和超铀元素差别很大，但他们的工作未再进行下去，丧失了一次重大发现的机会。

大约就在同时，哈恩与奥地利物理学家迈特纳（L. Meitner，1878～1968）也在进行超铀元素的研究。他们从研究中发现，铀原子也许没有得到粒子，而是失去了粒子。他们假设，铀原子失去一对粒子，这样就会产生原子序数为 88 的镭。如何检验镭的存在呢？有一种方法是用钡（原子序数为 56）检验。镭与钡的化学性质很相似，镭也会发生类似于钡的化学变化。哈恩和迈特纳把钡加入铀中，而后将钡取出，同时也将镭

一同取出。这就意味着钡镭混合物具有放射性。哈恩与迈特纳确信，这样的想法是正确的，即铀中可以产生镭。然而当他们实际进行实验时却无法从钡中将镭分离出来。

这时，希特勒占领了奥地利。犹太人迈特纳本来就感觉，手持奥地利的护照已不是十分安全，所以迈特纳离开了德国，来到了瑞典。

就在哈恩进展放慢时，伊伦-居里的文章发表了。哈恩的助手斯特拉斯曼将此告诉了哈恩，消息“如同晴天霹雳”。他们马上着手研究，并将伊伦的实验重复了多次。经过精确的分析，哈恩确认，从铀中产生了一种新元素——钡。他将分析结果发表之后，又给迈特纳写了信，通报实验的情况。迈特纳和她的外甥弗里施（O. R. Frisch，1904～1979)认真讨论了哈恩的实验。按以往的实验的情况看，从原子核分裂出来的最大粒子是α粒子，而从铀分裂出18个α粒子后才能形成钡。这种可能性并不大。为此，迈特纳设想，钡是一次形成的，即铀一分为二，钡只是其中的一个产物。

迈特纳与弗里施将他们的研究结果发表后，弗里施又将结果同玻尔进行讨论。这时，玻尔将赴美参加一个学术会议，在会上，玻尔通报了哈恩和迈特纳的研究工作。当时大部分科学家都重复了哈恩的实验。迈特纳和弗里施还最先利用液滴模型解释核裂变反应，1939年，玻尔和惠勒（J. A. Hheeler，1911～　）以及苏联物理学家弗伦克尔各自独立地应用液滴模型提出了一种核裂变机制。

根据原子核的液滴模型，可以得到原子核结合能的半经验公式。依据这个公式计算某些原子核的结合能，与实验结果符合得很好。液滴模型指出，处于基态的原子核是球状的；在激发态的情况下，原子核要作振荡运动，液滴会发生形变。当形变发展到一定的程度，就会使核分裂为两个较大的液滴。由于库仑斥力的作用，两个核会分开。这就是用液滴模型解释的核裂变现象。

虽然迈特纳提出了核裂变的概念，用以描述铀核的裂变，但是迈特纳忽视了分裂时产生的中子。

费米听到铀核裂变的消息时，感到大吃一惊，这是他所未曾料到的；又因为由于他的错误认识而延缓了核裂变的发现，感到很大遗憾。然而在遗憾之余，费米认真思考了裂变时能否产生更多的中子的问题。这是关系到自持的链式反应的可能性问题。同时还有许多科学家也在思考这个问题，并从实验上检验链式反应的可能性。在这些人中，约里奥-居里夫妇、费米和匈牙利物理学家西拉德都很快就证实了链式反应，并且发现链式反应的速度是极快的，两次相隔的时间仅为2×10^{-14}秒。这就表明用中子不仅可以使铀核发生核裂变，而且裂变的结果会产生中子，进而诱发铀的链式反应，并释放出巨大的能量，这样，中子就成为人类打开核能大门的钥匙。

第二节　核理论的研究

随着核子的发现和研究的深入，人们不仅在核能开发上取得了进步，而且还提出

了一些关于核结构的模型以及与此相关的理论。

查德威克发现中子之后，苏联物理学家伊凡宁柯（1904～　）最先提出了原子核结构的中子-质子假说。利用伊凡宁柯的假说可以很好地解释原来质子-电子假说未能解释的问题，如“氮的灾难”。所谓“氮的灾难”是，按照质子-电子假说，氮的原子核由 14 个质子和 7 个电子构成。由于质子和电子都是费米子，其自旋量子数都为 1/2，所以氮核的自旋量子数为半整数。但实验结果表明，原子核的自旋遵从一个简单的规律，即原子核的自旋量子数是整数、还是半整数与核的质量数的奇偶性有关。由此可知，氮核的自旋量子数应为整数。

伊凡宁柯的新假说很自然地解决了“氮的灾难”。由于氮核由 7 个质子和 7 个中子构成，它们的质量数都为 1，核的总质量数为 14；每个核子的自旋量子数均为 1/2，因此核的自旋量子数为整数。后来，德国物理学家海森伯还发展了质子-中子假说，正确地预言了核的自旋与统计法。

一、核模型的建立

在质子-中子假说提出之后，随着实验的不断发展，人们对于核的微观结构有了更深的认识。物理学家在现有的理论基础上，推测核的一些性质，提出可以描述原子核结构的模型，并依据这些模型建立起相应的理论。当实验有所发展之后，往往模型和理论也相应的有所发展。

人类在认识原子核结构的历程中所提出的模型有以下几种：

1. 气体模型

气体模型是比较早提出的一种模型，它是费米于 1932 年提出的。这个模型把原子核中的中子、质子简单地看做是一群类似气体分子的集合，这些核子共同处在一个核半径 $R=r_0A^{1/3}$的范围内（A 为核子数），彼此没有作用，可以相对自由地独立运动。利用这个模型计算原子核中每一个核子的动能，其结果与实验相符，并且对于中等的或较大的原子核，每一个核子的结合能都近似为 8 兆电子伏特。这样一个估算结果，也与实验结论相接近。但这个模型过于简单，能说明的核性质不多。这个模型最致命的弱点是没有充分考虑核子间核力的短程性这一最重要的特点。

2. 液滴模型

1906 年，年轻的大学生玻尔参加了丹麦皇家科学院的有奖征文活动。玻尔写出了《用水注振动法测定水的表面张力》的文章，1909 年，玻尔获得了金质奖章。这篇文章显示出玻尔的研究能力。有趣的是，这篇论文对后来原子核的研究也产生了积极的影响。

20 世纪 30 年代，核物理作为一个研究热点受到人们的关注。玻尔也参加了核结构的研究，1935 年玻尔和弗伦克尔提出了液滴模型。他们认为，原子核每个核子的平均结合能几乎是一常数，总结合能正比于核子数，说明核力是饱和的；原子核的体积也正比于核子数，核物质的密度近似于一个常数，说明原子核是不可压缩的。1936 年，玻尔借助这个模型计算了核反应的截面，并说明了一些核现象。1939 年，玻尔和惠勒在解释核裂变时，使用的是液滴模型。他们主要抓住了核力的短程饱和性质，把原子核看成是一个密度很大（10^{14}克/立方厘米）的核“液滴”，把每一个核子看成相当核物质中的“分子”，每一个核子可以较自由地在核物质中运动。这个模型在一定程度上能够阐明原子核的静态性质和动力学规律，如质量规律、表面振动、变形核的转动以及核裂变等。这一模型在解释核裂变、原子核的稳定性以及推算原子核的半经验质量公式方面都比较成功，特别是在解释有关核的集体性质的实验事实方面是较成功的。但原子核所占据的空间极小，内部的电荷密度与质量密度极大，核子间的核力极强，而每个原子核具有的核子数又是有限的，最多也只有 200 多个，所以用液滴模型来描述原子核内部个别核子的行为、状态比较困难，对核内部结构的细节如核的自旋、磁矩等也难以作出有效的说明。但尽管如此，液滴模型至今在许多核现象的解释中，尤其是核裂变的解释中仍起很大作用。通过与液体类比，最初提出的液滴模型只是将原子核视为一个带电荷的理想液滴，根据液滴的运动规律对原子核进行动力学描述。以后又逐步增加了一些新的自由度，如将质子、中子分别看成两类流体，甚至将自旋取向不同也看成不同流体，并引入可压缩性、粘滞性等性质，使液滴模型更加合理。

3. 壳层模型

与液滴模型一样，壳层模型也是一个较为流行的原子核模型。

20 世纪 30 年代，人们从实验上发现，原子核的许多性质随着中子（或者质子）数目的增加而呈现出周期性的变化。例如，原子核的稳定性、各种原子核在地壳中所占的丰度、原子核低激发态的分布以及原子核电四极矩的大小等。当中子数或质子数为 2（He）、8（O）、20（Ca）时的原子核非常稳定。后来又发现质子和中子数为 28、50、82、126 的核也是比较稳定的，结合能特别大。美籍匈牙利物理学家维格纳（E. P. Wigner，1902～1995）建议将这些数称做“幻数”（有时也称 28 和 40 为“半幻数”），通常被称做“壳层数”。

这些现象显示了原子核内部核子数的填充可以和原子内的核外电子的填充相类比，存在着某种壳层结构。40 年代，迈耶夫人和詹森对此进行了深入的研究，并取得了重要的成果。

迈耶夫人（Maria Goeppert-Mayer，1906～1972），美籍德国物理学家。迈耶夫人原名 Maria Goeppert。4 岁时，全家迁到德国的哥廷根。由于环境的影响和先天的聪慧，18 岁时考入哥廷根大学数学系。上学时参加了玻恩主办的物理讨论班，因此在数学和

量子力学上打下了坚实的基础。1930 年获得理论物理博士。同年嫁给约瑟夫·迈耶。20 世纪 30 年代，迈耶夫人与玻恩在双 β 衰变方面做出了重要的工作；后来在费米的建议下，她研究了超铀元素的价壳结构。40 年代，迈耶夫人在尤里（H. C. Urey，1893～1981）的实验室进行铀同位素分离工作。1946 年，迈耶夫妇俩到了芝加哥大学。当时，迈耶担任该校的化学教授和粒子研究所（现称“费米研究所”）的教授，迈耶夫人被任命阿贡国立实验室理论部的高级教授。在研究中，她第一次用电子计算机解决了液态金属增殖堆的临界问题。1946～1947 年间，在芝加哥大学进行核物理研究的迈耶夫人在特勒（E. Teller，1908～　）的指导下，进行有关元素起源的研究。她注意到高丰度元素与其原子核中的中子数目或质子数目有某种联系。由于迈耶夫人可以方便地利用芝加哥大学和阿贡核实验基地的条件，可以亲自进行测量，并且除了丰度，还测量核的结合能、自旋和磁矩。她发现，这些幻数与核的结构有关，并且萌发了壳层的想法。

当时，有人力图仿照玻尔和泡利对元素周期律的解释来解释这些幻数。但是，由于电子处在一个有心力场，而核子并无这样的条件；把幻数与壳结构的量子力学相联系也发生了困难。所以，这种想法未能奏效。

尽管如此，迈耶夫人未放弃壳结构的想法，她的决心受到费米的鼓励和支持，她的丈夫也对她的研究给予了帮助。在同费米讨论问题时，费米提出了一个非常重要的问题：“是否有自旋-轨道耦合的迹象？”这个问题是研究幻数的人所未考虑过的。由于迈耶夫人具有很好的数学和量子力学基础，特别是当时物理学家尚不熟悉的转动群理论，所以她很快地得到了考虑到自旋-轨道耦合作用后的壳模型。

大约就在同时，德国海德堡大学教授詹森（J. H. D. Jensen，1907～1973）也独自地提出了自旋-轨道耦合核壳模型。1948 年，他们的论文同时发表了。1950 年，迈耶夫人与詹森合作，进一步发展和完善了壳层模型，并一起合著了《核壳层结构的基本理论》。

由于壳层结构的研究工作，使迈耶夫人获得极高的声誉，并且同詹森与维格纳分享了 1963 年的诺贝尔物理奖。这使她成为世界上第二个获得诺贝尔物理奖的女科学家。

核壳层模型有时也称做独立粒子模型。利用壳层模型，不仅解释了原子核的幻数，而且对中子数和质子数都为偶数的原子核与核子数为奇数的原子核来说，由壳层模型得到了这些核的基态和宇称与实验相符的结果。壳层结构能成功地解释原子核的许多基本性质，如磁矩、宇称以及许多原子核低激发态能级等现象。

壳层结构是在粒子独立运动模型的基础上，加自旋和轨道角动量的强烈耦合，以及其他假设而成的。虽然它能解释许多现象，但它毕竟是唯象的模型。由于它把核子看成是一群互不相干的、独立运动的粒子，每个粒子只是在一个平均场中运动，这样势必对多个核子有可能作集体性运动不能给出恰当的描述，对原子核集体运动所造成

的各种运动形态和由此而呈现的各种集体性也不能给予很好的说明。

4. 集体模型

集体模型也叫综合模型。1953 年，A. 玻尔（A. Bohr，1922～ ）和莫特森（B. R. Mottelson，1926～ ）提出了这个模型。在此之前，瑞恩沃特（L. J. Rainwater，1917～1986）也于 1950 年提出了这个模型。

壳层结构着重于对单个核子运动的研究，而液滴模型则把原子核所有运动都归结为整个集体的运动。既考虑到核内单个粒子的独立运动形态，又考虑到整个原子核或少数几个核子集体运动的形态，这就是集体模型的特点。这一理论用集体运动的观点，对核子在一个变动着的势场中运动时可能出现的各种情况，都各自建立一套完整的数学表示式。它紧紧抓住原子核可能呈现的能量状态和原子核状态之间的密切关系，而在这其中单个核子的运动与多个核子或整个原子核的集体运动如何达到恰当的平衡，是一个中心的问题。大量的理论研究和计算表明，在低激发能态时，原子核既有集体运动（表面振动），同时存在着单粒子运动。集体模型是统一描写原子核单粒子运动和集体运动的唯象理论，是玻尔和莫特森推广核壳层模型而提出的核结构模型。其中直接引用原子核的形变和方位作为描写集体运动的动力学变量，单粒子运动的势场则同时依赖于单粒子变量和集体变量。由于综合模型考虑了原子核内更多的运动状态，所以在解释原子核有较大的电四极矩和大的磁矩以及原子核的转动惯量等方面，与实验符合得较好，而且在很大范围内，原子核的低能激发谱也与模型预言的一系列能谱相一致。

此后，人们进一步了解到原子核内部还可能存在核子倾向于成对结合状态。另外还发现，原子核在很高角动量状态时出现一系列新的运动规律，其中有不少至今在理论和实验上都远没有给出很好的解释。因此，探索原子核的结构及其内部运动规律仍然是人类未来向知识的深度进军的一个重要目标。

二、β 衰变研究与中微子的发现

1. β 衰变理论的建立

从物理学基本理论可以知道，当一个粒子衰变为两个粒子时，动量和动能守恒，末态粒子的能量应为确定值。而 1914 年，查德威克在实验中发现 β 衰变中放出的电子的能谱为连续谱，这意味着电子可能具有各种不同的能量。这是什么原因呢？

对查德威克发现的现象，迈特纳认为：原子发射的电子能量都具有观察到的最大值，最终观察到的是电子经过别的过程损失一定能量后的次级电子。艾利斯（C. D. Ellis）和伍斯特（W. A. Wooster）设计了一个实验，用一个能量器把所有产生

的粒子收集起来，即使初级电子的能量被次级过程重新分配，也能从收集到的总能量算出每次β衰变放出的平均能量，它应当等于观察到的电子能谱极大值。可是，1927年他们的实验结果表明，能量器得到的只是最后射出的电子能量，其平均值与连续谱相符，而看不到次级发射的其他能量。由此可见并没有什么次级过程起作用的迹象。

面对这种困惑形势，玻尔对能量守恒理论提出质疑。玻尔的主张遭到激烈的反对，狄拉克表示："我宁可不惜任何代价来保持能量的严格守恒。"泡利也不同意玻尔的观点，1930年。他提出：β衰变中，可能存在一种质量极小、电中性的粒子带走了电子一部分能量。泡利的这一建议是很大胆的，因为这样的粒子是很难直接探测出来的，但这一假设最终使人们摆脱了有关核结构理论及β衰变所遇到的困境。

1933年10月的索尔维会议，对于中微子概念的发展具有重大意义。泡利在会上再次介绍了他对这个新粒子的看法。尽管海森伯还持有怀疑态度，费米却对它做了肯定，并且已经认识到它与中子的区别。那届索尔维会议后仅两个月，费米即在核的质子-中子模型的基础上，发表了有关β衰变的理论。他用相对论量子力学描述费米子，又利用狄拉克辐射理论的产生与湮灭算符及遵从二次量子化的方法导出了寿命公式和β衰变的连续能谱公式，成功地完成了他的β衰变理论。费米的β衰变理论，不仅圆满地解释了整个β衰变过程，澄清了有关β衰变的疑难，同时也确立了有关核结构的理论。按照费米的理论，在β衰变里，中微子总是和电子一起放出来，它们不都是原子核中原有的成分。基本的β衰变可以写成：

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

其中的p是质子，$\bar{\nu}_e$是反中微子。

1934年，约里奥-居里夫妇用α射线照射^{27}Al，结果除了发现当时有中子产生外，移去射线源后，靶物质还继续发出正β射线，从而第一次获得了人工放射性。方程为：

$$^{27}Al + ^{4}He \rightarrow ^{30}P + ^{1}n$$

$$^{30}P \rightarrow ^{30}Si + e^{+} + \nu_e$$

同年，维克（G.C.Wick）指出，在费米理论的相互作用里，允许原子核里发生如下过程：

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu_e$$

他还预言，可能会有轨道电子的俘获过程，1938年这个过程被阿尔瓦雷茨（L.W.Alvarez，1911～1988）观察到了。这些发现进一证实了费米β衰变理论的正确性，同时能量守恒定律又一次获得确认。

2. 中微子的发现

中微子只参加弱相互作用，且穿透能力极强，几乎可以不受任何阻碍地穿过地球，所以中微子的探测是十分困难的。1941年，中国物理学家王淦昌首先提出利用测量κ-俘获原子的反冲、确定中微子的间接方法。他指出："当一个β^{+}放射性原子不是放射一

个正电子，而是俘获一个 K 层电子时，反应后的原子的反冲能量和动量仅仅取决于所放射的中微子，原子核外电子的效应可以忽略不计。因此，只要测量反应后原子的反冲能量和动量，就很容易求得放射出的中微子的质量和能量。而且由于没有连续的β射线被放射出来，这种反冲效应对所有的原子都是相同的。”1942 年，美国物理学家艾伦(J. S. Allen)按照王淦昌的方案进行了测量，取得了肯定的结果，但并未完全成功。1952 年，罗德拜克（G. W. Rodeback）和艾伦又重新进行了 K 俘获实验，测出了原子的反冲能。这一年戴维斯（R. Davis）成功地重复了艾伦 1942 的实验，这样，确定中微子存在的间接检验得到了实验上的支持。

在核反应中，中微子的发射数量级极大，它们是在核裂变中子产物的β衰变中产生出来的。通过对核裂变产物的探测，有可能确证中微子的存在。1956 年，中微子终于被洛斯阿拉莫斯实验室的美国物理学家柯恩（C. Cowan，1919～　）与莱因斯(F. Reines，1918～　）首先在核反应堆中检测到。最后的实验是他们在 1959 年美国原子能委员会所属的赛凡纳河工场完成的，这个实验确实巧妙地证实了反中微子的存在，它的结果很快被粒子物理界承认，它也被列为 20 世纪物理学的重要实验之一。莱因斯因此获得了 1995 年的诺贝尔物理奖。

中微子的存在被证实后，为了探测到中微子，人们把目光转向了宇宙。最早进行实验的是美国布鲁克海文国家实验室的物理学家戴维斯等人，他们首先用四氯化碳(C_2Cl_4）作为探测介质，中微子与之相撞后。即产生氩

$$\nu_e + {}^{37}Cl \rightarrow {}^{37}Ar + e$$

反应生成的${}^{37}Ar$（Ar 是惰性元素），一旦生成后便自动脱离氯分子，聚合为小氩气泡。${}^{37}Ar$ 具有放射性，即使量很小，也能因为它具有的放射性而被识别出来。戴维斯利用这个装置终于进一步证实了中微子的存在。1959 年，美苏科学家找到了获取大量中微子的办法，即用加速器产生高能质子，再用这些质子轰击适当的靶，通过产生大量π介子衰变获得大量的中微子。

3. 中微子的研究进展

1962 年，美国的施瓦茨（M. Schwartz，1932～　）、莱德曼（L. M. Lederman）及斯坦博格（J. Steinberger，1921～　）等在布鲁克海文的加速器上进行实验，证实了 ν_e 和 ν_μ 是两种不同的中微子。70 年代中期，在美国斯坦福的直线加速器中心的名叫 SPEAR 的正负电子对撞机中，佩尔（M. L. Perl，1927～　）的小组发现了一种新的轻子——τ子，其质量为 1777 兆电子伏特，与电子、μ子是同一家族，同时，还得到了另外两种中微子——ν_τ 和 $\bar{\nu}_\tau$。中国高能物理研究所的郑志鹏等人也在北京正负电子对撞机上对τ子的质量作了重新测定，得到了十分精确的数值。这样中微子的家族就有了 6 个成员：ν_e、$\bar{\nu}_e$、ν_μ、$\bar{\nu}_\mu$、ν_τ、$\bar{\nu}_\tau$。为了确定自然界中中微子的种类，70 年代以来科学家们通过很多途径作了研究：对恒星演化的研究、对宇宙中 He 丰度的研究、对超新星爆

发的电子中微子总能量的研究等，得出了只存在上述 6 种中微子的结论。

4. 中微子的质量

1948 年，修文（C. W. Sherwin）用^{32}P测量β衰变的电子与反冲核的能量和动量，得到中微子的质量为零。1954 年柯费特·汉森改用^{37}Ar的 K 电子俘获测得中微子质量小于 8 千电子伏特。接着每隔几年就有人用不同的方法测量中微子的质量。1972 年，瑞典物理学家勃格维斯特对磁谱仪方法作了改进，测得中微子质量小于 60 电子伏特。20 世纪 70 年代以前，实验测量只能减小中微子质量的上限，但可以断定中微子的质量很小。

对中微子的质量是否为零的质疑有两方面的原因：①若中微子的质量不为零，存在中微子振荡，则太阳中微子失踪之谜就揭开了；②有关暗物质的问题，1933 年瑞士天文学家兹威基用两种方法估计星团质量，1978 年一些射电天文学家系统测量旋涡星系的转动曲线，1984 年对银河系周围一些矮球星的研究等大量事实证明：还有大量的物质虽然看不见，但它们是存在的，科学家们称它们为暗物质。暗物质到底是由什么组成的呢？有人认为是黑洞，或死星，或宇宙尘埃，或弥漫在宇宙空间的气体等。人们已知暗物质不是由重子组成。根据对中微子性质的了解，中微子是轻子，若中微子的质量不为零，最自然的暗物质候选者就是中微子。还有一些其他候选者，例如引力中微子、光微子、胶微子等，但实验中还没有证实它们的存在。

20 世纪 80 年代以来，有一股研究中微子的热潮。1980 年苏联理论与实验研究所柳比莫夫小组在经过 10 年的氚β谱测量以后，发表了 17 电子伏特$<m_\nu\leqslant$40 电子伏特的结果。1986 年，在日本仙台和大阪的国际会议上，瑞士苏黎世大学物理所的昆迪许得到$m_\nu<$18 电子伏特的结果。从最近的实验结果看，迄今为止实验测得中微子质量上限$m_\nu<$10 电子伏特，并不排除$m_\nu=0$。目前，有几台为别的目的建立的大型探测装置记录下了一个新星爆发的宝贵信息，由美国 IBM 和日本神冈的数据拟合结果：$m_\nu\approx$4 电子伏特或$m_\nu<$16 电子伏特（95%可信度）。科学家们利用二体衰变：

$$\pi^+\rightarrow\mu^++\nu_\mu$$

测量了μ子中微子的质量，$m_\mu<$0.25 兆电子伏特。1986 年，阿拔希在美国斯坦福的直线加速器中心 SLAC 的 PEP 贮存环上得到τ子中微子的质量小于 84 兆电子伏特（95%可信度）。目前这种探测仍在继续中。

三、介子理论的建立

1932 年，中子被发现以后，苏联物理学家伊凡宁柯与海森伯很快就提出了原子核是由质子与中子构成的理论，这一理论随后被实验所证实。但是什么样的力把质子与中子束缚在这样一个小小的原子核中呢？要对这一质子-中子模型有深入与全面的了

解，研究核子间的相互作用已迫在眉睫。在这期间人们作了大量的实验，根据实验结果，海森伯提出，质子与中子是依靠某种“交换力”把它们维系在核中的。他的这一想法很快被低能散射实验所证实。这些实验还表明，核力与核子是否带电无关。1936年，卡森与康登引入了同位旋的概念，对核力的电荷无关性作出了解释。他们认为质子与中子是同一种粒子的两种状态，即同位旋的第三分量分别为 1/2 和 −1/2 的状态。后来，在大量散射实验的基础上，对核力的性质又有了一定的认识。发现核力是一种短程力，在距离小于 10^{-13}厘米时表现为吸引力，且强度远比单位电荷间的电磁力大得多。人们曾试图用已知的各种粒子作为传递核力的媒介，但都没有成功。对于核子间具有的交换力，1935 年，日本的理论物理学家汤川秀树提出了介子理论。

1. 汤川的预言

汤川秀树（Yukawa Hideki，1907～1981）是日本理论物理学家，1949 年诺贝尔物理奖获得者。1929 年，汤川秀树毕业于日本京都帝国大学理学院。1932 年任该校讲师。1935 年任大阪帝国大学讲师。1940 年起，先后任京都帝国大学教授、名誉教授、东京帝国大学教授。1946 年他创办并出版了国际著名刊物《理论物理学进展》杂志。

汤川秀树在基本粒子物理学研究中，做出了出色的贡献。30 年代初期，他从事原子核和量子场论的研究工作，发表了基本粒子相互作用的论文，同时也发表了用 β 粒子轰击某种物质能产生新粒子的见解。

在研究原子核内部核子，即质子和中子之间相互作用的问题时，汤川秀树于 1935 年提出了著名的介子场理论。汤川大胆地设想，核力是任意两个核子之间交换一种尚未发现的新的重粒子产生的。他还进一步算出了这种粒子的质量大约是电子质量的 200 倍。由于质量介于质子和电子之间，故称为介子。

2. μ 子的发现

在汤川预言新粒子的两年之后，即 1937 年安德森和尼德迈耶（Neddermeyer）从在科罗拉多洲的帕克峰上的云室装置上拍摄的照片中发现了一条新粒子的轨迹。这条轨迹比质子的轨迹要弯曲些，但比电子的轨迹要直些，说明它的质量介于质子和电子之间。人们认为这可能就是汤川秀树理论预言的介子。史蒂文森（C. E. Stevenson）和斯特里特（J. C. Street）在云室实验中，从宇宙射线里发现了一种质量大约为 207 电子质量的粒子。

1945 年意大利物理学家孔韦尔西（M. Conversi）、潘契尼（E. Pancini）和皮乔尼（O. Piccioni）在实验中发现，正 μ 介子和负 μ 介子在物质中受阻的行为不一样，正 μ 介子的衰变类似在真空中一样，而负 μ 介子如被重核阻隔，则被俘获形成 μ 原子，μ 原子再衰变，但如被轻核俘获，其衰变就像在真空中一样。μ 子在真空中的衰变方程为

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

这些性质都与汤川秀树预言的介子的性质不一样。

3. π介子的发现

安德森发现的粒子并不是汤川所预言的体现强相互作用的粒子，汤川预言的粒子一旦距离核足够近，无论是轻核还是重核，都会发生剧烈的反应，而宇宙射线中发现的粒子与原子核间的作用是非常微弱的。后来，美国的马夏克（R. E. Marshark）、贝特、日本的坂田和井上（T. Inone）分别提出了“二介子理论”，他们认为这是两种介子，它们的质量稍有差异，较重的一种就是现在的π介子，它与质子、中子的作用很强，它以汤川预期的方式对核力做出贡献；较轻的一种就是现在的μ介子——安德森等人发现的介子，它仅参与弱相互作用和电磁相互作用，与强相互作用无关。他们认为μ介子虽不是π介子，但可能是π介子的衰变产物。当高能宇宙射线粒子进入大气层后，与高空大气中的原子核发生强作用过程而产生$\pi^{\pm}$，$\pi^{\pm}$在射向地面的过程中蜕变成$\mu^{\pm}$。这一思想启发人们要到高空中去寻找π介子。

英国布利斯托尔大学的鲍威尔（C. F. Powell，1903～1969）与他的同事拉特斯（C. M. G. Lattes）、奥恰里尼（G. P. S. Occhialini）发展了乳胶探测带电粒子的技术，提高了乳胶的灵敏度，并增加了乳胶的厚度。他们探测π介子的工作是从1945年开始的。1947年，他们用气球把核乳胶纪录宇宙射线，通过对乳胶底片上宇宙射线粒子径迹的分析，证实了π介子的存在，并发现了π介子可衰变为μ介子和中微子的过程。他们又推算出π介子和μ介子质量分别为电子质量的273倍和207倍。鲍威尔还研究了π介子的特性，发现π介子有三种：π^+、π^0、π^-，并确定了它们的质量。他发现，π介子很容易衰变成μ介子和一个中微子，同时产生激烈的核蜕变。μ介子很容易衰变成为一个电子和多个中微子，但它不参加强相互作用，只参加弱相互作用。这自然就与核力无关了，因此人们一般不再把μ介子列入介子之列，而看成是轻子。伦敦帝国学院的帕金斯（D. Parkins）也用乳胶独立地做实验，并作出了类似的发现。

后来，人们把参与强相互作用的粒子叫做介子，μ介子不参与强相互作用，它是轻子因此就不再称为μ介子，而称为μ子，而把汤川秀树预言的介子称为π介子。为此汤川秀树获得了1949年度诺贝尔奖，成为第一个获得这项荣誉的日本人。汤川的理论成果，现已成为当前研究基本粒子相互作用的两大类型之一，称汤川型相互作用。

鲍威尔是英国物理学家。在第二次世界大战后，鲍威尔是在英国最早恢复宇宙射线研究的年轻科学家。1947年他发现了π介子，取得了高能物理研究的突破性成果；并由于核乳胶的发明而获得了1950年度诺贝尔奖。

π介子的发现，是人们对基本粒子研究的具有决定性意义的重大收获。从1935年汤川秀树预言介子的存在，经过12年的探索，终于寻找到了π介子的痕迹，使基本粒子研究工作，进入了一个新的天地。π介子和μ介子的发现都是先在宇宙射线中发现

的。1948年，稳相加速器问世，首次获得了人工π介子。

事实上，随着物理学的发展，人们进一步看到，核力的作用机制要远比当时汤川所设想的复杂得多，不能把核力作用机制简单地归结为核子之间交换π介子的过程，也不能简单认为汤川理论已经解决了核力的机制。尽管如此，汤川理论仍具有重要的地位和影响。

4. μ原子的研究

1948年，中国物理学家张文裕发现，负μ介子可以取代原子中的电子而形成一种特别的原子，称为μ原子。μ原子中的μ^-或者像自由的μ^-那样蜕变，或者被核中的质子吸收而转化为一个中子并放出一个中微子

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$$

如同通常的k俘获过程那样。1954年张文裕积累了更多的资料，从中得出结论，μ^-停止在物质中后，不会发生核裂变，即μ子与核没有强相互作用。理论物理学家惠勒用量子力学对μ原子进行了计算，实验结果与理论结果符合得很好。

μ原子的发现开创了研究物质结构的新领域即μ原子物理学。由于μ子质量比电子大200多倍，因此μ子的某一轨道直径只是电子轨道的1/200，μ子比电子离核更近。作为探测核结构的工具，μ子比电子更精确。从1953年起美国建成了高能粒子加速器，可以产生大量的μ子束，并采用NaI（Tl）闪烁晶体来探测μ原子能级跃迁产生的γ射线，并使μ原子物理学得到一定程度的发展。人们用μ原子测定了核的尺寸，研究了真空极化效应，精确测定了μ子的质量。

1964年以后，世界上建立了一些介子工厂，μ子的流强比普通加速器大100倍到10 000倍，高能量分辨率的半导体也被应用于μ原子物理学，从而可以测定精细结构和超精细结构的γ射线，进而研究核的电偶极矩、四极矩和磁偶极矩等。吴健雄在这一领域作了大量工作。

第三节　粒子的发现与强子结构的研究

在粒子物理学发展的过程中，最初人们只知道质子、电子、光子和中子四种基本粒子。随着实验技术的不断提高，发现了数以百计的粒子。正电子的发现为粒子物理学的形成与发展奠定了基础。

一、宇宙线与正电子的发现

宇宙射线分布在广阔的宇宙间，它的发现虽然多少带有一点儿偶然的色彩，但仍是20世纪物理学的重大成就之一。

20 世纪初，人们观察到一种很奇怪的现象：带了电荷的验电器，经过一段时间以后，验电器所带的电荷会慢慢自动放掉。是什么原因使验电器的电荷被中和掉了呢？经过反复论证，人们推断，一定存在着具有很强穿透本领的射线，它们会引发气体的电离，从而中和掉验电器的电荷。可是，实验室及其附近并没有放射源，那么，射线来自何方呢？有人提出，这些奇怪的射线会不会来自地壳中微量的天然放射性元素呢？

为了检验这种想法是否正确，瑞士物理学家高凯耳（A. Cockel）指出，如果射线的确来自地壳中，离开地面越高，射线的强度会越来越弱，当到达一定高度时，射线就不存在了。这时，验电器的漏电现象也就不会发生了。

按照这种设想，1909 年，高凯耳乘坐大气球，将验电器带到几千米的高空。在气球逐渐上升的过程中，的确观察到验电器放电速度在减慢，表明随气球升高，射线的强度在减弱。然而，当气球上升到一定高度时，却出现了新的情况，验电器放电速度反而加快了。气球升得越高，验电器放电速度也越来越快了，显示出射线强度不但没有减弱，相反更强了。这一实验结果大大出乎人们的预料。

1. 赫斯的发现

1911 年，奥地利物理学家赫斯（V. F. Hess，1883～1964），制作了 10 个侦察气球，把它们送到了 5350 米的高空，用来探测大气的电离情况。在实验中他在距地面的高度约为 150 米内时，气体电离是逐渐减弱的；随着气球上升高度的增加，气体电离现象越来越强，这一实验结果与高凯耳等人的测量情况没有什么不同。赫斯在实验中还发现，在同一个高度，无论是白天还是黑夜，实验得到的结果完全一样。可见，这些射线与太阳、行星以至“天河”的位置没有关系。

他们所获得的实验资料充分证明，这些射线不是出自地下，而是源于天外。赫斯等人第一次成功地发现了宇宙辐射的存在。这种辐射最初被称为“赫斯辐射”。后来才把这些看不见、摸不着、很神秘的射线称作“宇宙射线”，简称“宇宙线”。

宇宙射线的发现，为人们了解宇宙、认识宇宙提供了一个重要的“窗口”，它立即引起了科学家广泛的兴趣。通过大量的实验数据表示：在 5000 米的高空，射线使气体电离的程度比地面附近大 2 倍；到了 9200 米的高度时，气体电离强度竟比地面附近大 10 倍。到 20 000 米以上的高空，射线强度反而减小了；到 50 000 米的高空，射线强度不再随高度增加而发生变化，这时的射线强度仅是最大强度值的一半。

经过多年的深入研究，人们认识到所谓宇宙射线是宇宙辐射源射向地球的高能量粒子流。宇宙射线的发现是赫斯为人类做出的杰出贡献，为此他荣获了 1936 年度的诺贝尔物理奖。

2. 狄拉克的预言

1928 年，狄拉克从相对论和量子力学的一般原理出发，建立了相对论性电子波动

方程——狄拉克方程。奇怪的是，狄拉克方程给出了四个解，两个正解能描述已观察到的正能态的电子的两个自旋态。另外两个负能解与电子的负能态相应。按照相对论，可能存在正负两种能量值；而按照量子论，会发生正能电子不断落入负能状态（跃迁）的灾难，电子就不会稳定。

