APPU

The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书·理论物理专辑

原子论的历史和现状

——对物质微观构造认识的发展

关 洪 著

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书·理论物理专辑

原子论的历史和现状

——对物质微观构造认识的发展

关 洪 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

原子论的历史和现状——对物质微观构造认识的发展/关洪著. —北京:北京大学出版社,2006.11

(北京大学物理学丛书·理论物理专辑)

ISBN 7-301-10792-7

Ⅰ.原… Ⅱ.关… Ⅲ.原子论-高等学校-教材 Ⅳ.0562

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 062034 号

书　　名:原子论的历史和现状——对物质微观构造认识的发展

著作责任者:关　洪　著

责任编辑:顾卫宇

标准书号:ISBN 7-301-10792-7/O·0699

出版发行:北京大学出版社

地　　址:北京市海淀区成府路 205 号　100871

网　　址:http://www.pup.cn　电子邮箱:zpup@pup.pku.edu.cn

电　　话:邮购部 62752015　发行部 62750672　编辑部 62752021

出版部 62754962

印 刷 者:北京大学印刷厂

经 销 者:新华书店

850 毫米×1168 毫米　32 开本　11.625 印张　280 千字

2006 年 11 月第 1 版　2006 年 11 月第 1 次印刷

定　　价:22.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024　电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

内容简介

本书纵述了从古希腊开始的原子论的历史，强调了原子论与物质构造的其他各种学说的区别，指出“物质无限可分”的命题既不合于辩证法，亦没有得到任何物理学规律的支持。书中主要部分叙述了从原子论的复兴至气体动态理论和统计物理学的发展，物理学上原子概念的确立，再进到原子核和基本粒子的发现，以及从量子论到量子力学到量子场论、规范理论以及一直到M理论的最新发展。全书论证的主线是人类关于物质构造的认识已经从构成论转向生成论，即从物质是由现成的各种组分组合而成的观念，转到每种物理过程都是旧粒子消逝和新粒子生成的观念。此外，不仅基本粒子都处于不断生成和消逝之中，而且整个宇宙，各种粒子、原子、分子、元素和一切宏观对象都是从无到有地创生出来的，甚至空间和时间亦有其从无到有的生成过程。

前　言

物理学是自然科学的基础，是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科。几十年来，在生产技术发展的要求和推动下，人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破。物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展，丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握，促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步。物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和前导。

为适应现代化建设的需要，为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平，我们决定推出《北京大学物理学丛书》，请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍，为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习，开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材。

本丛书分两个层次。第一个层次是物理系本科生的基础课教材，这一教材系列，将几十年来几代教师，特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积累的基础上，力求深入浅出、删繁就简，以适于全国大多数院校的

物理系使用。它既吸收以往经典的物理教材的精华，尽可能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法；同时又注入科技发展的新观点和方法，介绍物理学的现代发展，使学生不仅能掌握物理学的基础知识，还能了解本学科的前沿课题和研究动向，提高学生的科学素质。第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学术著作。这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际上活跃的学科方向和专题，介绍该学科方向的基本内容，力求充分反映该学科方向国内外前沿最新进展和研究成果。学术专著首先着眼于物理学的各分支学科，然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科。

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用。

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997 年 3 月

理论物理专辑前言

彭桓武先生在他的专著《理论物理基础》(彭桓武、徐锡申著，北京大学出版社，1998 年)序中对理论物理作了精辟的阐述：

随着人们通过多次观察和实验等科学实践，对物质世界中在一定条件下一定现象之出现，获得大量可靠的感性认识，得到数据和经验规律。然后经过反复综合整理改造，形成概念，并用判断和推理的方法给以合乎逻辑的描述或解释，这样达到某种理性认识。如能以此为据对新现象有所预见且为而后的科学实验所证实，则表明这理性认识正确可靠。对越来越多方面的物质现象得到的越来越普遍的正确可靠的理性认识，便构成发展着的理论物理。

理论物理的发源可以从伽利略和牛顿对地面上物体坠落和天空中行星绕日等现象的统一解释算起。这奠定了牛顿力学，并从此动力学观点流行。这种观点和方法，结合对气体的物理实验和化学实验的多个经验规律，产生并逐渐澄清原子和分子的概念，阐明了热的分子运动本质，又结合电磁现象的观察和大量实验所总结的一系列经验规律，特别是法拉第的有关磁力线和电力线的形象思维，帮助麦克斯韦形成电磁场的概念和其动力学理论。不仅利用运动把电现象与磁现象联结起来，并且从理论上预见到电磁波动现象，光的现象即归结为电磁波动的现象。这预见为而后的实验证实，并为无线电通讯奠定基础。法拉第电解定律表明分子原子内部有带有一定的基本电荷的电子。有鉴于此，洛伦兹对物质中的电磁现象，提出电子论，引入带有电子运动的分子和微观电

磁场的概念，后者的局部的多分子的统计平均即是麦克斯韦的宏观电磁场，这样解释了物质对光的折射率随光波长的变化的色散现象。但对电子和其运动规律的较清楚的认识，则尚待从更多的近代物理实验和其伴随的20世纪才发现的相对论和量子论。在这两个理论中，对时间和空间，粒子和波，概念上比以前有所深入，有些人称之为革命，实际上不过是，随着认识到更深一层次，原来认为割裂的或对立的却是统一的或同一的，而回过头来看，原来的认识，在一定范围内仍是对的或可靠的到一定的近似程度而已。

理论物理是有用的。作为工程设计原理的早已成熟的那部分理论物理更不必谈。在开展理论、实验与工程技术相结合的工作时，理论工作先行一步常可以减少实验和工程的工作量。

为了促进我国的理论物理研究，国家自然科学基金委员会“理论物理专款”学术领导小组决定资助出版这套《北京大学物理学丛书·理论物理专辑》。希望从事理论物理研究的科学工作者介绍国际理论物理前沿和自己的研究工作，吸引更多的年轻人投入并献身于理论物理学的研究，为营造重视基础研究、安心基础研究的大环境，为发展我国理论物理学的研究及其在国际上占有一席之地做出贡献。有关申请出版资助的情况，请参阅国家自然科学基金委员会网站中有关“理论物理专款”的通告。本专辑的出版得到了北京大学出版社的大力支持，特此感谢。

国家自然科学基金委员会
“理论物理专款”学术领导小组
2005年10月20日

自　序

2002年年底，同我在北京大学物理系一起度过十载寒窗的老同学夏建白君为《现代物理前沿丛书》向我约稿，指定要我负担现代物理学史方面的一项选题。起初，我想到那年春天刚刚在武汉出版社印行了一本当代量子力学史的专著《一代神话——哥本哈根学派》，觉得一时未必能够找得到合适的题材，没有作出十分积极的响应。但是，后来编委会进一步盛情相邀，那就只得从命了。

恰好那一阵有机会同我的两位朋友董光璧君和金吾伦君对后者提出的“生成论”学说展开了广泛的讨论，并且读到了金吾伦的著作《生成哲学》和董光璧为这本书作的序言。在他们的启发下，我亦把一些初步观点写成了一篇论文《从现代物理学看构成论到生成论的转变》发表（载《自然辩证法研究》，18卷11期，2002年）。于是，我就决定将从这一角度谈论20世纪里原子论观念的演变，作为本书的话题。大家知道，在19世纪末20世纪初，原子论被物理学界普遍接受之时，原子的概念就已经不是自古以来那种“不可分，不可变”的组成物质的单元了。

本书的副标题“对物质微观构造认识的发展”，标明了我们集中讨论的是现代物理学里对于物质世界如何“构成”或者“造成”的观念上的演进。这里的“构成”，指的是物质是由各种现成的组分聚合构建而成的观念；而“造成”实际上也就是“生成”，指的是物质的各种组分都是在有关过程中产生而不是事先就存在着了的观念。书中在前面三章给出原子论前期历史的铺垫之后，后面的六章叙述的是在20世纪里微观物理学，包括从原子物理到原子核物

理再到基本粒子物理的实验和理论从创始到新近的发展，并且引申出对于其中所蕴含的深层道理的议论。结果，就写成了这本《原子论的历史和现状》。在本书最后一章和附录里，还对有关论题作了一些发挥，就现代物理学以及构成论和生成论的问题在科学、历史、哲学这几个层面展开进一步的讨论。

可能会有些读者觉得，书中的议论是否多了一点。但我以为，讲历史的著作除了“史料”的陈述之外，还应当包括作者的“史论”，即对历史人物和历史事件的评论，甚至对整个历史时期和整部历史的看法。科学史著作亦不例外。脱离史实的空头议论固然是无源之水和无本之木，简单地扣上几个什么“主义”的帽子、或者凡事都要说出“甲乙丙丁”的“开中药铺”的写法亦令人生厌，但单纯的史料辑录也只能算作资料的整理和汇编。我很欣赏英国哲学家罗素的《西方哲学史》。这部著作没有追求史料的详尽和完整，而是对各个哲学家和各种学说展开了许多精彩的议论，使我受益良多。在本书里面，亦引述了罗素关于古代原子论和其他问题的一些见解。当然，我并不奢望所有读者都会同意和支持本书中的观点，但那至少提供了思考现代物理学基本问题的一个不同的视角，为“百家争鸣，百花齐放”的园地增添一点色彩。何况，书中有多处的引证，这些观点亦是以不少国际理论物理学大师的意见为依据的。

由于篇幅的限制，也由于丛书主要面向的是修习物理科学的大学生、研究生和青年教师，书中没有细致地描述一些关键性实验，也没有详细地介绍各种新的理论方法。要了解这些方面的知识，可以参看有关的教科书和专著。由于同样的原因，也为了节省篇幅和考虑到查阅的困难，本书里很少列出有关的原始文献，所引述的多是与本书相适应的、读者比较容易找到的中等层次的科学读物。

因为出版计划的调整，《现代物理前沿丛书》后来并入了《北京大学物理学丛书》，成为其中的《理论物理专辑》。我很高兴能够有

这个机会为母校的出版事业尽一点绵薄的力量，并且感谢在物理学和哲学上都赋有高度修养的、北京大学出版社的顾卫宇小姐的真诚合作。

最后，作者对董光璧教授和金吾伦教授多次有益的讨论，以及夏建白教授和王正行教授对书稿提出的宝贵意见表示衷心的谢意。我还感谢方在庆教授和邵昕小姐在借阅资料上的帮助。

关　洪

2006 年 2 月于广州

目　录

第一章　古代原子论思想…… (1)
1.1　什么是物质的本原？ …… (1)
1.2　从种子论到原子论 …… (8)
1.3　“物质可分论”未必是原子论…… (16)
1.4　“物质无限可分论”符合辩证法吗？ …… (22)
第二章　近代原子论的复兴 …… (29)
2.1　伽森狄和原子论的复兴…… (29)
2.2　玻意耳和牛顿的气体静态模型…… (35)
2.3　伯努利的气体动态模型…… (44)
2.4　道尔顿和化学原子论的确立…… (51)
第三章　从气体动态理论到统计物理学 …… (62)
3.1　两位先行者赫拉帕斯和瓦特斯顿…… (62)
3.2　气体动态理论的发展…… (69)
3.3　玻尔兹曼和统计物理学的建立…… (77)
3.4　分子大小和布朗运动…… (85)
第四章　微观物理学的诞生 …… (96)
4.1　电子发现的前后…… (96)
4.2　放射性的发现和决定性的危机 …… (107)
4.3　量子概念的提出和连续性的突破 …… (117)
4.4　从卢瑟福的原子模型到玻尔的量子论 …… (128)

第五章 微观粒子的量子力学描述…… (140)
5.1 德布罗意波及其反响 …… (140)
5.2 海森伯的矩阵力学和薛定谔的波动力学 …… (148)
5.3 从爱因斯坦论光的二象性到玻恩对波函数的概率诠释 …… (158)
5.4 第一种非经典的内禀变量——自旋 …… (166)
第六章 从中子的发现到同位旋的建立…… (179)
6.1 核物理学的发展和中子的发现 …… (179)
6.2 狄拉克方程和正电子的发现——1932 奇迹年 …… (185)
6.3 泡利提出中微子假说和费米建立 β 衰变的量子场论 …… (191)
6.4 核力,介子和第一种内禀空间——同位旋…… (202)
第七章 量子场论的发展和新粒子的发现…… (212)
7.1 量子场论的发展 …… (212)
7.2 粒子“动物园”的建立和管理 …… (220)
7.3 中性 K 介子问题 …… (230)
7.4 电磁场的各种量子状态 …… (237)
第八章 在追求统一的道路上…… (247)
8.1 从规范理论到电弱混合模型 …… (247)
8.2 标准模型前后 …… (256)
8.3 从超对称、超弦到 M 理论 …… (267)
8.4 量子物理学和经典物理学的统一 …… (274)
第九章 从物质构成论到物质生成论的演变…… (287)
9.1 物质粒子是生成的而不是构成的 …… (287)
9.2 关于生成论和辩证法的讨论 …… (293)

9.3　没有任何物理学规律支持“物质无限可分” …… (297)
9.4　20 世纪的微观物理学已经从构成论
演变到生成论 …… (302)
附录　现代物理学中的因果性和决定性 …… (310)
A1　经典物理学中的因果性和关联 …… (310)
A2　量子物理学中的因果性和关联 …… (317)
A3　三种类型的统计决定性 …… (324)
A4　规律性、决定性和因果性辨析 …… (332)
基本参考文献 …… (341)
人名索引 …… (342)

第一章　古代原子论思想

1.1　什么是物质的本原?

五光十色、品种繁多的物质世界摆在我们祖先的面前,自然会使得古人思考,这些不可胜数的物质形式,是否由少数的基本元素或者原料所组成。这就是物质本原的问题,即把物质的基本要素约简为少数的和(或)微小的组成成分的问题。

开始的时候,人们设想的物质本原,采取了凭视觉能直接看见,或者至少像风和气那样凭触觉能感受得到的少数物质形式。例如,我国古代最早在《周易》、即据信其主要内容成书于殷周之际的《易经》里,选取了天、地、雷、风、水、火、山、泽这八样自然物,对

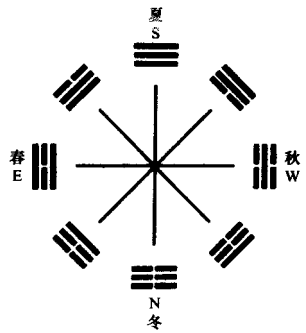


图 1.1　《易经》里所描述的一种"八卦"的图像。上方是乾,下方是坤,左下方是震,右上方是巽,右方是坎,左方是离,右下方是垠,左上方是兑。这八个卦象依次对应着天,地,雷,风,水,火,山,泽这八种自然物

应着八个基本的卦象，试图用它们作为世界万物的本原。[1]

与《易经》时代相近的《尚书》里的《洪范》篇，据信是周武王和箕子对话的记录。《洪范》"九畴"里的第一项是"五行"，其解说是："一曰水，二曰火，三曰木，四曰金，五曰土。水曰润下，火曰炎上，木曰曲直，金曰从革，土爰稼穑。润下作咸，炎上作苦，曲直作酸，从革作辛，稼穑作甘。"这种说法明显地反映着当时农业社会的特征，并且用人的几种味觉来形容它们。而在较晚些时的史伯在《国语》里就更加明确地写道："故先王以土与金木水火杂，以成百物"，认为这五样东西是世界上各种物质的本原。

与此差不多同时，《管子》的《水地》篇里则说："水者何也？万物之本原也，诸生之宗室也"，认为水才是组成物质的单一本原。这种观念也是同农业生产分不开的。

不过，对于物质的本原也有别样的主张。例如，稍晚些时的老子在《道德经》四十二章里说："道生一，一生二，二生三，三生万物。万物负阴而抱阳，冲气以为和。"按照老子，世上万物是由"道"产生出来的。那么道又是什么呢？《道德经》二十五章里又说："有物混成，先天地生。寂兮寥兮，独立而不改，周行而不殆，可以为天下母。吾不知其名，字之曰道。"从这段话看，道比天地还要早，似乎是一种原初状态的物质。但从《道德经》里第一章"道可道，非常道。名可名，非常名"等其他文字看，道又更像是一种非物质的东西。因此，老子的"道"被认为是一种类似于"绝对精神"的东西，而他则被戴上了"客观唯心主义"的帽子。

由于古代汉语的意义富于弹性，很难说只能有唯一的一种解释，况且一部古代文献里互相矛盾的语句亦不少见，我们在这里就不予深究了。然而，注意到上述引文的第二句话里"阴"、"阳"、"冲气"的说法，这可能是我国古人著作里第一次谈到阴阳二气的相互冲突在物质生成中的作用。

从老子开始，历代陆续有不少学者发挥"气"或者"元气"是物

质本原的思想。我们在这里不能够一一罗列，只举出两三位哲学家为代表。例如，汉代的王充(27—约 100)在他的著作《论衡》里说："天地合气，万物自生。犹夫妇合气，子自生矣。"主张万物"因气而生，种类相产"。宋代的张载(1020—1077)在《正蒙》一书中说："太虚即气"，"太虚无形，气之本体；其聚其散，变化之客形尔。""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。""气聚，则离明得施而有形；不聚，则离明不得施而无形。"明确提出了虚空中充满了无形的气，并且无形而不可见的气和有形而可见的物互相转化的思想。明末清初的王夫之(1619—1692)继承了张载的思想，他在《张子正蒙注》里也有类似的论述："阴阳二气充满太虚，此外更无他物，亦无间隙。""凡虚空皆气也，聚则显，显则人谓之有，散则隐，隐则人谓之无。"

他们说的"气"，不是我们能够在呼吸中感觉到其存在的空气，也不是可以凭触觉感受到的风。这是一种人们头脑里设想出来的抽象东西，并非像前面所讲的"五行"等几样东西那样，凭人类的感官可以感触得到的。因此，如果没有说明作为万物本原的"气"同经验怎么样联系的话，你可以把它当做是一种物质的东西，也不能够禁止别人把它当做是像老子的"道"那样的一种非物质的东西。

总之，我国古代关于物质本原的种种说法，诸如"五行说"、"元气说"等等，都只是一些处在文明初级阶段的很不具体的想法，同后来化学里的"元素"和物理学里的"场"等有确切规定的科学概念相距甚远。我们既要充分评价古人合理的思想萌芽，亦不宜过分拔高，牵强附会地说它们等同于近代科学里的基本概念。

虽然如此，当清朝末年西方的科学理论介绍到了中国之后，谭嗣同(1865—1898)，孙中山(1866—1925)，梁启超(1873—1929)等仁人志士纷纷从经典文献里找出一些论说，同近代科学的概念挂上钩，试图为他们改革社会的主张提供依据。例如，谭嗣同把"元气"同物理学里的"以太"联系起来，孙中山亦大谈从以太到电子到

元素再到物质的演化，梁启超还声称从《墨经》里找到原子概念。一方面，虽然这些都不是真正的科学讨论，但亦表现了科学在社会上受到的重视。另一方面，这种生吞活剥式的“古为今用”风气却至今不衰，对于科学的发展起到的未必都是积极的作用。

现在让我们把镜头转到西方文明的发源地希腊。[2]古希腊的哲学家们也有用在日常生活和生产中可以感觉到的一些物质形式当做万物本原的种种类似猜想，以下先按时间顺序介绍几位古希腊哲学家的看法。

首先，泰勒斯(Thales，约纪元前 624—约前 547)主张水是万物的本原。不过他的论著没有流传下来，我们是从后世哲学家的著作里了解到他的主张的。例如，亚里士多德(Aristotle，纪元前 384—前 322)在《形而上学》一书里提到：“那些最早的哲学家们，大都把物质性的本原当做万物的本原。因为在他们看来，万物都是由它构成的，都是首先从它产生，最后又化为它的，那就是万物的元素，万物的本原了。”“这一派哲学的创始人泰勒斯就把水看成本原。他得到这个看法，也许是观察到万物都以湿的东西为养料……”

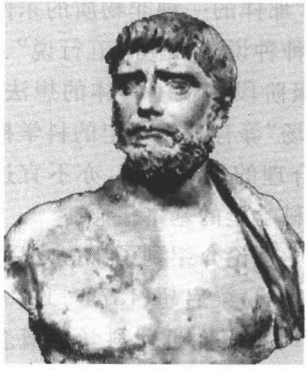


图 1.2 泰勒斯(Thales，约纪元前 624—约前 547)



图 1.3 亚里士多德(Aristotle，纪元前 384—前 322)

其次，阿那克西美尼（Anaximenes，约纪元前 588—约前 524）则主张万物的本原是气。他的著作只留下了少量残篇，我们也是从后人的介绍得知他的主张的。例如，亚里士多德也是在《形而上学》里提到："阿那克西美尼……认为气在水之先，并且是一切物体的最单纯的本原。"

还有，赫拉克利特（Herakleitos，约纪元前 540—约前 480）主张万物的本原是火。在他留下来的著作残篇里有这样的陈述："这个世界……它过去、现在、未来永远是一团永恒的活火。"古希腊哲学家论述的编集者艾修斯（Aetius，主要活动在纪元 100 年前后）对他的介绍也说："赫拉克利特……主张万物的本原是火。……万物都从火产生，也都消灭而复归于火。"

除了这几种单一本原的主张之外，晚些时的恩培多克勒（Empedokles，约纪元前 495—约前 435）又提出了多本原说。在他的著作残篇里说元素有四种："火、水、土以及那崇高的气。"亚里士多德的《形而上学》里也提到："恩培多克勒说本原是四种元素，在已经被人说过的那几种之外，又加上了第四种——土。"

这种主张同我国古代的"五行说"是多么相像啊，差别只在于"五行"里面多了一个"金"。四种元素火、水、土和气，都是在自然界里直接存在的东西。而我国古代讲的金，主要指铜或者其合金青铜，那是需要经过采掘和冶炼才能得到的，不是一种现成的天然物料。从这里也可以看到，"五行说"里反映了我国古代冶金技术的高超成就。

那么，在古希腊有没有提出过像老子的"道"那样的非物质本原呢？我们发现，根据艾修斯的转述，阿那克西曼得（Anaximandros，约纪元前 610—约前 546）亦说过"万物的本原是无限者，因为一切都生自无限者，一切都灭入无限者。"又根据古希腊亚里士多德著作的注释者辛普里丘（Simplicius，约纪元 490—约 530）的叙述，"他[阿那克西曼得]说'无限者'是一切存在物的本原和原

素……他说本原并不是水，也不是大家所承认的任何其他原素，而是另一种不同的本体，这种本体是无限的；从这个本原产生出一切的天，以及其中所包含的一切世界。”

根据参考文献[2]编者的意见，这里的“无限者”应当理解为“无规定者”。那么，从《道德经》第一章里的“无名，天地之始”，十四章里的“绳绳兮不可名”，二十五章里的“不知其名，字之曰‘道’”等形容“道”的词语看，原初的“道”是无名或者不可名的，亦即是无规定的。这样看来，阿那克西曼得的“无限者”或者“无规定者”，似乎同老子的“道”有相通之处咧。

此外，古希腊还有另外一派以非物质的东西作为本原的观点。这里指的是著名的毕泰戈拉(Pythagoras，约纪元前 570—约前 490)学派。毕氏关于直角三角形边长的定理和音律五度相生的研究成果，至今仍然有效。据说这个学派的信条是“万物皆数也。”[3]不过毕氏的著作也没有流传下来，根据亚里士多德在《形而上学》里的介绍：“毕泰戈拉学派曾经从事数学的研究……进而认为数学的本原就是万物的本原。……由于在这些本原中数目是最基本的，而他们又认为自己在数目中间发现了许多特点，与存在物和自然过程中所产生的事物有相似之处……所以他们从这一切进行推论，认为数目的元素就是万物的元素。”“毕泰戈拉学派看到许多可感觉事物具有数的属性，便设想实事实物均为数——不是说事物可用数来计算，而是说事物就是由数所组成。其故何在？在乐律，在天体，在其他事物上均见有数的属性。”



图 1.4 毕泰戈拉(Pythagoras，约纪元前 570—约前 490)

这里说的数目即自然数。他们相信，所有的数，例如包括小数

和分数，都能够用自然数精确地表示出来。据说毕氏有一个门徒证明了 2 的平方根不可能表示成一个精确的分数，这位叛逆者就被抛到河里淹死了。由此可见，这个学派已经演变到差不多成为一门神秘的“邪教”的程度了。

还有哲学家柏拉图（Plato，纪元前 427—前 347）。他在《蒂迈欧》（Timaieos）篇里提出，火、土、水、气这四种元素并不是物质的真正本原。他论证说，凡物体皆有体积，而任何体积的表面都可以分解为一些三角形。他还认为“所有的三角形从根本上说来就是两种”。它们的形状其实就是现在任何一名中学生都熟知的两种直角三角板的形状。柏拉图于是“假定这两种三角形就是火和其他元素的最初成分。”

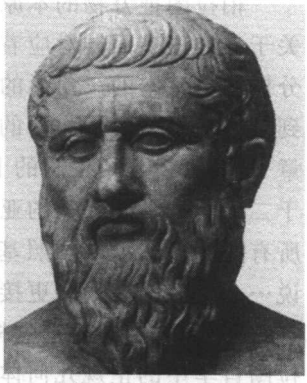


图 1.5　柏拉图（Plato，纪元前 427—前 347）

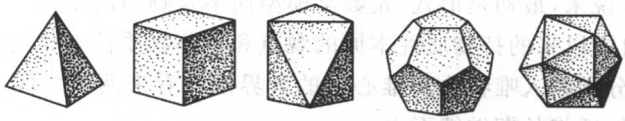


图 1.6　仅有的五种正多面体

柏拉图或者他的弟子已经证明了，只可能存在着五种不同的正多面体。它们是：正四面体，正六面体，正八面体，正十二面体和正二十面体。并且柏拉图还把物质的构成同这几种正多面体联系起来，认为土的最小单元是立方体即正六面体，水的最小单元是正二十面体，火的最小单元是正四面体，而气的最小单元则是正八面体。这几种正多面体的每一个面都是正三角形或者正方形，当然都可以用他说的那两种三角形拼接而成。然而，剩下来的正十二

面体就有麻烦了，它既找不到对应的元素，又因为它的每一个面都是正五边形，不能用那两种三角形拼接出来。不过这也难不倒聪明的柏拉图，他说，这“第五种结合物，是神用来描绘宇宙的”。这样一来，生活在世俗世界的我们就不必为它伤脑筋了。

柏拉图把万物的本原不是归于数而是归于形的思想，特别是关于五种正多面体对应着组成世界的几种元素，和它们最终可以分拆成更基本的三角形的假设，对后世产生了深远的影响。例如，到了 20 世纪，量子力学的创始人之一海森伯 1959 年发表一篇文章[4]，在复述了柏拉图的上述主张之后说：“我们现在知道，有不下于二十五种不同种类的亚原子粒子，而我们有充分根据可以设想，所有这些形式都是仿照基本的数学结构构成的。”“人们已经可以说……最后的答案将更接近于柏拉图在《蒂迈欧》篇中所表示的观点”等等。他由此得出这样的结论：“现代物理学的基本粒子，像柏拉图哲学中的正规几何体那样，是为数学对称性的要求所规定的。它们不是不灭和不变的，所以严格说来不能称之为实在物。我们毋宁说它们是一些基本数学结构的简单表现。……所以，对于现代科学说来，最初是形式，是数学模型而不是物质的东西。”

自古以来的持物质性本原的观点和持非物质性本原的两种观点，被分别归入唯物论和唯心论的世界观。看来两者之间的矛盾和辩驳，还将长期继续下去。

1.2 从种子论到原子论

上一节所讲的东西方古代对于物质本原的种种设想，多是论及物质组成的成分，而不是关于物质结构的单元的。从现代的观点看来，那些设想基本上是一些哲学上的遐思，还不能成其为科学的原理；如果硬要说是萌芽状态的科学的话，似乎更应该归入化学而不是物理学的前身。然而，那时候哲学和科学尚未分家，更没有

分化出各个门类的自然科学。处在人类文明的初级阶段，古人朴素的猜想存在着这样那样的谬误是完全不足为奇的。真正令我们感到惊讶的是，在那样初步的发展水平上，在各种各样关于物质本原的猜测中，居然出现了日后被证明为正确的原子论学说。

原子论是从另一条路线，即从物质构造的方面去猜测物质的本原的。这方面要探究的问题是，把物质分割得越来越小，是不是会得到不可以再分割的基本单元，以及那些基本单元具有什么样的性质。这是两个互相紧密联系但又有着本质区别的问题。在古希腊先后出现了两种关于物质结构的学说，即种子论和原子论。这两种学说都主张物质是由许多的基本单元、即分别由种子和原子构成的，但种子和原子被赋予的性质却相距甚远，因此这是两种截然不同的关于物质结构的学说。

种子说的倡导者是雅典的哲学家阿那克萨戈拉（Anaxagoras，约纪元前 500—前 428），他的主要著作《论自然》只留下了一些片段。根据古罗马的希腊哲学家传记作者第奥根尼·拉尔修（Diogenes Laertius，约纪元 200—约 250）的引述，阿那克萨戈拉说过："我们必须假定：结合物中包含着很多各式各样的东西，即万物的'种子'，带有各种形状、颜色和气味。人就是由这些种子组合而成的，其他具有灵魂的生物也是这样。"阿那克萨戈拉又把"种子"（希腊文 *σπερματα*；拉丁文 *spermata*）叫做"同类的部分"（希腊文 *ομοιομερειαζ*；拉丁文 *homoromeria*），并且认为同类的部分就是万物的本原。



图 1.7　阿那克萨戈拉（Anaxagoras，约纪元前 500—前 428）

在艾修斯的著作里这样说："阿那克萨戈拉断言'同类的部分'是存在物的本原。他认为事物从虚无中产生或消灭为虚无是完全

说不通的。我们吃的食物表面看来好像是单纯齐一的，譬如水和面包，可是从这些食物却长出头发、筋腱、血管、肌肉、神经、骨骼和其他一切肢体来。因此应当承认在我们所吃的事物中并存着一切事物，因而一切事物都能由它而增长。所以在这食物中便含有血液、神经、骨骼等等的发生部分，这些部分只能如理性所认识；因为不能把一切都归结到感官，感官只是给我们指出水和面包由这些物质构成，而只有凭借理性才能认识到这些物质包含着部分。因为这些包含在食物中的部分与这些部分所构成的物质是相似的，所以他称这些部分为'同类的部分'，并且断言这就是万物的本原……"

根据古罗马诗人卢克莱修在他的《物性论》里的叙述，当阿那克萨戈拉"谈到这种事物的'种子'时，他意思是说骨头是由非常小的骨头构成，小而又小的肉构成了一切的肉，而血则是由血滴所造成；认为黄金是黄金粒子所结集，土是由许多小小土块所构成，火是由许多的火苗，水由水，对于所有其他的质料，他也虚构了同样的情形。"[5]

由此可见，阿那克萨戈拉的"种子"有许多种，他所说的每样物质的种子，就是组成那种物质的微小单元。而这种微小的种子，具有与由它们组成的物质相同的各种性质。或者，用我们现在的术语讲，宏观的物体是由微观的种子构成的，但宏观的物体和微观的种子是"同类"的东西，具有相同的一些性质。所以，在种子论者看来，宏观世界和微观世界只有尺度的不同，微观只是缩小了的宏观，并没有质的差异。

亚里士多德在《形而上学》里也提到："阿那克萨戈拉……说本原的数目无限；因为他说一切事物都由同类的部分造成……万物的生灭只是由于结合和分离，此外并无其他意义的生灭，万物是永恒存在的。"另外，根据第奥根尼·拉尔修的引述，阿那克萨戈拉认为："希腊人说产生和消灭是用词不当的。因为没有什么东西产生

或消灭，而只是混合或与已有的东西分离。因此正确的说法是把产生说成混合，把消灭说成分离。”

原来，阿那克萨戈拉认为存在着种种永恒不变的种子，是为了把万物的出现、生长和消失，解释成各种种子的同类组合和拆分。应当说，虽然这种种子论未免显得过于单纯，却的确是探究物质微观结构的最初尝试。

原子论的创始人是古希腊的留基伯（Leucippus，约纪元前500—约前440）和德谟克利特（Democritus，约纪元前460—约前370）。留基伯生平事迹的细节已不可考，而德谟克利特是留基伯的学生和他的学说的继承者。所以，他们常常被相提并论，事实上两人关于原子论的论述已经分不清楚了。据说德谟克利特亦曾师从阿那克萨戈拉，所以有人认为在某种意义上，原子论亦是在种子论基础上的一种发展。

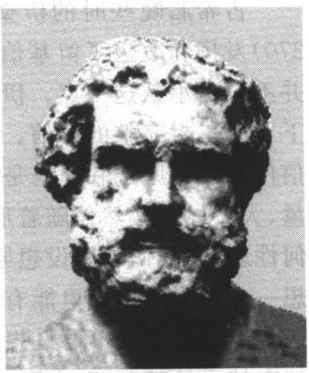


图1.8　德谟克利特（Democritus，约纪元前460—约前370）

德谟克利特的著作也只留下了一些残篇。根据第奥根尼·拉尔修的叙述，“他［德谟克利特］的学说是这样的：一切事物的本原是原子和虚空，别的说法都只是意见。……原子在大小和数量上都是无限的，它们在宇宙中处于涡旋运动之中，因此形成各种复合物：火、水、气、土。这些东西其实是某些原子集合而成的：原子由于坚固，是不能毁坏也不能改变的。”

亚里士多德在《形而上学》一书中说：“留基伯和他的伙伴德谟克利特说，充满和虚空是根本的元素。……留基伯和德谟克利特把元素之间的区别看成其他一切事物的原因。这些区别有三种：形状、次序、位置。因为他们说，事物的不同仅在于形态、相互关系

和方向。形态属于形状，相互关系属于次序，方向属于位置。”

艾修斯说：“德谟克利特主张在自然中颜色是不存在的，因为元素是没有性质的，只有一些结实的微粒和虚空；由微粒构成的复合物，全靠元素的次序、形状和位置而获得颜色。除了元素的的次序、形状和位置之外，就只是一些现象。”而亚里士多德也在《论生灭》中说：“德谟克利特主张黑色相应于粗糙的原子，白色相应于光滑的原子，他也把各种滋味归因于原子。”

古希腊晚些时的伊壁鸠鲁（Epikouros，约纪元前 341—约前 270）发扬和改进了留基伯和德谟克利特的原子学说，虽然他自己并不明白承认这一点。伊壁鸠鲁的主要著作都已失传，但仍然留下了两三封完整的书信。他在其中一封据说是在他临终前写成的信件中说：“原子和虚空是永恒的。”“我们要认定原子除了形状、重量、大小以及必然伴随着形状的一切以外，并没有属于可知觉的任何性质。”“我们不要设想原子有各种各样的大小”，“我们也不要设想一个有限的物体里能有无限的部分或有各种程度微小的部分。……而且我们也不要设想在有限的物体里，有可能无限地过渡到越来越小的部分。”“实际上我们已经根据原子对于感觉到的物体的关系而肯定它有大小，只是说它在微小上比感觉到的物体差得很远。”

在这里我们看到，伊壁鸠鲁实际上继承了留基伯和德谟克利特原子学说的核心内容，但亦加进去自己的新东西：

第一，伊壁鸠鲁说原子有重量，这是德谟克利特没有说过的。

第二，德谟克利特认为原子有各种大小，而伊壁鸠鲁则说原子必定比一般的物体微小得多。

第三，伊壁鸠鲁在同一封信件里还说道：“原子永远不断在运动，有的直线下落，有的离开正路，还有的由于冲撞而向后退。”所以，伊壁鸠鲁的原子具有重量而直线下落，又由于偏离直线而互相冲撞。这一点与德谟克利特只做涡旋运动的原子是不同的。

马克思(K. Marx,1818—1883)就是以“德谟克利特的自然哲学与伊壁鸠鲁的自然哲学的差别”为题来写他的博士论文的[6]。在这篇学位论文里,马克思高度评价了伊壁鸠鲁所说的“原子离开直线的偏斜运动”,并且认为“偏斜运动正是要超出决定论的”。有些自命为马克思主义者的哲学家把“非决定论”视若洪水猛兽,一经发现就要口诛笔伐。他们怎么会料得到马克思竟然曾经为伊壁鸠鲁“超出决定论”的见解叫好呢?[7]

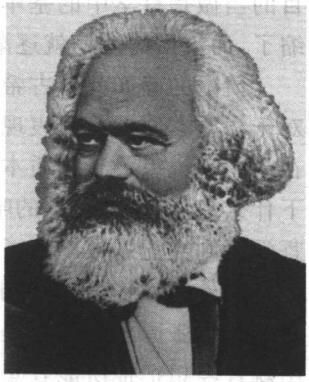


图 1.9　马克思(K. Marx,1818—1883)

现代英国哲学家罗素(B. Russell,1872—1970)指出,像德谟克利特那样的古希腊前期“哲学家们,都曾致力于一种无所为而为的努力想要了解世界。他们想象中的了解世界要比实际的情形轻而易举得多,但是没有这种乐观主义他们就不会有勇气做出开端来。他们的态度在只要并不是仅仅体现他们时代的偏见的时候,大体上可以说是真正科学的。但它不仅仅是科学的;它还是富于想象的、生气蓬勃的,并且充满了冒险的乐趣。”[8]我们觉得,这段评价对于古希腊的原子论者说来,是十分恰当的。

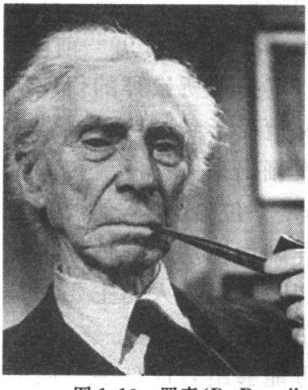


图 1.10　罗素(B. Russell,1872—1970)

罗素还认为:“德谟克利特以后的哲学的错误之点就在于和宇宙对比之下不恰当地强调了人。首先和智者们一起出现的怀疑主义,就是引导人去研究我们是如何知道的,而不是去努力获得新知识。……柏拉图又出现了否定感性世界而偏重那个自我创造出来

的纯粹思维的世界；随着亚里士多德又出现了对于目的的信仰，把目的当做是科学中的基本观念。……从他们那时候起，生气就萎缩了，而流俗的迷信就逐渐兴起。"[8]

情况的确如此。古希腊后期的哲学家们，除了个别之外，不再对于物质本原的探究表现出多少兴趣了。而包括种子论和原子论在内的学说里关于物质本原是永恒不灭的主张，没有给神创论留下什么地盘，这种强烈的唯物论倾向，亦使它后来在盛行的唯心论哲学派别支配下被冷落了多年。

此外，拒绝承认真空的存在的亚里士多德，亦从另一个角度猛烈批评主张原子和虚空是一切事物本原的原子学说。据说，柏拉图就曾经想把他所能收集到的德谟克利特的全部作品用火烧光，后来才被别人劝阻；不过那也只是因为德氏的著作早已流传于世，烧也是烧不尽的缘故。

到了古罗马共和国末期，伊壁鸠鲁的学说才一度重新活跃起来。那时候的一位诗人卢克莱修(Lucretius，约纪元前 99—前 55)写了他一生仅有的一部长诗《物性论》[5]，宣扬他所崇拜的伊壁鸠鲁其人及其哲学。然而，这部著作后来又遭受了到"焚书坑儒"式的长久劫难，一直到文艺复兴时期才被发掘出来并广泛流传。虽然因为其作者本质上是一位文学家而不是一位科学家，他没有为原子论添加什么实质上的新内容，只是详细而生动地宣传和讲解德谟克利特、特别是伊壁鸠鲁的学说，但从那时起，人们主要都是从卢克莱修雄辩的诗篇里了解到古代的原子论学说的。

卢克莱修在《物性论》里，先是用字母能够组合成许多不同的文字，作为原子(在诗篇里称作"始基"，"原初物体"等等)能够构成万物的譬喻："这些字母竟能够做出这么多的事情，单单由于它们次序的改变。但是那些作为事物的始基的东西，它们能有更多不同方式的结合，由之不同的东西就能一一被产生。"

卢克莱修还从在暗处看到的光束中的无数尘埃飞舞，推断即

使在看起来静止不动的物体里，亦有无数原子处在激烈运动之中："每当你让太阳的光线投射进来，斜穿过屋内黑暗的厅堂的时候，你就会看见许多微粒以许多方式混合着，恰恰在光线所照亮的那个空间里面……不停地互相撞击……你就可以猜测到：在那更广大的虚空里面有怎样一种不停的始基的运动"。因而"不必疑惑为什么既然始基全部都永远在运动，但整个看来物体却像是完全静止。"

卢克莱修重申了德谟克利特的意见，说原子是没有颜色的，"但你也不要以为原初物体只不过没有颜色而已；它们同样也与温暖和寒冷无关系，而且它们也并不发出什么热气；它们运动着，既缺声音也乏水分；也并不从它们本身抛放出任何自己的气味。"由此可见，卢克莱修的原子没有宏观物质可被我们感觉到的性质，不仅没有声和色、香和味，而且没有干湿和冷热。在两千年前就把热现象归因于大量原子的运动，真是一种远远超越时代的天才猜测啊。从这里也可以看出原子论和种子论的根本区别。

卢克莱修认为，不同的感觉是由原子的大小、形状、姿态、运动和排列决定的。他还为此做出一些形象化的解释："所有一切能够愉快地触动我们的感官的东西，都是由圆滑的原素所构成。而那些显出苦味和辛辣的东西，乃是由更弯曲的原素缠结在一起，因此老是钩呀割呀才进得我们的感官，而当它们进入时就撕切着我们的身体。""对我们显出是硬而密实的东西，必定是由彼此勾结得更紧的始基所造成……凡是具有流动性的东西，它们必定是由更圆滑的原素所构成。"虽然这种简单化的说法过于天真，但亦的确是用微观原子的性质和行为去解释由它们组成的宏观物质的表现的最早尝试。

总而言之，原子论者第一次区分了宏观和微观这两个有着本质区别的世界。原子不再是仅仅作为宏观物质微小颗粒的种子。组成宏观物质的种子具有这种物质的一切性质，而组成宏观物质

的原子并不具有可被我们感觉到的任何性质。应当说，原子论者开拓了用微观粒子的结构和行为去推演出宏观世界五光十色现象的道路。

不仅如此，卢克莱修还试图以原子论的观点来解释快乐和痛苦这一类在微观层次不可能存在的情感。他说："……当物质物体在全部血肉肢节中受了暴力骚扰、就在身体内它们各自的地方颤动的时候，那里就有着痛苦存在；而当它们再次回归到原来位置的时候，就有柔和的愉快到来；所以你能够知道事物的始基，既不能受痛苦所袭击，也不能从本身取得快乐；因为它们不是由任何原初物体所合成……所以它们必定不具有任何的感觉。"这就也许是扯得太远了。虽然亦有的现代科学家，例如维格纳(E. Wigner, 1902—1995)相信："我坚持认为，有朝一日科学会尝试完全解释爱情是怎么一回事。"[9]

1.3 "物质可分论"未必是原子论

大家知道，原子的英语单词是 atom，它来源于希腊文名词 $\alpha\tau o\mu o\zeta$(拉丁文是 *atomus*)，意思是"不可分"。起了这个名称，含有原子是组成物质的、不可以分割的基本单元的意思。清朝末年严复(1853—1921)就曾经将 atom 译成"莫破"或"莫破尘"，用现代汉语讲，就是不可分割的微粒。

然而，科学名词是在一定的语境(context)下产生的，我们不可以脱离特定的语境，只从名词字面上的意思来理解它。例如，费曼(R. Feynman, 1918—1988)曾经说过，物理学里所用的词汇与日常生活里的意思不尽相同。[10]如果只从字面的意思来理解的话，是不是只要从古代著作里找出谈论物质变化的片言只语，就说我国很早就有了"化学"这门科学呢？是不是从古人的诗句里找到了"物理"这个词组，就说他已经创建了物理学呢？又如，虽然古代

文献里很早就出现了“元素”或者“原素”的字样，亦不能说那时候已经有了现代科学里的元素概念。

国内有些科学史研究者从儒家经典《礼记·中庸》里“君子语大，天下莫能载焉；语小，天下莫能破焉”这句话，就“发现”了我国两千多年前已经有了原子观念。[11,12]我们认为，这是一种很不严肃的治学态度的表现。

首先，虽然很有可能当年严复把 atom 译成“莫破”，的确袭用了《中庸》里的用语，但这句话的原文，是接着前面的语句“……虽圣人亦有所不能焉。天下之大也，人犹有所憾”说的。事实上，《中庸》第十二章的全文是：

> “君子之道费而隐。夫妇之愚，可以与知焉，及其至也，虽圣人亦有所不知焉；夫妇之不肖，可以能行焉，及其至也，虽圣人亦有所不能焉。天地之大也，人犹有所憾。故君子语大，天下莫能载焉；语小，天下莫能破焉。《诗》云‘鸢飞戾天，鱼跃于渊’，言其上下察也。君子之道，造端乎夫妇；及其至也，察乎天地。”[13]

这一段话，从头到尾讲的是“君子之道”，并且拿普通的夫妇关系来做对比。这种“君子之道”或者“中庸之道”，完全是精神方面的东西。这一章总的意思是不论天地之远大还是家庭之细小，都为“君子之道”所包容，根本没有谈到物质的组成或者结构的意思。我们认为，断章取义甚至捕风捉影地从古代文献里抠几个字下来就宣称是什么伟大发现，决不是一种可取的研究方法。

其次，原子这个名称是在原子论的语境中使用的，它不仅仅指组成物质的不可分割的微粒，而且含有特定的意义。这就是在上一节里讲到过的，原子属于与宏观世界有着本质不同的微观层次，宏观现象乃是由大量原子的各种构造方式和运动状态显现的结果。这一点是原子论的核心，也是原子概念的精髓。脱离了这一

点去谈什么原子，无异于抽掉了原子论的灵魂，只拿一个空洞的名词来做招牌。

更值得指出的是，历史上提出过的组成物质的单元，并不止原子一种。上一节里介绍的种子论里的种子，也是组成物质的一种单元。你有什么根据说只要把物质分成“莫破”或者“不可分”的单元，就一定是原子，而不可以是像种子那样的东西呢？

所以，“物质可分论”不一定就是原子论。

不仅如此，历史上除了出现过上一节里说的、把万物的本原归于非物质的“道”或者“无限者”的成分的思想之外，还提出过物质可以分解成非物质单元的学说。这方面的一个著名的例子就是“单子说”。

虽然早在古希腊亚里士多德、柏拉图和欧几里得（Euclides，约纪元前 330—前 275）的著作里就已经出现过“单子（monad）”这一个名词，但形成了系统的“单子论（monadology）”的当数德国哲学家和数学家莱布尼茨（G. Leibniz，1646—1716）。据说他是在 1695 年写给数学家洛必达（G. L'Hospital，1661—1704，学过极限和微积分的学生都知道有这么一条“洛必达法则”）的一封信中最早使用单子这一术语的，后来他在 1714 年专门为此写成了一本《单子论》[14]。



图 1.11 莱布尼茨（G. Leibniz，1646—1716）

根据莱布尼茨，“单子不是别的东西，只是一种组成复合物的单纯实体，单纯，就是没有部分的意思。”“在没有部分的地方，是不可能有广袤、形状、可分性的。这些单子乃是自然的真正的原子，简言之，也就是事物的要素。”由此可见，莱布尼茨的单子亦是一种组成物质的不可分割的单元。

然而，莱布尼茨的单子虽然具有物理微粒的一些性质，但归根结柢是一种精神的实体。他的单子既不是空间的点，也不是物理的质点，它们是由神发射出来的，纯粹属于精神上的东西。用他的话说，单子就是作为“一种单纯实体”的“灵魂”。我们在这里不可能复述莱布尼茨关于单子的整个一套论证，只是通过这个例子说明“物质可分论”可以不是原子论，甚至“物质可分”的学说也可以不是唯物论。

另外一位主张物质可以分解成非物质组分的是奥地利物理学家和哲学家马赫（E. Mach，1838—1916）。例如，他在1885年成书的《感觉的分析》一书里说：“并不是物体产生感觉，而是要素的复合体（感觉的复合体）构成物质。”他认为：“颜色、声音、温度、压力、空间、时间等等，以各种各样的凡是相互结合起来；与这些要素相联系的，又有心情、感情和意志。”按照马赫，物体就是由这些感觉的要素“联结而成的复合体”。[15]

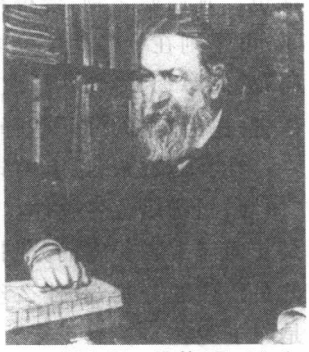


图1.12　马赫（E. Mach，1838—1916）

综上所述，“物质可分论”不仅未必是原子论，而且未必属于唯物论的世界观。

下面我们要讨论的是，我国古代文献有没有原子论思想的确切记录。[16]

在这方面，有一种颇为流行的观点，认为墨子（纪元前478—前392）已经提出了原子的概念。[11,12,17]他们的根据是《墨经》里下面这几句话：[18]

> “端，体之无序而最前者也。”（《经上》篇）
>
> “端，是无同也。”（《经说上》篇）

以及

"非半不斫，则不动，说在端。"(《经下》篇)

"非斫半，进前取也。前，则中无为半，犹端也。前后取，则端中也。斫必半，毋与半非，不可斫也。"(《经说下》篇)[19]

梁启超在《墨经校释》这部著作里，除了采用前人的校勘，把上面第一句里的"序"字改为"厚"外，又自作主张地将第二句里的"同"字改为"间"，由此提出了如下的解释："物理学上的'极微'即端也。凡质碍之物，皆得析之为分子，分子更析为原子，更析为电子；电子则在今以为不可析，几乎端矣。端不可析，故无间；无质碍，故无厚；为一切物质之原，故云在前。"正是梁启超这段话，第一次把《墨经》里的"端"解释做原子。

在我们看来，以上两句话即使改了两个字，也看不出来其中的"体"是指物质或者物体。看来看去，这两句话明显的含义，说的只是几何体或者长度的分割，并没有讲到物质的分割。况且，即使讲的是物质的分割，有什么理由说分割得到的单元一定不是种子而是原子呢？

事实上，在《经说》篇接着"端，体之无序而最前者也"这句话的下文有"有閒，中也"等语句("閒"通"间")。在《经说上》篇接着"端，是无同也"这句话，则是"有閒，谓夹之者也。閒，谓夹者也。"这些都明显讲的是数学或者几何学的空间概念，谈的根本不是物质结构。

至于后面两句，则表达了"端"是不可以再分割的意思，不过亦一点看不出来谈的是物质的结构。并且，在《经下》篇里紧接着所引的那段话后面的一句是："景到，在午有端与景长，说在端。"这句话里的"端"指的分明是光和影(景)、或者说光线的交会点。总而言之，没有任何能够令人信服的证据支持《墨经》里的"端"讲的是物质分割的说法。

文献［16］的前言说得很好："自梁启超作《墨经校释》，开始了大胆怀疑大胆窜改《墨经》原文字句以圆己说的风气，至近世而益盛，这对《墨经》的研究实为甚大障碍。"

英国科学史家李约瑟(J. Needham，1900—1995)在研究了《墨经》里的以上语句和其他有关论述之后，亦认为那里讲的大都是数学问题，所以他把这部分内容放到"数学"章的"几何学"一节里。[20]他把以上《墨经》引文的前两句称为"几何点的'原子'定义"，后两句则是对于"不可分"概念的论证。并且，"后来中国的思想家持有一种'原子'的几何点的见解，虽然这种见解在中国人的思想中从未占主导的地位。"

李约瑟把《墨经》里"端"的概念，同古希腊"与德谟克利特学派有关的数学家"所持有的"几何原子"的概念相提并论。注意到英语里的 atom 一词，除了原子之外，还有不可分割的微小部分的意思，所以李约瑟说的"几何原子"里的"原子"，不过是一种借用的词汇，同物质构成的原子论没有什么关系。

李约瑟还提到，[21]有人主张西方的原子论思想得益于他们的拼音文字的启发(我们记得，卢克莱修在《物性论》里就作过这样的比方)；而中国的象形文字则缺乏这种提示，因而没有发展出原子论思想。李约瑟认为这种说法不能成立。因为，汉字虽然不是由拼音字母组合而成，但亦可以分属数目不多的部首，或者进一步拆解为十几种基本的笔画。所以中国古代原子论思想不发达，还要到别的方面去找原因。我们觉得他的意见是有道理的，事实上汉字基本笔画的数目比西方语言的字母还要少。此外，我国古代不仅没有提出原子论学说，而且对于物质的微观结构似乎并没有给予足够的关注。

1.4 “物质无限可分论”符合辩证法吗?

进入20世纪之后,我们知道组成物质的原子不再像古代原子论者所设想那样是不可分和不可变的单元了。一个原子可以分成核和电子,原子核进一步分成质子和中子,质子和中子又是由夸克组成的……;一种原子还可以转变为别种原子,如此等等。这正是本书要阐述的主题:“对物质微观构造认识的发展”。

面对着这种状况,很自然会产生这样的问题:物质还可以照这个样子继续分割下去吗?或者说,物质是不是无限可分的呢?

古希腊的原子论者持原子是不可以分割的观点,与之不同的种子论者却认为物质是可以无限分割的。根据第奥根尼·拉尔修的叙述,提出种子论的阿那克萨戈拉说过:“在小的东西里并没有最小的,总是还有更小的。因为存在者决不能因为分割而不复存在。在大的东西里也总是有更大的。大的在数目上也和小的一样多。每一件东西都是既大又小。”卢克莱修在《物性论》里也说:阿那克萨戈拉“不承认物体的分割应有止境。”(文献[5],45页)

亚里士多德在他的著作《物理学》里,专门有一节讨论这个问题,不同意阿那克萨戈拉关于物质是由无限多的无限可分的种子组成的主张。[22]

由此可见,关于物质是否无限可分的争论古已有之,不是近年才发生的。

我国的古籍《庄子》的《天下》篇里,记载了战国时期的公孙龙等“辩者”的一句名言:“一尺之棰,日取其半,万世不竭。”“棰”就是木杖即木棍。这句话的意思是一根一尺长的木棍,每日砍削去一半,永远也砍不尽削不完。《庄子》里是把它和“卵有毛,鸡三足”等“辩者”的其他诡异言论放到一起的,并没有赞同的意思。

可是,到了现代,不断有学者从这句话里发掘出宏大的意义

来。例如文献[11](第8页)说,“公孙龙臆测到物质的无限可分,应该说是符合于辩证法的。”文献[12](第24页)说,“这是用具体比喻来说明物质是可以无限分割的,也就是说,物质的组成是连续的。这是战国时期公孙龙及其他辩者在探讨物质结构问题时所反映出来的朴素的辩证思想。”

我们断然不同意这种意见。试问:“无限可分”或者“连续”的主张是辩证思想,难道“有限可分”和“不连续”的主张就一定不是辩证思想吗?未免太小瞧辩证法了。

我们认为,“物质无限可分论”根本就不是什么辩证法。这是因为,辩证法并不是单纯讲量的变化,还讲量的变化到了一定程度就会发生质的变化,即所谓“从量变到质变”。“一尺之棰,日取其半”,剩下那一半是什么呢?它仍然是一段木头。纵令“万世不竭”地分取,如果每次剩下来的都是一小块或者一小颗木头,仅仅如此,就不是辩证法。反之,在原子学说里主张物质分割到原子层次,就会出现新的质,这才是真正的辩证思想。[23]

德国哲学家、辩证法大师黑格尔(G. W. Hegel, 1770—1831)把那种单纯讲量的变化的无限演进叫做 die schlechte Unendlichkeit,旧译“坏的无限”或“恶无限性”;我们根据新的译本[24],称之为“单调的无限”。根据黑格尔,“某物变为一个他物,而这个他物本身又是一个某物,因此这个某物同样变为一个他物,如此递进,以至无限。”“这种无限性是单调的或否定的无限性……”“这种向着无限的进展并不是真正的无限……”“说我们终归应该放弃这种总是不断进展的考察,这无疑是很正确的,但并不是因为这项工作崇高庄



图1.13　黑格尔(G. W. Hegel, 1770—1831)

严，而是因为它单调无聊。沉湎于考察这种无限进展之所以无聊，是因为在这里永远重复着同类事情。人们设定一个界限，超出这个界限，然后又设定一个界限，如此类推，永无尽头。”[24]



图 1.14 恩格斯(F. Engels，1820—1895)

恩格斯(F. Engels，1820—1895)也多次批判了那种单调的无限性。例如，他在《反杜林论》里说：“……这种毫无内容的持续性……正因为这种做法很无聊，黑格尔才把这种无限性称为恶无限性。”[25]

所以，我们认为“一尺之棰，日取其半，万世不竭”这一个被普遍认为是表达了“物质无限可分”的命题，不是辩证法而是被辩证法大师们斥之为“无聊”的一种“单调的无限”。

应当说，与古希腊的“种子论”和公孙龙的上述命题一脉相承，一直到现代的“物质无限可分论”，都具有类似的特征。

为了给“物质无限可分论”披上辩证法的外衣，文献[26]里说：“粒子的可分性和粒子的可分割是不同的观念。分割是说‘一尺之棰，日取其半’，而可分却说的是‘一分为二’的意思，是说的粒子也是对立的统一。”这我们就看不懂了。“分”这个单词的意义竟然要用一个复杂的词组“一分为二”来规定，那“一分为二”又是什么意思呢？原来指的就是“对立统一”。

我们接着要问：对立统一又是什么意思呢？不难查到，列宁(В. И. Ленин，1870—1924)在《谈谈辩证法问题》这篇文章里，一开始就说“统一物之分为两个部分以及对它的矛盾着的部分的认识，是辩证法的实质(是辩证法的”本质“之一，是它的基本的特点或特征之一，也许是它的基本的特点或特征)。”[27]这里讲得很清楚，“对立统一”的“分”，指的就是“统一物之分为两个部分”的

“分”。所以,“一分为二”里的“分”,也应当是这个意思。那么,“物质无限可分论”的意思就应该是,任何物体都可以分成两个部分,然后每个部分又可以进一步分成两个更小(或者也可以不是更小?)的部分……如此无限地“分”下去。这不分明是一种“单调的无限”吗?