为了给“负能困难”以物理解释，狄拉克根据泡利不相容原理，于1929年12月提出了“空穴理论”。他认为真空并非真的一无所有，而是一个充满负能态的电子海洋。这就是说，真空是一种负能态被填满而正能态全空着的状态。既然它的所有负能态全被电子填满了，正能态电子不可能再跃迁到负能态去，电子的稳定性问题解决了。当一个处于负能态的电子得到足够能量跃迁到正能态时，负能态中就留下一个“空穴”。就是说，正能态电子和“空穴”同时产生，而当一个处于正能态的电子落入“空穴”时，电子和“空穴”就一道湮没。由此可知，“空穴”显示带正电的粒子的性质，电荷大小与电子相等。当时质子已发现，狄拉克试图将“空穴”解释为质子，但由于质子的质量要比电子大得多，该解释会导致氢原子的不稳定。1931年9月，狄拉克提出电子负能态的“空穴”应是一种质量与电子相同的未知新粒子——“反电子”。

3. 安德森的发现

安德森（C. D. Anderson，1905～1991）是美国物理学家，1936年诺贝尔物理学奖金获得者。1927年，安德森毕业于加利福尼亚理工学院，1930年获博士学位。后留校任教，他的漫长的科学生涯，都是在他的母校中度过的。



图 11-6　首次发现正电子的径迹

安德森是核物理研究的开拓者之一，长期致力于基本粒子的研究，获得了一系列重要发现。1932年，他和密立根共同研究宇宙射线问题。发现了正电子。这是人们发现的第一个反粒子。1936年，安德森发现 μ 子，此后对X射线、光电子、γ 射线、宇宙射线等也有研究。这些研究对基本粒子研究具有重要的意义。

安德森在宇宙射线实验中，利用放在强磁场中的云室来记录宇宙射线粒子，并在云室中加入一块6毫米厚的铅板，借以减慢粒子的速度。当宇宙射线中粒子通过室内的强磁场时，用快速拍照的方法拍下粒子径迹的照片。安德森原以为宇宙射线打出来的次级带电粒子应该都是电子，但结果发现这种粒子是带正电的，质量很小，且径迹与电子径迹相似。安德森当时并不知道狄拉克的理论预言，他遂命名这种带正电荷的、质量与电子质量相同的粒子为“正电子”，其实

这就是狄拉克预言的“反电子”。

4. 赵忠尧的贡献

在此之前，其他一些物理学家在一些照片中也发现了正电子的径迹，只是在当时这些径迹并没有引起他们的注意，或是作了错误的解释。英国的布拉开特在安德森前曾观察到正电子的存在，但由于过于谨慎，未及时发表。约里奥-居里夫妇在1931年末就已观察到正电子的径迹，但他们把它理解为向放射源移动的电子，而不是从源发出的正电子。

1927年，赵忠尧（1902～1998）来到美国加州理工学院留学，做密立根的研究生。密立根为赵忠尧提出的题目是“硬伽马射线通过物质时的吸收系数”。当时，物理学家普遍认为，硬伽马射线通过物质时的吸收，主要是由自由电子的康普顿散射引起的，计算吸收系数所依据的公式是刚刚问世的“克莱因-仁科公式”。赵忠尧的实验数据要全部采用这个公式进行计算，以增强数据的实在性，而且借此还可以验证克莱因-仁科公式是否正确。实验进行了一年多的时间，实验结果表明，对于轻元素，实验与克莱因-仁科公式的计算结果符合得相当好，但对于重元素，实验值比理论值大得多，出现反常吸收。例如，硬伽马射线通过重元素铅所得到的吸收系数比公式计算的结果高约40%。他将此写成论文，并交给密立根。密立根对此也没有十分的把握，搁置了3个月还做不出决定。在另一位教授的劝说下，密立根才消除了对赵忠尧实验可靠性的疑虑，并同意发表。1930年5月，美国《国家科学院院刊》发表了赵忠尧的《硬伽马射线吸收系数的测量》。在文中，赵忠尧比较了硬伽马射线通过轻元素和重元素的吸收系数。此外，赵忠尧还提出了一个重要的问题：硬伽马射线对轻重元素吸收系数不同意味着什么？

在赵忠尧进一步独立地进行的探索硬伽马射线与物质相互作用的机制的实验中，赵忠尧首次发现，伴随着硬伽马射线在重元素中的反常吸收，还存在一种从未见过的特殊辐射现象。这种辐射非常弱，其能量为0.5兆电子伏特。赵忠尧将实验结果整理成第二篇论文《硬伽马射线的散射》，并于1930年10月发表在《物理评论》上。其实，这种“特殊辐射”就是正负电子对转化为两个光子的湮灭辐射。正是在赵忠尧实验的启示下，安德森在云雾室中注意到正电子的径迹。

正电子的发现是大量基本粒子发现的开始。它不仅给基本粒子增加了一个新成员，同时证实了狄拉克的理论。正电子的发现，还改变了基本粒子是固定不变的旧观念。更重要的是它第一次证明了反粒子的存在，显示了物质的一种基本对称性，为以后在实验上继续寻找其他粒子的反粒子创造了先例，在物理学发展史上是一个重要的里程碑。

二、反质子与反西格马负超子的发现

正电子的发现证实了狄拉克的反粒子理论，一些理论物理学家开始认真对待这一理论。1934 年泡利与克拉夫证明，即使不能形成稳定的负能粒子海，也会有相应的反粒子存在。于是人们就开始寻找其他粒子的反粒子。1955 年，张伯伦-塞格雷小组发现了反质子。

塞格雷（E. G. Segre，1905～1989）是美籍意大利物理学家。1928 年毕业于罗马大学，获得哲学博士学位。在罗马，塞格雷结识了费米。在费米的组织下，拉塞蒂（F. Rasetti）、塞格雷等人创立了罗马科学团体。他们的工作取得了出色的成就，成为世界上最重要的物理研究中心之一。1935 年，塞格雷离开罗马到巴勒莫大学，后于 1938 年移居美国，在加利福尼亚大学辐射实验室做研究工作。

在罗马时期，塞格雷和费米一同从事研究工作，他们利用中子作为入射粒子来轰击原子核，三年间，发现了约 40 种新的放射性物质。1937 年，塞格雷和佩里埃合作，在伯克利回旋加速器上，利用氘核与中子轰击钼发现了第一个人工放射性元素锝。1941 年，他同西博格等人，成功地制备了同位素钚，证明了这种物质可以用作核燃料，为原子弹的研制创造了条件。1943～1946 年间，他在奥本海默领导的洛斯·阿拉莫斯实验室工作，为原子弹研制发挥了重要作用。战后，塞格雷致力于反物质研究。

张伯伦（O. Chamberlain，1920～　）的主要研究课题是核物理学。早在 1948 年，他曾利用一台高能回旋加速器，研究了原子核中的质子和中子的极性及相互作用问题。此后不久，他开始致力于反质子的探测工作。

根据狄拉克的理论，反质子的质量与质子相同，二者所带电荷和磁矩则相等而反号，质子与反质子成对出现或湮没，用两个普通的质子碰撞便可获得反质子，但反质子的产生阈能为 6.8 吉电子伏特。1954 年，在加利福尼亚大学的劳伦斯辐射实验室，建成了 6.4 吉电子伏特的质子同步稳相加速器，这为寻找反质子提供了条件。1955 年，张伯伦和塞格雷用上述加速器证实了反质子的存在。由于反质子出现的机会极少，大约 1000 亿高能质子的碰撞，才能产生数量很少的反质子，因而证实反质子的存在极为困难。

张伯伦-塞格雷小组借助实验装置，用质子束打击铜靶作为产生反质子的源，并在轰击以后产生的多种类型数量极大的次级粒子中找到反质子。实验过程中，每产生一个反质子，将有 10^5 个介子出现，因此鉴别反质子的实验装置比较复杂。加速器磁场首先将次级粒子束偏离一定角度。然后，用两个磁铁分别再将粒子束偏离一定角度。两组四极透镜可以聚焦带负电荷的粒子束，其中包括负 π 介子、负 K 介子和反质子。用两个闪烁计数器及相应的快符合线路测量束流粒子飞行的时间。另外用阈式气体契伦克夫计数器记录粒子的速度，再从中筛选出反质子，符合线路中能够给出束流中的反

质子数。1955 年他们的实验小组测到 60 个反质子。由于这一发现，他们获得了 1959 年度诺贝尔物理学奖。

不久他们又发现了反中子。尽管高能粒子打靶时也能产生反中子，但是由于反中子不带电，更难从其他粒子中鉴别出来。他们是利用反质子与原子核碰撞，反质子把自己的负电荷交给质子，或由质子处取得正电荷，这样，质子变成了中子，而反质子则变成了反中子。

1956 年成立的杜布纳联合核子研究所拥有一台能量 10 吉电子伏特的质子同步稳相加速器。1956 年秋，王淦昌（1907～1998）到该所工作。利用这台加速器和他自己设计的 24 升丙烷气泡室于 1958 年开始寻找新粒子。1959 年 3 月开始，他们发现一个荷电反超子——反西格马负超子。这是在高能 π 介子核反应中第一次观测到有反粒子产生、衰变和衰变产物湮没等完整图像，进一步证实了狄拉克的任何粒子都有反粒子的预言。以后人们又陆续发现了一些反粒子。1961 年人们发现反氘核。对反粒子和反物质问题的研究为核物理学的发展开辟了新的道路。

三、强子结构的早期研究

1. 坂田模型

从实验上证明 π 介子的存在之后，费米和杨振宁认为，π 介子是由核子（质子，中子）与反核子（反质子、反中子）构成的。由于当时反中子和反质子尚未被发现，所以费米与杨振宁提出的新的模型是要有一些胆识的；但核子不具有奇异数，因此不能构成奇异粒子。

尽管费米-杨振宁模型只是初步的研究，但这毕竟是一个良好的开端。1955 年，在奇异粒子（K 介子和超子）已被发现并证明，这些粒子符合盖尔曼-西岛（Gell-Mann-Nishijima）关系式（1953 年）的基础上，日本物理学家坂田昌一（1911～1970）提出了著名的“坂田模型”。

坂田昌一是日本理论物理学家。出生在东京。在高中学习时，他就阅读了石原纯、普朗克和彭加勒等人的著作，对物理学变革有了一定的认识。他还听了石原纯关于原子物理学的讲演，并与石原纯建立了通信联系。1930 年，坂田考入京都帝国大学物理系。在汤川秀树的鼓励下，选定了原子核理论为研究方向。从 1933～1938 年，坂田与汤川等人合作写出了 4 篇关于介子理论的论文。1941 年，坂田与汤川合作出版了《原子核及宇宙线的理论》；同年，坂田获得了博士学位。1942 年坂田与别人合作提出了二介子理论，因此获得了日本朝日奖。1955 年，坂田提出粒子的复合模型。1959 年，又提出粒子的“名古屋模型”。

坂田昌一还非常重视科学哲学的研究，特别是科学哲学对物理学研究的指导作用。

1929 年，他结识了武谷三男，他们一起抵制当时的实证主义哲学的潮流，并且以辩证唯物主义指导粒子物理学的研究。

坂田认为，强子是由 3 个粒子和它们的反粒子构成的。这 3 种粒子就是质子、中子和 Λ 超子。这 3 种粒子和它们的反粒子被称做“基础粒子”。

在“坂田模型”中，除了 π 介子与费米-杨振宁模型的结构相同外，坂田还提出了一些奇异粒子的结构，如 κ^+、κ^0、κ^-、Σ^+、Σ^0、Σ^-、Ξ^0、Ξ^-等。坂田还利用群理论预言了一些新粒子。

总的来看，坂田模型可以对介子进行分类，可以解释介子的质量、自旋、宇称等性质，但对重子的分类则不够理想。这主要表现在预言的重子太多了，如 $\kappa^{0,-}$和 $\Xi^{0,-}$，前者由正、负核子与 Λ 构成，后者则由反核子与 2 个 Λ 构成，这样的组合有 27 种。此外，对重子的自旋和宇称等性质也解释得不够理想。

2. 八重法

如何对基本粒子进行分类？一般来说，好的分类方法应能将所有（已知）粒子归纳进一个方案中，并且能像门德列耶夫预言未知元素的性质那样，预言新粒子的存在和基本性质，同时也能反映粒子内在性质的变化规律，以及粒子间的内在联系。

60 年代初，盖尔曼和尼曼（Y. Neeman，1925～　）各自独立地提出了一种名为“八重法”（也称“八度法”）的分类方案。这个方案包括当时已发现的（包括“共振态”粒子在内的）80 多种强子。

盖尔曼（M. Gell-Mann，1929～　），美国理论物理学家。15 岁时盖尔曼进入耶鲁大学，1951 年获得麻省理工学院哲学博士学位，并成为普林斯顿高级研究院的研究人员。1947 年，研究人员在宇宙线中发现了奇异粒子。由于奇异粒子具有截面大和衰变寿命长的矛盾，从理论上是难以解释的。1953 年，盖尔曼和日本的中野董夫、西岛和彦各自独立地提出了奇异量子数的概念，并提出了盖尔曼-西岛法则。这就解释了上述的矛盾。

1958 年，盖尔曼与费因曼一同提出了弱相互作用的守恒矢量流理论，揭示了弱相互作用的本质，这一理论为建立弱相互作用与电磁相互作用统一理论开辟了道路。1961 年，盖尔曼提出“八重法”，概括了当时发现的大量粒子，并预言了 Ω^-粒子的存在。1964 年，盖尔曼发展了“坂田模型”，提出了强子结构的“夸克”模型，在说明强子分类和质量谱等方面非常成功。由于盖尔曼对粒子物理学发展的巨大贡献，他获得了 1969 年度的诺贝尔物理奖。

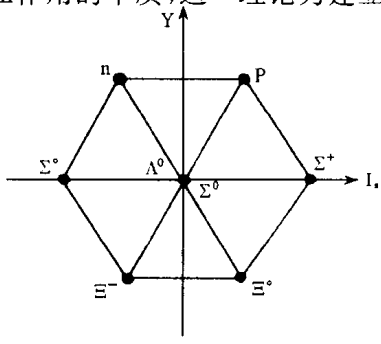


图 11-7　$J^P=(1/2)^+$八重态图

盖尔曼和尼曼的“八重法”主要考虑的因素有电荷 Q、重子数 A、超荷 Y。它假设 8 个质量最小的重子构成一个“超多重态”。

这 8 个重子是中子、质子、1 个 Λ 超子、2 个 Ξ 超子和 3 个 Σ 超子。从图 11-7 中可以看到它们的排列是非常规则的。其纵坐标为 Y、横坐标 I_S（同位旋分量）。从排列上可以看出一定的规律，即从左上向右下的方向上，同一直线上的粒子电荷数相同；沿水平方向向右，同一直线上粒子的奇异数（或超荷）相同。

按照类似的方法可以得到“十重态”的对称图形。从图 11-8 中可以看到 4 个 Δ 粒子、3 个激发态 Σ^* 粒子、2 个 Ξ^* 粒子，处在 A 的位置上是一个空心圆圈（余者为实心圆圈）。1962 年，盖尔曼在欧洲核子中心的会议上预言了这第 10 个粒子，即“失踪了的”粒子——Ω 粒子，它的电荷 $Q=1$，奇异数 $S=-3$，质量数为 1680 兆电子伏特，自旋为 3/2，宇称为正。1964 年，人们在美国布鲁克海文实验室发现了 Ω^- 粒子，并与盖尔曼的预言完全吻合。

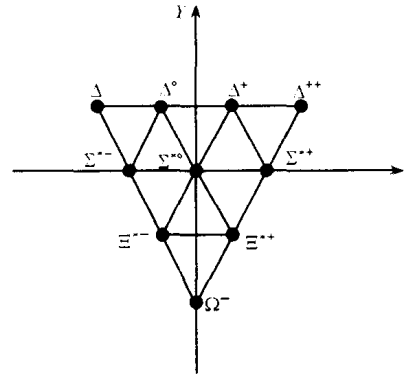


图 11-8　$J^P=(3/2)^+$ 十重态图

“八重法”分类表相当于粒子物理学中的“周期表”。除了可以归纳已发现的粒子，使这些粒子在八重态或十重态中找到它们的位置，而且可以预言新的粒子及其性质，如 Ω 粒子。借助这些图表中，可以很好地解释粒子的各种量子性质。

四、夸克理论的发展

到 1964 年，当时发现的新粒子已近百个，并且新发现的粒子还在增加，因此，盖尔曼在坂田模型和“八重法”的基础上进一步提出了当时所有发现的强子都是由三种“夸克”粒子所组成的想法。同时，茨维格也独自提出了类似的想法。他将这种基础性粒子称做“爱斯”（这是扑克牌中的“A”）。

1. 夸克的提出

盖尔曼提出，夸克是带有分数电荷的粒子，这种想法在当时看来是太离奇古怪了，“夸克”一词也来自原来是詹姆斯·乔伊斯（Jonnes Joyes）小说《芬涅根的祭礼》中海鸥的叫声。所以，当盖尔曼将文章寄给《物理快报》时，该杂志拒绝发表。这样，盖尔曼只得将文章转投欧洲的《物理学快报》（Physics Letters）。

盖尔曼认为，夸克是构成已发现的强子的更基本的粒子，也称做“夸克子”或“夸克粒子”。这些更基本的粒子像“积木块”一样，它们可以按照一定规则搭建。它们不同于坂田模型中的质子、中子和 Λ 介子，它们既是基础粒子，又是复合粒子，而夸克只是“基础粒子”。它们分别是 u 夸克（上夸克）、d 夸克（下夸克）和 s 夸克（奇异夸克）。

作为基础粒子的夸克必须是费米子，不是玻色子，因为费米子可以构成费米子，也可以构成玻色子；玻色子只能构成玻色子，而不能构成费米子。夸克具有分数电荷。上夸克的电荷为 2e/3，下夸克的电荷为－e/3，奇异夸克的电荷为－e/3。2 个下夸克和 1 个上夸克构成中子，写作 (udd)；构成质子的夸克为 (uud)。中子的电荷为 0，质子为 1。

2. 层子模型

中国理论物理学家在 1965 年也开始认真地研究强子结构问题。1966 年，北京基本粒子物理小组提出了一个层子模型。层子的意思是，强子是复合粒子，它由更小的基本粒子——层子构成，而层子并非是最终的基本粒子，它只是物质结构无限层次中的一个层次。层子表现的一种科学哲学思想是，物质是无限可分的，而且层子也是无限可分的。

就层子的种类来看，它不一定是 3 种，可能会多于 3 个，且应从实验上加以确定。层子与层子或反层子之间的相互作用构成了强子，但这种相互作用是怎样作用的呢？中国的物理学家提出了一种“超强相互作用”的观点。“超强相互作用”将层子束缚在一起，并构成强子。

层子模型是层子间动力学理论建立前的一个较好的模型，借助这个模型成功地说明了粒子物理的一些实验数据；通过层子所参与的相互作用可将重子和介子的性质有机地联系起来。所以，层子模型的提出，使当时繁复的粒子物理现象开始呈现出统一的且有机联系的图像。

3. 粲夸克的发现

20 世纪 60～70 年代，世界上建立起一些能量更高的加速器，这为研究强子结构提供了更好的条件。1974 年 8 月，美籍华裔物理学家丁肇中的研究小组在布鲁克海文实验室的质子加速器（能量为 3.3×10^{10}电子伏特）上发现了一个新的粒子，并于 11 月份宣布。同时，在美国西海岸的斯坦福大学直线加速器中心里克特小组也发现了类似的粒子。丁肇中将此粒子命名为“J”，其形象与中文的“丁”字相近，寓意为中国人发现的粒子；里克特则将它命名为“ψ”。因此，这个粒子就以“J/ψ”命名。不久在意大利和联邦德国的加速器上也相继观察到这个粒子。为此，丁肇中与里克特获得 1976 年的诺贝尔物理奖。

里克特（B. Richter，1931～　）是美国物理学家。1952 年毕业于麻省理工学院，1956 年获哲学博士学位后，他去斯坦福大学攻读高能物理学，并一直在此工作。在这里，里克特负责建造了世界上第一对电子贮存环。20 世纪 60 年代，他又设计了斯坦福正电子加速环，以提高粒子的能量量级。由于斯坦福巨大的加速器，使里克特于 1974 年发现了 ψ 粒子。

J/ψ 粒子是自旋为 1 的玻色子，它的质量很大，比质子质量还要大 3 倍多。它的电

荷是 2e/3。但是 J/ψ 的寿命却出奇地长，达 10^{-20}秒；其寿命比类似能量的典型强子要长 1000 多倍。这些性质对新的量子色动力学是一个重要的支持。为了说明 J/ψ 粒子的性质，人们提出了一种新的夸克——粲夸克，即 c 夸克。新发现的 J/ψ 是由一个粲夸克和一个反粲夸克组成的束缚态。

丁肇中（Samuel Chao Chung Ting，1936～ ）是美籍华裔物理学家。1956 年到美国密执安大学学习，并从机械专业转到物理专业。1962 年获得该校的博士学位，后去哥伦比亚大学和麻省理工学院任教。丁肇中的实验工作主要在 DESY（位于德国汉堡的“电子同步加速器研究中心”）、CERN（位于瑞士日内瓦的“欧洲核子研究中心”）和美国布鲁克海文实验室进行。1974 年夏，丁肇中的小组在布鲁克海文实验室发现了 J 粒子。

由于“夸克囚禁”的问题，人们当时认为，夸克之间是被胶合在一起的，这种胶合粒子就称做胶子（gluon）。为了描述胶子和夸克的作用，物理学家提出了量子色动力学。70 年代，理论物理学家在分析中微子、核子和电子相互作用之后，认为胶子对夸克的作用是确实的。但是，如何从实验上找到这种粒子呢？人们想到，高能电子碰撞可以产生的粒子集中成两股喷射出来，这种现象被称做“双喷注”现象。它是两种夸克变化所致。如果强子中除了夸克还有胶子，那么就会产生第三股喷注。

在 DESY，1978 年建成了佩特拉（PETRA），这是当时世界上能量最高的正负电子对撞束贮存环。加速器的周长为 2.3 千米，功率为 4.5 兆瓦，设计能量高达 19GeV，并可使这样高能量的正电子与电子相撞。在这个对撞机上工作的有 4 个小组，其中 1 个小组是丁肇中领导的。这个小组由来自 5 个研究单位的科学家组成，其中有中国 20 多位物理学家。他们的小组被称做马克-杰（Mak-J，这实际上是一个大型探测装置的代号）。1979 年底，Mak-J 小组最先从实验上看到“三喷注”现象。这第三股喷注可以解释为是胶子引起的。

4. 第 3 代夸克的发现

盖尔曼和茨维格提出夸克模型时提出存在 3 个夸克，即上夸克 u、下夸克 d 和奇异夸克 s。1974 年发现粲夸克。到此为止，人们发现了前 2 代的夸克。其中第 1 代夸克 u 和 d 构成了我们的现实世界，加上电子和中微子 ν_e，就可以说明宇宙中的稳定物质了。第 2 代夸克和轻子与中微子，即 s 夸克和 c 夸克，μ 子和中微子 ν_μ，它们的发现不仅说明了一些新发现的粒子，而且表现出基本粒子发现的历史。这就像按“世代”繁衍一样，粒子的“世代”也在发展着。

从 20 世纪 70 年代，人们开始寻找第三代夸克。1975 年，斯坦福直线加速器中心（SLAC）的玻尔及合作者发现了一种很重的轻子——τ 子。1977 年，莱德曼领导的费米实验室和哥伦比亚大学开始了寻找底夸克（b）和顶夸克（t）的工作。

1984 年，欧洲核子中心（CERN）发现了顶夸克的痕迹。但找到它非常不容易，为

此一些实验室开展了寻找顶夸克的“竞赛”。费米实验室的费米碰撞检测器（CDF）进行实验检测。CERN 的物理学家起用 UA1 和更小的 UA2 进行检测。

1992 年 5 月，费米实验室的研究人员利用 Tevatron 对撞机寻找顶夸克。参加实验的是两个国际性的合作组：CDF 和 D0，共 800 余人。1994 年 4 月，他们首次观察到顶夸克的实验证据，并测定了其质量。它比同一代的底夸克重 30 多倍，是质子质量的 180 多倍，大大出乎人们的预测。这一成果是 90 年代高能物理学的一个重大成果，并被国际合众社评为 1995 年度的“十大国际科技新闻”。

顶夸克的质量为最轻的上夸克的 30 000 多倍，这对探索基本粒子质量的起源和机制有很重要的启发。这一发现对完善原有的理论和探索超对称大统一模型都有重要意义。顶夸克的发现是借助世界最大的质子-反质子超高能对撞机，并且花了近 20 年的时间才完成，说明超越国际的科技合作是具有重要意义的。

5. 夸克囚禁

就现在的认识水平来看，夸克是最小的物质粒子，在构成强子时，夸克之间的作用还要借助胶子，这就像传递电磁作用的媒介粒子——光子一样。同样，就像带电粒子所带电荷决定电磁作用的强弱一样，夸克粒子也带有“色荷”；不过电荷只有一种，色荷却三种：红色（R）、黄色（Y）和绿色（G）。这些色荷决定夸克参与强相互作用的强弱程度。由于色荷共有三种，因此胶子就有 8 种。一般来说，介子是由一个夸克和一个反夸克构成，重子是由三个夸克构成。这些正反夸克之间的作用是通过交换胶子来完成的。如果说约束核子在原子核内的力是核力，那么约束夸克在重子或介子内部的力可以称作“色力”。不同的是，核力对核子的约束是有限的，在外界作用下，像放射性元素那样，核子脱离原子核并不是太困难的事情。然而，从实验的情况来看，色力并非一般的力，夸克要冲破色力的束缚成为自由存在的夸克是不可能的。这种现象就像夸克被“囚禁”起来一样，因此就将这种现象称作“夸克囚禁”。

关于“夸克囚禁”，意大利和美国物理学家曾提出了“弦”模型来解释。他们认为，强相互作用可能是由一些“弦”状粒子产生的。在这种模型中，介子中的正反夸克系于一根“弦”的两端。重子中的三个夸克则由三根“弦”连系着。这种弦的长度约为 10^{-13}厘米。借助这种图像，人们可以看到，夸克受制于“弦”的作用。然而，奇怪的是，当两个夸克离得十分近时，它们之间彼此并无妨碍，每个夸克的行动很“自由”；但夸克离得较远时，色力的作用却随距离的增加而增大，也就是说，夸克不能完全挣脱“弦”的作用而变成“自由夸克”，而只能在“弦”的控制下、在距离较近时获得“渐近自由”。

总的来说，要定量解释“夸克囚禁”问题和强子结构的图像，仍是高能物理的重要任务。

思 考 题

1. α、β、γ射线是怎样发现的?

2. 质子是如何发现的?

3. 人工核反应是如何发现的?

4. 查德威克是如何发现中子的?约里奥-居里夫妇在发现中子的研究中作了哪些工作?

5. 宇宙线是怎样发现的?赫斯做出了什么贡献?

6. 正电子是如何发现的?赵忠尧对正电子的发现有哪些贡献?

7. 反质子是如何发现的?

8. 简述原子核模型理论的建立。

9. 费米是怎样发现慢中子效应的?这一发现有什么意义?

10. 简述核裂变的发现过程。

11. 泡利为什么要提出中微子假设?费米是怎样解释β衰变的?

12. 汤川秀树的核力理论是什么情况下提出的?对这种理论的验证大致经历了一个怎样的发展过程?

13. 王淦昌对核物理的主要贡献有哪些?

14. 简述盖尔曼提出的“八重态”和“十重态”的基本内容,以及“夸克模型”的基本内容。

15. 丁肇中和里克特是怎样发现新夸克的?这种新夸克具有什么意义?

第十二章　凝聚态物理学的发展

由大量原子、分子或离子集聚而成的固态和液态物质统称为凝聚态物质，凝聚态物理学就是研究这类物质的物理性质、微观结构、粒子运动形态及其相互关系的学科。这一重要的分支学科，在当今物理学中的发展最快、规模也最庞大。本章仅就固体结构、导电理论和超导理论的发展做一简要的介绍。

第一节　固体结构的研究

凝聚态物理学是由固体物理学发展而来的。在相当长的时间里，人们研究的固体主要是晶体。因此，固体物理学的建立与发展最初就是从几何晶体学的研究开始的。

一、几何晶体学的建立

早在17世纪中叶，丹麦地质学家斯蒂诺（Nicolaus Stenno，1638～1686）就发现，任何一种化学的或矿物的晶体，其两相应晶面之间的夹角均为一恒量，这个恒量可以标志这种晶体的特征，这一规律后被称为斯蒂诺定律或结晶学第一定律，这一发现为晶体学的建立奠定了一定的基础。18世纪，法国矿物学家阿维（Rene'-Just Haüy，1743～1822）由破碎的方解石受到启发，开始对晶体的几何规则进行研究，从而推出一个关于晶体结构的完整的理论。这一理论后来常被用于对矿石的分类，以及对晶体热电和压电现象的研究。法国物理学家布拉菲（Auguste Bravais，1811～1863）进一步研究了晶体几何结构，于1848年导出了点阵在晶体空间的14种排列方式。这14种排列符合32种对称类型，包括2000多种晶体。布拉菲的专著《晶体学研究》一书，详尽地分析了分子多面体的几何学，是固体物理学中关于晶体结构的有影响的经典著作，布拉菲点阵就是用他的姓氏命名的。布拉菲的研究成果燃起了人们研究晶体外部形态以及内部结构的兴趣。1890年费多洛夫（E. C. Fedorov），1891年熊夫烈（A. M. Schoenflies，1853～1928）以及1895年巴洛（W. Barlow，1845～1934）等人，分别用不同的方法，研究了晶体的宏观对称类型。他们根据晶面夹角恒定的规律，对大量的晶体进行了测角与投影工作，将晶体按它们的宏观对称性进行了划分，证实了晶体结构的对称组合方式只有230种，可归并为7个晶系，又用能够反映这些对称型的14种布拉菲格子来描述它。他们的工作全面地奠定了晶体结构对称理论的基础。

二、晶体结构分析的进展

固体物理学发展史中的一个重要里程碑，就是1912年劳厄等发现的X射线晶体衍射现象。德国物理学家劳厄（Max Theodor Felix von Laue，1879～1960）1903年在柏林大学获得理论物理博士学位，1909年到慕尼黑开始从事X射线方面的研究。自1895年伦琴（Wilhelm Konrad Rontgen，1845～1923）发现X射线以来，关于这种辐射的性质的争论一直很活跃。有人认为它像阴极射线一样，由粒子组成；而有人则认为它像声波一样是纵波；还有人认为它是像光波那样的横向电磁波。争论的关键在于测定其波长，然而所有迹象表明，X射线的波长要比可见光波长短很多。制造单位长度内刻痕数极多的光栅，在当时的技术条件下是不可能的。当时，慕尼黑大学理论物理教授索末菲的研究生厄瓦耳（Paul Peter Ewald）正在准备博士论文，论文的内容是对晶体的双折射现象进行微观解释。由于当时量子力学尚未问世，这篇论文只在洛伦兹的色散理论范围内进行讨论。厄瓦耳设想晶体中的偶极子呈点阵结构排列，在入射电磁波的作用下，振动偶极子发射次级电磁波。当厄瓦耳向劳厄请教，劳厄问他偶极子的阵列间隔是多少时，厄瓦耳估算为10^{-8}厘米，这恰好与X射线的波长有同一数量级。当时劳厄正应邀撰写一篇关于物理光学的综述文章，他把一维光栅的衍射理论向二维做了推广。厄瓦耳的问题对劳厄是一个启发，他想到，晶体的点阵相当于一个三维光栅，对X射线来说，恰好是间隔与波长可以比拟的理想障碍物。劳厄在索末菲的另外两位研究生的协助下，做出了硫化锌晶体的X射线衍射图样，并把它拍摄到照相底版上。这一实验不仅说明了X射线的电磁波本性，而且肯定了晶体空间点阵结构假设的正确性，并提供了对晶体进行结构分析的方法。后来的实践证明，用X射线研究大分子的聚合物结构是一种极为有效的方法。1953年英国晶体学家威尔金斯（Maurice Hugh Frederik Wilkins，1916～　）从化合物胶状溶液中制备出脱氧核糖酸（DNA）纤维，并用X射线照射，利用X射线衍射图样测得重要数据。利用这些资料，英国晶体学家克里克（Francis Harry Compton Crick，1916～　）和美国遗传学家沃森（James Dewey Watson，1928～　）推导出著名的DNA双螺旋结构模型，从而使他们三人分享了1962年诺贝尔医学和生理学奖。

劳厄不仅提出了晶体结构的X射线分析法，而且以此为基础，建立了晶体衍射的运动学理论。这种理论处理方法的特征在于，相互独立地考虑各个原子对X射线的散射，完全忽略入射束与衍射束之间的动力学相互作用，这样可以将透过晶体的入射束强度视为不变，以使衍射强度的计算更加简便，即只需单纯地把各体元中物质对衍射的贡献相叠加即可。由于在通常的实验条件下，小晶体的衍射强度甚小，晶体衍射的运动学理论仍不失为一种良好的近似理论，以致在晶体结构分析中所应用的衍射理论仍多半局限于运动学理论的范畴。由于发现晶体中X射线衍射以及对晶体衍射运动学

的提出，劳厄获得1914年度诺贝尔物理学奖。

继劳厄之后，创立X射线晶体结构分析这一新的科学分支的是英国物理学家布拉格父子。W.H. 布拉格（Sir William Henry Bragg，1862～1942），1882年考入剑桥大学，1885年以优异成绩获数学学士学位。以后，在瑞利及J.J. 汤姆孙门下攻读物理学。1886年接受澳大利亚阿德莱得大学聘请，担任该校教授，直到1908年，布拉格回到英国，受聘利兹大学任物理学教授。在利兹大学期间，他得知劳厄所进行的X射线晶体衍射工作，立即对这项课题发生了兴趣。他的儿子W.L. 布拉格（Sri William Lawrence Bragg，1890～1971）当时正是剑桥大学的学生，也在进行这方面的工作。1912年11月，他以《晶体对短波长电磁波的衍射》为题向剑桥哲学会作了报告，推导得出了X射线衍射的基本规律，提出了著名的布拉格方程。1913年1月，老布拉格用电离室探测X射线经衍射的反射线，获得了成功的衍射图样。同年3月，他又自制了第一台X射线谱仪，用它研究X射线的光谱分布，X射线波长与普朗克常数之间的关系，以及发射体与吸收体的原子量等等。布拉格采用了儿子的建议，研究布拉格公式的逆关系，即用已知波长的X射线测定晶体点阵的平面距离，从而测定晶体结构。他们用这种方法分析了卤化碱金属的晶体结构，比较精确地测定了晶格间距离的绝对值。他们不仅由衍射结果得出了X射线的波长公式，又根据X射线衍射的基本规律，推导出有关晶体结构的情况。例如，他们证明了氯化钠晶体中的钠离子和氯离子按一定的几何规律周期地分布排列，即每一个钠离子的周围有六个氯离子，而每一个氯离子周围，也将有六个钠离子。这些发现对化学产生了深远的影响，德拜的电离新概念就是由此发展出来的。到1913年底，布拉格父子不仅积累了用X射线谱仪所完成的大量晶体结构分析资料，而且整理出一整套规范的操作规程。1915年父子俩联名发表了实验结果，并于当年共同获得诺贝尔物理学奖。小布拉格当年仅25岁，从而成为最年轻的获奖者。

当时在英国，与布拉格一起研究X射线衍射技术的还有巴克拉（Charles Glover Barkla，1877～1944）和莫塞莱（Henry Gwyn～Jeffreys Moseley，1887～1915）。巴克拉在利物浦大学毕业后，赴剑桥大学在J.J. 汤姆孙指导下进修，后回利物浦大学任教。1913年他进入剑桥大学工作后，就开始研究X射线的性质。根据这种射线的散射性质，他证明了当X射线被特定的元素散射时，会产生具有特定贯穿性的射线。由于当时还没有找到测量X射线波长的方法，巴克拉利用标准厚度的铝片对特定射线的吸收量来确定实验结果。他发现了X射线的两种类型，把其中贯穿本领较大的称为“K辐射”，较小的则称为“L辐射”。这是了解原子内电子分布的第一步。这一情况很快被西格班（Karl Geoge Seigbahn，1886～1978）和玻尔所证实。由于对X射线的研究，巴克拉被授予1917年度诺贝尔物理学奖。在巴克拉研究成果的基础上，莫塞莱利用X射线衍射技术确定和比较了各元素的标识X射线辐射波长，证实了巴克拉的设想，即标识X射线波长随元素原子量的加大而均匀地减小。莫塞莱把这一规律归因于原子量增大时，原子中的电子数增加，核中正电荷也在加大（后来才发现，核电荷反映了核内

带正电的质子数)。这一发现导致了门捷列夫元素周期表的一项重大改进,就是从按原子量排序改变为按核中质子数排序,这样做免去了原来排序中的两个周期性的例外。

一般认为,X 射线的晶体结构分析是由巴克拉、W. H. 布拉格以及莫塞莱三人开创并打下基础的。特别是 W. H. 布拉格在伦敦大学担任职务后,开始组织他自己的学派。在 1932 年,他担任皇家研究所的领导人之后,这个充满活力的研究小组进入戴维—法拉第研究实验室,改变了该室死气沉沉的局面,他们的工作使英国走在晶体研究领域的前沿。

20 世纪初是原子物理发展的黄金时代,30～40 年代核物理研究又处于蓬勃发展时期,在这期间,固体物理虽有发展,但只不过是不引人注意的一股潜流。直到第二次世界大战之后,固体物理才开始引人注目,在这个转折中,W. L. 布拉格做出了重要的贡献。

在卢瑟福去世后,W. L. 布拉格继任了卡文迪什物理学教授,这是一个举足轻重的职位。当时该实验室在世界上享有盛誉,该室历届教授及其指导下的研究生对物理学做出过杰出的贡献。特别是卢瑟福任职的时期,更是人才辈出、硕果累累,它已成为世界核物理研究的中心。布拉格继任以后,对科学研究的方向进行了必要的调整,转向固体物理研究。在晶体研究方面,他大胆扶植关于蛋白质结构分析与 DNA 结构的研究;与此同时,也支持英国天文学家赖尔 (Sir Martin Ryle, 1918～) 关于射电天文学的研究方向。

对于布拉格大胆的决策,当时许多人感到困惑不解。例如戴森 (Freeman John Dyson, 1923～) 感到在剑桥学不到物理了,只好离开剑桥来到美国的普林斯顿,后来他在那里以提出量子电动力学的重整化问题的出色工作而闻名于世。他于 70 年代曾在一篇题为《物理学的未来》的文章中,回忆道:"当时的英国物理界都在埋怨布拉格,说他损坏了卡文迪什的光荣传统。但是,事隔 30 年之后,对这个问题应当有新的估价。不能不承认,布拉格的变革取得了巨大的成功。"

事实上,从当时的情况看,英国继续在核物理领域保持领先地位的可能性是极小的。由于经济条件决定,英国不可能在加速器方面与美国竞赛,因而不可能阻止高能物理的中心从剑桥往加州伯克利转移。失去了核物理的优势,却换来了其他两个领域的领先地位。X 射线衍射晶体分析的研究,导致了克里克和沃森确定了 DNA 双螺旋结构,发现了由碱基配对的序列确定的生物遗传密码,这不仅在分子生物学上有划时代意义,也是 20 世纪最重大的科学成果之一,它显示出凝聚态物理在边缘学科方面具有强大的生命力。正是卡文迪什实验室在二战后开创的广义晶体学研究,包括分辨率为原子尺度的常规结构分析、电子晶格成像技术、分辨率为数十埃的电子衍射成像技术,以及分辨率更高的扫描电镜、光学显微镜及 X 射线形貌术等,构成了当今材料科学的基础。

继布拉格父子测定氯化钠、氯化钾等晶体结构,揭开了晶体分析的序幕以后,晶

体结构分析的理论与实践又有了很大的进展。20 世纪 20 年代后期发现了电子衍射术，第二次世界大战后又发现了中子衍射术，为晶体结构分析增加了研究手段。1927 年，美国物理学家戴维孙（Clinton Joseph Davison，1881～1958）和革末（Laster Helbert Germer，1896～1971）一起发现了低能电子衍射现象。同一年，G.P. 汤姆孙使用了不同的方法独立地证实了电子的波动性。

进一步的研究证明，电子衍射像 X 射线衍射一样，也遵循布拉格公式，它们有共同的几何原理，利用电子衍射也可以进行物相鉴定、测定晶体取向和原子的位置。由于电子的波长较 X 射线短，所得到的花样能既简单又直观地反映晶体的空间结构，使对电子衍射底片图样的解释以及晶体结构的分析大为简化。此外，晶体对电子的散射本领较对 X 射线强，大约为对 X 射线散射本领的几十万倍，强烈的散射能力，既使电子束在晶体中的穿透深度变小，又使得衍射束的信息变强，因而使电子衍射技术具有极突出的优点。只要微小量的试样，就可以获得足够强的衍射信息，特别适于研究薄膜、微晶、微区的结构分析。在电子衍射晶体结构分析的基础上发展的电子显微镜与扫描电子显微装置，不仅能使人们直接观察小于微米级的物体微区组织形态，而且还能对样品进行逐个微区的点扫描成像分析。电子衍射技术已成为一门专门的学科，电子显微镜在固体材料研究中已获得越来越广泛的应用。例如研究晶体表面薄膜结构、固体结构中的有序、无序与各种缺陷以及点缺陷形变中的位错增殖和运动、晶体中的脱落、沉析、微晶物相及与基体间的取向关系、磁畴等。

与 X 射线衍射、电子衍射相类似，中子也具有波粒二象性，中子束在晶体中也能产生衍射，并且也遵守布拉格定律。最早对中子束的衍射现象进行观测的是费米。20 世纪 50 年代以后，对中子的衍射现象及中子谱线研究逐渐普遍，原因在于中子衍射与 X 射线衍射相比，具有它自己独有的特点。X 射线衍射主要起因于晶体原子中核外电子云的散射，中子衍射则主要起因于原子核的散射，因而可用于探测轻元素和区分原子序数相近的各元素。由于 X 射线衍射时，轻元素的衍射较弱，常被重元素原子的衍射所掩盖，应用 X 射线衍射研究轻元素已不适用。中子束的穿透能力强，适合于研究样品的整体结构。中子具有磁矩，能与原子所具有的任何磁矩发生作用，中子衍射图样可以提供晶体的顺磁、抗磁、铁磁、磁畴等信息，因而中子衍射是研究磁性物质的重要手段。此外，由于一种元素中的各种不同的同位素对中子散射的本领不同，因此利用中子衍射又能区分同位素。由于有上述优点，中子衍射晶体结构分析已成为引人注目的研究课题。

第二节　导电理论研究

早在 19 世纪，有关物质导电的宏观经验定律，如欧姆定律、电阻定律、基尔霍夫定律等就已建立。但是，有关物质导电的机理还是一个重要的研究课题。

一、早期的介质导电理论

最初，人们认为，物质的电磁性应归结为其中所含的带电粒子的作用，并试图用经典电磁理论做出解释，其代表人物有韦伯、克劳修斯等人。其中韦伯提出的理论最典型。1831 年，韦伯经洪堡（Alexander Von Humboldt，1769～1859）介绍与高斯结识，后又经高斯介绍，被任命为格廷根大学的物理学教授，以后他大部分时间一直与高斯合作，研究电磁学问题。他认为一切物质的电磁现象均可归结为单个带电粒子在电磁场中的运动，而运动电荷之间的作用力又是最基本的，它们决定了各种电磁现象。1852 年，他试图用电流体和带电粒子解释电阻，1875 年，他又用分子参数表征电导率，由此发展到一切物质都是由带电粒子组成以及由它们决定物质的电性、磁性以及热学性质的物理思想。这一观点，对德鲁德（Paul Karl Ludwig Drude，1863～1906）和洛伦兹发展电子论均具有较大的影响。

在这一方面，值得提到的还有克劳修斯与阿伦尼乌斯（Svante August Arrhenius，1859～1927）。克劳修斯主要致力于热力学与统计物理学的研究。在创立气体分子运动论的同时，他还提出了有关溶液中电流的理论。他认为，在电作用下，液体分子被分开（离解）而形成带电微粒（离子），又由于这些带电微粒的运动，才形成电流。他的这一见解在当时并未被接受，后经整整一代人的时间，才被接受下来。阿伦尼乌斯是一名瑞典化学家。早在乌普萨拉大学读书时期，就对溶液的导电现象产生了兴趣，后来他成功地解释了像氯化钠这类溶液的导电现象。他认为，这类导电是由颗粒性的带电粒子运动形成的，并于 1884 年在他的博士论文中，完成了电离理论。这篇论文经过了长达 4 小时的严格考试，仅得了最低的及格分数。在 19 世纪 90 年代，J. J. 汤姆孙发现电子、贝克勒尔发现放射性之后，人们突然认识到阿伦尼乌斯电离理论的价值。1895 年，阿伦尼乌斯被任命为斯德哥尔摩大学教授，1903 年正是由于那篇勉强被通过的论文，使他荣获诺贝尔化学奖。阿伦尼乌斯不仅对当时刚刚兴起的物理化学的发展起到了关键作用，也为物质导电理论的形成做出了重要的贡献。

19 世纪 90 年代，洛伦兹在麦克斯韦电磁理论的基础上，发展了有关金属导电的电子论。当时，人们对阴极射线的性质已经做了不少的研究，对它的本质——电子束的认识也是在这一时期完成的。1897 年，J. J. 汤姆孙测出了电子的荷质比，直到这时，人们才接受导电介质中的电流是由颗粒性带电粒子的运动所形成的思想。

二、金属电子论

在洛伦兹提出的电子论的基础上，经过发展逐步建立起金属电子论。在这方面做出贡献的有李开（C. V. Eduard Riecke，1845～1915）、德鲁德、J. J. 汤姆孙和洛伦兹。

金属电子论的核心内容是研究金属中电子的状态与行为，并由此解释金属的各种性质，如光学性质、热电效应、霍耳效应、热导率与电导率的关系等。

金属电子论首先对金属的电结构提出了明确的图像。1897 年，电子被发现。不久，1898 年李开和 1900 年德鲁德分别先后提出了金属自由电子气模型，认为金属中有许多自由电子，它们不束缚于个别原子而在整块金属中自由运动，就像气体中的分子一样。然后，德鲁德用自由电子气理论引入平均自由程概念，推导出了金属的热导率与电导率，从中找到它们之间的关系，从而解释了导电性较好的金属也是热的良导体的事实。利用这一理论，又能很好地说明 1853 年实验得出的维德曼-夫兰兹定律，即在一度温度下，许多金属电子的热导率 λ 和电导率 σ 之比为一常量。其结果与 1928 年 A. 索末菲由金属自由电子模型出发，解玻耳兹曼输运方程得出的 $\frac{\lambda}{\sigma T}=\frac{\pi^2}{3}\left(\frac{k}{e}\right)^2=$常量几乎完全一样。在李开与德鲁德等人工作的基础上，1905 年，洛伦兹建立了更为完整的自由电子气模型。这一模型认为，在金属中负电荷就是在阴极射线中被发现的电子，它们可以在原子实之间自由地运动，而正电荷则固定在金属原子上。金属的许多特性，如导电、导热性等，均与自由电子的运动有关。应用电子气模型，金属电子论引入了气体动力论的理论与方法，用于讨论自由电子的行为，并由此计算出金属各方面的性质，成功地解释了维德曼-夫兰兹定律。此外，金属电子论还比较成功地解释了欧姆定律等宏观导电实验定律。

在早期，将金属电子论用于磁性研究的有韦伯、佛克脱（W. Voigt）和 J. J. 汤姆孙等人的工作，但获得较大成功的则是法国物理学家朗之万。朗之万在 19 世纪 90 年代末期去剑桥大学，在 J. J. 汤姆孙指导下学习。而后，为获得博士学位，于 1902 年回到法国，在皮埃尔·居里的指导下学习。1904 年，朗之万在法兰西学院获得物理学教授职位。1895 年，皮埃尔·居里用实验测定出顺磁性与抗磁性的磁化率与温度的关系。1905 年朗之万运用基元磁体的概念对物质的顺磁性与抗磁性做了经典的解释。他认为，抗磁性是物质所共有的。这是因为在原子内部，作轨道运动的电子在外磁场作用下，进行拉莫尔进动，进动方向与外磁场同向，电子带负电，于是产生反磁场的附加磁矩，因而形成了物质的抗磁性。而顺磁性和铁磁性只是分子（或原子）具有固有磁矩的物质才会具有，对这种物质，抗磁性与顺磁性相比较要弱得多，由于被掩盖才没有表现出来。朗之万还成功地应用电子论，对居里关于磁性物质的三定律做出了成功的解释。他认为，由于在原子内部，电子的运动不易受到温度的影响，抗磁性不容易随温度而变化。对于金属铋这个例外，朗之万像 J. J. 汤姆孙一样，把它归结为自由电子的效应。随后，他又应用经典统计计算了顺磁物质磁化强度随温度的关系。结果是，当分子磁矩的取向能与热运动能相比极小时，磁化率与绝对温度成反比。

在朗之万的论文发表之后仅两年，另一位法国物理学家外斯（Pierre Weiss，1865～1940）将朗之万的理论加以推广，对铁磁性进行了比较成功的解释。1887 年，外

斯以第一名的成绩毕业于苏黎士工业学院，随后去法国深造。他对磁学，特别是朗之万关于物质磁性的理论感到极大的兴趣。他认为除了顺磁性与抗磁性外，铁磁性也应与内部的带电粒子行为有密切关系。他首先建立了一个铁磁性的理论模型，认为在原子间，使磁矩排列起来的相互作用可以等效于一个磁场，他把它叫做分子场，后又被称为平均场，以与一般的磁场相区别。分子场与物质的磁化强度成正比。在有外场存在时，作用在一个原子上的总磁场将为外场与分子场之和。他利用这一模型，解释了物质内部原子磁体间的强耦合，从而使它们的磁矩朝向一个方向排列，形成强度累加起来的磁畴。在无外场时，各个磁畴的磁矩取向是任意的，一旦有外场作用，磁畴沿同一取向排列，就会形成很强的磁性。外斯用平均场理论成功地论证了居里温度的存在，理论结果与实验值大致相符。

尽管金属电子论取得了多方面的成功，但是它不久就遇到了多重困难。例如根据理论，自由电子对金属比热容的贡献很大，这与实验不符。在对磁性的解释上，朗之万与外斯等人建立的也只是唯象的理论，它们只能对部分实验现象做出解释。这些困难直到 1925～1926 年，海森堡和薛定谔等人建立了描述微观粒子运动的量子力学之后，才得到了一定程度的克服。

量子力学的建立，使人们有可能真正地从微观角度认识物质的各种属性。电子具有自旋，根据泡利不相容原理，电子服从费米-狄拉克统计，这就使人认识到，尽管在金属导体中，自由电子的密度很高，却只有在空态，即费米能级附近，电子的跃迁才能对金属的许多属性，例如电导率、比热等有贡献。

1927 年，泡利首先应用量子统计成功地推导出自由电子气的顺磁性。1928 年，索末菲应用费米—狄拉克统计成功地计算了自由电子气的比热容与输运现象，解决了经典理论的困难。按照费米统计，由于只有处在费米能级 ξ 附近的电子，才有可能被热激发，被激发的电子数近似等于 $N\frac{kT}{\xi}$，k 为玻尔兹曼常数，T 为绝对温度，N 为自由电子的总数，由于$\frac{kT}{\xi}$值比 1 小得多，所以按量子统计计算出来的值要比经典电子论计算值$\frac{3}{2}Nk$ 小很多。索末菲在对热电效应的解释上，也有较大的改进。

三、能带理论的建立

有关电子论的另一重要进展，是由布洛赫(Felix Bloch，1905～1983)完成的。1924 年，布洛赫进入苏黎世的瑞士联合理工学院学习工程学。一个偶然的机会，他看到了索末菲的论文《原子结构与光谱》，虽然当时他不能完全看懂，却从中体验到一种美的享受。此后，他定期出席在苏黎世举行的每一次物理讨论会。在那里听到了德拜、薛定谔等人的报告，并开始与苏黎世物理学家及研究生们广泛接触，深为他们的工作所

吸引。经过他的刻苦努力，终于掌握了薛定谔的新波动力学以及海森伯的矩阵力学。1927年，布洛赫随德拜来到了莱比锡，成为了海森伯的研究生。为确定博士论文的题目，海森伯出了两个题目供他考虑，布洛赫选择了其中有关金属导电理论的课题。在德鲁德、洛伦兹、泡利以及索末菲早期工作的基础上，金属导电理论领域的研究已经有了不小的进展，他们都把导体电子视为自由电子理想气体，却忽略了自由电子与正离子之间的相互作用，布洛赫认为这是不尽合理的。经布洛赫的计算证明，当电子与正离子相隔一个原子距离时，静电作用与费米能级相近。这表明，尽管自由电子气假设考虑了电子的动能，但它忽略了电子在正离子势场中的势能。布洛赫假定电子处于晶体正离子的周期势场中，然后利用薛定谔方程说明电子在周期势场中的运动规律。布洛赫找到了单个电子的波函数应满足的薛定谔方程，证实方程解的一般形式为一个周期性函数，后被称为布洛赫函数，由它可以反映晶体中电子的运动性质，以及在周期势场中，单电子态的能量。相应的波矢量变化范围被限制在波矢空间的一个多面体内，这个多面体后被称为布里渊区，其形状和大小与晶体的结构有关。布洛赫的理论结果还表明，处在固体中的电子能量状态是一系列的能带，而不是一个个分立的能级。按照泡利不相容原理，在每个能带中，可以容纳晶体元胞数目2倍的电子，按从低能态到高能态的顺序，晶体电子填充各能带。而价电子所处的能态及能量更高的空带均与固体的许多物理、化学性质有密切的关系。

1928年的夏天，布洛赫完成了他的全部计算工作，博士论文的题目为《晶格中电子的量子力学》，当时他仅23岁。这篇著名的论文问世后，同一研究领域的工作者立刻意识到能带结构将是决定固体各种特殊性质的关键。进一步的研究发现，能带结构是决定固体各种特殊物理性质的决定因素，应用它不仅可以说明金属、半导体和绝缘体的区别，而且也是说明物质磁性、输运性质以及超导性质的先决条件。半个世纪以来，对具体材料的能带进行理论计算和实验研究，一直是固体物理中的重要基础课题。1928年，布洛赫首先提出描述晶体单电子波函数的紧束缚近似法。他先考虑电子在点阵附近所受到的原子实场的作用，再把电子处于整体晶体中作共有化运动，对其整体波函数取各个点阵原子的束缚态的线性组合作近似描述。这种方法又称为原子轨道线性组合法，它只适用于不同原子之间轨道重叠较少的窄禁带固体，因此以此为基础的能带理论还只是一个雏形。

从1930～1950年，能带理论又有了进一步的完善与发展。在能带理论的计算方面，一些理论物理学家提出许多独出心裁的巧妙方案。1933年，维格纳（Eugene Paul Wigner，1902～1995）和塞茨（Frederick Seltz，1911～　）在能带理论中引入群论，并提出能带结构计算的元胞法。他们把整个晶体划分成分属于各个原子的许多“元胞”，每个元胞以阵点为中心，由与近邻的阵点连线正交的等分面围成。对体心立方的金属钠，可以设想由于电子间的强斥力作用，同时有两个电子处在同一元胞中的几率极小，所以价电子只具有元胞中心的离子实势，而其他元胞的离子实势及其余电子对它的

作用势将抵消。这样一来，计算该电子波函数的薛定谔方程将与钠原子一样，所不同的只是边界条件。后来科林加（J. Korringa）、科恩（W. Kohn）和罗斯托克（N. Rostoker）又对元胞法加以补充与完善，构成了简称为KKR的方法。这种方法在各种实际固体，特别是包含d电子的过渡金属及其他化合物的能带计算中，有广泛的应用。除了元胞法以外，赫林（C. Herring）于1940年提出了正交平面波法，以及在此基础上进一步发展的赝势法。然而从理论上严格按公式计算赝势相当繁难，所以在实用中常选用含有可调节的经验参量的各种近似给出结果，再由结果与实测的晶体或原子数据相比较中，确定这些参量的具体数值。所以这种对固体的能带计算方法，带有半经验的性质，有广泛的应用。1937年，斯莱特（John Clarke Slater，1900～1976）还提出了另一种与元胞法近似的缀加平面波法。此外还有格林函数法、线性化能带计算法等。

在此基础上，人们对于各种简单金属、半导体、许多含d电子的过渡金属以及结构比较简单的化合物的能带结构都做了比较可靠的理论计算，理论计算与实验结果基本相符。

第三节　超导物理进展

超导现象的发现与极低温度的探索密切相关，而极低温度的获得是从气体液化技术开始的。

一、气体的液化和低温的获得

18世纪末和19世纪初，通过降温和压缩的办法，已经实现了氨、氯气和亚硫酸等气体的液化。19世纪20和30年代，通过法拉第等人的工作，硫化氢、氯化氢、二氧化硫、乙炔、二氧化碳等气体都实现了液化。到了1854年，除了氢、氧、氮等几种气体外，当时已知的其他气体都能被液化了。用增加压力的办法企图使这几种气体液化的一切实验的失败，使它们获得了“永久气体”的名称。

1863年，英国化学家和物理学家安德鲁斯（Thomas Andrews，1813～1885）发现，装有液态和气态二氧化碳的封闭玻璃管被加热到88°F（30.92℃）时，二氧化碳的液态和气态之间的分界面完全消失；当温度高于这个值时，无论如何增大压力，二氧化碳也不能液化。安德鲁斯把这个温度称为二氧化碳的“临界温度”，他设想每种气体都有自己的临界温度。1869年他又提出，所谓“永久气体”，都只是临界温度很低的气体；只要找到了获得更低温度的方法，它们也是可以被液化的。

1852年，焦耳和W. 汤姆孙在研究气体的内能与体积变化的关系时，发现充分预冷的高压气体通过多孔塞在低压空间绝热膨胀后，一般要发生温度变化，这就是“焦

耳-汤姆孙效应”。焦耳-汤姆孙效应为获得低温提供了一个新的途径。

1877 年 12 月，在法国科学院的同一个会议上，法国的铁器制造商盖勒泰特（L. Cailletet，1832～1905）和瑞士的皮克泰特（Raoul Pictet，1846～1904）宣布他们用不同的方法各自独立地液化了氧。凯勒泰特将冷却到－29 C的氧加压到 300 个大气压，然后使它突然膨胀而降温，得到了凝聚成雾状的氧蒸汽云。皮克泰特则是采用逐级降低温度的级联冷却法，获得了液态的氧雾。

1875 至 1880 年，德国工程师林德（Karl Linde，1842～1934）根据焦耳-汤姆孙效应，采用“循环对流冷却”的方法，制成了气体压缩式制冷机，发展了气体液化技术。1883 年奥匈帝国的乌罗布列夫斯基（Szygmunt F. Wroblewski，1845～1888）和奥耳舍夫斯基（Karol S. Olszewski，1846～1915）用这种方法使氧气和氮气被大量液化。1898 年，英国杜瓦（James Dewar，1842～1923）成功地实现了氢的液化。

这时，荷兰物理学家卡末林-昂内斯（Heike Kamerlingh-Onnes，1853～1926）开始在这一领域的研究中发挥领导作用。他在莱顿建立的低温实验室，用氯甲烷达到－90 C，用乙烯达到－145 C，用氧气达到－183 C，用氢气达到－253 C。昂内斯制造出一台非常精巧的装置，先用蒸发氢使氦气冷却，再利用焦-汤效应使氦气液化，终于在 1908 年 7 月 10 日首次制出液态氦，这使人类首次获得 4K 的低温，从而消除了最后一种“永久气体”。

向愈来愈低的温度逼近，虽然愈来愈困难，但总还是可能的。那么是否存在着降低温度的极限呢？早在 1702 年，法国物理学家阿蒙顿已经提到了“绝对零度”的概念。他由空气受热时体积和压强都随温度的变化而变化设想，在某个温度下空气的压力将等于零。根据他的计算，这个温度按后来提出的摄氏温标约为－239 C。后来，兰伯特更精确地重复了阿蒙顿的实验，计算出这个温度为－270.3 C。他说，在这个“绝对的冷”的情况下，空气将紧密地挤在一起。他们的这个看法没有得到人们的重视。直到盖·吕萨克定律提出之后，存在绝对零度的思想才得到物理学界的普遍承认。

1848 年，汤姆孙在确立热力学温标时，重新提出了绝对零度是温度的下限的观点。

1906 年，德国物理化学家能斯特（Walther Nernst，1864～1941）在研究低温条件下物质的变化时，把热力学的原理应用到低温现象和化学反应过程，发现了一个新的规律，这个规律被表述为：“当绝对温度趋于零时，凝聚系（固体和液体）的熵在等温过程中的改变趋于零。”德国物理学家普朗克把这一定律改述为：“当绝对温度趋于零时，固体和液体的熵也趋于零。”这就消除了熵的常数取值的任意性。1912 年，能斯特又把这一规律表述为绝对零度不可能达到原理：“不可能使一个物体冷却到绝对温度的零度。”这就是热力学第三定律。

二、低温超导电性的发现

随着低温的获得，人们注意到纯金属的电阻随温度的降低而减小的现象，金属电阻在低温区的变化成了人们关注的问题之一。杜瓦发现铂的电阻随温度下降，可是比理论预期要降的慢得多。1902 年，开尔文也提出一种想法，他认为随着温度的降低，电子将凝结在金属原子上，这会使金属的电阻变得无限大。受这一想法的影响，昂内斯最初认为，电阻先随温度降低到一个极小值，然后开始加大，并在绝对零度时变到无穷大。正由于有这一想法，昂内斯把他的研究重点转移到低温电阻上来。事实证明，这是一个极有远见的选择。

昂内斯于 1870 年进入格罗宁根大学学习，第二年就获得学士学位。其后去海德尔堡，在本生和基尔霍夫指导下学习，以后在格罗宁根大学获得博士学位，1882 年成为莱顿大学物理系教授并就任实验室主任之职，当时年仅 29 岁，此后担任这一职务达 42 年之久。昂内斯就职后，把实验室的全部研究方向都确定在低温方向，建成了当时世界一流的低温实验室，从而使莱顿大学成为世界著名的低温中心。

昂内斯和克雷（J. Clay）先后在液氦温度下测量金、汞、银、铋、铝和铅等几种不同金属的电阻，发现不同纯度的金属在低温下电阻的变化不同，金属越纯，温度降低时电阻变得越小，其中金与铂最为显著。1911 年 2 月，昂内斯发现，在 4.3K 时，铂的电阻是一个定值。他认为，这个定值是由杂质引起的，如果铂很纯净，很可能会在氦的沸点，电阻消失为零，所以应该放弃在绝对零度时电阻趋于无限大的想法。昂内斯甚至利用普朗克量子概念，并类比爱因斯坦 1907 年提出的量子固体比热理论，提出新的电阻理论，用以说明在绝对零度下，金属的电阻减小为零。

昂内斯选择汞作研究对象，因为汞在常温下可以连续用蒸馏法提纯。测量结果表明，“在 3K 时，发现电阻降到 3×10^{-6}欧姆以下，即为其在摄氏零度电阻值的一千万分之一。”这说明“纯汞的电阻可以变为零，至少找不出与零的差异”。这实际上是人类第一次观察到的超导电性。昂内斯的这一结果于 1911 年 4 月及 5 月先后以论文的形式发表出来。

1912 年 12 月，昂内斯研究小组陆续对其他金属进行考察，结果发现金属铝、锡和汞一样，也具有低温超导特性。1913 年 2 月至 5 月间，昂内斯连续发表四篇论文，公布了他们的两项重要发现。其一是，超导体电流越强，临界转变点就越低；其二是，即使是不纯的汞，电阻消失的方式也和纯汞一样。这一结果出乎人们的预料，它表明超导电阻理论并不像原来设想的那样。

1913 年 9 月，在华盛顿召开的第三届国际制冷会议上，昂内斯正式提出了“超导态”概念。在极低温度下，某些金属将显现超导电性。这一结论虽已被世人所承认，但是在当时，人们还只是把超导电性看做正常导电机制的一个特殊情况，企图把超导机

制纳入原有的导电理论体系，而没有认识到它们之间质的区别。

为进一步精确测量在超导态下，金属的电阻究竟小到什么程度，在1914年4月至5月间，昂内斯设计了一个巧妙的实验。他先降低温度，使一个铅制的闭合线圈进入超导态，再撤去外磁场，线圈产生感应电流，然后观察感应电流的衰减情况。结果发现，直到液氦完全蒸发，在两个多小时内，没有看到电流有丝毫衰减的迹象。经过详细计算，该线圈的超导态电阻的上限值只是0℃时电阻值的2×10^{-11}倍，以致完全可以认为超导态时的电阻为零。

1914年，第一次世界大战爆发，莱顿的超导电性实验研究几乎处于停顿状态。可是在这一期间，美国国家标准局的西耳斯比（Francis Briggs Silsbee）却完成了一项重要的理论工作。他把超导体的临界电流与临界磁场联系了起来，在缺少足够的实验数据的条件下，大胆地提出了一项重要的假设：电流的临界值就是当电流自身的磁场为临界磁场时的电流值。西耳斯比把两种表面上不同的现象联系起来，并指出其中的磁效应更为根本，这对以后的超导研究产生了重要的影响。1926年，西耳斯比的假设被昂内斯等人所证实。

三、完全抗磁性的发现

1933年，德国的迈斯纳（Walter Meissner，1882～1974）和奥克森费尔特（R. Ochsenfeld）在超导电性的研究中，又做出了一个惊人的发现。迈斯纳是由学工而转为学习物理学的，他也是少数几个在普朗克那里获得博士学位的学生之一。1908年，他进入帝国物理技术研究所工作，1934年任慕尼黑技术大学物理学教授，在那里一直工作到退休。迈斯纳从1913年起开始低温领域的研究，当时，帝国大学物理－技术研究所要建造一套液化氢的装置，在1922～1925年又建造了一套液化氦的装置。由于迈斯纳受到过理与工的双重教育，使他非常胜任这一工作。在此基础上，该研究所建造了低温物理实验室。在这里，迈斯纳先后发现了钽、钛、钍、铌以及一些碳化物、硫化物、硅化物及氮化物的超导电性，有的化合物临界温度Tc竟然高达10K。

1911年，超导体的零电阻效应被发现后，在相当长的时间里，人们一直认为超导电性是超导体的最本质的性质，却忽略了超导体的磁性质。

迈斯纳从前人的工作中注意到，超导体在有磁场时的转变中，有滞后现象存在。他说："这种磁滞后现象首先使我想到可能是磁导率发生了变化。在产生超导电性时，如果用来测量的电流和它的磁场分布保持不变，那就没有理由出现磁滞后现象。"于是，他与奥克森费尔特进一步做了实验研究，得到了与前人认识截然不同的结果：当物体进入超导态以后，外部空间的磁场分布将发生变化，使超导体内部的磁感应强度保持为零。这说明，超导体具有特殊的磁性质，处于超导状态时，它相当于一个磁导率μ为零的抗磁体。这一发现，被后人称之为"迈斯纳效应"。迈斯纳效应的发现，使人们对

于超导态的本质有了一个全新的认识，也为可逆热力学在超导方面的应用奠定了基础。

四、超导电性的唯象理论

超导电性被发现之后，昂内斯在第一届索尔维会议上报告了这一结果。在这次会议上，朗之万首次从热力学的角度讨论了超导电性。他认为，应该用相变讨论正常态到超导态的转变。1924 年，继昂内斯接任莱顿大学昂内斯实验室主任的荷兰物理学家开索姆（Willem Hendrik Keesom，1876～1956）利用热力学理论，推导出正常态与超导态的熵差和临界场对温度导数之间的关系，但这一工作没有引起人们的注意。

1930～1932 年间，昂内斯实验室的工作人员继续对液氦和超导体深入研究。他们发现，在 2.19K 时，氦的比热有突变并在转变点比热不连续变化。据此，埃伦菲斯特于 1933 年首次提出了热力学中的二级相变概念。接着，他的学生拉特格斯（A. J. Rutgers）把在二级相变下导出的公式用于超导体，得出开索姆曾得出的转变点比热与临界场对温度导数之间的关系，这就是后人称作的拉特格斯公式，它与实验结果符合得很好，显示了把热力学理论用于超导体的可能性。

受到拉特格斯的启发，在荷兰泰勒实验室工作的戈特（Cornelis Jacobus Gorter，1907～1980）在超导态磁场 B＝0 情况下，应用热力学方法同样导出了拉特格斯方程。几个月以后，当迈斯纳-奥克森费尔特效应被发现以后，戈特立即在《自然》杂志上发表论文指出，处于超导态的超导体内部磁场可能永远为零。“在迈斯纳效应的基础上，超导态似乎可以不仅用 $E=0$，而且 $B=0$ 的假设来完成我以前的考虑。”1934 年，戈特与卡西米尔（Hendrik Brugt Gerhard Casimir，1909～　）合作，从更普遍的角度讨论了超导体的热力学处理问题，并提出一个引人注目的“二流体”模型。他们认为，在超导体中，有两种电子流体，其中有序的电子处于“晶相”，它们是对应于无阻电流的超流电子。在较高的温度下，另一小部分电子则处于气相。这一模型的提出，为以后超导理论的发展打下了重要的基础。

在 1950 年以前，除了戈特－卡西米尔的热力学理论与二流体模型以外，在超导电性的唯象理论中，比较成功的还有伦敦兄弟的电动力学理论。1932～1933 年间，在苏黎世的一次学术会议上，泡利曾提出，考虑到电子有惯性，认为超导体电场会立即产生无限大电流的假定是不合理的。他认为，应当计及电子的加速过程。1933 年 8 月，德国物理学家贝克尔（R. Becker）、黑勒（G. Heller）和桑特尔（F. Santer）在题为《论超导球内电流的分布》论文中，利用加速方程和麦克斯韦方程给出外磁场变化引起的感生电流的精确解。这个解表明，超导电流仅存在尺度极小的表层中。

由于纳粹对犹太人的迫害，流亡到英国的伦敦兄弟，F. 伦敦（Fritz London，1900～1954）与 H. 伦敦（Heintz London，1907～1970）研究了许多超导实验结果后，提出了另一种看法。他们认为，在超导体中，存在有两部分电子，一部分电子与普通

导体的电子相同，称为正常电子，它们的行为遵守欧姆定律；另一部分电子则与超导电性有关，它们在运动时不受任何阻力，称为超导电子。1935 年，他们联合发表了一篇《超导体的电磁学方程》的论文，不仅给出了描述超导体电导的无限大以及迈斯纳效应的结果，他们还提出了一个重要的预言，这就是超导电流与磁场仅在超导体表层穿透深度 λ（其数量级为 10^{-5} 厘米）存在，表层电流对外磁场起到了屏蔽作用，而使内部的磁场永远为零。

由于伦敦方程预言了表面透入层的存在，而且当超导体的尺寸与透入层的深度 λ 相近时，磁场会透入到样品的中心，这样将使小尺度的超导体不具有完全抗磁性，它在磁场中的能量就会比大块超导体低，从而使临界磁场高于大块样品。这一推论为实验检验提供了一条途径。然而，在当时制备小尺度的超导样品是很困难的。1939 年，英国物理学家休恩伯格（David Shoenberg）利用汞的胶体颗粒首次从实验上得出磁场穿透深度 λ 的直接证据。

进一步的实验还发现，锡、铟等超导体的 λ 测量量，以及临界磁场值与样品尺寸的关系跟伦敦理论的计算值不相符。1953 年，皮帕德（Sir Alfred Brian Pippard，1920～　）根据一系列超导体微波表面阻抗测量值，提出了一个相干长度的概念，并对伦敦理论做了非局域的推广。他的结果不仅成功地解释了穿透深度 λ 与纯度的关系，而且说明了磁场对 λ 的影响。为了解释伦敦理论与一些实验事实间的矛盾，1950 年，京茨堡（Vitaly Lazarevich Ginzburg，1916～　）和朗道（Lev Davidovich Landau，1908～1968）在朗道二级相变理论的基础上，又引入了一些假设，提出了一个京茨堡－朗道方程，即 G-L 方程。他们利用这个唯象的 G-L 方程，不仅成功地算出磁场的穿透深度、界面能、小样品的临界磁场等，而且还预言出超导体具有一些宏观量子现象。1959 年，Л. П. 戈科夫用超导微观理论（BCS）的表述形式，也推导出 G-L 方程，使 G-L 方程的正确性进一步得以证明。