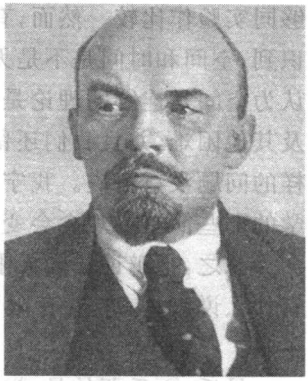


图 1.15 列宁(В. И. Ленин, 1870—1924)

再说,“物质无限可分论”的本意,是沿着原子论思路的一种发挥。我们知道,原子的原文 $\alpha\tau o\mu o\zeta$,意思就是“不可分”,英语的释义是 indivisible 或者 not+cut,[28]也就是不可分割或者不能分成两个部分或者更多部分的意思。因此,指物质“可分”的“分”不是“分割”的说法,实在很像是一种偷换概念的诡辩。

此外,在数学里,例如在传统的实数理论里,实数轴是连续而无限可分的。不过,也不能禁止人们去创造并非无限可分的实数理论。数学家完全有这样做或者那样做的自由。但物理学就不同了。物理学是一门经验科学,物理学理论是要受到经验事实的检验的。你当然可以抱着“物质无限可分”的信念,但实际上物质是否无限可分,并不由人们的主观意志来决定。事实上,在物理学里已经了解到,物质有许多性质并不是无限可分的。例如,量子理论告诉我们,一个物理系统的束缚状态的能量是量子化即采取分立值而不是无限可分的。还有像角动量等许多物理量的取值是不连续的,即不是无限可分的。

不仅如此,就是空间和时间是否无限可分,或者说空间和时间是否连续变化,都是允许探讨的一个问题。事实上,已经发表了不少关于量子化空时的研究工作,虽然目前这些研究的结果还不能

够同实验作比较。然而，有许多物理学家相信，将来我们必定会认识到，空间和时间是不是无限可分的。例如，费曼就讲过："我相信认为空间是连续的理论是错误的，因为我们会得出这些无限大以及其他困难，并且我们还留下了是什么决定了所有粒子的大小这样的问题没有解决。我宁愿怀疑当深入到无限小的空间时，几何学的那些简单的观念会变得不对。"(文献[10]，175 页)

总之，把辩证法同无限可分或者连续性捆绑在一起的意见没有什么说服力，难道有限可分和不连续性就一定会违反辩证法了吗？

最后，更重要的是，辩证法不是静止和凝固的，它含有丰富的内涵。应该肯定，把辩证法概括为"一分为二"，对于哲学的宣传和普及有着一定的积极意义。但正如恩格斯所说：辩证法"并不是重复，而是发展，是前进或后退，因而它成为运动的必然形式。"(文献[25]，581 页)这种辩证法的发展或者运动，就不是像"一分为二"那样粗浅的概括所能够包容得了的了。

那么，到底什么是辩证法呢？要真正了解和着手研究辩证法，建议读两本书。一本是黑格尔的 Die Logik，即《逻辑学》(黑格尔写了两本《逻辑学》，俗称《大逻辑》和《小逻辑》，前者是一本单行本，后者是他的《哲学百科全书》的第一部分)；一本是马克思的 Das Kapital，即《资本论》(《资本论》有三大卷，不大容易读完。要大概了解马克思的辩证法，读完第一卷就可以了)。

不过，我们这本书不是哲学讲义，主要的部分还是谈论物理学问题。只是因为原子论开始的时候同哲学思想有非常紧密的联系，我们才在第一章里花一点篇幅谈谈有关的问题。直到最后一章，我们再回过头来，接着进行从原子论的现代发展看怎么样正确运用辩证法的哲学讨论。

参考文献

[1] 在这一章里引用的我国古代文献，一般在国内不难找到，因此没有一一列出其出处。或者也可以参照二手资料中的引述，例如：任继愈主编，《中国哲学史简编》，北京：人民出版社，1973。

[2] 在这一章里引用的古希腊文献的译文，一般可参看：王太庆主编，《西方自然哲学原著选辑(一)》，北京：北京大学出版社，1988；也可以参看：北京大学哲学系外国哲学史教研室编译，《西方古典哲学原著选辑·古希腊罗马哲学》，北京：三联书店，1957。在这些资料里可以查到的，不再列举其出处。

[3] M. Kline，《古今数学思想》(第一册)，张理京等译，上海：上海科学技术出版社，1979，168 页。

[4] W. Heisenberg，从柏拉图到普朗克，中译文载《严密自然科学基础近年来的变化》，上海：上海译文出版社，1978，172—184 页。

[5] Lucretius，《物性论》，方书春译，北京：商务印书馆，1981，44 页。

[6] K. Marx，《博士论文》，贺麟译，北京：人民出版社，1961，20 页。

[7] 参看：关洪、成素梅，决定性、规律性和因果性辨析——兼评《决定性的历史命运》一书，《自然辩证法通讯》，1998 年 4 期，69—75 页。

[8] B. Russell，《西方哲学史》(上卷)，何兆武，李约瑟译，北京：商务印书馆，1976，106—107 页。

[9] E. Wigner，《乱世学人——维格纳自传》，关洪译，上海：上海科技教育出版社，2001，159 页。

[10] R. Feynman，《物理定律的本性》，关洪译，长沙：湖南科学技术出版社，2005，116 页。

[11] 王锦光、洪震寰，《中国古代物理学史话》，石家庄：河北人民出版社，1981。后来，王锦光曾经在一次会议的发言里说，他放弃了关于《墨经》里说的“端”就是原子的观点。

[12] 蔡宾牟、袁运开主编，《物理学史讲义·中国古代部分》，北京：高等教育出版社，1985。

[13] 依照：朱熹，《四书章句集注》，北京：中华书局，1983。

[14] 参看:北京大学哲学系外国哲学史教研室编译,《西方古典哲学原著选辑·十六—十八世纪西欧各国哲学》,北京:商务印书馆,1975,483—499 页。

[15] E. Mach,《感觉的分析》,洪谦等译,北京:商务印书馆,1986。

[16] 参看:方孝博,《墨经中的数学和物理学》,北京:中国社会科学出版社,1983;以及此书中所引的各种原始文献。

[17] 阎康年,《原子论与近代科学》,北京:高等教育出版社,1993,557—558 页。

[18] 依照:孙启治点校,孙诒让撰,《墨子闲诂》,北京:中华书局,2001。

[19] 引文中的"斲"字,原文是左从"耆"、右从"斤"的一个古字。这两个字都读 zhuó 音,意义亦都是"斫"(亦音 zhuó)或者"砍"。因为原来那个字不出现在任何一本不难找到的字典和任何一种计算机字库里,为印刷排版和读者查阅方便,这里换植了一个比较容易查到的异体字。

[20] J. Needham,《中国科学技术史(第三卷)· 数学》,北京:科学出版社,1978,201—206 页。

[21] J. Needham, Science and Civilization in China, vol. 4, pt. 1, Cambridge U. P., 1962, pp. 13—14.

[22] Aristotle,《物理学》,张竹明译,北京:商务印书馆,1982,24—28 页。

[23] 参看:金吾伦,《物质可分性新论》,北京:中国社会科学出版社,1988。

[24] G. W. Hegel,《逻辑学(哲学全书·第一部分)》,梁志学译,北京:人民出版社,2002,182—184 页。其中"否定的无限"似应译为"消极的无限"。

[25] 《马克思恩格斯全集》,第二十卷,北京:人民出版社,1971,57 页。

[26] 何祚庥,《三大论战——现代物理学研究中的哲学问题》,北京:北京师范大学出版社,2000,133 页。

[27] 列宁,《哲学笔记》,北京:人民出版社,1990,397 页。

[28] The Concise Oxford Dictionary of Current English, London: Oxford U. P., 1959.

第二章　近代原子论的复兴

2.1　伽森狄和原子论的复兴

当代科学史家霍耳顿(G. Holton，1922—)曾经这样评论过原子论的历史："今日的物理科学如果没有作为基本出发点的、关于物质和电荷的不连续性的专门假定，那是无法想象的。挑战这种观念无异于在化学中重新引进燃素说。原子式的粒子是我们每日的面包、奶油和果酱。今天，对于我们的先辈们遇到的烦恼，对于伽利略和牛顿为了避免由于同唯物论沾边而受到指责、从而把他们关于原子论的猜想伪装起来的做法，我们也许会一笑置之。然而，听起来不可思议的是，在17世纪时的法国，讲授原子学说仍然会受到处死的威吓。只是到了后来，我们的师长一辈和在第一次世界大战之后不久受教育的年长同事们，才真正代表了历史上把原子论作为确定无疑的信念的第一代科学家。"[1]

在漫长的欧洲中世纪时期，自然科学臣属于宗教神学，还没有取得自己独立的地位。经院哲学家们按照宗教的目的歪曲亚里士多德的学说，利用它来为基督教的教义提供依据。于是，亚氏的著作成了至高无上的权威，当时所谓学习自然哲学，不过是死抠他的《物理学》等著作而已。

此外，由于古希腊原子论者关于原子是世界最初本原的主张，漠视圣经里关于上帝创造世界的信条，也使得原子学说被当做是无神论的异端而长期受到打击和压制。例如，卢克莱修的《物性

论》第一卷的第一章《序诗》，简直就是一篇反对宗教的宣言。而在接着的第二章《物质是永恒的》里，卢克莱修更明确宣称："未有任何事物从无中生出……而当一朝我们知道无中不能生有，我们就将更清楚看到我们寻求的：那些由之万物才被创造的原素，以及万物之成如何是未借神助。"[2] 如果在古希腊或者古罗马时代，这样的主张只会受到言论上的攻击的话，在神权统治的中世纪社会里，就很可能会招来杀身之祸了。

直到15世纪初，人们才重新找到了失落千年之久的卢克莱修的《物性论》的完整版本。它在不久之后翻译出版，古代原子论学说才逐渐为近代的欧洲学界所知。这时候正值文艺复兴这个伟大的思想解放运动的早期，在这样的形势下，就陆续有一些学者开始不怕谈论原子学说了。

近代物理学的开创者伽利略(Galileo Galilei，1564—1642)在意大利得风气之先，一方面在1632年出版的《关于托勒密和哥白尼两大世纪体系的对话》这部著作里勇敢地批评了当时盛行的对于亚里士多德的崇拜："那些思想浅薄的人，他们的卑鄙真使人无法形容！甘心情愿做亚里士多德的奴隶；把他的什么话都奉为圣旨，一点不能违反。""我赞成读亚里士多德的著作，并精心地进行研究；我只是责备那些使自己完全沦为亚里士多德的奴隶的人，变得不管他讲的什么都盲目赞成，并把他的话一律当做丝毫不能违反的神喻一样，而不深究其他任何依据。"[3]

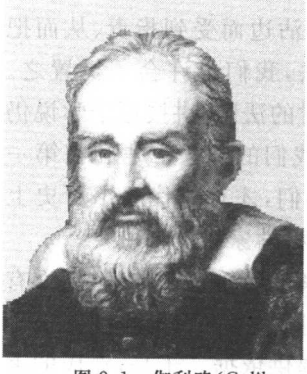


图2.1 伽利略(Galileo Galilei，1564—1642)

另一方面，伽利略又在他1638年出版的最后著作《关于两门新科学的对话与数学证明对话集》中提到过"原子"这个名词。例

如，他在“谈话”的第一日里，谈到几何的线、面和体都“由无限多的，而不是有限数目的原子组成”，意思是指“把线分解为无限多数目的无限小的不可分割的部分。”这里明显指一种“几何原子”，而不是原子论里的原子。虽然伽利略在后续的讨论中，把这种论证推广到黄金和石头那样的固体甚至水和水银那样的液体亦是由“无限多数目的无限小的不可分割的部分”或者“粉末”组成，但运用的都是类似的推理方法，谈的亦大都是数学上的或者空间上的分割以及对于无限可分还是有限可分的分析，对物理学问题只有一些粗浅的猜测，更没有论及微观原子的性质与宏观物质有什么不同。所以，我们认为伽利略只是袭用了原子这个名词，并没有深入掌握原子论思想的实质。[4]尽管如此，伽利略公开赞同原子论的世界图景，的确是一个良好的开端。

法国哲学家和数学家笛卡儿(R. Descartes，1596—1650)对于物质世界的组成则抱着另一种想法。1633 年，笛卡儿写成了《论世界》一书，系统地阐述了他在这方面的主张。但是，当他听闻伽利略被教庭判罪之后，生怕书中对哥白尼学说的支持会给他带来麻烦，便没有把它付印。这些内容，在经过了修改补充之后，收进 1644 年出版的《哲学原理》一书。这部著作除了第一部分专门论述认识论问题之外，其余三个部分依次谈的是运动的一般规律、天文学和物性学问题，可以看做是一本系统的物理学专著。[5]



图 2.2　笛卡儿(R. Descartes，1596—1650)

笛卡儿认为，上帝创造世界时，把充满着整个世界的原始物质分成一小块一小块，这些小块物质之间没有间隙，所以它们必定是有棱有角的；又因为它们紧挨在一起，所以只能各自转动。由于各

个部分的转动摩擦，结果形成了三类不同的物质："第一类在与别的物体碰撞时产生很强的激发力，使它分解成无限小的一些颗粒，在填满其他物体所留下来的所有狭小角落和间隙中取得了它的形状。第二类是分解成球形微粒的物质，比我们的双眼所能看到的物体都小得很多，但仍然能够进一步分解得更微小。第三类由那些或者由于太笨重或者由于其形状不便于运动的部分组成。"(见文献[5]，110 页)按照笛卡儿，太阳和恒星就是由第一类物质聚集起来而发光的；第二类物质充满天空，可以承载光的传播，第三类物质则组成可以反射光的地球、行星的彗星。

笛卡儿假设在太阳周围的天空中的第二类的微细物质(相当于后来人们设想的以太)不停地旋转，形成一个以太阳为中心的漩涡，离太阳较近者旋转较快，而远处的则旋转较慢。笛卡儿还比喻说，这就好像漂浮在河面的漩涡上的草杆跟随着打转一样。而且，他说在这种漩涡里，离中心较近的草杆的确转得比远处的快，并且转的也不一定是正圆形而可以是扁圆形的圈。"于是，我们很容易想到，所有这些现象都会发生在行星的运动上。"(文献[5]，96)

笛卡儿关于太阳系的各个行星是被以太漩涡裹挟着围绕太阳转动的、这种易于从日常经验得到理解的模型很快就流行开来，成为占着主导地位的学说。在他的理论里有不同的微粒或者颗粒，也有漩涡的运动。不过这些并不是德谟克利特的所说的原子及其漩涡运动。笛卡儿的世界到处充实而没有虚空，与认为原子和虚空是一切的本原的原子论有原则上的不同。事实上，在笛卡儿的《哲学原理》一书里，专门有一节从一切微粒都必定具有无限可分的性质来论证"原子是不可能存在的"；(文献[5]，20—21 页)还在另外一节里宣称"我拒绝德谟克利特所作的每一项假设"。(文献[5]，284—285 页)

我们在这里介绍笛卡儿学说的目的，是为了给出当时产生过广泛影响的、原子论的一种对立面。

真正复活了古希腊原子论的是法国哲学家和科学家伽森狄(P. Gassendi，1592—1655)。他在1624年发表了《对亚里士多德的异议》一书，表达了对传统哲学的反叛。1644年又出版了《对笛卡儿〈沉思〉的诘难》，逐条批驳笛卡儿的新著《形而上学的沉思》。从1647年开始，他深入研究了伊壁鸠鲁的哲学，出过介绍伊壁鸠鲁的生平和学说的两本专著。伽森狄关于原子论的系统论述，见于他的《伊壁鸠鲁哲学纲要》[7]以及《哲学纲要》一书的第二部分"物理学"，后一部著作收入在1658年他逝世后才出版的《全集》里。[8]



图2.3　伽森狄(P. Gassendi，1592—1655)

马克思在《神圣家族》一书里高度评价了伽森狄的贡献。他说："在法国以笛卡儿为主要代表的17世纪的形而上学，从诞生之日起就遇上了唯物主义这一对抗者。唯物主义通过伽森狄(他恢复了伊壁鸠鲁的唯物主义)来反对笛卡儿。法国和英国的唯物主义始终同德谟克利特和伊壁鸠鲁保持着紧密的联系。"[9]

伽森狄先是在《伊壁鸠鲁哲学纲要》里说[7]："宇宙由物体和虚空构成……"，"本原或者最原初的最单纯的物体(称粒子更好些)，应该是非合成的，不可分的，任何力量都毁坏不了的，因此是不变的……"，"所谓复杂物体的本原，按其本性，不仅是饱满的，密实的和不变的，而且是绝对不可分的，这一点之所以必要，原因就在这里。所以我们通常把它们称做原子。"这里明显表现出对古希腊原子论的继承。

在这部著作里，伽森狄复述了伊壁鸠鲁原子学说的要点。他说，原子有不同的"大小，形状和重量"，而"颜色，冷热以及其他的质不是原子所固有的，这是复杂物的属性，它们的产生部分出自原

子本身不可分的属性，部分出自原子本身偶然的属性。”他说：“原子经常处于运动或趋向运动的状态”，“原子本身具有两种运动，一种取决于原子本身的重量；另一种取决于打击或者碰撞……取决于重量的运动，首先是指原子沿垂线的运动”，此外，“必须承认有原子的极小的碰撞。正是通过这种办法才能产生原子间的所有联结，交织，紧密结合，而由此产生了世界、它的所有部分，以及一般说来存在于世界中的所有东西。”

伽森狄试图用组成结晶体的原子的形状来说明各种晶体的不同外观。他不难举出这样的例子，食盐的立方形结晶体，是因为组成食盐的原子具有同样的形状的缘故。他认为，其他物质的原子则可以有各种不规则的形状，甚至带着钩和刺，以利于相互的结合。

此外，他还恢复和推进了伊壁鸠鲁关于宇宙形成的想法，认为原子在虚空中的无序运动使它们得以偶然地相互聚集的联结起来，成为一团混沌。后来轻小的原子因为受到碰撞而上扬，形成了天空、星体、日月和空气，而笨重的原子则下沉而形成土地和水体。这种宇宙由原子的运动和聚结演化而成的说法，显然是向笛卡儿漩涡说发出的一种挑战。

在这部著作里，伽森狄旗帜鲜明地“反驳归于上帝的恩泽和归于创造世界的劳作”，批判了柏拉图主张的上帝创世说，并且得出结论说：“世界是由自然创造的。”由此可见，写作这本著作的时候，伽森狄基本上只是复述和发挥伊壁鸠鲁的原子学说，并且仍然坚持伊壁鸠鲁的无神论观点。

但是，在后来的那部《哲学体系》里[8]，伽森狄却改变了调子，说要摒弃在原子论里混杂的错误成分。他说“首先要拒斥关于原子是永恒的和非创造的观念……这样做了之后，就能够承认原子是上帝从一开始创造出来的物质的原初形式”。而且，他还要拒绝的是原子具有能够运动的本性的观念，“承认上帝在一开始的创造

中，赐予原子以运动和活动的能力。”并且“上帝一开始就创造了形成整个宇宙所需要的那么多的大量的原子。”这样一来，伽森狄就给原子论披上了宗教的外衣。后来的法国哲学家狄特罗(D. Diderot，1713—1784)曾经对此评论道：“可怜的伽森狄，为了躲避殉教者的花冠，不得不给伊壁鸠鲁挂上基督教的面具。”

我们在上一章里已经提到，马克思在青年时代所写的博士论文的题目就是“德谟克利特的自然哲学与伊壁鸠鲁的自然哲学的差别”。在这篇论文的序言里，马克思也这样说：“伽森狄诚然把伊壁鸠鲁从禁书里面拯救出来了，那是教会神父们和整个中世纪——那体现了非理性的时代把他禁闭起来的，但伽森狄在他的阐述里也只接触到一个有趣的方面。他竭力要使他的天主教的良心和他的异教的知识相协调，使他的伊壁鸠鲁和教会相适合，这当然是白费气力的。”[10]

不像以前原子论的宣传者卢克莱修只是一位文学家那样，当时的伽森狄本身是一位颇有造诣的科学家。他担任过巴黎大学里的数学教授，进行过天文学研究，在物理学上对于惯性定律的确立亦做过不可磨灭的贡献，留下了深刻的影响。他复兴了古代被视为异端的原子论，并且给它披上了基督教的正统外衣，也使得后来像玻意耳和牛顿那样的虔诚信徒亦有可能接受和运用原子学说了。[11, 12]

2.2　玻意耳和牛顿的气体静态模型

在上一节里所讲的伽森狄设想的原子既是小到看不见的，又是以高速度在虚空中运动着，并且彼此之间不时发生碰撞。而且，他还假定“原子按其本性具有同一速度”。这种动态的原子图景，已经具备了后来初期的气体动态理论的各个基本要素。伽森狄在这一方面，比起他的朋友伽利略所说的那种粗浅的原子观念，已经

远远地走在前头了。所以，有评论说，假使伽森狄掌握了伽利略建立的力学方法，本来他是可以在物理学上作出更大得多的贡献的。[11]但是，历史的发展常常不是径情直遂的，往往注定要走过一些迂回曲折的道路。今天的读者会感到意外的是，首先对物质性质给出合理解释的，竟然会是静态原子的模型。

原子论在科学上的真正深入发展，是同对于气体性质的研究分不开的。在伽利略的《关于两门新科学的谈话》里，已经有了用机械泵抽水只能够抽到一个极限高度的记载。他写道："当我第一次注意到这一现象时，我以为是机械出了毛病了；但我叫来修理机器的工匠告诉我说，毛病不在水泵上，而是因为水的落差太大，不能够抽得上这么高；并且他还补充说，无论是用一台水泵还是任何靠抽吸原理来工作的机械，都不可能把水抽上比十八肘尺还高一根头发丝的高度；不论水泵是大还是小，这都是抽水高度的极限。"（文献[4]，16—17 页；中译文参看文献[13]，77—78 页）肘尺（cubit）是自古时候沿用下来的一种长度单位，合后来的半米多一点儿。那么这个极限高度就是九米多了，同我们今天的数据差不了多少。

然而，那时候普遍信奉的是亚里士多德否定真空存在的"自然界拒斥真空"这一教条，认为泵里的水能够被抽吸上升，是为了要填补腾出来的真空的缘故。伽利略在这方面仍然保持着老旧的观念，相信上述现象不过表明了这种拒斥是有一定限度的。于是，伽利略就让他的一名学生托里拆利（E. Torricelli，1608—1647）深入研究这个问题。

1644 年，托里拆利用灌满了水银的玻璃管做了那个大家都知道的实验，证明插在盛有水银的碗里的一根上端封闭的玻璃管内，至多只能支持一又四分之一肘尺多一点（接近于今天的数据 76 厘米）那么高的水银柱。而且，托里拆利认为，这一现象的原因不在于玻璃管的什么性质而"是外在的并且是外来的"，那是"水银进入

容器并上升到足与外界空气的重量迫使它进入以求保持平衡的高度”(文献[13],80—81 页),从而明确提出了大气压的概念。

下一位接着作出贡献的是著名的法国哲学家和数学家帕斯卡(B. Pascal, 1623—1662)。他请人把自制的水银气压计带到山顶上去,证明了大气压强随着高度的增加而降低(文献[13],82—89 页)。这一结果显示出越往高处大气就越稀薄,因而地球表面外的大气层必定是有限的。今天我们所使用的压强单位,就出自对帕斯卡的纪念。

建立了这些基本的认识,加上气压计、抽气泵等技术的发展,就进一步推动了对于气体性质的研究工作。

大家都知道英国物理学家玻意耳(R. Boyle, 1627—1691)所发现的、以他的姓氏命名的气体定律,即在等温条件下,一定量气体的体积与其压强成反比的实验规律。我们这里要介绍的是,玻意耳对于这种“空气的弹性”的解释。以下两段文字出自他于 1660 年出版的《关于空气弹簧及其效应的物理——力学新实验》一书。(文献[14];或[6], 35—51 页)



图 2.4　玻意耳(R. Boyle, 1627—1691)

玻意耳说:“可以设想,靠近地面的空气是一堆彼此紧挨着的一个个细小物体,就像一团羊毛那样。它由细长而柔软的一条条纤毛组成;每一条都确实像一个小弹簧,容易弯曲和卷绕;但亦像一个弹簧那样,依然有把它自己伸展开来的能力。虽然这些纤毛以及我们拿它们来作比喻的空气微粒,确实能够产生外部压强;而两者都赋有一种自行膨胀的能力;依靠这种力量,虽然可以用人手把这些纤毛折弯和把它们挤压在一起,并且把它们塞进一个最适应于物体本性的狭小空间里去,然而,在受压缩的时候,那些纤毛

仍然力图向外挣扎，由此它持续地推斥着阻碍它的膨胀的那只人手。当不同程度地把手放松以撤减外部压强之后，那原先受压缩的羊毛团即刻膨胀开来，或者说显示出它自己趋于恢复它原来较为松软和自由的状态，直到那个羊毛团或者重新达到它以前的尺寸，或者至少尽可能接近于把它压缩着的手所允许的大小为止。一块受压缩的干海绵的这种自行膨胀的能力，在一定程度上比一团羊毛要更加明显。然而我们还是选择使用羊毛团来做例子，因为它不像海绵那样是一整块物体，而是由许多细长而柔软的物体组成，它们结合得并不牢固，就像空气本身看起来的那样。”

但是，玻意耳马上又说：“还有另一种方式来说明空气的弹性：即由最聪慧的笛卡儿先生所假设的，空气不外是由许多不同大小和不同形状的细小和柔软的微粒堆积或者聚集而成，它们由于受到（特别是太阳的）热而上升，掺入到环绕着地球的流体和微妙的以太物质里去；并且由于那些微粒浸泡于其中的天上物质的不息骚动和到处翻卷，每一个微粒就赋予了同其他所有气体微粒撞击的能力……它们的弹性能力不是靠它们的形状或者结构而形成的，而是靠着得自在它们之间飞快地流淌的以太流体的激烈骚动和摇晃，并且它们彼此的回旋运动不仅使得那些纤细的空气微粒分离且伸展开来……；而且亦使得它们相撞，然后彼此反弹开来，结果就会要求有比它们被压缩时所占有的更大空间。”

由此可见，玻意耳同时提出了一种静态微粒的气体模型和一种动态微粒的气体模型这两种思想。他说虽然前者更加简单明白，并且是在他接着所做的论述中主要使用的一种机制，但他亦不轻易否定后一种机制的可能性。然而，他说的那些微粒未必可以当做是正统的原子。特别是他后面所指笛卡儿学说里的微粒，就明显不适宜归属于原子的概念。尽管如此，他所提出的这两种模型，仍然可以看做是关于气体结构的早期猜测，并且对原子论的后来发展起到了积极的启发作用。

下一位作出贡献的是牛顿(I. Newton，1642—1727)。他在1687年出版的《自然哲学之数学原理》第二编的最后一个命题里，证明了以下的定理：[15]

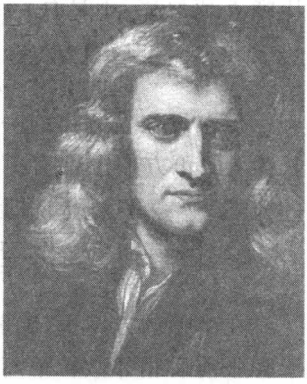


图2.5　牛顿(I. Newton，1642—1727)

> “如果流体由相互离散的粒子组成，密度正比于压力，则各粒子的离心力反比于它们中心之间的距离。”

因为密度是与体积成反比的，所以这里讲的“密度正比于压力”，即是玻意耳定律里讲的体积与压强成反比的规律。牛顿在这一著作里是用一种几何学的方法来证明这条定理的。他在证明中假设了流体中的各个微粒是静止而呈规则排列的，并且在流体膨胀或者压缩的前后，各个微粒的相对排列仍然保持着不变的样式。

下面用简单的初等代数方法复述这一证明。图2.6是牛顿的《原理》里的一幅插图。设气体充满了一个边长为 l 的立方体，它的体积就是 $V=l^3$。又设气体膨胀之后充满一个边长为 l' 的立方

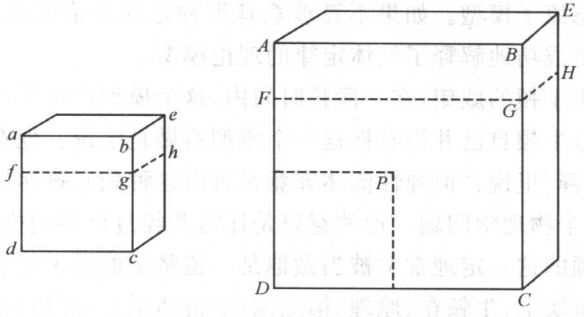


图2.6　牛顿在《自然哲学之数学原理》里推导玻意耳定律所用的插图

体，它的体积就变成 $V'=l'^3$。根据玻意耳定律，气体的体积 V 与压强 p 成反比，于是有

$$\frac{p}{p'}=\frac{V'}{V}=\frac{l'^3}{l^3}$$

现在设在立方体的一个表面上总的受力为 F，那么在这个边长为 l 的正方形上就有 $F=pl^2$。同理，在气体膨胀之后，有相应的公式 $F'=p'l'^2$。利用上面的结果，马上得到

$$\frac{F}{F'}=\frac{pl^2}{p'l'^2}=\frac{l'}{l}$$

在牛顿的方案里，膨胀前后的两个正方形边长之比 l'/l，亦等于膨胀前后相邻微粒距离之比；而在一个表面上的总受力，当然也是同相邻微粒之间的作用力成正比的。于是，我们就从玻意耳定律导出了微粒之间的排斥力反比于其距离的结果。

不过，我们这里的证明同牛顿原来的证明一样，都是不那么严格的。因为这一结果仅在作用力局限于近邻微粒的条件下才是正确的。对于现在这种比库仑力的力程还要长的力说来，非近邻微粒的作用肯定是不能忽略的，严格的结果会依赖于气体体积的大小和形状。牛顿自己也明白这一点。

这就是牛顿提出的气体的静态微粒模型，或者也可以说是气体的静态原子模型。如果不算玻意耳那种定性的论证的话，它也是第一个成功地解释了气体定律的理论模型。

由于牛顿的威望，在一段长时间内，这个模型产生了巨大的影响。不过牛顿自己并没有把这一个模型看做是定论。他在这条定理的“附释”里说：“但弹性流体究竟是否由这种相互排斥的粒子组成，这是个物理学问题。”他的意思是还需要经过更多的检验。

牛顿的这一定理常常被当做他是一位坚定的原子论者的重要证据。事实上，牛顿在《原理》第三编《宇宙体系》一开始的《哲学中的推理规则》的“规则Ⅲ”的附释里声言：“我们可以下结论说，一切

物体的最小微粒也都具有广延，坚固性，不可入性，能动性，并赋有其固有的惯性，这是整个哲学的基础。”（文献[15]，404 页；文献[17]，4 页）而牛顿继承了伽利略等先辈所运用的质点概念，并且发展出了质点动力学方法，更为原子理论的发展准备了一种必不可少的工具。

此外，牛顿也曾经为原子论做过积极的辩护。例如，原子学说受到的重要批评之一是，在气体里的各个以高速运动的原子，又会不时发生相互的碰撞，那么经过许多次的碰撞之后，原子必定变得残旧甚至破碎了？据说笛卡儿就曾作出过这样的指责。那么，由这些残破了的原子的组成的气体，怎么会仍然具有与原来气体相同的一切性质呢？

牛顿针对笛卡儿派的批评，在 1717 年出版的《光学》第二版的末尾所加上了第 31 个即最后一个 Query（疑问）里[16, 17]，专门谈了这个问题：“在我看来，似乎上帝在开始造物时，就把物质造成一些密实的、有质量的、坚固的、不可入的、可运动的粒子，其大小，形状和和类似的其他一些性质，以及空间上的比例等等，都最有助于达到他创造它们的目的；这些原始粒子是实心的，比任何由它们组成的多孔的物体都要坚固得无可比拟；它们甚至坚固得永远不会磨损或者破裂；没有什么普通的力量能把上帝自己在他最初创世时所造出来的物体分割开来。只要这些粒子继续保持完整，它们就可以组成性质和结构在任何时间都是一样的物体；但是如果这些粒子竟会磨损或者碎裂，那么由它们组成的物体的性质就会发生改变。”

在这里，为了保证原子的永恒性，牛顿不得不乞灵于上帝的创造，在这方面比古希腊的原子论者倒退了一大步。而包括原子在内的微观粒子为什么不会磨损或者陈旧的物理学道理，要等到两百多年之后，在量子力学里提出了粒子全同性原理方才得到解决。

然而，事实上牛顿并不是一位彻底的原子论者。在上面所引

的一段话里可以看出，牛顿认为原子是实心(solid)的。显然在这里的形容词 solid 不可以译成“固体”。因为固体是由许多原子组成的宏观物体，单个原子怎么会是固体呢？如果单个原子真的是固体的话，那么由许多原子组成气体，岂不是会得出气体是由固体组成那样的荒唐结论来了！

从这段话还可以看到，牛顿同时认为，由一个个实心的原子组成的普通(宏观)物体是“多孔”的，意思是组成物体的原子之间还留有许多孔隙或者空洞。他在这里因袭了笛卡儿的观念，认为普通的物体实际上就像海绵那样，里面有无数细小的孔道，便于以太出入其间。

《光学》第二版出版时，牛顿已经是一位 75 岁的老人了，在这一版附加的 31 个“疑问”里仍然有多处提到也称作“媒质”的以太。例如，在“疑问 18”里说“热是不是由一种远比空气更为微细的媒质的振动穿过真空传过去的，而这种媒质在空气被抽出后仍然留在这真空中？这种媒质是否就是光赖以折射和反射……的那种媒质？”(文献[17]，170 页)又如，“疑问 21”里还讨论了“是否……由于每个物体总是力图从媒质的较稠密部分走向较稀薄的部分，引起了这些巨大物体彼此相互吸引……？”(文献[17]，171 页)

由此可见，直至晚年，牛顿依然以为以太不仅仅是光赖以传播的媒质，而且可能是传播热的媒质，甚至会在引力的形成机制中起作用。这些证据都表明了，那种认为“从 1684 年下半年起，牛顿抛弃了以太说”的说法[18]，是完全不符合历史事实的。

此外，人们常常从《光学》第二版的“疑问 29”里“光线是否发光物质发射出来的很小物体？”等论述(文献[17]，186 页)，来把牛顿说成是光的微粒说的倡导者。然而，在“疑问 19”我们又看到了“光的折射是不是由于这种以太媒质在不同地方具有不同密度而发生的……”等字句(文献[17]，170 页)。实际上，牛顿提出的不是一种纯粹的光的微粒说，而是同时用微粒和以太去解释光的性

质。在这方面，也不能说他是一位彻底的原子论者。

值得我们思考的一个问题是，牛顿那么擅长解决动力学问题，为什么竟然会提出一种气体的静态原子模型呢？的确，在上面所引述的“疑问 31”里的那段话里，牛顿已经说了原子是“可运动(movable)”的，在这里坚持了古代原子论的基本观念。但为什么他又不去建立一个气体的动态原子模型呢？要知道对他说来，这个问题并不难解决。假使他真的着手那样做了，就会成为气体动态理论的创始人了。

我们想，这里的首要原因是，牛顿的当务之急不是气体问题，而是要解决引力问题。我们已经说过，当时关于太阳系行星运动的理论，占着支配地位的是笛卡儿派的漩涡说。牛顿在《原理》第二编《物体在阻滞介质中的运动》里研究的流体力学问题，其主要目的就在于论证笛卡儿的漩涡说不能够给出符合于开普勒诸定律的行星运动。例如，在第二编最后一条定理的“附释”里，他下了这样的结论：“由此看来，行星的运动并非由物质漩涡的携带”，和“漩涡假说与天文现象严重对立”，等等(文献[17]，184 页)。此外，在牛顿为《原理》1713 年第二版所加的“总释”里，一开始就说“漩涡的假说碰到许多困难。”这些困难里还包括了“彗星的运动……根本不能用漩涡的假说来解释”。(文献[17]，47 页)在 1717 年为《光学》第二版写的“疑问 28”里，牛顿又一次回到这个话题，说笛卡儿的漩涡说“的存在是得不到证明的，因而只应把它抛弃掉”。(文献[17]，184 页)由此可见，牛顿几十年来念念不忘的是维护他的引力学说，对气体问题并没有显示出真正的兴趣。

其次，虽然牛顿在《原理》开篇的《运动的公理或定律》的最后一个“附释”里(文献[17]，35—43 页)，对两体碰撞问题的解决做了一些评论，并且肯定了惠更斯等人的贡献；但统观全书，牛顿在这方面似乎没有做多少进一步的研究。

不仅如此，从《光学》的“疑问 31”里(文献[17]，206—207 页)，

我们还读到了这样的语句:“惯性力是一种被动的本原……单单有这样一个本原,世界上就不会有任何运动了。要使物体运动就得有某种别的本原;而物体现在已经运动,就需要有某种别的本原使这个运动保持下去。因为从两个运动的各种合成来看,很可以肯定地说,世界上运动的数量不总是一样大小的。”这就不禁令人感到诧异。牛顿不是早就在《原理》里关于“运动定律”的最后一条“推论”中得出“物体相遇和碰撞时,从同方向的各运动之和或从方向相反的各运动之差中所求得的运动的量,永远不会改变”(文献[17],38—39页)这样的结论,即建立了他的“运动的量”守恒即后来说的动量守恒的定律了吗,怎么又会说出这样的话来呢?

看来,即使是牛顿那样的伟人,亦难免有时候犯糊涂。是不是在这方面的糊涂,亦妨碍了他在气体理论上取得本来能够取得的成就,我们就不得而知了。

2.3 伯努利的气体动态模型

在17世纪末到18世纪初,出现过一些不成熟的气体原子模型,大都背离了伊壁鸠鲁关于原子在虚空中直冲横撞的主张,而认为气体的一个个原子悬浮在以太媒质之中静止不动。其中包括了上一节里讲过了的玻意耳和牛顿的静态原子模型,亦有气体原子在平衡位置附近作振动或者转动的少数“准动态”模型。

英国物理学家胡克(R. Hooke, 1635—1703)是牛顿的同时代人,他在1678年发表的著作《论弹簧》里提出(文献[6],52—61页),组成物体的各个微粒都在其平衡位置附近作不息的振动,借助于这种振动而避免同相邻的微粒挤靠在一起。他是这样解释玻意耳定律的:“空气是一种由许多很小的微粒组成的物体。……如果有一定量的这种物体关在一个坚实的容器里面,然后设法把它压缩到较小的空间里,各个微粒的运动的量将会保持不变(假设热

是相同的），结果它们的振动和摇晃将会按反比地增加，即是说，如果压缩到一半的空间里，其振动和摇晃的数目将会加倍……而且，如果设法把容器空出较大的空间，振动的幅度就会成比例地增加，并且振动和摇晃的数目则成反比地减小。”

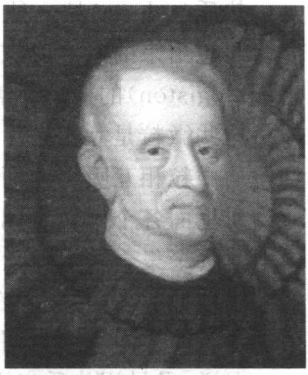


图 2.7　胡克（R. Hooke，1635—1703）

他还试图用气体微粒的振动和它们之间的引力这两者的综合作用来解释地球表面上的大气层的形成。然而，尽管在物理学上胡克有过人的洞察力，但却缺乏必要的数学技巧，没有能够把这个振动模型定量化。现在看来，胡克的这种振动模型，似乎更适合于描写固体晶格而不是气体的性质。

另一个气体的准动态原子模型是后来欧拉（L. Euler，1707—1783）于 1727 年提出的。在他的模型里，沉浸在以太中的气体微粒处在不停的转动之中，亦能够作出类似的解释。

回顾牛顿的那个静态原子的模型，虽然可以近似地解释封闭在容器里的气体的弹性；但是，假若原子之间真的只有与其距离成反比的排斥力的话，像地面上的大气那样不受约束的气体原子就要无限止地四处逃逸，怎么可能仍然能够相对稳定地聚集在一起呢？（按照牛顿的万有引力定律，在远距离的极限下，与距离平方成反比的引力比这种与距离成反比的斥力衰减得更快）以上所说的两种准动态原子的气体模型的提出，也许亦是为了在这方面能够得出一种比较合理的说明。

然而，气体原子靠着自身的振动或者转动以保持彼此之间的距离的这一类机制，不久之后就都让位给了一种早些时设想出来的物质——热质。

热质(caloric)是一种依照唯物论的思路,把热当做是一种物质而假想出来的。当时在化学里亦流行着类似的假想物质——燃素(phlogiston)的概念。热质被设想为由许多微粒组成的一种流体。这些微粒是互相排斥的,同时却与普通物质或者说组成普通物质的微粒相互吸引。而且,组成热质的微粒被赋予钻进一切普通物质里面各个微粒之间的空隙的能力。于是,在各个物质微粒周围就会聚集着一定数量的热质,就像地球周围的大气那样,我们把它叫做"热氛"(事实上在英语里描述地球外围的大气和原子外围的热氛的是同一个名词 atmosphere)。

据说,最早用热质来说明原子之间的排斥的,是荷兰化学家布尔哈夫(H. Boerhaave, 1638—1738)。这也难怪,因为从牛顿开始,只知道有一种普遍存在的万有引力。迟到 18 世纪末,库仑(G. A. Coulomb, 1736—1806)才完成了他的静电学实验。当时实在不知道有什么普遍存在的作用机制能够使静止的一个个原子不会无限止地紧靠在一起,人们借用热质来担当这一任务,就一点也不足为奇了。当然,起到排斥作用的热质只存在于原子周围的一定区域,就长距离的作用而言,还是要靠万有引力的吸引以保持相对稳定的聚集状态。

借助于热质说,不难解释一些有关的热现象。例如,当温度升高时,每个原子会吸收更多的热质在它的外围,这样就使得相邻原子加强了排斥,从而拉长了原子的间距,这样就解释了物质受热膨胀的现象。假设热质的排斥效应有随距离而变化的适当函数关系,热质说甚至可以解释固体的热膨胀系数随温度的变化。至于量热学的各种实验结果,就更加容易用热质说来解释了;事实上,热量、比热和潜热等等概念和沿用至今的名词,最早都是在热质说的理论里建立起来的。

从 18 世纪到 19 世纪初期,热质说正大行其道。例如,1816 年拉普拉斯(P.-S. M. de Laplace, 1749—1827)正确地计算出空

气中的声速；1822 年傅里叶(J. B. J. Fourier，1768—1830)创立热传导的理论；1824 年卡诺(N. L. S. Carnot，1796—1832)关于热机的著名定理的证明。这几项重要的贡献，都是在热质说的基础上做出来的。[22]由此可见，那时候热质说确是一种富于成果的理论方法。在这样的形势下，许多科学家都认为热质是原子的一个不可缺少的成分。这种状况自然会有利于各种原子的静态模型。

然而，也有敢于跳出这一巢臼的丹尼尔·伯努利(D. Bernoulli，1700—1782)。瑞士的伯努利家族里接连出了几位数学家兼物理学家，他是其中最闻名的和成就最大的，流体力学里著名的“伯努利定理”就是他的贡献。在他 1738 年出版的、叙述了这条定理的同一本著作《流体动力学》里，还包含着第一次用动态的原子模型推导出玻意耳气体定律的工作。[19]



图 2.8　丹尼尔·伯努利(D. Bernoulli，1700—1782)

下面把伯努利的证明简单复述如下：

如图 2.9 所示，设有一汽缸式的容器，顶部有一个活塞，它的上面置有可更换的重物。汽缸里的气体是由一个个分离开来并且在不停运动着的原子组成的。今设在一重物的压力下，活塞在 EF 线上取得平衡。换用较重的另一重物后，活塞停止在较低的 ef 线上。设 EF 的高度为 1，压缩后的 ef 高度为 s。那么压缩前后汽缸的体积比就是 $1/s$，体密度比就等于 s，而面密度比等于 $s^{2/3}$。我们可以想象汽缸内的原子是整齐排列的，压缩前后的原子间距比应当等于体积比的立方根即 $s^{-1/3}$。

伯努利作了一个简化的假定，设想每颗原子都具有相同大小

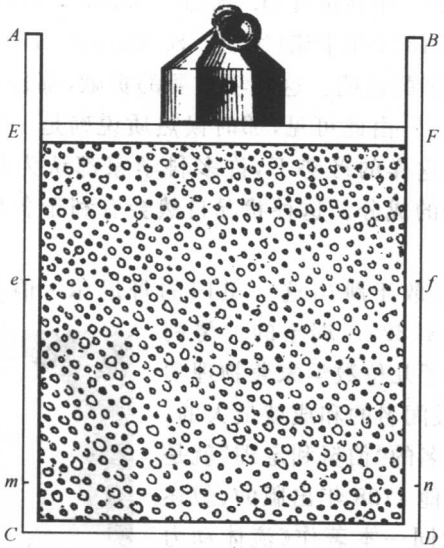


图 2.9 伯努利推导玻意耳定律所用的插图

的速度 v，并且都在垂直方向上运动。那么，活塞表面上所感到的压力，一方面正比于它所面对的原子数目，即正比于原子的面密度；另一方面正比于受到原子冲击的频率，即反比于原子的间距。所以，压缩前后活塞压力之比是：

$$\text{压力比} = \text{面密度比} / \text{原子间距比} = s^{2/3}/s^{-1/3}$$

$$= s = \text{密度比} = \text{体积比的倒数}$$

这样就推导出了气体的压强 p 同体积 V 成反比这一合乎玻意耳定律的结果。

伯努利还知道气体压强是随温度而增加的。他考虑到活塞所受到的压力一方面正比于所受到每个原子撞击的效果，一方面正比于撞击的频率，而这两个因素都同原子的速度成正比，因而他得到了这样的近似结果：

$$pV \propto v^2$$

伯努利还指出，气体的温度是 v^2 的单调上升函数，虽然由于那时候温度和热量这两个物理量还没有明确区别开来，他未能确定那是个什么样的函数。

不仅如此，伯努利考虑到原子本身有一定的大小，他实际采用的原子间距的表达式，还扣除了原子所占的尺寸。这样得到的精确结果，就会同玻意耳定律略有出入。应当承认，这是历史上第一个处理非理想气体的理论模型。

伯努利的基本假设和主要结果，尽管还不够细致，却是惊人地正确的，他无愧为一位气体理论的先驱。在伯努利的理论里，原子真正在虚空之中穿越，不需要考虑以太的作用，也不需考虑在一定距离之外的原子之间的相互作用力，仅仅靠原子的运动，以及遇到障碍时发生的碰撞，就能够解释气体的性质以及这种性质对热的依赖。他的这些远见卓识远远超出了他的时代，真个是曲高和寡，长期以来得不到任何人的赏识。可能由于牛顿的巨大威望使得人们倾向于他那一类的静态模型，也可能由于笛卡儿的以太漩涡理论依然支配着许多人的头脑，还可能由于这个模型太简单了而难以置信，伯努利这项建筑在动态原子观念上的贡献被埋没了一百多年，直至 1859 年这份文献从拉丁文译成德文的版本面世之后，方才广为人知，而那时候历史早就翻开了新的一页。

伯努利的这一工作可以称为气体的动态理论，是与过去玻意耳和牛顿等人的气体静态理论(static theory of gases)相对立、并且同胡克和欧拉等人的准动态理论亦有原则区别的第一个真正的气体动态理论(kinetic theory of gases)。我国以前制定的《物理学名词》里把 kinetic theory 译成“分子运动论”[20]，其实它是同 static theory 相对立的一种微观理论，并没有专指“分子”的意思。后来新版的《英汉物理学词汇》又把它改译成“动理论”[21]，这个译法也不怎么妥当，一来这个生硬的名词好像还没有叫开，二来我们觉得，总不宜把它的对立面 static theory 叫做“静理论”吧。

在这一节的最后，我们再讲一下波斯科维奇(R. J. Boskovic，1711—1787)，他在1758年出版的《自然哲学理论》中提出了一种与众不同的原子模型[23]。波斯科维奇指出牛顿关于原子是坚固、结实、不可分，而有质量、大小和形状的微粒的主张是有毛病的。他认为，既不会变形又不会碎裂的物体是不能发生相互碰撞的。因为，根据“连续性原理”，当两颗以不同速度运动的粒子相遇时，在它们的接触点上要发生速度的改变，因而必定会随着产生形变。但是，绝对刚硬的物体不会发生形变，因此也就不可能发生碰撞。

为了避免这一困难，波斯科维奇设想了一些占据一定空间位置、能够参与相互作用，有质量而无大小和形状的点状原子。亦即是说，他所说的实际上是一些仅仅作为力心的点状原子。它们既然没有大小，自然就不存在变形的问题了。

波斯科维奇假设可以用一条曲线来描写原子之间的作用力。如图2.10所示：上半平面的是吸引力，下半平面的是排斥力。我们看到：在近距离处的区域 $E—D$ 是越近越强的排斥力，起到防止原子紧挤在一起的效用，E 点处就是一个平衡的距离；在远距离处的区域 $S—T—V$ 是符合于与距离平方成反比的引力；而在中间的则是吸引与排斥多次交错更替的区域，用来反映蒸发和凝聚，结晶

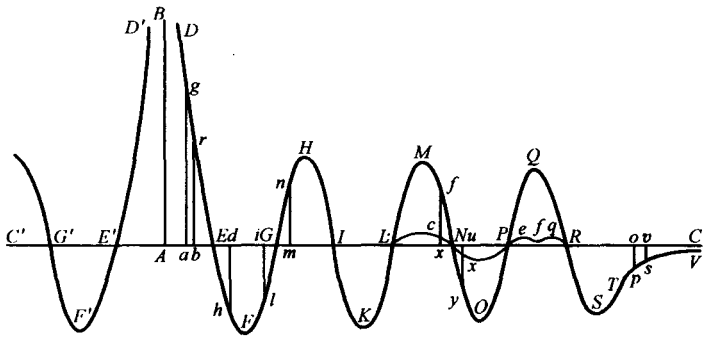


图2.10 波斯科维奇设想的原子间作用力随距离变化的曲线

和融解甚至化学结合和分解等各种各样的相互作用。例如，$G—H—I$ 的吸引区域，用来解释蒸发现象，G 和 I 就分别表示液体蒸发和固体气化的两个极限点。

在今天的我们看来，波斯科维奇的点状原子好像是一种描述微观相互作用的数学模型，而他的力曲线则好像是一种把各种力"统一"起来的雄心勃勃的方案。不过这种"统一"的力曲线不是来自动力学的结果，而只是一种唯象式的拼凑。尽管如此，波斯科维奇的原子论注重原子之间相互作用描写的特征，亦有其积极的意义。特别是对于凝聚态物质，就不能像在气体理论里那样，除了碰撞以外不必顾及原子或者分子之间的相互作用了。波斯科维奇在这方面的率先探索，对于后来的发展也产生了不可忽视的影响。

2.4　道尔顿和化学原子论的确立

英国化学家道尔顿(J. Dalton，1766—1844)出身贫寒，年轻时曾经多年在乡村学校担任教师。他是从业余的气象学研究开始他的科学事业的，早在 1793 年就出版了一本专著《气象学观测与探讨》，同年他被聘为一所由一个非主流教派创立的、设在曼彻斯特的"新学院"的教授。从他的实验观察所表明的水的蒸汽压只依赖于温度的规律，道尔顿领悟到蒸发是一种物理过程，而不是像当时大多数学者以为的那样是一种化学过程。对于多种成分的混合气体的分压和溶解等方面的研究，更使他坚定了这种信念，而把主要方向转移到对气体的物理性质上去，并且于 1800 年辞去了学院的职务，定居在曼城，开始了私人教学和研究的生涯。

另一方面，从 1661 年玻意耳在《怀疑的化学家》一书里提出应当努力识别各种不同的纯粹化学物质开始，到拉瓦锡(A. L. Lavoiser，1743—1794)在 1789 年出版的《化学纲要》一书的这一个多世纪里，已经明确地建立起化学元素的概念。在同一时期，在

对大量的化学反应进行了定量研究的基础上，法国的一位药剂师普鲁斯特(J. L. Proust，1754—1826)总结出定比定律，即“两种或者两种以上元素相化合成某一化合物时，其重量之比是天然一定的。”化学理论在这方面的进展，亦为道尔顿的原子学说准备了必要的基础。

道尔顿1801年发表几篇文章，其中得到了“所有弹性流体按同量的热而膨胀”的结果。那时候说的“弹性流体”即气体，实际上道尔顿独立地发现了气体的体积与温度成线性变化的定律，它是由查理(J. Charles，1746—1823)1787年首先发现的。道尔顿还首次陈述了混合气体的分压定律，即混合气体中每一种气体的压强与别种气体无关的规律。此外，道尔顿进一步认识到气体溶解于水，并非由于化学亲和力，而是仅仅由于压强的物理作用。



图2.11 道尔顿(J. Dalton，1766—1844)

道尔顿起初完全相信牛顿关于气体原子相互排斥的静态模型。在发现分压定律后，他作出了这样的解释：“当两种弹性流体A和B混合到一起时，不像每种微粒都互相排斥那样，A的微粒并不排斥B的微粒……任何一种微粒的压强或者总重量仅仅来自它自己那一种微粒压强或者重量。”

然而，道尔顿并没有严格遵照牛顿的原子概念，他认为原子周围是被热质的氛围包裹住的。例如，在1803年9月6日的笔记里道尔顿写道：“物体最终原子乃是在气体状态时被热围绕之微粒或核心。”在图2.12中可以看到道尔顿在他的笔记里画出的原子图像，从中间的微粒发出的好像光芒四射似的辐射式线条，表示的就是原子外层的热氛。不过，如果说这种图像对单纯气体不成问题

的话，对于满足分压定律的混合气体，就出现了一个大漏洞。因为，如果像道尔顿说的那样，不同种类的原子的外围都是同一种热质的话，它们怎么能够不相互排斥呢？要克服这一困难，看来只能够假设每一种原子外围的热质都是不同的，彼此之间没有相互作用。那么，上帝开始创造世界的时候，就需要为几十种（现在是一百多种）原子创造那么多种不同的热质，这样做是不是太累了？实在是太难为他了。

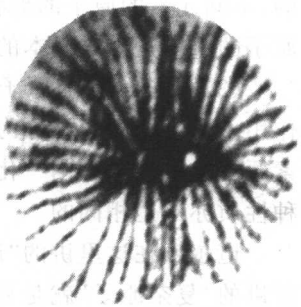


图 2.12　道尔顿所描绘的原子图像

不久之后，在菲涅耳（A. J. Fresnel，1788—1827）1818 年提出的“以太部分曳引模型”里，亦出现了类似的尴尬局面。[24] 因为菲涅耳所说光在运动媒质中传播的“曳引系数”依赖于光学折射率，对于不同频率的单色光，以太就会受到不同程度的曳引。那么，岂不是对于每一种单色光，都要求有一种不同的以太了吗？后来在爱因斯坦的相对论里，在低速近似下自然能够推出菲涅耳的公式，亦从根本上免除了以太的责任。道尔顿那种太不自然的原子构造模型，后来亦被证明为过时的了。

我们暂且不管道尔顿的原子构造模型，看看他是怎样对化学原理作出解释的。在 1803 年 10 月 18 日，道尔顿在“曼彻斯特文哲学会”（Manchester Literary and Philosophical Society，他从 1794 年起就是这个学会的一名成员）宣读了一篇论文，提出了化学原子论的要点，其大意如下：

（1）元素的最终组分称为简单原子，它们是看不见和不可分割的微粒，既不能创造亦不会毁灭，它们在一切化学变化中均保持其独特性质。

（2）同一元素的各个原子，其形状、重量等各种性质都是相同

的，不同元素的原子的形状、重量等各种性质则各不相同。每一种原子的重量是其最基本的特征。

(3) 不同元素的原子以简单数目的比例相结合，就发生化合作用。化合物的原子称为复杂原子。复杂原子的重量是所含各元素原子重量之和。同一化合物的各个复杂原子的形状、重量等各种性质亦都是相同的。

道尔顿在这里讲的“简单原子”就是我们今天讲的原子，而他所讲的“复杂原子”就是后来说的分子。在同一篇文章里，道尔顿还发表了第一张原子重量即原子量的列表。

道尔顿的这些主要成果以及经过修订的原子量表，都收入了他 1808 年开始陆续出版的《化学哲学新体系》。[25] 在这部著作里还收入了道尔顿在原子论思想指导下，于 1804 年最终通过实验确证的倍比定律：“当相同之两种元素可生成两种或两种以上的化合物时，若其中一元素之重量恒定，则另一元素在各化合物中之相对重量成简单倍数比。”