20 世纪 30 年代，超导唯象理论有了快速的发展。作为认识超导机制的必经阶段，发展唯象理论是必要的。事实证明，在 F. 伦敦提出的唯象理论中，已经提出了许多有关超导微观图像的看法。它们不仅是深刻的，也是正确的。以唯象理论作为认识的第一步，再过渡到更为本质的微观理论，这是物理学中经常采用的研究方法。

五、超导电性的微观理论（BCS 理论）

20 世纪 30 年代以来，金属电子导电理论在许多方面取得了成功，但它却不能解释超导现象。在量子论建立后不久，F. 伦敦就指出，超导环内的磁通是量子化的。因此，超导电性应该是宏观世界中的一种量子现象。伦敦关于超导磁通量子化的预言于 1962 年被证实。不少人认为，金属电子导电理论所使用的自由电子模型对超导体不再适用，应充分考虑电子间以及电子与正离子间的相互作用。为此，超导物理界在电子间的库

仑作用以及电-声相互作用方面展开了广泛的研究。

1947 年，海森伯根据电子间的库仑作用，提出了一种超导的微观理论。他认为，在超导体中，靠近费米面的电子，由于“普通的相互作用”而产生一种凝聚，由此“导致由运动电子格子构成的自发电流”。另一位物理学家科佩（H. Koppe）在此基础上，得到了超导体在有限温度下的热性质，以及临界场的存在和取值等。然而，由于海森伯把超导电性完全归结于库仑作用引起，致使他的理论遇到了多方面的困难。它不仅与布洛赫定理矛盾，而且也解释不了为什么只有少数金属具有超导态这样的基本事实。按他的说法，只要温度足够低，所有的金属都应具有超导性质。

1948 年，玻恩和我国物理学家程开甲提出了另一个有影响的超导理论。他们利用一些经验定律，根据能带结构底部与顶部的能级分布关系，提出在动量空间中有非对称的占领态，它们对应于自发电流。但是，由于在当时对一些细节无法计算，同时也与布洛赫定理相矛盾，致使这一理论未被广泛接受。

1950 年，流亡英国的德国物理学家弗罗里希（Herbert Frohlich，1905～　）迈出了关键的一步。他指出，金属点阵的振动可以等效为声子，而电子与声子的相互作用是产生超导电性的关键，金属中的电子正是通过交换声子而相互吸引的。他首次用场论的方法处理电子-声子的相互作用，他认为电子通过吸收并放出虚声子引起能量改变，并用二级微扰理论计算出电子的自能变化。结果发现，如果电子和声子相互作用足够强，在动量空间中，电子会呈现一种新的分布，这就是超导态。这一理论成功地解释大多数碱金属不具有超导性，而超导体多为不良金属的事实。弗罗里希电子-声子的相互作用理论的第一个巨大成功，是对同位素效应的预言。根据弗罗里希的理论，超导体中所含同位素的质量越轻，超导转变温度就越高。1950 年 5 月，美国国家标准局的麦克斯韦（Fmanuel Maxwell）和拉特格斯大学的雷诺兹等人分别独立发现，汞的超导转变温度 T_c 与其同位素的质量有关，其关系恰与弗罗里希的理论预言一致。同年 6 月，美国物理学家巴丁（John Bardeen，1908～1991）用变分波函数的方法也得到了几乎与弗罗里希同样的结果，再一次为电-声相互作用的理论提供了证明。

弗罗里希和巴丁的研究虽然取得了一些突破，却仍有不少的困难与问题。例如，他们仅仅考虑了电子在振动场中的自能，却没有充分考虑电子和声子相互作用能，在微扰理论的使用上，也存在一定的问题。

超导微观理论（BCS）的一个关键步骤是库珀电子对概念的提出。1955 年，巴丁的超导理论遇到困难。他意识到，要处理带有吸引相互作用的费米气体多体问题，需要借助量子场论这一有力工具，他认为：“对一个适当的理论来说，框架已经有了……所需要的是带有根本性的新观点，特别需要一个真正恰当的超导态物理图像，以及有序参数——如果它存在——的本质。”

杨振宁向巴丁推荐了号称“来自东部的量子技师”的库珀。库珀（Leon North Cooper，1930～　）1954 年由于原子核理论方面的研究，获哥伦比亚大学博士学位。他对量子

场论尤为精通。这时，另一位才华横溢的巴丁的研究生施里弗(John Robert Sehrieffer，1931～　)也应邀加入了这个三位一体，他们共同合作，展开对超导微观理论的研究。当时，建立超导微观理论的二个基本要素已经具备。首先，F. 伦敦提出的动量空间中动量的一种长程有序的观点，揭示了超导电性的本质之一，同时皮帕德有关电子相干长度的观点，也引起了人们的重视；其次，有关超导体电子能谱中存在能隙的实验证据逐渐增多；此外，随着同位素效应的发现，以及弗罗里希和巴丁对其理论的探索，已明确了电子-声子的相互作用是产生超导电性的主要原因。这些均表明，当时正处在超导微观理论诞生的前夜。库珀果然不负众望，在他来到的第二年，就迈出了关键性的一步，提出了以“库珀对”而闻名的电子对概念，为 BCS 理论奠定了基础。库珀直接从动力学出发，考虑了存在相互吸引作用时，在金属中描述电子态的等能面，即费米面上，存在有一对自旋反向的电子，只要有净的吸引作用，无论这种吸引多么微弱，它们都能形成一种能量较低的束缚态，这两个电子即组成电子对。库珀还证明，当它们的总能量为零时，束缚最大，从而对偶的能量最低。库珀还预言，在金属费米面上，这种电子对的集体，将会显示超导态的许多平衡特性。

库珀的电子对概念为超导理论准备了一个新的图像，施里弗又通过对电子对态“占有率”的考虑，提出了超导态基态的波函数，并导出了能隙方程。在这些研究成果的基础上，巴丁、库珀和施里弗三人一道，终于在 1957 年建成了完整的超导微观理论。按他们三人姓氏的第一个字母，又称做 BCS 理论。为此，三人共获 1972 年诺贝尔物理学奖。其中巴丁又曾因半导体方面的研究，而与肖克莱 (William Shockley，1910～1989) 和布拉顿 (Walter Houser Brattain，1902～1987) 共获 1956 年诺贝尔物理学奖，成为物理界连获两次诺贝尔奖的第一人。

BCS 理论的建立是集体的成果，组织者是巴丁。这一理论认为：在电子-声子相互吸引以及电子-电子相互排斥作用彼此抵消之后，电子间仍有剩余的吸引作用，而且在费米面附近结成两两的电子对。它们的波函数大量相干重叠，因而在具有一个皮帕德相干长度的线度空间内，将有 10^7 数量级的电子对。在没有电流的基态，它们的动量均为零；而有电流时，所有电子对具有动量 p，当电子与晶格碰撞，使动量变化时，与它配对的电子动量将相应变化，以保持电子对总动量不变。大量具有相同总动量 p 并速度相同的电子对就构成了超导电流。

BCS 理论取得了巨大的成功，应用它可以导出伦敦方程、皮帕德方程以及京茨堡-朗道方程等超导态重要关系，从而可以解释有关超导电性的各种现象，其结果都与实验有很好的符合。

BCS 理论不仅揭示了超导电性的秘密，它对物理学的其他领域也产生了深刻的影响，它被誉为“自量子论发展以来，对理论物理最有贡献的重要理论之一”。然而，该理论是以近自由电子模型为基础，是在电子－声子作用很弱的前提下建立起来的。对于有些超导体，如汞和铅的一些现象还不能用它解释。对 BCS 理论需要直接从电子－

声子相互作用模型方面加以改进，此外，它还需要利用标准的量子场论为工具，这样建立起来的即为强耦合理论。这一理论后来也有一定的发展，如 A. Б. 米格达尔提出了一个有关电子－声子相互作用的定理；以后，又由 Г. М. 埃利阿斯贝格和南部阳一郎（Yoichiro Nambu，1921～ ）得到的一个自洽的联立积分方程组等。强耦合理论与 BCS 理论相比，不仅有了很大的改进，而且对探索高临界温度超导材料也有很好的指导作用。

六、超导隧道效应的发现

日本物理学家江崎玲于奈（Leo Esaki，1925～ ）在研究半导体二极管，考查窄宽度 p-n 结的导电机制时发现，有时与预料的相反，会出现反向电阻随电流的加大而减小的负阻现象。经过进一步研究，他认为这是部分电子穿透厚度大约 100 个原子的阻挡层而引起的。这些穿透阻挡层的电子可以起到某种开关的作用，这就是后人称之的“半导体隧道效应”。1957 年，江崎玲于奈把这一发现写入他的博士论文，他于 1959 年在东京大学获博士学位。同年，他到美国国际商用机器公司工作，1973 年，由于半导体隧道效应的重要发现而获得诺贝尔物理学奖。

江崎玲于奈的发现引起了物理学家们的兴趣，也使美国物理学家加埃沃（Ivar Giaever，1929～ ）受到启发，于是开始研究超导体的隧道效应，结果取得了成功。加埃沃于 1952 年获机械工程学学士学位。毕业后，几经转折，最后于 1958 年受聘于纽约州斯克内克塔迪的通用电气研究室做实验工作，后来他发现自己的物理知识要比数学差得多，不得不边工作边在夜校学习，1964 年又拿到博士学位。

开始，加埃沃在实验室研究将薄膜用于电子器件方面的课题。他的合作伙伴费希尔（J. C. Fisher）也是机械工程师出身，他们在实验物理方面几乎没有什么基础，因此曾连遭失败。几个月之后，终于摸索到了一整套方法。他们采用真空蒸镀法，制备金属薄膜，并用自然生长的氧化层充当绝缘层，把金属膜分离开。最后，在覆有氧化层的薄膜上，交叉地镀上几条铝膜，制成几个隧道结。大约在 1959 年 4 月，加埃沃与费希尔连续观察到几次成功的隧道穿透实验现象。为了进一步证实实验中出现的电传导是一种隧道效应，而不是由其他原因产生的，加埃沃把研究工作与超导电性联系了起来。

BCS 理论已经证明，超导体的基态与激发态之间只有一个很小的，但非零的能量差，这种特征表现为一个在费米能级处的能隙禁区。为了研究这个能隙，并设法实验测量它，在 BCS 理论诞生的前后，人们大约用了近 20 年的时间。伯克利的廷克海姆（M. Tincham）与他的几个学生用实验验证了能隙的存在。这一结果不仅为 BCS 理论提供了一个证明，也使人们意识到，若是电子能够通过一片非常薄的绝缘层进入超导体，这个绝缘的阻挡层就会改变输出与输入电子金属的势差，因而就有可能改变注入

能，单个电子就有可能一次性地穿透阻挡层。为了证明这个设想，加埃沃在铝上覆盖一层极薄的氧化铝绝缘薄膜，这就是铝-氧化铝-铅的隧道结。因为在氦的沸点，铅是超导体，铝却不是，因而这一隧道结又是一个超导体-势垒-普通金属体系。最初的两次实验都失败了，因为氧化层太厚，当时所用的仪器也十分简陋，只有一只电压表和一只安培计，它们难以检测通过厚氧化层的弱电流。后来，减小氧化铝的厚度，终于在1960年发现了超导体单电子的隧道效应，论文于当年发表。在诺贝尔奖演讲中，加埃沃这样回忆说："在第三次实验中，我不是仔细地氧化第一层铝条，而是简单地把它放在空气中曝露了几分钟，就放回到蒸发台中去沉积交叉的铅膜。用这种办法得到的氧化层厚度大约不超过 30×10^{-9}m，所以我能顺利地用已有的设备测量电流与电压的特性。……当铅从正常态转变到超导态时，激动人心的是电流与电压特性发生了显著的变化。我立即用不同的样品重复了这个实验，一切顺利！"

1960年以后，加埃沃又进行了超导体－绝缘层－超导体隧道结的实验。根据BCS理论，隧道穿透效应的几率应正比于超导体中电子的态密度。如果在两块超导体之间出现隧道效应，这将在伏安特性曲线的特定区域出现负阻效应。很快地，加埃沃就在1.2K下（此时铝变为超导）成功地观察到超导体－绝缘层－超导体隧道结的隧道效应，并确实看到了负电阻特性，从实验上证实了隧道穿透效应的几率正比于超导体中电子的态密度的观点。由于对超导隧道效应的研究，江崎玲于奈与加埃沃共同分享了1973年诺贝尔物理学奖的一半奖金。

七、约瑟夫森效应的发现

约瑟夫森（Brian David Josephson，1940～　）曾就读于剑桥大学三一学院，从1961年10月起，他就在超导物理学家皮帕德（B. Pippart）的指导下做研究生。1962年还在读研究生的约瑟夫森研究了江崎玲于奈发现的隧道效应，对这一效应产生了浓厚的兴趣。1964年获得博士学位后，他担任剑桥大学三一学院的研究员，1974年任物理学教授，并在卡文迪什实验室从事研究工作。

对约瑟夫森效应的发现，安德森（Philip Warren Anderson，1923～　）起到了至关重要的作用。1961到1962年间，在美国贝尔实验室做研究工作的安德森应邀来到剑桥大学，以客座教授的身份与莫特（Sir Nevill Francis Mott，1905～1996）一起工作，共同研究半导体的性质。他对超导体也做过研究，成功地扩展了巴丁等人的理论，并研究了杂质对超导物质的影响。他的有关研究成果，使他与范弗莱克（John Hasbrouck Van Vleck，1899～1980）及莫特共获1977年诺贝尔物理学奖。在任剑桥大学客座教授期间，安德森开设了关于固态与多体理论的课程，约瑟夫森也听了安德森的课。在授课中，安德森介绍了"对称破缺"这一新概念，并用他自己表述的BCS理论赝自旋模型加以说明。这一概念引起了约瑟夫森极大的兴趣，它正是导致这一重要新发现的

契机。约瑟夫森曾在他的诺贝尔奖演讲中回忆道："我被'对称破缺'的见解强烈地吸引住了，想知道是否能有从实验去观察它的途径。原始对称的存在，意味着绝对相角 ϕ 不能观测到，但是并不排除观测到两个隔开的超导体函数 F 之间的相位差的可能性。然而，考虑到粒子数一相位的测不准关系，说明只有当两个超导体能够交换电子时，才能观察到这种相位差 $\Delta\phi$。当我发现一些观察结果暗示着，当在两超导体之间的足够薄的正常区域中有超导电流流过时，我认为这个超导电流应当是 $\Delta\phi$ 的一个函数。原则上我知道怎样计算这种超导电流，但是觉得它太难而不值得去一试……不过我能够做出一个这种电流对时间依赖关系的定性预言……我期待着一个频率以 $2eV/h$ 为周期而变化的电流。"

1962 年，科恩（M. H. Cohen）等人从理论上对超导体-势垒-正常金属系统隧道效应进行了计算。在计算中，他们引入了微扰论的方法，来计算隧道电流，但这种方法相对比较简单，较完备的分析则应采用隧道哈密顿量进行。但是这种计算对于势垒两侧都是超导体的情况，却是非常繁复的，用帕皮德的话来说，科恩是被吓住了。约瑟夫森看到科恩等人文章的预印本后，立即对势垒两侧都是超导体的情况进行了计算，终于得出了以前未曾料到的结果。经过与安德森、皮帕德共同讨论审核，论文以"超导隧道中可能有的新效应"为题，发表在新创刊的《物理通讯》第一卷第七期中。在这篇论文中，约瑟夫森做出了两个很重要的预言，这就是：在恒定的电压下，存在有交流超导电流，频率为 $2eV/h$；在零电压下，能出现一直流超导电流。

约瑟夫森的论文发表以后，立即引起了人们的注意，也有一些人持怀疑态度。他的导师皮帕德曾认为，两个电子同时产生隧道效应（即电子对的隧道效应）的几率非常小，因而观测不出什么结果。就连 BCS 理论提出者之一的巴丁，在一开始也对约瑟夫森的预言持怀疑态度。只有安德森不仅读懂了约瑟夫森的论文，而且认识到这一效应的重要性。他确信约瑟夫森是正确的，但也意识到实验检验将有许多困难。依他的估计，困难来自两方面，即地磁场与室温噪声的影响。在安德森等人的努力下，终于采用低阻超导结成功地用实验证实了零电压直流超导电流的存在。实验中还发现，约瑟夫森电流对磁场有非常灵敏的依赖关系，超导电流随磁场的变化与光学中的单缝衍射图十分相似。他们的实验结果在 1963 年发表。

与此同时，夏皮罗（S. Shapiro）也得到了约瑟夫森效应的间接证明。1963 年以后，人们不仅对约瑟夫森效应展开了广泛的实验研究，而且对它的实际应用也进行了深入的研究。以此为基础，一门新兴的学科——超导电子学诞生并发展了起来。由于在理论上预言了超导电流通过隧道阻挡层，也即约瑟夫森效应的提出，约瑟夫森获得了 1973 年诺贝尔物理学奖的一半奖金。

八、高临界温度超导材料研究

1957 年，BCS 理论提出后，尽管该理论可以比较满意地给出一些超导现象的解释，但是它对探索新的超导材料帮助不大。例如，它不能明确地回答临界温度是否存在有上限。BCS 理论只是一种弱耦合理论，它对超导体中的相互作用考虑得仍不够细致，又做了太多的简化处理，若用于实际研究，必须对它进一步作出修正与发展。

1960 年，苏联物理学家埃利阿斯贝格（Г. М. Элцащберг）提出，需要直接从电子—声子相互作用模型建立超导理论，而不是像 BCS 理论那样，用一个等效而简化的电子直接作用模型来替代它。为此需要利用标准的量子场论工具，这就是强耦合理论的基本思想。埃利阿斯贝格所发展的强耦合理论，其方程可以利用计算机求得较精确的数值解，与实验相比较，其精确度比 BCS 理论有了很大的改善。

1967 年，贝尔电话实验室的英国物理学家麦克米伦（W. L. McMillian）在强耦合理论的基础上导出一个临界温度公式，并得出两点预言：一是临界温度直接与声子的扰动频率有关，要提高临界温度，必须依靠材料的“弹性软化”；二是临界温度的提高，将受到电子-声子耦合强度平均值 λ 的限制。由此，从理论上推导出，临界温度的上限为 40K。1975 年，美国纽约大学石溪分校的艾伦和贝尔电话实验室的戴恩斯（C. R. Dynes）对这一问题又做了仔细的考察。他们把埃利阿斯贝格强耦合理论中的积分方程严格地变成无穷次代数方程来求解，导出了一个新的临界温度公式，并提出了提高临界温度的途径。

第一个具有高临界温度的超导体，是由德国物理学家阿舍曼（Von. G. Ascherman）和加斯蒂（E. Justi）等人在 1941 年发现的氮化铌（NbN），临界温度 T_c 为 15K，它的结构为 B-1 型。此后，陆续又发现了一系列 B-1 型结构的超导体，但临界温度均没有超过 18K。

1950 年，同位素效应被发现后，人们意识到声子对超导态的出现起着至关重要的作用。美国物理学家哈迪（G. F. Hardy）和修尔姆（John Hulm）首次发现 4 个 A-15 结构的超导体，其中钒三硅（$V_3SiV_3S_i$）最高的临界温度达 17.1K。1964 年，贝尔实验室的马梯阿斯（B. T. Matthais）发现了 A-15 结构的另一种重要超导材料铌三锡（Nb_3Sn），其临界温度是 18K 左右。紧接着，他又于 1967 年发展了 A-15 结构的三元化合物，其临界温度为 20.5K，首次突破 20K 大关。以后，人们又在 A-15 结构的化合物中，陆续发现了其他一些临界温度较高的超导体，其临界温度达到了 23.2K，这是贝尔实验室的泰斯塔迪（L. R. Testardi）在溅射制备的铌三锗（Nb_3Ge）薄膜中获得的。此后，这一纪录一直保持了十多年，直到 1986 年才有所突破。

1968 年以前，高温超导材料的研究处于十多年的停滞状况。在这阶段的探索中，人们尽管也摸索出一些规律，但是主要采用的是经验方法。由于 BCS 理论中，对是否存

在临界温度尚有争议，而在实验中又长时间没有发现更高临界温度的超导体，一些人把注意力转向了新的方向。

早在1950年，F. 伦敦在他的著作《超流动性》中，曾谈到超导研究与生物物理、生物化学和有机大分子的关系。1963年，美国斯坦福大学的利特耳（W. A. Little）也曾研究过有机超导材料问题。他认为，在具有长链状分子结构的有机材料中，如果有许多有机分子组成的侧链，主链上的电子之间通过交换侧链上电子激发而产生吸引力，就有可能出现超导性。这就是后来称作的超导激子机制。人们预料，这种机制有可能具有高临界温度。苏联的京茨堡也很快地看出激子机制提高临界温度的可能性，并提出介质－金属－介质夹层式的激子机制模型。1972年，美国的艾伦德（D. Alender）、布雷（J. Bray）和巴丁也提出了一个激子超导机制模型，使金属薄层与一半导体层密切接触，金属的费米面处于半导体的能隙中间，由于隧道作用，金属中的电子可以进入到半导体的能隙中去，并有一定的穿透深度，在半导体中的这个电子则可以激发起电子，从而与另一个电子形成电子对，这就是后人所称的ABB模型。

探索更高临界温度的超导体，成为各国超导领域科学家一直努力追求的目标。自1968年以来，人们已先后找出27种元素、数千种合金或化合物超导体材料。但是，临界温度一直没有突破Nb_3Ge薄膜中得到的23.2K。从1911年到1973年，超导临界温度平均每年提高0.3K。而在1973年后，尽管采用了多种方法，做了许多艰苦的努力，如晶体材料非晶化和颗粒化、声子软化、激光激发弱连结的超导结、加压和加第三种杂质元素等方法，在非晶态超导体、一维有机超导体、二维层状超导体、零维稀土磁性超导体、重费米高超导体、非平衡超导体、络化物超导体和高J_c的第二类超导体等中去寻找，都一无所获。从1973到1986年的13年中，临界温度一直没有提高。高临界温度超导的研究一度进入低潮，使不少人怀疑是否有高临界温度超导体存在。

1986年1月，高临界温度超导体的研究终于取得了突破性的进展。这一进展是从在国际商用机器公司（IBM）苏黎世研究室工作的瑞士物理学家缪勒（Karl Alexander Müller，1927～　）和他的学生、德国物理学家柏诺兹（Johannes Geog Bednorz，1950～　）开始的。1958年，缪勒在瑞士联邦工业大学获物理学博士学位，1963年进入IBM苏黎世实验室工作，1973年被任命为该实验室物理部负责人。1968～1969年，他曾担任苏黎世物理学会主席。而柏诺兹则在大学期间先后学过化学、矿物学和晶体学的有关专业知识，这些学习和训练为他以后研制陶瓷超导材料奠定了良好的基础。1982年，柏诺兹在瑞士联邦工业大学获博士学位，同年成为国际商用机器公司实验室的研究人员。从1983年起，柏诺兹开始与缪勒合作，研究高临界温度超导体这一公认的难题。

开始，他们一起检验了上百种金属氧化物，均不成功。后来，柏诺兹在一份期刊上看到法国卡昂大学化学家米歇耳（C. Michel）等人的一篇有关镧钡氧化物的研究论文，米歇耳很细致地研究了钡镧铜氧化物$BaLa_4Cu_5O_{13.5}$样品的电导、磁化率和热电势

等性质，却没有想到超导电性问题。柏诺兹与缪勒决定一试，他们采用与米歇耳不同的方法，制备了这种样品。在1986年1月27日，终于发现这种样品在35K开始出现超导转变。经再三核实之后，其结果于1986年4月以题为《在Ba-La-Cu-O系中可能的高T_c超导电性》的论文，发表在联邦德国的《物理学杂志》上。这篇被称作划时代的论文，一扫高温超导体研究中的沉闷空气，同时也标志着一个超导研究新时期的开端。

1986年10月，柏诺兹等人又提出了他们在Ba-La-Cu-O系统中获得了T_c为33K左右的报道。紧接着，1986年12月15日，美国休斯顿大学的朱经武等人报告了在处于压力下的La-Ba-Cu-O化合物体系中获得了40.2K的超导转变。同年的12月26日，中国科学院物理研究所宣布，他们成功地获得了转变温度48.6K的超导材料，并在少数样品中发现在70K左右有超导迹象。激动人心的进展相继在世界各地出现，人们期待着超导临界温度能突破液氮沸点77K大关。

很快地，在1987年2月16日，美国科学基金会正式宣布，朱经武领导的阿拉巴马大学和休斯顿大学组成的实验小组，在92K处观察到了超导转变。同年2月24日，中国科学院物理研究所宣布赵忠贤领导的研究集体获得了液氮温区超导体，起始转变温度在100K左右，出现零电阻为78.5K，超导材料为Ba-Y-Cu-O。在这一时期，全世界掀起了科学史上罕见的超导研究热潮，有关超导研究的新进展层出不穷。由于以液氮代替了液氢，为超导技术实际应用展开了广阔的前景。

缪勒和柏诺兹共同获得了1987年度的诺贝尔物理学奖。

思 考 题

1. 劳厄是如何发现X射线晶体衍射现象的？
2. 简述布洛赫在能带理论建立中的贡献。
3. 简述昂内斯关于低温超导电性的发现过程。
4. 超导电性的微观理论（BCS理论）是怎样建立的？
5. 缪勒和柏诺兹关于金属氧化物超导电性的发现有什么重要意义？

第十三章　非线性物理学研究进展

第一节　非线性现象的发现

线性是指量与量之间的正比关系；在直角坐标系里，这是用一根直线表征的关系。由于人的认识的发展总是从简单事物开始的，所以在科学发展的早期，首先从线性关系来认识自然事物，较多地研究了事物间的线性相互作用。线性科学在理论研究和实际应用上都有十分光辉的进展，在自然科学和工程技术领域，对线性系统的研究都取得了很大的成绩。

到20世纪60年代以后，情况才有了改变。由于电子计算机的广泛应用和由此发展起来的“计算物理”和“实验数学”方法的利用，人们从一些看起来不甚复杂的不可积系统的研究中，发现了确定性动力系统中存在着对初值极为敏感的混沌运动。人们越来越明白地认识到：“大自然无情地是非线性的。”在现实世界中，能解的、有序的线性系统只是少见的例外，非线性才是大自然的普遍特性；线性系统其实只是对少数简单非线性系统的一种理论近似，非线性才是世界的魂魄。恩里科·费米说：“圣经中并没有说过一切大自然定律都可以用线性方式来表示。”[①] 而且正是非线性才造成了现实世界的无限多样性、曲折性、突变性和演化性。

这样，就逐渐形成了贯穿物理学、数学、天文学、生物学、生命科学、空间科学、气象科学、环境科学等广泛领域，揭示非线性系统的共性，探讨复杂性现象的新的科学领域“非线性科学”。混沌理论就是在这种科学思想的背景下发展起来的。

一、庞加莱的三体问题研究

不论中国还是西方，“混沌”（chaos，又称“浑沌”）概念古已有之。面对浩瀚无垠的宇宙和繁纷多变的自然现象，古人只能凭借直觉对它进行模糊、整体的想像和猜测，逐步产生了混沌的概念。中国古代所说的“混沌”，一般是指天地合一、阴阳未分、氤氲渺蒙、万物相混的那种整体状态。它既含有错综复杂、混乱无序、模糊不清的意思，又有内在地蕴涵着同一和差异、规则和杂乱、通过演化从“元气未分”的状态产生出五光十色、多姿多彩的现实世界的丰富内涵。

---

① 卢侃、孙建华编译，《混沌学传奇》，上海翻译出版公司，1991年，第86页。

在古埃及和巴比伦的传说里，都提出了世界起源于混沌的思想。在《圣经》“创世纪”中说，起初神创造了天地，大地是空虚混沌，神灵运行于黑暗的深渊中，神说“要有光”，于是就有了光；神把光暗分开，于是就有了晨昏昼夜。这就是“创世”的第一天。这些借“神”的外衣所编织的动人神话，都反映了古人关于世界起源的共同思想：世界产生之前的自然状态是混沌，万物借分离之力从混沌中演化出来。

以牛顿力学为旗帜的科学革命，导致了把宇宙看做是一个巨大的精密机械，或者说就像一架精确运行的“钟表机构”。因为牛顿力学的核心是牛顿第二定律，它是一个二阶微分方程：这个方程的解，即物体的运动轨道，完全由两个初始条件惟一地决定。就是说，只要知道了物体在某一时刻的运动状态以及作用于这个物体的外部的力，就可以准确地确定这个物体以往和未来的全部运动状态。

对这个经典确定论的信心，充分体现在1812年法国科学家拉普拉斯关于一个高超“智者”的设想上。他写道：“假设有一位智者，它能知道在任一给定时刻作用于自然界的所有的力以及构成世界的一切物体的位置。假定这位智者的智慧高超到有能力对所有这些数据做出分析处理，那么它就能将宇宙中最大的天体和最小的原子的运动包容到一个公式中。对于这个智者来说，再没有什么事物是不确定的了，过去和未来都历历在目地呈现在它的面前。”[①] 拉普拉斯的设想实际上是提出了一个令人敬畏的命题：整个宇宙中物质的每个粒子在任一时刻的位置和速度，完全决定了它未来的演化；宇宙沿着惟一一条预定的轨道演变，混沌是不存在的；随机性只是人类智力不敷使用时的搪塞之语。

科学认识的步伐，走出一条“之”字形路线：“混沌”让位于“规则”——这是牛顿所建立的伟大功绩；而“规则”又产生出新形式的“混沌”。迈出这一步伐的第一人，是伟大的法国科学家庞加莱。

庞加莱被誉为是“一只脚站在19世纪，一只脚站在20世纪”的跨世纪天才学者，“是最后一位传统科学家，也是第一位现代科学家”。这位蓄胡须、戴眼镜、和蔼可亲、不修边幅、带着心不在焉的糊涂外表的沉思者，却是一位科学上的集大成者，在数学、天体力学、物理学和科学哲学等领域，都做出了杰出的贡献。他通晓他的时代的全部数学，在每一个重要分支里都做出了富有创造性的工作，这使他成为世界数学界无可争辩的领袖。正是这位科学巨擘，在确定论思想浓重笼罩着全部科学界的时候，却把智慧的眼光投向早被驱赶出科学园地的混沌深渊。他是在研究天体力学，特别是“三体问题”时发现混沌的。

1887年，瑞典国王奥斯卡二世（Oscar Ⅱ，1829～1907）悬赏2500克朗，征求天文学中一个重要问题的答案。这个问题就是“太阳系是稳定的吗？”其实这是牛顿本人早就提出来的一个老问题了。牛顿以当时已观测到的木星和土星运动的不规则性以及

① P. S. Laplace, Theorie Analytique des Probabilites, Paris (1886), p. vi.