道尔顿的这些原则看起来都很好。但光凭这几条原则，仍然不足以确定化合物中不同元素原子的比例，因为我们并不知道参加化学反应的各种“简单原子”和(或)“复杂原子”数目的比例。道尔顿在这里采取了一个简单化的做法，实质上假定了两种元素生成化合物，如果没有别的理由的话，这种化合物的分子中两种原子的数目，就采取尽可能简单的整数比。例如，道尔顿按照最优先的简单比例得出水的组成是氢 1 氧 1，氨则是氢 1 氮 1，用现代记法就分别是 HO 和 NH，等等。

虽然自然界本身是比较简单的，但亦常常并不像人们起初想象的那么简单。今天我们看到上面那样的“分子式”，就晓得道尔顿的原子量数据必定会有许多混乱之处了。另一个未必更不严重的错误是，道尔顿因袭牛顿的静态原子观念，认为同一种类的原子必定是互相排斥的，所以多个同类的原子是绝不可能组成一个分

子的。道尔顿据此认定氢、氮、氧等元素，都由“简单原子”即单原子分子组成。事实上，道尔顿在《化学哲学新体系》这部著作发表的各种元素里，没有一种元素的分子是由两个或者更多个相同的原子组成的。

当1808年法国化学家盖吕萨克(J. L. Gay-Lussac，1778—1850)发表了关于化合反应前后的各种气体的体积的定律之后，尖锐的矛盾就暴露出来了。盖吕萨克通过一系列的精密实验，得出这样的结论：“各种气体在彼此起化学作用时，总是以简单的整数比相结合。”而且，他还说化合产物气体的体积，也同反应气体的体积成简单的比例。这一结果本来可以是对道尔顿原子学说的极好支持。但是，盖吕萨克不满足于此，而是进一步提出一个大胆的假设，认为在同温同压下，相同体积的各种气体(不论是单质还是化合物)中，含有相同数目的原子。例如，实验测定2体积的氢气和1体积的氧气化合出水，按照盖吕萨克的假设，水的复杂原子里，氢原子和氧原子的比例应当是2∶1，直接同道尔顿的1∶1相矛盾。



图2.13　盖吕萨克(J. L. Gay-Lussac，1778—1850)

道尔顿得悉盖吕萨克的工作之后，断然拒绝他的假设。这里的第一个问题是两人的不同假设会导致一系列不同的结果。例如，从实验测定2体积的氢气和1体积的氧气化合出2体积的水蒸气，道尔顿的解释是每个氢原子和水原子所占的体积相同，并且亦等于一个氧原子所占体积的两倍；而按照盖吕萨克，则只能得出一个水原子里含有一个氢原子和半个氧原子这样不合理的结论。于是道尔顿不仅不接受盖吕萨克的理论，而且说他的实验也做错了。其实，这里的第二个问题的关键在于，争论双方都没有意

料到，像氢和氧等一些常见气体的分子，竟是由两个相同的原子组成的。

1811 年，意大利物理学家和化学家阿伏伽德罗（A. Avogadro，1776—1856）很快提出分子假说，给出了解决这个问题的方案。他首先区分了原子和作为化学物质（无论是单质还是化合物）最小单元的分子。其次，他破天荒地提出，气体元素的分子可以由不止一个相同的原子组成，从而为修正道尔顿的失误铺平了道路。而且，他还认为在相同的条件下，同体积的任何单纯的气体，含有相同数目的分子（而不是盖吕萨克所认为的原子）。



图 2.14 阿伏伽德罗（A. Avogadro，1776—1856）

与此同时，阿伏伽德罗摒弃了道尔顿的静态原子模型，而认为气体分子连同周围的热质的尺寸，比分子之间的距离要小得多。这种模型自然有利于后来渐显优势的热的运动说，却难以同当时流行的热质说取得一致。加以阿伏伽德罗的理论尚不够完善，以及当时原子量的测定数据亦不够精确，都使他的分子假说在长时间内没有受到应有的重视。顺便提一下，法国物理学家安培（A. M. Ampère，1775—1836）在 1814 年亦曾独立地提出与阿伏伽德罗相近的看法，也没有得到多少注意。

经过半个世纪里许多化学家测定原子量工作的进步，特别是在能量守恒定律确立前后热的运动说成功地取代了热质说，1860 年由意大利化学家康尼扎罗（S. Cannizzaro，1826—1910）总结并论证了阿伏伽德罗的原子-分子学说的成就，才使它终于得到了科学界的普遍承认。

从这段历史发展我们可以看到，其中一个关键的概念突破是

提出相同的两个原子能够组成一个分子。如果说像氯化钠那样的分子是由两个带有不同电荷的氯离子和钠离子依靠异性相吸的静电力维系而成，这样的机制容易被人接受的话，那么，两个相同的原子凭什么可以结合成一个分子呢？我们说过，在道尔顿的静态原子模型里，由于同类原子外围热氛的相互排斥，这样的结合是不可能发生的。当初阿伏伽德罗只是根据对实验数据的分析，为了使原子-分子学说能够自圆其说而提出这一要求，并且笼统地说它们是靠引力结合的。对这种后来叫做"共价键"的分子结合方式，则要等到 1927 年，由海特勒(W. Heitler，1904—1981)和伦敦(F. W. London，1900—1954)运用量子力学理论求出氢分子的解，才使人们开始了解到这种化学键的本质，并且开创了量子化学的先声。

总而言之，尽管道尔顿的原子学说存在着这样那样的毛病，其中有一些在一种理论的初创阶段是难以避免的，主要的问题亦在其他科学家的共同努力下得到了正确的解决，最终构筑起了一套行之有效的化学原子论。但是，这一理论的基本框架是由道尔顿建立起来的，最大的功劳应当归于他。而且，这一化学理论体系的创立，亦受益于当时物理学已经达到了的成就，以及道尔顿本人对于一些物理学现象和其中规律的思索。

1860 年前后，化学家们发现的元素总数逐渐达到和超过半百，原子量测定的工作亦不断取得进展。那么，他们自然会思索，这些众多的不同元素之间会存在着一些什么样的关系，其中的一条主要的思路，就是试图从按照原子量排列的元素顺序，找出它们的化学性质变化的规律来。从 1860 年开始，陆续出现过一些关于元素性质按原子量的升序呈某种周期性再现的猜测。例如，英国化学家钮兰兹(J. A. R. Newlands，1837—1898)在 1865 年提出的"八度律"(law of octative)就是其中的一个代表。"八度"是一个音乐名词，意思指在七声音阶里，从任何一个音出发，经过八度

的音程之后，就回到了同一音名。钮兰兹的“八度律”则说的是一种类似的规律：“从任何一个元素开始数起的第八个元素，是第一个元素的一种重复。”这样说来，他的元素周期是七而不是八。现代的读者也许会觉得不对头，原子里的电子填满一个壳层的数目可能是八，但不可能是七呀。这里的问题在于，钮兰兹在他的“八度律表”里，是没有给惰性元素留出位置的。

在这一类的猜测里真正获得成功的是俄国化学家门捷列夫（Д. И. Менделеев，1834—1907）。他在1869年提出元素周期律，列出包含有六十多种已知元素的第一张周期表；而在1871年发表的新版化学元素周期表，已经具有今天我们看到的那种基本形式。门捷列夫根据他的周期律，调整了单纯靠原子量顺序而错排了的几种元素的位置，订正了另外几种元素的原子量。特别是，门捷列夫依据他的周期表中的空位，预言了一些新元素的原子量、比重（密度）和化学价等物理和化学性质。第一个得到成功认证的新元素是在1875年发现的、后来成为一种重要半导体材料的镓，它是在化学的历史上第一次发现一种先有理论预言的新元素。至此，门捷列夫化学元素周期表的成就，意味着作为一种理论分析方法的化学原子论取得了决定性的胜利。[26]

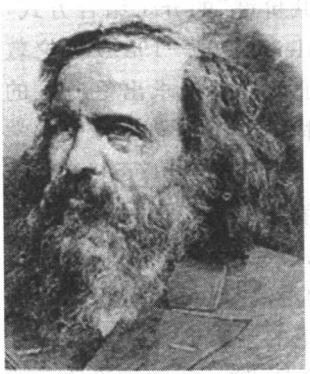


图 2.15 门捷列夫（Д. И. Менделеев，1834—1907）

一个世纪之后，在基本粒子的分类上又重演了这一幕。凑巧的是，粒子物理里的“八重法”（eightfold way），听起来就有点像是钮兰兹的“八度律”的再现。

最后，再提一下一位英国医生普劳特（W. Prout，1785—1850），他在1815年提出一个假说，认为所有不同种类的原子，都

是由最轻的氢原子组成的，试图解释为什么当时发现的许多原子的原子量，都接近于氢原子量的整数倍。后来，精密的原子量测定结果表明事实并非如此。例如，氯元素的原子量，就处在两个相邻的整数中间，明显不满足那样的规律。因此，普劳特的假说被当做是空想而被抛弃了。然而，到了 20 世纪 30 年代，当物理学家了解了原子和原子核的结构时，明白了原子的质量几乎全部都是由组成原子核的质子和中子贡献的，而质子和中子的质量又差不多相等。这样一来，每一种具有确定质子和中子数目的原子核的原子，它们的原子量的确都应当接近于氢原子量的整数倍。氯元素的原子量不接近整数，是因为天然的氯主要是由两种不同的同位素混合而成的缘故。普劳特的天真猜想作为一种近似规律，竟在一个新的层次上复活了。

纵观从 16 世纪原子论思想开始重新发扬光大以来，直到 19 世纪，先后提出过多种不同的原子学说。在气体理论方面，有从玻意耳和牛顿的静态原子模型，胡克和欧拉的准动态模型，到伯努利的动态原子模型；在原子本身构造的方面，有由热质或者以太组成的“氛围”包裹着的原子，也有波斯科维奇的那种没有内部结构的点状原子。至此，作为一种理论基础的原子分子方法首先在化学里取得了成功。但是，在物理学上还没有建立一种普遍接受的原子图像，还没有提出过怎么样（哪怕是间接地）测定原子的大小和质量等基本性质的方法，当然也就不可能产生出这方面的结果。亦即是说，整个原子学说仍然停留在想象和思维的层面上。要使物理学家们承认原子是组成一切物质的实体，还需要做大量理论上和实验上的工作。

参 考 文 献

[1] G. Holton, Foreword to the symposium “History of the Atomism”, Am. J. Phys. 49 (1981) 205.

[2] Lucretius,《物性论》,方书春译,北京:商务印书馆,1981,1—9 页。

[3] Galileo Galilei,《关于托勒密和哥白尼两大世纪体系的对话》,上海:上海人民出版社,1974,146—147 页。

[4] Galileo Galilei, Dialogues concerning Two New Sciences, translated by H. Crew and A. De Salvio, Macmillan, 1914, pp. 25, 39—41(按:此书书名原文第一个单词不是相应于英语 dialogue 的 dialogo,而是相应于英语 discourse 的 discorsi,应该译成"谈话"而不是"对话").

[5] R. Descartes, Principles of Philosophy, translated by V. R. Miller & R. P. Miller, Dordrecht: D. Reidle Pub. Co. 1983. 或者文献[6],22—34 页。

[6] H. A. Boorse and L. Motz(ed.), The World of Atom, vols. I—II, New York: Basic Books, Inc, 1966.

[7] 参看:王太庆主编,《西方自然哲学原著选辑(三)》,北京:北京大学出版社,1993,101—120 页。

[8] 参看:The Selected Works of Pierre Gassendi, edited and translated by C. B. Brush, New York: Johnson Reprint Co., 1972, pp. 279—434.

[9]《马克思恩格斯全集》,第二卷,北京:人民出版社,1961,161 页。

[10] K. Marx,《博士论文》,贺麟译,北京:人民出版社,1961,序。

[11] R. B. Lindsay, Pierre Gassendi and the revival of atomism in the Renaissance, Am. J. Phys. 13(1945)235.

[12] L. U. Pancheri, Pierre Gassendi, A forgotten but important man in the history of physics, Am. J. Phys. 46(1978)455.

[13] W. F. Magie(ed.),《物理学原著选读》,北京:商务印书馆,1986。

[14] 参看: S. G. Brush, Kinetic Theory, vol. 1, London: Pergamon Press, 1965, pp. 43—51.

[15] I. Newton,《自然哲学之数学原理》,王克迪译,武汉:武汉出版社,1992,399—401 页。

[16] I. Newton,《光学》,周岳明等译,北京:科学普及出版社,1988,223 页。

[17] H. S. Thayer(ed.),《牛顿自然哲学著作选》,上海:上海人民出版社,1974,209 页。

[18] 阎康年,《原子论与近代科学》,北京:高等教育出版社,1993,104 页。

[19] D. Bernoulli, On the Properties and Motions of Elastic Fluids, Especially Air (英译文), 见文献[14], pp. 57—65; 中译文见文献[13], 262—266 页。

[20]《物理学名词》(英汉对照), 中国科学院编译出版委员会名词室重订, 北京: 科学出版社, 1956。

[21] 赵凯华主编,《英汉物理学词汇》, 北京: 北京大学出版社, 2002。

[22] 牛顿曾经在《原理》第二篇里计算过空气中的声速, 但因为他采用的是按照玻意耳定律的等温过程膨胀系数, 结果与观察值不符合。后来拉普拉斯在热质概念的基础上, 改用绝热过程的膨胀系数, 算出了空气中声速的正确值。参看文献[24], 第 8.3 节。

[23] 参看: [6], 117—128 页。

[24] 参看: 关洪,《物理学史选讲》, 北京: 高等教育出版社, 1994, 第 7.2 节。

[25] J. Dalton,《化学哲学新体系》, 李家玉等译, 武汉: 武汉出版社, 1992; 原文节选参看: [6], 139—156 页。

[26] 参看:《化学发展简史》,《化学发展简史》编写组编写, 北京: 科学出版社, 1980, 121—132 页。

第三章　从气体动态理论到统计物理学

3.1　两位先行者赫拉帕斯和瓦特斯顿

上一章讲过，伯努利 1738 年通过计算运动着的原子对器壁的碰撞而推导出气体压强公式的工作，在气体的静态理论和热质说占着主导地位的情况下，长期以来没有引起物理学界的丝毫注意。然而，过了一个世纪，在英国仍然有两位业余科学家孤军奋战，先后独立地重新提出和推进了气体的动态理论，他们富于启发的成果，亦确实为原子学说的发展留下了不可磨灭的贡献。[1-4]

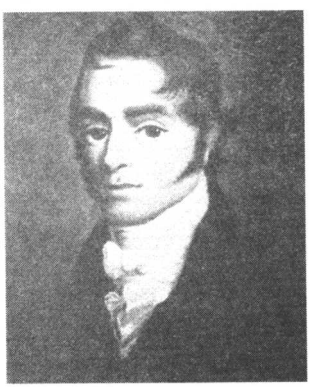


图 3.1　赫拉帕斯(J. Harapath，1790—1868)

赫拉帕斯(J. Harapath，1790—1868)是 19 世纪的第一位重要的气体动态理论专家。他没有受过多少正规教育，年轻时一边继承父亲的商务，一边靠自学读通了微积分和那时候的物理学，亦少不了得益于他有幸遇到的几位良师益友。三十岁时，赫拉帕斯放弃他的祖业，从故乡布里斯托尔去到伦敦，以从事私人教师为生，亦曾经徒劳地试图提交一篇数学论文以谋求大学里的一个职位。中年以后，赫拉帕斯进入一家铁路公司，成为一份铁路科技刊物的编辑。

赫拉帕斯像那个时代的许多迷恋科学的年轻人一样，首先研

究的是天文学问题。他按照牛顿的《原理》和拉普拉斯的《天体力学》里的方法来计算月球的轨道，将得出的结果同他自己的观测作比较，由此引起了他对引力本性的思考。

在上一章里我们已经提到，牛顿晚年在他的《光学》新版本里加上的“疑问 21”里曾经猜测，万有引力是否来源于“每个物体总是力图从媒质的较稠密部分走向较稀薄的部分？”这里讲的弹性媒质也就是通常说的以太。赫拉帕斯据此假设，行星朝向太阳一面的媒质密度比背向太阳一面的密度要稀薄一些，借此来解释行星所受到太阳的“吸引”。正是通过对这一问题的研究，使他开始详细考虑这种假想媒质的温度、压强和密度之间的相互关系。

赫拉帕斯不相信热质说，也不接受气体的静态模型。他采用动态原子的观点，从而提出了一种气体的动态理论。1820 年，他写成《关于热、气体和引力的原因、定律和基本现象的研究》一文，投交英国皇家学会会刊（*Philosophical Transactions of Royal Society*），被拒绝以后改投《哲学纪事》（*Annals of Philosophy*），并于 1821 年发表。

在这篇文章里，赫拉帕斯在一开始陈述的几条公设里申明：“物质是由具有惯性的，赋有质量的，完全坚固而不可摧毁的原子所构成，……”特别是：“气体是由完全自由地相互运动着的原子或微粒所组成的。”并且：“非常稀薄的气体的各个部分充满着所有空间，并且最大程度地伸展至它的极限。”

赫拉帕斯根据这种自由运动的原子对器壁碰撞的机制，推导出了气体压强公式，这一部分内容基本上是在不知情的情况下对伯努利工作的重复，然而赫拉帕斯还尝试猜测气体性质同热的关系。可是，由于赫拉帕斯还采取了“热来源自各个原子或者微粒固有的运动，并且正比于它们各自的动量”这样一条假设，他所得到的理想气体定律的温度依赖是不正确的。令 p 为气体压强，V 为其所占体积，假设各个分子具有相同的速度 v，用绝对温度 T 来表

示，赫拉帕斯得到的结果，相当于这样一条定律：

$$pV \propto v^2 \propto T^2$$

由于赫拉帕斯最后一步的错误，在例如混合物质的温度等问题上就会导出与实验不相符合的结论。不过，在上一节里已经说过，1820 年前后正是热质说大行其道之时。事实上，拉普拉斯在 1821 年，泊松（S.-D. Poisson，1781—1840）在 1823 年都还在发表用热质理论来研究气体性质的文章。热质说并不排斥原子的运动，当时的物理学家不能接受的只是根本不需要热质的、把热仅仅归于原子运动的气体动态理论。况且，那时候热（量）和温度这两个概念尚未得到严格的科学界定，量热学实验还不够精确，能量守恒定律的确立更是在二十多年之后的事，在这样的种种因素影响下，赫拉帕斯的理论难免不够成熟。我们觉得，这里面重要的不是他有什么失误，而是他敢于首先走出猜测气体热学性质同原子运动的关系的第一步。这也是他比伯努利更加深入的探索，虽然一时没能得出恰当的结果。

赫拉帕斯后来在 1832 年的一次会议上宣读了关于空气中声速计算的一篇文章，在这一工作中不仅第一次从气体动态理论推导出在温度 32°F 时，空气中声速的数值为 1089.6 英尺/秒（合 332.11 米/秒），与当时的实验数据符合得很好，而且也第一次从这一方法估算了空气分子的平均速度。

赫拉帕斯为了争取承认，曾经给包括《泰晤士报》在内的一些报刊写过一些信件或者文章，介绍他的学说以及对有关争论的辩驳，但都收效甚微。1847 年赫拉帕斯出版了两卷本的专著《数学物理学》，总结和扩展了他的研究成果。而正是这套书里的有关内容，引起了焦耳的注意和引用。后来，在瓦特斯顿和麦克斯韦的有关著作里，亦都先后肯定了赫拉帕斯在气体动态理论方面的先驱性贡献。

瓦特斯顿（J. J. Waterston，1811—1883）是在 19 世纪中叶

对气体的动态理论作出贡献的又一位业余科学家。和赫拉帕斯一样，他也是英国人，也没有受到完整的高等教育，他的贡献在生前亦没有得到学术界应有的承认。

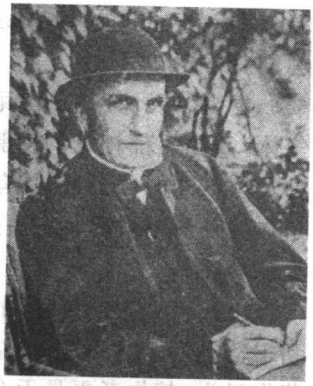


图 3.2　瓦特斯顿(J. J. Waterston，1811—1883)

瓦特斯顿成年之时，正是确立能量守恒定律的前夜，这方面的进展对他后来的工作产生了决定性的影响。1832 年他从家乡爱丁堡去到伦敦，受雇于铁路部门做测量和制图的工作。1839 年开始，瓦特斯顿受聘于英国殖民地的东印度公司，在孟买担任导航培训的职务，一直做到 1857 年才回到苏格兰。他在印度的时候，还时常在闲暇时间利用当地图书馆的资料进行研究。

1843 年，瓦特斯顿从印度把手稿寄回爱丁堡，匿名出版了他的第一部著作《关于精神功能的思考》，试图将分子学说运用于生物学，以说明中枢神经系统的生理学。在这本书的最后一章里，他提出了关于气体动态理论的一整套想法以及一些初步的结果。其中包含了例如：由运动粒子组成的气体的压强正比于其密度乘以其速度的平方；气体温度的增加正比于分子动能的增加；分子的线性运动同转动的动能之比可能是常数；一个分子在两次碰撞之间走过的路程反比于气体的密度和分子直径的平方，等等。瓦特斯顿在这部著作里，甚至根据他的理论，推算出在温度 60°F[①]时，空气分子的平均速度为 2282 英尺[②]每秒；以及估计分子的大小为百

① 华氏度(°F)温度 t_F 与摄氏度(℃)温度 t 的换算为：$\frac{t_F}{°F}=\frac{9}{5}\frac{t}{℃}+32$。

② 1 英尺(ft)＝12 英寸(in)＝0.3048 m。

万分之一英寸。这些结果虽然还不够准确，但总算是一些最早的尝试。

更为令人惊讶的是，瓦特斯顿在这部著作里，还从“所有简单气体”的比热都相等的实验结果，推断出“处在温度平衡状态的各种大小不同的分子，都具有相同的活力[动能]”的结论。实际上这是在一种简单情况下对后来的统计物理学里的“能量均分定理”的提前表述。

由此可见，瓦特斯顿的研究成就，比伯努利和赫拉帕斯都深入和丰富得多。然而，这些结果都隐藏在冠以那样一个古怪书名的著作里头，其作者更是无名之辈，以至于普遍怀疑，到底有没有哪一位物理学家在瓦特斯顿生前读过并且读懂过这部著作。只是在重新发现瓦特斯顿的贡献并且在 1928 年重印这本书之后，人们才有可能直接接触到他的这些成果。怪不得文献[2]将其介绍瓦特斯顿那一章的标题取为“一位天才的悲剧”了。

话说回来，瓦特斯顿这部著作除了那些真知灼见之外，也有不少似是而非甚至明显错误或者前后矛盾之处。但是我们不要忘记，当年开普勒(J. Kepler，1571—1630)论述行星运动三大定律的那部著作里，亦充斥着大量的音乐谐例、几何图形和赞美上帝的颂歌，把各个行星的轨道运动看成是一曲曲“天界的和声”。亏得牛顿等学者把埋藏在稻草堆里的几颗珍珠发掘出来，开普勒的贡献才不至于被埋没。

然而，在这一本著作上瓦特斯顿所受到的不公平对待仅仅是开始。1845 年，他写成专门论述气体动态理论的《论由在运动中的自由的弹性分子所组成的媒质的物理学》一文，投送给皇家学会。当时的惯例是，非会员的投稿要由两位会员审阅，决定是否发表。其中一位审阅人的评语是：“文章全是胡说八道”，另一位则说：“文章的原理中所包含的假设在我看来是很难接受的，并且完全不能作为一种数学理论的合理基础。”我们已经说过，赫拉帕斯

亦曾有过类似的遭遇，而他则决定撤回稿子另投别的刊物。但瓦特斯顿身在印度，无法及时联系。于是就按照皇家学会的规定，在《会刊》上登了不到一页的摘要，而他的原稿则被封存到学会的档案库里去了。

瓦特斯顿依然没有气馁，他继续在一些学术会议上提交他1845年的论文摘要，又在1858年在《哲学杂志》(*The Philosophical Magazine*)发表的一篇关于声学理论的文章里，重申需要把赫拉帕斯提出的气体的热或者温度与分子的速度成正比的假设，改为与速度的平方成正比。此外，还提到了在皇家学会存档的、他在1845年写的一篇未发表的文章里，已经系统研究了包括声速在内的这一类问题。在1858年发表的另一篇关于毛细作用和潜热的关系的文章里，瓦特斯顿还重新估算了水分子直径的尺寸约为1.2×10^{-8}厘米，已经达到了正确的数量级。尽管如此，瓦特斯顿所做的一系列开创性的贡献，仍然没有引起任何主流物理学家的注意和重视，显得他仍然好像是游离于科学界之外似的。

1891年，当时担任皇家学会秘书、也是一位声学权威的瑞利(J. W. Rayleigh，1842—1919)读到了瓦特斯顿1858年关于声学理论的文章，给他以很深刻的印象。瑞利当即从档案里调出瓦特斯顿1845年的文章，加了长篇大论的按语，于1892年发表在皇家学会会刊上，以补偿学会的过失。这时瓦特斯顿已经辞世将近十年了。

瑞利在这篇按语里说："那时候没有发表这篇文章的失误真是一场不幸，可能因而使这方面的进展推迟了十到十五年。"但是他又为皇家学会辩解说："从这篇文章的历史看来……一位相信他自己有能力干大事的年轻作者，也许最好是先在其价值易于判明的局限课题上取得科学界的赞同和承认，然后再在这个基础上向前跃进。"这番话正反映了皇家学会的传统是不利于支持新生力量的，这个老牌学会差不多已经把科学活动当成是圈内人的游戏了。

事实上，为了打破皇家学会的垄断，给科学的发展创造更多的机会，1831 年由一批年轻人发起成立了“英国科学促进协会”(The British Association for the Advancement of Science)，以同皇家学会分庭抗礼。瓦特斯顿亦曾受益于这个协会，得以有机会参加他们举办的多次学术会议。后来，麦克斯韦也积极参加了协会的活动，并且一度担任过协会的会长。

在瓦特斯顿 1845 年那篇重要文章里，明确主张“热本质上是分子的活力[动能]”，蒸汽和气体里的分子“在运动中没有受到任何力的约束限制，它在每一方面都可以看做是同自由运动的子弹一样。”“这些自由的子弹赋有完全的弹性……”，支配它们的是“活力守恒的原理”。

从分子对器壁碰撞的机制，设 m 为分子的质量，N 为分子的总数，$n=N/V$ 为单位体积内的分子数，他得出的结果相当于

$$p \propto nm\langle v^2 \rangle \propto T$$

这一表达式等价于综合了玻意耳定律和盖吕萨克定律等实验结果的理想气体定律

$$pV \propto T$$

在这里他第一次引入了分子的均方速度 $\langle v^2 \rangle$ 的概念，并且根据能量而不是动量的考虑，认识到它是同绝对温度 T 成正比的，从而改正了赫拉帕斯的错误。

这篇文章讨论的还有气体中的声速，定压比热同定容比热之比，以及热功当量的计算等问题。而且，在这篇文章以及 1851 年的摘要里，瓦特斯顿还导出了初步的能量均分定理和阿伏伽德罗的假设：“两种不同气体当达到压强和热的平衡时，其单位体积内的原子数目相等，并且每一颗原子的活力亦相等。”由此可见，初期气体动态理论的主要结果，都已经包括在他的工作里了。

有人猜测，瓦特斯顿后来之所以能够在《哲学杂志》上接连发表文章，主要是由于这份期刊的主编、光学专家布儒斯特(D.

Brewster,1781—1868)宽容的胸怀所致。无论如何,在1868年布儒斯特去世以后,再也见不到瓦特斯顿在任何刊物上正式发表的文章了。1878年瓦特斯顿还投了两篇稿子给皇家天文学会,都被拒绝了。几个月后,他便退出了他参加了达几十年之久的这个学会,变得更加孤单了。

1883年夏日的一个早晨,瓦特斯顿离开他在爱丁堡的寓所去海滨散步,此后再也没有任何人见到过他。一位孤独的天才就此消失了。

3.2　气体动态理论的发展

19世纪40年代正是能量守恒定律的发现和确立的关键时期。大家都知道焦耳(J. P. Joule,1818—1889)1845年发表的热功当量实验,为能量的转化和守恒的证实作出了卓越的贡献。热既然可以转化为别种形式的能量,它本身就不会是一种物质。这种形势显然有利于气体的动态理论而不利于热质说。



图3.3　焦耳(J. P. Joule,1818—1889)

1847年,焦耳在那篇著名的文章《论物质、活力和热》里,根据他的实验结果,下结论说"必须放弃热是一种物质的假说"。1848年,亦即是在赫拉帕斯出版了他的《数学物理学》一书的第二年,焦耳在曼彻斯特文哲学会的一次会议上做了一个报告。他采用了气体的动态理论,计算出在60°F的温度时,氢气分子的速度为6225英尺/秒(约合1897米/秒)。事实上,这项成果在很大程度上是赫拉帕斯工作的重复。但在焦耳在这篇文章里,亦进一步采用取气体的全部分子

中各有三分之一在相互垂直的三个方向上运动的模型，给他的气体压强公式确定了适当的数值因子，此外还初步计算了气体的定容比热。

焦耳的这一工作1851年在该学会的会刊上正式发表。但这个地方学术团体的聚会和刊物的影响实在有限，它没有起到多大的作用。而且，焦耳的数学修养亦不足以推进他的理论模型深入发展。1857年，由于克劳修斯的关注，这篇文章才在伦敦的《哲学杂志》上重新登载。看来上面提到的三位英国科学家的贡献，都没有在他们的祖国及时生根发芽。奇怪的是，甚至麦克斯韦后来的研究，也很少提到这几位同胞的工作。结果，在这方面的主要舞台就转移到欧洲大陆的德国去了。

克仑尼希(A. K. Krönig，1822—1879)是柏林的一所工科院校的一名教授，他的专长是化学，亦担任过一份综述性刊物《物理学进展》(*Fortschritte der Physik*)的主编，在学术界已经颇有名望。他在1856年发表了一篇短文《气体理论基础》，产生了比较大的影响，一度被认为是系统的气体动态理论的奠基之作。

其实，克仑尼希这篇文章的内容，包括气体定律的推导，分子速度和气体比热的讨论等等，都没有超过上面所讲过的三位先行者的工作。他关于分子只在三个相互垂直的方向上以相同的速度运动的假设，亦没有什么新的东西。不过在克仑尼希的文章里根本没有提到前人的贡献，显得好像全是自己独创似的。



图3.4 亥姆霍兹(H. von Helmholtz，1821—1894)

事实上，亥姆霍兹(H. von Helmholtz，1821—1894)1855年在《物理学进展》上发表的一篇有关“热的力学理论”的评述性文章里，已经明白地提到了瓦特斯顿的工作，并且指

出焦耳关于氢分子速度的计算，采用的是赫拉帕斯的方法。他所说的“热的力学理论”(mechanical theory of heat)是比气体动态理论含义较广的、一种用机械运动来解释包括了固体和液体的热现象的学说，或称“热动力学”(thermodynamics，这一名词后来指一门专门的学科“热力学”)。克仑尼希那时候正是这份刊物的主编，而且还为亥姆霍兹的文章加了一处注释，他不可能不注意到亥姆霍兹这篇文章的具体内容。并且，有人比较过克仑尼希的文章同瓦特斯顿 1851 年的报告摘要，发现二者是十分相似的。因此，克仑尼希工作的独创性，确实是值得怀疑的。

不过，我们还是应当说克仑尼希即使不是一位创始人，也以一位科学家的身份，在把热的力学理论向科学界介绍和推广的工作中起到了积极的作用。毕竟那几位先驱的工作并没有产生多大的影响。并且，克仑尼希在他的短文里讨论他的简单模型的缺点时指出：“即使是最平滑的器壁，它的表面也应该认为是凹凸不平的。所以，所有气体分子的运动方向都是完全不规则的，把它们全都计算出来是不可能的。但是，按照概率论的定律，它们也不是完全没有规律的。”这一点正给下一步的努力指明了方向。[5]

真正给气体动态理论打下坚实基础的是克劳修斯和麦克斯韦。德国物理学家克劳修斯(R. Clauxius，1822—1888)早在 1850 年就发表了建立热力学第二定律和熵的概念的奠基性文章。几年之后，他又在 1857 年发表了《论我们称之为热的那种运动的本性》一文。克劳修斯在这篇文章里说，他早就考虑过这方面的问题，受到了克仑尼希 1856 年文章的启发，就把自己的观点发表出来。克劳修斯在这



图 3.5　克劳修斯(R. Clauxius，1822—1888)

篇文章里的推导，基本上沿用了标准的气体动态理论方法，但是亦有改进。他主要考虑了气体分子实际上是以各种可能的不同方向互相碰撞以及同器壁撞击，计算出平均的效应，首次以精确的方法得出了气体压强公式

$$p = \frac{1}{3} nm\langle v^2 \rangle \propto T$$

式中的数值因子 1/3 是由对各个方向上的碰撞的统计平均求得，而不是像克仑尼希那样从过分简单的模型得出。这是概率的统计方法在物理学理论中的第一次严格的应用。这一进展有着深远的意义，它不限于气体问题的解决，而是为原子分子的微观状态同由它们组成的宏观物质的性质之间架设了一道桥梁，真正实现了古代原子论的核心思想。

克劳修斯在这篇文章里也计算了气体分子的运动速度。他得到的结果是，在 0℃ 的温度下，氧、氮和氢的气体分子的速度分别是 461，492 和 1844 米/秒，这些数据已经达到相当准确的程度。不过，在这项计算里，他假设了气体分子都以相同的速度运动，并没有做统计平均。这是因为，如果说分子的各种运动方向都是平等的，需要的只是对不同方向的简单相加或者积分的话，对它们运动速度的考虑就要复杂得多了。分子的运动速度不可能对各种取值都是机会均等的，那么它们采取了什么样的一种分布呢？这个问题要等到麦克斯韦才得以解决。

可是，即使是克劳修斯的这一初步的结果，亦引起了一场轩然大波。他所算出的分子每秒几百到一千多米那么高的运动速度，那时候是从未听闻过的，一时难以令人接受。1858 年，荷兰气象学家拜斯-巴洛特(C. H. D. Buys-Ballot，1817—1890)质疑说，如果气体分子真的以那么高的速度运动的话，不同的气体就会非常迅速地互相扩散而混合起来。然而，事实上例如把硫化氢或者氯气施放在房间的一个角落里，要等到几分钟之后才能在房间里

的另一个角落里嗅得到那些气体的气味。他说，根据气体动态理论，在这段时间里，那些气体的分子足以在房间里来回穿行千万次了。此外，像二氧化碳那样比空气重的气体，亦能够在一个敞口的容器里保存不短的一段时间而不会迅速跑掉，他认为亦是同分子的高速运动相违悖的。

克劳修斯认识到拜斯-巴洛特的批评，确实揭示了那时候发展起来的气体动态理论的不足之处。克劳修斯为此在 1858 年发表《论气体分子的平均自由程》一文来回答这个问题。他在这篇文章里指出，气体分子的实际运动并不是完全不受其他分子影响的自由运动，分子间的作用力使得它们在距离靠近时发生碰撞。因此，每一个分子都不能完全不受阻碍地在一条直线上运行一段很长的距离。其实，克劳修斯在 1849 年发表的、对于太阳光受到大气层的不同成分的反射的讨论中，已经运用了类似的观念。所以，实际上平均自由程这个概念的提出，在很大程度上得益于克劳修斯的早期研究。

为了估算气体分子的自由程、即在两次碰撞之间分子通过的路程，克劳修斯假定分子之间的力是一种短程力，只在有效半径范围内起作用，而分子之间的距离一般要大得多。他计算出一个分子在行进的每一步中与别的分子发生碰撞的概率，进一步便可以通过积分来求出分子能够不发生碰撞而走过的平均路程、即分子的平均自由程 l。克劳修斯的结果可以写成

$$l = \frac{3}{4\pi n\sigma^2}$$

式中的 n 是分子的空间密度，即单位空间中的分子数目，σ 是分子在碰撞中的有效作用半径，可以看做是分子大小的一种量度。我们也可以把上式改写为

$$\frac{l}{\sigma} = \frac{1/n}{\frac{4}{3}\pi\sigma^3}$$

这一结果表明，分子平均自由程同分子半径之比，恰好等于每一个分子平均所占活动空间同一个分子本身体积之比。

克劳修斯在这篇文章里引入平均自由程的观念，只是作为回答拜斯-巴洛特批评的一种说理性的论证，并没有把它同可观察的具体物理过程联系起来，因而还不能够确定平均自由程的长短。此外，在克劳修斯这篇文章的计算里，仍然假定各个分子所运动速度完全相同。所以，克劳修斯一方面的确首先在物理学里使用了精确的概率统计，起了一个好头；另一方面他的理论还是比较初步的，并没有达到统计方法的全面运用。

1855 年公布的剑桥第四届亚当斯征文奖的题目是土星光环的运动和稳定性问题。麦克斯韦(J. C. Maxwell，1831—1879)在其后的几年里集中研究了这个课题。原来，早在 1787 年拉普拉斯就把土星光环当做一整块固体来处理，研究过它的稳定条件。但是，那么宽的一块环体的内侧和外侧所受土星的吸引力存在着明显的差别，又要保持整体的转动，它的内部必定会产生巨大的应力，要保持稳定是很不容易的。麦克斯韦分别研究了刚性环、非刚性环或者流体环的稳定性，最后提出了一种由许多个卫星式的碎块组成的模型。在这项研究里，麦克斯韦已经开始对组成整体的大量成分运用了统计方法。[6]

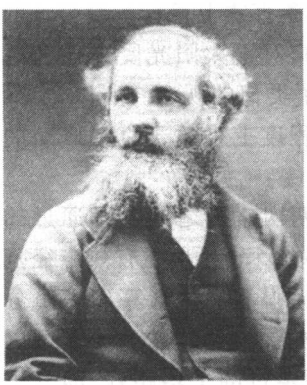


图 3.6 麦克斯韦(J. C. Maxwell，1831—1879)

麦克斯韦在研究土星光环的时候，曾经考虑到互相发生碰撞的大量物体会表现出一种什么样的规律性的问题，但一时无从下手。1859 年，正当他总结这方面的成果的时候，读到了克劳修斯新近发表的文章，顿时豁然开朗，很快就把他的研究重点之一转移

到气体的动态理论上来。可以说，在此后的两个十年里，麦克斯韦在统计物理学方面的重要工作，基本上是同他同样取得了划时代成就的电磁学研究齐头并进的。

1860 年，麦克斯韦发表了《气体动力学理论说明》一文，取得了突破性的进展。他在这篇文章里首先推导出分子速度的统计分布规律。他把气体分子看做是一些理想的弹性小球（刚球），通过互相碰撞而达到一种确定的速度分布。由于在平衡状态下没有一个优先的方向，速度分布函数必定与速度的方向无关，而只决定于速度的大小或者说决定于速度的平方。麦克斯韦进一步假设速度的三个互相垂直的分量是完全独立的。于是，运用因子化方法便容易得出高斯型的速度分布函数，其中对应着三个垂直分量的独立因子的相乘，表现为指数上的速度分量平方的相加，结果就得到我们今天所说的麦克斯韦速度分布函数。

找到了速度分布函数，就可以算出平均速率$\langle v\rangle$和均方速率$\langle v^2\rangle$，从而对平衡态问题从头进行精确的处理，不再像在过去那样只能假定划一的分子速度了。更重要的是，麦克斯韦由此给出了解决非平衡态问题的普遍方法。他自己首先用新的方法计算出气体分子的平均自由程

$$l=\frac{1}{\sqrt{2}\pi n\sigma^2}$$

这个结果只在数值系数上略小于克劳修斯的公式。然后，麦克斯韦首次运用平均自由程的机制，处理了气体的输运过程。他首先推导出了气体的内摩擦（黏性）系数

$$\mu=\frac{1}{3}\rho l\langle v\rangle$$

式中的ρ是气体的质量密度。运用斯托克斯（G. Stokes，1819—1903）测量得出的μ/ρ值，麦克斯韦算出在室温和标准大气压下，空气分子的平均自由程合 5.6×10^{-8} 米，已经达到了正确的数

量级。

由于平均自由程是同质量密度 ρ 或者分子数密度 n 成反比的，因此麦克斯韦求得的黏性系数 μ 是同气体密度无关的。这一乍看起来令人惊奇的结论其实不难理解。因为当气体密度增加时，分子碰撞即交换动量的机会增加了；与此同时，分子的平均自由程缩短了，这意味着在非平衡状态下，每次碰撞所携带的动量差额减小了。这两种效应的效果正好互相抵消。1866 年，麦克斯韦夫妇亲自做实验证实了这一规律。

可是，由于气体分子平均速度 $\langle v\rangle$ 正比于温度的平方根 $\sqrt{T}$，所以麦克斯韦的黏性系数 μ 也是正比于 $\sqrt{T}$ 的。然而，实验的结果倾向于 μ 正比于 T 的关系。在麦克斯韦 1867 年发表的一篇论文里，可以看到他为了克服这一困难，舍弃了分子的刚球模型，发现黏性系数对温度的依赖关系取决于分子之间作用力的形式，情况看来不像原来想象的那么简单。后来，麦克斯韦尝试过与距离的五次方成反比的分子力模型，还研究过扩散和热传导等其他输运过程的理论，这里不再一一细说。

另一方面，麦克斯韦觉得他原来推导速度分布函数所采用的速度的三个垂直分量互相独立的假设“靠不住”，在 1867 年发表的另一篇文章里重新进行推导。在新的推导里从两体碰撞过程出发，只运用了动能守恒和细致平衡的条件，就能推出原来的速度分布函数。所谓细致平衡，指的是每一个个别的碰撞过程中两个分子所发生的速度变化，必定由相应的一个逆过程所发生的相反的速度变化相抵消，从而保证在平衡状态下保持总体的速度分布不改变。这样，就把麦克斯韦的速度分布律建立在一个比较合理的基础之上。1872 年，玻尔兹曼证明了 H 定理，并且根据这一定理证明了分子的速度分布最后达到平衡时趋于麦克斯韦分布，最终为这一分布律给出了坚实的理论依据。

3.3　玻尔兹曼和统计物理学的建立

1865 年，奥地利物理学家和化学家洛施密特(J. Loschmidt，1821—1895)联合运用麦克斯韦的平均自由程公式和黏性系数公式，推导出气体分子的大小。我们在这里用一种简化的推理来说明这个问题。上面已经说过，麦克斯韦已经能够用测量到的气体黏性系数，计算出空气分子的平均自由程。另一方面，在克劳修斯的公式里，分子平均自由程同分子半径之比，正好等于每一个分子平均所占活动空间同一个分子本身体积之比。而麦克斯韦的平均自由程公式，同克劳修斯的结果只在数值因子上稍有不同。现在，洛施密特巧妙地指出，因为可以认为液态中的各个分子是紧挨在一起的，那么同一种物质在液态同气态时的质量密度之比，就等于气体中每个分子所占活动空间同分子本身大小的比值。洛施密特由此推算出“空气分子”的直径约为 10^{-9} 米。这一数值大约比它的现代值大四倍，不仅优于在此之前所有估算的结果，亦是第一次不靠粗略的估计而是以精确的公式为基础的推导。

从洛施密特这篇文章里给出的公式，还可以推算出在标准状态(0℃，1 大气压)下，1 立方厘米的理想气体所含有的分子数目：

$$N_L \approx 2 \times 10^{18}$$

虽然实际上在洛施密特的文章里并没有明显给出这一结果，但后来人们还是把这个常数称为“洛施密特数”，它的现代值约为 2.687×10^{19}。洛施密特数乘以 1 摩尔理想气体的标准状态下的体积(约为 $2.241 \times 10^4\ \mathrm{cm}^3$)，就是后来得到广泛使用的阿伏伽德罗常数 N_A。

洛施密特在这篇文章里，既求出了分子的尺寸，又给出了计算分子数目的方法，为原子分子概念的具体化迈出了重要的一步。原子和分子不再是一些假想的抽象符号，它们的质量、速度、大小

和数目都是可以确定的了。因而，乐观的原子论者们认为，已经可以把原子和分子看做是组成一切物质的实体了。

在洛施密特任职的维也纳大学里，有一位年轻的同事玻尔兹曼（L. Boltzmann，1844—1906），对这方面的问题亦感到强烈的兴趣。1868年，玻尔兹曼发表《关于运动质点之间动能平衡的研究》一文，把麦克斯韦的速度分布律推广到了保守力场中的情况，在原来速度分布函数的指数因子里的速度平方指数之外，加上势能项，使这一因子得以写成现在我们使用的形式



图 3.7 玻尔兹曼(L. Boltzmann，1844—1906)

$$\exp\left[-\frac{1}{kT}\left(\frac{1}{2}mv^2+V(x)\right)\right]$$

式中的 k 称为玻尔兹曼常数，以纪念他的贡献。相应的速度分布函数，一般就叫做麦克斯韦-玻尔兹曼分布，而 kT 则成为粒子热运动能量大小的量度。

在同一篇文章里，玻尔兹曼还使用一种独特的方法推导出麦克斯韦分布。他假定由有限个分子组成的系统的总能量分配给各个分子，遵循着所有的能量组合都是机会均等的原则。在计算系统能量的分配时，玻尔兹曼把本来是连续变量的总能量划分为相等的许多个小单元，把它们当做可以逐个计数的分立对象来处理，以便于运用代数学里的组合计算。结果，玻尔兹曼得出一种复杂的能量分配公式，最后再取每份能量的大小趋于零的极限，恢复到连续的变化，便可以得出麦克斯韦分布。

这种计算方案体现了玻尔兹曼的研究风格，那就是专门着重于概率方法的使用。此外，这种在计算过程中把能量划分为一个个小单元的做法，亦在他日后的工作中继续有所应用，并且曾经对

普朗克的量子假说起到过关键的启发作用。

玻尔兹曼 1872 年发表的输运过程理论，亦是从麦克斯韦的有关研究成果出发的。事实上，包括热传导、扩散和黏性现象在内的几种经典输运过程，都是系统处在非平衡状态下发生的过程。对这一类过程仅仅运用只适用于平衡状态的麦克斯韦速度分布，在逻辑上是有缺陷的。所以，麦克斯韦对于输运过程的处理，只能看成是一种初步的理论。玻尔兹曼在这篇文章里，把速度分布函数看做是随空间坐标 $\boldsymbol{r}$ 和时间 t 而变化的函数 $f(\boldsymbol{r},v,t)$，推导出它所满足的方程

$$\frac{\partial f}{\partial t}+u\frac{\partial f}{\partial x}+v\frac{\partial f}{\partial y}+w\frac{\partial f}{\partial z}+X\frac{\partial f}{\partial u}+Y\frac{\partial f}{\partial v}+Z\frac{\partial f}{\partial w}$$
$$=\iint(f'f'_1-ff_1)\mathrm{d}\omega_1\Lambda\mathrm{d}\Omega$$

方程左方包含分布函数随时间、空间和速度的变化率，右方描写在分子之间每一次碰撞和相应逆碰撞过程对于分布函数的影响。分布函数本身是一个宏观量，所以在方程左方出现对它的微分；每一次碰撞是微观过程，所以在方程右方出现对它们的积分。因此，这一道形式特别的方程，被叫做玻尔兹曼积分微分方程。

玻尔兹曼积分微分方程是严格处理输运过程的理论基础，虽然对它求解决非易事，玻尔兹曼自己也仅仅限于对个别特殊情况给出方程的解。今天，玻尔兹曼方程的精确解和近似解已经广泛应用于流体、等离子体和中子输运等现代研究课题。

进一步的问题是，既然玻尔兹曼方程描写的是速度分布函数的变化，就应当亦可以推出在什么条件下，能够从非平衡状态下的分布函数达到平衡状态下的分布。事实上，如果我们把麦克斯韦分布函数代入方程，便会发现只剩下左方描写它的时间变化率的第一项，方程的其余各项或者消失或者互相抵消。亦即是说，麦克斯韦分布是一种稳定而不再变化的分布，这样就能够得到在平衡

状态下必定趋于麦克斯韦分布的结论。所以我们说，玻尔兹曼的工作为麦克斯韦分布提供了一个最坚实的理论基础。

不过，玻尔兹曼没有采取这种简单的做法。他在这篇文章里定义了一个函数

$$E=\int_0^{\infty} f(x,t)\left\{\ln\left[\frac{f(x,t)}{\sqrt{x}}\right]-1\right\}\mathrm{d}x$$

证明 E 函数总是随时间减小的，除非它达到了麦克斯韦分布的形式而不再变化。玻尔兹曼还联系到他早年对热力学的研究成果，证明在达到了麦克斯韦分布的平衡状态下，E 函数实质上就是热力学熵（只差一个数值因子），这样就把 E 函数的不增加和熵的不减小这两个性质相同的命题联系起来，并且把热力学里对平衡态定义的熵，推广到非平衡状态。在玻尔兹曼后来的工作中，把这个 E 函数改称为 H 函数，并且做了一些改进，以上的命题就是著名的“H 定理”的原型。

玻尔兹曼的以上结果刚一问世，就遭到了严厉的质问。例如，洛施密特在 1876 年著文批评说 H 定理所显示的热学过程的不可逆性，是同作为玻尔兹曼理论基础的力学过程的可逆性相矛盾的。洛施密特指出，假设在某一时刻，系统中所有粒子的速度方向都反过来，按照力学的演化规律，系统就会在将来的另一时刻回到原先 H 取较大值的状态。

为了回答被称为“可逆佯谬”的这一责难，玻尔兹曼于 1877 年发表了《热的力学理论的第二定律和概率计算或与热平衡有关的诸定理》等文章，指出每一种可能的微观运动状态都具有一份相同的概率，而系统的不同宏观状态对应着各种组合方式不同的微观状态，这些微观状态的数目 W 就是热力学概率。那么，系统的演进方向就是从 W 较小的宏观状态趋向 W 较大的状态，最后达到 W 最大的状态。当系统所含粒子的数目足够多时，按相反方向演进的可能性实际上等于零。从直观上容易明白，例如一盒子均匀

分布的气体自发地收缩到一个较小的体积而让其余部分空出的过程，尽管理论上的可能性不等于零而等于一个很小很小的数，但在实际上是不会发生的。

玻尔兹曼就这样回答了洛施密特的批评，并且首次揭示了由大量粒子组成的系统的统计规律，具有与个别粒子服从的力学规律不同的新性质。而且，在这一工作里，玻尔兹曼运用概率方法进一步论证了，系统处在某一状态的熵 S，同这一宏观状态所对应的概率 W 的对数成正比，即同所对应的微观状态的数目的对数成正比。虽然玻尔兹曼没有给出相应的表达式，但后来普朗克补上了这个称为玻尔兹曼常数的因子 k，得出了热力学量同统计概率相联系的等式

$$S = k\ln W$$

而且，在这篇文章的推导过程里，玻尔兹曼为了便于进行概率计算，又一次运用了将能量划分为一个个有限大小的分立单元，最后再将得到的结果取连续极限的做法。

于是，玻尔兹曼就这样以原子学说的思想为基础，以经典力学的规律为依据，通过概率统计方法，从微观机制给出了对于宏观热现象全方位的解释，从而建立了统计物理学这一门学科里最早得到发展和应用最广泛的分支——统计力学。当然，起初讨论的只是比较简单的问题，例如单原子分子的气体，后来才扩展到复杂的系统。无论如何，统计力学的基本理论框架已经在玻尔兹曼手里树立起来了。[6]

从以上的描述看来，原子学说在物理学里正取得节节胜利，似乎全面成功已是指日可待了。然而，事情没有那么简单，物理学理论的发展既不是径情直遂的，亦不是只沿着一个方向前进的。大家知道，19 世纪中叶也是电磁场理论趋于成熟的时期，而这方面的进展一时未能纳入原子论的轨道。特别是，在同一时期建立的能量守恒定律和热力学唯象理论的成功运用，更使得一部分科学

家认为最要紧的不是探究物质的构造，而是查明不同形式的能量之间的转化和守恒，以及能量是怎样从利用率较高的形态降解到利用率较低的形态，最后全部耗散为热的变化过程。

在这方面的一位突出的代表是拉脱维亚化学家奥斯特华尔德（W. Ostwald，1853—1932）。他主张，只有能量才是基本的物理实在，“要把关于各种自然现象的定律还原为与之对应的各种能量形态的定律。”在奥斯特华尔德看来，一切物理过程都不外是能量的积聚和弥散、传递和消耗，在此之外不必考虑什么物质的构造。他甚至曾经把原子论说成是一种“不能直接用实验证实其结论”的“有害的假说”。



图 3.8 奥斯特华尔德（W. Ostwald，1853—1932）

奥斯特华尔德把他的学说命名为 energetics，旧译“唯能论”，近来亦有人译成“能量学”[8]。我们觉得，“唯能论”这个名称过于绝对，听起来好像一个哲学名词似的，在科学上一般不使用这一类称谓。“能量学”则容易被误解为以能量为研究对象的一门学科，其实它只是侧重于一个片面的学说。我们建议把 energetics 定名为“能量说”。历史上，伽伐尼（L. Galvani，1737—1798）在青蛙的肢体上发现电流，因而提出“动物电说”；伏打（A. Volta，1745—1827）用不同金属的堆叠产生电流，因而提出“接触电说”；后来弄清楚了这些现象本质上都同化学反应有关，最后统一于“化学电说”。我们认为，一方面，奥斯特华尔德的主张亦只是一种过渡性的科学学说，叫做“能量说”比较妥当；另一方面，“能量学”和“唯能论”这两个名称都含有或褒或贬的含义，称为“能量说”可能是一种比较客观的中性选择。

原子论的另一位激烈的反对者是著名的物理学家和哲学家马

赫，一般把他在这方面的观点归属于现象论。马赫主张，“每个物理学概念仅仅是……感性要素的一定形式的联系。”他评论说，“原子不能被感官察觉，因而只是思想的东西。”“原子论在物理学中的地位正像数学中的辅助概念一样，只是便于在精神上描述事实的一种数学模型。”马赫还认为“原子具有与迄今在物体中观察到的特性绝对相矛盾的性质”，因而拒绝接受原子概念。由此可见，马赫反对原子论的依据，既有哲学上的，亦有物理学上的，我们不在这里详细分析讨论了(参看文献[9]、[10])。

为统计物理学的创立做出了卓越贡献的玻尔兹曼，为坚决捍卫原子论而进行了一系列的争辩。然而，玻尔兹曼又仍然保留着强烈的机械论自然观，因此不可避免地存在着严重的局限性。例如，他说过：“力学是整个理论物理学赖以建立的基础，所有其他科学分支都是从它那里产生出来的。”总的说来，在那个时期里，化学家们大都喜欢使用作为一种理论方法的原子分子学说，而物理学家们则多少对原子分子的真实存在抱着怀疑态度。况且，到了 19 世纪后期，已经在固体和气体的比热和黑体辐射等问题上发现了经典统计物理学所不能解释的现象。所以，当时对原子论的批评不是完全没有道理的。此外，要承认原子和分子是组成物质的实体，还需要对什么是实体或者什么是实在，在观念上有新的理解。那个时代的原子犹如当今的夸克，并不是可以直接观察到的东西(参看文献[10]，97 页)。但是，今天的物理学家们大都毫不犹豫地把夸克当做组成物质的实体来进行研究，很少关心其中哲学观念的转变，时代毕竟变了。

在那样的背景下，玻尔兹曼曾经在 1898 年出版的《气体理论讲义》里写道：“我意识到，仅仅一个人孤军奋战，不足以抵挡时代的潮流。但我仍然尽力而为，好使当气体理论再度复兴时，将不会有很多的内容需要重新发现。”出人意料的是，玻尔兹曼竟等不及这一天的到来，于 1906 年 9 月在当时属于奥地利的海滨旅游胜

地、的里雅斯特地区的杜伊诺自缢身亡。关于他走向绝路的真正原因，人们多所猜测，至今仍是一个未解之谜。[11]

虽然，玻尔兹曼同奥斯特华尔德和马赫关于原子学说的争论，基本上属于科学观念的分歧，而不是哲学立场上的对立。[9,10] 而且，尽管他们之间存在着严重的分歧意见，私下里却都是好朋友。然而，自古以来原子论的命运就同唯物主义的兴衰紧密地联系在一起，这一场新的争论自然也不能例外。于是，一些过分热心的作者总是喜欢给玻尔兹曼戴上一顶“唯物论者”的桂冠，宣传他是如何同“唯心论者”英勇战斗并且受尽了打击迫害而轻生的。

其实，玻尔兹曼晚年的心境是很复杂的。他曾经因为患有精神方面的疾病而进行过治疗，还时常抱有害怕自己丧失讲课能力的恐惧心理。再说，科学理论的证实需要有一定的条件和时机，不是单凭个人坚持就可以获胜的。最后，我们了解到玻尔兹曼的一位曾孙亦在二十年前自绝。此外，亦是自行结束生命的著名作家海明威(E. Hemingway, 1899—1961)，他的一位孙女也在十年前被发现服用过量药物而身亡。由于类似的情况屡屡出现，于是就有某些家族的成员身上存在着“自杀基因”，因而容易自寻短见的说法。

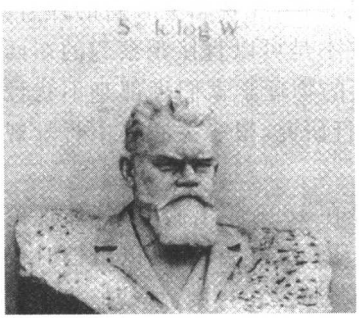


图 3.9 玻尔兹曼之墓

可是，即使是有精神疾患也好，或者还有自杀基因也好，玻尔兹曼做出最后决定的时候总有一个具体的诱因。我们猜想，那可能涉及个人的隐私，不便公诸于众，我们是永远无从知晓了。玻尔兹曼在他毕生为之奋斗不息的原子学说正要被物理学界广泛接受的关键时刻，以如此令人痛心的方式弃世，不能不说是科学史中的一大悲剧。然而，玻尔兹曼人

虽然不在了，镌刻在他墓碑上的那道公式 $S=k\log W$ 必将永存下去。[12]

3.4　分子大小和布朗运动

统计物理学里的基本方法是统计平均，运用玻尔兹曼的概率方法不仅可以算出系统宏观物理量的平均值，而且还能够算出那些宏观量围绕平均值的涨落，因为涨落公式涉及的不外是一些不同阶次的矩的平均值的计算。例如，x 的涨落值，即 x 对其平均值 $\langle x\rangle$ 的方均根偏差的平方

$$\langle(x-\langle x\rangle)^2\rangle=\langle x^2\rangle-\langle x\rangle^2$$

1902 年，美国物理学家吉布斯(J. W. Gibbs，1839—1903)在他的《统计力学基本原理》一书中，又把麦克斯韦和玻尔兹曼所创立的概率方法发展成普遍的系综方法，将原来对微观状态的平均改造为对适当系综的平均。

伴随着统计物理学的发展，物理学家们沿着多种途径对分子的大小进行了不懈的研究。前面提到，1858 年瓦特斯顿曾经估算水分子尺寸为 1.2×10^{-8} 厘米。他是运用毛细作用与潜热的关系，估计出分子层的厚度而求出这一结果的。事实上，杨(T. Young，1773—1829)早在 1816 年就得出过相近的尺寸，他是从液态表面张力的效应估计分子力的力程而求得这一结果的。我们亦已经讲过，1865 年洛施密特运用气体动态理论的方法计算出“空气分子”的直径为 10^{-7} 厘米，虽然这个结果偏大，但它的确是第一次对分子大小的有确凿理论根据的计算。

在这之后的几年内，陆续有人以不同的方法估算分子的大小。1870 年，威廉·汤姆孙(W. Thomson，1824—1907，1892 年晋封为开尔文男爵)著文评述了运用光的色散、金属的接触电势差、液体薄膜的毛细作用和气体分子平均自由程等四种不同方法对分子

直径的计算，归纳出在普通液体和透明或者看起来不透明的固体中，相邻分子中心的平均距离在$(0.2\sim1)\times10^{-8}$厘米的范围内，而气体分子的直径亦不会小于上述下限的结论。

1873年，麦克斯韦重新研究他的扩散理论，并且同新的实验数据做比较，得出氢与二氧化碳的分子直径为$(5.8\sim9.3)\times10^{-8}$厘米，它们的质量则为$(46\sim1012)\times10^{-25}$克的数据，达到了正确的数量级。

同年，荷兰物理学家范德瓦耳斯(J. D. van der Waals，1837—1923)通过一种简单的模型，把理想气体状态方程 $pV=RT$ 修改为第一个正式的非理想气体状态方程

$$\left(p+\frac{a}{V^2}\right)(V-b)=RT$$

式中的参数 b 明显代表气体分子本身占据有限体积的影响。将范德瓦耳斯的公式同当时已经达到相当精确程度的实验数据做比较，就能够算出气体分子的大小。随后对于空气和氢气估算的分子直径的分布在$(1.5\sim5)\times10^{-8}$厘米的范围内，比运用气体动态理论之外的方法得到的结果都好。

我们在前面提到过，在伯努利原来的气体压强公式里，已经考虑了气体分子有限大小的影响。不过，为了简化叙述，我们在那里只引述了他最后的近似结果。例如，伯努利起初在公式里表示的气体分子在容器中的活动范围，并不是容器的总宽度 D，而是扣除了分子直径 d 的 $D-d$。那么，假如当时想得到并且有可资利用的实验数据的话，本来早在一百多年前就有可能通过类似的方法估算气体分子的大小。

在19世纪末年，包括克劳修斯在内的一些物理学家，仍然不倦地运用气体动态理论和液体表面现象以及电学和光学的效应来确定分子的大小，这里不再一一细说。

现在让我们把历史这部巨著翻到20世纪初年，属于这个世纪

的一位科学大师开始登场，他就是日后举世闻名的爱因斯坦(A. Einstein，1879—1955)。1901 年，刚刚从瑞士苏黎世联邦工业大学毕业而还没有找到正式工作的爱因斯坦，为了申请博士学位而向苏黎世大学提交了一篇学位论文。[13,14]但是，第二年爱因斯坦又把这篇不成熟的文稿撤回了。三年之后，已经在伯尔尼专利局担任技术员的爱因斯坦于 1905 年 4 月 30 日重新完成了他的博士论文，做的题目正是关于测定分子大小的理论。这篇论文于 7 月 20 日再次呈送苏黎世大学，并于 7 月 27 日通过评审，终于取得了博士学位。



图 3.10　爱因斯坦(A. Einstein，1879—1955)

另一方面，爱因斯坦于 1905 年 8 月 19 日将他已经通过了的博士论文的一份修改稿投送给《物理学记事》(*Annalen der Physik*)，并于 1906 年 2 月得以发表。这篇题为“分子大小的新测定法”的学位论文的正式发表，比他关于布朗运动理论的那篇著名文章要晚半年，并且名气也没有那么大。但是，实际上关于布朗运动的那篇文章是爱因斯坦在完成博士论文后接着赶写出来，并且于 11 天之后、即 1905 年 5 月 11 日发送出去的，而且两篇文章在物理思想和处理方法上亦存在着重要的传承关系。可以这样说，爱因斯坦关于布朗运动的研究成果，是建筑在他对分子之间相互作用的多年理论钻研的基础之上的。并且，这两项研究都是对当时在物理学里确立原子学说的重要贡献。

事实上，爱因斯坦先后在 1901 年和 1902 年最初两篇正式发表的学术论文，都是通过考察分子力对液体中不同的可观察现象的影响来研究分子力的性质。其中第一篇的题目是“从毛细现象得出的结论”，第二篇是“关于金属及其盐的全离解溶液的势差的

热力学理论和研究分子力的一种电学方法”。[15]由此可见，爱因斯坦在那几年里专注的研究方向之一，正是液体中的分子力所引起的各种效应。

爱因斯坦在他的博士论文里，把稀薄溶液中的溶质分子，看成是悬浮在液体中的一些球形微粒。他综合运用经典流体动力学的纳维-斯托克斯方程以及溶质微粒的热力学和动力学平衡条件，处理了悬浮微粒的运动同液体性质的相互影响。在溶质分子的直径比溶剂分子直径大得多的情况下，研究了这种溶液的内摩擦过程和溶质的扩散过程，并且应用于糖的稀薄水溶液。在推导过程中还运用到关于流体渗透压的范特霍夫定律和关于小球状物体在黏性流体中下落的斯托克斯公式所给出的液体的不同参数之间的关系。

在爱因斯坦最后算出的两个理论公式中，溶剂在添加溶质之后的黏性系数 η 以及溶质在溶液中的扩散系数 D 都只分别决定于“每克分子实际分子的数目 N”(即阿伏伽德罗常数)和“该分子的流体动力学有效半径”P 这两个未知量。于是就能够运用当时已经可以查得到的糖的水溶液的有关实验数据，从这两道公式解出 N 和 P。他在原来文章末尾给出的结果是：

$$P = 9.9 \times 10^{-8}\ \text{cm}$$

$$N = 2.1 \times 10^{23}$$

虽然这里得到的 N 的数量级是正确的，但是其数值只约为正确值的三分之一。在这篇文章发表的时候爱因斯坦加了一段“补遗”，依据新版的《物理化学表册》，将结果调整为

$$P = 0.78 \times 10^{-6}\ \text{mm}$$

$$N = 4.15 \times 10^{23}$$

但 N 的数值仍然不能令人满意。原来，爱因斯坦在这篇文章里推出的黏性系数公式有一项的数值因子出了错。直到 1911 年，爱因斯坦才在查清错误之后发表了更正，重新计算的 N 值是 6.56×10^{23}，终于接近了从气体动态理论和黑体辐射得出的数值。

从以上的简单介绍里已经可以看出，爱因斯坦的这项研究同布朗运动有多么紧密的联系了。因为，布朗运动指的正是在液体中的悬浮粒子的一种不规则运动。

正像在被光束照射着的空气中会看到尘埃微粒在作不规则的运动一样，在液体中的悬浮微粒所做的不规则运动也应该很早就被人们观察到了。然而，首先对这种现象进行认真研究的是英国的一位植物学家布朗(R. Brown, 1773—1858)。他在 1828 年出版了一本小册子《简述 1827 年 6,7,8 月对于植物花粉所含微粒的显微镜观察，以及对于有机和无机物体中活动分子的普遍存在的观察》，叙述了他的发现。[16, 17]

布朗首先取下一种植物的花粉颗粒浸在水里，在显微镜下对它们的不规则运动进行频繁的反复观察，得出这样的结论："这种运动既不是由液体内的对流所引起，亦不是由液体的逐渐蒸发所引起，而是属于微粒本身的运动。"

布朗在对从其他活体植物上取下来的花粉微粒进行观察并且得到同样的结论之后，为了检验这种运动是否一种生命现象，他进一步观察从干枯的植物甚至存放了上百年之久的植物标本的花粉，以及把植物的其他部分捣碎而得到的微粒，都得到相同的结果。然后，布朗再观察磨碎了的树脂和煤灰等有机物质，甚至植物化石的粉末，最后是玻璃和岩石等无机物料的粉末，亦观察到了同样的现象，从而证明了这种运动不是一种生命现象。

布朗的微粒表现出的恒久不息的骚动引起了各种怀疑和争论。开始有人曾经试图用从光的照射到液体蒸发，从毛细作用到温度差异等多种不同的机制来说明这种现象，都没能给出令人满意的解释。与此同时，在各个实验室里进一步的研究工作表明，布朗运动随着悬浮微粒的质量密度和几何尺寸的减小而加剧，亦随着液体黏性性的减小和温度的增加而加剧。布朗微粒的典型半径是微米级的，太大的颗粒行动迟缓，太小了又不容易跟踪观察。

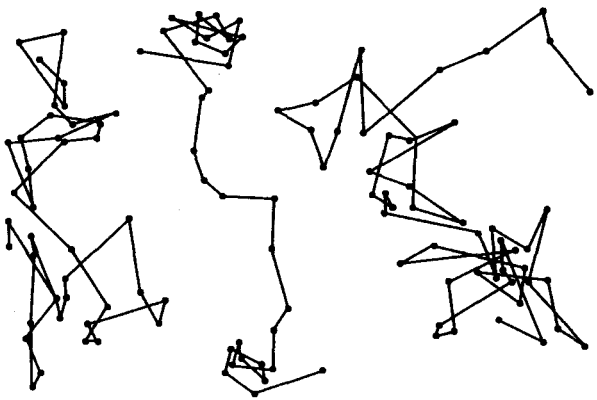


图 3.11 三个布朗微粒的运动，每隔一段相等时间间隔的记录

在气体动态理论和统计物理学兴起之后，人们自然会开始考虑液体分子的热运动同布朗微粒的曲折运动之间有什么样的联系，试图在液体的内部找原因。但是，简单地把布朗的微粒当做一个个巨大的分子，从能量均分定理求得的速度约为 1 厘米/秒，远远高出实际观察到的移动速度。

1877 年，比利时物理学家德耳索(J. J. Delsaux)最早正确地指出，布朗运动是悬浮微粒受到周围液体分子的不平衡的碰撞而引起的运动。但是，这一建议在 1879 年受到瑞士细胞学家内格里(C. von Naegeli, 1817—1891)的反驳，内格里错误地认为悬浮微粒在每次转折时只受到一个液体分子的冲击，由于双方质量的悬殊，布朗微粒不可能从那种碰撞中获得可以观察到的速度改变。1888 年，对布朗运动做过一系列精密实验研究的法国物理学家高伊(L.-G. Gouy, 1854—1926)进一步提出，因为在液体内分子会以一种成群结队的方式运动，因此对悬浮微粒的每一次个别的冲击，都会是由于大量分子同时作用的结果。不过他亦意识到，单纯用热力学的观点来理解布朗运动，存在着根本性的困难。

在这种情况下，亦有些科学家断言神秘的布朗运动违反了能量守恒或者热力学第二定律的原理。例如，庞加莱(J. H. Poincaré，1854—1912)迟至1904年还在一次演讲中把对布朗运动解释上的困难当做"数学物理学当今的危机"的一个重要项目。他说："我们在眼皮底下看到，运动通过摩擦变成了热，热又反过来变成运动，这就与卡诺原理相矛盾。"[18]

实际上，布朗微粒在液体中所受周围液体分子的碰撞是非常频繁的，在典型的情况下每秒约有10^{21}次。所以，我们不可能实时监测微粒的运动，实际上观察到的只是在宏观短的一段时间间隔内，把瞬息万变的运动抹平了的一种剩余的平均效应。所以，布朗运动实质上不是一种直接的热运动现象，而是液体分子热运动的一种间接反映。

爱因斯坦正是在这样扑朔迷离的背景下开始他对于布朗运动的理论研究的[19,20]。在以上所说他在1905年发表的关于布朗运动的第一篇题为"热的动态理论所要求的悬浮在静止流体中的微粒的运动"的文章里，爱因斯坦先是通过统计物理学的方法，在相同的前提下重新推导了在他的博士论文里已经得出的扩散系数D的公式。然后，他假设溶液中布朗微粒的密度分布函数满足系数为D的扩散方程。从这个方程不难求出布朗微粒的位移具有高斯型密度函数的解，亦即是一种典型的随机分布。最后，也是最关键的一步，爱因斯坦没有去关注布朗微粒的瞬时位移，而是算出经过一段时间间隔t之后，半径为a的悬浮微粒的均方位移

$$\langle x^2\rangle = 2Dt = \frac{RT}{3\pi Na\eta}t$$

这就是爱因斯坦关于布朗运动得到的最后结果。这是第一次将一种微观粒子运动的均方涨落同一种由黏性参数表征的宏观耗散效应结合起来运用于同一层次的现象而得到的划时代贡献。他在文章的最后指出，利用这个公式，亦可以从已知的其他各个参数

测定阿伏伽德罗常数 N。

事实上，写成这篇关于布朗运动的文章之前三个月（即 1905 年 3 月 18 日）提交的那篇以提出光量子假设而闻名的文章里，爱因斯坦已经提出过一种利用黑体辐射的长波极限来确定阿伏伽德罗常数 N 的方法，并且算出了不错的数值

$$N = 6.17 \times 10^{23}$$

在短短的两个月之内，爱因斯坦竟提出了三种测定阿伏伽德罗常数的不同方法，可见他对这个问题的重视程度了。

爱因斯坦在这之后的几年内，还接着写过几篇深入讨论布朗运动的论文。他在 1915 年回顾说：布朗运动理论“之所以重要是因为它允许精确地计算 N”；1917 年他又写道：“由于对布朗运动本质的理解，所有对热力学定律的玻尔兹曼解释的正确性的疑虑，一下子都消失了。”

在叙述有关实验工作的进展之前，我们先交代一下布朗运动理论工作的一些初期发展。

第一，爱因斯坦在上述第一篇文章里作了这样的假定：“每一单个粒子所进行的运动，同其他一切粒子的运动都是无关的；同一种粒子在各个不同的时间间隔中的运动，都必须被看做是相互独立的过程，只要我们设想所选取的这些时间间隔不是太短的就行了。”这里明显地说出了马尔科夫链的特征，那是 1906 年在俄国数学家马尔科夫（A. Markov，1856—1922）的文章里提出来的。于是，爱因斯坦把单粒子的随机行走同多粒子的扩散过程建立起联系的这项研究，就可以看做是马尔科夫过程在物理学理论上的一次提前运用。

事实上，这也是随机过程在物理学理论里的最早应用之一。如上所述，布朗运动理论研究的是随机位移的均方值，同原来的统计物理学里计算的涨落在表达式上是一致的。但是，布朗运动理论做的不是以概率计算为基础的统计平均，亦不是对系综的平均，

实际上是一种别开生面的统计物理学分支。在下一章里我们将讲到，在同一年里，随机过程理论亦在对于放射性衰变规律的分析中获得成功的应用。

第二，1906 年，波兰物理学家斯莫鲁绰夫斯基(M. Smoluchowski，1812—1917)亦完成了同爱因斯坦类似的关于布朗运动的理论工作。在后来的几年里，他们两人又先后对有相近物理机制的临界乳光现象进行过成功的研究。爱因斯坦并且在 1910 年发表的有关工作中，找到了他发现的测定 N 的最后一种方法。

第三，法国物理学家郎之万(P. Langevin，1872—1946)在 1908 年建立了具有普遍意义的、描写随机涨落的动力学方程，其中除了含有与粒子速度的负值成比例的黏性项之外，还加上了随机力的一项。后来的布朗运动公式，多由郎之万方程导出，不需要再重复爱因斯坦当年对涉及到的各种物理效应的未必完全准确的讨论。



图 3.12　郎之万(P. Langevin，1872—1946)

爱因斯坦和斯莫鲁绰夫斯基的理论文章发表之后，实验物理学家们纷纷运用已经可以得到的新的仪器和技术，对布朗运动的规律进行研究。其中做得最好的是法国物理学家佩兰(J. B. Perrin，1870—1942)，他在 1908 年发表的一批工作里，不仅精确地验证了爱因斯坦的各项理论预测，而且亦成功地测定了阿伏伽德罗常数 N。

到了 1909 年，从几种截然不同的方法测定的阿伏伽德罗常数 N，已经得到了 $(6\sim9)\times10^{23}$ 那样相当集中的结果。佩兰在这一年里总结说："我认为，一个不带任何偏见的头脑，在考虑趋于如此相同结果的那些极端分散的现象时，不可能不留下强烈的印象；并

且我还认为，今后很难再靠理性的论证来为对分子假说的敌视态度辩护了。”

面对着这样的形势，原来对立面的领头人奥斯特华尔德也不得不放弃了反对原子论的立场。1908 年 11 月，他在为他的新版《物理化学基础》写的导言里谈到布朗运动时候说，新近的结果已经“使得即使是小心谨慎的科学家，也能够谈论充满着空间的物质的原子组成的实验证据了。”

至于马赫的情况就要复杂些。有一位目击者报道说，当 1903 年马赫有一次在实验室里看到了荧光屏上显示出受到 α 粒子撞击而发出的闪烁时曾经说过：“现在我相信原子的存在了。”但是，马赫后来在 1913 年为他的《物理光学原理》一书写的序言里，仍然坚持反对原子论的态度。这就主要不是科学的说理，而只是反映了他的哲学信念了。

最后，我们引用佩兰 1914 年出版的《原子》一书中的一段关于原子和分子的实在性的评论作为本章的结束：

> “原子论胜利了。虽然不久之前在最后一个回合里反对它的人仍然为数甚众，可是现在都相继打消了他们的疑虑，这些疑问在很长的一段时期里曾经是正当的，而且不可否认也是有益的。”

参 考 文 献

[1] 王竹溪，《统计物理学导论》，北京：高等教育出版社，1956。

[2] H. A. Boorse and L. Motz (ed.), The World of Atom, vol. I, New York: Basic Books, 1966.

[3] S. G. Brush, Kinetic Theory, vol. 1, The Nature of Gases and of Heat, Pergamon Press, 1965.

[4] S. G. Brush, The Kind of Motion We Call Heat —A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century, Book I, North-Holland Pub.

Co., 1976.

（以上三种为本章基本参考文献）

[5] 小泉贤吉郎，新数学物理学的诞生，沈一民译，《科学史译丛》，1986 年 2 期，26—35。

[6] C. W. F. Everitt，《麦克斯韦》，瞿国凯译，上海：上海翻译出版公司，1987（本书是 Dictionary of Scientific Biography 中 Maxwell 条目的中译本）。

[7] 玻尔兹曼的传记材料可参看：C. Cercignani，《玻尔兹曼——笃信原子的人》，胡新和译，上海：上海科学技术出版社，2002。

[8] 李醒民，奥斯特华尔德的能量学和唯能论，《自然辩证法研究》，1989 年 2 期。

[9] 杉山滋郎，19 世纪末的原子论论争和机械自然观，李醒民译，《科学与哲学研究资料》，1986 年 6 期，173—200 页。

[10] 董光璧，《马赫思想研究》，成都：四川教育出版社，1997，第三章。

[11] 葛墨林、李新洲、关洪，玻尔兹曼晚年考，《自然杂志》，1990 年 13 卷 2 期，106—109 页。

[12] 假如爱因斯坦有一块墓地的话，我相信他的墓碑上会刻上那道深刻地改变了世界的公式 $E=mc^2$。但是依照他的遗愿，爱因斯坦的遗体火化后，骨灰撒在一处不公开的地方，根本没有什么墓碑。

[13] A. Pais, Subtle is the Lord… The Science and the Life of Albert Einstein, Oxford: Oxford University Press, 1982, §5；中译本：《上帝难以捉摸——爱因斯坦的科学与生活》，方在庆等译，广州：广东教育出版社，1998，第 5 节。

[14] 《爱因斯坦全集》（第二卷），范岱年主译，长沙：湖南科学技术出版社，1989，148—180 页，301—302 页。

[15] 文献[14]，3—34 页。

[16] 文献[2]，206—212 页。

[17] W. F. Magie (ed.)，《物理学原著选读》，北京：商务印书馆，1986，266—271 页。

[18] 参看：H. Poincaré，《科学的价值》，李醒民译，北京：光明日报出版社，1988，292 页。

[19] 文献[13]，105—118 页。

[20] 文献[14]，181—206 页，290—300 页。

第四章　微观物理学的诞生[1,2]

4.1　电子发现的前后

在以上几章里，讨论的都是宏观系统的物理学。即使是布朗微粒，也含有千千万万的原子和分子，本身不是一种微观粒子。在20世纪之前，没有直接观察到过个别原子和分子的运动。在经典统计物理学里，每一个原子和分子的运动被假设服从牛顿力学的规律，这一点并没有受到直接的检验，而只是把它们的行为作为统计对象写进理论计算里去，最后同实验比较的只是对大量微观对象统计平均的结果。

从这一章开始，跨入到微观物理学，亦即人们常常讲的原子物理学。现在通常讲的原子物理学或者还有亚原子物理学，研究的领域实际上包括了原子和分子、原子核和基本粒子等在内，它们具有基本相同的理论基础和实验手段，成为了现代物理学最重要的部分。

第一个直接观察到的微观粒子是电子，它也是人类发现的第一种亚原子粒子。但是，从它最初被观察到直至最后被确切认证，亦经过几十年之久的一段曲折的历程。

早在17世纪末期已经开始看到在气压计上方的玻璃管内的“真空”部分发出闪光，实际上这是玻璃管内的水银同管壁摩擦起电而激励的水银蒸气放电。法拉第(M. Faraday，1791—1867)在1836年亦曾对这一类的低压气体放电进行过仔细的观察。但对

气体放电深入细致的研究，有赖于真空技术的进步。普吕克尔（J. Plücker，1801—1868）1859 年使用刚发明的水银真空泵研究真空放电的辉光现象。1869 年他的学生希托夫（W. Hitorf，1824—1914）又发现，这种“辉光射线”可受置于放电管内的障碍物阻挡而在玻璃管壁上留下阴影，并且在没有外场时看到它是沿直线行进的。



图 4.1　法拉第（M. Faraday，1791—1867）

1876 年，哥耳德斯坦（E. Goldstein，1850—1930）进一步发现，这种从阴极发出的射线总是沿着与电场相反的单一方向行进，而不像光线那样向四面八方发射，他并且把它命名为“阴极射线”（cathode ray）。

“阴极射线”这个词组里的“射线”（ray），沿用了几何光学里的“光线”（英语里也是 ray）这一称谓，可见开始的时候是把它当做一种未知的光线来看待的。自从牛顿发现太阳光光束的色散现象之后，人们就开始了对太阳光谱的研究。19 世纪初，1800 年赫舍耳（W. Herschel，1792—1871）从红外线（infrared ray）的热效应肯定了第一种不可见光线的存在。1801 年，里特（J. Ritter，1776—1810）又从紫外线（ultraviolet ray）能使氯化银产生光化学反应而发现了另一种不可见的光线。回顾在整个 19 世纪里，许多物理学家都在孜孜不倦地致力于各种各样新型的“ray”（光线或者射线）的追求，这种传统一直延续到 20 世纪之初，例如反映在 1895 年由阴极射线的研究导致的“伦琴射线”即 X 射线的发现，以及 1896 年由伦琴射线的研究导致的“贝克勒耳射线”即放射性现象的发现和不久之后命名的“α 射线”，“β 射线”和“γ 射线”等名称上。

X射线和放射性的发现引起了普遍的轰动，物理学家们热切地希望发现更多类似的不可见射线，纷纷投入到这方面的实验研究来。例如，庞加莱1897年在一篇文章里提到伦琴和贝克勒耳的发现时说，无疑还会看到其他一些现象，“并且将会完成这样一幅图画，现在我们仅仅开始看出它的大概。”在这样的气氛中，竟然出现了宣称发现一种后来被揭露为虚假的“N射线”这样一场闹剧。[3, 4, 5]

事情是这样的。1903年，法国南锡(Nancy)大学的物理学教授布隆德洛(R. Blondlot，1849—1930)在法国科学院的刊物上发表文章，报告发现X射线管在工作时会发出一种被他命名为N射线的新型射线，这种射线能够使得细小的火花或者火焰的亮度增强而被检测到。N射线的名称取自布隆德洛的故乡Nancy。后来他又声称发现了烧红的某些金属和太阳光等等都会发射N射线，并且使用了硫化钙等一些别的材料来做他的检测器。此外，布隆德洛还研究了N射线在不同物料中的穿透性质，以及N射线会受到铝制棱镜的折射等等。



图4.2 布隆德洛(R. Blondlot，1849—1930)

此后，布隆德洛不仅接连发表了二十多篇关于N射线的论文，而且在1904年还就此出版了一本专著。他的这一发现点燃了新的一轮探索热潮。据统计，在那三四年里，有一百多位科学家在正式的科学期刊上发表了大约三百多篇关于N射线的论文，其中包括了从一些动物甚至人类身上发出了N射线的报告。

布隆德洛宣称观察到的N射线的微妙效应是需要在暗室中用肉眼细心观察才能看到的。对于这种在黑暗中飘忽不定、时隐

时现的光影，个人的主观意愿无疑会对他自以为看到的结果产生强烈的影响。在法国有许多科学家声称证实了N射线存在的同时，其他国家的大多数同行却无法成功地重复他们的结果。1904年夏天，对此持怀疑态度的美国光学专家、也是热心于揭发各种各样虚假科学效应的伍德(R. W. Wood，1868—1955)到了布隆德洛的实验室，观看他们的演示。据说，当实验在漆黑的房间里进行的时候，伍德暗中一度取走了他们用来测定折射率的那块铝制棱镜，但实验者仍然能够得出先前的观测结果。伍德在不动声色地离开之后，当年晚些时候在英国的《自然》杂志发表了一篇文章报道他的见闻。于是，国际科学界再也不承认那种子虚乌有的N射线了。



图4.3　伍德(R. W. Wood，1868—1955)。北京大学物理系于1935年购进伍德制造的一具精密光栅，至今仍然保持良好的性能

有些研究者把这一事件当做“病态科学”(pathological science)的典型例子。他们认为，N射线并不是那些实验者存心弄虚作假的产物，而是一批认真又诚实的科学家在一种病态意识的支配下所作出的虚假成果。但是，亦有些研究者不同意这种说法。事实上，在伍德的文章公开发表，N射线的真相已经大白于天下之后，法国的科学家们仍然坚持继续进行研究，直到1906年还在发表这方面的文章。

布隆德洛亦不是等闲之辈，他此前已经先后于1893年和1899年获得法国科学院的两次嘉奖，并于1894年接替故去的亥姆霍兹成为科学院的通讯院士。在N射线的虚假被揭露之后，法国科学院不仅顶住国际科学界的巨大压力，拒绝对这一事件展开调查，而且正值争论最激烈的1904年，法国科学院又向布隆德洛

颁发了新的奖项——勒贡奖。由此可见，在N射线课题上作出虚假成果，并不能完全归因于科学家的个人意愿，而明显是一种狭隘民族主义的表现。本来，实验家们常常倾向于得出符合自己希望或者所相信理论的数据，理论家们也常常选用易于得到他们预期结果的近似方法，这都是不足为奇的。但当时法国人急于在20世纪初的物理发现中争夺领先地位，才真正是这一事件的主要动因。因此，这一事件的出现，要从科学之外去找原因，简单地说它是一种病态现象，没有多少说服力。

这里面其实有一个心理学上的问题。奈(M. J. Nye)在一篇题为"N射线：在科学的心理和历史中的一段插曲"的文章里说[5]，N射线事件"不是'病态'的，更不是'非理性'或者'伪科学'的。参与调查和辩论的科学家很正常地受到传统的并且简单化了的科学目的的影响，受了个人竞争动力以及对自己的机构、区域和国家的忠诚之心的影响。"甚至有研究者提出，这是否可以算做是一种"集体癔症"(mass hysteria)的发作。那就不属于我们这本书讨论的范围了。

总之，19世纪的物理学家似乎普遍缺乏探索原子的构成乃至物质的一般构造的意识。真正对原子内部构造的深入研究，要等到20世纪才开始。看来这种思想上的局限，可能是受到自古以来原子"不可分"观念束缚的结果。例如，牛顿那种归因于上帝创造从而是永恒而不可能改变并且坚实而不可能碎裂的原子，自然是没有什么内部构造可谈的。

另一方面，19世纪物理学的进展也确实提示了原子电荷的得失只能是一个基本单元的整数倍的线索。1834年，法拉第在研究电解现象时，创造了正离子和负离子等新的术语，用来描写得到或者失去电荷的原子或分子，并且认识到它们是在溶液中携带电荷形成电流的载体，同时执行着化学物质在电极上的淀积或者析离。法拉第把他的结果概括在两条电解定律里，第一定律说的是在电

极上淀积或者析离的某种化学元素的质量与所通过的电量成正比;第二定律说的是,由相同电量产生的不同元素的电解产物,存在着确定的"当量"关系。然而,主要是一位实验家的法拉第虽然作出了有利于原子论的贡献,他自己对于原子以及对于其他理论观念的议论,一般只是模糊的猜测,亦没有达到一种坚定信念的程度。

真正的进展出现在 1881 年,在那一年里亥姆霍兹把法拉第电解定律里的"当量"同在法拉第电解定律之后三十年内提出和趋于成熟的化合价理论结合起来,导出了这样的结论:"法拉第定律最令人惊异的结论也许是这样,如果我们能够接受基本物质都是由原子组成这一假设,我们就不可避免地会下结论说,正电或负电也会分成确定的一些基本的部分,它们表现得就像是电的原子一样。"用现代的术语来表达,亥姆霍兹得到的结论相当于说:1 摩尔一价离子所携带的电量即法拉第常数 F 满足等式

$$F = Ne$$

式中的 N 是阿伏伽德罗常数,e 就是上面所讲的电荷基本单元。

其实,早在 1874 年,爱尔兰物理学家斯通尼(G. J. Stoney,1826—1911)在英国科学促进协会的年会上已经给出了根据上面的公式估算的 e 的数值。从上一章我们知道,那时候已经有了阿伏伽德罗常数或者洛施密特常数的初步数据,斯通尼由此得出的结果是 $e \approx 3 \times 10^{-11}$ esu(静电单位),尽管差了一个数量级,但作为第一次的尝试,应该说是相当不错了。

斯通尼的这一结果到 1881 年才正式发表。1891,他又在另一篇文章里把这个电荷的基本单元命名为"电子"(electron),这一称呼沿用至今,虽然斯通尼原来指的只是电荷的单元而不是物质的粒子。

原子和分子为什么会带电?开始的时候人们并没有想到是由于在它们内部的带电粒子发生迁移的结果,而是沿袭了原来对于宏观物体设想的带电机制。例如,麦克斯韦一方面在气体动态理

论中成功地运用了原子概念，另一方面又受到自古原子不可分概念的束缚。他在承认电解定律意味着存在着电荷的基本单元的同时，却对分子带电的解释感到困难。他曾经试图把宏观物质的接触电势差机制运用于微观的分子，自然不会有什么满意的结果，但也说明了那时候大部分物理学家的认识模式。

此外，在18世纪中叶静电学研究初期提出的“电流体”学说，包括富兰克林(B. Franklin，1706—1790)的“单流体”说和后来的“双流体”说，都被用来说明电解等过程的机制。在这种学说里，认为物体带电状况的变化，是由于依附于物体的一种无重量的电流体的盈亏或者两种电性相反的电流体的对流所致。在发现电子之后，关于“电流体”的文献都已经变成历史的陈迹，在国内更是很难找得到。不过，在我国大量印刷的恩格斯身后出版的《自然辩证法》这本在他生前未公开发表的文稿集里，恰好有一篇题为“电”的文章，讲的就是这方面的问题[6]。这篇文章主要依据1872至1874年间出版的维德曼(G. Wiedemann，1826—1899)的著作《流电说和电磁说》中叙述的材料进行评论。读者如果有耐心的话，可以在这篇文章里看得到关于用电流体和接触电来解释电解现象的一些评述，对那个时代关于原子和分子的带电机制的流行观念得到一点印象。

现在回过头接着讲对阴极射线本质的认识过程。早在1871年，瓦尔雷(C. Varley，1828—1883)从阴极射线会受到磁铁的作用而偏折的现象，推测这些射线可能是“物质的一些细小粒子，靠电的作用从阴极中发射出来。”1879年，克鲁克斯(W. Crookes，1832—1919)做了一系列的研究之后，亦认定射线由带电微粒组成，不过他却以为，这些微粒是在真空放电管里由于接触了阴极而得到负电荷的残余气体分子。

然而，当时的许多物理学家都持相反的看法，认为阴极射线不过是以太的激荡，或者说是一种新型的辐射。于是，科学家们开始

对阴极射线的本质展开了一场反复的争论，以下举几个重要的例子：

1880 年，为了反驳克鲁克斯的论点，哥耳德斯坦用一根长而直的放电管激发出阴极射线，这种状态下分子的平均自由程很短，使得由分子组成的射线在放电管中不可能始终沿一根直线行进。于是，哥耳德斯坦倾向于认为阴极射线是一种电磁辐射现象。

1883 年，赫兹(G. R. Hertz，1857—1894)在不充分的实验条件下，没有发现阴极射线在外电场中偏转的效应，也没有发现阴极射线使放电管外的磁针摇摆的效应。因此他下结论说："阴极射线不比电灯泡发出的光同电的联系更紧密……阴极射线是电中性的，……光是最接近于它们的类似现象。"

1891 年，赫兹进一步发现阴极射线能够穿透薄金属箔，他的学生勒纳德(P. Lenard，1862—1947)接着在阴极射线管上开了一个用薄金属箔遮住的小孔，把射线引到管外，这些结果都不利于射线由粒子组成的观点。不过，1894 年汤姆孙(J. J. Thomson，1856—1940)的实验证明了射线的传播速度远小于光速，1895 年佩兰在放电管内收集到阴极射线携带的电荷，直接证明了它们带的是负电荷。这两个新的结果指示出阴极射线由带负电的粒子组成，又不利于射线是一种辐射的观点。

当时已经知道，带电粒子在磁场中的运动轨迹(的曲率)直接取决于它们的质量同电荷的比值。实际上，早在 1890 年，舒斯特(A. Schuster，1851—1934)就从阴极射线在磁场中的偏转估计出其荷质比与约为氢离子的 500 倍左右，但这一工作没有受到重视。1897 年，维谢尔特(E. Wiechert，1861—1928)重新进行测量的结果是 2000 到 4000。他并且猜测，如果假定阴极射线粒子和氢离子的电荷都取斯通尼所说的"电子"这一基本电荷值的话，那么它们的荷质比有这么大的差异，就是因为两者质量悬殊的缘故。舒斯特由此得出这样的推论："这表明我们处理的并不是化学里的

原子，因为这些运动粒子的质量要比已知的最轻的化学原子即氢原子小 2000 到 4000 倍。”因此，可以说他是第一个明确地提出存在着一种亚原子粒子的人。

同年，考夫曼（W. Kaufmann，1871—1947）亦得到了相近的结果。但是，他却误以为测量到的是真空管里残余气体分子的离子，没有想到竟会是一种其质量比氢原子小上千倍的带电粒子。

在此前后，塞曼（P. Zeeman，1865—1943）1896 年运用新型的光栅和强大的电磁铁，观察到施加磁场后钠原子光谱黄线双线的每一条都变宽了。塞曼立即向他的老师洛伦兹（H. A. Lorentz，1853—1928）请教，洛伦兹回答说他的理论能够解释这种现象。



图 4.4 塞曼（P. Zeeman，1865—1943）

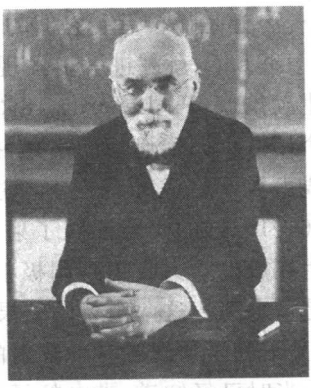


图 4.5 洛伦兹（H. A. Lorentz，1853—1928）

原来，洛伦兹在 1892 年发表了文章《麦克斯韦电磁理论及其对运动物体的应用》，试图在静止以太框架的基础上，从介质内部的微观结构出发来研究满足麦克斯韦方程组的电磁学问题。那时候大家都不知道原子和分子有没有和（或）有什么样的内部构造，他开始只把介质中电荷和电流的微观载体笼统地称为“带电粒子”，在 1895 年出版的《运动物体中电现象和光现象的理论研究》里又改称“离子”。在洛伦兹的这一理论模型里，最重要的贡献是

设定了带电粒子在电磁场中受力的公式，亦即是我们沿用至今的“洛伦兹力”公式。

塞曼的问题刚好给洛伦兹的动力学理论一个初试牛刀的机会。他在一个在做简谐振动的“离子”的运动方程里加上“洛伦兹力”项，便可以解出以振子本征频率为中心的一高一低的两个附加频率，其频率之差距同磁场的强度和“离子”的荷质比成比例。虽然塞曼在他的初步实验里只观察到在磁场中谱线变宽的效应，亦足以由此估算出这种带电粒子的荷质比了。他得到的数据是 $e/m \sim 10^7$ emu/g，已经是一个很不错的结果了(emu 为静磁单位，电子的荷质比的现代值为 5.27×10^{10} esu/g，合 1.76×10^7 emu/g)。

1897 年，在塞曼经过改进的实验里，又发现镉原子光谱的蓝线不是变宽了而是依照偏振方向的不同而分裂成两条或者三条，并且完全符合于洛伦兹理论指出的偏振分类。这就是后来所称的“正常塞曼效应”。但是，无论是塞曼还是洛伦兹，都没有从测定出来的大得惊人的荷质比的数值，对原子内部负责发出光的带电粒子作出什么推论来。

在同一时期，拉摩尔(J. Larmor，1857—1942)也从不同的角度研究这一问题。他假设原子是由分别带正负电荷的粒子构成的，它们在以太的背景中由于互相吸引而做轨道运动。早在 1894 年，拉摩尔就依据他的理论计算了外磁场对带电粒子运动周期或频率的影响，预见到由这些频率决定的光谱线的分裂。这就是所谓的“拉摩尔进动”，所求得的裂距与后来洛伦兹的结果是相同的。但是，他以为那些带电粒子的质量与原子同数量级，因而判定这种分裂是不可能观察到的。1897 年 2 月，在得知塞曼的初步结果之后，拉摩尔指出原子内部做轨道运动的是质量比原子小得多的带电粒子。同年，他又指出引起塞曼效应的带电粒子的质量接近于与汤姆孙对阴极射线测量出的电子。

真正在广阔的视野上进行了综合的研究，运用独到的眼光从



图 4.6 汤姆孙(J. J. Thomson, 1856—1940)

多种不同效应证认出电子的存在,并且自己也做了精密的实验测定工作的,乃是不愧被誉为电子发现者的汤姆孙。1897 年初,汤姆孙意识到阴极射线在磁场中的偏转与真空管内残留气体的种类无关,就意味着它不是由原子、而是由一种比原子小得多的微粒所组成。随后,他读到了塞曼的初步结果,再结合自己的实验工作,于 1897 年 4 月 30 日在皇家学会做了一次讲演,系统地阐述了他所得到的结果。在这次讲演开始时讨论了勒纳德关于阴极射线被不同物质吸收的实验,得出这样的结论:"从阴极射线是一些高速运动的带电粒子的假设出发,那么这些带电体必定比通常的原子小得多。"在叙述了他的实验结果之后,汤姆孙又说:"指出下面这点是很有趣的:我们从阴极射线发现的 e/m 值、与塞曼从磁场对钠光的周期影响的实验所推导出来的值,具有相同的数量级……"

1897 年 10 月正式发表了汤姆孙的实验文章。在这篇文章里首先叙述以另一种方式重复了佩兰的方法,肯定了阴极射线由带负电的粒子组成。然后他宣告成功地观察到了在静电场中阴极射线的偏转,这是赫兹在几年前因为管内真空度不够而未能做到的。接着,J. J. 汤姆孙描写了他运用对阴极射线施加横向的且相互垂直电场和磁场,使两者的偏转效应互相抵消的方法,结合单独施加电场的方法,同时测量出射线的速率和荷质比。最后得到的荷质比的数量级是 10^7 emu/g,且这个结果与管内残留气体的性质无关。

一般认为,1897 年是汤姆孙发现电子的年份,但他对阴极射线的研究没有就此止步。1899 年汤姆孙又发表这方面的一篇重要文章。在这篇文章里,汤姆孙测定了被 X 射线电离的气体离子

的电荷，又运用相同的方法测定了用紫外线在金属表面击出的带电粒子（光电效应的射出物）的荷质比，得出结论说："在紫外线……情况测出的 m/e 值与阴极射线是一样的。"此外，汤姆孙给出了运用他的学生威尔孙（C. T. R. Wilson，1869—1959）刚刚发明的云室测定基本电荷的数值为 6.8×10^{-10} esu。最后，汤姆孙给出新发现的带电微粒的质量是 3×10^{-26} g。这些结果都具有正确的数量级。

至此，从阴极射线、塞曼效应、光电效应等多种现象证认出同一种带负电的微小粒子的存在，并且对它的基本性质取得了确定数据的工作，可以说基本上大功告成了。汤姆孙在他的文章里宣告："起电本质上涉及原子的分裂，原子质量的一部分从原来的原子里脱离出来获得自由了。"这一观点被人们普遍接受，并且用斯通尼发明的名词"电子"（electron）去称呼汤姆孙所说的那种"带电粒子"（electrified particle）或者"微粒"（corpuscle）了。



图 4.7　密立根（R. A. Millikan，1868—1953）

1899 年，洛伦兹把他的电磁学模型里的"离子"改称电子，并且把他的理论正式定名为"电子论"。1900 年，进一步的实验又证认出放射性现象里的 β 射线由高速运动的电子组成。1906 年到 1916 年，密立根（R. A. Millikan，1868—1953）通过不断改善的实验方法，精确地测定了电子的电荷。这是后话。

4.2　放射性的发现和决定性的危机

1895 年 11 月，德国物理学家伦琴（W. C. Röntgen，1845—



图 4.8 伦琴(W. C. Röntgen, 1845—1923)

1923)在研究阴极射线的时候,意外地观察到了接上了电源的阴极射线管旁边的一块涂有荧光物质铂氰酸钡的纸屏会闪出荧光,由此发现了一种穿透力很强的射线。同年 12 月,他提交了题为"一种新射线"的报告,并且把这种未知的新辐射命名为"X 射线"。伦琴自己鉴于这种射线总沿直线行进,既不被电场和磁场偏转,又观察不到通过介质时的折射,认为就是寻觅已久的以太纵波辐射。当时确有不少物理学家没有掌握麦克斯韦理论的结果,误以为电磁波既有已经观察到的横波又有未曾观察到的纵波。

这一发现公布之后,维谢尔特和斯托克斯从 X 射线的发生方式,推断它是阴极射线撞击到玻璃管壁上发出的电磁辐射。由于波长很短而不受折射。1906 年,巴克拉(C. Barkla, 1887—1944)证实了 X 射线具有横向的偏振。直到 1912 年,劳厄(M. Laue, 1879—1960)通过晶体点阵的衍射,终于证实了 X 射线的确是波长为 10^{-9} 厘米左右的电磁波。



图 4.9 贝克勒耳(H. Becquerel, 1852—1908)

1896 年 1 月,在巴黎科学院的一次例会上,庞加莱介绍了伦琴的工作。参加会议的有一位研究荧光和磷光物质的专家贝克勒耳(H. Becquerel, 1852—1908)。当贝克勒耳知道 X 射线是从受到阴极射线撞击的玻璃管壳上产生荧光的区域发出来的,就想要弄清楚 X 射线是否荧光或者磷光物质

所引起的振动的表现，或者是否荧光或者磷光材料本身就会发出X射线。这种猜想立刻得到了庞加莱的支持。

贝克勒耳开始用来做试验的几种磷光物质没有得出预期的结果。后来他换用硫酸铀铣钾，把这种材料涂在包裹着照相底板的黑色厚纸外面，经过阳光曝晒之后，发现里面的底片感光了。1896年2月24日，贝克勒耳向巴黎科学院提交报告，以此作为磷光物质在发出可见光的同时，也发出一种能够穿透黑色厚纸的辐射的证据。他似乎找到X射线的另一种来源了。

然而，在3月2日，贝克勒耳又向科学院报告一个意想不到的新发现。原来，在这几天里，由于巴黎没有出太阳，或者由于别的什么原因，贝克勒耳把准备好了而没有晒过阳光的样品里的底片也冲洗出来，发现它亦感光了。他立刻意识到，这是同荧光或者磷光没有关系的、由铀化合物本身发出的一种经久不衰的新辐射。因此，他把这种辐射称为“铀射线”。贝克勒耳还发现，像X射线一样，这种新的辐射也会使周围的空气发生电离。

我们已经说过，当时还有X射线，阴极射线等几种新的辐射登场，这种“铀射线”不过是其中的一员。从波兰去到巴黎的玛丽·居里(M. Curie，1867—1934)听到这一消息之后，决定对此做深入的研究。她在1898年4月提交了一篇短文，证实了贝克勒耳关于“铀射线”的结果，并且发现铀的含量越多，就会发出越强的射线。她还发现，已知的钍化合物亦有更强的类似辐射。因此，在同年12月她和她的丈夫皮埃尔·居里(P. Curie，1859—1906)合作的文章里，便改称这



图4.10　皮埃尔·居里(P. Curie，1859—1906)和玛丽·居里(M. Curie，1867—1934)夫妇

种来源并非独一无二的“铀射线”为“贝克勒耳射线”，并且在这篇文章的标题里，第一次出现了“放射性”(radioactive)这个词。根据在她 4 月的文章里说到沥青铀矿的辐射比所含的铀强得多的现象，居里夫妇又进行了艰苦的工作，于 1898 年底从含铀矿物里提取了两种新的放射性元素钋和镭，方才引起了人们的普遍关注。在起初的几年里，各个实验组对这种全新现象的研究，实际上是在充满未知数的一片黑暗之中，在成功和失误的交替之中摸索着前进的。

1895 年，在新西兰出生和受教育的物理学家卢瑟福(E. Rutherford，1871—1937)经过考试选拔，得到了赴英国留学的机会。他选择了剑桥大学的卡文迪什实验室，师从 J. J. 汤姆孙。那几年汤姆孙正在紧张地从事证认电子存在的工作，让卢瑟福去研究 X 射线在气体中产生的电离等效应。沿着这条路线，在 1896 年贝克勒耳发现放射性之后，卢瑟福就开始投入到铀引起的电离的测量中去。

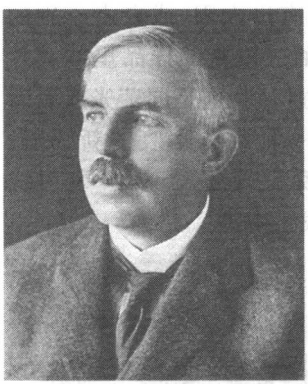


图 4.11 卢瑟福(E. Rutherford，1871—1937)

卢瑟福很快就作出了关于贝克勒耳射线的重要研究成果。他发现，铀射线不是单一成分的，它至少含有两种穿透能力不同的辐射。他把它们分别命名为 α 辐射和 β 辐射。这一工作是在 1899 年初发表的。同年贝克勒耳又发现，卢瑟福所说穿透能力较强的 β 辐射能被磁场偏转，而且偏转方向与阴极射线相同；进一步测定了它的荷质比之后，证认了 β 射线就是高速运动的电子流。

开始因为所用的磁场较弱，观察不到 α 辐射的偏转，便误认为它是电中性的。1903 年卢瑟福才用强磁场实现了 α 射线的偏转，

肯定它带有正电荷。直到 1908 年，卢瑟福和盖革(H. W. Geiger，1882—1945)终于证认出，α 粒子是带两个单位正电荷的氦离子，即失去了两个电子的氦原子。

第三种射线是 1900 年由维拉德(P. Villard，1860—1934)从镭的辐射中发现的，它的穿透力也很强，并且不受磁场偏转。1903 年，卢瑟福把它命名为 γ 射线。直到 1914 年，卢瑟福等通过 γ 射线在晶体表面上的反射，测定了它的波长，肯定了它是一种波长很短的电磁辐射。这些都是后话。

回过头看，在 1900 年前后，几种放射性射线的主要性质还没有弄得很清楚。

天然放射性元素的最初母体，例如铀和钍，它们能够在地球上存活到今天，其半衰期必定是很长的，所以开始以为放射性是一种恒定不变的现象。后来发现了一些物质的放射性随着时间变化，但一时没有找到这种变化的规律。这是因为当时发现的天然放射性不是一种单一的过程，而是原初的母体蜕变到子体，子体又接连蜕变到第三代、第四代……直到经过十代八代甚至十多代，变到像铅那样的稳定元素为止。所以，要梳理清楚几个放射性“家族”及其各个成员的前因后果，绝不是一件容易的事。

1898 年转到加拿大蒙特利尔(Montreal)的麦吉尔(McGill)大学的卢瑟福着手利用刚发现不久的钍化合物来研究放射性现象。他和合作者发现钍的放射性变化无常，在弄清楚这是由于室内气流的影响之后，他认为这表明有某种物质逸出。卢瑟福从这一线索入手，收集到一种放射性气体，把它叫做钍射气。在 1900 年题为“从钍化合物发射出的一种放射性物质”的文章里，卢瑟福发表了这一结果。在同一项工作里，他还把钍射气抽出来，单独测量其放射性活性随时间的衰减，同时测量留下来的钍化合物再度产生钍射气而使得其放射性活性随时间的恢复，分别绘出了两条曲线的图形，见图 4.12。

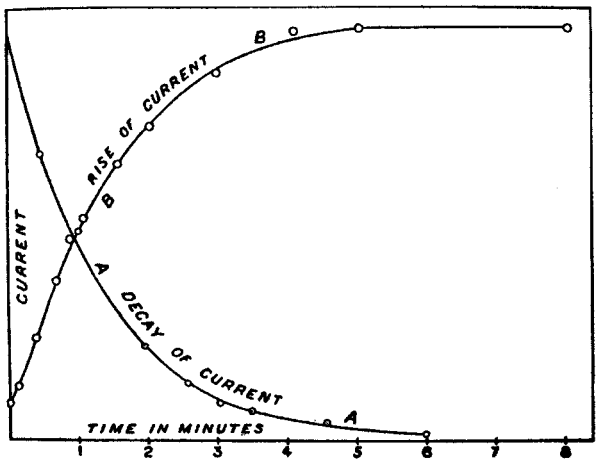


图 4.12 卢瑟福单独测量抽取出来的钍射气的放射性活性随时间的衰减(下降曲线),同时测量留下来的钍化合物再度产生钍射气而使得其放射性活性随时间的恢复(上升曲线),分别绘出了两条曲线的图形,横坐标是以分为单位的时间(选自卢瑟福和索迪 1902 年发表的文章)

根据这些结果,卢瑟福在这篇文章里,第一次宣告放射性物质的活性随时间按几何级数衰减的规律,并且写出了相应的指数式衰减的数学公式。这是人类第一次发现微观物理现象本质上的统计性质。卢瑟福测量的钍射气,后来知道是放射性气体氡的一种同位素 Rn^{220};他当时得到的半衰期是 1 分钟,其现代值是 55.6 秒。

放射性元素在发出三种射线的同时,竟然还产生着新的气体物质,这一结论完全推翻了原子永恒不变的传统观念。卢瑟福意识到下一步需要进行大量的物质分析工作,他找到一位年青的化学家索迪(F. Soddy, 1877—1956)合作,对放射性规律和放射性物质的变化进行了系统的研究,终于从错综复杂的现象迷宫里,初步整理出实际过程发生的几条可能路线。亦即铀,钍和镭等几种元素的放射性谱系的雏形。同位素的概念和名称,亦是索迪后来

提出来的。

卢瑟福和索迪 1902 年合作发表的文章《放射性的原因和本性》，不仅涵盖了上述 1900 年文章的主要结果，而且进一步提出了理论上的解释，可以看做是他们对这方面工作的一个总结。

在这一工作里，他们首先重复了放射性随时间衰减和恢复的实验。这次处理的是新的材料，即钍化合物产生的 ThX 的放射性。后来知道 ThX 是镭的一种同位素 Ra^{224}；他们当时测得的半衰期是 4 日，其现代值是 3.64 日。

接着通过多方面的论证，卢瑟福和索迪得到结论说：ThX 无疑是一种具有与钍不同化学性质的物质，有关的化学变化必定具有亚原子的特征。“因而，鉴于放射性同时是一种原子现象，又伴随着产生新类型物质的化学变化，这些变化必定是在原子里面发生的，并且放射性元素必定进行着自发的转变。……我们显然是在对付在已知的原子力范围之外的现象。因而放射性可以看做是亚原子化学反应的一种表现。”

总之，他们宣告了，放射性现象是一种原子变成另一种原子的过程。在物理学里，这是深入到原子内部的物质结构探索的开始；在化学里，这是推翻原子不可摧毁原则的一场革命。放射性就这样把物理学和化学这两门古老的学科联结起来了。

卢瑟福和索迪就这样提出了“放射性嬗变学说”。不过，在这篇最早阐述这一学说的文章里，他们还不敢使用古代炼金术里的“嬗变(transmutation)”这一名词，而只是谨慎地说发生了“转变(transformation)”。

这篇文章里还为一个几年来困惑着物理学家们的问题给出了答案。在发现放射性的初期，人们不知道好像是用之不竭的放射性能量是从哪里来的，有些学者怀疑能量守恒定律不再有效，但多数物理学家都相信那是从外界通过某种机制输入的。例如，居里夫人在上述 1898 年的第一篇文章里就说过：“人们可以设想，所有

空间都总是贯穿着类似于伦琴射线那样的射线，只是其穿透性更强，而且只能够被如像铀和钍那样的大原子量的某些元素吸收。”而同年克鲁克斯则怀疑热力学第二定律的有效性，猜测放射性物质所释放的能量是从周围的空气中抽取的。

德国物理学家埃尔斯特(J. Elster，1854—1920)和盖特尔(H. Geitel，1855—1923)从1898年开始，做了一系列的实验工作来检验放射性来自外部能量的假设。他们把放射性样品先放在隔绝空气的真空容器里，后来又藏到几百米深的矿坑下，都没有发现有什么减弱的迹象；而且把辐射源置于阴极射线和太阳光照射之下，亦没有观察到增强的效应。于是他们在1898年和1903年先后下结论说：“贝克勒耳射线由空间中预先存在的辐射激发而产生的假设看来是极不可能的。”“人们不得不把辐射的来源归于所涉及元素的原子本身。”

而卢瑟福在1902年的那篇文章里亦宣称：“如果我们假设系统的能量在变化过程之后比在那之前要少的话，那就可以为保持辐射所需要的能量来源给出说明了。”在1904年的另一篇文章里，他更明确地宣告：“从放射性物质连续不断发射出来的能量，是来自原子内部固有的能量，这一点也不违反能量守恒定律。”

可以看出在放射性的研究上表现出两条不同的研究路线。以贝克勒耳为先导的法国科学家本来是最早发现和研究放射性现象的，但他们主要关心的只是放射性的能量是从哪里来的。例如，皮埃尔·居里在起初研究放射性的时候就讲过：“人们能够设想，每一个镭原子作为一个连续和恒定的放射性能源起作用，除了能量来自何处之外，其他不必作具体说明。”后来，他在1903年又发表了量热学实验的结果，测量到每1克镭在1小时内可以使约1.3克水的温度从冰点升到沸点，其热效果远远超过任何化学反应。他在这一工作里重提镭的能量是从外界输入的假说，并且得到庞加莱的支持。直到1919年，佩兰还提出认为放射性能量来源于一