彗星以极扁的轨道横穿所有行星的公转轨道所可能带来的干扰作用为依据，提出了太阳系的运动可能会陷入紊乱的担心。此后不少科学家都对这个问题进行过探索。直到1784年，拉普拉斯根据万有引力理论证明，太阳系是一个完善的自行调节的机械机构，行星之间的相互影响和彗星等外来天体所造成的摄动，最终都会自行得到改正。所以，太阳系作为一个整体是稳定的，它将无限期地继续做着目前的周期运动。拉普拉斯的答案并没有消除科学界的这个疑虑，没有阻止100年后瑞典国王的悬赏征文。

庞加莱向奥斯卡国王的难题发起了进攻。但是这个问题是太困难了，它涉及到了怎样研究复杂动力系统的稳定性这个深刻的问题。连庞加莱这样的天才学者，也未能彻底攻克它。但是，他却为了做这一工作而创立了一个新的数学分支——拓扑学，并大大推进了人们对这个历史难题的认识。他因此获得了这项奖金。

在太阳系中，包含着十多个比月球大的巨大天体，这是造成解题困难的根本原因。如果太阳系仅仅由太阳和地球组成，这就是一个“二体系统”，它们的运动是简单而规则的周期运动，太阳和地球将围绕一个公共质心、以一年为周期永远运转下去。然而，当增加一个相当大的天体后，这就成了一个“三体系统”，它们的运动问题就大大复杂化了。对短时间内的运动状态，可以用数值计算的方法来确定；但是由于根据牛顿力学所列出的方程组不能解析地求解，所以系统长时间的运动状态是无法确定的。

为了减少解决“三体问题”的难度，庞加莱采用了美国数学家希尔(George William Hill，1838～1914）提出的一个极为简化的三体系统，即“希尔约化模型”。三体中有一个物体的质量非常小，它对其他两个天体不产生引力作用，就像由海王星、冥王星和一粒星际尘埃组成的一个宇宙体系一样。这两颗行星就像一个“二体系统”一样绕着它们的公共质心做周期运动；但这颗尘埃却受到两颗行星万有引力的作用，在两颗行星共同形成的旋转着的引力场中做复杂的轨道运动。这种运动不可能是周期的，也不可能是简单的，看上去简直是乱糟糟一团（图13-1）。

为了用几何方法直观地描绘运动的情况，可以以描述系统状态的状态参量为坐标张成的“相空间”来描绘运动过程。某一时刻系统的状态在相空间里用一个点表示；系统状态随时间的变化，即系统运动方程的解，对应于相空间的一条曲线，称为“相轨道”；如果物体做周期运动，它的相轨道就是一条闭合曲线；如果曲线不闭合，则表示物体的运动是非周期的。但是，为了确定系统的运动是不是周期性的，与其自始至终地跟踪系统运动的全过程，不如只观察系统的相轨道是否总会通过同一相点。设想通过相空间中一点A（初始状态）做一个横截面（图13-2），如果系统的相轨道总在同一点A穿过截面，那么系统的运动就是周期性的；相反，如果系统的相轨道每次都在不同点穿过这个截面，它的运动就是非周期的。这个截面现被称为“庞加莱截面”。

庞加莱把他的截面方法应用于“希尔约化模型”的研究，以观察尘埃粒子的运动。庞加莱震惊了，他发现尘粒的运动如此复杂而且违反直觉。它的轨线多次穿过截面所形成的交点竟连缀成无穷多交点的“栅栏”（图13-3，现称为“同宿栅栏”）。

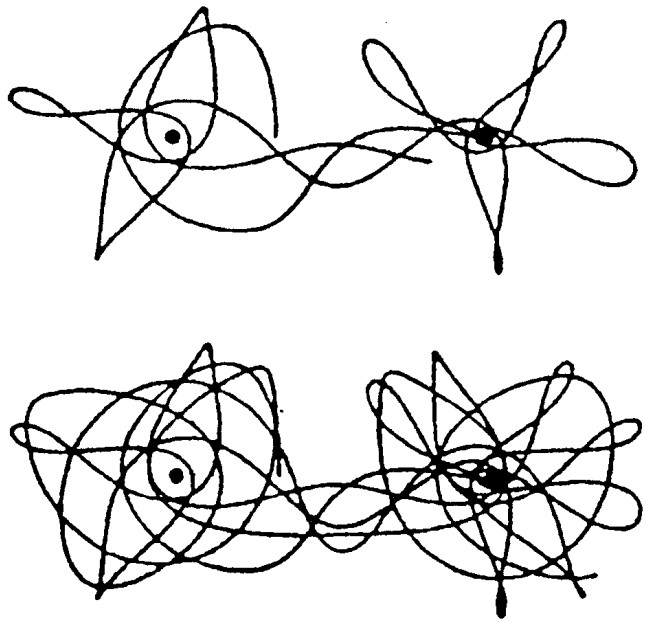


图 13-1　一粒尘埃绕两颗质量相等的固定行星的复杂运行轨道

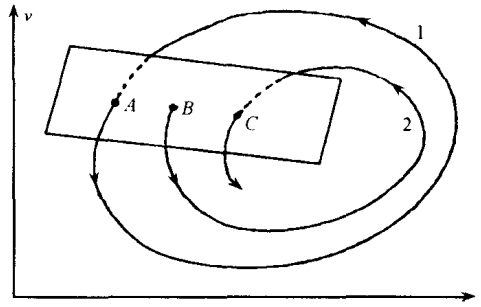


图 13-2　用庞加莱截面考察运动情况：
曲线 1 表示周期运动；曲线 2 表示非周期运动

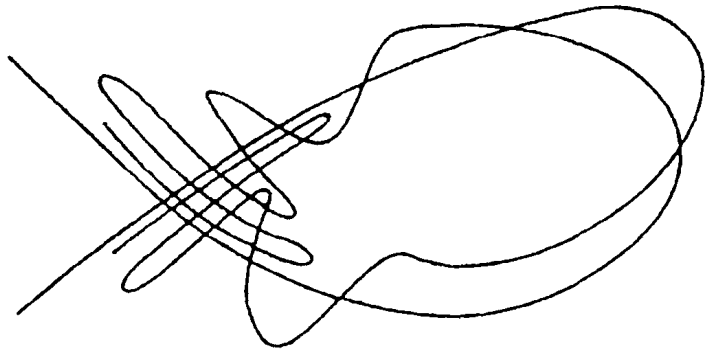


图 13-3　尘粒运动的“同宿栅栏”

他写道："当人们试图描画由这两条曲线和它们的无穷次相交（每一次相交都对应于一个双渐近解）构成的图形时，这些相交形成一种格子、丝网或无限密集的网栅结构；这两条曲线从不会自相交叉，但为了无穷多次穿过丝网的网节，它们必须以一种很复杂的方式折叠回自身之上。这一图形的复杂性令人震惊，我甚至不想把它画出来。没有什么能给我们一个三体问题复杂性的更好的概念了。"①

从截面上一点出发的系统，经过一个过程后，当它再穿过截面时，却在另一点交于庞加莱截面，简直无法预言它下一次将从哪一点穿过截面；实际上系统是以无规则点的序列频频穿过庞加莱截面的。这就是混沌，庞加莱在"三体问题"中发现了混沌！

这一发现表明，即使在"三体系统"，甚至是极为简化的"希尔约化模型"中，牛顿力学的确定性原则也受到了挑战，动力系统可能出现极其惊人的复杂行为。并不像人们原来认为的那样，动力系统从确定性的条件出发都可以得出确定的、可预见的结果；确定性动力学方程的某些解，出现了不可预见性，即走向混沌。

二、KAM 定理的提出

美国数学家伯克霍夫（George Birkhoff，1884～1944）是 20 世纪初少数几个认识到庞加莱动力系统研究工作的重要性的人物之一，他继承和发展了庞加莱的工作。

伯克霍夫把庞加莱截面方法用于探索哈密顿系统的一般行为。他发现微分方程的性质取决于正则级数的收敛性。如果正则级数是收敛的，则微分方程的解位于 N 维不变环面上。但实际上级数的收敛、发散与否取决于振幅的大小。当考虑非线性作用时，椭圆不动点周围的不变环面有些遭到破坏，有些继续存在但有点变形。

1932 年，伯克霍夫证明，对应于不变环面的消失，存在不稳定区域，它可以被一条扭曲映射下的不变曲线所包拢，而区域内并无环绕原点的不变曲线。他实际上已经证明，任意接近外边界的点，在映射作用下可以任意接近内边界，反之亦然。在研究不稳定区的结构时，伯克霍夫让一个收缩性的扭曲映射作用于两条不变曲线之间的不稳定区域，结果不稳定区域被映射到一个更小的子区域中；映射的迭代最终把原区域变成了一个面积为零、结构极其复杂的极限集合，位于原区域中的点的轨迹都收敛到这个集合中去了。

伯克霍夫实际上已经发现了"混沌行为"和现在所说的"奇怪吸引子"的实例，他当时称之为"奇特曲线"。更值得提出的是，他已经意识到这种行为是动力系统的通有行为。

除伯克霍夫等极少数人之外，几乎没有人沿着庞加莱的道路前进。直到 20 世纪 60

---

① 庞加莱，《天体力学新方法》（New Melhods of Celestial Mechanics）（1892）；译文参见《上帝掷骰子吗？——混沌之数学》，第 73～74 页。

年代以后，对动力系统的研究才有了长足的进展。

1960 年前后，苏联数学家柯尔莫果洛夫（A. N. Kolmogorov）、阿诺德（V. I. Arnold）和莫塞尔（J. Moser）提出并证明了以他们的姓氏的字头命名的 KAM 定理。这个定理的基本思想是 1954 年柯尔莫果洛夫在阿姆斯特丹举行的国际数学会议上宣读的《在具有小改变量的哈密顿函数中条件周期运动的保持性》短文中提出的。后来他的学生阿诺德做出了严格的证明，莫塞尔又推广了这些结果。

KAM 定理是关于近可积系统的一个重要的、一般性结论，有十分重要的意义。假定系统的哈密顿函数分为两部分

$$H = (H_0)(J_i) + \varepsilon V(J_i, \theta_i)$$

其中 H_0 部分是可积的，V 是使 H 变得不可积的扰动，只要 ε 很小，这就是一个弱不可积系统。KAM 定理断言，在扰动较小，V 足够光滑，离开共振条件一定距离这三个条件共同成立下，对于系统的大多数初始条件，弱不可积系统的运动图像与可积系统基本相同。可积系统的运动限制在由 N 个运动不变量决定的 N 维环面上，而弱不可积系统的绝大多数轨道仍然限制在稍有变形的 N 维环面上，这些环面并不消失，只有轻微的变形，称为不变环面。不过，只要有非零的扰动，总会有一些轨道逃离不变环面，出现不稳定、随机性的特征。

大量的计算机数值实验表明，破坏 KAM 定理的任何一个条件，都会促使迷走轨线增多，使运动的不规则性和随机性增大，最终导致混沌运动。当然，这运动所遵循的仍然是决定性的牛顿力学方程式。所以，KAM 定理以一个限制性原理的形式，从反面泄露了有关牛顿力学面目的真实信息。它暴露出，确定性的动力系统，只要精确地从同一点出发，其运动就是一条确定的轨道；但是只要初始条件有无论多么微小的变化，其后的运动就会变得无序和混乱，就如同掷骰子一样，是随机和不可预测的，这就是牛顿力学的内禀随机性。

第二节　混沌理论的创立

一、洛仑兹的气象预报研究

混沌研究上的一个重大突破，是在天气预报问题的探索中取得的。

1922 年，英国物理学家和心理学家理查孙（Lewis Fry Richardson，1881～1953）发表了一篇题为《用数值方法进行天气预报》的文章。在文章的末尾，他提出了一个异想天开的幻想：在一个大建筑内，集聚一大批长于计算的工作者，在统一指挥下相互协调地对影响天气变化的各种数据进行计算。他估计，为了使天气预报和实际的天气变化达到同步，大约需要 64 000 个熟练的计算者。他设想，在遥远的将来，有朝一

日或许有可能发展出比天气变化还要快的计算手段，从而使天气预报梦想成真。

真是先知之见，不到30年，电子计算机就出现了，并且成功地用于天气预报。在牛顿力学确定论思想的影响下，当时科学家们对天气预报普遍持有这样乐观的看法：气象系统虽然复杂异常，但仍然是遵循牛顿定律的确定性过程。在有了电子计算机这种强有力的工具之后，只要充分利用遍布全球的气象站、气象船、探空气球和气象卫星，把观测的气象数据（气压、温度、湿度、风力等）都及时准确地收集起来，根据大气的运动方程进行计算，天气变化是可以做出精确预报的。

美国气象学家、麻省理工学院的洛仑兹(Edward Lorenz)最初也接受了这种观点。1960年前后，他开始用计算机模拟天气变化。

洛仑兹有良好的数学修养，他本想成为一个数学家，只是由于第二次世界大战的爆发，他成了空军气象预报员，使他成了一位气象学家。

洛仑兹把气候问题简化又简化，提炼出影响气候变化的少而又少的一些主要因素；然后运用牛顿的运动定律，列出了12个方程。这些方程分别表示着温度与压力、压力与风速等等之间的关系。他相信，12个联立方程可以用数值计算方法对气象的变化做出模拟。

1961年冬季的一天，洛仑兹用他的计算机算出了一长段数据，并得出了一个天气变化的系列。为了对运算结果进行核对，又为了节省点时间，他把前一次计算的一半处得到的数据作为新的初始值输入计算机。然后他出去喝了杯咖啡。一个小时后当他又回到计算机旁的时候，一个意想不到的事情使他目瞪口呆了，新一轮计算数据与上一轮的数据相差如此之大，仅仅表示几个月的两组气候数据逐渐分道扬镳，最后竟变得毫无相近之处，简直就是两种类型的气候了。开始时洛仑兹曾经想到可能是他的计算机出了故障，但很快他就悟出了真相：机器没有毛病，问题出在他输入的数字中。他的计算机的存储器里存有6位小数，0.506127。他为了在打印时省些地方只打出了3位0.506。洛仑兹原本认为舍弃这只有千分之一大小的后几位数无关紧要；但结果却表明，小小的误差却带来了巨大的“灾难”。两次输出的变化曲线（图13-4），可以清楚地看出来，开始时的两个隆峰还很好地相重叠，但到第三个和第四个隆峰时，就完全乱套了。这个结果从传统观点看来是不可理解的。因为按照经典决定性原则，初始数据中的小小差异只能导致结果的微小变化；一阵微风不会造成大范围的气象变化。但是洛仑兹是从事天气预报的，他对长期天气预报的失败是有深切感受的，这个离奇古怪的计算结果与他的经验和直觉是完全相符的，所以他深信他的这些方程组和计算结果揭露了气象变化的真实性质。他终于做出断言：长期天气预报是根本不可能的！

洛仑兹是个穿着气象学家外衣的数学家，他很快看出了气候变化不能精确重演与长期天气预报的不可能二者之间存在着一种必然的联系。基于这种认识，洛仑兹就把气候问题丢在一边，专心致力于在更简单的系统中去寻找产生复杂行为的模式。他抓住了影响气候变化的重要过程，即大气的对流，从表征着流体运动过程的纳维-斯托克

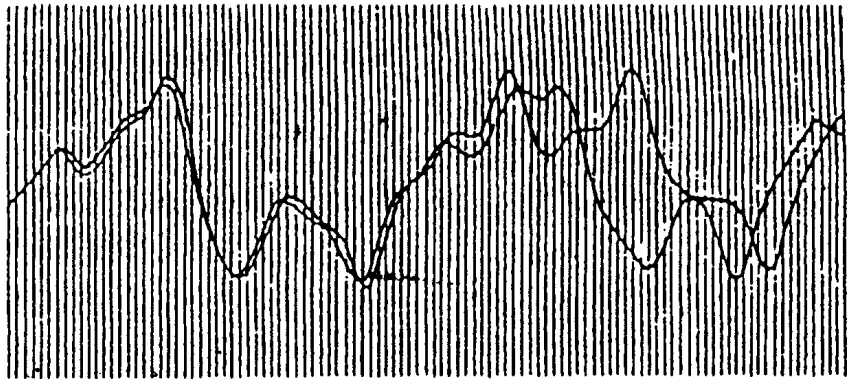


图 13-4　初始情况十分相近，却导致后果的巨大差异

斯方程组出发，经过无量纲化处理并做傅里叶展开，取头一、二项，得到傅里叶系数满足的一组常微分方程。与大气的实际对流运动相比，这组方程是大为简化了，它只是抽象地刻画了大气真实运动的基本特点，既考虑了流动的速度，又考虑了热的传输，与真实的大气运动是大体类似的。他建立的三个方程是

$$dx/dt = 10(y - x)$$
$$dy/dt = 18x - y - xz$$
$$dz/dt = (8/3)z + xy$$

x、y、z 是三个主要变量，t 是时间，d/dt 是对时间的变化率；常数 28 对应于不平稳对流刚开始后系统的状态。

这就是 1963 年洛仑兹发表在《气象科学杂志》20 卷第 2 期上的题为《确定性非周期流》中所列出的方程组。由于其中出现了 xz、xy 这些项，因而是非线性的，这意味着它们表示的关系不是简单的比例关系。一般地说，非线性方程组是不可解的，洛仑兹的方程组也是不能用解析方法求解的，惟一可靠的方法就是用数值方法计算解。用初始时刻 x、y、z 的一组数值，计算出下一个时刻它们的数值，如此不断地进行下去，直到得出某一组“最后”的数值。这个方法叫做“迭代”，即反复做同样方法的计算。用计算机进行这种“迭代”运算是很容易的。

洛仑兹把 x、y、z 作为坐标画出一个坐标空间，描绘了系统行为的相轨道，他吃惊地发现，画出的图显示出奇妙而无穷的复杂性（图 13-5）。这是三维空间里的双重绕图，就像是有两翼翅膀的一只蝴蝶；它意味着一种新的序，轨线被限制在某个边界之内，决不会越出这个边界；但轨线决不与自身相交，在两翼上转来转去地环绕着。这表示系统的性态永远不会重复，是非周期性的，从这一点来说，它又纯粹是无序的。正如这篇论文的标题所表示的，从确定性的方程和确定的初始状态出发，经过多次迭代后，却得出了非周期性态的结果。这就是混沌！

现在就可以说明什么是现代科学意义上的“混沌”概念了。1986 年在伦敦召开的

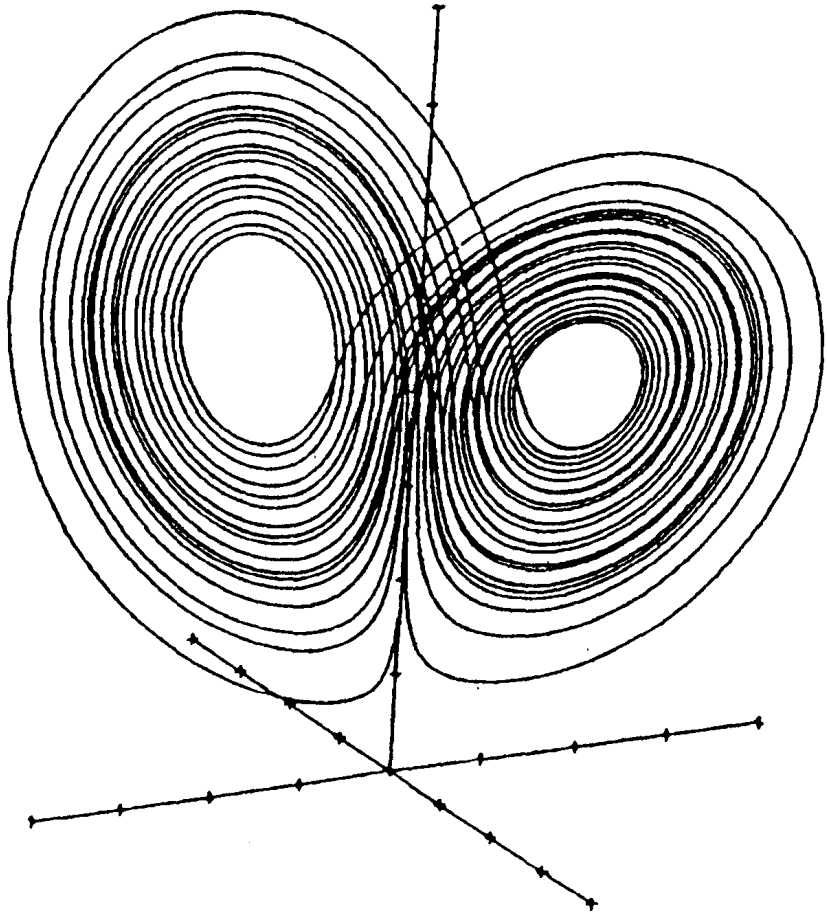


图 13-5　洛仑兹吸引子：轨线不重复地绕两叶回转

一个关于混沌问题的国际会议上，提出了下述的定义："数学上指在确定性系统中出现的随机性态"。传统观点认为，确定性系统的性态受精确的规则支配，其行为是确定的，可以预言的；随机系统的性态是不规则的，由偶然性支配，"随机"就是"无规"。这样看来，"混沌"就是"完全由定律支配的无规律性态"，这真是一个大自然的"悖论"。

经典力学断言，系统的行为或运动轨道对初值的依赖是不敏感的，知道了一个系统近似的初始条件，系统的行为就能够近似地计算出来。这就是说，从两组相接近的初值描绘出的两条轨道，会始终相互接近地在相空间里偕游并行，永远不会分道扬镳，泛泛的小影响不会积累起来形成一种大的效应。混沌研究却粉碎了传统科学中这种对近似性和运动的收敛性的信仰。处在混沌状态的系统，或者更一般地说对于一个非线性系统，运动轨道将敏感地依赖于初始条件。洛仑兹已经发现，从两组极相邻近的初始值出发的两条轨道，开始时似乎没有明显的偏离，但经过足够长的时间后，就会呈

现出显著的差异来（图 13-4）。小的误差竟能带来巨大的灾难性后果，这一点早在 1908 年就被目光敏锐的庞加莱洞察到了。他在他的名著《科学与方法》中写道："我们觉察不到的极其轻微的原因决定着我们不能不看到的显著结果，于是我们说这个结果是由于偶然性。如果我们可以正确地了解自然定律以及宇宙在初始时刻的状态，那么我们就能够正确地预言这个宇宙在后继时刻的状态。不过，即使自然定律对我们已无秘密可言，我们也只能近似地知道初始状态。如果情况容许我们以同样的近似度预见后继的状态，这就是我们所要求的一切，那我们便说该现象被预言到了，它受规律支配。但是，情况并非总是如此。可以发生这样的情况：初始条件的微小差别在最后的现象中产生了极大的差别；前者的微小误差促成了后者的巨大误差。预言变得不可能了，我们有的是偶然发生的现象。"[1] 这一段几乎是百年前的话，不正是我们近几十年才揭开的混沌来源之谜吗？

洛仑兹从他关于长期天气预报的研究中悟出的正是这个道理。对于任何小块地区气候变化的误测，都会导致全球天气预报的迅速失真。洛仑兹非常形象地比喻说：巴西亚马孙河丛林里一只蝴蝶扇动了几下翅膀，三个月后在美国的得克萨斯州引起了一场龙卷风。人们把洛仑兹的比喻戏称为"蝴蝶效应"。

二、周期倍化分叉的发现

在动力系统演化过程中的某些关节点上，系统的定态行为可能发生性质的改变，原来的稳定定态变为不稳定定态，同时出现新的更多的定态，这种现象叫作"分叉"（bifurcation）。分叉是由运动方程中参数的变化引起的，所以往往要用"参数空间"来描绘分叉现象。随着参数的变化，分叉可以一次接一次地相继出现，而这种分叉序列又往往是出现混沌的先兆，最终会导致混沌。

生物群体数量（"虫口"）变化的研究以及涉及到的一类典型一维映射的分叉现象的研究，在 20 世纪 70 年代混沌学的创立和发展中曾经起到过特殊的作用。

生态学家们一直试图为生物群体增减寻找一个数学模型。一个合理的简化就是用离散的时间间隔去模拟虫口的变化。因为许多生物群体的数目基本上都是按照一年的时间间隔变化的，而不是连续地随时间变化，它们的一代一代之间决不会重叠。因此，描写生物群体的方程不是连续的微分方程，而是比较简单的差分方程，这是一种迭代模型，即逐年逐年地反复用同一个函数进行数值运算，它可以反映由一个状态（数目）到另一个状态（数目）的跳跃变化。这个差分方程应该反映出以下影响虫口增减的因素：第一，虫口的增长必定与前一年的虫口数目成正比，这是一个线性关系，比例系数 k 即群体的增长率；第二，虫口的增长又受到空间、食物、流行病等许多因素

① 彭加勒著，李醒民译，《科学的价值》，光明日报出版社，1988 年，第 389～390 页。

的限制，不可能无限增长。实际情况是，群体小时稳定增长，群体适中时增殖量近于零，群体暴涨时急剧下降。

一个较好的方程是由迭代逻辑斯蒂映射所得到的非线性逻辑斯蒂（Logistic）差分方程

$$x_{t+1} = kx_t(1 - x_t)$$

x 表示虫口的相对数，它被定义为介于 0 和 1 之间的数，0 代表灭绝，1 代表群体的最大虫口数；t 表示时间，它只能以整数 0，1，2，3…跳跃；生殖增长率 k 代表了这一模型的一个十分重要的特征，表示拉伸或压缩的程度，也即非线性程度。参数 k 越低，意味着群体最终将在较低的数量水平上灭绝；参数 k 的值提高以后，群体的数量也不会无限增长，这是可以理解的。但是计算表明，在 k 值提高后，群体却不可能收敛于一个定态水平，这是令人费解的。

20 世纪 70 年代，美国普林斯顿大学的生态学家罗伯特·梅（Robert May）开始利用计算机对这种单一群体生物随时间而变化的最简单的生态学方程进行系统的研究。梅编制了计算机程序，慢慢增加 k 值，对方程进行数值运算。他发现，当 k 值小于 1 时，在 0 到 1 之间任意取初值 x_0，经过若干次迭代，虫口数趋于终态 $x^* = 0$，表示生物群体将灭绝。当 $1 < k < 3$ 时，任取初值 x_0，经过一系列迭代（演化过程）后，虫口数越来越趋于一个稳定态 $x^* = 1 - 1/k$。如取 $k = 2$，则虫口数将最终稳定在 $x^* = 0.5$；若取 $k = 2.4$，则 $x^* = 0.5833$，若取 $k = 2.7$，则 $x^* = 0.6292$；随着 k 值的增大，稳定平衡值也会增大，但系统的行为没有质的变化，都会达到一个稳定的定态（即虫口数达到一个稳定值）。

为了在全局上对逻辑斯蒂差分方程的解（即最终定态）做出了解，梅以参数 k 值的变化为横坐标，以群体最终虫口数为纵坐标，把二者的变化关系集拢在一张图上（图 13-6）。迭代计算发现，当 k 值超过 3 之后，系统的定态失稳了，这条线分裂为两条，虫口交替振荡于两年的两点之间，x^* 值在两个数之间一年一换地交替跃变，这是周期 2 循环。当 k 值增大到 3.5 左右时，周期 2 吸引子也开始失稳，出现周期 4 循环，群体的不同起始值 x_0 都收敛于以 4 年为周期的循环中，每 4 年返回近原值一次；当 k 值增至 3.56 后，周期又加倍到 8；k 到 3.567 时，周期达到 16。此后将更快地出现 32、64、128…的周期倍化序列。这就是“周期倍化级联”；倍周期就是分叉或双分枝现象。周期分裂再分裂，这种双分枝越来越快地发生，以致到 $k = 3.58$ 左右这种分裂突然呈现崩溃之势，周期性态就变成混沌，虫口的涨落再也不会确定下来，虫口的逐年变化完全成为随机的，全部区域染成了墨色。

这么简单的动力学系统，在非线性作用下，当 k 从 0 趋向 4 时，其动力学性态的复杂性逐步增加，即从定态变为周期性态，通过周期倍化级联而到达混沌性态。

但这还不是最终的图景。更令人惊奇的是，在这个复杂的区域中又会突然出现一个有正规周期的窗口（图 13-6 中狭窄的白条部分）；不过周期由偶数变为奇数。如当

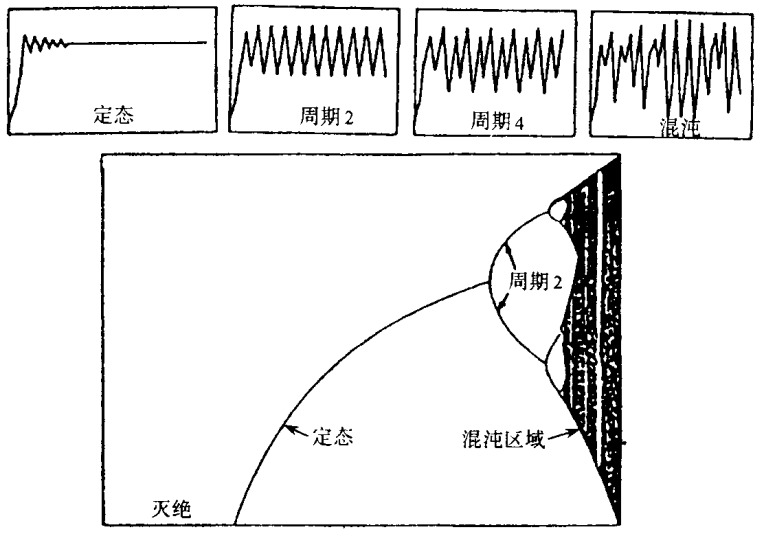


图 13-6　倍周期分叉与混沌

$k=3.835$ 时，出现周期 3 循环；轻微地增加 k 值，周期以新的“倍化级联”出现 6、12、24、48…周期。当 $k=3.739$ 时，将得到周期 5 循环，此后又是双分枝的 10、20、40…的周期。愈来愈快的倍周期双分枝再度爆发出现混沌。

图像特别明显地显示出，周期区内分叉序列中两个相邻分叉点之间的距离越来越快地缩短，而且似乎有某种规则的比例关系。美国物理学家费根鲍姆（Mitchell Feigenbaum）敏锐地觉察到了这种几何收敛的周期倍化级联现象的规则性，对收敛的速度——标度比的值进行了深入的探讨。1975～1976 年，费根鲍姆投入到对逻辑斯蒂映射的研究。不久他就发现了规律，相继的分叉点之差具有恒定的比率，前一个差值约为后一个差值的 4 倍，更精确地说，这二者的比率约为 4.669。对一个物理学家来说，恒定比率意味着标度率，表明物理学特征必在愈来愈小的标度上再现，这当然是极为重要的。费根鲍姆用这个方法对另一个映射即三角映射

$$x \to k\sin(x)$$

进行了计算，同样发现了周期倍化级联和几何收敛现象，更为惊人的是它的标度比值也是 4.669。

费根鲍姆利用计算机进行了更精确的计算。对于逻辑斯蒂映射，他很快得出了一个更精确的标度比值：4.6692016090；对三角映射重复计算，到小数点后 10 位，两数完全相同。看来标度比不依赖于方程，无论逻辑斯蒂映射还是三角映射，没有什么差别，这当然不可能是巧合。费根鲍姆的发现表明，在逻辑斯蒂映射一类的非线性映射中，倍周期分叉遵循一个普适性规律：当 $t\to\infty$ 时，分叉间距比存在一个极限值

$$\delta = 4.66920160910399097\cdots$$

同时，分叉也在越来越窄的宽度上出现，这又是一种普适性规律：相邻两个分枝间的宽度按一定比率缩小，缩小因子在$t\to\infty$时，也存在极限值

$$\alpha = 2.5029078750958928485$$

这两个常数被称为“费根值”(Feigenvalue)。

费根值的普适性具有相对性，它只适用于具有像抛物线那样的峰的单峰映射；对于多峰或者具有扁平锋和尖峰那样的情况，标度比值将会不同；但每一类的映射，其标度比总是相同的。

费根鲍姆的发现，是一条普遍适用于一切从有序转变到混沌的动力系统在转变点上的自然规律。这一发现的意义在于，动力系统中存在着标度变换，事物整体具有与其部分相似的结构，说明在完全确定的系统中不需要引入任何干扰，就可能出现不规则的随机运动，这是一种内禀特性。费根鲍姆的发现，推动了非线性科学的发展。

三、奇怪吸引子

早在1883年，庞加莱就发现了湍流问题。他发现，液体流中的涡旋通常不扩散，而是倾向于集中到单个涡旋之中。他说这一现象还没有恰当的数学解释。实际上他讨论的是二维现象，还不是真正的湍流，但与间歇现象有明显的联系，表明他已很接近湍流的探讨。

法国流体动力学家库埃特（M. M. Couette，1858～1943）为了研究流体被扭曲的“切变流”，曾制造了一个筒里套筒的双圆筒装置，中间装上水，使外筒固定，内筒旋转，有控制地进行切变实验。1923年，英国应用数学家泰勒（Geoffrey Ingram Taylor，1886～1975）利用这种旋转同心柱体进行实验。当内筒转速足够高时，发现流体不再平稳地转动，而是搅乱成成对的涡旋，涡旋会变成波状，波动又此起彼伏，出现麻花涡旋、辫子涡旋等螺旋模式；转速更高时，系统则呈湍流状（图13-7）。

那么，平稳流是如何变成湍流的呢？也就是说湍流开始的时候是通过什么样的步骤形成的呢？1944年，苏联物理学家朗道（Lev Landau，1908～1968）在一篇论文中提出了湍流肇始的一幅图景：当表征系统中外力与黏滞力竞争的无量纲雷诺数为零时，流体将做光滑的平稳流动；当由于外界的扰动而使雷诺数增大时，层流中分枝出一个周期轨道，对应于流体的周期运动；当更多的能量进入流体，即雷诺数不断增大时，每次都出现一个与上一个频率不和谐的频率；当频率数足够大时，拟周期运动即转变为湍流。这就是说，各种不同频率的运动的积累和叠加，就会产生非常复杂的湍流。1948年，德国数学家霍普夫（Eberhard Hopf，1902～1983）按照同朗道一致的思路，提出了一个更加详细的理论，即通过摆振的积累而由平稳层流转变为湍流的具体机制。此后20多年，霍普夫一朗道理论曾被广泛接受。

关于湍流的形成，目前流行的看法是认为，在层流中由于各种原因出现的扰动波，

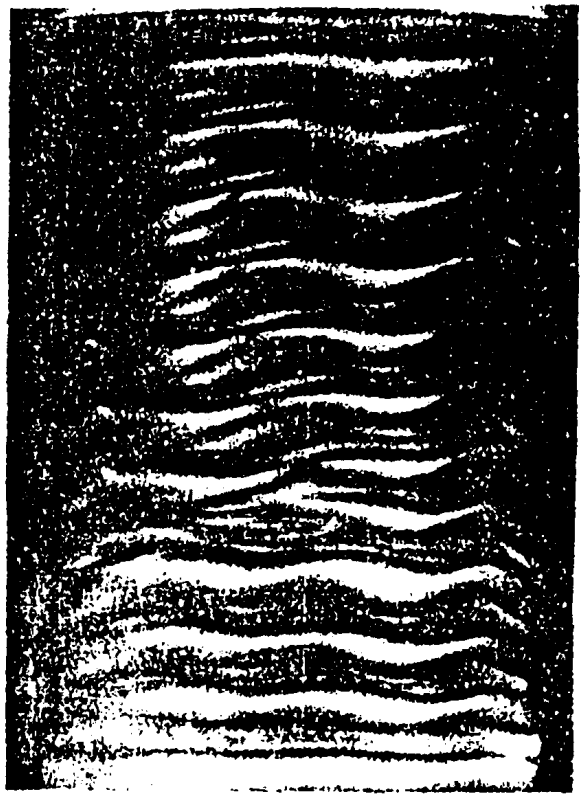


图 13-7　库埃特-泰勒实验中的波状涡旋

经演化、放大、失稳而导致流体运动的不稳定，最终发展为湍流。

20 世纪 70 年代以来，非线性科学关于混沌现象的理论和实验研究的进展，为解决湍流理论的百年难题提供了启示。特别为解决湍流的发生机制、小尺度混乱与大尺度结构共存等问题带来了希望。

1971 年，法国物理学家茹勒（David Ruelle）和荷兰数学家泰肯斯（Floris Takens）的《论湍流的本质》一文，对湍流的研究产生了很大影响。茹勒和泰肯斯指出，由平稳流向湍流的转变，不需要一系列的频率，只要三个独立的运动就会产生湍流的全部复杂性。他们描绘出如下的图景：第一次转变，即从定态到单个摆振，产生流体中的周期运动；第二次转变，即加上一个不同频率的摆振，开始时像两个独立的周期运动的拟周期叠加，但这种运动不能继续保持下去，微小的扰动就会破坏掉它。两个独立的周期运动将相互作用而变得同步，合成为具有单个合成周期的周期运动，即发生锁频现象。当有三个叠加频率时，不再发生频率的锁定现象，而会出现一个新奇的结果，即运动进入维数不多的“奇怪吸引子”。他们认为，湍流能量的耗散，必定导致相空间的压缩，把运动轨迹向着吸引子的低维相区推进。这个吸引子不会是不动点，

因为湍流不会逐渐平息；也不会是周期吸引子，因为湍流是一种不同次序的性态，决不可能产生任何排斥其他节奏的节奏，它具有各种可能循环的整个宽谱。其相轨迹可能是一种继续不断变化、没有明显规则或次序的许多回转曲线，所以称为“奇怪吸引子”。茹勒和泰肯斯论文中的一些推理和证明是模糊的、错误的，但他们提出的“奇怪吸引子”的图像，却是十分吸引人的。

利用相空间描述系统的演化要用到“吸引子”概念。一般的动力系统，最终都会趋向于某种稳定态，这种稳定态在相空间里是由点（某一状态）或点的集合（某种状态序列）来表示的，这种点或点集就是“吸引子”。它表示着系统的稳定定态，是动力系统的最终归宿，即系统行为最终被吸引到的相空间处所。

经典力学指出，有三种类型的吸引子。一种是稳定的不动点，它代表一个稳定定态；第二种是稳定的“极限环”，即相空间中的封闭轨线，在它外边的轨线都向里卷，在它里边的轨线都向外伸，都以这个封闭曲线为其极限状态。极限环代表一种稳定的周期运动；第三类吸引子是稳定的环面，代表系统的准周期运动。

上述几类吸引子，都代表规则的有序运动，所以只能用于描述经典动力系统，而不能描述混沌运动。有耗散的混沌系统的长期行为也要稳定于相空间的一个低维的点集合上，这些点集合也是一种吸引子。但是混沌之所以是混沌，就是它绝不可能最终达到规则的有序运动；因而在它的吸引子内部，运动也是极不稳定的。在这种吸引子上，系统的行为呈现典型的随机性，是活跃易变和不确定的。更为奇特的是，混沌系统的吸引子（点集合）具有极其复杂的几何图像，如果没有电子计算机这种高效工具，混沌吸引子是无法绘制出来的，所以茹勒和泰肯斯把它们称为“奇怪吸引子”，以区别于前述那几种“平庸吸引子”。奇怪吸引子既具有稳定性和低维性的特点，同时还具有一个突出的新特点，即非周期性——它永远不会自相重复，永远不会自交或相交。因此，奇怪吸引子的轨线将会在有限区域内具有无限长的长度。

洛仑兹所给出的那个绕两叶回转的永不重复的轨线，就是一个奇怪吸引子——“洛仑兹吸引子”。它是在三维空间里的一类双螺旋线；系统的轨道在其中的一叶上由外向内绕到中心附近，然后突然跳到另一叶的外缘由外向内绕行；然后又突然跳回原来的那一叶上。但每一叶都不是一个单层的曲面，而是有多层结构。从中取出任意小的一个部分，从更精细的尺度上看，又是多层的曲面。这种螺旋线真是高深莫测、复杂异常。它永远被限制在有限的空间内，却又永不交结，永无止境。

1976 年，德国的若斯勒（Otto Rössler）考察了一个更为简化的洛仑兹方程

$$dx/dt = -(y+z)$$
$$dy/dt = x + ay$$
$$dz/dt = b + xz - cz$$

这个方程组的特点是只有最后一个方程中含有非线性项 xz。若斯勒由这个方程组得出了一个洛仑兹吸引子的变种（图 13-8）。

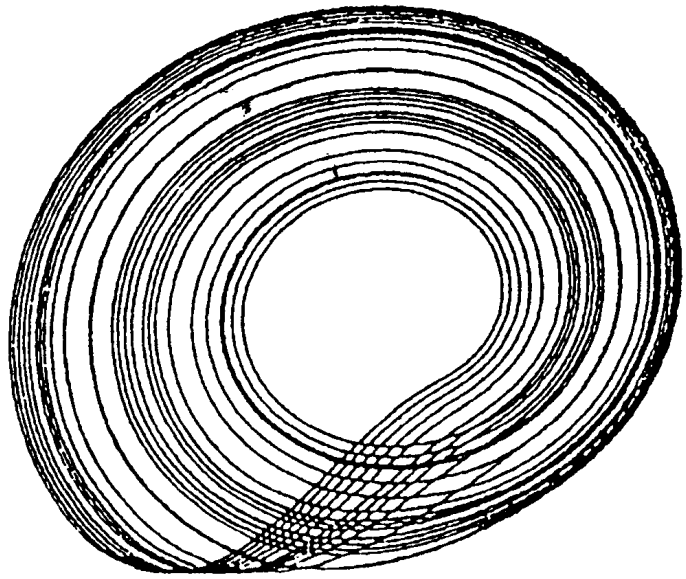


图 13-8　若斯勒奇怪吸引子

与洛仑兹吸引子不同，若斯勒吸引子只有一片。它似乎是这样形成的：当 z 较小时，系统的轨道在 (x, y) 平面或平行于它的平面内向外旋；当 x 足够大时，z 开始起作用，轨道在 z 轴方向拉长；当 z 变大后，dx/dt 则变小，轨道又被拉回到 x 较小处。三个变量的交互作用，产生了轨线的复杂运动。