种空间辐射的假说。总之，他们关心的主要是热力学方面的问题。

与此同时，以卢瑟福（他在 1907 年回到英国曼彻斯特的维多利亚（Victoria）大学物理系）为首的英国物理学家坚持从原子物理的角度去探究放射性现象的本质，从而取得了累累硕果，后来居上地登上了领先的地位。他们着重的是物质内部构成的问题，我们将会看到，卢瑟福学派的研究方向从原子的嬗变到原子的结构再到原子核物理，始终都是沿着这条路线进行的。而法国物理学家开始的时候迟迟不承认卢瑟福的嬗变学说，没有意识到新的能量形式是同物质内部构成的变化相联系的。有评论指出，这两种研究纲领的差异，不单纯是个人风格的或者科学思想上的原因，而是类似于上一节所讲到“N 射线事件”里那样，有一种狭隘的“民族沙文主义”在作怪。[9]

设 $N(t)$ 为 t 时刻存在的放射性物质的原子数目，卢瑟福把放射性的指数衰减规律表示为

$$N(t) = N(0)\exp(-\lambda t)$$

式中的 λ 是这种放射性原子的平均寿命（相应的半衰期为 λ 乘以 ln2），实验证明它不依赖于各种物理和化学等外部条件。容易由此导出衰变率满足的微分方程是

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = -\lambda N(t)$$

虽然方程的形式和宏观物理学的扩散定律或者放电过程相类似，但从原子论的观点看，它含有更深刻的意义。因为，这一规律意味着，放射性物质在相等的时间间隔内衰变的百分比是不随时间先后而改变的常数。这就强烈地提示了：每个原子或迟或早发生衰变的机会不受其他原子的是否存在的影响。

1905 年，奥地利物理学家许外德勒（E. R. von Schweidler，1873—1948）从这个想法出发，用概率论计算了满足指数式定律的衰变同实际放射性计数的涨落（统计偏差）。因为指数函数的值实

际上总是无理数，而放射性计数的数据则总是整数，所以放射性元素的衰变原则上不可能严格地遵循指数定律而必定存在着误差。[7,8]在许外德勒的处理里，只运用了概率计算的基本规则，不需要对原子内部发生的动力学过程做出任何假设。因为参数 λ 代表的相对衰变率是一个恒定的常数，假设了大量长寿命的放射性物质的每个原子的衰变是各不相干的，就可以从概率论的标准方法推导出这些原子每秒衰变数目 n 的平均数 $\langle n\rangle$ 满足泊松分布，由此得到其均方根偏差即标准差 σ 满足的关系

$$\frac{\sigma}{\langle n\rangle}=\frac{1}{\sqrt{n}}$$

这是一道可以同统计数据比较的公式，它的实验证实表明了放射性原子的衰变是一种纯粹的随机过程。注意到在同一时期爱因斯坦对布朗运动的随机行为的理论研究及其证实，许外德勒给出的正是随机过程在物理学中应用的第二个例子。（当然，误差的一般性分析亦是随机过程理论的一种常见的应用，但那里没有涉及具体的物理机制。）

这样就确认了，我们只能了解某一种原子或者粒子的衰变概率或者平均寿命，而在原则上无法预言某一个粒子在什么时候衰变。这就是微观现象本质上的统计性。后来的量子力学理论，一般不能够准确地预言个别测量事件的结果，而只能够预言大量相同测量事件的平均值，就反映了微观现象的这种本质上的统计性。

在经典物理学里，我们知道相同的物体在同样的初始条件和同样的外部环境下，会有同样的演化过程。例如，按同样的角度以相同的速度抛出的各个落体，会沿同样的轨道做相同的运动。而现在，放射性指数式衰减的规律，意味着我们只能够了解某一种原子或者粒子衰变的概率或者平均寿命，而无法确定个别的粒子在什么时刻衰变。各个完全相同的同类原子，其衰变时刻有先有后，并且是无法预知的。从这一现象开始揭示的微观对象行为本质上

的统计性，亦给传统的因果性和决定性的观念带来了强烈的冲击。

今天我们知道，其实原子的自发辐射也存在着类似的问题，即，我们无法知道多个处在激发态的原子中，任何个别的原子会在什么时刻发射出光。但是当时的物理学家们一方面在观念上亦倾向于把其原因归于外界的影响，另一方面与放射性衰变过程可以在荧光屏上或者电离室和云雾室中逐个观察到不同，长期以来实验上观察到的都是大量原子自发辐射的集体效应，没有能够观察到个别原子的辐射。因此，人们首先认识到问题的严重性的，乃是完全同样的放射性原子为什么有的会先衰变，有的会后衰变。

例如，在 20 世纪初年，针对那种企图用经典物理学原理来解释放射性衰变有先有后的模型，开尔文问道："在一块镭化合物里的一些原子马上就要爆裂，而另一些原子则会在爆裂之前稳定地存活几千年，它们之间到底有什么差别呢？"卢瑟福也说，按照经典物理学，"在同一时刻形成的所有原子的存活时间应当是确定的，……然而，这是同观察到的放射性转变定律相矛盾的；按照这一定律，各个原子的寿命跨越了从零到无限大的所有数值。"而索迪是这样描述这个问题的："如果死亡天使每秒钟都在世界上所有生灵中选出指定的一部分让他们逝去，而这种选择完全是随机的而毫不顾及他们的年龄……那么，我们的寿命期待值就会像放射性原子一样了。"这个譬喻很好地说明了微观世界的统计性规律是和宏观世界的因果决定性有根本区别的。

4.3　量子概念的提出和连续性的突破

对日常生活和经典物理学里的决定性观念提出了挑战的放射性规律，明显地不能在旧理论的框架内得到解释，但在放射性发现之初亦仅限于建立了唯象性的描述，没有能够催生出新的动力学理论。这是因为时机还没有成熟，微观对象的本性还没有充分暴

露出来的缘故。而在19世纪末年，人们已经认识到，还有另外一些物理现象是经典理论所不能够说明的。

其中最突出的问题之一是固体比热的困难。早在1819年，杜隆(P. L. Dulong，1785—1838)和珀蒂(A. T. Petit，1791—1820)在他们的文章里，发表了关于固体物质比热的实验结果，即十多种金属和固体硫的比热与其原子量的乘积接近相等。于是他们在原子论的基础上提出了这样的定律："一切单纯物质的原子具有完全相同的热容量。"换句话说，所有固体的克分子热容具有相同的数值。初期只观察到少数固体的比热多少偏离杜隆-珀蒂定律，还不至于造成严重的困难。但到了19世纪末，随着低温技术的发展，实验逐渐发现，温度降到很低时固体的比热普遍显著减小，而降到极低温度时则表现出接近于一个很小的极限值的趋势。

我们在上一章里讲过，瓦特斯顿早就已经提出了气体分子动能的均分定理的雏形，后来麦克斯韦把它引进了统计物理学。1868年，玻尔兹曼又把能量均分定理推广到分子中的每一个运动自由度占有一份平均动能 $kT/2$。1871年，他由此证明作简谐振动的束缚原子组成的单原子固体的克分子定容比热 $c_V=3R$ ($R=kN_A$ 是普适气体常数，N_A 为阿伏伽德罗常数，束缚原子在三个振动维度上各贡献一份动能和一份势能)，从而解释了杜隆-珀蒂定律。那么，只根据分子整体运动的维度和组成它的各个原子可能的转动和振动自由度，就能够从它所享有的平均能量决定它所贡献的比热，并且这一规律是不随温度而变化的。现在发现了固体比热在低温时普遍下降，无疑是对经典统计物理学的基本原理提出了挑战。多原子分子气体的比热，亦存在着类似的困难。

另一个重要的问题是，已经发现每一种原子和分子都会发出许多条不同频率的特征光谱线。根据经典的电磁学理论，每发射或者吸收一种频率的振动，意味着辐射源必定具有同一频率的一种振动模式，而每一种振动模式又对应着一个独立的自由度。这

样一来，就会要求即使是最简单的原子都具有很多的内部自由度。那么，为什么分子和原子作为整体运动的自由度对由它们组成的物质的比热有贡献，而原子内部的众多自由度对物质的比热没有贡献呢？这是否意味着经典物理学的原理不适用于原子内部呢？这确是一个难解的谜。

鉴于这种形势，开尔文在1900年展望新世纪物理学的著名演说里，就把能量均分学说的困难当做与以太漂移问题并列的"第二朵乌云"。他断言说气体比热的预测值"与观察的明显偏离绝对足以否定玻尔兹曼-麦克斯韦学说。"

然而，首先取得突破的却是热辐射的频谱分布。1859年，基尔霍夫(G. R. Kirchhoff，1824—1887)指出，在达到热平衡的条件下，理想辐射体即"完全黑体"发出的辐射能量对波长或者频率的分布，仅决定于其温度。1895年，卢梅尔(O. Lummer，1860—1887)和维恩(W. Wien，1864—1928)用开有一个小孔的空腔实现了对于这种"黑体辐射"的观察。1893年，维恩用热力学理论研究不同温度下的黑体辐射强度的波长分布，导出了关于其强度最大值的波长与绝对温度的乘积为常数的"位移律"。1896年，他又假设电磁辐射可以看做是服从麦克斯韦分布的气体，从而推出了辐射能密度的频率分布

$$\rho \propto \nu^3 e^{-a\nu/T}$$

这一结果被称为维恩定律，容易看出，这一分布函数具有在低频和高频的两头趋于零而中间部分突出的形状。起初掌握的实验数据同这条定律符合得相当好。

被这种与具体物料无关的能量分布普遍性质吸引到这一研究领域来的，有一位热力学的能手普朗克(M. Planck，1858—1947)。1899年，他假设在黑体辐射腔体里同电磁辐射相互作用的是一种线性谐振子，求得辐射能同这种振子的平均能量U的关系为

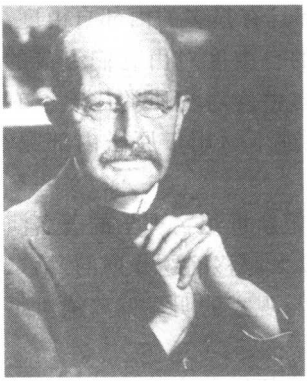


图 4.13 普朗克(M. Planck, 1858—1947)

$$\rho = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}U$$

本来,对这一式子里的 U 运用一维振动的能量均分定理 $U=kT$,马上可以得到

$$\rho = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}kT$$

这就是瑞利在 1900 年 6 月发表的,后来称为"瑞利-金斯"公式的定律。

但是,普朗克一直倾向于现象论的观点,对于热力学函数的偏爱,使他对基于原子论的统计方法不够注意。1900 年的秋天,普朗克还不知道瑞利的文章。然而,他从同事鲁本斯(H. Rubens, 1865—1922)那里知道了这一点,后者同库尔鲍姆(F. Kurlbaum, 1857—1927)合作的实验亦得出了与瑞利定律相同的结果。他们观察的是低频范围,即接近 $\lambda T \to \infty$ 的区域,在这一区域里新的测量数据明显偏离了维恩定律。

事实上,在这一年里有好几位物理学家都试图用几个简单的函数因子相乘的办法,来拟合辐射频谱的最新数据,但都没有取得成功。

普朗克走的是另一条路线。他没有直接去调和对中高频适用的维恩公式和对低频适用的瑞利公式,或者说没有直接对这两条公式进行"内插"。普朗克巧妙地运用热力学的方法,算出相应于维恩公式,平衡状态下系统的熵 S 对内能 U 的二阶微商是

$$\frac{d^2S}{dU^2} \propto -\frac{1}{U}$$

而对于瑞利公式则有

$$\frac{d^2S}{dU^2} \propto -\frac{1}{U^2}$$

于是，他很自然地，也是很走运地假设了常常亦被称为“内插”的过渡公式

$$\frac{\mathrm{d}^2 S}{\mathrm{d}U^2} \propto \frac{\alpha}{U(\beta+U)}$$

通过计算，并且从维恩位移律确定式中的常数 $\alpha=-k$，$\beta=h\nu$，便得出著名的关于线性谐振子平均能量的普朗克公式

$$U = \frac{h\nu}{\mathrm{e}^{h\nu/kT}-1}$$

和相应的辐射能谱定律

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

1900 年 10 月 19 日，普朗克向德国物理学会报告了这一结果。鲁本斯当晚就拿这条公式同他的实验数据作比较，发现在各个区域都符合得很好。

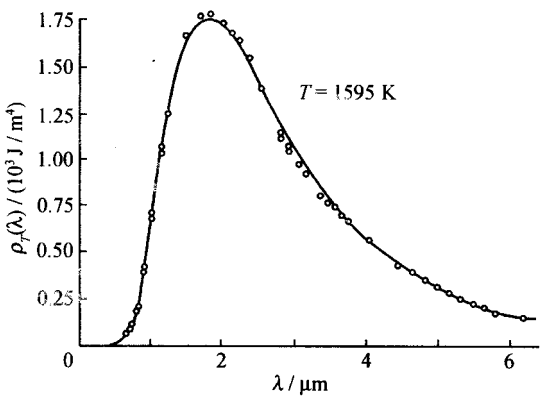


图 4.14　黑体辐射能谱的实验数据，曲线按普朗克公式绘出

容易看出，在 $h\nu \ll kT$，即在后来设定的能量子 $h\nu$ 比热运动能量小得多的极限下，由于振子能量接近于连续分布，普朗克的平均能量函数 U 回复到经典的能量均分值。而在 $h\nu \gg kT$ 的相反的情

况下，即在能量子 $h\nu$ 不比热运动能量小多少或者比它大得多的情况下，振子能量的不连续性显得突出，这种运动比较难于激发，平均能量函数 U 就会比能量均分值小得多。

普朗克的公式实际上对平均能量总与温度成比例的能量均分定理提出了挑战。然而，以上简化的概括叙述并不代表普朗克原来的思路，事实上他可能事先不知道有这条定理，因为他以前不大熟悉统计物理学的方法。其实，从瑞利的公式已经可以看到，如果能量均分定理普遍成立的话，在包含空腔与辐射的系统里，有限自由度的腔体物质的能量终将耗尽给无限自由度的腔内的电磁辐射，根本不可能达到热平衡。所以，能量均分定理肯定要修改。

普朗克提出辐射公式之后，一鼓作气地着手对它作出物理解释。他很快发现，他所拿手的热力学普遍理论是不可能解决这个问题的。出于无奈，他转而求助于从前不喜欢的热力学的统计观点，尝试使用玻尔兹曼的方法，写下了熵同概率的关系 $S=k\log W$。普朗克后来把他所采取的这决定性的一步称为“孤注一掷的行动”。

为了进行概率统计的计数，需要把振子的能量划分成一小块一小块的“能量元”ε，振子能量的取值只能够是它的整数倍。我们在上一章里已经提到，玻尔兹曼在 1877 年的文章里，已经使用了这种概率计算的方法，并且对其结果取 $\varepsilon\to 0$ 的连续极限。普朗克无疑得益于玻尔兹曼的概率方法，事实上在那段时期里两人亦有过书信往来，并且正是玻尔兹曼向普朗克给出了有益的指引和提示。

不过，普朗克采取了一个前无古人的关键假设，在他的推导里“能量元”ε 不再是一种最后要趋于零而被抹掉的中间手段，而是始终当做真正的能量最小单元。亦即是说，普朗克假设振子的能量分布实际上是不连续的，它的取值只能够是 ε 的整数倍。采用

概率统计的方法，普朗克重新推导出他的辐射公式所需要的熵的表示式，并且通过与辐射定律的比较确定了 $\varepsilon=h\nu$。普朗克把其中的 h 称为“作用量子”，因为它具有作用量的量纲。后来人们把它称为普朗克常数，它标志了量子效应的尺度。

这一工作发表于 1900 年 12 月 14 日，第一次把本质上的不连续性引进物理学，这一天就被认为是量子的生日。普朗克的辐射定律由于同实验符合得很好，马上受到了普遍的承认。但是他的量子概念太不合常规，开始没有得到多少支持。再说，如果提出一个假设只解决了单独一个问题，那只是一种“特设假定”，并不能算是真正的成功。为了赢得这场革命的胜利，量子物理学还要在另一些阵地上再次发起冲击。

后来知道普朗克依赖于振子模型推导辐射定律的方法是不完善的。1908 年德拜根本取消了普朗克的电磁振子，直接考虑辐射体同电磁场的平衡，便能够从能量子的假设导出普朗克公式。这就是今天在许多教科书里采用的方法。1924 年，玻色（S. N. Bose，1894—1974）在他的论文《普朗克定律和光量子假说》里，提出了全同粒子的一种新的统计方法，能够完全不借助经典的电磁理论而导出普朗克定律。这实际上是量子统计方法的首次应用。玻色先把这篇文章的英文稿寄给爱因斯坦，爱因斯坦读过后亲自译成德文推荐发表，并且用这种统计方法成功地处理了单原子理想气体及其涨落问题。这就是玻色-爱因斯坦统计的由来。

如果说普朗克引进能量子的概念是不得已而为之的话，爱因斯坦提出光量子则多少是一种自觉的延伸。在他 1905 年发表的文章《关于光的产生和转化的一个试探性观点》[10] 的引言里指出，“光学观测都同时间平均值相关……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去时，这种理论会导致和经验相矛盾。”

对麦克斯韦的连续场理论的这场改造，是从对于黑体辐射的

考察开始的。爱因斯坦认为，在普朗克的推导里，对振子取分立的能量值，同时对辐射场采取连续的能量分布，本身就是一个矛盾。在这篇文章的前半部分，爱因斯坦考虑在维恩公式有效的范围内，包围在固定体积的空腔里的低密度单色辐射，计算出辐射的熵后，按照玻尔兹曼的方法去解释，就得出如下结论："如果……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 $R\beta\nu/N$ [$=h\nu$]的能量子所组成的不连续媒质一样，那么，接着就会使人想到去研究，是否光的产生和转化的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。"

由此可见，光量子的概念，是爱因斯坦首先从对黑体辐射的研究中论证得来的。接着，在文章的后半部分，他把这一结果运用于解释光致发光和"固体通过辐照而产生阴极射线"（即光电效应）等几种现象。

光电效应是 1899 年由汤姆孙和勒纳德两人独立发现的。1902 年，勒纳德进一步的实验证明了，这种效应中所释放的电子的速度或者能量仅决定于光的频率而与光的强度无关，光强只决定释放电子的数目。显然，这一规律是用能量连续分布的电磁场的作用所无法解释的。

爱因斯坦指出，认为"能量子钻进物体的表面层，并且它的能量至少有一部分转换为电子的动能"，就可以解释勒纳德的观察结果。爱因斯坦由此得出了著名的光电效应定律：

$$\text{光电子动能} = \text{光量子能量}(h\nu) - \text{金属脱出功}$$

可是，由于当时光电效应的实验工作还很粗糙，尚未能对这一关系式进行检验。直至 1916 年，密立根等人所做的精密观测才证实了爱因斯坦公式的有效性，并且测定了多种金属发射光电子的频率阈值。由此可以理解到，为什么在爱因斯坦 1905 年推出光量子假说之后十年之久，依然得不到多少人的支持。

尽管如此，爱因斯坦仍然坚持在这方面努力探索。1917 年，

他在《辐射的量子理论》一文里进一步提出，光的能量子即光量子不仅具有一份能量 $h\nu$，而且也携带着一份动量 $h\nu/c$。这一论断亦在 1923 年被康普顿(K. T. Compton，1892—1962)关于电子受 X 射线散射的实验，即“康普顿散射”所证实。不久之后，这种光量子在 1926 年由刘易斯(G. N. Lewis，1875—1946)命名为“光子”，被广泛承认为一种粒子，康普顿散射就可以认为是电子同光子的散射。

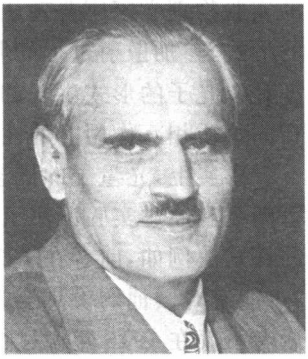


图 4.15　康普顿(K. T. Compton，1892—1962)

这里有一个值得注意的问题。爱因斯坦在 1905 年文章的导言部分是这样叙述他的推理的：“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［即光电效应］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说来解释，似乎就更好理解。按照这里所设想的假设，从点光源发射出来的光束的能量在传播中不是连续分布在越来越大的空间之中，而是由个数有限的、局限在空间各点的能量子所组成，这些能量子能够运动，但不能再分割，而只能整个地被吸收或产生出来。”这里的后一句话，包含着光是由光子组成的，或者光束可以看做是光子流的意思。

然而，事实上包括光电效应和康普顿散射在内的一切有关实验，都只证明了在“光的产生和转化”，即光与物质相互作用的过程中是以光子的形式起作用的，没有任何实验证明过光在自由传播的过程中也是以光子的形式存在的。例如，1927 年，康普顿在诺贝尔物理学奖受奖演说里说：“这个实验直接证明了定向辐射量子的存在，表明每一个反冲电子都伴随有 X 射线散射。……因此，散射的 X 射线是以光子的形式发出的……”[11]。由此可见，严谨

的实验物理学家康普顿认为自己的实验证实了的，正是光“以光子的形式”参加散射过程的假设，而没有说成证明了光在传播过程中亦是以光子的形式出现的。爱因斯坦上面那段话里，实际上把光在同物质相互作用时的性质，缺乏根据地外推到传播中的光。

事实上，光量子的概念一开始就受到最早提出能量子概念的普朗克和通过实验证实了光电效应公式的密立根等一流物理学家的怀疑。例如，前者在 1913 年为爱因斯坦写的(联名)推荐信说：“可能有时候他的设想会迷失方向，例如，他的光量子假说……”；后者不仅在 1916 年说过：“爱因斯坦推导公式所依据的半微粒理论，现在看来是完全站不住脚的”，直到 1948 年他还在说：“它(光子)得到了确实的证明，尽管它不合理；因为它似乎违背了我们所知道的一切关于光的干涉的事实。”而爱因斯坦自己在 1911 年第一届索尔维会议上也是这样提到他的光量子假说的：“我坚持认为这个概念具有暂时性的特征，因为它与已由实验验证过的波动理论的结果不相协调。”[12]

此外，玻尔(N. Bohr，1885—1962)1923 年所表示的对于光子概念有保留的话：“虽然由爱因斯坦关于光电现象的预言的证实而显示出这一假设的巨大的启发性价值，光量子的理论仍然明显不能满意地解决光传播的问题”[13]，亦不是没有道理的。我们下面先谈谈比热的初期量子理论，以后还要回到这个话题上来。

1906 年，爱因斯坦发表文章《普朗克的辐射理论和比热理论》，首次用量子论的观念去处理固体比热问题。作为初步的尝试，爱因斯坦简单地将普朗克的给定频率的振子的平均能量 U 的公式去代替与温度成正比的能量均分数值。这样求出来的比热自然不再是与温度无关的常数，结果可以定性地解释实际固体为什么在常温时遵从杜隆-珀蒂定律，而在低温时则比热减小，并且预言在接近绝对零度时比热趋于零。

20 世纪初年，正是低温物理学迅速兴起的年代。1906 年，能

斯特(W. Nernst, 1864—1941)从他的“热力学第三定律”,即关于物质系统的熵在接近绝对零度时趋于极限值的陈述,推测在极低温度时比热亦趋于一个与具体物质的特性无关的极限值。根据爱因斯坦,这一极限值应当是零。

能斯特的随后的几年里致力于低温下的比热测量。1910 年,他的实验结果显示固体比热在极低温度下确实变得很小或者接近于零,证实了爱因斯坦的预言。考虑到那时候光电效应的精确测量尚未完成,关于固体比热的规律就成为继黑体辐射之后,第一个支持量子理论的有力佐证。不过,爱因斯坦过于简单的理论模型里得出的在接近绝对零度时比热的指数式变化关系,与进一步实验的细节不相符合。1912 年,德拜(P. Debye, 1884—1966)改进了爱因斯坦的计算,把振子的单一频率换成像在黑体辐射里用过的那种连续的频率分布,结果求得在接近绝对零度时固体比热与温度的三次方成正比的规律,同新的观测数据符合得很好。

了解到经典统计物理学里的能量均分定理的局限以后,气体比热问题亦在量子理论里得到圆满的解决。这是因为,除了分子整体平动的动能仍然是连续变化的,因而占着一份由能量均分定理决定的能量之外,分子的整体转动和各种振动的自由度也存在着各自的能量不连续性(能级),当温度降低到不满足热运动能量的量级 kT 远大于其能级间距的近似于连续分布的条件时,这些自由度的运动不容易被激发,它们对气体比热的贡献就会逐渐减小甚至消失。

至于原子内部有哪些运动自由度以及这些自由度为什么对物质比热没有贡献的问题,暗示了原子内部是一个全新的天地,那里会有全新的动力学,全新的运作规则。这正是我们下面要讲的内容。

4.4 从卢瑟福的原子模型到玻尔的量子论

自从发现了电子并且确定它是原子里面负责发出光谱线的组分之后，物理学家们就开始了对于原子内部构造的猜测。起初只知道原子里面有带负电荷的电子，而对于一个中性原子内部必定含有的带正电荷的成分一无所知，于是就出现了主要考虑由电子构成的一些物质模型，例如上面提到过的洛伦兹的电子论。与此同时，亦出现了假设原子由几百个甚至上千个电子组成的模型。这一类原子的电子模型最早是由汤姆孙在 1897 年提出的，他在 1903 年亦讲过，“氢原子里面包含有大约一千个电子。”在这种模型里并没有考虑正电荷所起到的作用。

当时认为原子里需要有这么多电子的第一个原因，显然是以为原子的质量主要是由这些电子贡献的。那时候已经测定了电子的质量，晓得了最轻的原子——氢原子的质量亦比电子的质量大一两千倍。另外一个原因是在上一节里讲过的，那时候已经知道，最简单的原子也会发射许多条不同特定频率的光谱线，按照经典物理学的振动理论，这些原子必定是具有许多个运动自由度的系统，所以一个原子里头不可能只有少数几个粒子。不过，这种原子的电子模型，除了说明其质量来源之外，似乎没有什么别的效用。同一时期，金斯(J. H. Jeans，1877—1946)和勒纳德也分别提出过原子由一些粒子对构成的模型。这些一对对的粒子里有一个是电子，另一个是带相同大小的正电荷的粒子，其质量或者与电子相同，或者比它大得多。这些模型亦没有取得什么实质性的进展。

还值得提到的是原子的行星模型。1901 年，佩兰就设想过，原子由一个或者几个带正电的“太阳”和一些带负电的小“行星”组成。1903 年，日本物理学家长岗半太郎(H. Nagaoka，1865—1951)又从麦克斯韦关于土星光环稳定性的研究得到启发，提出原

子的土星模型。在他的模型里，处在原子中间的是一个带正电的球体，在它周围有许多聚集在一个个环绕着中心球体的圆环上运动的电子。长岗还试图用这些电子所做的振动来解释观察到的原子光谱线系，但没有得到满意的结果。再说，电子之间强烈的库仑排斥力使得他的"土星环"不可能是稳定的，这是这一类模型的一个致命的弱点。尽管如此，长岗的工作亦曾受到庞加莱和卢瑟福的注意和引用。

第一个只用少数电子构造的、也是第一次尝试解释元素周期表的原子模型，是汤姆孙于 1903 年提出的他的第二个原子模型，亦即比较著名的"葡萄干布丁"模型。在这个模型里，汤姆孙吸收了两个方面的素材。第一方面是美国物理学家迈厄（A. M. Mayer，1836—1897）在 1878 年发表的用飘浮磁铁来模拟原子内部作用力的实验。迈厄把一些小磁针穿进木塞，按相同的极性竖直漂浮在一个容器内的水面上，而在容器上方悬着一块取向相同的大磁铁。他发现，在大磁体磁场的背景影响之下，互相排斥的小磁针会形成一些规则模式的稳定分布。例如，当磁针数目 n 不超过 5 时，它们会形成稳定的正多边形；$n=6$ 时，会有一根磁针位于中心；$n=15$ 时，从内到外会形成 1，5，9 的三层分布等等。汤姆孙注意到他的结果，认为那可能是周期律机制的一种提示。第二方面的启发是开尔文 1902 年发表的一篇文章，其中开尔文假设原子内部的正电荷分布是充满着整个原子体积的均匀的球状构形。汤姆孙很快就采纳了这一图像，并且于 1903 年提出了他的第二个原子模型。

在汤姆孙的模型里，把迈厄的磁作用换成静电作用，假定原子的结构是在一团弥漫分布的正电荷物质里镶嵌着一颗颗点状电子，就像一颗颗葡萄干镶嵌在一块蛋糕里一样。汤姆孙假定这些电子在保持一定的构形的同时，亦存在着某种旋转运动。从 1904 年开始，他企图通过对这种静电结合模型的计算，推导出原子里的

电子壳层结构。1906 年，汤姆孙得出这样论断："一个原子里所含电子的数目，同物质的原子量有相同的量级。"并且，氢原子里电子的数目，"不可能比 1 大得很多。"此外，他还指出，原子里正电荷物质的质量，不会小于所含电子的总质量。从前面的介绍我们已经知道，这些结果都是与当时的一般看法相悖的。虽然汤姆孙模型的具体机制后来被证明是不适当的，但他所得到的这些与众不同的结论，对日后的发展确实给出过有益的启迪。[14]

到 20 世纪初年，对各种元素原子光谱线的实验研究已经有半个世纪的历史，并且积累了丰富的精确数据，但是还没有哪一种理论能够解释哪怕是最简单的氢原子光谱；这种情况表明了，只凭元素的光谱数据或者再加上化学性质，并不能确切地了解原子内部的构造。只是在放射性发现之后，提供了适用的粒子（射线）束源，以及发展了有关的探测技术，才开辟了运用碰撞（散射）手段来研究原子内部的结构和相互作用的方法，从而在这方面取得了真正的进展。

在对放射性现象的研究方面取得领先地位的卢瑟福，从 1906 年起又开始运用 α 粒子轰击物质，观察由此引起的反应。他的一名助手盖革（H. Geiger，1882—1945）在 1908 年发表的一篇文章里，描述了用闪烁技术观察到的 α 粒子在铝箔和金箔上的散射数据，得出结论说："有一些 α 粒子……被偏转到很可观的角度。"这件事引起了卢瑟福的注意。1909 年，盖革和马斯登（E. Marsden，1889—1970）合作进行进一步的研究，得出定量的结果"入射的 α 粒子中大约有 1/8000 被反射"。这里讲的"反射"即散射角大于 90°的情形，也叫做"反向散射"或者"背散射"（back-scattering）。卢瑟福曾经这样描述他对这一结果的反应："这就像你把一颗 15 英寸的炮弹发射到一张薄纱纸上而它竟回过头来击中你一样不可思议！"

本来，从牛顿力学里对于二体弹性碰撞问题的运动学分析可

以知道，在实验室参照系里当入射粒子的质量大于静止的靶粒子的质量时，前者只会受到散射（偏转）角小于 90°的向前散射；只有当入射粒子的质量小于靶粒子的质量时，它才有可能受到散射角大于 90°的向后散射。在这一结果的推导里只运用了能量和动量守恒定律，而不需要知道碰撞的具体相互作用形式。[15]此外，接连通过多次碰撞达到大角度散射的机会是微乎其微的。因此，盖革实验的结果实际上表明了，在原子内部一定存在着质量大于 α 粒子的带电颗粒；而且，既然原子里面已经肯定存在着一些带负电的电子，这种大质量的粒子显然应当带的是正电荷。然而，在汤姆孙的葡萄干布丁模型里，带负电的电子的质量远小于 α 粒子，而分布在整个原子范围内的正电荷比带负电的电子还要分散，因而是不可能使入射的 α 粒子向后方返回的。

我们不清楚卢瑟福当时是不是掌握了这种推理步骤。虽然从笛卡儿、惠更斯（C. Huygens，1629—1695）和牛顿等前辈开始，已经对碰撞问题逐步开展了由浅入深的研究，后来在麦克斯韦和玻尔兹曼的统计物理学里又运用过刚球等模型去计算原子分子间的碰撞机会，但到那时候为止，似乎还没有人想到过怎么样从散射末态粒子的角分布去了解靶物质的微观结构。

卢瑟福为了解决 α 粒子受到静电库仑力散射的问题，苦苦奋斗了两年之久，在 1911 年发表了后来以他的姓氏命名的著名的微分散射截面公式。用现代的符号表示，他的计算结果是

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega}=\frac{N^2N'^2e^4}{4m^2v^2\sin^4(\theta/2)}$$

式中的 N 和 N' 分别是视作质量为无限大的靶粒子和质量为 m 的入射粒子的电荷数。

在这一理论基础上，卢瑟福提出了原子的有核模型。在他的模型里，假设一个含有 N 个电子的原子，有“$\pm Ne$ 的一个电荷位于它的中心，……为了方便起见假设其符号为正。”他在这句话里

没有完全确定中心电荷的极性，是因为上述散射公式的结果是与其无关的。虽然如此，在实际论证中，他都是认为原子中心有一个带正电荷 Ne 的核，而核外有 N 个电子在一个球内均匀分布。卢瑟福证实了上述截面公式所表示的角分布同盖革和马斯登的实验数据基本符合。他还由点模型的有效性，估计原子核的大小在 3×10^{-12} 厘米以内。

但是，公式中原子核的电荷数 N 仍然是未知的。在卢瑟福 1911 年的文章里，将他的散射截面公式里的 N^2 因子同盖革和马斯登对从铝到铅的不同靶体的实验结果做比较，亦只能得出核电荷数"同原子量成正比"的初步猜测。1914 年初，他又根据新的实验数据，估计原子核的电荷数约为其原子量的一半。

真正的进展是由荷兰的一位律师和业余科学家范登布罗克(A. J. Van den Broek，1870—1926)取得的。他从对元素周期表的研究，结合 α 粒子散射的新结果，于 1913 年底提出，核电荷数应当是独立于原子量的、周期表里的原子序数(Z)。

为了检验范登布罗克这一假设，卢瑟福的另一名助手莫塞莱(H. G. J. Moseley，1887—1915)对大量元素的 X 射线谱线的波长进行了系统的研究，给出了肯定的结论。事实上，他亦是第一次运用物理学的方法整理了元素周期表的排序，纠正了一些过去单纯运用化学方法所造成的疏漏。例如，过去只凭原子量的大小，把 $Z=28$ 的镍排在 $Z=27$ 的钴的前面。现在他根据物理学效应作出了更正。

在卢瑟福的那个时候，物理学家们掌握的只有经典物理学，他的公式自然是运用牛顿力学的原理，即计算 α 粒子运动轨道受到的偏转而推导出来的。我们后来知道，微观粒子的散射问题应该运用量子力学来处理，牛顿力学里的轨道概念原则上是不适用的。但是，后来量子力学得出的库仑散射截面的精确解或者某种近似解，还有量子电动力学里计算出的库仑散射截面的低能近似的结

果，又都是与卢瑟福公式完全一样的。所以，可以说卢瑟福是用错误的方法得到了正确的结果。如果说不出什么道理的话，我们只能够认为这仅仅是一种巧合。

有些作者给出论证，认为卢瑟福当时的实验情况，满足量子力学过渡到经典力学的近似条件，因而可以合理地运用牛顿力学的方法。这样的讲法是没有什么说服力的，因为卢瑟福公式与量子力学里的相应公式是完全相同的，不是什么近似结果。而且，这一公式可以运用于很宽的能量范围，包括了不满足经典近似条件的范围，亦可以运用于质量很小的电子那样的不可以做经典近似的情况。

实际上，卢瑟福的运气除了得出巧合的理论结果，确实亦与他们当时的实验条件有关系。不过那不是经典近似是否成立的问题，而是涉及的物理机制的问题。他们当时使用的是天然放射性物质的 α 射线源，其能量大约是 5 MeV。一方面，这一能量足够高，使得入射 α 粒子的运动不会受到众多核外电子吸引的明显干扰。另一方面，这一能量又不太高，否则 α 粒子就会克服同原子核的静电排斥势垒，钻到原子核的内部发生强烈的核作用，不再是单纯的库仑散射了。所以，卢瑟福有幸遇到适当的物理条件，这才是他得以成功的关键。

在卢瑟福提出原子的有核模型之前，已经有些物理学家在原来的原子模型的基础上，放进普朗克的能量子概念，企图作出进一步的说明。

第一个同普朗克的“作用量子”挂上了钩的原子模型，是 1910 年由哈斯(A. E. Haas，1884—1941)提出来的。他设想电子在汤姆孙的“葡萄干布丁”原子的表面上做回转频率为 ν，半径为 a 的圆形轨道运动。并且假定电子的静电势能的大小 e^2/a 等于普朗克的能量元 $h\nu$，再运用在平衡状态时离心力同库仑引力相等的关系 $4\pi^2 m\nu^2 a = e^2/a^2$（$e$ 和 m 分别是电子的电荷和质量），就可以得

出关系式 $h=2\pi e\sqrt{am}$。本来由此就可以推导出这种原子的半径 $a=h^2/(4\pi^2e^2m)\approx10^{-8}$ 厘米，即后来的氢原子的玻尔半径，但是哈斯的出发点是运用这种经典物理学的原子结构机制来“解释”普朗克的作用量子，自然不可能会有什么突破。

另一个这一类的模型，是在同一年里，由尼科耳孙(J. W. Nicholson，1881—1955)提出的。他以长岗的“土星模型”为基础，设想电子在带正电荷的中心球体外面的“光环”上做环绕运动。尽管他同时假设最简单的氢原子也是由几个更基本的“原始原子”组成，但也居然从电子环的势能对其绕转频率之比等于普朗克常数的整数倍的条件，导出了那些“原始原子”的角动量等于 $h/2\pi$ 整数倍的、后来叫做“角动量量子化”的规律。他的这一工作，后来也受到了玻尔的注意。

在卢瑟福的原子的核式模型里，核外的电子不可能是静止不动的，不然它们就会同原子核吸附到一起了；起初设想这些电子像众行星绕着太阳那样绕着原子核做轨道式的运动，因此这个模型也叫做原子的“行星模型”。不难看出，哈斯和尼科耳孙的推理，都可以套用到这个新模型上去。



图 4.16 玻尔(N. Bohr，1885—1962)

1912 年春天，玻尔从丹麦哥本哈根去英国曼彻斯特跟随卢瑟福做研究时，被这种原子的行星模型深深吸引住了。他很快就领悟到，成为当时热门话题的放射性现象牵涉到元素的转变，必定来自原子核内部的变化；而原子发出光谱线，则归因于核外电子(价电子)的运动。困难在于，一方面，按照经典物理学，带负电的电子沿着弯曲的轨道绕着原子核回转的时候，必

定由于其加速度而不可避免辐射出电磁波，从而逐渐损失它的能量。因此，这种运动状态不可能是稳定的。另一方面，就像经典力学里对靠引力维系的行星轨道的大小不存在着任何限制一样，仅仅靠电子的电荷 e 和质量 m 这两个参数不足以决定原子的大小。要算出原子的半径，就必须超出经典物理学，引进普朗克的作用量子。

1912 年年底，回到哥本哈根的玻尔，已经形成了以上的想法，并且决定应当从最简单的氢原子开始。而且，他从带电粒子，特别是 α 粒子通过物质时的能量损失的研究，运用同光的色散的比拟，由实验数据的分析，独立地认定氢原子里只有一个核外电子，而氦原子有两个，其他轻元素原子里的电子数目则约为其原子量之半，尽管当时实验物理学家们还没有完全弄清楚这一点。

可是，同前面提到而直到那时玻尔还没有看到的哈斯的工作一样，玻尔起初只考虑了氢原子的一个能量最低的状态即基态。氢原子数目众多的光谱线，看起来是太复杂了。1913 年初，当玻尔同他的同事汉森（H. M. Hansen，1886—1956）讨论这个问题时，对光谱学进展很熟悉的汉森立刻向玻尔介绍了巴耳末-里兹的简洁公式。

原来，瑞士的一位中学数学教师巴耳末（J. J. Balmer，1852—1898）1885 年已经整理出了可以概括氢原子的十多条光谱线的一个波长公式。后来，里兹（W. Ritz，1878—1909）把巴耳末的公式改用波长的倒数即波数 $\tilde{\nu}=1/\lambda$ 表示，并且加以推广，写成我们今天使用的形式：

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right), \quad n = 1,2,3,\cdots, \text{整数 } m > n$$

式中的 R 叫做里德伯常数，巴耳末原来的公式相当于 $n=2$ 的一套谱系。

玻尔后来回忆道："我一看到巴耳末公式，整个事情对我就马

上了如指掌了。”因为，从上式右方看到的前后两项“光谱项”的差，不是正可以对应着两个状态的能量之差吗？这一点给玻尔向氢原子问题发起全面的冲击，做好了最后的准备。

1913 年 3 月到 8 月，玻尔写作了题为“论原子和分子的组成”的一系列三篇论文，即著名的“三部曲”，奠定了“玻尔模型”即原子的量子论的基础。其中引入的三个主要的新概念是：

第一，“定态”的概念。假设原子里有一些具有分立能量值的电子轨道是稳定的，不需要从经典物理学对它们的稳定性做出解释。

第二，“量子条件”。定态的一系列分立能量值即“能级”，是由包含了普朗克的“作用量子”h 的“量子条件”决定的。这样一来，就把原子物理学带入了量子理论的新时代。

第三，“跃迁”的观念。电子从具有较高能量 E_m 的轨道跃迁到较低能量 E_n 的轨道时，就发出频率为 ν 的光辐射，并且满足下述的关系：

$$E_m - E_n = h\nu$$

这一公式显然是爱因斯坦的光量子能量关系的推广应用。

具体说来，玻尔先按照经典力学算出，电子的绕转频率 ν，原子能量 E，和轨道半径 a 的关系是（Z 是原子核的电荷数）

$$\nu = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{|E|^{3/2}}{Ze^2\sqrt{m}}, \quad 2a = \frac{Ze^2}{|E|}$$

再引入系统能级的量子条件

$$|E_n| = nh\frac{\nu}{2}, \quad n = 1,2,3,\cdots$$

注意到在力与距离平方成反比的情况下，系统的平均能量等于其平均势能的一半，所以这一条件实际上是与哈斯相同的。于是，玻尔从就可以由此推导出原子的大小，即玻尔半径，和定态能量，即只决定于主量子数 n 的能级（$n=1,2,3\cdots$）

$$E_n = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{n^2 h^2}$$

接着不难得出从跃迁的能量关系推得巴耳末-里兹的光谱系公式，并且算出的里德伯常数为 $R=2\pi^2 me^4/h^3$，同在光谱实验中已经知道的数值符合得很好。

玻尔在他的这些工作里还导出了在稳定的圆形轨道里电子的角动量必定是 $h/2\pi$ 的整数倍，即“角动量量子化”的结论。索末菲(A. Sommerfeld，1868—1951)受到这一结果的启发，于 1915 年把玻尔的量子条件推广到多自由度系统，表达成“任意坐标的相积分都是作用量子的整数倍”的公式

$$\oint p_k \mathrm{d}q_k = n_k h$$

据此在原子能级的主量子数 n 之外再引入角量子数 l 和 m，并且阐明了电子轨道平面对极轴的取向只能取某些分立数值的“空间量子化”规则。索末菲的这些成果，把玻尔模型里的一个圆形轨道推广到一系列的椭圆轨道，给出了原子能级的正确分类和跃迁的选择定则的依据。

1922 年到 1923 年，玻尔对多电子原子的问题亦做了深入的研究。他先用主量子数 n 和角量子数 l 对碱金属原子的能级做出定性的分类，接着又进一步用这种电子轨道分类的方法建立了原子的壳层结构，并且按照经验事实的提示来安排周期表里先后填充的各个壳层的可能轨道的数目。他从理论分析断定，原子序为 72 的元素，不是化学家们所期待的稀土元素，而应当是与锆的化学性质相近的非稀土元素。接着，哥本哈根大学研究所里的赫维西(G. von Hevesy，1885—1966)和科斯特(D. Coster，1889—1950)通过紧张的找寻，的确从锆英石中观测到这一新元素的特征光谱线，并且依照哥本哈根市的古老名称，把它命名为铪(hafnium)。

但是，除了最简单的氢原子，玻尔理论未能给出多电子原子的正确能级分布。而且，在谱系的强度和偏振的计算上，亦没有一种明确的方法。按照玻尔，解决这类问题，应当运用“对应原理”，即在大量子数下的连续极限下，“量子理论同经典理论形式上的相似”。1919 年，克拉默斯(H. A. Kramers，1894—1952)受到玻尔这种想法的指引，首次成功地计算出氢原子的一些斯塔克分量的强度和偏振，踏入了原子量子论的一个新的阶段。

对应原理的采用，表明了玻尔的模型远不是完善的理论，在解决进一步的问题时，还需要回过头来依靠经典物理学的拐棍。况且，对应原理只是一种原则性的指示，并不是一种有确定规则可循的工作程序，在具体实行的时候需要反复的猜测、摸索和试探。实际上，“它曾经以几乎是各不相同的方式运用于每一个问题。”[16] 看来，那段时间的这一类的工作，多少靠的是碰运气了。

总而言之，正如卢瑟福在收到了玻尔“三部曲”第一部分之后写的回信中，对玻尔说的那样：“你对氢光谱的产生所发表的观点是非常卓越的，看来很能说明问题。但是，普朗克的观点和古老的力学混合在一起，几乎很难使人对更基本的东西形成一种物理图象。”玻尔的原子模型首次成功地超出了经典物理学的理论，运用了量子论的一些原则。但它还没有完全同经典物理学划清界线。这指的是，它还不是一种动力学理论，缺乏系统和一致的概念基础，而只是经典物理学和新的动力学即量子力学之间的一种过渡性模型。在未来的量子力学里，将会采取全新的基本概念和严格的计算规则；玻尔模型里的电子轨道、对应原理等等，都将成为过去的历史了。

参 考 文 献

[1] A. Pais. Inward Bound: Of Matter and Force in the Physical World. New York: Oxford University Press, 1986；中译本：关洪、杨建邺、王自

华、傅冬梅译，《基本粒子物理学史》，武汉：武汉出版社，2002，2—11 章。

[2] 广重彻，《物理学史》，李醒民译，北京：求实出版社，1988，13—15 章。

[3] R. T. Lagemann, New light on old rays: N rays, Am. J. Phys. 45 (1977) 281.

[4] W. Broad, N. Wade，《背叛真理的人们——科学界的弄虚作假》，中译本，朱进宁，方玉珍译，北京：科学出版社，1988，121—124 页。

[5] 关洪，是病态科学，还是受伤的科学？——N 射线事件百年检讨，《科学文化评论》，2005 年 2 卷 2 期，100—107 页。

[6] 《马克思恩格斯全集》，第二十卷，北京：人民出版社，1971，453—508 页。

[7] E. Amaldi, Radioactivity, A pragmatic pillar of probabilistic conceptions, in *Problems in the Foundations of Physics*, G. T. di Francia (ed.), North-Holland, 1979, pp. 1—28.

[8] 详细介绍和推导亦可参看：E. Segré，《核与粒子》，上册，沈子威等译，北京：科学出版社，1984，第五章。

[9] M. 马利，原子嬗变的发现——法国和英国的科学作风与哲学，金吾伦译，《自然科学哲学问题丛刊》，1980 年 1 期，38—45 页。

[10] 《爱因斯坦全集》（第二卷），范岱年主译，长沙：湖南科学技术出版社，2002，131—147 页。

[11] 《诺贝尔奖获得者演讲集·物理学（第二卷）》，宋玉升等译，北京：科学出版社，1984，161—162 页。

[12] 转引自：A. Pais，《上帝难以捉摸——爱因斯坦的科学与生活》，方在庆等译，广州：广东教育出版社，1998，414，443—444 页。

[13] 参看：关洪，《一代神话——哥本哈根学派》，武汉：武汉出版社，2002，35—45 页。

[14] 参看：J. L. Heilbron, J. J. Thomson and the Bohr Atom, *Phys. Today*, 30 (1977) 4.

[15] 参看例如：D. Kleppner, R. J. Kolenkow，《力学引论》，宁远源、刘爱晖译，北京：人民教育出版社，1980，234—235 页。

[16] M. Jammer, The Conceptual Development of Quantum Mechanics, New York: McGraw-Hill. 1966, pp. 109—118.

第五章　微观粒子的量子力学描述

5.1　德布罗意波及其反响

在爱因斯坦于1905年和1917年先后提出光在与物质相互作用时表现为具有确定能量和动量的光量子，并且这一概念于1923年被康普顿散射的实验证实之后，物理学家们纷纷接受了光具有波动和粒子两种本性的观念。特别是包括布拉格（W. H. Bragg，1862—1942）和M. 德布罗意（M. de Broglie，1875—1960）等从事X射线衍射实验的物理学家们，都根据自己的研究成果相信这一观念，而后者无疑又把这方面的进展告诉了他的弟弟，正在巴黎攻读研究生的L. 德布罗意（L. de Broglie，1892—1987）。



图5.1　德布罗意（L. de Broglie，1875—1960）

L. 德布罗意1922年曾经运用爱因斯坦的光量子模型，研究过黑体辐射等问题。1923年夏天，他决定探讨像电子那样的粒子是不是亦反过来同波动有什么联系。当年秋天，他发表了几篇短文，描述了他的理论的要点；第二年又完成了博士论文《关于量子理论的研究》，综述了他的工作。

德布罗意提出："任何运动着的物体都会由一种波动伴随着，

因而不可能将物体的运动同波的传播分拆开。”他把这种波称为“相位波”。德布罗意又说过：“每一个微粒必然和一个波缔合，只要研究波的传播，就能为我们提供有关微粒在空间中的递次位置的信息。”因此他也把这种波叫做“缔合波”。德布罗意认为，为了使物质粒子的能量和动量同时满足量子条件和相对论的关系，就必须存在着这种与电子并驾齐驱的波动。

德布罗意的论证可以概括如下：按照相对论，物质粒子在其本身静止的参照系 S_0 里，能量是 $E_0=m_0c^2$，m_0 是它的静止质量。又由普朗克条件 $E_0=h\nu_0$，可将粒子看成在做一种频率为 ν_0 的振动，描写其振动的函数采取如下的形式

$$\sin\left(\frac{2\pi}{h}E_0t'\right)$$

t' 是在该参照系中的时间坐标。

今变换到对 S_0 以速度 v 相对运动的参照系 S。根据洛伦兹变换，这种振动函数变为如下的波动

$$\sin\left[\frac{2\pi}{h}E_0\left(t'-\frac{v}{c^2}x\right)\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}\right]$$

按照相对论，在运动参照系 S 里粒子的能量和振动频率亦分别变换为

$$E=\frac{E_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}},\quad \nu=\frac{\nu_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

恰好亦满足量子关系 $E=h\nu$。

此外，由波动函数的表达式可以看出，这种波动的相速度是 $u=c^2/v$。又由相速度的定义式 $u=\nu\lambda$，可以求出这种相位波的波长是（虽然在德布罗意原来的论文里没有写出最后的结果）

$$\lambda=\frac{u}{\nu}=\frac{c^2}{\nu v}=\frac{hc^2}{Ev}=\frac{h}{m_0v/\sqrt{1-v^2/c^2}}=\frac{h}{p}$$

式中的 p 是粒子的相对论动量。迈出了这关键性的一步，就可以

把运动参照系里的波动函数写成

$$\sin\left[\frac{2\pi}{h}(Et-px)\right]$$

的形式。亦即是说，对于具有能量 E 和动量 p 的粒子，伴随的相位波的频率为 $\nu=E/h$，波长为 $\lambda=h/p$。或者使用新定义的普朗克常数 $\hbar=h/2\pi$，将上式化简成 $\sin(kx-\omega t)$，其中的角频率 $\omega=E/\hbar$，波数 $k=p/\hbar$。最后，不难证明，这种相位波的群速度，即能量传递的速度等于粒子运动的速度 v。

光子的动量 $p=h\nu/c$，自然满足上述德布罗意关系 $\lambda=h/p$，因此可以把相应的相位波认作是原来的电磁波。但是，与现代教科书里的引述相反，德布罗意并不是直接把光的波长同光子的动量的上述关系式“推广”到电子那样的物质粒子，而是经过了以上的详细论证的。而且，那时候正是相对论大行其道之际，德布罗意作出的自然是相对论性的论证。

德布罗意假定电子的振动和引导着它的能量迁移的缔合波在相位上是同步的，并把这一概念运用到原子里的电子轨道，证明了当满足玻尔-索末菲的量子条件时，电子轨道的周长恰好等于相位波波长的整数倍。亦即是说，当相位波沿闭合轨道形成驻波时，原子达到稳定的状态。德布罗意由此宣称：“我们相信这是给出了玻尔-索末菲稳定性法则的道理的第一个物理解释。”

德布罗意相信，考虑了伴随着电子的相位波的新的力学同包括相对论在内的经典力学之间的关系，就像波动光学同几何光学的关系一样。可是，计算出来的电子波长比可见光甚至紫外线的波长都短得多，那么是否能够用实验直接验证这种相位波的存在呢？德布罗意在 1923 年的文章里写道：“从足够窄小的孔中穿过的电子束流，应当显示出衍射现象”，“沿此方向也许可以找出我们观念的实验证据。”他在 1924 年底的博士论文答辩会上回答提问时又说，通过电子在晶体上的衍射实验，应当有可能观察到这种假

想的波动的效应。

答辩委员会的主席郎之万将德布罗意的学位论文寄了一份给他的朋友爱因斯坦。爱因斯坦很高兴看到自己创立的光的波动-微粒二重性的观念，被推广到了电子那样的物质粒子。他那时候正在撰写关于“玻色-爱因斯坦统计”的第二篇论文《单原子理想气体的量子理论(二)》，于是就在文章里加上了一段介绍德布罗意工作的文字说：“德布罗意先生已经在一篇很值得注意的论文中指出了，一种物质粒子……可以怎样同一种波场相对应”，“在这篇学位论文中也对玻尔-索末菲的量子规则做了很值得注意的几何解释。”爱因斯坦的文章在 1925 年 2 月发表之后，由于他的公开支持，德布罗意波的概念很快就广为人知了。

爱因斯坦在这篇文章里亦讨论了用衍射现象检测这种与粒子运动相联系的波场的可能性。消息传到哥廷根，引起了玻恩(M. Born，1882—1970)和他的同事弗兰克(J. Frank，1882—1964)的兴趣。弗兰克和他们的一名学生埃尔萨瑟(W. Elsasser，1904—)分析了戴维孙(C. J. Davisson，1881—1958)等在 1919 年开始进行的一系列实验的结果。这些实验发现了从金属表面散射开来的慢速电子呈现出一种有规则的峰状角分布，而戴维孙误以为那样的结果反映了原子里不同的电子壳层的电荷密度。弗兰克和埃尔萨瑟却领悟到，这正是同熟知的 X 射线在晶体表面上的衍射相似的、一定波长的德布罗意波的衍射效应。埃尔萨瑟就这种问题写成一篇短文，也是在爱因斯坦的促成之下，于 1925 年夏天发表。

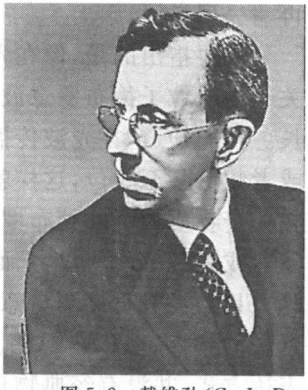


图 5.2　戴维孙(C. J. Davisson，1881—1958)

可是，1925 年戴维孙和他的助手革末(L. H. Germer，

1896—1971)在不知道埃尔萨瑟工作的情况下,在这一年的4月里由于实验室的一次意外事故,亦取得了关键性的进展。一天他们的液态空气瓶发生爆裂,实验用的玻璃管被震破了,涌入的空气使已经烧热了的镍靶严重氧化。他们在重新处理靶材料的过程中,意外地使原来的多晶态金属再结晶成单晶体。重新进行的实验显示出电子出射角度鲜明的峰状分布,观察到的最大峰值(布拉格角)与电子速度的关系正好满足相应波长的德布罗意波的衍射条件。

1927年开始,G. P. 汤姆孙(G. P. Thomson, 1892—1975, J. J. Thomson之子)亦通过电子透过极薄的金箔等金属箔片的衍射效应,从另一方面证实了"阴极射线表现得好像德布罗意理论中波长为 h/mv 的波一样。"这已经是量子力学诞生之后的事了。至于后来陆续成功地实现了原子束、分子束和中子束等类似实验,就不再一一列举了。

需要指出的是,像在光的干涉和衍射实验里的测量一样,所有关于物质粒子德布罗意波的实验直接测量到的,只是所涉及的波长。我们知道,在光波传播的实验里,还可以独立地测量光的速度或者频率甚至相位,这样就完整地测量出光波的各种性质。然而,在关于物质粒子的德布罗意波的实验里,从来不曾测量到相应的波速或者频率。所以,上面所讲的德布罗意波的频率或者速度,实际上只是没有直接测量意义的一些虚拟的参数。或者说,德布罗意波的频率 $\nu=E/h$,或者角频率 $\omega=E/\hbar$,不过是能量 E 的另一种表达方式,并没有经典物理学里描写波动或者振动快慢所用的频率参数的意义。

量子力学诞生之后,特别在薛定谔(E. Schrödinger, 1887—1961)把一切都说成是波动的观念影响之下,物理学家们普遍把电子本身看做是一种"物质波"。例如,1937年戴维孙在诺贝尔奖受奖演说《电子波的发现》里谈到"电子衍射的发现对于我们关于物

质波的物理真实性的信念是重要的和及时的。”而汤姆孙在因病推迟、于第二年春天才发表的受奖演说的题目亦是“电子波”。[1]

然而，按照德布罗意的原意，电子并不是波，亦不是后来人们常说的电子“有时候像波动，有时候像粒子”或者电子的行为“既像波动，又像粒子”。在他的观念里，电子这种微粒和指引着电子运动的相位波是两回事。所以，德布罗意的观点其实是“一边有电子，一边有波动。”1926 年开始，德布罗意沿着这条思路，提出所谓“双解理论”，在这种理论里，波动方程有两种不同的解，一个是量子力学里具有统计意义的连续的 ψ 函数，另一个是奇异解，其奇点代表电子那样的物理粒子。[2]