除此之外，混沌学家们还得到了一些其他的奇怪吸引子。可以断言，充分认识奇怪吸引子的作用，对许多问题的探索，都会有巨大的作用。不过，奇怪吸引子的数学理论是困难的，目前还处于起始的阶段。

四、分形与分维研究

1. 分形与“无穷嵌套的自相似结构”

两千多年来，古希腊人创立的几何学，一直是人们认识自然物体形状的有力工具。经典几何学所描绘的都是由直线或曲线、平面或曲面、平直体或曲体所构成的各种几何形状，它们是现实世界中物体形状的高度抽象。

然而事实上，传统几何学所描述的只是那些具有光滑性即可微性（可切性），至少是分段分片光滑的规则形体，这类形体在自然界里只占极少数。自然界里普遍存在的几何形体大多数是不规则的、不光滑的、不可微的，甚至是不连续的。如蜿蜒起伏的山脉，曲折凸凹的海岸线，坑坑洼洼的地面，枝干纵横的树枝，团块交叠的浮云，孔穴交错的蛋糕……真是奇形怪状，千姿百态。

1975年冬天的一天，正在思索着现实世界真实几何形象问题的法国数学家曼德布罗特（B. B. Mandelbrot）随手翻阅他儿子的字典，注意到了拉丁字“fractus”，这个来自动词frangere的形容词含有破裂之意。他由此创立了“分形”（fractal）这个概念，并由此创立了“分形几何理论”，从而把数学研究扩展到了传统几何学无法涉足的那些“病态曲线”和“几何学怪物”的领域。曼德布罗特说：“云朵不是球，山峦不是锥，海岸线不是圆，树皮不光滑，闪电也不走直线。”分形几何学所映射出的自然事物不是光滑无瑕、平坦规整的，而是凸凹不平、粗糙丛杂、扭曲断裂、纠结环绕的几何形体。

自然界的现象通常都发生在某种特征标度上，如特征长度、特征时间等特征尺度上。科学家关于事物特征的描述最基本的莫过于问它有多大，持续多久。每一个具体事物，都与特定的尺度相连系。

但是，分形几何学却否定了关于事物大小和久暂的区分的绝对标度性，指出对于大自然的某些现象，去寻求特征尺度是毫无意义的。曼德布罗特研究过电子通讯中的噪音，研究过河水泛滥的数据，还研究过棉花价格的涨落。在他的关于现实的图像里没有二分法的位置，无法把微小的变化与宏大的变化分离开来。他所寻找的图像，无所谓小尺度和大尺度的差异，而是超越一切尺度；它不是左和右的对称、上和下的对称，而是大尺度与小尺度之间的对称。

曼德布罗特关于大自然过程里不规整花样的研究以及他关于无穷复杂形象的探索最终汇流到一个交结点上，这就是自然事物的“自相似”这个特性，“大自然在所有标度上同时起作用”。自然界的许多事物在不同测量尺度上看去差不多一样，是一种“无穷嵌套的自相似结构”。“分形”就意味着“自相似”。一个几何图形，如果它的组成部分与图形整体之间有某种相似性，就称为“分形”。“自相似”的思想在人类文化的各个方面都有所反映。中国古代就有“袖里有乾坤，壶中有日月”和“一尘一世界”的说法。曼德布罗特曾引颂《格列佛游记》作者的一首打油诗：“博物学家看仔细，大蚤身上小蚤栖；更有微蚤叮小蚤，递相啮噬无尽期”。

海岸线就是天然存在的一个分形。曼德布罗特在一篇题为《英国的海岸线有多长》的文章里做出这样的结论：任何海岸线，在某种意义上都是无限长的；在另一种意义上说则决定于你所选用的尺的长度。因为在不同标度上描绘的海岸线图，都显示出相似的湾、岬分布。每一个大湾中都有小湾和小岬，那些小湾和小岬中又有更小的湾和岬；把这些湾和岬放大后和实际的海岸线仍然相似。所以，你如果用一米的尺沿海岸测量，可以得出一个近似的长度，因为实际上你已经把小于一米的曲曲弯弯部分忽略掉了。如果改用一厘米的尺去量，一些小的曲折将被计入，得到的海岸线将会增长。随着测度标尺的变小，海岸线的长度会不断加长，永远不会收敛于一个极限数值。其根本原因就在于海岸线是一个无穷嵌套的自相似结构。

分形不仅在所有的标度上都有结构，而且在所有的标度上都有相同的结构。1904年，瑞典数学家科赫（Helge Von Koch，1870～1924）构造的“雪花曲线”，严格地显

示了分形这种有趣的特征。设想给出一个正三角形，再不断进行如下变换：在每边正中的 1/3 边上再造一凸出来的正三角形，使原三角形变成六角形；在这个六角形的 12 条边的每条边中间的 1/3 上再凸出一个正三角形，变成一个 $4\times12=48$ 边形；反复操作这种变换以至无穷（图 13-9），其边缘愈来愈增添精细结构，得到一个由分形曲线（“科赫曲线”）围成的科赫岛，好似一个雪花。科赫曲线是一条连续的环，绝不自身相交；每次变换都会使“科赫岛”的面积稍有增加，但总面积永远是有限的，并不比原三角形的面积大很多（小于原三角形的外接圆）；但科赫曲线的总和却是无穷长的。这似乎是一个矛盾的结果：岛的面积有限，但周长无穷大；或者说一条无限长又绝不自交的曲线包围成了一个有限的面积。

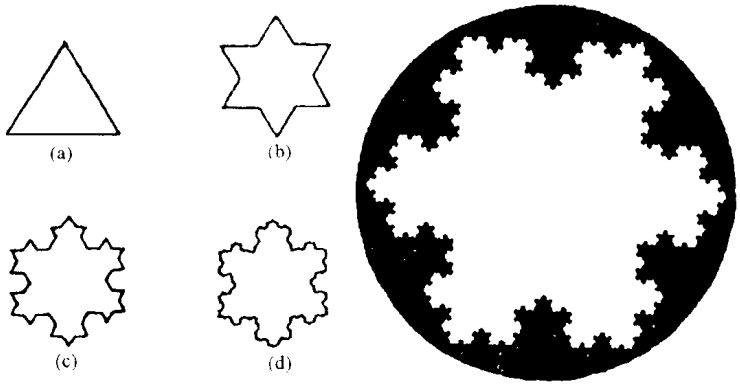


图 13-9　科赫曲线的生成

数学家们还构造了许多类似的一维的、二维的和三维的分形结构。如“康托尔灰尘”（图 13-10）：在一条线段上去掉中间的 1/3；然后对所余二段各去掉其中间的 1/3；反复操作下去，剩下的即康托尔集合。它是一些点非点、线非线的东西，数量为无穷多，但总长度为零。另如“塞尔平斯基地毯”（图 13-11 甲）和它的三维类似“孟格尔海绵”（图 13-11 乙）。前者总面积为零而孔线长度无穷大；后者总体积为零而总的表面积无穷大。在当时许多数学家的头脑里，认为这些曲线或形状是“病态的”，似乎大自然不应如此。但曼德布罗特却由这些一层比一层精细的相似结构中，窥视到了宇宙的秘密。

2. 分维概念的提出

分形的主要几何特征是关于它的结构的不规则性和复杂性，主要特征量应该是关于它的不规则性和复杂性程度的度量，这可用“维数”来表征。维数是几何形体的一种重要性质，有其丰富的内涵。整形几何学描述的都是有整数维的对象：点是零维的，线是一维的，面是二维的，体是三维的。这种几何对象即使做拉伸、压缩、折叠、扭曲等变换，它们的维数也是不变的；这种维数称为“拓扑维”，记为 d。例如当把一张

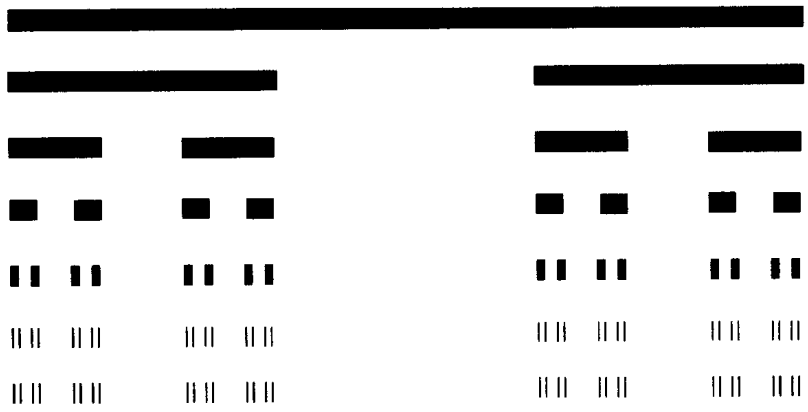
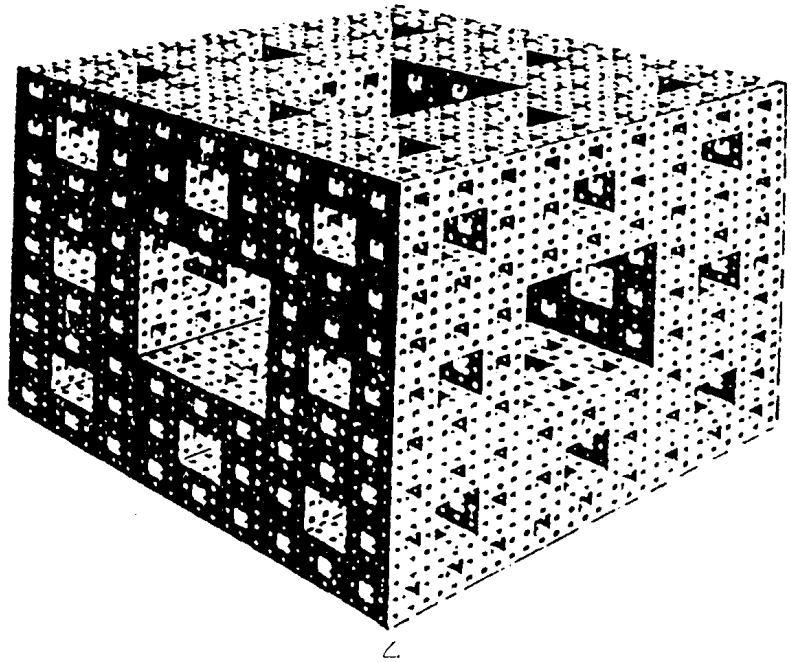


图 13-10　康托尔灰尘



甲



乙

图 13-11　塞尔平斯基地毯和孟格尔海绵

地图卷成筒，它仍然是一个二维信息载体；一根绳子团成团，仍然是一维结构。但曼德布罗特认为，在分形世界里，维数却不一定是整数的。特别是由于分形几何对象更为不规则，更为粗糙，更为破碎，所以它的分数维（简称“分维”，记为 D）不小于它的拓扑维，即 $D \geqslant d$。

维数和测量有密切关系。如为了测一平面图形的面积，就要用一个边长为 l，面积为 l^2 的标准面元去覆盖它，所得的数目就是所测的面积。如果用长度 l 去测面积，就会得到无穷大；而如果用 l^3 去测这块面积，结果就是零。这就表明，用 n 维的标准体 l^n 去测量一个几何对象，只当 n 与拓扑维数 d 一致时，才能得出有限的数值。如果 $n<d$，就会得到无穷大；如果 $n>d$，则结果为零。分数维也是按照这个要求来定义的。由于分形的复杂性有多种不同类型，所以可以提出不同定义的分维概念，从不同的角度表示分形的不规则性。通常用的是“容量维”。

简单地说，分维所表示的不规整程度，相当于一个物体占领空间的本领。一条光滑的一维直线，完全不能占领空间；但是“科赫曲线”却有无穷的长度，比光滑的直线有更多的折皱，拥挤在一个有限的面积里，的确占领了空间，它已不同于一条直线，但又小于一个平面，所以它大于一维，又小于二维，它的容量维为 1.2618。海岸线的分维数通常在 1.15 到 1.25 之间。曼德布罗特指出，对于各种分形来说，即使在不同的尺度上，用分维表示的不规整程度却是一个常量，表明“分维”概念的客观现实特性，分维所表征的正是大自然的规则的不规则性。

分形和混沌动力学之间的联系很快就被发现了。混沌的奇怪吸引子都是分形。结构的复杂性使现实世界出现了大量分形几何形体，也使确定性动力学体系出现无规性。奇怪吸引子都有层次的自相似性。无穷相似结构互相套叠起来，就相当于没有规则结构，所以“无穷嵌套的自相似结构”呈现出总体的混沌。非线性动力学系统一旦进入混沌吸引子区域，就会随机地在吸引子内部四处游荡，但又不能充满整个区域，区域内存在着无穷多的随机空隙，从而使整个混沌区出现维数上的“空洞”，呈现分数维数。洛仑兹吸引子就是三维背景空间中的一张分形曲面，其容量维等于 2.06；若斯勒吸引子也是三维背景空间中的一张分形曲面。所以，“分形几何学”和“分维”概念已经成为混沌学研究的重要工具。

第三节　远离平衡态的自组织现象研究

一、自组织现象——伯纳德花纹与化学振荡

宏观系统的自然倾向是沿着时间箭头走向平衡态。但实验发现，当两种气体的混合体由于加热而离开平衡态后，组织便会以一种简单浓度梯度的形式出现。如图 13-12

所示盛有氢气和硫化氢气体混合物的容器，使两端产生并保持一个很小的温度差，就会发现两种气体将逐渐分离，较轻的氢气多流向较热的一边，较重的硫化氢气则多聚集于较冷的一边，形成了各自的浓度梯度。这个现象表明，在不可逆的非平衡态过程中，可以产生出有序性。

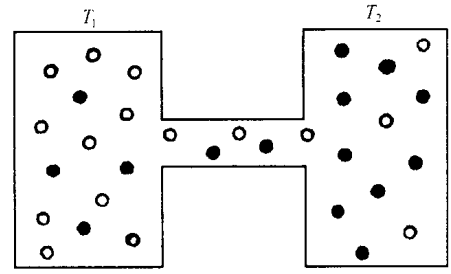


图 13-12　温度梯度造成了气体分布的浓度梯度

当系统远离平衡态时，还会出现更加壮丽的有序组织。1900 年，法国的伯纳德（Henri Bernard）首次发现了蜂巢状的自组织花纹（图 13-13）。在一个透明的碟子里加入一些液体，在炉子上加热，液体在竖直方向上便产生一个温度差。当液层顶部和底部之间的温度差达到一个阈值后，对流开始，下层较热的液体流入上面较冷的部分。

这时由于浮力、热扩散、黏滞力三种作用的耦合而形成液面上大范围规则的蜂巢状花纹（“伯纳德花纹”）。这种蜂巢结构的尺度约为分子间距的一亿倍。为了形成这种蜂巢状的对流单元，无数分子必须遥相呼应，协调行动。这表明，热的耗散把熵从系统中输出，使系统低熵的蜂巢结构得以产生并维持下去。

化学反应会发生振荡。1921 年，伯克利加州大学的布雷（William Bray）在用碘作催化剂使过氧化氢分解为水和氧气时，第一次发现了振荡式的化学反应。但是当时化学家们错误地确信，热力学定律不允许振荡，因而用实验方法的疵病为借口否定了这个发现。

1952 年，英国数学家图灵（Alan Turing）在一篇论文中，提出了像化学振荡一类现象的可能性。图灵对形状、结构和功能在生物体中的体现感到兴趣，期望为生物学中所谓的“形态来源论”找到一个化学基础。他提出了这样一个简单问题：一个有机体是如何把一个化学浑汤规整成为一个生物结构，如何使一团完全相同的细胞变成一个有机体？这是生命形成的一个难题。比如，一个哺乳动物的胚胎，本来是一个许多细胞组成的球体，支配它发展的生物化学反应的均匀、不可逆的扩散，本应保持这种球对称性，为何却反而孕育出不具有这种球对称性的动物形体？图灵证明了，受精卵变成生物的复杂形态所必需的这种对称性的破坏，的确可以发生。他已经触及到了问题的底蕴，即在平衡态附近，对称的均匀状态是稳定的；远离平衡态时，均匀状态就会因为无处不在的涨落而变成不稳定的。图灵还发现，各种颜色的物体具有不同的扩散率，在液体里相互起反应，就会变化其浓度而形成空间不随时间变化的稳态图案，也可以产生彩色波浪的振荡式图案。图灵的这种思想，在将近 20 年的时间里没有受到化学家和生物学家的注意。

比图灵的工作稍早，20 世纪 50 年代初，俄国化学家别洛索夫（B. P. Belousov，1893～1970）做出了化学振荡反应的关键工作。他用柠檬酸、溴酸钾、硫酸作配剂，用

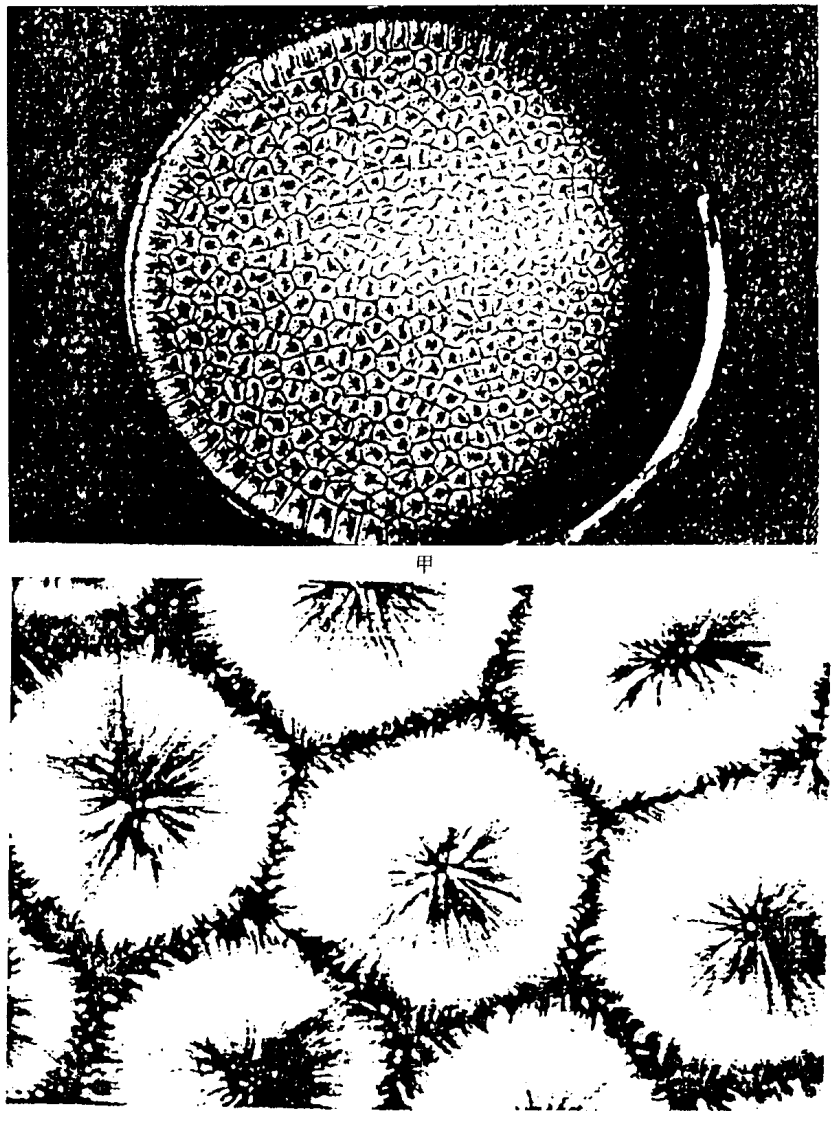


图 13-13　伯纳德花纹的全貌（甲）和局部放大（乙）

铈盐作催化剂进行实验，他惊讶地发现，溶液开始在无色和淡黄色两种状态间变来变去（相当于带电铈离子的两种不同的形式），即发生了颜色规则的周期振荡。这样，别洛索夫就首次提供了一个实在的化学反应，支持“反应－扩散”双重不可逆过程可以产生自组织的概念。但不幸的是，这个反应的奇特行为是化学家和生物学家们无法相信的，所以他的论文屡遭拒绝，最后在一个辐射医学学术讨论会的文集中刊登出来。当时人们认为热力学第二定律确言：任何化学反应只能走向退化的平衡态，在两种颜色之间的化学振荡当然是不可能的。

1963年，从莫斯科大学生物化学系毕业的扎鲍廷斯基（A. M. Zhabotinskii）对别洛索夫的配方做了一些修改，主要是用铁盐代替了铈盐，使颜色更鲜艳地从蓝变红，出现周期性的红－蓝变化。如果化学混合物在一薄层内扩散，就会形成圆形波和螺旋波纹，这就是“BZ反应”。这一发现终于取得了承认，众多的化学振荡反应被做了出来。近几十年来，自组织化学反应的研究，已经成为很时髦的一门学科。

二、耗散结构理论的建立

耗散结构理论是在热力学发展的过程中建立起来的。经典的热力学理论只适用于平衡态的过程，无法用以解释像生命这种远离平衡和高度有序化的系统，所以必须把热力学定律向非平衡态、非线性作用的领域推进。就像图13-12所示的热扩散的实验所表明的那样，在非可逆的、非平衡态过程中，可以产生出有序性。

1931年，非平衡态热力学的创始人之一、美籍挪威化学物理学家昂萨格（Lars Onsager，1903～1976）证明了不可逆过程热力学的一个基本原理，对动力系数对称性的昂萨格定理。这一定理确立了广义热力学“流”和“势”（或“力”）的线性关系。1932年，昂萨格又确立了非平衡态热力学的一般关系，即著名的“昂萨格倒易关系”，这个关系在近平衡态的区域里成立。因为在近平衡态区域，作用力比较弱，“势”或“力”（如温度梯度、浓度梯度等）同由它引起的“流”（如热流、扩散流等）之间呈近似的线性关系。如图13-12所示的实验里，温度梯度如同一种热力学力，给系统一个“推动”，引发了热量流和质量流；当温度梯度不很大，即接近平衡的情况下，热流和质量流与造成它们的“力”直接成正比；这种情况下的热力学被称为“线性热力学”。

昂萨格的倒易关系表明，在线性系统中有一种美学上很漂亮的对称关系：一个力（如某个温度梯度）可以产生或影响一个流（如某个扩散过程），那么这个流形成的力（如某个浓度梯度）也会影响与那个力联系着的流（如热流）。这个效应已经在实验上得到证实。倒易关系的提出标志着热力学从平衡态向非平衡态的推进，它本身也是不可逆过程热力学的最早结果之一。昂萨格为此获得了1963年的诺贝尔化学奖。

1945年，普里戈金（Ilya Prigogine，1917～　）登上了热力学的舞台。他1917年出生于莫斯科，10年后随同家人迁居西欧。后来师从比利时物理化学家德·顿戴（Thophile de Donder，1873～1957）投身于化学热力学的研究，并逐渐成为布鲁塞尔学派的领导人。他在时间的可逆与不可逆，物质结构的有序与无序，自然界的简单性与复杂性，运动状态的稳定与不稳定，运动规律的决定论与非决定论等重大问题上，都有深入的研究与独到的见解，并创立了“耗散结构理论”，获得了1977年的诺贝尔化学奖。

1945年，28岁的普里戈金发现，在线性表现良好的区域，热力学耗散降到它可能的最低点。他假定在近平衡区域里，局域体积元可以看做平衡系统，然后根据热力学

第二定律以及昂萨格倒易关系，得到了“最小熵产生原理”。这个原理表明，在近平衡的情况下，熵是递减函数；当达到定态时，耗散处于一个极小值。比如在热扩散的情形下，总熵可能是增加的，但当气体最终的浓度梯度建立起来之后，系统内禀的熵的产生率就达到它的最低值。

1947 年，普里戈金发表了题为《不可逆现象的热力学研究》的博士论文，其中包括了“最小熵产生原理”。这个原理表明，在线性非平衡区，熵产生起着平衡态理论中热力学势的作用，可作为判别线性非平衡区系统稳定性的一个函数；它表明，在这个态上，如果由于干扰和涨落而有所偏离，系统内部的变化都会使它回到原来的态，所以熵产生最小的态是稳定态。但是它同时还表明，在近平衡的非平衡线性区域，不可能发生突变，使系统过渡到新的稳定的有序结构。

普里戈金提出的这个最小耗散概念，比起最大熵的平衡态概念来是更为有用的。因为现实的系统都不是完全处在平衡态的，总会具有进一步演化的趋向；但是只要有一点很小的外部作用，使系统保持在偏离热平衡的状态，系统也将会实现一种稳恒态，而不是塌陷到完全无序的状态。

最小熵产生原理虽然是一个重要的结果，但它的证明决定于昂萨格所描述的流与力之间的良好线性关系。普里戈金希望大胆地跨进一步，探究远离平衡的非线性系统的情景，以完成更为复杂的现实系统随时间演化的图像，并把他的原理推广到流和力的简单关系被破坏的情况，找到一个关于演化的新的判据。

从 1947 年到 1967 年，普里戈金和他的同事格兰斯道夫（Paul Glansdorff）一起，考察了大量不同系统在远离平衡态时的不可逆过程，概括出了它们的演化行为的共同点，提出了“耗散结构”的概念，建立了一种称为“广义热力学”的理论。从本质上讲，他们使用的是一种“局部平衡”的近似方法，即把一个远离平衡态的系统，划解为许多子系统，在局部上表现为平衡态；整个系统由这许许多多的局部连缀而成。这个方法与广义相对论理论把弯曲时空想像为许多局部平直时空连缀在一起的方法是类似的。他们利用这种方法来研究平衡态热力学远不能处理的情形。

1969 年，在一个理论物理学和生物学的国际会议上，普里戈金在《结构、耗散和生命》[①] 的论文里，正式提出了“耗散结构理论”。1971 年，他和格兰斯道夫合著的《结构的热力学理论，稳定性和涨落》[②]，更系统地阐述了他们得出的可能对事物随时间演化的方式做出判别的所谓“普适演化判据”。在第一篇论文的开头，普里戈金就指出：“生物学与理论物理学之间仍然存在着巨大的鸿沟，这是非常明显的。按照某些著名生物学家的看法，在空间和功能两个方面的有序，乃是生命的基本特征。生命问题当然是一个‘多体问题’。因为有序的形成和维持包含着大量分子的联合作用。但是，统计

① I. Prigogine, “Structure, Dissipation and Life”, in Theoretical Physics and Biology, 1969.

② P. Glansdorff, I. Prigogine, Thermodynanic Theory of Structure, Stability and fluctuations, Wiley and Sons, London, 1971.

物理学在处理这种联合现象上，目前尚处于初期阶段。……在生命系统中，新陈代谢和能量的耗散，很可能起着本质的作用。”

普里戈金说，他希望在热力学的唯象方法的基础上，去“讨论生物有序之源，还想说明非线性热力学的新近发展能够使生物学和物理学之间的鸿沟缩小。”

普里戈金区分了两种类型的结构，即“平衡结构”和“耗散结构”。平衡结构是一种不与外界进行任何能量和物质交换就可以维持的“死”的有序结构；而耗散结构则只有通过与外界不断交换能量和物质才能维持其有序状态，这是一种“活”的结构。

普里戈金-格兰斯道夫的判据指出，对于一个与外界有能量和物质交换的开放系统，在到达远离平衡态的非线性区时，一旦系统的某个参量变化到一定的阈值，稳恒态就变得不稳定了，出现一个“转折点”或称为“分叉点”，系统就可能发生突变，即非平衡相变，演化到某种其他状态。一个重要的新的可能性是，在第一个转折点之后，系统在空间、时间和功能上可能会呈现高度的组织性，即到达一个高度有序的新状态。例如在某些远离平衡的化学反应中，可以出现规则的颜色变化或者漂亮的彩色涡旋。应该指出的是，当系统远离平衡时，整体熵产生以极快的速率增长，这是与热力学第二定律一致的；但是在小的尺度范围内，却可能出现极其有序的结构，这是只有在系统是开放的，通过与外界的能量和物质交换而保持在偏离平衡的状态时才可能出现的。因为这才使得系统所产生的熵可以输送到外界，使系统处于低熵的有序状态。

普里戈金和格兰斯道夫所给出的确实不像他们自己所说的是一个“普适演化判据”，而只是一个“弱”判据。因为它只是指出了热力学转折点存在的可能性，没有给出它的必然性；对于在第一个转折点之后会发生什么情况，他们的非平衡态热力学只给出了一个模糊的图像，系统的演化有多种多样的可能性可供选择。这种极度的复杂性，使得确定性的因果联系的描述变为不可能。对于一个化学家来说，这些选择可能意味着反应过程出现颜色的周期性变化或显现出彩色图案；对于一个生态学家来说，这些选择可能是生物种群的交替变化或实现一个稳恒态；对于一个医生来说，这或许是心脏病发作的预兆。但是无论如何，普里戈金-格兰斯道夫的“判据”还是非常有价值的，因为它指出在这种“转折点”之后，我们在有些情况下可以看到有序结构的出现。它表明，热力学定律并不禁止有序结构的自发产生，这就是普里戈金和格兰斯道夫所创立的理论的真正意义。

在《结构、耗散和生命》这篇有里程碑意义的论文的“结束语”里，普里戈金写道：“生命看来好像不再作为反对热力学第二定律的一个支撑点，尽管有某些‘麦克斯韦妖’方面的工作，然而下述物理定律合乎特有的动力学定律和远离平衡的条件。这些特有的动力学定律允许能量和物质流动，以建立和维持功能有序和结构有序。”耗散结构理论就这样把热力学定律和生物进化论协调起来，解决了克劳修斯关于物理过程是从有序到无序发展，而达尔文确言生物世界是从无序到有序发展的“演化悖论”。

思 考 题

1. 古人是如何理解“混沌”概念的？牛顿力学是如何否定了这种“混沌”观念的？
2. 庞加莱是如何发现混沌现象的？
3. KAM 定理是如何提出的？它的重要意义何在？
4. 洛仑兹是如何重新发现混沌的？“蝴蝶效应”的本质意义是什么？
5. 周期倍化分叉现象是如何发现的？“费根鲍姆值”的本质意义是什么？
6. 什么是“奇怪吸引子”？它具有什么重要特点？
7. 什么是“分形”和“分维”？它们与混沌动力学有何联系？
8. “耗散结构理论”是如何提出的？这个理论如何解决了“演化悖论”疑难？

结语：当代物理学面临的重大疑难和研究前景

在20世纪初，英国著名物理学家开尔文勋爵预告，物理学的大厦即将建成；但在物理学的晴朗天空中，还飘浮着两朵令人不安的“乌云”，这两朵乌云就是与迈克耳孙-莫雷实验相关的“光以太”问题和与黑体辐射实验相关的“能量均分”的学说，这两朵乌云在经典物理学框架内是无法驱散的。为解决这两大科学难题的努力，导致了相对论和量子力学的建立。20世纪初发展起来的狭义相对论和量子力学，成为整个20世纪物理学的两大支柱；原子物理、原子核物理、高能物理、半导体物理、电子学、激光物理以及由此发展起来的信息科学、材料科学、军事科学技术等高科技产物，都渊源于这两门物理学基础理论。甚至可以说，几乎所有20世纪的物质文明，都是从这两门物理基础科学衍生出来的。所以，科学难题的提出和解决，将会给人类的认识和社会的发展带来巨大的推动。

重大的发展一定是从重大问题上引发出来的。进入21世纪，目前的情况正像20世纪初出现的情况一样，物理学也面临着一系列科学难题。其中最为重大的问题，按照理论物理学家李政道教授的概括，首推以下四个：第一个是目前我们的物理理论都是对称的，而实验却越来越多地发现不对称，使人觉得理论不行；第二个是夸克不能单独存在，六种夸克都不能自由行动；第三个是类星体的巨大能源是如何产生的；第四个是宇宙中90%以上的物质是我们看不见的暗物质，这些暗物质是什么，我们不知道。

前两个问题是探索物质结构的最前沿的学科粒子物理学（高能物理学）的重大难题：对称性破缺的本质和夸克囚禁；后两个问题是天体物理学的重大难题。李政道猜测，前两个难题的解决，都可能与真空有关；对真空性质的了解，对真空涨落、真空激发的探索，有可能找到解决这些难题的出路。

一、对称性破缺和夸克囚禁疑难

1. 粒子物理学的成就

粒子物理学的发展，在20世纪物理学中是一个辉煌的亮点。在20世纪30年代，人们曾认为自然界的一切物质，都可以归结到四种粒子，即质子、中子、电子和光子，所以把它们称为基本粒子。但是随着正电子、中微子和介子的发现，人们认识到除了前述四种物体的组元粒子外，还存在一些粒子并不是物体的组元粒子，所以基本粒子世界是很复杂的。60年代初，从加速器实验中发现了100多种基本粒子，迫使人们领

悟到，这些粒子只是物质结构中比原子核更深的一个层次，而不是物质世界的终极本原，于是人们去掉了“基本”二字，把它们简称为粒子，并开创了粒子物理学。

从对各种粒子的相互转换过程的研究中，人们发现在微观粒子之间，除了存在着宏观世界的引力和电磁力之外，还存在着强相互作用力和弱相互作用力，这四种相互作用按强弱排序，即强作用力、电磁力、弱作用力和引力；粒子间的相互作用是造成千变万化的物理过程的根本原因。

根据参与相互作用的情况，人们把粒子分为两类：一类是参与强相互作用的粒子，如质子、中子、π介子、奇异粒子和一系列的共振态粒子等，统称为强子；另一类是不参与强相互作用，只参与电磁、弱相互作用的粒子，如电子、μ子和中微子等，统称为轻子。此外还有一类叫规范粒子，简单地讲它们就是在粒子之间传递作用力的媒介，如光子（传递电磁力）、$W^{\pm}$和Z^{0}（传递弱力）、胶子（传递强力）；理论上把引力的传递者叫作引力子，它的存在尚待实测证明。

高能物理实验进一步揭示，上百种强子并不“基本”，是有内部结构的。60年代中期，在分类规律的指引下，人们提出强子是由若干种夸克组成的复合体，夸克则是更深层次上的组元粒子。在当初提出三种夸克(上夸克u、下夸克d和奇夸克s)之后，1974年发现了粲夸克c、1977年发现了底夸克b，1995年发现了顶夸克t。这六种夸克成为构成所有数百种强子的“基本”单元，并由此诞生了夸克强相互作用的理论——量子色动力学。同时，轻子的发现也达到六种，即电子、电子型中微子、μ子、μ型中微子、τ子和τ型中微子。按今天的认识，六种夸克和六种轻子一起，才是目前阶段我们所知道的物质结构深层次的组元粒子。今天的实验没有证据显示夸克和轻子还有内部结构。至于它们是不是物质的终极本原，这是未来的物理学研究回答的问题。

继爱因斯坦的早期努力之后，60年代追求几种不同相互作用统一的努力又复活起来。60年代后期，终于成功地建立了弱力和电磁力统一的理论，并预言了弱中性流的存在和传递弱相互作用的中间玻色子的质量，这个预言于1983年1月和6月分别得到实验证实。弱电统一理论与描述夸克之间强相互作用的量子色动力学理论一起，成为粒子物理学中的标准模型理论。标准模型理论是20世纪探索物质结构和微观世界规律的极重要的成就。

2. 粒子物理学面临的挑战

自李政道和杨振宁于1956年提出在弱相互作用下宇称不守恒后，人们长期以来一贯认为的运动中对称性守恒的基本规律便被打破了。1964年人们又发现宇称和电荷共轭联合也是破缺的，即CP（正负粒子的对称与左右对称）不守恒。如果自然界中CPT联合守恒，那么CP不守恒就意味着时间（T）反演不守恒。1967年提出的弱电统一理论也是以对称性破缺为基础的。因为从现象上看，弱力和电磁力是性质差别很大的两种力，前者是短程力，后者是长程力，强度上它们也相差10个数量级。量子场理论指

出，弱力的微弱性和短程性都是因为传递弱力的媒介粒子质量很大。弱电统一理论指出，在能量很高（远大于几百 GeV）的现象中，传递弱力的媒介粒子和传递电磁力的光子的质量都为零，二者是同一种力，可以用一种统一的量子规范场来描述，具有规范不变的内部对称性。但是在能量较低时，一种被称为黑格斯（Higgs）机制的物理效应把这种内部对称性破坏了，于是就使某些传递力的媒介粒子获得了质量，如弱电统一理论预言的 $W^{\pm}$ 和 Z^{0} 粒子，从而出现了在低能现象中存在的弱力；但光子的质量依然保持为零，从而出现了电磁力。弱电统一理论在精确预言了中间玻色子质量的同时，还预言了黑格斯粒子（一种自旋为 0 的中性标量粒子）的存在，但理论上无法预言它的质量。从弱电统一理论提出以后，人们从几个 MeV 到几十个 GeV 都未找到黑格斯粒子存在的迹象。那么黑格斯粒子在哪里呢？如果黑格斯粒子不存在，对称性破缺的机制又是什么呢？这是粒子物理学中一个令人不解之谜。

按照标准模型理论，夸克和轻子的质量也是通过黑格斯机制破缺对称性而产生的，但夸克和轻子的质量谱从 eV 一直到 180GeV，相差 11 个数量级，这样宽广的质量谱的起源，也是高能物理学家们无法回答的。

夸克模型理论的建立，使我们对粒子世界的认识前进了一大步，但是高能物理学家们却一直为实验上寻找不到自由夸克而困惑。1973 年建立的量子色动力学理论，指出夸克不仅有六种“味”的区别，而且还有三种“色”的区别，即红夸克、蓝夸克和黄夸克，实际上是说明每一种夸克具有不同的内部空间（色空间）自由度。不同颜色的夸克靠胶子结合在一起，如果组成白色的复合体，就成为可以观测到的强子；非白色的单个夸克、胶子或它们的复合体，则不能单独出现。但是，夸克具有渐近自由的特点，它在强子的内部，却是自由存在的。

在量子色动力学的框架里，虽然可以唯象地解释夸克囚禁在强子内部的结构图像，但还无法定量地解释夸克囚禁疑难和强子结构图像。在作过许多尝试后，目前一个比较普遍的看法是认为夸克囚禁是由量子色动力学物理真空的性质造成的。

3. 真空的探索

真空是什么？到量子层次上，真空的概念已是十分玄奥和难以捉摸的了。按照现代物理学的基础理论——量子场论，物理世界是由各种量子场系统组成的，这些量子场系统的能量最低的状态（即基态）就是真空。所以，真空不空，它是相对论性的凝聚态。真空虽然是没有物质的态，但它仍然有作用，有作用就有能量的涨落，这种能量的涨落是可以破坏对称的。当年为了解释狄拉克方程的负能解，狄拉克曾引入空穴概念，用所谓的“负能电子海”作为对物理真空的描述。我们可以借用“狄拉克海洋”对物理真空作一个形象的比喻：物理真空就像一个蕴含无穷大能量的海洋，它成为一切物理过程的背景和本底，所有物理反应都是在这个浩瀚的大海上空进行的；绝对平静的海平面是完全对称的，但由于激烈的物理反应，有一部分能量会扰动海平面，

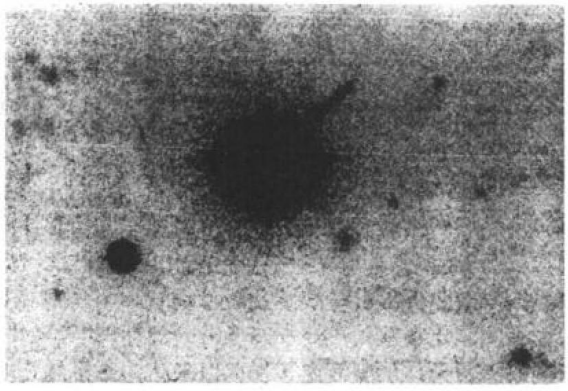
使一些浪花从海中溅出来，并参与海面上空所进行的反应。这就是所谓的真空激发，也就是真空对称性的破缺。这就是说，真空中充满着夸克-反夸克对和胶子，物质与真空中的夸克-反夸克对和胶子不断发生相互作用，造成新的强子结构的图像。黑格斯机制就首先假定了标量场势，真空是简并的；当某个特殊方向被选定后，完全的对称性就被破坏。真空破缺导致规范对称性自发破缺，从而规范粒子和费米子获得质量。

所以，对称性破缺的本质，可能来自于真空的不对称性产生真空对称性自发破缺机制；夸克囚禁可能是量子色动力学物理真空造成的。因而这两大难题的解决，关键在于揭示真空的物理本质。如何研究真空？李政道教授指出，首先要激发真空，然后再观测这激发真空的演化和性质。如何激发真空呢？这就需要造成一个有一定体积的高温高密区域，这可以在相对论重离子（如将核外电子剥离的重原子核 S、F_e、A_g 等）的碰撞中实现。随着各种更高能量加速器的建造，以及用非加速器物理弥补加速器物理之不足方法的发展，真空的物理本质的探索必将获得突破性的进展。

二、类星体的能源疑难

1. 类星体的发现

在射电望镜发明之后，人们相继发现天空中有一些发射无线电波的点，称为“射电点源”或射电源；在测定它们的位置后，编出了射电源星表。



类星体 3C273 的照片

1960 年，美国天文学家桑德奇（A. R. Sandage，1926～ ）等用当时世界上最大的 5 米口径的光学望远镜搜索观测时，找到了射电源 3C48 的光学对应体，在照相底片上，它类似一颗亮度为 7.6 等的很暗的蓝星；在用光谱仪拍下它的光谱后，发现它的光谱中有许多宽而强的发射线，十分复杂，谁也弄不清是些什么谱线，所以也弄不清它是什么天体。后来，有人发现了 3C273 对应于一颗比 3C48 还暗的天体，它的光谱也很奇

特，无法作出认证。

1963 年，美国天文学家施米特（M. Schmidt，1929～ ）发现，3C273 的光谱与 3C48 的光谱很类似；并且进一步发现，如果将 3C273 的所有谱线向红端移一段很大距离，谱线就可以认识了，它们都是地球上熟知的一些元素产生的发射线；但其红移量特别大，达到 0.158。3C48 的谱线也得到了认证，红移量更大，为 0.367。随后又陆续发现了一批性质类似的射电源，它们不像是恒星，但在照相底片上又呈类似恒星的星点，因而被称为类星射电源。光学观测表明，类星射电源的紫外辐射特别强。

后来发现一些光学性质类似于 3C48 和 3C273 的天体，它们有很强的紫外辐射，甚至辐射 X 射线，而不发出射电辐射，这种天体称为蓝星体。类星射电源和蓝星体这种似星非星的新天体，被统称为类星体。类星体的发现，引起了新的震惊，被看做是 20 世纪 60 年代天文学上的四大发现之一。

2. 红移挑战

类星体的一个共同特征是红移 Z 特别大。一般的恒星的红移量只有千分之几，而大多数类星体的红移大于 1，如 3C205 的红移量为 1.53，3C9 的红移量为 2.01。近些年发现的好多类星体的红移 Z 都超过 4。类星体如此巨大的红移，在科学上引起了争论。

如果把类星体的红移 Z 解释为多普勒效应，则表明它们在视线方向上远离我们而去，其退行速度 v 与红移量 Z 遵从以下关系式：

$$Z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$$

式中 c 为光速，λ 为实验室测定的谱线波长，$\Delta\lambda$ 为观测到的波长与实验室测定的波长之差。红移量越大，天体离我们而去的速度也越大。如当 $Z=3.5$ 时，v 可达 $0.9c$。根据天文学上的哈勃定律可知，天体的视向退行速度与天体的距离 D 成正比，公式为

$$v = HD$$

式中 H 为哈勃常数。如果哈勃定律对于类星体是适用的，那么，巨大的红移则意味着类星体是极为遥远的天体。比如，3C9 的 $Z=2.01$，其退行速度为 $v=2.4\times10^5$ 千米/秒，即 $0.8c$，与我们的距离则为 $D=142$ 亿光年。对于大多数类星体来说，离我们的距离都在 150 亿光年以上。

红移是遥远的河外天体的共同特征。因此，绝大多数天文学家认为，类星体也是河外天体。这就是说，类星体的距离是宇宙学距离，它们的红移是宇宙学红移。所谓宇宙学红移，意思是目前我们的宇宙正在膨胀，所有的星系都在彼此分离，类星体也在不断地飞离我们而去，所以它们的光谱线就显示出了红移。支持宇宙学红移的观测事实有，已发现的若干类星体分别位于相关的星系团里，而这些类星体的红移和这些星系团的红移差不多；既然类星体是星系级天体，那么红移自然是宇宙学红移。

1979 年，发现了“引力透镜”效应之后，又为宇宙学红移学说提供了一个支持。根据广义相对论引力理论，光线通过强大的引力场会发生弯曲。在一定条件下，一个大质量的天体会起到像凸透镜一样的聚光作用，从而使该天体背后的一个类星体被看成两个类星体。观测发现，大熊座 0957+56A 和 B，二者的红移量分别为 1.45 和 1.40，十分相近，很可能就是引力透镜作用形成的，而这个引力场可能就是由一个巨大的暗星系产生的。如果是这样，那么就可以肯定类星体是比暗星系更为遥远的天体。1980 年还发现了由引力透镜效应形成的三重类星体，都表明类星体是具有宇宙学距离的天体。

天文观测进一步发现，有些类星体周围有稀薄的气体。它们会吸收来自背后天体的发射线，使光谱上出现吸收线。观测发现，某些大红移类星体的光谱中有小红移类星体周围气体产生的吸收线；但却没有在小红移类星体光谱中发现大红移类星体周围气体产生的吸收线。这又证明了红移量大的类星体距离远，红移量小的类星体距离近。

少数天文学家认为类星体的红移不是宇宙学红移。因为观测到有些类星体与亮星系成协（即二者在天球上的视位置靠得很近，它们之间可能有某种物理联系），但二者的红移量差别很大。比如 NGC4319 与附近的马卡良星系 205 类星体之间有物质桥联系，但前者的 $Z=0.006$，后者的 $Z=0.070$，两者相差约 10 倍。如果说 NGC4319 的红移是宇宙学红移，则与它成协的马卡良 205 类星体的红移就应属于非宇宙学红移。持这种观点的人对非宇宙学红移提出了一些解释，例如认为类星体是由银河系或其附近的星系抛出来的。因而类星体的红移虽然是多普勒红移，但却不是宇宙学红移。

还有些天文学家认为，类星体的红移是大质量天体的引力红移。根据广义相对论，引力场中的辐射源发出的光谱线会发生红移。不过，根据计算，要发生类星体那么大的红移，其质量必须大于 $10^{12}M_{\odot}$（1 万亿个太阳质量 $M_{\odot}$），这比用一般方法测定的类星体的质量 $10^{8}\sim10^{9}M_{\odot}$（1 亿～10 亿 $M_{\odot}$）要大上几千倍，这是难以想像的。此外，还有人提出类星体的红移是由“光子老化”、“基本物理常数变化”或其他未知物理规律造成的。这些看法，尚未得到物理实验和天文观测的支持。

3. 能源和高能电子源困惑

观测表明，类星体有极强的紫外辐射，因而颜色显得很蓝。它的光学波段连续光谱的能量分布，呈幂律谱形式 $I_{\nu}\propto\nu^{-\alpha}$，$I_{\nu}$ 为辐射强度，ν 为频率，α 为谱指数，常大于零；光学辐射是偏振的，具有非热辐射性质，表明辐射源中质点远离热动平衡分布，其能量分布不服从一定温度下的玻耳兹曼分布律。类星体的红外辐射也非常强。类星射电源还发出强烈的非热射电辐射，射电辐射的频谱指数 α 平均为 0.75。类星体的射电辐射无疑是同步加速辐射，是由远离热动平衡分布的相对论性电子（速度接近光速 c 的高能电子）在外磁场中沿圆轨道或螺旋轨道运动而产生的辐射；类星体的光学辐射也很可能是同步加速辐射；其红外辐射的一部分 可能仍是同步加速辐射。

如果类星体的红移是宇宙学红移，即类星体是宇宙学距离上的天体，那么根据它的亮度和距离可以算出它的亮度（包括射电、红外线、可见光、紫外线直至X射线）将达到10^{46}～10^{47}尔格/秒，是迄今为止观测到的辐射功率最大的天体。它的可见光波段的能量输出，比普通星系强近百倍，加上红外等辐射能量，其能量输出比普通星系要大上千倍；除强烈的辐射外，类星体还有抛射物质的迹象。类星体的寿命估计约为10^6年，所以一个类星体的总能量将高达10^{62}尔格，比银河系整个生存期间释放的总能量还要大得多。

观测表明，类星体的亮度是变化的，时标为几年；少数类星体的光变很剧烈，时标为几个月或几天。比如3C446类星体的亮度在几个月内增加三个星等（即15倍），3C273在两年半时间内亮度改变了40%。类星体光变很快，说明它的尺度是很小的，或者说它的光学辐射区域很小，它的变化源的线度必然小于电波在几日到几年内通过的距离，其大小只有几“光日”到几“光年”，也就是10^{15}～10^{17}厘米。这个大小只有普通星系的十万分之一，甚至百万分之一。现在普遍认为，类星体的高能电子来源于类星体的中心区域，那么这个范围一定更小了。

现在多数天文学家认为，类星体是宇宙学距离上的星系级的天体。但是它体积小、能量大、亮度变化剧烈，光谱中有发射线的特点。这些互相矛盾的东西竟然容于一处，于是就产生了两个尖锐的问题：第一，为什么这么小的体积能产生这么巨大的能量？第二，它的高能电子是如何产生的？

为了解答这些问题，天体物理学界提出了许多理论模型。一种是恒星碰撞模型，认为在类星体中心，恒星的空间密度极高，大量恒星的碰撞释放出大量能量。这种释放的能量又是如何转化为高能电子的能量呢？为了解释这个问题，他们提出，恒星由于碰撞粘合而形成越来越大的恒星，进而演化成超新星，超新星的爆发就会释放出高能电子。恒星碰撞模型要求恒星数密度高达10^{11}/秒差距^3（1秒差距=3.26光年），这是难以想像的。另一种是大质量星模型，认为类星体的质量约为$10^8M_\odot$；这种星的光度可达10^{46}尔格/秒，但其能谱将是热辐射型的，与观测到的非热辐射幂律谱不符，而且这种星体也不稳定。其他还有自转中子星模型、黑洞吸积模型和物质-反物质湮没模型等，这些模型都存在着这样或那样的困难。

4. 活动星系核说

天体物理学的终极目标是研究天体的演化，而决定天体演化的关键是原初的产能机制。对于恒星中心的高效能源的探求，经历了近百年的时间，直到20世纪30年代，现代物理学才以“热核反应”机制说明了恒星的能源。但是，类星体的发现，却对“热核反应”机制提出了严重的挑战。一个天体的产能率常用单位质量产生的辐射能量来表示。热核聚变的产能率可达10^{18}尔格/克，远大于太阳的产能率10^{15}尔格/克，所以可作为恒星的能源。但是从观测估算出类星体的产能率比热核聚变产能率高出10～

10^3 倍，它的高效产能机制又是什么呢？

按照现代物理学理论，高效产能率来自物体的巨大质量和致密性。一个质量为 M、半径为 R 的致密巨大天体吸积单位质量周围物质位能的变化为 GM/R（G 为万有引力常数）。因而吸积周围物质位能转化成辐射能量的效率与中心天体的致密度 M/R 有关。有人据此提出类星体的中心可能有一个质量为太阳质量几亿倍的中子星，自转周期为几百天。但是，中子星存在临界质量，超过 2～3 倍太阳质量，就不稳定。观测要求，类星体中心的质量约为 10^7～$10^9 M_\odot$（1000 万到 10 亿倍太阳质量），惟一可能的中心天体是黑洞。在活动星系甚至很多正常星系中央，都存在“星系核”级的黑洞。黑洞以其巨大的引力吸积并吞噬周围的物质——气体与尘粒。当周围这些物质向黑洞运动时，只要具有一定的角动量，它们就会绕黑洞而去，极强的引力作用使在物质的绕转运动中给出巨大的产能率；黑洞吸积机制可提供出比热核反应机制高出百倍甚至千倍的产能率。这些看法后来便发展成为类星体和活动星系核的巨型黑洞吸积的动力学模型，它被公认为有关类星体和活动星系核产能机制的标准模型。

活动星系（又称激扰星系）是具有明显的激烈活动，而其寿命大大短于正常星系（10^{10}年）的星系。活动星系都有一个处于剧烈活动状态的核。星系核是星系中原初产能区之一，活动星系核比正常星系核更具活力。它具有极强辐射、快速光变、猛烈爆发、汹涌喷流等高能活动现象，产能的比例更大、更重要，甚至更占优势。造成星系核产能率增大的原因，除巨型黑洞吸积周围物质所释放出的引力能外，还有剧烈恒星形成和超新星爆发、内部激波激发等因素。

活动星系核在许多方面都与类星体相似。它们的体积都很小；光谱中有很强的宽发射线；其射电、红外、紫外或 X 射线的光度相当于或大于光学光度。所以其辐射不是黑体辐射，而是非热辐射，这种极强的辐射是普通恒星所依赖的热核反应机制无法产生出来的；经常有光变和爆发现象，其光学波段的亮度变化，往往是几个月或几天；辐射具有同步加速辐射的特征，有的有一定的偏振；许多活动星系核喷射出定向、准直、速度接近光速的物质流。对这个现象最自然的解释是，喷流是物质挣脱了星系核中极强引力场、沿着转动黑洞的轴向射出的。因此，类星体本质上可能是某种活动星系，观测到的类星射电现象是活动星系核的活动。如果类星体是具有宇宙学距离的天体，那么它们的活动比一般活动星系会更为剧烈，辐射功率更大。

活动星系核作为全波段天体，既处于非常远离热平衡的状态，又具有非常复杂的结构。它的射电、红外、光学、紫外、X 射线和 γ 射线连续谱辐射及不同波段和类型的谱线辐射来自不同的区域。通过多波段的观测，表明越靠近中心区，其发射的频率越高，所以活动星系核的总体结构大致如下：最外是尺度为 10^6 秒差距的射电瓣；其内是尺度为 10^5 秒差距的、由恒星和气体组成的光学星系；再内是尺度为 10^2～10^3 秒差距的产生窄发射线的区域；更里是尺度为 10^{-2}～10^{-1}秒差距的宽发射线的产生区；红外发射区横跨这两谱线发射区之间，远红外区在外，近红外区在内；光学和紫外连续谱发

射区在更内层的吸积盘上，尺度为10^{-3}～10^{-4}秒差距；中心是质量为$10^{8}M_{\odot}$、视界为10^{-5}秒差距的黑洞。活动星系核是一种结构复杂、对称性又不足的天体。这种天体不仅不同波段的发射是各不相同的，而且它们之间的转化也是复杂多样的。距黑洞最近的冕发射硬X射线和更高能光子，光子辐照吸积盘并加热吸积盘，在盘的从内到外的不同区域分别产生软X射线、紫外、光学到近红外辐射；X射线光子和紫外光子又会在宽线区和窄线区产生光电离谱线辐射。红外辐射多是高能光子照射在含尘埃的吸收环上的再发射，同步加速辐射多产生于喷流上的射电辐射，逆康普顿辐射（高能电子与低能光子碰撞而使低能光子获得能量的散射过程）又产生出高能光子直至γ光子……这多种过程也还不能揭示出活动星系核的全部复杂景像，距最终弄清楚活动星系核的全波段能源问题还相距甚远。

当然，在了解了活动星系核的结构图像和全波段能量辐射机制之后，下一步的任务还要研究活动星系核的形成、发展和死亡的长时标演化过程，这才能最终建立起关于活动星系核的整体统一理论。这个目标的实现，是更需耐心和时间的。

三、暗物质疑难

1. 什么是暗物质

天文学家们把宇宙间不发光的物质，即用光学望远镜看不见的物质，统称为“暗物质”，也就是所谓的“下落不明的物质”、“不可视物质”、“失踪质量”或“短缺质量”等。

更具体地说，“暗物质”可分为两类。一类是利用天体发射、吸收、反射、折射或散射电磁波的特性，可以探测到其存在的天体，称之为“尚未看见”的物质。它们之所以未被看见，或是由于太远，或是由于辐射作用太弱。例如处在太阳系边缘的海王星、冥王星等，就不是首先用光学方法看到的。随着观测手段的发展，这些过去看不见的东西，如各种星际分子、新的行星系、脉冲星、类星体、星系等，接连不断地被发现了。上述这些物质，本质上都是由质子、中子、电子等组成的，只要使它们处在高温、高压的状态，都是可以发光的。

另一类更为重要的“暗物质”，是除了由质子、中子、电子等“会”发光而处在不发光状态的物质之外，原则上不会发光，即与电磁波无缘的物质。它们自身不仅不会发光，而且也不能反射、折射或散射光，亦即对各种波长的光，它们都是完全透明体。我们所讨论的，就是这一类“暗物质”，因为多数天文学家相信，这种暗物质占宇宙物质总量的95%以上，因而成为当前宇宙论研究中一个重大的热点。

2. 暗物质存在的证据

我们知道，宇宙中的物质并不全部集中在星系中，星系之间的广阔空间里，充斥

着气体、尘埃和“熄灭”了的星体。星系团的质量可以用两种方法测量。一种是光度方法，即通过测量星系团中各个星系的光度，根据星系光度和质量之比（“质光比”），推出各个星系的质量，将它们取和，得出整个星系团的总质量。另一种方法是动力学方法，即测量星系团各个成员星系的红移，根据多普勒效应，得出各个星系之间的相对运动速度；再根据维里定理（一个稳定的自引力体系，体系总的内部动能 T 的二倍，与体系总引力势能 Ω 之和等于零，即 $2T+\Omega=0$）算出星系团的总质量。

1933 年，瑞士天文学家兹威基（F、Zwicky，1898～1974）用上述两种方法首先发现，后发星系团的动力学质量竟比光度质量大 400 倍，这个结果表明，星系团中存在着大量不可视物质。此后的一系列观测发现，星系团的动力学质量大于光度质量是星系群和星系团的普遍现象，只是二者不相符的情况没有那么大而已。

1978 年，天文学家们通过星系的转动曲线的测定，进一步证明了暗物质的存在。所谓星系的转动曲线，是指围绕旋涡星系转动物体的速度与其旋转半径的关系。转动曲线描述了距星系中心不同距离的物体，在星系盘上的轨道速度分布。出人意料的是，观测发现在星系发光区域之外，物体的转动速度与距星系中心的距离无关，不同距离上的物体竟有相同的转动速度。由力学原理可知，星系四周转动物体的离心力必等于星系的万有引力，由星系四周物体的转动速度分布，可测出星系周围的引力场，由引力场分布和质量分布的关系，亦即引力场所满足的牛顿方程，可计算出星系四周的质量分布，从而测定星系周围所存在的“晕”。对上述转动速度与距离无关的反常现象的惟一解释是，星系周围的空间不是真空，而是存在着质量可观的晕，这个晕是由不发光、不可视的物质组成的。

在宇宙学中，有一个非常重要的物理量，即宇宙物质的临界密度 ρ_c。这是一个很小的数值，约相当于每一立方米中有 0.5 个质子。它的物理意义在于：如果宇宙物质的平均密度 $\rho_0>\rho_c$，我们的宇宙将是封闭式宇宙，亦即现今的宇宙膨胀终会由于万有引力所引起的阻尼，而慢慢减小膨胀速度并且重新收缩，宇宙将交替地经历膨胀－收缩－膨胀的无限过程，这又叫作振荡式的宇宙；如果 $\rho_0<\rho_c$，我们的宇宙将无限膨胀下去，这称为开放式宇宙。暴胀宇宙论提出一个假说，即我们的宇宙中，正好有 $\rho_0=\rho_c$，这是暴胀宇宙论所蕴含的一个重要思想。但是，宇宙的平均密度 ρ_0 到底是多少，这要由观测资料来决定。用前面提到的光度方法，通过对发光天体的直接计数，可知发光天体的平均密度为 $\rho_L\approx 0.007\rho_c$，只占临界密度的极小部分。而由无线电望远镜对星系四周氢云的转动曲线的测定，可测得星系四周的晕的平均密度 $\rho_H\approx$（0.07～0.10）ρ_C，这比发光天体的平均密度大 10 倍左右。

有没有可能组成“晕”的物质成分也是常见物质，如不发光的矮星、褐矮星呢？从理论上讲，这是不大可能的。因为由常见物质（质子、中子、电子）组成的各种物质形态，必然有较强的电磁相互作用和强相互作用；当它们在万有引力作用下逐渐收拢成各种各样凝聚状态时，就会以光子或中微子的形式大量释放能量，从而形成各种等

级的发光天体。1994 年，用 10 米望远镜进一步测出红移量 $Z=3.3$ 的远河外星云中的氘核 D 与氢核 H 的丰度比为 $D/H\approx 2.5\times 10^{-4}$。由于是从远河外星云里测出的数值，它必然更接近于早期宇宙演化过程中的 D/H 值。由宇宙学中的元素合成理论可知，这个丰度比值非常灵敏地依赖于原始宇宙中常见物质的平均密度 ρ_b 的数值。由新测出的 D/H 值可以推知，$\rho_b>0.03\rho_c$。所以，由 D/H 比值可以得出，常见物质的总量最多仅为发光物质的 $0.03/0.007=4.2$ 倍。这意味着由星系四周晕的旋转曲线所测定的 ρ_H 值，已可确定在晕中必存在着非常见物质形成的暗物质。这个观测结果，被认为是天文学上近年来的第一件重大发现。

所以，多数天文学家现在相信宇宙中确实存在着比常见物质多得多的暗物质。

3. 暗物质的探寻

暗物质是些什么东西？它们是粒子还是场，亦或是二者的统一？又如何去寻找暗物质？这些问题是当前天文学家们关注的热点。宇宙学的理论认为，暗物质可能有两种形态：一种是热暗物质，即在宇宙形成物质世界时，保持着其相对论性粒子状态的暗物质；另一种是冷暗物质，即在宇宙形成物质世界时，已成为非相对论性粒子的暗物质。这两类暗物质在宇宙演化过程中起着不同的作用，但缺一不可。今天宇宙中之所以存在超星系团、星系团以及星系等发光天体系统，是直接与两类暗物质的存在相关的。这种观点已经越来越受到天文学家们的重视。为了能最圆满地解释当前观测到的星系团在宇宙空间的分布状况，并且满足高精度的关于宇宙背景辐射的观测结果（在卫星上进行的称为 COBE 的观测实验，测得宇宙空间确实存在满足普朗克黑体辐射曲线的宇宙背景辐射，其温度为 2.735K，偏离量仅为 10^{-5}），一种最佳的分配模型假说是：

$$\text{常见物质平均密度 } \rho_b = 0.02\rho_0,$$
$$\text{热暗物质平均密度 } \rho_{热} = 0.24\rho_0,$$
$$\text{冷暗物质平均密度 } \rho_{冷} = 0.74\rho_0。$$

按照这个假说，暗物质占宇宙物质总量的 98%，远远超过常见物质的总量。当然，这个假说还有待进一步确证。

1980 年，一些物理学家宣称，中微子的质量可能不为零；苏联的一个实验小组更具体地说，电子中微子的静止质量约为 6×10^{-28} 克。这个消息立刻在天文学界引起强烈反响，给困惑天体物理学家的暗物质问题投注一束希望之光，中微子立即成为热暗物质的最佳候选者。热大爆炸学说预言，在今日的宇宙里，每立方厘米空间内大约有 100 个中微子。如果它们有微小的静止质量，如果其中有一种中微子，如 ν_τ 中微子有 8eV 的静止质量，数量惊人巨大的全部中微子就足够提供多达 24%的宇宙物质质量，它们的引力足以主宰整个宇宙。另外，由于粒子物理学中的弱电统一模型是在中微子无质量的假定下建立起来的，所以一旦中微子被证实有质量，粒子物理学的标准模型必须

扩充，建立超出标准模型的更基本的理论。所以，中微子到底有没有静止质量，已成为天体物理学家和粒子物理学家共同研讨的重要领域。

1998年6月，苏波（Super-Kamiokande）实验组在第十八届中微子和天体物理国际会议上正式报道了中微子振荡的实验证据，立即被看作是天体物理和粒子物理领域的重大实验结果。所谓中微子振荡，是指一种中微子在运动过程中逐渐转化成含有另一种中微子的成分，再继续运动时又逐渐转化回来，从而表现为中微子类型的比例按运动距离而做周期性变化。这个现象的前提条件是中微子必须具有静止质量，而且不同类型中微子的静止质量不相等。不过，中微子振荡现象，只能给出两类中微子的质量差，从而间接得知中微子有质量，而不能给出各类中微子质量的绝对值，所以这种方法是一种间接法。反冲核法可以根据反冲核和电子的能量、动量的测定确定反冲核和电子的动量与能量，从而计算出中微子所带走的动量和能量，进而确定中微子的质量，这是一种直接法。到目前为止，用直接法只是给出了三种中微子静止质量的上限：电子型中微子ν_e的静止质量小于9.4eV，μ型中微子ν_μ的静止质量小于0.52MeV，τ子型中微子ν_τ的静止质量小于2.5MeV。这种方法给不出中微子静止质量的下限，所以并未排除静止质量为零的可能。

总之，由于中微子的特殊性质及其在微观粒子和宏观宇宙的探索中所扮演的重要角色，已经成为粒子物理和天体物理的一个探索热点。相信进一步的中微子实验，将会揭开中微子质量之谜，并成为粒子物理学和宇宙学发展的一个突破口。

至于冷暗物质，目前尚未能从现有已知的粒子中找到合适的候选者。仅仅知道这类形成冷暗物质的粒子必须是稳定的、中性不带电、仅有弱相互作用和引力相互作用，其质量必须很重，至少是质子质量的50倍，如此等等。当前最有可能成为冷暗物质候选者的，是所谓具有“超对称”特性的某类粒子。超对称是指费米子（自旋为半整数的粒子）和玻色子（自旋为整数的粒子）有某种破缺了的对称性；现在已知的粒子，都有它的超对称伙伴粒子，并且都有超对称的量子数$R=1$，而现在已知的粒子却只有$R=0$的量子数；这些伙伴粒子被统称为“微子”，与光子对应的称为“光微子”，与引力子对应的称为“引力微子”，如此等等。由于这些设想中的微子的加入，粒子家族的成员立刻增加了一倍。但是，这些增加的微子，大多有一个特点，即质量均极重，寿命均极短，所以在目前的超高能对撞机上，尚无法测知。人们设想，在这新增加的微子家族中，必有一个质量是最低的，但却是中性的稳定的粒子；也不排除存在某些不稳定、但寿命较长的带电或不带电的超对称微子。这个中性的、稳定的、重质量的超对称粒子，自然成为冷暗物质的最佳候选者，被称为第一中性微子（Neutra-lino），表示为C^0。

由于这种C^0粒子可能占了宇宙总质量的74%，自然成为探寻的重要对象。由于弱相互作用对这些粒子形成暗物质是有利的，使得探寻工作变得十分困难，因为它们能直接穿透地球和太阳，更不用说实验室里的探测器了。天体物理学家们只好借助观测

一种光度小、呈球形分布的星系——矮球状星系，来间接推断冷暗粒子的性质。例如，在银河系周围，就有若干个矮球状星系，距银河系中心大约有 20 万～60 万光年的距离。它们处在银河系的强大引力场中而不被银河系的潮汐力所瓦解，说明它们的质量很大；但它们的光度不大，说明其中发光物质不多，暗物质一定不少，而且这些暗物质粒子的静止质量必定很大，不然就不可能留在这种矮小的星系里。由此猜测，这些暗物质很可能是引力微子或光微子。

实验物理工作者目前也在用各种方法探测 C^0 的存在。方法之一是制造各种灵敏度极高的核探测器，以检测由 C^0 引起的原子核的反冲，以间接证实 C^0 的存在。有些实验工作者还企图用宇宙线方法，检测在宇宙空间里由 C^0 的湮灭过程

$$2C^0 \rightarrow 2\gamma$$

所释放出的单能光子。到目前为止，尚未得出可信的结果。

当然，也还有一些天文学家认为暗物质根本不存在，他们提出，已经观测到一些星系团正在膨胀和散开；因此没有必要假设在星系群或星系团内存在大量的暗物质，以提供强大的引力来保持星系群或星系团的动力学平衡状态。还有一些天文学家认为，暗物质的概念，是把牛顿的万有引力和动力学规律应用于星系这一天体层次而得以提出的，但牛顿力学只是从太阳系的观测数据中推出的，不能认为牛顿力学在星系这种环境下也是适用的。看来，围绕着暗物质是否存在这一问题，认识上的分歧也是很大的。

回顾 20 世纪物理学发展的成就，我们看到，现代物理学在微观、宏观、复杂系统和现代生物学四个基本方向上，把人类对自然界的认识推进到前所未有的深度和广度；但在新领域、新成果、新学科层出不穷的同时，却又揭示出许多新的物理学难题。科学难题的提出是大好事，每一个重大的科学难题，都预示着科学发展的一个新方向，预示着一个重大突破的临产。

在物理学的各个研究领域中，历来都有人做出发现已近尾声的预言，但这些预言无一不遭到历史的揶揄，每一个研究领域都不断涌现出激动人心的新发现。在过去的几十年里，每几个年头都有一些物理现象和方法的发现，它们是人们当初所未曾预料到的。可以断言，在今后的年代里，也一定会更加频繁地出现这些难以预料的新发现。以研究物质结构和运动在各个层次上的基本规律，提出新概念、建立新理论为目标的物理学理论研究，将始终处于整个自然科学发展的前沿，始终不会闭塞上探索的目光。物理学的诞生和发展，几乎与人类认识自然和利用自然的历史共久远；未来物理学的发展，仍将与人类文明的进步共生同行，永远达不到终极真理的境地。

思 考 题

1. 什么是对称性破缺疑难和夸克囚禁疑难？解决这两大疑难的出路何在？
2. 什么是类星体能源疑难？目前的研究现状如何？

3. 什么是暗物质？暗物质存在的证据是什么？怎样探寻暗物质？

4. 20 世纪的物理学取得了哪些重大成就？除本文讲到的重大疑难外，当代物理学还面临着哪些困难问题？

5. 任何一门物理学理论都不是终极真理，都存在着它的局限性和未决问题。请选择一门你学过的物理学理论，试概括出它所取得的主要成就，指出它所存在的局限和问题，并思考一下这门理论可能的研究前景。