在 1927 年举行的第五届索尔维会议上，德布罗意在题为“量子的新力学”的报告中，提出了他的理论的新版本“导波理论”。德布罗意在这一理论里放弃了原先的奇异解，而认为量子力学里的 ψ 函数本身，既描写了粒子出现的几率，又是一种“导波”(pilot wave)，引领着个别粒子的轨道运动。他试图通过这种双重的机制，既保留了量子力学测量的统计性质，又进一步给出粒子运动的经典式的因果描写。

德布罗意的理论受到了与会的泡利(W. Pauli，1900—1958)的质疑。泡利指出，双解理论不能够适当地处理非弹性碰撞问题，因而不可能是一种普遍成立的理论。德布罗意抵挡不住泡利的凌厉批评，于是就偃旗息鼓，收起了他的双解理论。[3]



图 5.3　泡利(W. Pauli，1900—1958)

在量子力学发展的早期，已经有人不满足于它的统计式预言，而认为观察到的微观粒子的行为，是由未能直接观察的、由更深层次的“隐变量”



图 5.4 冯诺意曼(J. von Neumann, 1903—1957)

描写的某种服从经典式因果规律的运动决定的，就像经典统计物理学里宏观系统的性质是由微观层次的原子分子的运动决定一样。现在虽然已经找不到最早的隐变量理论的文献，但从冯诺意曼(J. von Neumann, 1903—1957)1932 年出版的《量子力学的数学基础》里专门给出的隐变量理论不可能性的证明看来，当时确实流行着那样的一派学说。而且，虽然德布罗意的“双解”或者“导波”理论形式上不完全是一种隐变量理论，但就企图在量子力学的公认框架之外找出经典式运动的决定性规律这一点说来，亦存在着共同之处。[4]

玻姆(D. Bohm, 1917—1992)1951 年出版的《量子理论》一书，是忠实地按照正统观念写成的，书中还热心地安排了一节“量子理论与隐变量概念不相容的证明”。可是，第二年他就转了一个大弯，发表了两篇用隐变量来解释量子理论的论文。他在文章中指出，冯诺意曼关于隐变量理论不可能的证明是有漏洞而不普遍成立的。



图 5.5 玻姆(D. Bohm, 1917—1992)

玻姆把量子力学里的波函数写成 $\psi=R\exp(\mathrm{i}S/\hbar)$，其中的 R 和 S 都是实函数，再假设粒子的动量是 $\boldsymbol{p}=\nabla S$，就可以从薛定谔方程，并通过与经典力学里的哈密顿-雅可比方程的对比，推导出质量为 m 的粒子的运动所遵循的方程

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}=-\nabla(V+Q),\quad Q=-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\nabla^2 R}{R}$$

这个运动方程同牛顿方程很相似，只是除了含有经典势 V 的项之外，还多出了含有 Q 的附加项。因此，玻姆把 Q 称为“量子势”，它反映了粒子运动的非经典性质。与此同时，在玻姆的理论里，仍然保留 ψ 函数的模方代表发现粒子的概率这一解释。因为粒子的初始坐标是不能直接测量的量，于是，这就可以看做是一种比通常的量子力学更深一层的一种隐变量理论。

玻姆对量子力学基本问题的探索发表后，引起了一场轰然大波。玻姆很快就晓得了，在德布罗意的双解理论和导波理论里，老早就表达了同他相类似的一些想法。德布罗意在收到了玻姆论文的预印本之后，觉得这一工作是他自己从前放弃了的想法的复活，亦认为同样存在着不可克服的困难。后来德布罗意转而支持玻姆的工作，并且重新捡起他的双解理论。由此可见，德布罗意也够摇摆不定的了，如果不说是机会主义的话。

可是，玻姆的理论受到了许多物理学家的批评。其实，在物理学发展的每一个阶段，有还是没有更深层次的动力学，在开始的时候主要是一个信念上的问题。这不是一种能够靠辩论来解决的问题，只是在这些“隐变量”能够导出新的理论结果并且受到实验证实时，才能赢得普遍的承认，原子论不就经过这样一段曲折的历程吗？

由于相信他的“隐变量”有朝一日会变成“显变量”，玻姆后来把他的理论改称“量子势方法”，或者“量子力学的因果解释”。他说的“因果解释”，指的是回到经典式的、对个别系统行为的因果式决定性。玻姆打过这样的譬喻，量子势好比一种波场，指引着物质粒子的轨道运动，就像飞机的飞行受到导航的电波的指引一样。由此可见，玻姆自己也承认他的基本思想是同德布罗意一致的。在 80 年代初玻姆和他的合作者们将量子势理论用来计算狭缝衍

射问题，演示出沿着不同轨道朝着同一方向投射的许多电子的运动因为受到量子势的作用而显现出衍射图样，取得了令人瞩目的合理结果。[5]

但是，玻姆理论除了不能够得到超出现在的量子力学范围的可以用实验检验的结果之外，还存在着根本性的困难。例如，这种理论不能够恰当地处理束缚态问题。所以，普遍认为玻姆的理论只是一种对量子力学的可能解释，而不是能够取代量子力学的一种新的动力学理论。

在 1957 年的一次讨论会上，英国物理学家玻普(F. Bopp)做了这样的评论："我们说玻姆的理论是不能否定的，但又补充说，我们不相信它。""物理学的任务已经规定为对实验的可能结果做出预言。而我们今天所做的却是预言物理学的可能的发展——我们不是在做物理学，而是在做形而上学。"这大概是如今多数物理学家对玻姆理论所持的基本态度。[6]

总而言之，今天我们没有根据相信在量子力学对微观粒子的描写之后，还需要未能观察到的更深层次下的动力学描述。原子、分子和粒子以及它们之间的相互作用已经足够用来描写物理世界，并非必须引入隐藏着的变量或者势场。在 20 世纪里关于隐变量的另一场重大争论及其检验结果，将在第八章里谈到。

5.2 海森伯的矩阵力学和薛定谔的波动力学

在上一章的末尾提到，玻尔和索末菲的原子模型既保留了牛顿力学的轨道方法，又引进了与经典物理学明显冲突的"量子条件"，在理论上"缺乏系统和一致的概念基础，而只是从经典物理学过渡到新的动力学即量子力学的一座桥梁"。这种新理论即量子力学的建立，却表现为一段双头并进，迂回曲折的故事。在这场继相对论的诞生而出现的、20 世纪里的第二次也是更深刻得多的一

次物理学基本理论的革命当中，走在前面冲锋陷阵的主角，既有泡利，海森伯和狄拉克等在20世纪初年出生的几位才思敏捷的年青人，也有比他们年长一辈的玻恩和薛定谔等正当盛年的物理学家。

首先出场的是海森伯(W. Heisenberg，1901—1976)。1920年，海森伯进入慕尼黑大学，成为索末菲的学生。在后者的指导下，海森伯曾经在玻尔-索末菲模型的基础上，研究过反常塞曼效应等原子物理学问题，表现出了他突出的独创能力。1922年6月，索末菲带着海森伯去哥廷根参加由玻恩筹办的“玻尔节”。在那里，海森伯不仅聆听了玻尔的学术报告，而且有机会同玻尔攀谈，在原子物理学的认识论问题上获得了深刻的教益，这些都是他闻所未闻的。虽然慕尼黑曾经是培养物理学家的一个著名的中心，但毕竟开始走下坡路了。玻尔在邀请海森伯日后到哥本哈根访问的同时，也建议他应当争取到哥廷根去向玻恩学习。

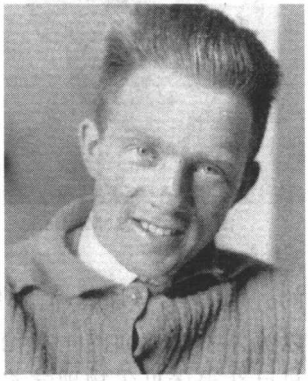


图5.6　海森伯(W. Heisenberg，1901—1976)

很快就有了这样的机会。1922年冬天，索末菲要离开慕尼黑去美国作一个学期的访问，商量好了让海森伯去哥廷根跟玻恩学习一段时间。1922年10月底。海森伯来到哥廷根，在这个数理大师林立的研究中心里，他真正开了眼界。当时玻恩小组的一个研究重点，是发展从天文力学的摄动方法里移植到物理学里来的微扰方法(“摄动”和“微扰”是同一个外语名词 perturbation 的不同译名)，深入探讨玻尔-索末菲的原子模型。海森伯在玻恩的指导下，合作用微扰论计算了氦原子的能量，但理论预言与实验并不符合。这样的结果，必定使得他们加强了要对原子物理学的理论动大手术的决心。



图 5.7 玻恩(M. Born, 1882—1970)

例如,在玻恩于 1924 发表的题为“量子力学”的论文里指出[7],由于还需要运用着许多经典物理学定律的量子论在氦原子等多电子原子问题上的失败,“力学本身将要经历一次变革”,“非常强烈地提出,要从经典力学过渡到一种新的‘量子力学’。”这是“量子力学”这一名词首次正式在文献中出现。

海森伯这次在哥廷根,虽然只度过了短短的五个月,但收获是非常大的。1923 年 3 月底,海森伯回到慕尼黑完成他的学业。7 月份,他以流体力学方面的一篇论文参加博士学位答辩。在答辩会上,对早已获得诺贝尔物理学奖的维恩提出的、同论文本身没有多大关系的一个又一个与实验原理有关的问题,海森伯都未能给出满意的回答。虽然由于索末菲的大力保荐,最后勉强通过,海森伯还是觉得非常之沮丧,连朋友们准备为他举行的祝贺晚会也没有参加,夤夜乘车离开慕尼黑赶到哥廷根去。

原来,事先玻恩已经同索末菲讲好,让海森伯拿到博士之后去做他的研究和教学的助手,接替已经离开了的泡利。玻恩早就看上了海森伯解决问题的杰出能力,没有计较他这次答辩的得失。在哥廷根期间,海森伯曾于 1924 年春假期间第一次到哥本哈根去,实现他两年前被邀请的访问。这一年 9 月到第二年 4 月,他又在那里逗留了一个学期。通过密切的接触,海森伯更加觉得“没有人像玻尔那样对量子理论的问题思考得那么深入。”“玻尔比任何其他人都更为量子论的不一致性而忧虑。”[8]在这一段时间里,海森伯先后同玻恩和克拉默斯合作,在对色散问题的研究中,运用和改造了玻尔的对应原理,取得了积极的成果。

1925 年 6 月，海森伯因患上季节性的花粉过敏症，向玻恩请准半个月假，到北海的一个宁静的小岛上疗养。就是在这里的聚精会神，使他终于来了灵感，想出了一种全新的解决办法。在下半月回到哥廷根后，他把新的想法整理成《论运动学和力学关系的量子理论再解释》一文[9]，7 月初把稿子交给玻恩请他审阅，看看有没有发表的价值，然后又匆匆赶到英国剑桥大学的卡文迪什实验室访问去了。

首先，这篇文章不是从旧量子论出发，而是彻底抛弃了玻尔模型里的电子轨道。论文的内容提要只有一句话："本文试图只靠那些原则上可观察的量之间的关系，建立理论量子力学的基础。"早在海森伯进慕尼黑大学前的那个暑假里，他就读过外尔（H. Weyl，1885—1955）介绍相对论的《空间，时间和物质》一书，深深地受到爱因斯坦的狭义相对论里对"同时性"分析的影响。海森伯认为，爱因斯坦的方法已经表明："当物理学家试图解决原则难题时，必须考虑的是可观察量。"正是这一思想决定了他的做法，在这篇文章里只考虑了光谱线频率和决定谱线强度的振幅等可观察量。[10]

其次，在克拉默斯对色散的研究中，在玻尔的对应原理的指引下，猜中了原子内部的电子同电磁场之间相互作用的正确表达式。这指的是，电子电矩的傅里叶分量的（绝对值）平方，决定着相应辐射的强度；或者说，可以把这种分量看做是相应的跃迁振幅。海森伯在先后同玻恩和克拉默斯对色散问题的合作研究中，已经掌握了这一点。不过，海森伯的数学不是那么好，氢原子问题对他说来是太困难了，所以他先去做一维简谐振子等比较简单的例子。

他的具体做法是，把玻尔模型里的跃迁频率 ν 加上表示初态和末态能级的两个量子数指标 n 和 $n-\alpha$，写成 $\nu(n, n-\alpha)$，这里的 n 是初态量子数，α 表示末态量子数的增值。然后依法处理每一个像坐标 x 或者动量 p 那样的变量的傅里叶分量（即对频率 ν 的展

开系数),就使每一个这样的分量都带上两个表示初末态的指标,例如 $x(n,\ n-\alpha)$。海森伯就这样建立了同一个经典的变量 x 相对应的一个数集 $\{x(n,\ n-\alpha)\}$,并且据此算出,同经典变量 x^2 对应的相应傅里叶分量满足以下的运算规则

$$x^2(n,n-\beta)=\sum_{\alpha}x(n,n-\alpha)x(n-\alpha,n-\beta)$$

海森伯就这样回答了在这篇文章前面所提出的问题:"如果用一个量子理论的量来代替一个经典量 x,那么要用什么来代替 x^2 呢?"

在由此出发而建立的一套"运动学"的数学程式的基础上,文章引入了玻尔-索末菲的量子条件以决定跃迁振幅。他又再次运用对应原理,将从变量 x 的傅里叶级数求微商的运算,换成对能级指标的差商,便算出了不久前由库恩(W. Kuhn)和托马斯(W. Thomas)两人独立得出的求和规则,即从同一能级出发的所有跃迁的电矩振幅平方所满足的公式。

作为例子,海森伯还求出了谐振子、非谐振子和刚性转子的能级。文章最后说:"这里提出的,运用可观察量之间的关系去确定量子理论数据的这一方法,可不可以看做是原则上满意的,或者到底是不是初步表达了构建理论量子力学的物理问题的一种方法……只有通过对在这里非常肤浅地应用了的方法的更深入的数学上的研究,才能够决定。"

看来海森伯对这篇文章不是那么有信心。这一方面显然是因为他的方法是前无古人的,另一方面也许是因为,在这篇文章里并没有求出可以同原子物理学里的任何实验数据直接比较的新结果。玻恩看过了海森伯的论文,首先觉得这正是在他们努力奋斗的进程上迈了一大步,就把它送出去发表。事实上,海森伯为了适应于他的数集的运算而把微分计算化为差分计算的方法,本来就是从玻恩的研究那里学来的。不过,玻恩对上面那种陌生的运算规则也觉得困惑不解。经过几天几夜的冥思苦索,他终于想起来,

海森伯的“数集”就是他在大学里学过的矩阵。因为，把海森伯使用的两个指标直接改成初态和末态的量子数指标 m 和 n，上面的求和式其实就是标准的矩阵乘法公式

$$(x^2)_{mn} = \sum_k x_{mk} x_{kn}$$

而且，在海森伯重新表述的量子条件里，正体现了矩阵乘法不可交换的特点。这就是后来把海森伯创始的这一套理论称为“矩阵力学”的原因。

玻恩由此看出，海森伯的工作已经为新的动力学打开了一个突破口，而这里还有一大堆数学问题亟待解决。这是因为，当时几乎所有物理学家都对矩阵运算很不熟悉。几天后，玻恩见到了两年前的助手泡利，表示希望后者来同自己合作，攻下这些难题。出乎他意料的是，已经由于提出“不相容原理”等贡献而变得很出名的泡利反应冷淡，甚至说出“我知道你喜欢冗长和复杂的形式主义，你琐碎的数学只会把海森伯的物理概念糟蹋掉”一类的话。[11]

第二天，玻恩找到他的另一位学生约丹(P. Jordan，1902—1980)帮忙。约丹那时刚刚结束了协助柯朗(R. Courant，1888—1972)编撰希尔伯特(D. Hilbert，1862—1943)同后者联名出版的名著《数学物理方法》的工作，数学是很好的。1925 年 9 月，玻恩和约丹很快完成了论文《关于量子力学》[12]。这篇文章的第一章介绍了矩阵计算。第二章是“动力学”，在这一章里，用哈密顿形式处理了单一自由度非简并系统的量子力学基础。他们将正则方程里的坐标 $\boldsymbol{q}$ 和动量 $\boldsymbol{p}$ 看成两个独立的矩阵，并且从旧量子论的量子条件导



图 5.8　约丹(P. Jordan，1902—1980)

出了它们满足的“对易关系”，即两个变量乘法交换之差所满足的关系式

$$\boldsymbol{pq} - \boldsymbol{qp} = (h/2\pi\mathrm{i})\boldsymbol{I}$$

式中的 $\boldsymbol{I}$ 是单位矩阵。

玻恩和约丹把上式称为“强量子条件”。然后在第三章里，运用这一套理论去处理谐振子和非谐振子，就自然算出海森伯的结果，而毋需像后者原先那样反复运用对应原理。

1925 年底，玻恩和约丹继续研究，并且同海森伯合作，以三个人的名义完成了《关于量子力学 Ⅱ》[13]。这一工作将前面的结果推广到多自由度和有简并的情况，系统地论述了矩阵本征值问题，定态微扰论和含时间的微扰论；作为应用的例子，导出了动量和角动量守恒定律，光谱线的强度公式和选择定则，还讨论了塞曼效应和耦合谐振子等问题。这篇文章给出了求解量子力学问题的合乎逻辑的一般方法，实际上奠定了以矩阵形式表示的现代量子力学的基本程式。

以上就是创立矩阵力学的“一人文章”，“二人文章”和“三人文章”的大概。与“三人文章”差不多同时完成的有狄拉克(P. Dirac，1902—1984)的《量子力学的基本方程》一文[14]，他异曲同工地得到与玻恩他们相似的结果，并且发现在新理论里的对易关系，在形式上相当于经典力学的“泊松括号”。原来，这是狄拉克在剑桥听到海森伯演讲之后，又看到了“一人文章”，就以惊人速度完成的工作。

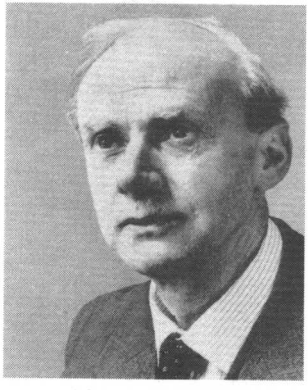


图 5.9 狄拉克(P. Dirac，1902—1984)

1926 年 1 月，又是差不多同时在不同的刊物上，分别发表了泡利与狄拉克运用新的矩阵力学解出

氢原子问题，推出玻尔理论里的能级公式以及巴耳末-里兹的光谱学公式等结果的两篇文章。这种矩阵代数的计算是相当复杂而陌生的，需要利用到除了轨道角动量之外的另一个守恒矢量（隆格矢量），充分显示了泡利和狄拉克的数学才能。这一空前的成功，无可争辩地证明了这种在基本原理上完全脱离了经典物理学的、新的量子力学至少是与旧量子论同样有效的。不但如此，泡利还运用微扰方法，轻易地解出了斯塔克效应和在交叉的电场和磁场作用下氢原子光谱线的分裂，而后一个问题是旧量子论始终未能够解决的。

下一幕的主角是薛定谔。虽然在他进入维也纳大学的那一年刚好遇上玻尔兹曼的不幸逝世，但亦深受这位统计物理学创始人的影响，做过不少这方面的工作。所以，薛定谔在阅读了上一节所说的爱因斯坦那篇发表于1925年初的《单原子理想气体的量子理论（二）》时，已经注意到德布罗意的研究了。



图5.10　薛定谔（E. Schrödinger，1887—1961）

当时薛定谔在瑞士苏黎世大学工作，而已经颇有名气的德拜（P. Debye，1884—1966）则在同一城市的联邦技术学院（ETH）任教，并且主持着由这两所学校联合组织的一个定期的物理学讨论班。1925年11月，德拜在一次讨论会上，要求薛定谔做一个报告，介绍德布罗意的理论。当薛定谔在下一次讨论会上讲完之后，德拜评论说这种想法还不成熟，要是一种波的话，就应当有波动方程。在过了几个星期的又一次讨论会上，薛定谔做了第二次报告，开头说的就是："我的同事德拜提出说应当要有一道波动方程；好的，我已经找到了。"

其实，在这之前，薛定谔已经紧张地投入了这方面的工作。德布罗意的文章里提到的关于氢原子稳定轨道的周长正好容纳整数个相位波，亦即形成驻波的机制，深深地吸引着他。可能他从德拜的提示中受到启发，从轨道的几何构造转到描写波动的微分方程。起先，薛定谔建立过一道相对论性的波动方程，试图由此解出氢原子能级，但因为得不出正确的结果而放弃了。到了 1925 年圣诞节假期，薛定谔转而建立一道非相对论性的波动方程，终于取得了突破。1926 年 1 月到 6 月，薛定谔完成了题为“作为本征值问题的量子化”的共四篇的一组论文，宣告他称之为“波动力学”的新理论的诞生。

在这组文章的第一篇里，薛定谔将系统的作用量写成 $S=K\log\psi$。这里的 ψ 就是描写波动的波函数。这样一来，一般的作用量 S 里对各个自由度部分的求和，就变成对各个自由度的 ψ 因子的乘积，K 是一个常数。

薛定谔再假定哈密顿量里只含适当选取的 ψ 的二次型，对于势能为 $-e^2/r$ 的氢原子，运用变分原理求出的拉格朗日-欧拉方程，就是所需要的波动方程

$$\nabla^2\psi+\frac{2m}{K^2}\left(E+\frac{e^2}{r}\right)\psi=0$$

即不含时间的(定态)薛定谔方程。

假定 ψ 是单值、二阶可微的实函数，将上述方程在球面坐标系里分离变量，便可以从径向波函数的有限性，解出氢原子的能级公式

$$E_n=-\frac{me^4}{2K^2n^2},\quad n=1,2,\cdots$$

当取 $K=h/2\pi$ 时，便是已知的能级公式。

定义氢原子系统的哈密顿算符

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 - \frac{e^2}{r}$$

将波动方程改写为

$$H\psi = E\psi$$

它就采取哈密顿算符本征值方程的形式，只对某些 E_n 值即本征值有解。薛定谔就这样，首次运用大多数物理学家都很熟悉的求解微分方程的方法，顺利地解出了氢原子的分立能级。在这里，并不需要电子轨道的概念。

在第二篇文章里，薛定谔先求出了谐振子的能级和定态波函数，所得结果与海森伯的矩阵力学相同，还讨论了转子和双原子分子等问题。第三篇文章阐述了定态微扰论，并且用新求出的氢原子径向波函数，计算了氢原子的斯塔克效应，结果与实验很好地符合。在第四篇文章里，他进一步得到后来称为“含时间的薛定谔方程”的、波动力学里的基本运动方程

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi = H\psi$$

并且用来计算色散等问题。

薛定谔这一组文章奠定了非相对论性量子力学的基础，今天在教科书里所讲的初步内容，大都是按薛定谔所给出的表述形式写成的。过去，物理学家们在弹性振动和电磁场等边值问题的求解中，已经遇到过分立的振动模式。如今，他们看到这一套在经典物理学里的波动理论里用分离变量法解出微分方程的传统方法，又取得了不亚于陌生古怪的矩阵力学的胜利。普朗克、爱因斯坦和索末菲等老一辈物理学大师都对此感到欣喜和鼓舞。

的确，薛定谔的波动力学更容易被物理学家们接受和运用，因而受到普遍的欢迎和重视。同时，矩阵力学和波动力学结果上的一致，暗含着两种数学程式的等价。事实上，希尔伯特和柯朗的《数学物理方法》一书中，已经提示了微分方程本征值问题同矩阵

运算的联系。1926 年 3 月，薛定谔在写作那一组文章的中间，又完成了《论海森伯、玻恩和约丹同我的量子力学之间的关系》一文，初步论证了波动力学和矩阵力学两者在“形式上和数学上的等同”。他还从上述哈密顿算符第一项“动能项”的形式，认识到动量应当表示为 $p=-\mathrm{i}\hbar\partial/\partial q$，从而推出了与玻恩的结果相同的对易关系

$$pq-qp=\mathrm{i}\hbar$$

与此差不多同时，泡利和艾卡特(C. Eckart，1902—)亦分别比较严格地证明了波动力学和矩阵力学这两套程式在数学上的等价。此后这两种理论就统称“量子力学”，不再保留各自原来的名称。

5.3 从爱因斯坦论光的二象性到玻恩对波函数的概率诠释

在上一章里讲过，爱因斯坦在 1905 年发表的文章《关于光的产生和转化的一个试探性观点》里，采用维恩能谱公式计算了辐射的熵。1909 年，爱因斯坦又发表了《论辐射问题的现状》[15]，改用普朗克辐射能谱公式，计算出在热平衡状态下系统能量的涨落公式：

$$\langle\Delta E^2\rangle=\left[h\nu\rho(\nu)+\frac{c^3}{8\pi\nu^2}\rho^2(\nu)\right]V\mathrm{d}\nu$$

式中 E 是频率为 ν 的辐射总能量，$\rho(\nu)$是辐射的频谱函数，其余符号具有惯常的意义。爱因斯坦发现，上式右方的前一项是采用维恩公式时得出的结果，而这一公式是把辐射当做由微粒组成的理想气体而导出来的，相当于“假设辐射由独立运动的……能量 $h\nu$ 构成”，即反映了辐射是由光子构成的微粒性质；而后一项是采用瑞利-金斯公式得出的结果，而瑞利-金斯公式是对辐射波场的每

个经典自由度运用能量均分定理而导出来的，属于“由干涉而产生的涨落”，即反映了辐射的波动性质。于是，爱因斯坦可以把对能量涨落的这一结果理解为

$$\langle \Delta E^2 \rangle = \langle \Delta E^2 \rangle_{\text{粒子}} + \langle \Delta E^2 \rangle_{\text{波动}}$$

即辐射的性质具有波动和微粒的二重性。这是第一次作出的对于光的二重性(duality)的论证。

1924 年提出了玻色-爱因斯坦统计之后，运用热平衡下的平均光子数公式

$$\langle n \rangle = \frac{1}{\exp(E/kT) - 1}$$

容易求得光子数涨落等于

$$\langle \Delta n^2 \rangle = \langle n \rangle + \langle n \rangle^2$$

考虑到能谱函数 $\rho(\nu)$ 同每个场自由度的平均能量的简单关系 $\rho(\nu) = (8\pi\nu^2/c^3)h\nu\langle n \rangle$，不难证明满足玻色统计时的上式就是上述爱因斯坦涨落公式的改写。按照上面的讨论，我们可以认为这一式子右方的前项亦属于“微粒”的贡献，后项则属于“波动”的贡献。而且，如果运用经典统计中的泊松分布，则公式右方只剩下前项即微粒性的贡献。这样一来，似乎更加证明了光同时具有波动和微粒的二重性。

紧接着量子力学的诞生，狄拉克等在 1927 年开始提出了用产生和消灭算符描写的最早形式的量子电动力学之后，情况就变得明朗了。我们知道，同模的玻色场的产生算符 a^+ 和消灭算符 a 之间的对易关系是

$$[a, a^+] \equiv aa^+ - a^+a = 1$$

而相应的粒子数算符数是 $n = a^+a$。由此可以算出单模的光子数涨落(均方差)是

$$\langle \Delta n^2 \rangle \equiv \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 = \langle a^+aa^+a \rangle - \langle a^+a \rangle^2$$
$$= \langle a^+ (a^+a + 1)a \rangle - \langle a^+a \rangle^2$$

$$= \langle n \rangle + (\langle a^+ a^+ aa \rangle - \langle n^2 \rangle)$$

将这一结果同上面相应的式子比较，可以看出涨落的“微粒”项$\langle n \rangle$来源于产生和消灭算符的非对易性，而上式最后圆括号内的两项，则对应于原来的“波动”项。然而，在以上的简单推导里，并没有用到微粒或者波动的原始概念。因此，爱因斯坦对于光具有波动-微粒二重性的那种论证，就失去了往日的说服力了。[16]

尽管如此，由于继光量子概念的建立之后，又提出了与像电子那样的实物粒子相联系的德布罗意波，人们普遍觉得那是光的波动-微粒二重性或者二象性向实物粒子的推广。后来，这种“波粒二象性”被广泛认为是微观对象的基本性质，甚至当做是量子力学的根本概念。例如，在玻姆的量子力学专著里就把这种二象性说成是“量子理论最有代表性的特点之一。”[17]

我们看到最早把波粒二象性当做量子力学概念基础的著作，是泡利在1933年写的《量子力学的一般原理》[18]，后来这样叙说的量子力学教材就不可胜数了。在国内，几乎所有量子力学(和原子物理教科书里的有关内容)一开始都讲的是波粒二象性，甚至把整部量子力学说成是关于这种波粒二象性的理论。

然而，应该注意到，好几位物理学大师的量子力学专著和教材却并没有那样写。例如：狄拉克1930年初版的《量子力学原理》[19]，朗道(L. Landau，1908—1968)1948年初版的《量子力学》[20]，费米(E. Fermi，1901—1954)1954年写成的《量子力学讲稿》[21]，费曼1965年出版的《费曼物理学讲义·量子力学》[22]。这几本量子力学著作，还有一些影响广泛的量子力学教材，都没从波粒二象性展开。

实际上，波粒二象性的观念，反映了在量子力学诞生前后，心目中只有经典物理学概念的物理学家们面对着崭新的动力学理论时感到的困惑。事实上，由于一时未能取得对新理论的正确理解，当时曾经出现过对于量子力学的波函数ψ的各种不同的解释。上

面已经提到过，创立波动力学的薛定谔，一直认为 ψ 代表了一种就像电磁波那样真实的物理场。流传至今的“物质波”和“电子云”等名词，都是薛定谔那种不恰当观念的产物。按照他的解释，所谓粒子不外是由作为物理实体的 ψ 波场集聚在微小的空间区域内而形成的波群——即后来所说的波包。换句话说，只有波场才是具有根本意义的存在物，而粒子不过是波的积聚。

例如，在薛定谔 1933 年的诺贝尔奖受奖演说《波动力学的基本思想》里，称呼他的理论为“物质波理论”，甚至宣称：“我们肯定地说，原子实际上纯粹是被原子核俘获的电子波的衍射现象。”[23] 玻恩曾经就这个问题同他的好朋友薛定谔进行过反复的争论，并且称呼薛定谔是“保波派”（wave defender）或者“唯波论者”（wave-totaller）的代表。[24]

玻恩批评薛定谔的主要论据之一是量子力学里的位形空间的概念。例如在一个由两个电子组成的系统里，电子 1 的波函数用 $\psi_1(\boldsymbol{x}_1)$ 表示，电子 2 的波函数用 $\psi_2(\boldsymbol{x}_2)$ 表示。这里的 ψ_1 是定义在 $\boldsymbol{x}_1$ 空间中的函数，而 ψ_2 是定义在另一个 $\boldsymbol{x}_2$ 空间中的函数，彼此没有交叠。假如两个电子之间没有相互作用，它们就各自在属于自己的那个空间里面自由地遨游，不会发生叠加或者干涉。只是在存在着譬如说依赖于两者之间的“距离” $|\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{x}_2|$ 的相互作用时，它们才会产生彼此的影响。在量子力学里各个粒子所处的这种空间，就叫做位形空间（configuration space）。在多体系统里，每一个粒子占据 3 维的位形空间，n 个粒子占据的总位形空间就是一个维数为 $3n$ 的空间。事实上，这个 $3n$ 维的总位形空间乃是 n 个 3 维的单粒子位形空间的直乘。

而按照薛定谔，假如 ψ 函数果真是像电磁场那样的物理场的话，那么在上述二体系统里，第一个电子的波函数 ψ_1 与第二个电子的波函数 ψ_2 同处于一个空间之内，就会发生量子力学里不可能发生的两个自由粒子波函数的叠加或者干涉，正如我们生活的这

个普通空间中不同来源的多个电磁场的叠加一样。换句话说，在量子力学里，多个粒子的波函数属于不同的自由度，不能够像经典物理学里的物理场那样直接相加。这是因为，在经典力学里，场是粒子受力的描写，而力或者说力的效果是可以相加的。但在量子力学里，波函数并不直接描写粒子所受到的相互作用，粒子之间的相互作用是需要在系统的哈密顿算符里另行引进的。

玻恩一开始就不相信薛定谔的“物质波”解释。据他自己说，其中很重要的原因是：“我的研究所和弗兰克的研究所都处在哥廷根大学的同一座建筑物里。弗兰克和他的助手们所进行的每一项电子碰撞实验，在我看来都是电子的微粒性的一个新证据。”[25]对散射实验的关注使他认为：“只考虑束缚电子是不可能解释清楚 ψ 函数的。”[26]

的确，只依靠原子和分子发出的光谱线的频率和强度这一类当时的实验知识，是不能够对包括薛定谔的“物质波”在内的几种经典解释做出检验的。作为矩阵力学主要创始人之一的玻恩，在拒绝薛定谔的“物质波”解释的同时，并不排斥他的波动力学。1926 年 6 月，恰在薛定谔完成了他的一组四篇文章的最后一篇的几天之后，玻恩发表一篇短文《论碰撞现象的量子力学》[27]。玻恩在这篇文章里一开始就宣称：“许多人假定现今形式学量子力学不包括跃迁问题，我自己则假设量子力学的理论是完备的，因而它必定能包括跃迁问题。”在第二段里又强调说：“在碰撞中我们处理的不是神秘的波场，而是专门处理用量子力学程式描写的物质粒子的系统。”玻恩接着指出：“在[量子力学]理论的不同形式中，只有薛定谔的一种被证明适用于这种过程，正是由于这一理由，我会把它当做是量子规律的最深刻的表述形式。”他就这样表明了，他要做的是运用薛定谔的波动力学里的波函数 ψ 去描写在碰撞前后的粒子系统的状态，亦即是散射过程的初态和末态。而其中的关键则是：“问题在于以数学方式写出散射粒子的渐近行为。”

玻恩在这篇文章里写出的渐近波函数，即在距离靶体很远之处的 ψ 函数，用现代形式表示就是

$$\psi = \mathrm{e}^{\mathrm{i}kz} + f(\theta,\varphi)\frac{1}{r}\mathrm{e}^{\mathrm{i}kr}$$

上式右方第一项平面波波函数，表示具有确定动量的从 z 方向入射的粒子束流；第二项的球面波波函数，表示从以静止靶为中心向四面八方散开的出射粒子，因子 $f(\theta,\varphi)$ 依赖于球面角 θ 和 φ。$f(\theta,\varphi)$ 就是我们今天称呼的“散射振幅”，玻恩原文的符号是 $\Phi(\alpha,\beta,\gamma)$，其中的 α，β 和 γ 是三个欧拉角。通过对这种渐近波函数的分析，玻恩便断言道：“如果换用粒子的语言表述，只可能有一种解释。$\Phi(\alpha,\beta,\gamma)$ 给出从 z 方向入射的电子沿以角度 (α,β,γ) 表示的方向射出的概率。”

但是，玻恩一开始没有找到正确的概率表述。他在 6 月底校对这篇短文的清样时，加了一条仍然不完全对头的注释说：“更仔细的考虑表明，概率正比于量 Φ 的平方。”只是在同年 7 月，在与那篇预备性短文标题相同的一篇正式论文里，玻恩才得出真正的概率诠释，即不是波函数本身，也不是它的平方，而是波函数的绝对值平方即模方同观察到粒子的概率相联系的解释。

在这篇文章里，玻恩不局限于碰撞问题，进一步讨论一般形式的波函数 $\psi(x)$。玻恩提出，在 $\psi(x)$ 对于一组正交完备的、具有分立本征值的本征函数 $\psi_n(x)$ 的求和展开式

$$\psi(x) = \sum_n c_n\psi_n(x)$$

或者对于动量本征函数即平面波波函数 $\psi_p(x)$ 的积分展开式

$$\psi(x) = \int c(p)\psi_p(x)\mathrm{d}p$$

里，相应展开系数的模方 $|c_n|^2$ 和 $|c(p)|^2$，分别代表系统处在相应本征状态 $\psi_n(x)$ 和 $\psi_p(x)$ 的概率，亦即分别代表对系统进行测量时，观察到相应本征值的概率或者概率密度。按照量子力学里的

表象变换理论，上面的展开系数 $c(p)$ 和 c_n，也可以看做是在动量表象和别的有关表象里的波函数，因此玻恩在这里就从原则上给出了波函数的概率诠释。

在玻恩这篇文章里，观察值出现的相对概率，指的是相应的统计频度。在这种规定下，上述展开的复系数 c_n 或者 $c(p)$，就起到概率幅度即概率幅的效用。这是概率幅这个概念第一次进入物理学，也可以说是第一次正式进入到科学理论里。[28]

但是，在以上两篇一短一长的文章里，玻恩还没有对普通坐标空间里的波函数 $\psi(x)$ 本身给出直接的概率解释。这一步是泡利首先迈出的。他在 1926 年年底完成的一篇研究气体简并度和顺磁性的文章的一处脚注里指出，$|\psi(x)|^2 \mathrm{d}x$ 代表观察到电子的坐标处在 x 到 $x+\mathrm{d}x$ 之间的概率，即是说 $|\psi(x)|^2$ 代表电子的空间中位置分布的概率密度。于是，从薛定谔方程直接解出来的、一般在坐标空间表示的波函数 $\psi(x)$ 本身，才被赋予了概率幅的意义。由此可见，在这一波三折的戏剧性进程中，精彩的台词常常是在注解里出现的。

就这样，玻恩终于找到了量子力学的物理解释，亦即量子力学的数学程式同经验事实相联系的钥匙。用玻恩自己的话讲：这是“对量子力学第一次提出了合理的解释。直到那时之前，量子力学一直是一种成功的和有效的数学程式，却没有任何合理的意义。”这种想法的关键之处在于，“碰撞过程必定是解决这个问题的线索，因为入射和出射粒子的相对数目是可以计数的，并且可以看做是经验的概率数值。”[29]

事实上，玻恩这方面的工作，也是首次运用量子理论去解决连续谱问题。他在这两三篇文章里，还在对波函数的概率诠释的基础上，提出了一种运用微扰论的、处理散射问题的近似方法，即后来得到广泛应用的“玻恩近似”方法。1926 年秋天，温策尔（G. Wentzel，1898—1978）和奥本海默（J. R. Oppenheimer，1904—

1967)运用玻恩的近似方法，处理两个带电粒子之间的碰撞，在波动力学的基础上推导出以前用经典力学得出的卢瑟福散射公式。接着又有贝特(H. A. Bethe, 1906—2005)和莫特(N. F. Mott, 1905—1996)等人，使用玻恩的方法计算了带电粒子通过物质的作用，都得到了满意的结果，证实了波函数的概率诠释的正确性。

玻恩又一次宣称："所有这些结果，都最动人地证实了量子力学的统计观点。经典物理学中所一直公认的自然过程的基本决定性，现在必须放弃了。"按照他的概率诠释，"我们得出的不是对'碰撞后的状态是什么'这个问题，而只是对'碰撞后的一种指定结果有多大可能'的问题的答案。"我们知道，在经典物理学里起支配作用的，是像质点的坐标和动量那样的物理量演化的因果决定性。在经典统计物理学里虽然也运用统计方法来计算系统的宏观性质，但系统中的每个微粒或者每个微观过程，都被设想成遵从经典物理学的规律，宏观系统的性质则是对这些大量个别对象的统计平均的结果。现在，按照玻恩的诠释，满足薛定谔方程的 ψ 函数本身不是物理量，而仅仅是一种概率幅度。因此，玻恩认为："这就碰到了整个决定论问题。从我们的量子力学观点看来，在一个个别事例里因果性地确定结果的量并不存在。""我自己倾向于在原子世界里放弃决定论。"当然，他在这里指的只是经典式的因果性决定论，也被称为拉普拉斯决定论。

用玻恩的话来说："量子理论在描述系统时……没有回答某个粒子在给定时刻的位置问题……在这方面，量子理论是和实验者一致的，因为微观坐标也是实验者的力所不及的，所以他仅仅数出事例的数目，并且满足于统计学。这表明量子力学只回答适当提出的统计问题，关于个别现象的过程问题是说不出什么的。"在量子力学里，"满足波动方程的波完全不代表物质粒子的运动，它们仅仅决定物质的可能运动，或者不如说仅仅决定物质的可能状态。"以及："经典理论引进了决定个别过程的微观坐标，但又由于

对其无知而通过对它取值的平均而消去这些微观坐标；而新的理论根本不用引进这些坐标就可以得到相同的结果。……我们解除了由力直接决定粒子运动的经典任务，而只让它们去决定状态的概率。”[30]

因此，玻恩把用 ψ 函数描写的波动称为“概率波”，明确地区别于薛定谔的“物质波”。总之，在量子力学里必须放弃粒子运动的经典式的机械决定性，而代之以一开始就使用概率描写的统计决定性。“粒子运动遵循概率定律，而概率本身按照因果律传播。”[31]玻恩的这句话很好地概括了量子力学的本质上的统计决定性，也是概率波概念的极好注解。

玻恩的这一诠释完成了量子力学的概念体系。在量子力学里对物理系统的描写，从此得到了清楚明确的意义。自此以后，再也用不着早期流行的“波粒二象性”那样的暧昧观念了。物理学家费曼在阐述量子力学的基本原理时，一开始就这样说：“为新的现象构造理论体系的尝试，一开头就引起了一场大混乱。在那里光和电子有时候表现得像波动而有时候表现得像粒子。1926 和 1927 年在称为量子力学的理论中，完全消除了这一表观上的矛盾。”[32]一位哲学家珀普尔(K. Popper，1902—1994)明确指出：“当玻恩将波幅的平方看做发现粒子的概率这一解释被接受之时，玻尔关于‘互补原理’和‘粒子-波动二象性’之间的联系就断开了。”[33]另一位哲学家邦格(M. Bunge，1919—)也说：“光的二象性乃是 1905 年到 1927 年这一空白时期的遗迹。”“它已经变成混乱的源泉而早就过时了。”[34]

5.4 第一种非经典的内禀变量——自旋

在经典物理学的质点动力学里，使用坐标和动量去描写一个质点的状态。在经典统计物理学里的“相空间”，就是由系统中各

个粒子的坐标和动量构成的。与此相适应的是，在质点动力学的运动方程里，写出的是粒子在坐标空间里，它的动量 $\boldsymbol{p}$ 随时间的变化率同所受外力 $\boldsymbol{F}$ 的关系：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x},t)$$

因此，在最初形式的量子力学里，沿用着与经典力学相对应的这种描写方式，去解决在普通空间中运动的氢原子和谐振子等问题，乃是很自然的一回事。

不同的是，在量子力学里不使用上述牛顿方程的动力学表达，而使用哈密顿形式。例如，在前一节里给出的哈密顿算符，可以写成以下“动能项”加“势能项”的普遍形式：

$$H=\frac{p^2}{2m}+V(\boldsymbol{x},t)$$

这明显是对经典分析力学里哈密顿函数的模仿。虽然在量子力学的基本假设里，并没有一种能够保证把经典力学里的任何动力学变量和相互作用形式“对应”地搬到量子力学理论里一定会生效的规定，任何一种动力学变量和相互作用形式的假设，最终都是要凭其结果同实验的比较来判断其适用与否的。但是早期的量子力学课题里对坐标和动量概念的运用，以及把氢原子的“库仑势”和谐振子的“恢复力”等相互作用形式写进薛定谔方程里所取得的成功，更加增强了物理学家们对于量子力学就是以坐标和动量为基本变量的一种理论的信念。在这里，不同的似乎仅仅是在量子力学里，粒子的坐标算符和动量算符在乘法中满足不可交换的规则。前面已经提到，各个坐标分量和动量分量满足的是如下的对易关系：

$$[x_i,p_j]=\mathrm{i}\hbar\delta_{ij}$$

而其他动力学变量，都被认为一定可以表示成坐标和动量的函数。例如，粒子轨道角动量 $\boldsymbol{L}$ 就是用它的坐标和动量的矢量积表

示的：

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{x}\times\boldsymbol{p}$$

并且由此可以推导出轨道角动量的三个分量满足的对易关系为：

$$[L_i,L_j]=\mathrm{i}\hbar\varepsilon_{ijk}L_k$$

式中的 ε_{ijk} 是三维的单位全反对称张量(当 ijk 三个指标均不相同且按 123 的顺序轮回时它等于 1，三个指标均不相同且按相反的顺序轮回时它等于 -1，其他情况即三个指标当中有两个或三个相同时它等于 0)。

在这种认识的语境之中，包括玻尔、海森伯和狄拉克在内的物理学大师们，在量子力学诞生的早期把粒子的坐标同动量之间的对易关系看做具有头等重要的意义，亦有不少教科书的作者曾经把上述坐标同动量之间的对易关系列进量子力学的基本假设之内。他们当时做梦也没有想到，后来竟然会出现脱离了坐标和动量的量子力学。

事实上，无论是玻尔的“互补原理”还是海森伯的“测不准原理”，都植根于坐标同动量之间的对易关系。他们所说的，坐标描写和动量描写是互斥又是互补的，或者不能够同时准确地测量坐标和动量，其来源都是粒子的坐标和动量的不对易性。这是一种适应于量子力学发展早期的思考方式。可是，后来很快发现，在量子力学里竟会有一些完全不依赖于坐标和动量的动力学变量。其中第一个出场的就是自旋。

早就有人想到了粒子除了有坐标、质量和速度之外还会有自转式的运动。或许，这是出自我们的太阳系里的各个行星都有自转这种现象的启发。而且，正如地球的磁场是同它的自转相联系的一样，具有某种电荷分布的粒子自然会由于它的自转而具有一定的磁矩。

甚至早在 1915 年，帕尔森斯(A. L. Parsons)已经提出了一种磁体粒子的模型，它绕着自身的轴旋转，其角动量的大小适足以

使得粒子周边的线速度等于光速。1921 年，康普顿在对晶体表面反射的 X 射线的研究中，发现反射强度不受在施加磁场时引起的电子分布变化的影响。在这一实验事实的基础上，他认为不可避免地会得出这样的认识："基本的磁体不在于作为整体的原子……因为无论是分子还是原子都不能给出对实验的满意说明，这一观点本身支持这样的见解，根本的磁性粒子是在原子的内部，也许就在于电子。"康普顿宣称："我因此作出这样的结论，电子本身就像一个小型的陀螺那样自转着，它可能就是根本的磁性粒子。"[35]

那么，电子的磁性或者它所具有的磁矩的效应会怎么样表现出来呢？在上一章已经说过，在 19 世纪末年，物理学家们已经从塞曼效应认识到，原子的线状光谱是由原子里面的电子的运动所决定的。所以，电子的磁性亦应当首先表现在对原子光谱的解释上面。

1896 年发现塞曼效应之后的第二年，洛伦兹提出的振动机制以及拉摩尔提出的进动机制，都能够解释在磁场中原子光谱线的三重分裂。这两种方法，运用的自然是经典力学的理论。那么，在后来的量子论里，是怎样解释这种分裂呢？在上一章里已经提到，1915 年索末菲在改进了玻尔的原子的量子论之后，在原子能级的主量子数 n 之外再引入角量子数 l 和磁量子数 m（对于指定的角量子数 l，磁量子数取 $2l+1$ 个值：$m=l, l-1, l-2, \cdots, -l+1, -l$），并且从量子条件推导出了"空间量子化"的现象。这一现象后来在 1921 年由斯特恩（O. Stern，1888—1969）和盖拉赫（W. Gerlach）通过原子束经过磁场的偏转直接证实。

1916 年，德拜和索末菲分别运用以上的理论方法计算了在外磁场中原子光谱线的三重分裂，首次用量子理论解释了塞曼效应，取得了可与洛伦兹电子论相匹敌的成就。但是，他们解释了的只是塞曼起初在 1896 年发现在外磁场中光谱线发生三重分裂的"正常塞曼效应"。可是，从 1897 年年底开始，进一步的实验发现了，

在强磁场中有些原子的某些光谱线可以分裂成 4,6,8……以至 11 条不等。这些称为“反常塞曼效应”的异常分裂现象,是从洛伦兹的经典理论到索末菲的量子理论都无法解释的。

此外,对碱金属原子光谱线的研究发现,以量子数 n 和 l($l\neq 0$)标记的能级,具有一种双重的结构。例如,做过光谱学实验的学生都看到过的钠原子黄线就是一对双线。这意味着原来的几个量子数不够用了,需要引入新的量子数。起初,索末菲和兰德(A. Landé)以为,碱金属的原子实(去掉价电子后的原子)具有额外的角动量 $s=1/2$(以普朗克常数 $\hbar$ 为单位),按照角动量相加法则,使整个原子的总角动量量子数 $j=l\pm 1/2$,即原来的一个 l 能级变成了两个总角动量量子数 j 为“半整数”的能级,这样就可以解释双线的产生。

1924 年,泡利计算出碱金属原子的原子实属于满壳层结构,其轨道角动量之和应当等于零因而没有磁矩。于是,泡利采取了决定性的一步,认为磁场中原子能量的变化仅仅归因于价电子而与原子实无关。他写道:“碱金属光谱的双重结构……是由于电子的量子论性质的特定二值性,这是不可能用经典观点描写的。”[36]

泡利这一假设,给电子规定了一个在经典物理学里没有的新自由度。泡利同年在这基础上提出“不相容原理”,他的原话是:“在一个原子里不可能存在两个或更多个相同的电子,它们在强磁场中所有的量子数 n,k_1,k_2,m_1 都是一样的。如果在原子里存在一个电子,它的这几个量子数都具有确定的数值,则这个状态已被‘占据’”(泡利在这里所说的四个量子数 n,k_1,k_2,m_1 是现在通用的 n,l,j,m_j 的组合:$n=n$, $k_1=l+1$, $k_2=j+1/2$, $m_1=m_j$)。泡利就这样把玻尔原子论里的一个基本的问题,即为什么原子里的多个电子不都拥挤在基态的问题,提升为量子理论里的一个新的基本假设。

然而,已经走到另一项重大发现的门前的泡利,却没有能够由

上述量子数的二值性进一步提出电子具有内禀的角动量和相应的磁矩。原来，在1923年，玻尔曾经假设这种二值性来源于电子受到的一种不可以用经典力学解释的“非机械应力”的影响。后来在1925年春天，这个假设又受到了海森伯的响应。泡利当时明显是赞同这一设想的。但是，这种作用机制没有什么说服力，使得泡利的额外量子数连同他的不相容原理一时难以被物理学家们接受。

1925年1月，德国物理学家克仑尼希(R. Kronig，1904—)在图宾根(Tübingen)从兰德那里读到了泡利写给兰德的信，了解到泡利的上述工作。克仑尼希立刻领悟到泡利的假设所蕴含的意义。因为泡利的安排相当于对于指定的轨道角动量 l，电子的总角动量 j 取 $l+1/2$ 与 $l-1/2$ 两个值，根据角动量的加法，这就意味着电子除了轨道角动量之外，还存在着一个固有的角动量 $s=1/2$(以普朗克常数 $\hbar$ 为单位)。事实上，这就是前些时候索末菲和兰德安排给原子实的那个角动量。现在，克仑尼希在泡利的启发下，把这个额外的角动量归于电子本身携带的一种新的自由度。为了作出一种动力学的解释，克仑尼希假设电子由于绕着自身的轴旋转而产生这个后来称为“自旋”的角动量。

克仑尼希假设电子具有1玻尔磁子的固有磁矩，计算了碱金属原子有关光谱线的双重分裂，得到了裂距与 Z^4 成比例的正确结果；而在索末菲认为相应的磁矩属于原子实的旧理论里，推出的裂距与 Z^3 成比例。可是，当他依法处理类氢原子和碱金属原子的精细结构时，发现计算结果为观察值的两倍。

克仑尼希在那个月的晚些时候就有机会在图宾根见到泡利，同他讨论自己的想法和计算结果。泡利回答说：“这是一个十分巧妙的想法”，不过仍然对克仑尼希的假设持怀疑态度。接着，克仑尼希去到哥本哈根，在那里见到了海森伯和克拉默斯等人，他们都不同意一个自转着的电子的概念。克仑尼希在这几位大牌理论物理学家的消极反应面前丧失信心，始终没有把他的工作送出去发

表，错过了这个重要发现的机会。真是可惜啊！

在后来的一封通信里，克仑尼希叙述了他当时经受的几点困扰："首先是已经提到过的因子 2。其次是难以理解一个电子绕着它的轴转动怎么会刚好产生一个磁子的磁矩。再次是一个具有经典尺寸的电子的电荷旋转能够产生这么大的磁矩，必须假设其线速度超过了光速。最后，那时候假定由质子和电子组成的原子核的磁矩是那么小。"实际上，当时从电子的质量全部是电磁质量的假设，可以算出的电子半径具有 10^{-13} 厘米的数量级。具体是这样计算的：设电子是半径为 a 的一个电荷均匀分布的球体，那么在球面上的静电势能就的大小就是 e^2/a，再运用相对论的质能关系，就得到 $a\sim e^2/(mc^2)\sim 2.8\times 10^{-13}$ 厘米的结果。那时候已经知道这一尺寸是原子核的大小，而现在知道的电子半径则小于 10^{-16} 厘米。最后，从已经观察到的光谱线的"超精细结构"，得出核磁矩比电子的玻尔磁子小三个数量级的结论，在当时流行的原子核由质子和电子组成的观念，不支持电子有那么大的磁矩。

不久，荷兰物理学家乌仑贝克(G. E. Ulenbeck，1900—)和

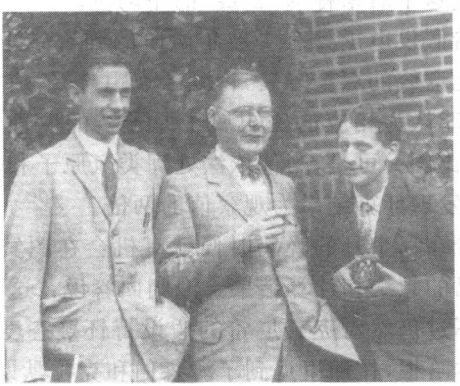


图 5.11 图上自左至右：乌仑贝克(G. E. Ulenbeck，1900—)，克拉默斯(H. A. Kramers，1894—1952)和高德斯密特(S. Goudsmit，1902—1978)

高德斯密特(S. Goudsmit，1902—1978)于1925年10月发表了关于电子自旋的短文。他们在不知道克仑尼希工作的情况下，独立地作出了相似的论证，假设电子本身具有大小为$\hbar/2$的角动量，它的两种投影$\pm\hbar/2$同轨道角动量的耦合就组成总角动量的双重结构。他们为了解释反常塞曼效应，也假设电子的固有磁矩对自旋角动量的比值等于轨道运动时的两倍。同克仑尼希一样，他们算出的氢原子精细结构裂距差一个因子2。

乌仑贝克和高德斯密特得到这样的结果之后非常兴奋，但因为晓得与权威们的意见相冲突而不敢送出去发表。他们向老师埃仑费斯特(P. Ehrenfest，1880—1933)报告之后，埃仑费斯特说这是非常重要的，如果不是完全胡说的话，并且在送出去之前建议先征求洛伦兹的意见。洛伦兹看到他们的稿子之后，指出一个自转着的电子会产生一些严重的困难，要就电子的质量比质子还大，要就电子的尺寸会比原子还大。在这样的情况下，乌仑贝克变得胆怯了，要求埃仑费斯特撤回那篇稿子。但埃仑费斯特说文章已经送出去了，然后补充说你们两位是那么年轻，说些蠢话也无妨。



图5.12　埃仑费斯特(P. Ehrenfest，1880—1933)

乌仑贝克和高德斯密特的文章发表之后，先后受到了海森伯和玻尔的祝贺，但他们仍然指出需要对因子2作出说明。1926年初，托马斯(L. H. Thomas)通过严格的相对论计算，消除了原来原子光谱精细结构双线裂距的计算值和观察值的不符。于是，连泡利那么苛刻的批评家都接受了电子自旋的概念，而乌仑贝克和高德斯密特就成了自旋的发现者。

自旋是第一个不可以亦不需要用经典力学说明的内禀变量，

即内部固有的变量。具体说，它不是像轨道角动量那样可以用粒子的坐标和动量表示的。亦即是说，自旋是第一个脱离了坐标和动量的动力学变量。在经典物理学里不可能有这样的动力学变量。在量子力学里，自旋的三个分量满足如下的对易关系

$$[J_i, J_j] = i\hbar\varepsilon_{ijk}J_k$$

在形式上，这一组对易关系与在本节开头写过的轨道角动量的三个分量满足的对易关系完全相同。但是，上述对易关系组就是自旋角动量的全部定义，不再受轨道角动量等于坐标与动量的矢量积那一类定义的限制。换句话说，点粒子也可以有内在的自旋，它不可以看做是什么东西在空间中旋转而成的。

在数学上，轨道角动量用幺模三维转动群 SO(3)描写，它的基本表示是轨道角动量量子数 $l=1$ 的三维矢量表示，由此构造出轨道角动量量子数 l 为所有非负整数的不可约表示。自旋角动量用幺模二维幺正群 SU(2)描写，它的基本表示是自旋角动量量子数 $s=1/2$ 的二维旋量表示，由此构造出轨道角动量量子数 l 为所有非负整数和“半整数”(非负整数加 1/2)的不可约表示。对于自旋量子数 $s=1/2$ 的电子说来，二维旋量的两个分量分别表示自旋朝上和自旋朝下的状态，而自旋矢量在三个坐标方向上的投影则用三个二行二列的“泡利矩阵”表示，它们亦满足上面给出的一般角动量算符的对易关系。

上面那组对易关系也是在量子力学里第一次出现的、完全脱离了坐标和动量的一组对易关系。所以，在量子力学初期植根于坐标与动量之间的对易关系的玻尔的“互补原理”和海森伯的“测不准原理”，在自旋角动量的理论描写建立之后，自然就失去了存在的价值。例如，冯诺意曼曾经评论说：“可是，有许多东西都是不对易的，你很容易找到三个互相不对易的算符。”[37]他说的意思明显是，例如自旋角动量的三个分量那样的算符，它们两两之间都是不对易的，那么说谁跟谁互补好呢？

总之，电子的自旋角动量不是转出来的，而是本身具有的。点粒子亦可以携带一个内禀角动量，不必过问它的空间结构。一句话，它是一种与普通的“外在”坐标和动量没有任何关系的“内禀变量”。虽然如此，粒子的自旋仍然是处在普通空间中的矢量。我们讲的自旋分量，都是在普通空间中的投影。所以，才可以产生自旋角动量和轨道角动量之间的耦合，例如 $\boldsymbol{L}\cdot\boldsymbol{S}$ 那种类型的自旋-轨道耦合。

在下一章里，我们将讲到在量子力学里还可以有“同位旋”那样完全脱离了普通空间的“内禀空间”。无论是内禀变量还是内禀空间，都是在经典物理学里不可能出现的全新概念。所以我们说，量子力学的容量比经典力学大得多，它能够描写许多在经典物理学里不可能容纳的性质，其中还包括像宇称一类的反演性质。

这是因为，在量子力学里，粒子或者物理系统的状态是由态函数 ψ 表示的，而系统的性质则是由哈密顿算符 H 规定的。虽然在早期的量子力学理论里，ψ 都是坐标的函数，而 H 都依赖于坐标和动量，但在后来的发展中就越出了这一限制。今天的量子力学基本假设里，不再包含坐标和动量之间的对易关系，而把它当成是关于描述动力学变量的算符性质的具体“工作假定”；而且，哈密顿算符不再硬性规定为动能项和势能项之和，对它的形式没有作出任何限制。在这方面走出第一步的，就是自旋的引入。粒子或者系统的自旋态函数，一般是用不依赖于坐标和动量的矩阵形式表示的。而在研究像自旋那样的内禀变量或者像同位旋那样的内禀空间的性质时，系统的哈密顿算符完全可以不含粒子的坐标和动量。而且，在量子力学里，粒子的反演性质属于它的态函数 ψ 在相应反演操作下的变换性质。这些都是在经典力学的框架里不可能描写的。

参 考 文 献

[1]《诺贝尔奖获奖者演讲集(第二卷)·物理学》,宋玉升等译,北京:科学出版社,1984,327—350 页。

[2] M. Jammer, The Philosophy of Quantum Mechanics, New York: John Wiley, 1974;中译本:《量子力学的哲学》,秦克诚译,北京:商务印书馆,1989,第 2.5 节。

[3] 同上,第 5.1 节。

[4] 参看:关洪,《一代神话——哥本哈根学派》,武汉:武汉出版社,2002,第 6.2 节。

[5] 参看:文献 [2],第 7.5 节;文献 [4],第 6.3 节。

[6] 转引自文献 [2],345 页。

[7] 英译文收入:B. L. van der Waerden (ed.), Sources of Quantum Mechanics, Amsterdam: North-Holland, 1967, pp. 181—198.