参考文献

爱因斯坦，英费尔德著．周肇威译．1962．物理学的进化．上海：上海科学技术出版社

爱因斯坦．1976～1983．爱因斯坦文集·第一～三卷．北京：商务印书馆

戈革．1999．史情室文帚——科学史与科学哲学文集．北京：中国工人出版社

关洪．1994．物理学史选讲．北京：高等教育出版社

郭奕玲，沈慧君．1993．物理学史．北京：清华大学出版社

海森伯著．范岱年译．1981．物理学和哲学．北京：商务印书馆

何祚庥，侯德彭主编．1992．量子力学的丰碑——纪念德布罗意百年诞辰．桂林：广西师范大学出版社

李约瑟．1975．中国科学技术史·第一卷第一分册．北京：科学出版社

卢鹤绂．1984．哥本哈根学派量子论考释．上海：复旦大学出版社

卢侃，孙建华编译．1991．混沌学传奇．上海：上海翻译出版公司

杰·克·麦克斯韦著．戈革译．1991．电磁通论．武汉：武汉出版社

派斯 A．著，陈崇光等译．1988．上帝是微妙的——爱因斯坦的科学与生平．北京：科学技术文献出版社

彭加勒著．李醒民译．1988．科学的价值．北京：光明日报出版社

钱德拉塞卡 S．著．杨建邺，王晓明译．1997．莎士比亚、牛顿和贝多芬——不同的创造模式．长沙：湖南科学技术出版社

申先甲等．1987．物理学史教程．长沙：湖南教育出版社

申先甲等．1985．物理学史简编．济南：山东教育出版社

宋德生，李国栋．1987．电磁学发展史．南宁：广西人民出版社

宋玉升等译．1984．诺贝尔奖获得者演讲集·物理学．北京：科学出版社

王福山．1983．近代物理学史研究．上海：复旦大学出版社

王自华，桂起权．1999．海森伯传．长春：长春出版社

韦伯 R．L．1985．诺贝尔物理学奖获得者．上海：上海翻译出版公司

魏凤文，申先甲．1994．20 世纪物理学史．南昌：江西教育出版社

魏凤文等编译．1990．现代物理学进展，长沙：湖南教育出版社

向义和．1994．物理学基本概念和基本定律溯源．北京：高等教育出版社

人名索引

A

阿伯拉罕（Mas Abraham，1875～1922） 260
阿尔瓦雷茨（L. W. Alvarez，1911～1988） 335
阿伏伽德罗（Amedeo Avogadro，1776～1856） 167
阿基米德（Archimedes，约公元前 287～前 212） 2，69，70，71，72，74
阿拉果（D. F. J. Arago，1786～1853） 131，132，133，135，190，191，194，229
阿勒-哈齐尼（Al-Khazini，12 世纪时人） 75
阿勒-哈增（Al-Hazen，965～1038） 74，75
阿里斯塔克（Aristarchus，约前 310～前 230） 72
阿蒙顿（Guillaume Amontons，1663～1705） 146，362
阿那克西曼德（Anaximander，前 611～前 547） 65，67
阿那克西米尼（Anaximanas，前 585～前 528） 65
阿诺德（V. I. Arnold） 380
阿维（Bene'-Just Hauy，1743～1822） 352
阿维森纳（Avicenna，980～1037） 77，78
埃格斯特朗（Anders Jonas Angstrom，1814～1874） 140，141
埃拉托色尼（Eratosthenes，前 270～前 196） 72，73
埃利阿斯贝格（Г. М. Эллиасберг） 369，372
埃伦菲斯特（P. Ehrenfest，1880～1933） 235，299，300，，365
埃皮努斯（F. U. T. Aepinus，1724～1802） 181
埃施瓦雷（J. Ishiware） 254
艾尔伯特（Albert of Saxony） 77
艾利斯（C. D. Ellis） 334
艾伦（J. S. Allen） 336
艾伦德（D. Alender） 373
爱丁顿（A. S. Eddington，1882～1944） 278
爱因斯坦（Albert Einstein，1879～1955） 2，3，12，18，21，23，24，25，177，235，240，241，248～281，285～289，291，302，306，308，309，311～318，402
安德鲁斯（Thomas Andrews，1813～1885） 361
安德森（C. D. Anderson，1905～1991） 338，339，342，343
安德森（Philip Warren Anderson，1923～ ） 370，371
安培（A. M. Ampère，1775～1836） 23，188，190，191，193，198～202，220
昂内斯（Heike Kamerlingh Onnes，1853～1926） 362～365
昂萨格（Lars Onsager，1903～1976） 397
奥耳舍夫斯基（Karol S. Olszewski，1846～1915） 362
奥克森费尔特（R. Ochsenfeld） 364，365
奥雷斯姆（Nicolas Oresme） 79
奥恰里尼（G. P. S. Occhialini） 339
奥斯特（H. C. Oersted，1777～1851） 20，153，188～191，193，196
奥斯特瓦尔德（Wilhelm Ostwald，1853～1932） 163，178

B

巴本（Denis Papin，1647～1714） 143
巴丁（John Bardeen，1908～ ） 367，368，371，

373
巴耳末 (Johann Jokeb Balmer，1825～1898) 141
巴克拉(Charles Glower Barkla，1874～1944) 297，354，355
巴罗 (Isaac Barrow，1630～1677) 107，121
巴罗 (P. Barlow，1776～1862) 191
巴门尼德(Parmenider，约前 540～前 470) 67，68
巴塞林 (Erasmus Barrtholinus，1625～1698) 120
柏拉图 (Plato，约前 427～前 347) 66
柏诺兹 (Johannes Geog Bednorz，1950～) 373，374
坂田昌一 (1911～1970) 339，345，346
鲍威尔 (C. F. Powell，1903～1969) 339
贝克勒尔 (Henri Antoine Becquerel，1852～1908) 222～224，320，357
贝克尔 (H. Becker) 326，327
贝克尔 (R. Becker) 365
贝克莱 (G. Berkeley，1684～1753) 240
贝索 (M. Besso，1873～1955) 248，251
贝佐尔德(Wilhelm von Bezold，1837～1907) 212
本生 (Robert Wilhelm Bunsen，1811～1899) 140，363
比克曼 (Isaac Beeckman，1588～1677) 101
毕奥 (Jean Baptiste Biot，1774～1862) 148，188，190
毕达哥拉斯 (Pythagoras，约前 560～前 480) 66，67，123
别洛索夫 (B. P. Belousov 1893～1970) 395
波多尔斯基 (B. E. Podolsky，1896～1966) 317
波根道夫 (J. C. Poggendorff，1796～1877) 192
波普 (Karl R. Popper，1902～1993) 7～10
波义耳(Robert Boyle，1627～1691) 119，121，150，165
玻恩(M. Born，1882～1970) 304，312，332，333，367
玻尔 (A. Bohr，1922～) 28，334
玻尔 (N. Bohr，1885～1962) 294，295，296，298，299，304～306，311～318，330，331，332，335，354
玻耳兹曼 (Ludwig Boltzmann，1844～1906) 174～176，222，234，236，282
玻列利 (Alphonse Borelli，1608～1678) 104
玻色 (S. N. Bose) 178
伯克霍夫(George Birkhoff，1884～1944) 379
伯纳德 (Henri Bernard) 395
伯努利 (D. Bernoulli，1700～1782) 113，151～152，165～166，172，181
泊松 (Siméon Denis Poisson，1781～1840) 114，132，149，152，186，204
博特 (W. W. G. F. Bothe，1891～1957) 326，327
布拉德雷 (James Bradley，1693～1762) 103，134，228，236
布拉顿 (Walter Houser Brattain，1902～1987) 368
布拉菲 (Anguste Bravais，1811～1863) 352
布拉开特 (P. M. S. Blackett，1897～1974) 322，343
布拉格 (Sir William Henry Bragg，1862～1942) 314，354，355
布拉格 (Sri William Lawrence Bragg，1890～1971) 354～355
布莱克 (Joseph Black，1728～1799) 144，147～148，150
布朗 (Robert Brown，1773～1858) 177
布雷 (J. Bray) 373，395
布里丹 (John Buridan，1295～1358) 78
布鲁诺(Giordano Bruno，约 1548～1600) 24，86
布洛赫 (Felix Bloch，1905～1983) 359～360
布儒斯特(David Brewster，1781～1868) 130，131，139

布雪勒（A. H. Bucherer，1863～1927） 261

C

查德威克(James Chadwick，1891～1974) 326，327，331，334
长冈半太郎(Hantaro Nagaoka，1865～1950) 293
陈显微（宋代） 53
陈元靓（1100～1150） 55

D

达·芬奇（Leonardo da Vinci，1452～1519) 78，84～85，152
达朗贝尔（J. R. d'Alembert，1717～1783) 112～114
达文波特（F. G. Davenport） 253
戴恩斯（C. R. Dynes） 372
戴森（Freeman John Dyson，1923～ ） 355
戴维(Humphrey Davy，1778～1829) 151，153，188，194，220
戴维斯（R. Davis） 336
戴维孙（Clinton Joseph Davison，1881～1958) 303，356
道尔顿（John Dalton，1766～1844） 69
德·顿戴(Thophile de Donder，1873～1957) 397
德拜（Peter Debye，1884～1966） 298，309，359
德布罗意（Louis de Broglie，1892～1987) 300～304，308，309，313
德鲁德(Paul Karl Ludwig Drude，1863～1906) 357～358
德谟克立特(Democritus，约前460～前361) 67，68，123
狄拉克（Paul Adrien Maurice Dirac，1902～1984） 178，300，307，311，335，341，342，343，344
笛卡儿(Rene Descartes，1596～1650) 40，92，101～103，107，112，117，118，119，120，121，123，126，150，227
笛索米斯(C. B. Desormes，1777～1862) 188
第谷·布拉赫（Tycho Brahe，1546～1601) 88～89
丁铎尔(John Tyndall，1820～1893) 177，234
丁缓（西汉末年） 44
丁肇中（Samuel Chao Chung Ting，1936～) 348，349
董仲舒（前179～前104） 59
杜菲(Charles Francois Du Fay，1698～1739) 180
杜隆（Pierre Louis Dulong，1785～1838） 148
杜瓦（James Dewar，1842～1923） 362，365
杜佑（735～812） 56

E

厄缶（Baron R. von Eötvö，1848～1919) 266～267
厄瓦耳（Paul Peter Ewald，1888～?） 353
恩培多克勒(Empedocles，约前493～433) 65，66

F

法布里（C. Fabry，1867～1945） 279
法拉第（M. Faraday，1791～1867） 14，24，153，157，191，194～198，203，204，207，219，220，228，361
范德格拉夫（R. J. Van de Graaff，1901～1967) 324
范德瓦尔斯（J. D. van der Waals，1837～1923） 170～172
范弗莱克（John Hasbrouck Van Vleck，1899～1980） 370
方以智（1611～1671） 26，39，49，52
菲茨杰拉德(George Fitzgerald，1851～1901) 212，243
菲涅耳(Augustin Jean Fresnel，1788～1827)

131，132，133，193，229，230，232，243，259
菲索（Armand Hippolyte Louis Fizeau，1819～1896） 135，137，229，231，232，236
斐劳波诺斯（Jahn Philoponus，6世纪） 77
费德森(B. Wilhelm Feddersen，1832～1918) 212
费多洛夫（E.C.Fedorov） 352
费根鲍姆（Mitchell Feigenbaum） 386，387
费竭纳（G.T.Fechner，1801～1887） 202，
费马（Pierre Fermat，1601～1665） 117，118，126
费米（Enrico Fermi，1901～1954） 178，328，329，330，331，335，345，356
费希尔（J.C.Fisher） 369
费因曼（R.P.Feynman，1918～1988） 17
夫琅和费（Joseph von Fraunhofer，1787～1826） 139
弗朗克（J.Franck） 252
弗里施（O.R.Frisch，1904～1979） 330
弗伦奇（A.P.French） 28
弗罗里希（Herbert Frohlich，1905～ ） 367～368
伏打（A. Volta，1745～1827） 187
傅科（Jean Bernard Leon Foucault，1819～1868） 135，136，137，139
傅里叶（J. B. J. Fourier，1765～1830） 148～150，204
富兰克林（Benjamin Franklin，1706～1790） 24，180，181，188

G

伽伐尼（A. Galvani，1737～1798） 153，186，187
伽勒（Johann Gottfried Galle，1812～1910） 107
伽利略（Galileo Galilei，1564～1642） 20，27，28，42，70，77，78，79，86，89～92，94，96～101，104，107，113，133，145，151，238
伽桑狄（Pierre Gassendi，1592～1655） 164
盖尔曼（M. Gell-Mann，1929～ ） 346，347
盖革（Hans Geiger，1882～1947） 293
盖斯勒（Heinrich Geissler，1814～1879） 220
高凯耳（A.Cockel） 341
高斯（Carl Friedrich Gauss，1777～1855） 118，184，186，193，274，275
高诱（生活在2～3世纪） 53，58，59
戈特（Cornelis Jacobus Gorter，1907～1980） 365
哥白尼（Nikolaus Copernicus，1473～1543） 86～88
哥尔德斯坦（Eugen Goldstein，1850～1930） 220
革末（Laster Helbert Germer，1896～1971） 356
格拉泽(Donald A.Glaser，1926～) 323，324
格兰斯道夫（Paul Glansdorff） 398，399
格雷（Stephen Gray，1670～1736） 179，180
格里凯（Otto von Güericke，1602～1686） 146，179
格里马第（Francesco Maria Grimaldi，1618～1663） 118，125
格林（George Green，1793～1841） 186
格林斯坦（J.L.Greenstein，1909～ ） 279
格罗夫(William Robert Grove，1811～1896) 158
格罗斯曼(M. Grossmann，1878～1936） 268，274，275，276
葛洪（283～343） 42
巩珍（明代） 55
古兹密特(Samuel. A. Goudsmit，1902～1978) 299，300
郭璞（276～324） 52

H

哈迪（G.F.Hardy） 372

哈恩（Oto Hahn，1879～1968） 329，330
哈金斯（Sir William Huggins，1824～1910） 141
哈雷（Edmund Halley，1656～1742） 105
哈密顿（William Rowand Hamilton，1805～1865） 118，115，152，311
哈切特（J. N. P. Hachetle，1769～1834） 188
海森伯（Werner Karl Heisenberg，1901～1976） 20，298，299，304～308，311，312，331，337，338，359～360，367
亥姆霍兹（H. Von Helmholtz，1821～1894） 155，158～159，196，203，211，212，219，231，
亥维赛（Oliver Heaviside，1850～1925） 214，215
韩非子（约前280～前233） 54
韩婴（西汉） 59
汉森（H. M. Hansen，1886～1956） 295
赫拉克立特（Heraclitus，前540～前475） 65
赫拉帕斯（J. Herapath，1790～1868） 167～168
赫林（C. Herring） 361
赫斯（V. F. Hess，1883～1964） 341
赫歇尔（Friedrich William Herschel，1738～1822） 138，139，233
赫兹（Heinrich Hertz，1857～1894） 212～216，221，226，236，242，287
黑勒（G. Heller） 365
黑斯（Hess，1802～1850） 154
亨利（J. Henry，1799～1878） 28，195
亨内考（Villard de Honnecourt） 152
洪堡（Alexander Von Humboldt，1769～1859） 357
胡尔斯（R. A. Hulse，1950～ ） 281
胡克（Robert Hooke，1635～1703） 43，105，107，119，120，121，123，125，150，165，228
华伦海特（Gabriel Danile Fahrenhert，1686～1736） 146～147
桓谭（汉代） 49
惠更斯（Christian Huygens，1629～1695） 27，94，102～104，107，112～113，120，125，126，127，128，130，131，133～134，151，153，228，240
惠勒（J. A. Wheeler，1911～） 318，330，332，340
惠施（约前375～前318） 35，36
惠斯通（Sir Charles Wheatstone，1802～1875） 135
霍尔顿（G. Holton） 23
霍尔瓦克斯（Wilhelm Hallwachs） 287
霍普夫（Eberhard Hopf，1902～1983） 387

J

基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff，1824～1887） 140，193，233，282，363
吉伯（William Gilbert，1540～1603） 179，187
吉布斯（Josah Willard Gibbs，1839～1903） 175～176，301
加埃沃（Ivar Giaever，1929～ ） 369～370
加斯蒂（E. Justi） 372
贾公彦（隋唐年间） 43
江崎玲于奈（Leo Esaki，1925～ ） 369～370
姜岌（晋代） 50
焦耳（Janes Prescott Joule，1818～1889） 153，156，158，162，167，361
金斯（Jams Hopwood Jeans，1877～1946） 235
京茨堡（Vitaly Lazarevich Ginzburg，1916～ ） 366，373
井上（T. Inone） 339
玛丽·斯可罗多斯卡·居里（Maria Sklodowska Curie，1867～1934） 24，223～225
皮埃尔·居里（Pierre Curie，1859～1906） 24，223，225，358

K

卡诺（Ssde Carnot，1796～1832） 151，158，160～163，236

卡文迪什（Henry Cavendish，1731～1810） 107，184，185
卡西米尔（Hendrik Brugt Gerhard Casimir，1909～ ） 365
开尔文（Lord Kilvin，即 Willian Thomson，1824～1907） 14，161，185，222，363，401
开普勒（Johannes Kepler，1571～1630） 24，75，88～89，107，117
开索姆（Willem Hendrik Keesom，1876～1956） 365
康尼查罗（S. Cannizzaro，1826～1910） 167
康普顿（A. H. Compton，1892～1926） 290～292，314
考夫曼（Walther Kaufmann，1871～1947） 236，260
考克饶夫（S. J. D. Cockcroft，1897～1967） 324
柯恩（C. Cowan，1919～ ） 336
柯尔丁（Ludwig August Colding，1815～1888） 158
柯尔莫果洛夫（A. N. Kolmogorov） 380
科恩（M. H. Cohen） 371
科尔劳施（R. Kohlrausch） 209
科赫（Helge Von Koch，1870～1924） 391
科拉顿（Jeans Deniel Colladon，1802～1892） 195
科里奥利（Gaspard Gustave Coriolis，1792～1843） 113，152
克拉贝龙（B. P. E. Clapeyron，1799～1864） 161
克拉弗特（T. B. Крафт） 147
克莱斯特（Ewald Georg von Kleist，1700 以后～1748） 180
克劳姆林（C. D. Crommelin） 278
克劳修斯（R. E. Clausius，1822～1888） 158，162～164，168～170，172，173，357
克雷（J. Clay） 363
克雷洛（Alexis Claude Clairault，1713～1765） 106
克里克（Francis Harry Compton Crick，1916～ ） 353，355
克鲁克斯（William Crooks，1832～1919） 220，222
克仑尼希（August Karl Krŏ nig，1822～1879） 167～168
克罗尼格（R. L. Kronig） 299
孔特（August Kundt，1839～1894） 423
孔韦尔西（M. Conversi） 338
孔颖达（574～648） 50，52
库埃特（M. M. Couette，1858～1943） 387
库恩（Thomas S. Kuhn，1922～） 9，10
库仑（C. A. Coulomb，1736～1806） 182～184，185，188
库珀（Leon North Cooper，1930～ ） 367～368

L

拉比（I. I. Rabi，1898～1988） 15
拉卡托斯（Imre Lakatos，1922～1974） 10，11
拉摩（Joseph Larmor，1857～1942） 220
拉格朗日（Joseph Lagrange，1730～1813） 113，115，152，186，311
拉普拉斯（P. S. M Laplace，1749～1827） 22，114，132，148，152，186，190，204，376，377
拉特格斯（A. J. Rutgers） 365
拉特斯（C. M. G. Lattes） 339
拉瓦锡（Antoine Laurent Lavoisier，1743～1794） 148，153～154
莱布尼茨（G. W. F. von Leibnitz，1646～1716） 40，111，113，151
莱德曼（L. M. Lederman） 336，349
莱因斯（F. Reines，1918～ ） 336
赖尔（Sir Martin Ryle，1918～ ） 355
兰伯特（Johann Heinrich Lambert，1728～1777） 148，362
兰金（William John Rankine，1820～1872） 158

朗道（Lev Davidovich Landau，1908～1968） 366，387
朗格（L. Lange，1863～1936） 241
朗之万（P. Langevin，1872～1946） 301，302，308，358～359，365
劳厄（Max Theodor Felix von Laue，1879～1960） 23，198，297，353～354
劳伦斯（E. Lawrence，1901～1958） 324，325
老子（春秋末年） 40，41
勒纳德（Philipp Lenard，1862～1947） 221，222，236，287，288，292
勒维烈（Urbain Jean Joseph Leverrire，1811～1877） 107，277
勒维-契维塔（Tulio Levi-Civita，1873～1941） 274，275
雷布卡（G. A. Rebka） 279
楞茨（H. F. E. Lenz，1804～1865） 153，193，195
黎曼（B. Riemann，1826～1866） 274，275
李比希（Justus Liebig，1803～1873） 153
李开（C. V. Eduard Riecke，1848～1915） 357，358
李政道（1926～ ） 21，401，402
李约瑟（Joseph Needham，1900～1995） 26
里德伯（Johannes Robert Rydberg，1854～1919） 141
里赫曼（Г. В. Рихман，1711～1753） 24，147
里克特（B. Richter，1931～ ） 348
里奇（G. Ricci-Curbastro，1853～1925） 274
里切尔（Jean Richer，1630～1696） 104
里特（Johann Wilhelm Ritter，1776～1810） 138，188
利特耳（W. A. Little） 373
林德（Karl Linde，1842～1934） 362
刘伯温（1311～1375） 52
刘献廷（1648～1695） 53
刘歆（？～23） 44
刘易斯（G. N. Lewis，1875～1946） 287
刘禹锡（772～842） 37
留基伯（Leucippus，约前490～？） 67，68
柳宗元（773～819） 37
卢克莱修（Lucretius，约前95～约前55） 69，73
卢默尔（Otto Lummer，1860～1925） 234，283
卢瑟福（Ernest Lord Rutherford，1871～1937） 225，236，293，294，320，321，322，324，326
鲁本斯（H. Rubens，1865～1922） 283
吕不韦（？～前235） 58
伦敦（F. London，1900～1954） 365～366，368，373
伦敦（H. London，1907～1970） 365
伦恩（Christopher Wren，1632～1723） 102
伦福德（Count Rumrord，即 Benjamin Thompson，1753～1814） 151，153
伦琴（Wilhelm Konrad Röntgen，1845～1923） 221，222，242，353
罗宾森（John Robison，1739～1805） 181
罗德拜克（G. W. Rodeback） 336
罗兰（H. A. Rowland，1848～1901） 140，260
罗迈诺西（G. D. Romagnosi，1761～1835） 188
罗蒙诺索夫（М. В. Ломоносов，1711～1765） 150，166
罗默（Olaf Romer，1644～1710） 133，134
罗森（N. Rosen，1909～ ） 317
洛仑兹（Edward Lorenz） 380～384，389
洛伦兹（Hendrik Antoon Lorentz，1853～1928） 220，231，232，237，242～245，247，250～254，261，297，298，314，357～358
洛喜密特（Joseph Loschmidt，1821～1895） 173～174

M

马赫（Ernst Mach，1838～1916） 20，177，240，245
马里古特（Pierre de Maricourt） 76

马吕斯（Etienne Louis Malus，1775～1812） 130，131，132
马斯顿（Ernest Marsden，1889～1945） 293，294，321
马梯阿斯（B. T. Matthias，1919～1980） 372
马夏克（R. E. Marshark ） 339
迈尔（Robert Mayer，1814～1878） 154～155，158，162
迈克耳孙（A. A. Michelson，1852～1931） 136，137，138，231，232，236，238，243，253，
迈斯纳（Walter Meissner，1882～1974） 364～365
迈特纳（L. Meitner，1878～1968） 329，330，334
迈耶夫人（Maria Goeppert-Mayer，1906～1972） 332，333
麦克米伦（E. M. McMillan，1907～1991） 325
麦克米伦（W. L. McMillian） 372
麦克斯韦（Fmanuel Maxwell） 367
麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831～1879） 172～176，200，202，204～216，228，230，231，236，286，357
曼德布罗特（B. B. Mandelbrot） 391，394
梅（Robert May ） 385
梅耳维尔（Thomas Melvill，1726～1753） 138
蒙日（Comte de Péluse Monge，1746～1818） 152
米切尔（J. Michell，1724～1793） 182
米歇耳（C. Michel） 373
密立根（Robert Millikan，1868～1953） 227，289，292，343
闵科夫斯基（H. Minkowski，1864～1909） 257，258，273
缪勒（Karl Alexander Muller，1927～ ） 373～374
莫泊丢（Pierre Louis Moreau de Maupertuis，1698～1759） 106，114～115
莫塞莱（H. G. J. Moseley，1887～1915） 297，354～355
莫塞尔（J. Moser） 380
莫特（Sir Nevill Francis Mott，1905～1996） 370
莫特森（B. R. Mottelson，1926～ ） 334
默多克（William Mardook） 144
穆斯堡尔（R. L. Mossbauer，1929～ ） 279
穆欣布罗克（Pieter wan Musschenbrock，1692～1761） 180

N

奈格尔（Ernest Nager） 6
南卓（唐代） 59
能斯特（Walther Nernst，1864～1941） 362
尼德迈耶（Neddermeyer） 338
尼曼（Y. Neeman，1925～ ） 346
牛顿（Isaac Newton，1642～1727） 25，27，28，94，105～112，120～126，128～130，138，148，150，165，239，240，242，278，376，413
纽康（Simon Newcomb，1834～1906） 137
纽科姆（Simon Newcomb，1835～1909） 277
纽可门（Thomas Newcomen，1663～1729） 143～144
诺达克夫人（T. Noddack，1896～ ） 329
诺伊曼（F. E. Neumann，1798～1895） 202，211

O

欧几里得（Euclid，约前 330～前 275） 71，72
欧拉（Leonhard Euler，1707～1783） 109，114，128，152，186
欧姆（Georg Simon Ohm，1789～1854） 28，192～193

P

帕金斯（D. Parkins） 339
帕邢（Friedrich Paschen，1865～1947） 141
潘契尼（E. Pancini） 338
庞德（R. V. Pound） 279，280
泡利（Wolfgang Pauli，1900～1958） 24，178，

298，299，312，335，359，365
培根（Francis Bacon，1561～1626） 7
培根（Roger Becon，1214～1294） 76
佩兰（Jean Baptiste Perrin，1870～1942） 177～178，221，225
庞加莱（Henri Poincaré，1854～1912） 222，223，235，238，245～248，254，375～379，384
彭塞利（Jean Victor Poncelet，1788～1867） 152
皮克泰特（Raoul Pictet，1846～1904） 362
皮帕德（Sir Alfred Brian Pippard，1920～ ） 366～368，370～371
皮乔尼（O. Piccioni） 338
珀耳帖（Jean Charles A. Peltier，1785～1845） 153
珀替（Alexis Petit，1791～1820） 148
普朗克（Max K. E. L. Planck，1858～1947） 28，175，178，234，237，282～287，289，301，311，316，362
普里戈金（Ilya Prigogine，1917～ ） 397～399
普列斯特利（J. Priestley，1733～1804） 181，184
普林尼（Pliny，23～79） 73
普林斯海姆（Ernst Pringsheim，1859～1917） 234
普吕克（Julius Plücker，1801～1868） 220

Q

钱三强（1913～1992） 12

R

茹勒（David Ruelle） 388，389
瑞恩沃特（L. J. Rainwater，1917～1986） 334
瑞利（Lord Rayleigh，1842～1919） 177，225，232，234，282，354
若斯勒（Otto Rössler） 389

S

萨伐尔（F. Savart，1791～1841） 190，191
塞贝克（Thomas Johann Seebeck，1780～1831） 153，192，194
塞茨（Frederick Seltz，1911～ ） 360
塞格雷（E. G. Segre，1905～1989） 344
塞曼（Piter Zeeman，1865～1943） 244，297，298
塞维利（Thomas Savery，1650～1715） 143
桑德奇（A. R. Sandage，1926～ ） 404
桑特尔（F. Santer） 365
沙皮罗（I. I. Shapiro） 280
沙维奇（P. Savitch） 329
摄耳修斯（Amders Celsius，1701～1744） 146
沈括（1031～1095） 26，45，46，48，49，50，52～56，59，60
慎到（前395～前315） 52
尸佼（前390～前330） 41
施里弗（John Robert Sehrieffer，1931～ ） 386
施米特（G. C. Schmidt，1856～1949） 224
施米特（M. Schmidt，1929～） 405
施特默尔（Marter Stromer） 147
施瓦茨（M. Schwartz，1932～ ） 336
史伯（西周末） 35
史蒂文森（C. E. Stevenson） 338
束皙（262～301） 42，49，50
斯蒂诺（Nicolaus Stenno，1638～1686） 352
斯莱特（John Clarke Slater，1900～1976） 361
斯米顿（John Smeaton，1724～1792） 144
斯莫卢霍夫斯基（Marian von Smoluchowski，1872～1917） 176～177，235
斯涅尔（Willibrod Snell，1591～1626） 117，118
斯塔克（Johannes Stark，1874～1957） 295
斯台文（Simon Stevin，1548～1620） 95～96，153
斯坦博格（J. Steinberger，1921～ ） 336

斯特藩（Joseph Stefan，1835～1893） 234
斯特拉斯曼（F. Strassman，1902～ ） 329，330
斯特里特（J. C. Street） 338
斯通尼（G. J. Stoney，1826～1911） 141，219
斯托克斯（George Gabriel Stokes，1819～1903） 230，231，236
宋钘（前4世纪） 36
宋沆（唐代） 59
宋应星（约1587～ ） 38，58
索第（Frederick Soddy，1877～1956） 225，236
索耳德纳（J. G. von Soldner，1776～1833） 278
索末菲（Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld，1868～1951） 296，298，353，359

T

泰肯斯（Floris Takens） 388，389
泰勒（Geoffrey Ingram Taylor，1886～1975） 387
泰勒（J. H. Taylor，1941～ ） 281
泰勒斯（Thales，前620～前550） 64，65，73
泰斯塔迪（L. R. Testardi，1930～ ） 372
汤川秀树（Yukawa Hideki，1907～1981） 338，339，340，345
汤姆孙（George Paget Thomson，1892～1975） 356
汤姆孙（Joseph John Thomson，1856～1940） 170，225～227，278，287，293，297，321，354，357～358，
汤姆孙（开尔文）（William Thomson，1824～1907） 152，157～159，161～162，203，204，205，207，212，361，362
特勒（E. Teller，1908～ ） 333
廷克海姆（M. Tincham） 369
图灵（Alan Turing） 389
托勒密（Ptolemy，100～170） 72，74，118
托马斯·杨（Thomas Young，1773～1829） 128～135

W

瓦尔顿（E. T. S. Walton，1903～1995） 324
瓦莱（Cromwell Fleetwood Varley，1828～1883） 220
瓦利斯（John Wallis，1616～1703） 102
瓦特（James Watt，1736～1819） 144，150
瓦特斯顿（J. J. Waterston，1811～1883） 167
外斯（Pierre Weiss，1865～1940） 358～359
王充（27～100） 37，49，51，52，54，58
王夫之（1619～1692） 38，39
王淦昌（1907～1998） 335，336，345
王廷相（1474～1544） 38
威尔金斯（Maurice Hugh Frederik Wilkins，1916～ ） 353
威尔逊（Charles Thomson Rees Wilson，1869～1959） 227，322，323
韦伯（Wilhelm Weber，1804～1891） 193，202，203，209，211，220，357
韦德曼（Gustav Heinrich Wiedemann，1826～1899） 221
韦斯科夫（V. F. Weisskopf，1908～ ） 21
维恩（Wilhelm Wien，1864～1929） 234，235，308
维格纳（Eugene Paul Wigner，1902～1995） 332，360
维拉德（Paul Villard，1860～1934） 225，320
沃格尔（Hermann Larl Vogel，1841～1907） 141
沃拉斯顿（W. H. Wollaston，1766～1828） 138，191，233
沃森（James Dewey Watson，1928～ ） 353，355
乌伦贝克（George E. Uhlenbeck，1900～1988） 299，300
乌罗布列夫斯基（Szygmunt F. Wrobleski，1845～1888） 362
吴健雄（1912～1997） 340

吴有训（1897～1977） 291
吴曾（南宋） 42
吾衍（元代） 49
伍斯特（W. A. Wooster） 334

X

西博格（G. T. Seaborg，1912～1999） 325，344
西耳斯比（Francis Briggs Silsbee） 363
西格班（Karl Geoge Siegbahn，1886～1978） 297，354
希尔（George William Hill，1838～1914） 377
希隆（Heron，前150～前100） 72～74，114，118
希托夫（Johann Wilhelm Hittorf，1824～1914） 219
夏皮罗（S. Shapiro） 371
香克兰（R. S. Shankland） 253
肖克莱（William Shockley，1910～1989） 368
谢林（F. W. J. von Schelling，1775～1854） 154
休恩伯格（David Shoenberg） 366
修尔姆（John Hulm） 372
修文（C・W・Sherwin） 337
薛定谔（Erwin Schrödinger，1887～1961） 308～311，313～315，359～360
荀子（约前298～前238） 37，43

Y

雅克・卡西尼（Jacques Cassini，1677～1756） 106
亚当斯（John Couch Adams，1819～1892） 107
亚当斯（W. S. Adams，1876～1956） 279
亚里士多德（Aristotle，约前384～前322） 20，66，69，70，72，73，76～78，118～120
燕昭王（前331～前279在位） 43
杨振宁（1922～ ） 21，345，367，402
伊壁鸠鲁（Epicurus，前341～前270） 68
伊尔文（Irvine） 148
伊凡宁柯（1904～ ） 331，337
伊斯梅尔・博里奥（Ismaël Boulliau） 145
尹文（前4世纪） 36
俞璞（宋代） 53
虞翻（三国时期） 52
约里奥-居里夫妇（Frédéric Joliot-Curie，1900～1958；Irene Joliot-Curie，1897～1956） 326，327，330，335，343
约瑟夫森（Brian David Josephson，1940～ ） 370～371

Z

曾公亮（998～1078） 54
曾三异（南宋） 53，55
扎鲍廷斯基（A. M. Zhabotinskii） 397
詹・雷伊（Jean Rey，1582～1630） 145
詹森（H. D. Jensen，1907～1973） 332，333
张伯伦（O. Chamberlain，1920～ ） 344
张果（中唐） 50，51
张衡（78～139） 44，45，49
张君房（宋代） 53
张文裕（1910～1992） 340
张载（1020～1077） 37～40
张志和（约730～810） 50，51
赵友钦（1279～1368） 45～47
赵忠贤（1941～ ） 374
赵忠尧（1902～1998） 342
郑玄（127～200） 43
周密（南宋） 52
朱熹（1130～1200） 36，38，50，52
朱载堉（1536～1610?） 57
庄绰（南宋初） 52
兹威基（F. Zwicky，1898～1974） 337，410

后　记

这本《物理学史教程》是在我们多年来教学经验和研究成果的基础上编写出来的。1979 年，首都师范大学物理系就率先系统开设了“物理学史”选修课，1984 年，建立了“物理学史”硕士点［现为“科学技术史（物理学史）”硕士点］，开始招收研究生。1987 年，申先甲教授主编由湖南教育出版社出版了《物理学史教程》。

20 世纪 90 年代以后，我们把加强素质教育作为教改目标，探索培养高素质人才的突破口和方式方法，积极开展物理学史与物理教育结合的研究和实践，参与了教育部和北京市的多项研究和教学研讨工作。我们多次修订了“物理学史”课程的教学大纲，编写翻译出版了一批教学参考书。1996 年，申先甲教授的研究工作“发挥物理学史的教育功能，推动物理教育改革”获得了北京市政府教学科研成果二等奖。2002 年，我研究室合作的论文“谈谈物理学史在素质教育中的作用”（大学物理，2000 年，11～12 期）获得了首届全国大学物理教学优秀论文三等奖。

2001 年，获得北京市教委“精品教材建设项目”的支持，我们有机会重新修订和编写了这部教材。我们参考了大量近年出版的有关教材和研究论著，在新教材的编写中努力突出以下特色：

1. 体现文理渗透和学科交叉，促进科学文化与人文文化的沟通。通过物理学发展过程的论述和分析，说明物理学是一个不断探索的过程，倡导科学精神、科学态度和科学方法。

2. 对物理学发展历史进行整体概括描述，突出重大物理学理论和概念的历史发展过程，同时特别注意加强 20 世纪物理学的发展和现代物理学思想方法的内容，全面反映 20 世纪物理学的发展概貌。

3. 增加物理学史与物理教学结合的有关内容。阐述物理学史的素质教育功能，说明物理学史在物理教学改革与人材培养中的作用，提出在物理教学中引入物理学史加强素质教育的原则和方法。

本书主编李艳平、申先甲负责提出编写大纲和进行统稿工作；本书绪论、第九章、第十三章和结语由申先甲编写；第一章、第二章、第五章和第十一章由刘树勇编写；第三章、第四章、第六章、第十二章由王士平编写；第七章由申先甲和李艳平编写；第八章、第十章由李艳平编写。

感谢科学出版社孔国平先生为本书出版所做的大量工作。

衷心希望读者对书中存在的问题提出批评指正。

作　者

2002 年 10 月于北京