[8] J. Mehra, H. Rechenberg, The Historical Development of Quantum Theory, vol. 2, New York: Springer, 1982, pp. 150—151.

[9] 英译文收入文献 [7], pp. 262—276.

[10] W. Heisenberg,《原子物理学的发展和社会》,马名驹等译,北京:中国社会科学出版社,1985,70 页。

[11] M. Born,《我的一生——马克斯·玻恩自述》,陆浩等译,上海:东方出版中心,1998, 308 页。

[12] 英译文收入文献 [7], pp. 277—306.

[13] 英译文收入文献 [7], pp. 321—385.

[14] 英译文收入文献 [7], pp. 307—320.

[15]《爱因斯坦全集》(第二卷),J. Stachel 主编,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社,2002,469—486 页。

[16] 参看:P. W. Milonni, Wave-particle of light: a current perspective, in *The Wave-Particle Dualism*, S. Diner *et al.* (eds), D. Riedel Publishing Company, 1983, pp. 27—68.

[17] D. Bohm, Quantum Theory, Prentice-Hall, 1951; 中译本:《量子理

论》,侯德彭译,北京:商务印书馆,1982,139 页。

[18] W. Pauli, General Principles of Quantum Mechanics, Berlin: Springer-Verlag, 1980.

[19] P. A. M. Dirac, The Principles of Quantum Mechanics, Oxford: Clarendon, 1958.

[20] L. D. Landau, E. M. Lifshitz, Quantum Mechanics, London: Pergamon Press, 1958.

[21] E. Fermi, Notes on Quantum Mechanics, The University of Chicago Press, 1961; 中译本(附有费米的手稿影印件):《量子力学》,罗吉庭译,西安:西安交通大学出版社,1984.

[22] R. P. Feynman *et al.*, The Feynman Lectures on Physics: Quantum Mechanics, Addison-Wesley, 1965.

[23]《诺贝尔奖获得者演讲集(第二卷)·物理学》,宋玉升等译,北京:科学出版社,1984,263—273 页。

[24] M. Born, Physics in My Generation, Pergamon, 1956;中译本:《我这一代的物理学》,侯德彭等译,北京:商务印书馆,1964,147—181 页。

[25] 文献[2],49 页。

[26] 文献[24],220 页。

[27] 英译文收入:J. A. Wheeler, W. H. Zurek (eds.), Quantum Theory and Measurement, Princeton: Princeton U. P., 1983, pp. 52—55.

[28] 如果不算没有产生多大影响的、在早几年一位遗传学家引入的一种实数概率幅的话。参看:关洪,《量子力学的基本概念》,北京:高等教育出版社,1990,第 3.3 节。

[29] 文献[11], 323—325 页。

[30] 以上见文献[24],14—19 页。

[31] 转引自文献[2], 51 页。

[32] R. P. Feynman, A. R. Hibbs, Quantum Mechanics and Path Integrals, New York: McGraw-Hill, 1965, p. 1;中译本:《量子力学与路径积分》,张邦固、韦秀清译,北京:科学出版社,1986。

[33] K. Popper, Quantum Theory and the Schism in Physics, Totowa: Rowman and Littlefield, 1982, p. 1.

[34] M. Bunge, Philosophy of Physics, Dordrecht: D. Reidel, 1973, p. 114.

[35] 以上参看:M. Jammer, The Conceptual Development of Quantum Mechanics, New York: McGraw-Hill, 1966, p. 148.

[36] B. L. van der Waerden, Exclusion Principle and Spin, in *Theoretical Physics in the Twentieth Century: A Memorial Volume to Wolfgang Pauli*, M. Fierz and V. Weisskopf (eds), London: Interscience Publishers, 1960, pp. 199—244.

[37] 参看:文献 [2], 109—110 页。

第六章　从中子的发现到同位旋的建立

6.1　核物理学的发展和中子的发现

在核物理研究的早期，例如卢瑟福的 α 粒子散射实验，使用的放射源都是天然放射性元素发出的射线。1919 年，卢瑟福又用 α 射线去照射氮，发现产生出射程较长而质量较小的微粒，并被证认为氢原子核。卢瑟福起先称之为“H 粒子”，1920 年又起了后来正式的名称“质子（proton）”。实际上，这是第一次实现的人工核反应

$$^{14}_{7}\mathrm{N}+^{4}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow{}^{17}_{8}\mathrm{O}+^{1}_{1}\mathrm{H}$$

这种用人为的方法实现的原子嬗变过程，表明人类已经从原子的构造进入到原子核内部，开始用他们掌握的知识去变革原子核了。

在卢瑟福首次实现人工核反应之后，物理学家们纷纷用 α 射线轰击各种原子，希望再发现新的现象。因为当时使用的天然 α 射线源的能量不高，所以只是在轰击少数轻原子时发现产生质子的类似反应。可是，当用钋的 α 射线轰击铍元素时，发现了异样的情况，产生出的是一种穿透力特别强的射线，开始被称为“铍射线”。1930 年 6 月，博特（W. Bothe，1891—1957）和贝克（H. Becker）通过系统的研究，发现这种“铍辐射”也存在于 α 射线轰击其他轻元素的产物之中。他们评论说，“新的辐射……是那么硬，使得我们很难怀疑它们来源自原子核。”

但是，当时业已发现的粒子有带负电荷的电子、带正电荷的质

子和不带电的光子这三种，似乎已经品类齐全，许多物理学家料不到自然界还会存在着其他种类的粒子。在这种观念的支配下，他们以为这种辐射由原子核发出的 γ 射线组成。然而，它的能量值和角分布都不符合于 γ 射线的性质。

1932 年 1 月，老居里夫妇的下一代、约里奥-居里夫妇(J. Joliot，1900—1958；I. Curie，1897—1956)发表了一篇文章《从被穿透力很强的 α 射线照射的含氢物质发射的高能光子》。他们让由 α 射线照射铍元素产生的射线照射电离室窗口上的石蜡或其他含氢物质时，就在电离室里检测到电离效应，并且认为石蜡发射出来的是高速运动的质子。他们并且进一步指出，如果质子的发射是一种康普顿式的效应，这些 γ 射线的能量就应当有 50 MeV 左右。约里奥-居里夫妇觉得这一能量值确实高到出乎意料，但亦不至于成为否定康普顿散射机制的理由。然而，在下个月发表的另一篇短文里，他们又改口说质子发射的机制“对应于辐射同物质相互作用的一种新模式。”由此可见，在 20 世纪之初核物理研究的法国学派专注于能量来源而忽视物质构造的传统，仍然支配着他们的研究路线。



图 6.1 查德威克(J. Chawick，1891—1974)

然而，在卢瑟福的实验室里工作的查德威克(J. Chadwick，1891—1974)对此却有不同的反应。后来查德威克是这样回忆的[1]：“一天早上我读到了约里奥-居里夫妇的文章，他们在这篇文章里报告了从铍产生的辐射的一种十分惊人的性质，一种极为令人吃惊的性质。……在那个上午晚些时我告诉了卢瑟福。我长期以来形成了一种习惯，每天上午 11 时前后我都要找他，告诉他有什么有意义的消息，

并且讨论实验室工作的进展。当我告诉他约里奥-居里夫妇的观察和他们对此的观点时，我看到他越来越惊奇的神色，终于蹦出了一句'我不相信。'这样一种急迫的言辞完全不合乎他的性格，在我同他长期相处的经历中我想不起有类似的情况。我指出要留意约里奥-居里夫妇所报告的电离效应。当然，卢瑟福同意我们必须相信他们的观察结果；但对这种现象的解释却完全是另外一回事。

"我那时候正好准备开始自己的实验，因为已经准备好了一个漂亮的钋放射源……我开始的时候不带什么先入为主的偏见，虽然在内心里很自然地想的是中子。我推断约里奥-居里夫妇的观察肯定不能归于一种康普顿效应，因为我已经不止一次在这方面寻找过。我相信在这里面有一种完全新颖的和奇异的东西。几天的紧张工作就足以证明，这些奇异的效应是由一种中性粒子产生的，并且使得我们能够据此测定其质量：卢瑟福在 1920 年设想的中子终于自行展露出来了。"

原来，卢瑟福早在 1920 年就说过："电子与氢核可能有一种[比普通的氢原子]紧密得多的结合方式……这种原子的存在看来是为了说明重元素的构成所必需的。"按照后来的认识，卢瑟福所说的这种由氢核即质子和电子结合而成的原子式的粒子，其自旋必定是整数而不可能取 1/2(以普朗克常数为单位)，所以不会是 1932 年发现的中子。再说，为什么普通的氢原子不会随时坍缩成这样一个中性的粒子呢？这个问题似乎并没有引起过卢瑟福的烦恼。[2]

可是，卢瑟福认准了的事情，素来是说干就干。在接下来的几年里，他的助手们分别使用了一些不同的方法去寻找这种中性粒子，虽然都没有得到成功，但亦在 1921 年开始发表的一些文章里为它起了"中子(neutron)"这一名称。

现在回过头看，卢瑟福当初的设想虽然显得过于简单，在细节上确实存在着一些经不起推敲之处；不过，在 1920 年谁也不知道

粒子还有什么自旋，按照当时的认识水平，他的那种猜测亦无可厚非。重要的是，他惊人的物理直觉恰好找对了正确的主攻方向。卢瑟福学派这种坚持探究物质构造而不是仅仅去计算能量得失的研究路线，终于在中子的发现上结出了又一个硕果。

具体说来，查德威克要做的实验是使用云室和计数器等仪器来研究有关的过程。他发现铍辐射不仅从石蜡，而且亦会从锂、铍和硼等物质中击出带电粒子，并且证明了这些粒子就是铍辐射所通过的物质元素的反冲原子。从这些反冲粒子在云室里的射程就可以计算出它们的能量和速度了。查德威克认为，铍辐射的这些性质与康普顿散射中的 γ 辐射量子很不相同，“这一特性预示着辐射是由粒子组成的。”

由于中性粒子没有在云室中留下径迹，所以不能直接测量它的质量。查德威克利用了一种巧妙的方法，先后测量在铍射线照射下石蜡放出的质子的最大射程和在充氮的云室内的反冲原子的射程，将根据动量守恒写出的两道方程联合求解，就可以算出未知粒子的质量同质子质量之比。最后他得到了这样的结论：“铍辐射事实上是由粒子组成的，这些粒子的质量大约和质子的相同。”再根据这种粒子“很容易穿透……10 厘米乃至 20 厘米的铅”，“而质子却能被 1/4 毫米的铅挡住”的事实，断定它是电中性的。

1932 年 10 月，查德威克发表了他的工作，把“铍射线”的产生过程解释为

$$^{9}_{4}\mathrm{Be}+^{4}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow{}^{12}_{6}\mathrm{C}+^{1}_{0}\mathrm{n}$$

这就是中子 n 的发现经过。

上述核反应能够产生出中子来，那么原子核里面是不是原来就存在着中子呢？或者说，中子是不是原子核的构成成分呢？按照经典物理学的观念，这是一个合乎道理的问题。

然而，在中子发现之前的二三十年里，按照同样的思路，已经发展出一种原子核构成的学说。因为，原先不知道有什么中子，从

放射性现象发现之初，物理学家们就从原子核的β衰变，看到了原子核会放出电子来，由此认为电子必定原来就处于核内，或者说电子必定是原子核的一种构成成分，就是理所当然的了；同样，从原子核的α衰变，看到了原子核会放出α粒子来，亦会认为α粒子必定原来就处于核内，或者说α粒子必定是原子核的一种构成成分。

事实上，在第四章里谈到的范登布罗克，在他1913年提出用核电荷数作为原子序数 Z 的那篇文章里，就设想过原子核是由α粒子和电子构成的。但是，因为α粒子即氦核的"质量数"A 等于4，而电子的质量比质子小得多，它们不会对原子核质量有明显的贡献，所以这种模型难以解释例如上述反应式里的铍的构成，因为它的质量数不是4的整数倍。

后来大行其道的是原子核由氢核即质子与电子构成的模型，那是由卢瑟福在1914年提出来的，并且很快就得到各国物理学家广泛认同。按照这种模型，一种质量数为 A，原子序为 Z 的核素，含有 A 个质子和 $A-Z$ 个电子。在这里质子主要起到了提供核质量的作用，而电子则抵消掉 A 个质子的多余电荷，使得总的核电荷刚好等于 Z。并且，如果不算在微观领域内非常微弱的引力作用的话，当时只知道有电磁作用，两种电荷相反的粒子自然有利于靠库仑力束缚在一起。在这样的安排下，各种核素即各种原子核及其不同同位素的质量数和电荷数都得到了解释。于是，普劳特在整整一百年前关于所有原子都是由个数不等的氢原子结合而成的猜想，就以所有原子核都是由个数不等的氢核结合而成的这种新形式复活了。

然而，核内存在着电子的可能性，亦不断遭到质疑。首先，上一章已经提到，"当时从电磁质量的计算得到的电子半径具有10^{-13}厘米的数量级"，这一尺寸实际上已经同核的大小相当，很难设想在原子核的里面可以装得进许多个与它差不多大小的电子。其次，已经从原子光谱线的超精细结构测定的核磁矩比电子所具

有的玻尔磁子小三个数量级，多个电子的磁矩怎么会都恰巧差不多完全抵消掉而只剩下一点点零头哩？

最后，更加确定的矛盾集中在核自旋以及相关的统计问题上。以氮 14 为例，它的 $A=14$，$Z=7$，按照核的质子-电子模型，它应该由 14 个质子和 7 个电子组成，一共有 21 个自旋为 1/2 的粒子。那么，氮核的总自旋只能够取半整数值，因而服从费米统计。但是，1928 至 1929 年，从氮分子 N_2 及其离子 N_2^+ 的转动带光谱里相邻谱线、即对应于角动量量子数为奇数和偶数的谱线的强度比先后测定出氮核的自旋为 1，满足的是玻色统计。这个结论同质子-电子结构模型不符合，这就是突出的氮分子困难。面对着这个尖锐的矛盾，竟有人提出，可能在核内的电子的行为会变得与在核外时不一样，从这种说法可以看到问题的严重程度了。

中子的发现开辟了新的天地，亦带来了一系列的争论。特别是，中子发现之初，它的自旋和质量还未经精确测定，关于中子是基本粒子还是复合粒子，以及原子核到底由哪些组分粒子构成等等问题，一时仍然未能作出定论。一方面，卢瑟福和查德威克秉承原先的思路，坚持认为中子是由质子和电子结合而成，同时放弃电子在核内的单独存在。佩兰则认为，原子核的组分有 α 粒子、质子、中子和电子。甚至到了 1933 年，狄拉克还在说原子核由质子、中子和电子组成。

另一方面，苏联物理学家伊万宁柯（Д. Д. Иваненко，1904—）于 1932 年 4 月最早提出中子应当是像质子和电子那样的基本粒子。同年 8 月，他又提出，如果原子核仅由质子和中子组成，而且中子和质子一样具有自旋 1/2 和满足费米统计，就可以解决氮分子光谱的困难。因为，按照这一方案，氮 14 核含有 7 个质子和 7 个中子，总数是 14，它就应当有整数自旋并且满足玻色统计。1932 年夏天，海森伯一方面采用伊万宁柯关于原子核的质子-中子模型，开始尝试处理核力问题，一方面又认为核内存在电

子会使β衰变易于得到解释，并且从当时测量到的中子质量偏小的数据，亦倾向于认为中子是一种复合粒子。

中子既然不带电，就难以像对带电粒子那样直接测定其质量。早期对中子性质的了解，有赖于对氘的性质的研究。氘，或者说重氢即氢的一种质量数为2的同位素，也是在1932年这个丰收年份的1月里由尤里(H. Urey，1893—1981)宣布发现的。1933年5月，从对氘分子光谱的观察，得到氘核自旋值倾向于1的结果，至1934年3月进一步的实验确认了这一结果之后，才推出中子的自旋或者是1/2或者是3/2的结论，并且于1937年最后落实为1/2。至于中子的质量，起初的测量值都比氢原子小，直到1934年8月，查德威克对氘核的光致分裂过程进行精确的测量，结果知道中子的质量不仅大于质子，而且大于质子和电子质量之和。与此同时，海森伯等人通过对核力的初步研究，亦已认识到质子和中子是靠一种新型的强作用力结合成原子核的，这是一种比电磁力强得很多的短程力；而质子和电子只靠电磁力，除了氢原子之外是不会形成原来所设想的那种结合状态的。由于这几方面的进展，终于否定了中子是复合粒子的可能性，肯定它是一种基本粒子。

6.2　狄拉克方程和正电子的发现——1932奇迹年

对于自由粒子，上一章给出的原始形式的自由粒子薛定谔方程可以写成

$$\mathrm{i}\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi=-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi$$

注意到方程中对时间的微商是一阶的，而对空间坐标的微商则是二阶的，肯定不满足相对论协变的要求。事实上，薛定谔开始构造他的理论的时候，正是相对论呼声很高的日子，所以其实他首先写出的是满足相对论协变性的、对时间和空间都是二阶微商的方程

(m 是粒子的静止质量)

$$\left(\nabla^2-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}-\frac{m^2c^2}{\hbar^2}\right)\psi=0$$

只是他发现用它不能恰当地解决氢原子问题,才转到非相对论的理论上去。后来人们弄明白了,以上方程描写的不是电子而是自旋为零的介子,现在一般称为克莱因(O. Klein, 1894—1977)-戈顿(W. Gordon,1893—1940)方程,虽然也有人把它叫做相对论性薛定谔方程。

此外,薛定谔方程解出的氢原子能级与玻尔理论的结果相同,只决定于其主量子数 n 而与角动量量子数 l 无关,但观察到的光谱线存在着按电子的总角动量(轨道角动量加自旋角动量)量子数 j 的进一步分裂。曾经运用过综合考虑电子动能的相对论修正加上电子的自旋-轨道耦合的微扰近似方法,算出了与当时的实验观察相符合的能级修正项公式,

$$\Delta T=\frac{R\alpha^2}{n^3}\left(\frac{1}{j+\frac{1}{2}}-\frac{3}{4n}\right)$$

那么,是否能够从基本原理出发,建立相对论性的量子力学理论,精确地而不是近似地解决这个问题呢?这就是 1928 年狄拉克提出他的相对论性电子方程时的背景。狄拉克实际上是在寻求一道对时间和空间都是一阶微商的"线性"方程,根据一般的线性条件以及相对论协变的要求,他导出了以下形式的"狄拉克方程"(按照相对论表述的惯例,方程中的 $\mu=1,2,3,4$,重复指标表示求和)

$$\left(\mathrm{i}\hbar\gamma_\mu\frac{\partial}{\partial x_\mu}-mc\right)\psi=0$$

式中的 γ_μ 是满足条件

$$\gamma_\mu\gamma_\nu+\gamma_\nu\gamma_\mu=2\delta_{\mu\nu}$$

的四个量.可以证明,满足这一代数关系的 γ_μ 的最简单的或者说基

本的解，是 4 个四行四列的矩阵，所以常常把它们叫做 γ 矩阵。那么，相应的 ψ 就是具有四个分量的一种旋量。为了同上一章讲过的描写自旋角动量量子数 $s=1/2$ 的二分量旋量相区别，一般把它称为狄拉克旋量。

粗略地说，四个分量的狄拉克旋量 ψ 里，有两个分量分别描写自旋朝上的电子的状态和自旋朝下的电子的状态。亦即是说，狄拉克方程的解自动包含了电子的自旋变量。或者说，相对论性的狄拉克方程是为自旋为 1/2 的粒子建立的。并且，从电磁作用的参加可以得出自旋为 1/2 的电子具有一个玻尔磁子的磁矩的结果。从前，在薛定谔方程里，需要另外分别设定电子的自旋和磁矩。现在，在相对论性的理论里，这些都是已经包含在方程里面的内禀性质了。

按照相对论，这样描写的电子，它们的能量 E 当然取正值而且不小于其静止质量 m。然而，在 ψ 里还有两个分量，描写的不是这种 $E\geqslant m$ 的“正能解”电子，而是 $E\leqslant m$ 的“负能解”电子，其中一个是自旋朝上的状态，另一个是自旋朝下的状态。在量子力学里还没有遇到过这种情况。为了对负能电子作出解释，狄拉克提出了他的“空穴理论”，认为由于电子满足的不相容原理，所有负能量能级都被一一填满，形成一个“负能海”，相应于物理上的真空状态。那么，当有一个负能电子得到能量跃迁到正能区后，它就成为一个普通的正能电子，而在负能海中留下了一个成为“空穴”的空位。根据分析，这个空穴的性质表现得就像一个带一份正电荷的正能量粒子那样。于是，狄拉克由此得出了他的方程同时描写了一个带负电的电子和一个带正电的粒子的结论。

本来，从方程的正能解和负能解的对称性可以看出，空穴表现的质量应当与电子相同。可是，当时知道的带一份正电荷的粒子只有质子，而且海森伯和外尔都表示过新理论应当同时描写电子和质子的看法，狄拉克就采取了“负能电子分布中的空穴乃是质

子”的假设。他后来回忆道：“我恰恰在这一步没有勇气假设有一种新粒子，这是由于当时总的舆论倾向是反对新粒子的猜测的。”

不过，这种“乱点鸳鸯谱”的错事也不能全怪他们。在上一节里已经说到，在发现质子之后直到发现中子之时，除了不带电的光子之外，物理学家们只认识到有一种带负电的电子和一种带正电的质子。并且，他们常常把这两种粒子相提并论，说成是“一种负电子和一种正电子。”例如，卢瑟福在 1914 年就在一篇文章里写道：“The hydrogen nucleus is the positive electron.”又如，密立根在 1929 年为第 14 版的《不列颠百科全书》写的“电子”条目里，仍然把电子和质子称为“negative and positive electrons”。

这两句话怎样翻译呢？当然可以直译为“氢核是正电子”以及“负电子和正电子”。但是我们今天说的“正电子”是 positron，即电子的反粒子，不是他们讲的 positive electron。考虑到 electron（电子）本来的意思就是“带电的粒子”，那么也许把 negative electron 和 positive electron 译成“带负电的粒子”和“带正电的粒子”，更能够反映当时的语境。无论如何，在狄拉克写出他的方程之前的十几年里，人们的确是把电子和质子相提并论的，他受到这种习惯的影响也就不足为奇了。

1930 年初，奥本海默指出狄拉克假设存在的困难。因为如果空穴代表质子的话，氢原子里的电子会很快落到空穴里湮没而放出两个 γ 光子，这一过程会使得通常的物质只能够存活 10^{-10} 秒那么短的时间。同年年底，外尔又改变观点反过来指出，电子和质子在质量上的差别，将会破坏理论的基本对称性。受到这些批评之后，狄拉克终于在 1930 年改正了错误，宣称“一个空穴应当是一种在实验物理学里未曾发现的新粒子，它有与电子相同的质量和相反的电荷”，并且把这种新粒子称为反电子。

其实，在那之前探测宇宙线的云室里早就留下了反电子的踪迹，它在磁场中的径迹的弯曲方向与电子相反。以前因为想不到

会有带正电荷的反电子，所以把这些反向弯曲的径迹误认为属于反向行进的负电子。1932 年，安德森（C. D. Anderson，1905—1991）在云室中插进一块薄铅片，由铅片两边速度减慢的方向判定粒子的走向，确认了在宇宙线中存在一种带一个正电荷的粒子，其质量与电子接近。安德森把它命名为正电子。这种正电子无疑就是电子的反粒子，即狄拉克说的反电子。它也是第一次发现的反粒子。



图 6.2　安德森（C. D. Anderson，1905—1991）

狄拉克的空穴理论只是一种过渡性的理论。试问那填满了无限多个负能状态的无数电子所具有的巨大总电荷，为什么不会产生可以观察到的物理效应呢？在后来的量子电动力学里，场算符 ψ 表示电子的消失或者正电子的产生，而它的伴随旋量 $\bar{\psi}$ 则表示正电子的消失或者电子的产生，再也不需要负能电子的海洋了。

此外，从含有库仑势的狄拉克方程，能够得出氢原子主量子数为 n 的能级按电子的总角动量量子数 j 分裂的精确结果。在这一精确公式对精细结构常数 α 的展开式里，重新导出了上面所讲的加上了相对论性动能修正和适当的自旋-轨道耦合的薛定谔理论所得出的能级修正项。这里的 $\alpha=e^2/\hbar c\approx 1/137$ 是描写电磁相互作用强度的无量纲参数。

后来的发展弄清楚了，原则上存在着描写具有各种各样的自旋的粒子的相对论性方程。例如，麦克斯韦方程本身就满足相对论协变的要求，在量子场论里，它的解描写自旋为 1 的光子的产生和消失。而且，一切种类的粒子都存在着反粒子。只不过有少数粒子，例如光子和在本书下一章里将要讲到的中性 π 介子等，本身就是自己的反粒子。

1932 年在现代物理学的发展上真是一个奇妙的年份。在这一年里不仅先后发现了中子和正电子，而且也实现了不用天然放射性而用人工加速的粒子束打击靶物质以产生核反应的第一批成果。在这一年里相继研制成功和投入使用的人工装置包括范德格拉夫(R. J. van de Graaff, 1901—1967)的静电加速器，科克饶夫(J. D. Cockcroft, 1897—1967)和瓦尔顿(E. T. S. Walton, 1903—)的高压倍增器，以及劳伦斯(E. O. Lawrence, 1901—1958)的回旋加速器。并且，下面将要讲到，这一年前后也是中微子假说从初步提出到趋于成熟的时期。所以，1932 年也可以说是一个“奇迹年”。

在物理学的历史上，“奇迹年”(拉丁文 *annus mirabilis*)这一词组最先用在牛顿身上，指的是老年的牛顿在 1714 年写的备忘录里，说他自己年轻时候“在 1665 年和 1666 年闹瘟疫的”一年半时间里，先后发明了二项式定理、微积分、颜色学说，并且从开普勒第三定律“推出了使行星保持在它们的轨道上的力必定要和它们与它们绕之而运行的中心之间的距离的平方成反比例；而后把使月球保持在它的轨道上所需要的力和地球表面上的重力作了比较，并发现它们与这一关系相当符合”等光辉业绩。

有据可查的是，牛顿最早在 1669 年就在朋友中散发了小册子《分析学》，又于 1671 年写下书稿《流数法和无穷级数》，接着在 1672 年致皇家学会的一封信里报告了他的分光实验和颜色学说。如果说这些成就都离开那个“奇迹年”不算远，因而他关于这些方面的言辞可信度比较高的话(至少他在那两年里可能有了一些初步的结果)，他关于在那两年里就已经证明了行星的椭圆轨道和反平方引力的关系，以及用引力统一解释了月球轨道和地面重力的回忆，却没有得到任何文字资料的支持。与此相反，从 1680 年前后胡克、哈雷(E. Halley, 1656—1743)同牛顿之间的通信和讨论的记录看来，牛顿对这些问题的解决，不会早于 1679 年年底。例

如，那一年里牛顿在同胡克的通信中还明确认为，远处倾斜下落的一个物体受地球引力的影响而运动时，走过的是一条逐渐收紧的螺旋线而不是胡克所主张的一个椭圆。[3,4]

那么，为什么牛顿偏要那样说呢，是不是他晚年记忆模糊了呢？考虑到牛顿在发明微积分的优先权上同莱布尼茨有激烈的争吵，在用反平方的引力来解释行星运动的问题上同胡克也有过类似的不愉快经历，晚近的许多研究者认为，老年的牛顿在 1714 年的那段话并非记不清楚了，而是故意把自己的发现年份说得早早的，制造出遥遥领先的假象，好在优先权的论战中占据有利的地位。所以，牛顿自己所说的在 1665～1666 年间里的成就并不那么可信，他的“奇迹年”里确实含有不少的水分。然而，在那之后 240 年的爱因斯坦“奇迹年”里的成果，都是有公开发表的论文为依据的，而且最重要的三篇论文，只是在 1905 年里不到个四个月的时间里完成(3 月到 6 月)或者发表(6 月到 9 月)的。所以，只有爱因斯坦的 1905 年才是科学史上绝无仅有的一个货真价实的“奇迹年”。

现在我们又迎来了一个新的“奇迹年”，不过在这一年里的几项成就不是由一个人独自做出来的，而是分属于几组物理学家的贡献。

6.3　泡利提出中微子假说和费米建立 β 衰变的量子场论

回顾在核 α 衰变中，放出的 α 粒子可以认为是原来就存在于核内的一种成分。而且，1928 年伽莫夫(G. Gamow，1904—1968)等人已经运用量子力学里的库仑势垒穿透机制，说明了半衰期从短到不足一秒至长到十亿年级的各种 α 衰变过程放射出来的 α 粒子能量与其半衰期的关联走势。后来，对于在核反应里中子的产生，亦可以做类似的理解。至于 γ 衰变嘛，它放出的是电磁辐

射而不是实物粒子;从经典物理学里已经知道,带电粒子作加速运动时就能够发出电磁辐射,自然不会有什么疑问。现在,既然原子核只是由质子和中子构成,那么在核 β 衰变中放出的电子,就是在这个过程中从无到有地产生出来的了。可是,即使运用在发现中子之前的几年内建立起来的量子力学理论,亦不能够恰当地描写这种粒子产生的过程。这是因为,在量子力学里的态函数 ψ 是满足概率守恒的,或者说全空间的总概率是不随时间变化的。这就意味着用态函数 ψ 描写的电子是永远不生不灭的。这是关于 β 衰变的第一个令人困惑的问题。

此外,查德威克早在 1914 年就从实验发现,每一种放射性核素通过 β 衰变发射出的 β 粒子即高速运动的电子,它们的能量不是像在 α 衰变中发射的 α 粒子和在 γ 衰变中发射的 γ 射线那样具有一个确定的数值,或者说观察到的不是一种尖峰状的能量分布,而是呈现出一种两头为零中间突出的、从零能到一个最大能量值的一种宽广的连续分布。这种 β 能谱的最大值,相当于末态电子按照能量守恒定律计算出的能量值。那么,为什么绝大多数 β 粒子都在不同程度上丧失了它的一部分甚至全部能量呢?这是关于 β 衰变的第二个困难的问题。

1915 年,卢瑟福认为,连续的能谱意味着每个同类原子核发出具有各种不同的能量的 β 电子。1922 年,迈特纳(L. Meitner, 1878—1968)则提出了不同的观点,认为每个原子核发出的 β 电子开始时都具有满足能量守恒定律的单一能量值,但是一部分电子由于参与原子核里面的某种中间过程而失去了一部分能量,最后转换为次级的 β 电子,因此观察到的不是原子核发出的初级电子而是能量减小了的次级电子的能谱分布。1923 年康普顿完成了那个电子和光子散射的著名实验之后,迈特纳和老居里夫人等人又认为,β 电子可能是在同原子核发出的 γ 光子散射之后失去一部分能量的。

为了检验迈特纳的假设是否正确，艾利斯(C. D. Ellis，1895—1980)和伍斯特(A. Wooster，1903—)经过反复研究，最后设计了一个实验，运用一个量能器把β衰变中产生的所有粒子都收集起来，不论它们是初级过程还是次级过程的产物。那么，如果初级电子的能量重新分配给后来产生的各个次级粒子的话，也能够从收集到的总能量，计算出每次β衰变放出的平均能量应该等于观察到的β电子能谱的最大值。然而，他们1927年发表的实验结果表明，量能器里得到的只是最后射出的β电子的能量，其平均值与观察到的连续谱相符，实际上否定了存在着次级过程中放出来的额外能量。由此得到的结论只能是：观察到的β电子就是核衰变中放出的电子，并没有什么次级过程起作用的迹象。

为了解决β电子的能谱不是单值的而是连续分布的困难，玻尔干脆提出放弃能量守恒定律。这已经他第二次这样做了。第一次是在1924年，玻尔同他的两位合作者克拉默斯和斯雷特(J. C. Slater，1900—1976)联合发表了一篇文章《辐射的量子理论》，一般用这三位作者姓氏的缩略，简称为BKS文章。玻尔在这篇文章里提出，在个别的微观过程中，能量和动量守恒定律不再成立。由于过去证实这两条守恒定律的根据，都只来自宏观物理学实验，所以只要对大量微观事件的统计结果满足能量和动量守恒定律，并不违反当时已知的任何物理学规律。

这时候，康普顿效应的初步观察结果，已经显示了在散射过程中，光子表现得就像电子一样，是一种具有确定能量和动量的粒子。爱因斯坦在致玻恩的一封信件中写道，如果“玻尔关于辐射的意见”是正确的话，“在那种情况下，我宁愿做一个补鞋匠，或者甚至做一名赌场里的雇员，而不愿意做一个物理学家。”[5]很快，在美国的康普顿本人和他的合作者，通过运用云室研究的进一步实验工作，证实在单个微观(康普顿)散射过程中，能量和动量守恒定律是准确成立的结论，否定了玻尔的假设。

这一回玻尔又旧调重弹，认为观察到的β电子连续能谱表明了在个别β衰变过程中能量并不守恒。这个主意最早是玻尔在1929年分别写给泡利和狄拉克的信件中提出来的，并且于1930年5月在一次讲座中首次公开申明他的观点。玻尔的观点当即受到了严厉的批评。例如，当泡利收到玻尔的手稿之后回复道："我不得不说我对你的文章一点也不满意。"而狄拉克的反应是："我宁可不惜任何代价地保持严格的能量守恒。"不过，我们现在要按当时的背景来看待玻尔的观点。那时候量子力学刚刚在几年前诞生，它已经给出了解决原子光谱的途径，甚至可以初步解决分子结合的问题。而且，上面已经提到，α衰变的性质也已经用量子力学给出了解释。然而，在20世纪头四分之一出现的相对论和量子力学的革命性理论，亦使得不少物理学家憧憬着这场革命还会以更加激烈的形式发展下去，还会有更加不合常规的发现，从而推出又一种新的物理学基本理论。这种新理论将会取代量子力学，就像量子力学曾经取代了牛顿力学那样。

具体说来，面对着原子核的组成和和β衰变等问题上的困难，一些一流的物理学家估计，进入到核物理学的领域，量子力学将不再生效，在这个更加微小的尺寸内需要寻求全新的理论。实际上，在BKS文章之前，就有几位物理学家分别发表过怀疑或者放弃能量守恒的言论。例如，1916年能斯特建议能量守恒只在某种统计意义上成立；1922年索末菲说协调光的波动理论和量子现象的最温和的办法就是放弃能量守恒。甚至连爱因斯坦都一度发生动摇，他在1910年针对光量子概念的困难说过，"人们必须抛弃现今形式的能量原理。"

面对着新的困难，玻尔和海森伯宁愿相信，核物理学需要新的动力学理论。他们认为，正像过去的普朗克常数标志着经典物理学同量子力学的分界线一样，现在电子的经典半径 a 标志着量子力学不再适用的界限。在这一尺寸内经典的电动力学明显失效，

而它也正好是原子核的尺度。1929 年，玻尔在一份没有公开发表的手稿里表示，当涉及到经典电子半径 a 的尺度时，就会需要一些新的物理学定律。[6]与此同时，海森伯则试图在理论上引进一个基本长度来解决困难。他认为，当进入到这一空间尺寸之内，目前的物理学基本理论将不再适用。海森伯后来在他的新理论里亦曾经多次使用这一手法。

有一篇文章这样评论当时的形势，“为了摆脱这种左右为难的局面，看来任何东西都是可以接受的——或者说，只是除了一种新的基本粒子之外。”[7]

这里面其实有一个基本的运动学问题。一个二粒子系统，在总动量为零的参照系里，两个粒子的动量必定是大小相等方向相反的。在牛顿力学里，这样的参照系叫做质量中心系或者简称质心系。不过，在相对论力学里，粒子的质量是随着对于参照系的速度而变化的，因而系统的质心没有确定的意义，于是把系统总动量为零的参照系改称为动量中心系。如果这个系统的能量是确定的话，那么再加上每个粒子的能量 E，动量 p 和（静止）质量 m 满足的关系式（牛顿力学里是 $E=p^2/2m$，相对论力学里是 $E^2=p^2c^2+m^2c^4$）就能够完全确定每个粒子的能量或者动量的大小。换句话说，在一个母体粒子静止的参照系里，由这个母体衰变而成的二体末态中的每一个粒子的能量必定是完全确定的。但是，三体末态就没有这种限制，由于总能量在三个粒子之间存在着各种不同的分配方式，就会出现像 β 电子连续能谱那样的分布。

所以，现代的物理学家看到任何衰变或者反应过程放出的一个末态粒子的动量中心系能谱是连续分布的，就知道过程的末态必定包含不止两个粒子。那么，为什么那时候的物理学家们都没有想到这一点，宁可放弃能量守恒定律而不去设想还有一个未观察到的末态粒子呢？我们估计，这是否反映了那时候的物理学家还受到伽森狄和牛顿等人的宗教观念的影响，认为组成物质世界

的基本单元都是由上帝创造的，因而不敢擅自增加新的基本粒子品种呢？

勇敢地跨出这一步的是思想上独立不羁、一向敢想敢说的泡利。他关于一种新的中性粒子的想法，最早是在 1930 年 12 月的一封信件里提出来的。这是他从苏黎世发给在德国图宾根参加放射性学术会议的朋友们的一封“公开信”，信中写道，“考虑到^{14}N和^{6}Li原子核的‘错误’统计以及连续的β能谱，我采取了孤注一掷的举措，以挽救统计性的‘交换定理’以及能量定理。即是说，有可能在核内存在着一种电中性的粒子，它的自旋是 1/2 并且遵从不相容原理，我想把它叫做中子，……中子的质量必定与电子同数量级，无论如何不会大于 0.01 质子质量。假设在β衰变中有一个中子同电子一起发射出来，并且中子和电子的能量之和保持恒定，连续的β能谱就能够得到理解了。”信中还说，“但是我觉得还不是发表这一想法的时机……请问怎么样从实验上证实这种中子的存在呢，如果它的穿透能力比γ射线还要大 10 倍的话。”在信件的最后，泡利说近日在苏黎世有一个“非出席不可”的盛大舞会，所以他就不能够参加图宾根的学术会议了。

由此可见，泡利提出新粒子的动机，并不是单纯为了解决β连续能谱的问题，而且希望能够一箭双雕地解决原子核的质子-电子模型所带来的自旋和相关的统计性的困难。他说的“交换定理”实际上指的就是由奇数个费米子组成的粒子自旋为半整数且满足费米统计、偶数个费米子组成的粒子自旋为整数且满足玻色统计的规则。

不过，泡利在这里讲的“中子(neutron)”不是后来查德威克发现的同名粒子。而且，泡利在这封信里又明显把他的“中子”看做是原子核的一种组成成分，所以这个时候他对关于以后改称为“中微子”(neutrino)的这种粒子的观念还不是十分清楚的。不过，不久测定了中子的自旋之后，原来以为的二体β衰变基本过程

$$n \longrightarrow p + e^-$$

不仅不会产生连续的β能谱，并且在角动量守恒或者说自旋搭配上也是有困难的，加上了中微子(ν)或者按照以后的命名称为反中微子($\bar{\nu}$)的粒子成为三体衰变

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

之后，这两个问题都迎刃而解了。

虽然泡利那封信没有正式发表，但是在此后的两三年里，他亦曾在几次不同的会议上讲述他的这一设想，并且加以整理和提炼，逐渐形成了一种比较成熟的假说。此外，1933 年夏天，埃利斯和莫特判断β能谱确实具有明锐的上限，它对应于β衰变过程的母核和子核之间的能量差。亦即是说，β电子的能量可以达到而不会超过能量守恒定律所允许的数值。这个结果显然有利于泡利的假设。因为，如果能量确是玻尔讲的那样统计守恒的话，为什么个别的β电子总是发生能量亏空而不是盈余的偏差呢？

1933 年 10 月，泡利在布鲁塞尔举行的第七次索尔维会议上，做了一个“供发表”的正式报告。他在报告中谈到：面对着“由于β射线存在着连续能谱的困难”，“玻尔所支持的一种解释容许当我们处理轻粒子起到重要作用的一种核过程时，不再遵从能量和动量守恒定律。在我看来这一假设要就是不能令人满意的，要就甚至像是无稽之谈。”“1931 年 6 月，我在帕萨迪纳的一次会议上提出了这样一种解释：守恒定律是成立的，伴随着β粒子的发射，有一种迄今未曾观察到的穿透能力很强的中性粒子发射出来。β粒子和在同一过程中从核发射出来的中性粒子的能量之和，等于对应着β能谱上限的能量。我们明白地假设，不仅能量是守恒的，而且线动量和角动量亦是守恒的，并且在所有基本过程中保持粒子的统计特性。”“这些中性粒子的质量不可能比电子大得多。为了同重的中子相区别，费米给它们起了‘中微子’的名称。中微子的固有质量很可能等于零。……在我看来中微子的自旋是 1/2，并

且服从费米统计，虽然事实上还没有什么实验为我们提供这一假设的任何证据。”由此可见，这一次泡利不再说中微子是核的组成成分，而只说中微子是在衰变过程中发射出来的了。

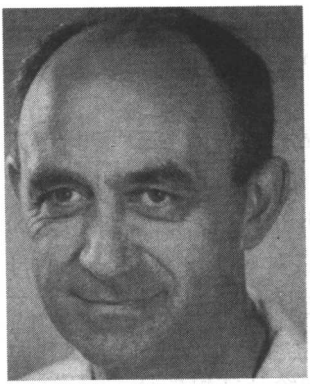


图 6.3 费米(E. Fermi，1901—1954)

费米也出席了这次会议，不过他没有参加关于β能谱问题的讨论。可是，费米在会后马上着手用那时候新兴的量子场论来研究β衰变过程，并先后于 1933 年底在意大利和 1934 年初在德国发表了他的理论，那是首次成功地运用量子场论来来解决一个实际物理问题。也许可以这样譬喻，费米这一工作的意义，好比第一次运用量子力学解出氢原子的能级一样。不过，在量子力学里首先有了薛定谔方程，把经典力学的库仑势代进去以后，剩下的就是数学问题了；而量子场论要困难得多，因为并没有现成的相互作用形式可以遵循。

而且，对于量子场论，真正的困难还在于，在上一章里已经提到的，从狄拉克 1927 年发表文章《辐射的发射和吸收的量子理论》开始，在他和海森伯等人一系列讨论量子场论的文章里，运用振子模型方法进行量子化的只是电磁辐射，它的量子即光子满足的是玻色统计，相应的吸收算符和产生算符所满足的是普通的对易关系。虽然 1928 年约丹和维格纳给出了费米子的吸收算符和产生算符所满足的反对易关系

$$\{a,\ a^{+}\} \equiv aa^{+} + a^{+}a = 1$$

但也没有想到真的会有什么用处。

这也许是因为，从麦克斯韦以来，场的概念同实物的概念一向是泾渭分明的。在麦克斯韦的理论里，电磁辐射是场，而电荷和电流的载体则是实物。在爱因斯坦的相对论里，更是严格区分了静

止质量为零的场和不为零的“有重物质”。所以，开始的量子场论自然只着重研究辐射的量子化，没有谁想到实物粒子也可以同场的量子化发生关系。

费米对量子场论并不陌生，此前他已经在这方面发表过多篇研究论文，并且于 1932 在《现代物理评论》上登载了一篇评述性文章《辐射的量子理论》。现在，他独具慧眼地为 β 衰变理论给出了“四费米子作用”的形式，第一次使用自旋 1/2 粒子的吸收算符和产生算符同时描写了初态中子的消失和末态质子、电子和(反)中微子的创生，为一种新型的相互作用——弱相互作用的动力学打下了坚固的基础。这一成就使得不少老资格的理论物理学家大吃一惊，他们做梦都想不到量子场论的抽象程式居然可以有这样的用途。例如，参与构造出费米子的吸收算符和产生算符的维格纳就这样说过：“我们从来没有想到过它能用在现实的物理学理论里。”[8]

在量子电动力学即研究纯电磁作用的量子场论里，满足狄拉克方程的电子同电磁场的相互作用项是

$$ie(\bar{\psi}\gamma_\mu\psi)A_\mu$$

式中的 ψ 是描写电子的狄拉克旋量，A_μ 是四维电磁势矢量，即三维的矢量势和一维标量势的组合。

现在费米采用的是仿效上述电磁作用形式的矢量型相互作用，使用现在的符号，可以把他的 β 衰变相互作用写成

$$g_V(\bar{\psi}_p\gamma_\mu\psi_n)(\bar{\psi}_e\gamma_\mu\psi_\nu)$$

其中每种 $\bar{\psi}$ 包含了这种粒子产生和相应的反粒子消失的费米子算符，ψ 包含了这种粒子消失和相应的反粒子产生的费米子算符。于是这种相互作用就能够描写在一个中子消失的同时，产生了一个质子、一个电子和一个反中微子的 β 衰变基本过程。费米假设中微子的质量等于零，由此计算出与实验观察符合的 β 电子能谱的形状，并且确定了这种相互作用的强度(费米常数 g_V)，初步解

决了这个难题。然而，实际上费米只考虑了四维矢量流中的第四分量，相当于只考虑了标量势的情形。不过，β电子能谱的形状与这种相互作用的细节无关，只决定于相空间的大小，所以费米的简化理论一开始就能够得出正确的结果。

其实，1928年冯诺意曼已经给出了狄拉克理论中的五种基本的协变形式，即：S(标量)，V(矢量)，T(张量)，A(轴矢量)和 P(赝标量)。在四费米子作用中采取不同的协变形式，会得到不同的角分布等细节，但不会影响到β电子能谱的形状。这也是费米的运气所在。

在这里必须强调的是这一理论具有非常重要的意义。因为它第一次描写了在核反应中，末态所有"实物"粒子都是在过程中创生出来的，而不是原来就存在着的。β衰变所产生的电子和中微子，原先都不是原子核的构成成分。甚至末态的质子与其看做是由初态中子转化而来，不如看做是初态中子的消失和末态质子的创生。这是描写物质构造的现代物理学理论从构成机制转变到生成机制的一个划时代的里程碑。

1934年晚些时，约里奥-居里夫妇用α射线照射铝27，结果除了发现当时有中子产生之外，在移去放射源之后，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。有关的反应过程是

$$^{27}\mathrm{Al}+{}^{4}\mathrm{He}\longrightarrow{}^{30}\mathrm{P}+{}^{1}\mathrm{n}$$

$$\downarrow\longrightarrow{}^{30}\mathrm{Si}+\mathrm{e}^{+}+\nu$$

其中的磷30同位素的半衰期只有大约200秒，因而在自然界中不可能单独存在。

同年，维克(G. C. Wick，1909—)指出，在费米理论里，允许原子核里发生如下的反β衰变的虚过程：

$$\mathrm{p}\longrightarrow\mathrm{n}+\mathrm{e}^{+}+\nu$$

而约里奥-居里夫妇发现的磷30的衰变，就是这一基本过程的表现。而且，根据费米理论，维克等还预言会存在轨道电子的俘获

$$p+e^- \longrightarrow n+\nu$$

这种过程亦由阿尔瓦雷兹(L. W. Alvarez, 1911—1988)于1938年观察到了。

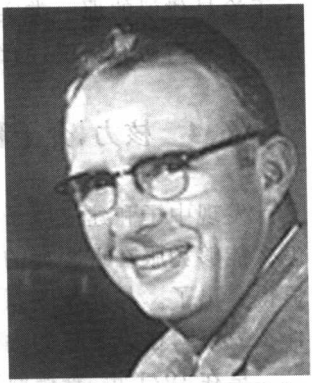


图6.4　阿尔瓦雷兹(L. W. Alvarez, 1911—1988)

于是,再也没有人怀疑中微子的存在了。不过,由于中微子不参加强作用和电磁作用,它的穿透能力极强,即使是泡利起初的估计亦是太保守了。事实上,中微子可以几乎不受阻碍地穿过整个地球,由此可以想见探测中微子的困难了。此外,同β电子一样,β衰变中放出的中微子的能量也是不确定的,探测起来更加困难。1941年,在抗日战争时期随浙江大学迁往贵州的王淦昌(1907—1998)写成《关于探测中微子的建议》一文,提出用上面提到的那一类俘获过程去直接探测中微子。因为那是一种二体反应,只要测定了末态核的反冲能量,就可以确定中微子的能量和质量。这篇文章在1942年于美国发表之后,经过多年的努力,莱因斯(F. Reines, 1918—1998)等

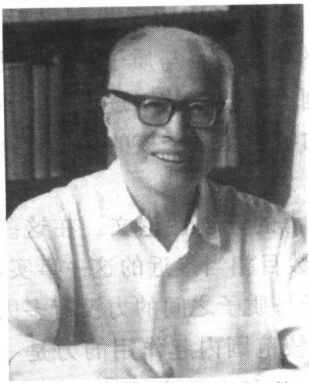


图6.5　王淦昌(1907—1998)

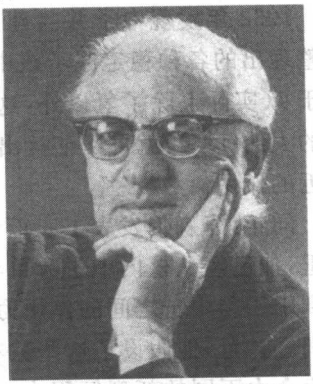


图6.6　莱因斯(F. Reines, 1918—1998)

终于在1952年至1956年间利用核反应堆的高通量中微子流进行了王淦昌建议的那一类实验，确认了中微子的单独存在。这时候离开泡利当初的提议，已经过去三十多年了。

6.4 核力，介子和第一种内禀空间——同位旋

发现中子和建立原子核的质子-中子模型之后，那么多个质子怎么能够克服在近距离的巨大库仑排斥力而共处于核内的问题就显得突出了。与此相联系的另一个问题是，电中性的中子又是靠什么力束缚在原子核的内部呢？

早在1921年，查德威克和比勒尔(E. S. Bieler，1895—1929)在依据原子核的质子-电子模型分析α粒子的时候，已经指出："没有一个由四个氢原子核和两个电子通过反平方力联结起来的系统，能够在那样的范围内给出那么强的力场……"和"现在的实验看来没有对电荷所在之处的力的变化规律的本性给出任何启示，而仅仅表明了这些力是非常强大的"。可以说，是他们第一次指出原子核内部必定存在着一种强大的非电磁短程力。

1932年发现中子并且建立原子核的质子-中子模型之后，从所整理出的各种稳定原子核中所含的中子数目与质子数目之比接近于1(实际上除了氢以外，这一比例值从轻核的1逐渐增加到重核的大约1.5)，就可以估计出质子和中子在原子核的构造上起着相近的作用。

同年，海森伯发表了三篇讨论核力的开创性论文。在这些工作里，他已经从核内中子数目与质子数目相当接近的这一事实，意识到中子与中子之间的作用力同质子与质子之间的力没有多大的差别。并且，他假设了这些只在原子核范围内起作用的力是一种与库仑力不同的新型短程力。至于质子和中子之间的短程力，他仿照对氢分子或者其离子的量子力学处理中的"交换力"机制，认

为一个中子由一个质子和一个电子组成，并且中子与质子通过交换一个电子而产生相互作用。在这里海森伯依然部分地运用那时候仍然盛行的原子核由质子和电子组成的模型，因而在一些细节上与后来确立的质子-中子模型并不相容。但是，他提出的这种交换力的机制以及仿照描写自旋交换的泡利算符而写出的质子和中子交换的算符，对以后的发展起到了积极的启发作用。

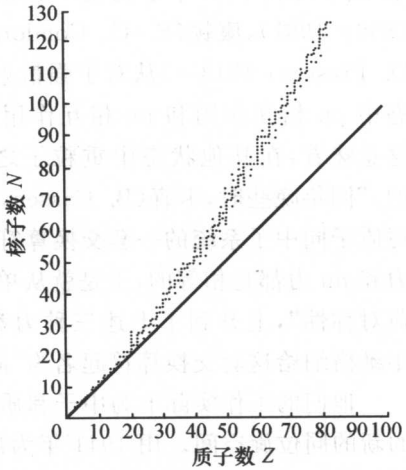


图 6.7　从轻核到重核的中子数 N 对质子数 Z 的比值



图 6.8　维格纳(E. Wigner, 1902—1995)

事实上，紧接着海森伯之后，维格纳等人又先后提出了存在着其他形式的质子-中子交换力的建议。接着，在那几年里，进行了对于不同的交换力机制以及各种各样的短程势函数的核力研究，试图解释已经有了初步结果的中子-质子和质子-质子散射的实验数据。可是，当时还没有认识到，在那么短的距离内是无法从散射数据确定势的具体形状而只能满足于估计其强度和力程的。

1935 年，通过变分法的计算，证实了 ^{3}H(pnn)和 ^{3}He(ppn)的结合能的差异可以归结为库仑作用的影响。这就意味着短程的质

子-质子力和中子-中子力是一样的。1936 年，布赖特(G. Breit，1899—1981)，康顿(E. U. Condon，1902—1974)和普雷森特(R. D. Present，1913—)从对于强散射实验的分析，证实了“在^{1}S 状态中 pp 相互作用和 pn 相互作用在实验误差范围内是相等的。这意味着，在其他状态中重粒子之间的其他相互作用也是相等的。”同年晚些时，卡森(B. Cassen，1902—)和康顿运用海森伯描写质子同中子系统的一套交换算符，论证了在^{1}S 状态中 pp 力，pn 力和 nn 力都是相等的，于是就从单纯的 pp 力与 nn 力相同的“电荷对称性”，上升到了上述三种力都相等的“电荷无关性”。1937 年维格纳给这套交换算符起名为“同位旋”(isotopic spin)算符。

他们的工作实际上为中子和质子引进了一个仿照自旋而建立的新的同位旋空间。用 1941 年为质子和中子起的一个总称——“核子(nucleon)”来说，质子和中子被分别看做是同位旋朝上和朝下的核子状态，它们组成同位旋空间中的一个二分量旋量，就像自旋朝上和自旋朝下的电子在普通空间中的表示一样。而与在普通空间里自旋-自旋相互作用的转动不变性相对应的，就是“电荷无关性”，即同位旋空间中的核子-核子相互作用的转动不变性。在理想的同位旋不变性里，核子这个同位旋双重态里的质子和中子的质量应当是一样的；两者实际上的质量差，则可以归于电磁作用的影响。

在获得了逐渐完善的实验数据之后，人们知道还可以从以下几方面得到电荷对称和电荷无关即同位旋转动不变的证据：一是所有原子核的结合能近似与原子量 A 即质子和中子数目之和成比例的实验数据；二是从核半径的测量了解到核的体积亦近似与 A 成比例的规律。如果把质子和中子看成一样，就很容易从核力的短程性理解这两个结果。第三是“镜像核”的能级分布的相似性。镜像核指的是中子和质子互换的两个或者多个原子核，例如：^{3}H 和^{3}He，或者^{13}C 和^{13}N。不过，在 1936 年还没有那么丰富的实-

验资料的情况下，他们就能够从对少数结果的分析提出同位旋的概念，真是一项了不起的成就。

当初起的“同位旋”的名称，显然是从“同位素(isotope)”一词脱胎而来。这里的“位”本来指的是元素周期表上的位置，对应着元素的原子序数 Z；同位素则指 Z 相同而质量数 A 或者中子数 N 不同的核素。然而，现在的质子和中子则是质量数 A 相等而原子序数即电荷数 Z 不相等的粒子。对于这个并不合适的名词，曾经有人建议改为 isobaric spin，虽然 isobar 这一名词被翻译为“同质异位素”或者“同量异位素”，指质量数 A 相等而电荷数 Z 不相等的核素，但 isobaric spin 仍然翻译做“同位旋”。再后来国际上为了省事起见，干脆简称 isospin 或者 i-spin。与此相对应，中文名词是否可以改为“同旋”，亦便可以与“自旋”那样的简单叫法相呼应呢？

顺便说一下，以上说的 isobaric spin 的译名“同质异位素”或者“同量异位素”里的“质”和“量”比较费解，很难令人一下子想到指的是“质量”和“原子量”。我建议不如改成“同重异位素”，一望而知指的是重量相同，因而质量亦相同的核素。再说，baric 的词根对应于希腊语 barus，本身就是“重”的意思。例如，下面就要讲到的 baryon(重子)这一名词也是用这个词根造出来的。

我们说过粒子的自旋是第一种内禀变量，但自旋矢量仍然是在普通坐标空间中伸展的矢量；而现在的同位旋矢量完全脱离了普通空间，它是在推广了的电荷空间即同位旋空间中伸展的矢量。事实上，同位旋空间是第一个建立的内禀空间。我们说过，量子力学理论的容量远远超过只能够用坐标和动量描写的经典力学，因为量子力学里的哈密顿算符不受必须使用坐标和动量表示的限制，它能够包容各种各样的内禀变量和内禀空间里的算符。随着粒子物理学的发展，同位旋空间这种首先建立的内禀空间以及与此相关的同位旋转动不变性，开拓了发现各种各样内禀空间和内

禀对称性的一条康庄大道。

上面说过，模仿原子物理学里的相互作用势来描写核力的努力，除了估算其强度和力程之外，并没有得到太多的成功。那么，是否可以另辟蹊径，采取别的方法来描写核力呢？1935 年，日本物理学家汤川秀树（H. Yukawa，1907—1981）认为，核力是靠一种介子场作媒介而起作用的，介子是一种自旋为整数的玻色子，两个核子通过交换介子发生作用，就像两个电荷通过交换光子发生作用一样。汤川还认识到，在长程的电磁力情况下，作为媒介的光子是没有（静止）质量的；那么，核力的短程性就意味着作为媒介的介子是有质量的。汤川对点源的克莱因-戈顿方程求解，得出屏蔽式的库仑势，即库仑势乘上一个随距离 r 衰减的负指数因子。算出其平均力程 r_0 与介子质量 m 的关系式 $r_0 \approx h/mc$（h 是普朗克常数，c 是光速），就能够从当时了解到的核力力程的大约值 2×10^{-13} 厘米，推算出这种设想的介子的质量大约等于 200 倍电子质量的结论。玻尔正好在那一年里访问了日本，据说，当汤川同他讨论这个问题的时候，玻尔很不以为然反问汤川为什么要做这样的问题。这也反映了玻尔一贯不喜欢引进新粒子的态度。

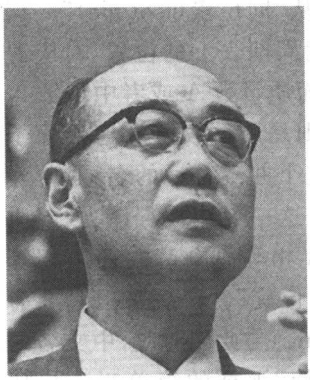


图 6.9 汤川秀树（H. Yukawa，1907—1981）

介子的原文起先叫做 mesotron，后来简化为 meson。这一名词的前缀 meso 的意思是“中间”或者“中介”。因此，介子可以理解为媒介粒子，也可以理解为中等质量，即质量介乎电子和质子之间的粒子。1937 年，安德森果然在宇宙线中发现了质量约为 200 倍电子质量的带电粒子，起初大家以为它就是汤川所预言的介子了，所以命名为 μ 介子。可是，不久就弄清楚了，μ 介子并没有表

现出原来所预期的那种同核子相关的强相互作用。为了解决这一困难，坂田昌一(S. Sakata，1911—1970)等于1943年提出“二介子理论”，认为传递核力的不是 μ 介子，而是另一种未发现的粒子。1947年，珀威尔(C. F. Powell，1903—1969)使用核乳胶探测到宇宙线中还有一种质量比 μ 介子稍大的带电粒子，命名为 π 介子。很快也发现了，π 介子的确与核子存在着短程的强相互作用，它就是汤川所预言的介子了。



图 6.10　珀威尔(C. F. Powell，1903—1969)

实际上，后来通过实验研究确定了 μ 介子的自旋是 1/2，而 π 介子的自旋是 0，因而它们不属于同一类粒子。介子这个术语后来专门用来指参加强相互作用的、自旋为整数即为玻色子的粒子。核子和后来发现的参加强作用的其他费米子则称为重子(baryon)，重子和介子合称强子(hadron)，即强作用粒子。早些时发现的 μ 介子的性质与电子极为相似，它的自旋也是 1/2，属于费米子而不是玻色子。于是不再把它叫做“μ 介子”而改称“μ 子”(muon)。我们可以把 μ 子看做是一种较重的电子，并且后来发现各自有配对的中微子，即电子中微子和 μ 子中微子。电子，μ 子和两种中微子统称“轻子”(lepton)。

每一种重子和轻子都有反粒子。如果我们给每一种重子赋予一个等于1的新量子数——重子数 B，而给每一种重子的反粒子安排等于 -1 的重子数，那么就会发现存在着一条重子数守恒定律。它的意思是一个重子可以转变或者衰变为另一个重子，但不可以转变为一个反重子，亦不可以转变为一个轻子。例如从一个中子转变为一个质子的基本 β 衰变过程就可以看出这一规律。我

们亦可以相仿地为轻子家族定义轻子数 L，它的数值是对轻子取 1 而对反轻子取 -1，亦存在着相应的轻子数守恒定律。例如从基本的 β 衰变过程看，轻子（电子）和反轻子（反中微子）是成对产生的。这就是我们为在 β 衰变中产生的中性粒子取名为反中微子的原因。进一步，为了描写电子和 μ 子各自同一种中微子配对而不会同另一种中微子搭配的性质，可以定义电子和电子中微子具有等于 1 的“电子数”，它们的反粒子的电子数则是 -1；对于 μ 子和 μ 子中微子亦可以类似地规定一种“μ 子数”。

此外，经过多年的研究发现，当初汤川的想法虽然富于启发意义而且也取得了重要的阶段性成果，但是亦包含着过于单纯的成分。从量子场论的角度看，电磁场的媒介——光子用矢量场描写，但 π 介子则是一种（赝）标量场，两者的性质之间存在着巨大的差异。而且，实际上早年试图运用介子场论去解决核力问题的努力，始终没有获得所预期的成功。亦即是说，这条路子没有走对。

有关的动力学问题将在下文讲述，我们在这里再讲一下 π 介子发现前后对于同位旋不变性研究的进展。[9] 早在 1938 年，弗洛里希（H. Fröhlich，1905—），海特勒和克默（N. Kemmer，1911—）联名发表文章，讨论了不仅有中子和质子参加，而且还有介子参加的情况下，核力相互作用的电荷无关性。用后来的语言说，他们的理论工作讨论的就是满足同位旋转动不变性的核子与 π 介子的相互作用。不过要记住，那时候实验上刚刚发现了“μ 介子”，并且以为那就是作为核力媒介的粒子，π 介子的发现要等到将近十年之后。

克默等运用了卡森和康顿处理质子和中子的同位旋方法，考虑如何构成它们与介子的相互作用。上面讲过，卡森和康顿为了描写质子和中子的转换，仿照描写电子自旋的泡利算符，引入了相应的同位旋算符。那么，如像在普通空间里存在着三个坐标方向的三个泡利算符一样，在同位旋空间里亦应当有相应的三个描写

核子同位旋性质的算符。在这三个算符里。除了描写中子和质子之间发生转换即电荷改变的算符外，亦应当存在一个电荷不改变，即不发生中子和质子之间的转换的算符。于是，如果中子和质子之间发生的转换是由于同带电的介子起作用的话，亦应当存在一种电中性介子的作用，对应着中子或者质子不发生转换的情形。

克默等就这样第一次从内禀对称性的要求，成功地预言了新的粒子。后来发现了带一个正电荷和带一个负电荷的 π^+ 和 π^- 介子之后，他们的工作就意味着预言了电中性的 π^0 介子的存在。π^0 主要衰变到两个 γ 光子，这是一种寿命很短的电磁过程，因此迟至 1950 年才被发现。

于是，在核子的一套同位旋双重态之外，又确认了 π 介子的一套同位旋三重态。带电 π 介子和中性 π 介子的质量差，亦可以归于电磁作用的影响。此后，就像原子的能级按自旋分类那样，新发现的强子都按同位旋和自旋分类。因为同位旋转动不变性仅仅在强相互作用中成立，所以这种同位旋方案不适用于轻子。

π 介子-核子系统同位旋分析的一个著名的早期例子，是在 π 介子-核子散射中发现在动量中心系能量 1232 MeV 处出现一个高度突出的共振峰，其宽度约为 120 MeV。通过对包括 π^+-p，π^+-n，π^--p，π^--n 等不同的散射过程及其角分布的分析，确定这是一个同位旋为 3/2、自旋亦为 3/2 的“共振”，因此称为(3，3)共振。

纵观本章所述，从中子的发现，中微子假说的提出，正电子以及 μ 子和 π 介子的陆续发现，其中有一些是先有预言的或者先有猜想的发现，有一些却是完全意外的发现。例如，为什么除了电子之外，还会有一种与电子很相似的 μ 子，μ 子的质量为什么比电子大那么多，这些问题长期以来一直困惑着物理学家，至今没有完全得到解决。

而且，从这段历史看，起先大多数物理学家在理论解释出现困

难的时候，普遍不愿意提出存在着新的粒子，宁愿不相信物理学基本定律甚至基本动力学的有效性。他们不敢怀疑构造物质世界的组分基元的数目是否足够，而一心质疑基本理论是否仍然成立。

有评论说，20 世纪基本物理学的发展，可以看成是反对牛顿质点概念的一场持续的战争。在牛顿的眼里，世界是由上帝创造的一些微小而有质量的坚固颗粒构造而成的。并且，从 17 世纪中叶的静电学研究开始，一直到 20 世纪初年，在只存在带正电和带负电这两种粒子的长期历史传统观念支配之下，在电子和质子之外存在着第三种实物粒子的观念被认为是无稽之谈。因此，“在 20 世纪 30 年代，多数物理学共同体都反对提出新粒子。”[10]

可是，下一章将要讲到，到了 1950 年前后，新的粒子爆发似地出现，其中只有很少数是事先作出预言的。与此同时，取代牛顿世界观的新观念也趋于成熟了。世界不再适宜于看做是由一些现成的组分搭建而成。一切粒子都是在有关过程中产生或者生成的。至于现在发现了的粒子种类是否已经齐备了，或者什么样的粒子才真正是物质世界最根本的组分？对于这一类问题，汤川秀树认为，如像在中国古代文献《庄子》里说的，那是我们是否能够“知鱼之乐”那样的没有答案的问题。[11]

参 考 文 献

[1] C. Weiner, 1932—Moving to the new physics, in *History of Physics*, S. R. Weart and M. Phillips (eds), New York: American Institute of Physics, 1985, pp. 332—339.

[2] A. Pais. Inward Bound: Of Matter and Force in the Physical World. New York: Oxford University Press, 1986；中译本：关洪、杨建邺、王自华、傅冬梅译，《基本粒子物理学史》，武汉：武汉出版社，2002，§ 17a。

[3] 关洪，《物理学史选讲》，北京：高等教育出版社，1994，107—110 页。

[4] R. Westfall，《牛顿传》中译本，北京：中国对外翻译出版公司，1999，155—161 页。

[5]《爱因斯坦文集》(第一卷),许良英等编译,北京:商务印书馆,1976,193页。

[6] 文献[2],§14d。

[7] L. M. Brown, The idea of the neutrino, in *History of Physics*, S. R. Weart and M. Phillips (eds), New York: American Institute of Physics, 1985, pp. 340—345.

[8] 转引自:E. Segré,《原子舞者——费米传》,杨建邺等译,上海:上海科学技术出版社,2004,代译序。

[9] H. A. Bethe, F. de Hoffmann, Mesons and Fields, vol. II, Evanston: Row, Peterson and Co., 1955, pp. 35—62.

[10] L. M. Brown and L. Hoddeson, The birth of elementary particle physics: 1930—1950, in *The Birth of Particle Physics*, L. M. Brown and L. Hoddeson (eds.), Cambridge U. P., 1983, pp. 3—36.

[11] T. Takabayashi, Some characteristic aspects of early elementary particle theory in Japan, *ibid.* pp. 294—303.

第七章　量子场论的发展和新粒子的发现

7.1　量子场论的发展

虽然玻恩和约丹在 1925 年创立量子力学的矩阵程式的那篇“二人文章”的最后一章里，已经提到了关于“矩阵电动力学”即把电磁场写成矩阵形式的初步概念，但场的量子化的系统阐述则要归功于狄拉克，这在上一章已经提到了。可以这样说，狄拉克 1927 年初发表的文章《辐射的发射和吸收的量子理论》奠定了量子电动力学，即电子与电磁场相互作用的量子理论的基本原则。他在这篇文章里沿用了经典场论里把空间中的场看做由无数振子组成的模型，然后对谐振子运用量子力学的处理。因为谐振子的能级是等间距的，标记能级的量子数 n 就可以认为对应着拥有数值上等于能级间距 $h\nu$ 的能量子的数目。用现在教科书里的话说来，运用对于谐振子建立的用能级升降算符表达的“占有数表象”[1]，就不难过渡到用产生和吸收算符表示的“粒子数表象”，这样就从单个自由度系统的粒子描写变成了原则上具有无限自由度的场的描写。由于历史上的原因，这种场的量子化方法亦被称为“二次量子化”。这样得出来的电磁场的量子即光子的产生算符和吸收算符满足的是普通的对易关系，自然对应着玻色统计的情况。

狄拉克在同年接着发表的另一篇论文里，写下了在那时期非常有用的、从量子力学搬过来的二阶微扰公式。在第二年建立了狄拉克方程之后，就很自然转而使用狄拉克旋量 ψ 来描写电子，并

且将狄拉克原来采用的从量子力学搬过来的电磁辐射的矢量势同电子的电偶极矩的时间导数相耦合的作用形式，换成在上一章里已经写出过的电子同电磁势的矢量型相互作用。包括狄拉克、海森伯、泡利、约丹和克莱因在内的一批物理学家运用和发展这套新方法，不久就相继解决了康普顿散射、电子对产生和韧致辐射等早期量子电动力学里的几个典型课题，其结果逐渐被证明与实验符合得相当不错。

运用这种场论方法，亦能够自给自足地计算出爱因斯坦定义的自发辐射系数。这个问题最早也是由狄拉克运用一阶微扰方法解决的。我们在前面说过，量子力学的定态是永远稳定的，它不可能发生自发的跃迁。量子力学里要计算决定光谱线强度的自发辐射概率，还需要配上爱因斯坦从热力学平衡条件推出的自发辐射、受激辐射和吸收系数三者满足的关系式。现在，量子电动力学能够自主地描写辐射的吸收和发射，因此可以解决量子力学不能够独自解决的这个问题。

在开始的那几年的量子电动力学里，只对辐射场进行量子化，可以说是一种“半经典”的理论。从费米建立 β 衰变的量子场论开始，在量子电动力学里亦对电子场进行了量子化，成为一种统一使用产生和吸收算符来描写电子场和辐射场的“全量子”理论。与此同时，在建立相对论协变的量子电动力学上也取得了一定的进展。

正当理论家们为量子电动力学的节节胜利而沾沾自喜的时候，他们料想不到进一步计算电子自能一类问题的二阶微扰或者散射问题的高阶微扰时，竟会得出无限大的结果。电子的自能可以看做是一个电子放出光子后又重新吸收那一类的过程。本来，量子电动力学的微扰公式是按照精细结构常数 α 展开的，而 α 的数值约等于 1/137，比 1 小得多，单纯从这一角度看，微扰公式的高阶项是很有希望收敛的。那为什么会出现无限大的结果呢？

原来，在经典物理学里，如果将电子看做是一个几何点，由于

在接近该点处的静电势趋于无限大，那么在它周围的固有静电场的能量亦会趋于无限大。这就是在20世纪之初为了避免这一困难而把电子的大小局限于它的“经典半径”的缘故。然而，在量子电动力学里，例如在计算康普顿散射的时候，电子并不是在坐标空间而是在动量空间里描写的。或者说，相应的产生(吸收)算符描写的是一个具有确定动量的电子的产生(吸收)，并没有明显依赖于电子的空间分布。所以，初看之下点状电子无限大自能的困难似乎绕过去了。然而，现在这一麻烦又改头换面地在高阶微扰里出现了。从30年代中叶开始，这个基本困难一直困扰着场论理论家们。

无论在实验方面还是在理论方面，真正的进步是在二战以后取得的。由于战时雷达研究的促进，微波技术得到了飞速的发展，测量的精度得到很大的提高。1947年底，兰姆(W. E. Lamb，1913—)和里瑟福(R. C. Retherford，1912—1981)发表文章《用微波方法观察到的氢原子精细结构》，报告了他们从实验发现的结果：氢原子能级在主量子数 $n=2$，总角动量量子数 $j=1/2$ 的能级中，轨道角动量量子数 $l=0$ 状态的能量高于 $l=1$ 状态的能量，这一个后来被称为“兰姆移位”的差值约合1000兆赫的频率(乘以普朗克常数 h)，正属于微波的范围。而按照狄拉克方程的严格解，这两个状态的能量应该是完全相同即“简并”的。1948年初，佛雷(H. M. Foley，1917—1982)和库什(P. Kusch，1911—)又发表了《关于电子的内禀磁矩》一文，报告了钠和镓原子光谱的精细结构数据，分析出电子的磁矩并不是狄拉克理论预言的那样准确地等于一个玻尔



图7.1 兰姆(W. E. Lamb，1913—)

磁子，而是多出千分之一有余的结论。这新发现的多出部分，就叫做电子的“反常磁矩”。这两个新的实验结果，向当时被认为最先进的相对论性量子力学理论敲响了警钟。

贝特最早对兰姆移位做了一种非相对论性的估算。他认为氢原子中电子的自能同自由电子的自能这两种理论上为两个无限大的差值，是造成兰姆移位的来源。他在计算里，通过适当选择的积分上限的截断，得出 1040 兆赫的结果，同当时的实验数据符合得很好。这是对兰姆移位的一种理论上的初步解释。贝特的这项工作，引起了他的年青同事费曼的浓厚兴趣。此前费曼为了解决场论里的无限大困难，已经做了一系列的尝试，先后发展出非相对论性和相对论性的路径积分方法。这种方法实际上是在矩阵力学和波动力学之后的量子力学的第三种理论程式。经过了一段时间，费曼终于用他自己的方法，在相对论的层面上解决了这个难题。其中引入了代表电子非点状空间分布的参数，相当于做了相对论性的截断；而且发现，最后的结果对这个参数并不敏感，于是求出了有限的兰姆移位。

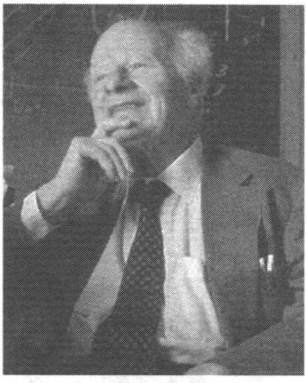


图 7.2　贝特(H. A. Bethe，1906—2005)

费曼还由此发展了一种图形技术，能够大大地简化微扰计算的分析。在这种后来被普遍运用的“费曼图”里，用顺时间方向的实线代表电子的运动；与此同时，又用逆时间方向的线段代表正电子、即电子的反粒子的运动。由于这是一种相对论协变的理论，在图形中的每个关节点，即电子或正电子，同用虚线代表的光子(电磁场的量子)相交遇即发生作用的每一点的空时坐标，在计算中都是要对整个空间时间积分的。因此，在对由一个图形代表的那项

的全部积分中，就包括了所有各个关节点的时间先后顺序各不相同的那些贡献。而其中的每一种不同的时间顺序，在老式的微扰计算里，一般都代表一个单独的项；这些不同的项，对应着过程里含有或者不含有电子-正电子对等等的不同的“中间态”。（在第9.1节里给出了康普顿散射过程的低阶费曼图的具体例子。）现在，按照费曼的方法，一下子就算出了原来要先分开来算的好些项的贡献之和；而这个和式，一般要比原来的每个单项都简单得多。并且，对于同越复杂的图形相对应的计算，这种优越性就越明显。而且，费曼也已经敏锐地看出，他的方法不仅适用于量子电动力学，即电子同光子相互作用的理论，亦应当适用于刚刚兴起的介子理论的计算。



图7.3 费曼（R. P. Feynman，1918—1988）

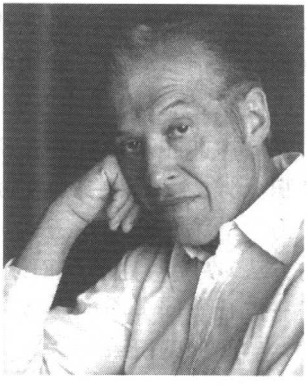


图7.4 施温格（J. S. Schwinger，1918—）

与此同时，施温格（J. S. Schwinger，1918—）也在尽全力做同样的问题，用相对论性量子电动力学的新方法去计算兰姆移位和电子的反常磁矩，并且得到与费曼相类似的结果。

1948年春天，朝永振一郎（S. Tomonaga，1906—1979）在新近日本出版的英文刊物《理论物理学进展》上面，登载了他1943年发表的一篇日文文章的英译文，讲的正是量子场论的相对论性形

式，以及有关无限大量的消去办法。这表明了，几年前朝永在与西方世界隔绝的情况下，已经建立了施温格理论的基本纲要。



图 7.5　朝永振一郎(S. Tomonaga，1906—1979)

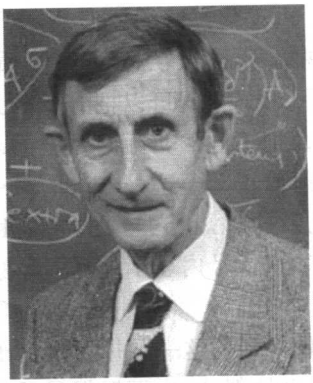


图 7.6　戴孙（F. J. Dyson，1923—）

1947 年秋天，戴孙(F. J. Dyson，1923—)领悟到，费曼的图形和施温格的方程，恰恰是同样一套理论体系的两个不同的侧面。他很快系统地论证了他们两人理论的等效性，并且把费曼方法的路径积分表述，转换成大家都容易看懂的形式。经过戴孙创造性地整理改写的这一理论方法，给出了后来普遍使用的量子场论的标准程式。

上面所说最早由贝特成功地尝试，后来由费曼、施温格等继续发展的对量子场论中出现的无限大量的消减处理方法，又形成为一种“重正化”(renormalization)理论。例如，上面说过，电子的自能可以近似看做是一个电子放出光子后又重新吸收那一类的过程，这种处在中间状态里的光子叫做“虚光子”。处在这类状态中的电子同外界电磁场相互作用的计算中出现了无限大的积分，从这一积分中减去同样表现为无限大的自由电子的相应积分，得到的是称为“辐射修正”的有限差值。于是就可以由此求出对于电子磁矩的修正，即电子的反常磁矩。类似地从在原子中的束缚电子

的无限大的高阶微扰项减去自由电子的相应无限大项得出的有限“辐射修正”，亦可以用来解释“兰姆移位”。

重正化方法的依据是，电子的质量和电荷本来都是不可计算的观察量，那么在施加上述“质量重正化”或者还有“电荷重正化”等手续之后，就可以把有关的无限大项归入自由电子的质量和电荷，而把不同的实际问题里的剩余的有限差值作为有观察意义的“辐射修正”。[2]这一方法的最令人信服的例子就是上面所说的电子的反常磁矩，它与“正常磁矩”即一个玻尔磁子之比值的最新测量值是(括号内表示最后一位数字的实验误差)

$$0.001\,159\,652\,187(4)$$

(测量得到的这一数据不是电子磁矩的全部，而是它比一个玻尔磁子多出的部分)。而根据量子电动力学的高阶微扰的重正化计算得出的数值是(括号内表示最后三位数字的计算误差)

$$0.001\,159\,652\,379(261)$$

这一高度符合的结果被认为是当代物理学理论所受到的最精确检验的一个范例。

尽管直到 1950 年才测定了 π 介子是赝标量粒子，即自旋为零宇称为负的粒子。可是在 1940 年前后，理论物理学家们已经开始研究包括用自旋为 0 的标量(和赝标量)场和自旋为 1 的矢量(和轴矢量)场描写的介子，并且试图模仿已经在量子电动力学里得到成功的方法，用介子场论来解决核力问题。在这期间他们提出了各种不同的模型，但都遇到了严重的困难。在这里一个难以克服的障碍是描写核力强度的无量纲参数 $g^2/\hbar c\approx 15$ 比 1 大得多，没有希望得到收敛的微扰展开。此外，当时认为 π 介子就是汤川提出的传递核力的媒介，这样的想法太天真了。事实上电磁作用媒介的光子是一种矢量粒子，而 π 介子却是一种赝标量粒子，两者的基本性质不同。从以后的规范场论知道，π 介子是不适宜作为传递强相互作用的粒子的。所以，在那一段时期试图用介子场论解

决核力问题的努力终于失败了，或者说走在了一个不正确的方向上。[3]

另外一个问题是已经测量到质子的磁矩大约是 2.79 核磁子，中子的磁矩是－1.91 核磁子。而按照严格的狄拉克理论，质子的磁矩应该是 1，而中子是 0。物理学家解释说，满足狄拉克方程的仅仅是“裸体”(naked)的核子，它们还会“穿上衣服”(dressed)，即在其周围放出 π 介子，成为“物理”的核子。例如，一个裸质子可以变成一个裸中子加上一个 π^+ 介子，或者一个裸质子加上一个 π^0 介子；一个裸中子可以变成一个裸质子加上一个 π^- 介子，或者一个裸中子加上一个 π^0 介子，等等。于是，这些可能的状态就会强烈地影响到它们的电磁性质，产生比“正常磁矩”还大得多的“反常磁矩”。这种情况亦反映了强相互作用不再适合于微扰论的思路，不再像电子那样只有大约千分之一的“反常磁矩”。

在量子电动力学里，电子还是当做一个几何点。或者精确地说，从量子电动力学的结果同实验的比较看来，可以认为电子的大小不超过 10^{-16} 厘米，现在还不必考虑电子的内部情况。但是核子就不同了，由于它们存在着强作用的转变机会，例如会有放出 π 介子然后再吸收的过程。于是，它们参加电磁作用时就会表现出存在着电荷和磁矩的内部分布。这个问题最早出现在对原子核内部分布的研究里。实验上使用高能的电子打击原子核，入射电子就像一根探针那样深入原子核的内部。入射电子的动量越大就钻得越深，它“看到”的原子核的范围就越小；或者说，原子核里与电子起作用的部分就越小，因而观察到的散射截面就会比点状靶体的相应截面小。实际的散射截面与点状靶体的散射截面之比是一个作为入射电子动量的函数的因子，称为“形状因子”(form factor)。于是，由对测量到的在各种入射动量情况下的形状因子施行傅里叶变换回到普通空间，就能够了解到原子核电荷的内部分布。

1950 年，罗森布鲁斯(M. N. Rosenbluth)用场论方法推导出电子的对(有内部结构的)核子的散射截面公式，其形式为点状靶体的截面乘上一个包含有电形状因子和磁形状因子的因式。这两个形状因子分别对应的是质子和中子内部的电荷分布和磁矩分布。霍夫斯塔特(R. Hofstadter，1915—)从 20 世纪 50 年代中期开始，运用高能电子散射方法，从原子核电磁结构的研究转向单个质子和中子的电磁结构的研究，并且于 60 年代初期取得了确定的结果。例如，现在我们知道质子的电荷分布是负指数型的，从中心向外逐渐衰减，其平均半径约为 0.8×10^{-13} 厘米。这是用场论方法对强作用粒子内部构成的现象学研究得出的重大进展。

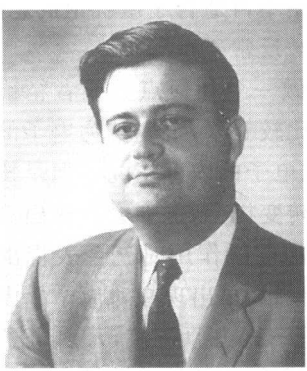


图 7.7 罗森布鲁斯
(M. N. Rosenbluth)



图 7.8 霍夫斯塔特
(R. Hofstadter，1915—)

7.2 粒子“动物园”的建立和管理

上面我们讲过的历史，从 1897 年电子的发现，直到 1950 年观察到中性 π 介子，基本粒子的数目仍然是屈指可数，理论上好像再也不需要有更多的新品种了。然而，谁也没有料到，一开始踏入

20 世纪下半叶，观察到的基本粒子的数目突然爆炸式地增长，而且什么叫做基本粒子的观念亦起了很大的变化。查一查今天的粒子数据表，我们可以看到有数以百计的不同品种的粒子，比当年列出周期表时候的化学元素数目要多得多，而且还在不断更新和扩充。这个数目的量级相当于一般动物园里动物的品种，粒子的多样性可以同动物界媲美，所以行家们借用“动物园”(zoo)这个名词来形容五花八门的这个粒子大家族。动物学里有动物的分类学。我们在这一节里，讲的就是粒子动物园里的分类学。我相信，很少有人记得住现在那么多种粒子的名称。甚至于 1954 年去世的费米已经讲过，“要是我完全记得住这些粒子的名称的话，那我就会是一名植物学家(botanist)了。”其实，在第五章里提到的、1925 年海森伯在剑桥大学的演讲，题目就是“光谱项动物学和塞曼效应植物学”(Termzoologie und Zeemanbotanik)，这是科学家们为处在描述性阶段的学科从生物学借用过来的术语。

早在 1947 年开始，已经在宇宙线实验里观察到一个未知的中性粒子衰变到一个质子和一个 π^- 介子这一类的个别事例。但是，真正的进展是在运用加速器产生的粒子束流做出来的。1954 年，在布鲁克海文(Brookhaven)实验室用加速到 1.5 GeV 的 π 介子轰击质子，观察到如下的反应

$$\pi^- + p \longrightarrow \Lambda + K^0$$

Λ 和 K^0 是两个新发现的中性粒子，它们分别衰变到 $p\pi^-$ 和 $\pi^+\pi^-$。实际上这些事件已经在宇宙线实验里看到过了，不过那时候稀少事例的统计还不足以测定它们的物理性质。产生新粒子的类似反应还有

$$\pi^- + p \longrightarrow \Sigma^- + K^+$$

Σ^- 和 K^+ 分别衰变到 $n\pi^-$ 和 $\pi^+\pi^0$。后来又发现了 Σ^+ 和 K^-，Σ^+ 衰变到 $p\pi^0$ 或者 $n\pi^+$，K^- 衰变到 $\pi^-\pi^0$。实际上，上面提到的这些新粒子还有其他常见的或者罕见的衰变方式。

此外还发现了一种“级联粒子”Ξ^-，它的衰变分两步走，先衰变到 $\Lambda\pi^-$，然后中间产物中的 Λ 再衰变为 $p\pi^-$：

$$\Xi^- \longrightarrow \Lambda + \pi^-$$
$$\hookrightarrow p + \pi^-$$

这些新粒子的共同特点是，从它们相当大的产生截面（达到毫巴[mb]的量级）看，属于强相互作用过程；但从它们相当长的寿命（不短于 10^{-10} 秒的量级）看，其衰变又属于弱相互作用过程。理论上怎么说明强产生和弱衰变的这种两面性呢？

为了解决这个问题，先是在 1952 年初，派斯（A. Pais，1918—2000）提出了“协同产生”（associated production）的规则，指出这些新粒子都是成对产生然后各自衰变的，就像上面所说的 Λ 和 K^0 以及 Σ^- 和 K^+ 那样。这就强烈地提示，为了区分这两种过程，有必要引进一个新的量子数和相应的选择定则。下一步是在 1955 年由盖尔曼（M. Gell-Mann，1929—）和西岛和彦（K. Nishijima，1926—）两人独立走出的，他们给这些新粒子多重态安排了适当的同位旋量子数，并且把适用于核子的电荷公式（$B=1$ 是重子数）

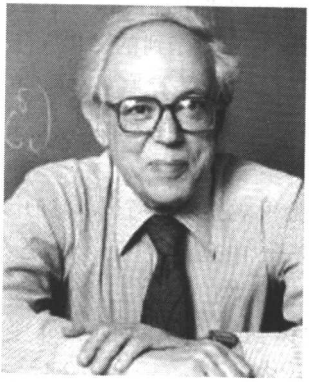


图 7.9 派斯（A. Pais，1918—2000）

$$Q = I_3 + \frac{B}{2}$$

推广为新的公式

$$Q = I_3 + \frac{S}{2} + \frac{B}{2}$$

式中的 S 是新引进的量子数“奇异数”（strangeness）。此后，奇异数不为零的粒子就称为“奇异粒子”（strange particle），而奇异粒

子当中的各种重子则统称为“超子”(hyperon)。具体说来，K^+ 和 K^0 介子的奇异数定义为 1，它们的反粒子 K^- 和 $\bar{K}^0$ 则为 -1。Σ 和 Λ 超子的奇异数为 -1，而 Ξ 超子为 -2；它们的反粒子则具有相反的奇异数。用强作用的产生过程里的奇异数守恒，就自然解释了先前讲的“协同产生”现象。而在这些奇异粒子的衰变过程中，奇异数改变 $+1$ 或者 -1。这个新引入的可加量子数就这样区别了强作用和弱作用这两种过程。

使用后来更常用的“超荷”量子数 $Y=S+B$，上述“盖尔曼-西岛公式”可以改写成以下比较简洁的形式：

$$Q = I_3 + \frac{Y}{2}$$

表 7.1 列出了在 1955 年已经认识到的强子(介子和重子)品种，这张表维持了将近十年之久的新颖性(质量值是新近的数据)，在这个日新月异的领域里已经是很难得的了。用表上的单位表

表 7.1　在 1955 年已经认识到的强子

粒子	名称	重子数 B	奇异数 S	超荷 Y	质量/(MeV/c^2)	同位旋分量 I_3	同位旋 I
介子	π^+	0	0	0	139.6	1	1
	π^0	0	0	0	135.0	0	
	π^-	0	0	0	139.6	-1	
	K^+	0	1	1	493.7	1/2	1/2
	K^0	0	1	1	497.7	$-1/2$	
	$\bar{K}^0$	0	-1	-1	497.7	1/2	1/2
	K^-	0	-1	-1	493.7	$-1/2$	
重子	p	1	0	1	938.3	1/2	1/2
	n	1	0	1	939.6	$-1/2$	
	Λ	1	-1	0	1115.7	0	0
	Λ	1	-1	0	1189.4	1	1
	Σ^+	1	-1	0	1192.6	0	
	Σ^0	1	-1	0	1197.4	-1	
	Ξ^0	1	-2	-1	1314.8	1/2	1/2
	Ξ^-	1	-2	-1	1321.3	$-1/2$	

示，电子的质量是 0.5110 MeV/c^2，μ 子的质量是 105.7 MeV/c^2。

从表上可以看到，按照盖尔曼-西岛公式的安排，各种粒子的量子数恰到好处。实际上，表中列出了的两个超子 Σ^0 和 Ξ^0 当时还没有发现。Σ^0 通过电磁作用衰变到 $\Lambda\gamma$，因为寿命很短而不容易观察到；而 Ξ^0 的质量不足以衰变到 $\Sigma^+\pi^-$ 或者 $\Sigma^-\pi^+$，只能够衰变到两个中性粒子 Λ 和 π^0，亦是难以观察的。所以，这两个超子是先由理论作出预言的。事实上，1957 年才测定了 Σ^0 的寿命；而迟至 1959 年才首次发现 Ξ^0。至此，对于盖尔曼-西岛公式已经没有任何疑问了。

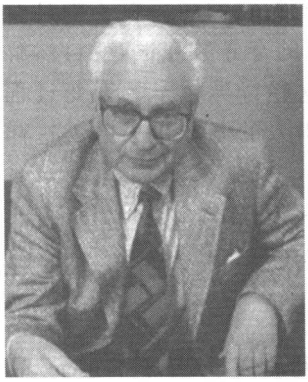


图 7.10 盖尔曼(M. Gell-Mann, 1929—)

不要小看盖尔曼-西岛公式那样简单的算术式子。它既然能够正确地表达各种强子的同位旋和奇异数的关联，就必定具有深刻的含义，指示着进一步发展的方向。我们试把以上八个自旋-宇称都是 $1/2^+$ 的重子以奇异数 S 为纵坐标，以电荷 Q 为横坐标排列出来，就会看到这样一幅图像：

	n	p
Σ^-	Σ^0,Λ	Σ^+
Ξ^-	Ξ^0	

为了更好看一些，再把它换成以超荷 Y 为纵坐标，以同位旋第三分量 I_3 为横坐标的一幅图像：

	n	p	
Σ^-	Σ^0,Λ		Σ^+
	Ξ^-	Ξ^0	

类似地，还可以画出表中的七种自旋-宇称都是 0^- 的赝标量介子

的另一幅图像：

$$\begin{array}{ccccc} & & K^0 & & K^+ \\ \pi^- & & \pi^0 & & \pi^+ \\ & & K^- & & \bar{K}^0 \end{array}$$

这是多么美丽的两幅严格对称的图像啊！它们强烈地提示着，必定存在一种比同位旋更高的内禀对称性。

强子的第一个组合模型是费米和杨振宁在1949年提出的，他们假设π介子是由一个核子和一个反核子组成的束缚态。其中，π^+和π^-分别对应于$p\bar{n}$和$n\bar{p}$，π^0则对应于由$p\bar{p}$和$n\bar{n}$叠加的对称状态。当然，这种对比只有结构上的抽象意义而不是一种动力学的实际模型。坂田昌一1956年把费米-杨模型推广到包含奇异粒子的情形，把当时观察到的七个介子认作是由三个作为“基础粒子”的重子p，n，Λ及其反粒子组合而成的。1959年，池田峰夫（M. Ikeda，1926—1983），大贯义郎（Y. Ohnuki，1928—）和小川修二（S. Ogawa，1924—）把描写同位旋不变性的SU(2)群扩充到包含了奇异数的SU(3)群来改进坂田模型。他们把坂田的三个“基础粒子”p，n，Λ填充到SU(3)群的三维基本表示上，对应的反粒子则属于其共轭表示。可以这样从一个基础粒子和一个它们的反粒子构造出来的最简单的介子“超多重态”属于八维表示，除了尚缺中间与π^0位置重叠的一个同位旋单态的空位之外，与上面的图像符合得很好。这里说的“超多重态”，指的是不同的同位旋多重态与超荷的结合，例如这个用八维表示描写的超多重态含有（同位旋，超荷）量子数



图7.11　坂田昌一（S. Sakata，1911—1970）

分别为(1/2,1)，(1,0)，(0,0)和(1/2,−1)的两个双重态，一个三重态和一个单态：

可是，重子的情况就不怎么妙了。因为在这个方案里，已经把p,n,Λ这三个重子用做基础粒子，那么由于重子数守恒，其他五个重子(三个Σ和两个Ξ)就要由两个基础粒子和一个反基础粒子构成，填充的只能是缺了不少空位的高维表示，例如15维表示。

1961年初，盖尔曼和尼曼(Y. Ne'eman，1925—)独立地提出了以SU(3)对称性为基础的一种新方案。在他们的方案里，让SU(3)群的三维基础表示空着，而重子和介子一样填充八维表示。从上面给出的重子图像不难看出，这种安排的位置真是不盈不亏，天衣无缝。不仅如此，本来在理想的SU(3)对称性里，八个重子具有完全相同的质量，为了反映实际上各个同位旋多重态质量上的差异，在假设了这种对称性破缺具有SU(3)群的八个生成元里相当于超荷的那个算符的性质之后，便能够推出重子八重态中的质量公式

$$M_N + M_\Xi = (M_\Lambda + 3M_\Sigma)/2$$

这一结果与实验值符合得很好。

那么，介子八重态里的一个空位又怎么样解释呢？这要从上一章谈到的(3,3)共振说起。它原来是一个在π-N散射过程中观察到的高峰，因为其形状符合于准稳定态衰变能谱的固有分布即维格纳-布莱特“共振”曲线而得名。[4] 这个“共振”的宽度为120 MeV，折算为寿命值合10^{-23}秒的数量级，相当于光穿过一个核子那么短的时间。现在由于粒子物理学的发展，有需要把这些共振态也当做某种形式的“粒子”。与过去完全稳定的，或者通过弱作用或电磁作用衰变的粒子不同，它们不过是一些通过强作用衰变的粒子罢了。按照这种新的观点，我们把(3,3)共振命名为Δ粒子。在今天的粒子数据表里，大部分都是这种从“共振态”的身份转为强衰变形式的粒子。而过去那些通过弱作用或电磁作用衰变

的粒子，现在则被认为是相对稳定的“长寿粒子”了。

1961 年观察到有关过程中 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 能谱的 3π 共振态 η，它的能量为 547 MeV，宽度为 1.2 keV。进一步的研究发现它正好适宜于占据赝标量介子八重态中的空缺，而且亦很好地符合相应的质量关系。不久又观察到一组完全由“共振态”组成的矢量介子八重态。

在重子方面，作为 Δ 的伙伴，1960 年和 1962 年相继发现了自旋-宇称也是 $(3/2)^+$，能量是 1385 MeV 的 Σ 激发态 $\Sigma(1535)$ 和 1535 MeV 的 Ξ 激发态 $\Xi(1535)$。盖尔曼于 1962 年适时地提出，这三个多重态里的九个粒子适宜于填充 SU(3)群的十维表示，缺少的一个空位属于奇异数 S 为 -3，电荷为 -1 的单态粒子，并且为其取名为 Ω^-；而且，从计算出的十维表示中四个同位旋多重态的质量等距离分布的规律，预言 Ω^- 的能量为 1685 MeV。1964 年，果然在预期的能量值上观察到具有合适的自旋和宇称性质的 Ω^-。这一戏剧性的结果使得没有人再怀疑 SU(3)对称性的这种“八重法”方案了。

八重法(eightfold way)这个词组，是盖尔曼在 1961 年关于 SU(3)对称性即所谓“幺正对称性”的第一篇重要论文里写出来的。[5]事实上它的标题就是“The Eightfold Way:……”。在这篇文章的开始处，他在强调要运用 SU(3)群的八维不可约表示来描写重子和介子时，使用了“eightfold way”这一术语。因为这种八维不可约表示描写的是包括了几组同位旋多重态的一套超多重态，亦即是一组八重态。所以，当时我们把 eightfold way 译成“八重法”，亦有叫“八维法”的。[6]我们想，这种叫法的目的，也许正是为了与同样运用 SU(3)对称性，但把重子首先填充三维表示的日本坂田学派的理论方案区分开来。

但是，盖尔曼本人在早期的文章里，没有说出这一术语的由来。而在新版《英汉物理学词汇》里又改译作“八正法”。[7]据说这

是因为 eightfold way 出自日本的佛教用语，称为“八正道”或者“八正法”。我们查阅过有关的资料，了解到 eightfold way 确是佛教用语，不过并不限于日本人使用。按照我们的理解，eightfold way 是佛教里的一套修行得道的八种方法或者八条途径，涉及道德、伦理、修养等几个方面。然而，由于我们对宗教的教义没有多少兴趣，就不在这里一一复述那八种方法了。

因为英语的 way 既有“方法”的意思，也有“途径”或者“道路”的意思，所以 eightfold way 的意思就是个人修炼的“八种正确的方法”或者“八种正确的途径”的意思，简称“八正法”或者“八正道”。

然而，无论 eightfold way 这一术语是否来自佛教用语，除了同样有一个“八”的数字之外，“八正法”或者“八正道”的意思同物理学里的用意相距甚远。我们觉得还是叫“八重法”比较妥当。因为，顾名思义“八重法(eightfold way)”不是别的，它就是以“八重态(octet)”作为包括重子和介子的强子家族的基态表示的方法。

1964 年，盖尔曼又迈出新的一步，在一篇只占期刊两页的短文里提出了“夸克模型”。他说，假如八重态是基本的表示，那么基本的对称群就应该是八维幺模幺正变换群 SU(8)。现在 SU(3) 对称性的成功，意味着应当把这个群的基本表示即三维表示当做“基本的对象”。盖尔曼把这三个一组的未发现的“基础粒子”u，d 和 s 称为“夸克”(quark)。这一回他指明了这个名词出自爱尔兰作家乔伊斯(James Joyce，1882—1941)1939 年的一部作品《芬尼根的觉醒》(Finnegan's Wake)，其中确有形容鸟鸣声的“三声夸克”的语句。

用三种夸克存在的原始质量差，容易推导出原先从对称性破缺机制得出的质量公式。类似地，用夸克模型还可以推出中子和质子磁矩的比值是

$$\mu_n/\mu_p = -2/3$$

与实验值$-1.91/2.79=-0.68$符合得很好。

盖尔曼的三个夸克 u,d 和 s,取自英语 up,down 和 strange 的首个字母,指的是"朝上","朝下"和"奇异"的意思。它们在同位旋和奇异数的安排上,实际上与坂田模型里的"基础粒子" p, n 和 Λ 一一对应。所以,三种夸克和三种反夸克的不同结合,自然能够再现原来的介子八重态。不过,两个夸克的结合得不出所需要的重子八重态,三个夸克的结合才可以含有这种八维表示。三个夸克组成一个重子,所以一个夸克的重子数就是 1/3。那么,按照盖尔曼-西岛公式推算,夸克 u,d 和 s 的电荷亦不是整数,而分别是 2/3,$-1/3$ 和$-1/3$。在理论家们对从未见到过的分数电荷的出现感到奇怪的同时,实验家们却乐于找到了新的研究课题,但在经过了一些反复之后,个别实验物理学家曾经声称检测到分数电荷粒子的结果仍然由于无法重复而不被承认。

另一个棘手的问题是夸克的统计性。例如,由处在空间波函数是对称的三个基态的夸克组成的自旋-宇称为$(3/2)^+$的十维表示里的Ω^-是由三个全同的 s 夸克组成的,由于它的自旋 3/2,所以自旋波函数也是全对称的。于是这个状态的总波函数对于任意两个夸克的交换都是对称的,这就违反了自旋为 1/2 的夸克所必须满足的费米统计的要求。开始有人提出,夸克满足的不是通常的玻色统计或费米统计,而是一种异常的 parastatistics;根据量子力学里的粒子全同性原理,并不能排除存在着这样的可能性。

后来解决了问题的是另一种答案,即为夸克增加一个新的自由度的方案。这个新自由度即颜色自由度,每一种夸克都分红、绿、蓝三色,在这个额外的颜色空间里配上全反对称的波函数,上述统计性质的困难就不复存在。但是,这些颜色是隐藏起来的,观察到的粒子都是由三种颜色的夸克适当混合而成为无色的。当然,这里讲的颜色只是一种借用的说法,同我们的视觉完全没有关系。

夸克最特别的地方是，与以往所有的粒子都不一样，它是原则上不可以单独存在的，不然我们早就会看到这些带有分数电荷和分数重子数的古怪粒子了。即是说，我们看到的只是由夸克或者还有反夸克组成的重子和介子，不可能观察到自由状态的夸克。打个比方说，这就好像我们只能够看到一端是北极一端是南极的磁体，不可能拿出一个单独的磁荷一样。那么，不可能单独存在的东西，还能够算做一个基本粒子吗？

韩（M.-Y. Han，1934—）和南部阳一郎（V. Nambu，1921—）在提出颜色自由度后，还假设在这个同样是三维的颜色空间里存在着一种由另一个 SU(3)群描写的对称性。这个颜色空间里的对称群因此叫做色 SU(3)群。为了区别起见，把原来的 SU(3)群称为味 SU(3)群，相应的自由度称为味自由度。后来，由色 SU(3)对称性逐渐发展出一门量子色动力学（quantum chromodynamics，简称 QCD），被认为是取代介子场论的强相互作用理论的最有希望的候选者，在这一门理论里亦对夸克为什么不会单独存在给出了解释。与此同时，味自由度或者味动力学的研究亦取得了显著的进展。我们将在下一章里简单提到这些方面的问题。

7.3 中性 K 介子问题

上一节介绍的各种基本粒子，每一种重子都有它的反粒子。重子的重子数 $B=1$，而反重子则有 $B=-1$。因为重子数总是守恒的，所以重子不会是自身的反粒子，重子与反重子亦不会衰变到同一种末态。对于轻子也可以作出相似的论断。

但是，其他种类的粒子就不一定是那样了。例如，光子 γ 和中性 π 介子 π^0 都不带有非零的可加量子数，因而它们都是自身的反粒子。而更加独特的是中性 K 介子 K^0 和 $\overline{K}^0$，这两种互为反粒子

的中性奇异粒子都衰变到同样的一些末态，例如 2π 状态 $\pi^0\pi^0$ 和 $\pi^+\pi^-$，3π 状态 $\pi^0\pi^0\pi^0$ 和 $\pi^+\pi^-\pi^0$，以及一些包含轻子的末态。这些衰变方式都不违反奇异数 S 改变 $+1$ 或者 -1 的选择定则。在上一节列出的各种粒子当中，中性 K 介子的这种性质是独一无二的。多年后新发现的介子 B^0(5729 MeV)和它的反粒子亦具有相似的性质。

顺便提一下，因为 2π 系统和 3π 系统的总宇称是相反的，最早观察到这两种自旋相同且质量非常接近的衰变末态的时候，误以为属于两种不同的粒子，分别命名为 θ 和 τ。这就是著名的“θ-τ 之谜”。只是在 1956 年发现在弱相互作用过程前后宇称不守恒之后，才认识到它们是同一种粒子的不同衰变方式。

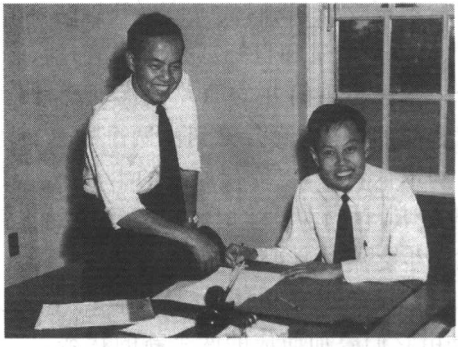


图 7.12　李政道(左)和杨振宁(右)1956 年提出弱相互作用宇称不守恒

上一节说过，中性 K 介子产生的过程是奇异数守恒的强作用过程，因此产生出来的必定是奇异数为 1 的 K^0 或者奇异数为 -1 的 $\overline{K}^0$。或者说，产生的 K^0 和 $\overline{K}^0$ 是强相互作用的本征态。然而，产生出来的两种中性 K 介子的自由衰变过程，又属于奇异数不守恒的弱相互作用过程。并且，由于 K^0 和 $\overline{K}^0$ 都可以衰变到相同的一些末态，就可以发生它们通过虚的中间态互相转变为对方的如下过程

$$K^0 \longleftrightarrow (2\pi \text{ 或 } 3\pi \text{ 等末态}) \longleftrightarrow \overline{K}^0$$

亦即是说，K^0 和 $\overline{K}^0$ 的任一方可以通过两次弱作用转变为另一方。

虽然这样接连发生两次弱相互作用的机会是微乎其微的，但只要这种机会不等于零，就会对中性 K 介子产生出来之后的自由状态产生巨大的改变。这是因为，既然这种粒子的衰变是弱相互作用的过程，自由行进的中性 K 介子就应当是弱作用的本征状态。

在中性 K 介子产生之时，出现的 K^0 和 $\overline{K}^0$ 除了奇异数或者超荷不同以外，其他各项性质都是一样的。在中性 K 介子产生之后自由行进并且进行衰变的过程中，由于这是一种弱相互作用过程，奇异数或者超荷不再守恒，我们就应该抛开这些不守恒的量子数，把 K^0 和 $\overline{K}^0$ 当做两个能量和自旋都相同的简并状态。

按照量子力学里二重简并的简并微扰理论，两个简并状态只要存在着互相转变的可能，就会得到由两个原来的本征状态叠加而成的两个新的本征状态，以取代原来的本征态。具体说来，在中性 K 介子的情况下，它们在产生时是以强作用的本征态 K^0 和 $\overline{K}^0$ 出现的。而在产生之后的衰变过程中，由于 K^0 和 $\overline{K}^0$ 之间可以通过上述的两次弱作用过程互相转换，这时候的本征状态就不再是 K^0 和 $\overline{K}^0$，而是由它们叠加而成的两个新的状态。

作为初步的近似（忽略 *CP* 不守恒的微小效应）[8]，容易算出在同时考虑强作用和弱作用的情况下，中性 K 介子双重态的本征状态，亦即独立存在的两种中性 K 介子的状态是[9]

$$\begin{cases} |K_L^0\rangle \approx \dfrac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\overline{K}^0\rangle) \\ |K_S^0\rangle \approx \dfrac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\overline{K}^0\rangle) \end{cases}$$

K_L^0 和 K_S^0 这两种中性 K 介子对应着不同的衰变方式，因而具

有不同的平均寿命。K_L^0 主要衰变到 3π 末态和含轻子的其他末态，它的寿命 τ_L 是 5.17×10^{-8} 秒；K_S^0 主要衰变到 2π 末态，它的寿命 τ_S 是 0.893×10^{-10} 秒。两者的寿命相差几百倍。

上式的反演变换式是

$$\begin{cases}|K^0\rangle\approx\dfrac{1}{\sqrt{2}}(|K_L^0\rangle+|\overline{K}_S^0\rangle)\\ |K^0\rangle\approx\dfrac{1}{\sqrt{2}}(|K_L^0\rangle-|\overline{K}_S^0\rangle)\end{cases}$$

现在假定在 $t=0$ 的初始时刻，由强作用过程产生了一个 K^0 介子。由以上变换式可知，其中含有 K_L^0 和 K_S^0 的概率各占一半。在此之后，系统的两种本征状态是 $|K_L^0\rangle$ 和 $|K_S^0\rangle$，按照各自的平均寿命演化。

这种“粒子混合”(particle mixing)的方案是在 1955 年由盖尔曼和派斯联名发表的。实际上，它从一个全新角度体现了量子力学里的基本原理。粒子也可以混合吗？从经典物理学看来，只有波动才能够叠加或者混合，粒子的混合简直是匪夷所思。但在量子力学里，粒子不外是能量、自旋、电荷等等观察量的本征态。那么根据态叠加原理，守恒量子数相同的两个甚至更多个粒子自然可以叠加即混合。费曼曾经高度评价这一项贡献说，“这是理论物理学最伟大的成就之一。它靠的不是如广义相对论里那样精致的数学技巧，而其预言就如同正电子的预言那么重要。特别有趣的事实是，在这个问题里我们把叠加原理的逻辑推论发挥得淋漓尽致。”[10]

在盖尔曼和派斯成功地处理了中性 K 介子系统之后，后来就陆续出现了分别用卡比玻角和外因伯角描写的粒子混合。甚至，不久也找到了中性 K 介子混合在原子物理学里的翻版——量子拍。这是粒子物理学对原子物理学反哺的一个极好例子。[11] 由此看来，量子力学早就准备好了必需的概念，早先没有发现量子拍现

象，完全是由于人们不敢想或者想不到而已。

在中性 K 介子混合机制的基础上，派斯和皮奇安尼(O. Piccioni, 1915—)接着又提出“再生”(regeneration)效应。这一回盖尔曼很不高兴，他埋怨派斯没有同他在这个方向上继续合作而找了别人，从此两人就闹翻了。

简单地说，设用 π^- 介子束流打击靶物质，产生出来的 K^0 介子中有一部分朝某一方向射出。上面说过了，在产生之后的自由行进过程中，K^0 按一半 K_L^0、一半 K_S^0 的概率进行衰变。由于 τ_S 比 τ_L 短得多，例如在经过了几个 τ_S 那么长的时间之后，短寿的 K_S^0 实际上已经衰变殆尽，可以认为留下来的都是长寿的 K_L^0 了。然后在 K_L^0 继续行进的途中遇到一薄块物质(再生器)的阻碍，K_L^0 就会与物质中的核子发生散射。而 K_L^0 在参加这种强相互作用过程的时候，又是以一半 K^0、一半 $\bar{K}^0$ 的概率出现的。亦即是说，这种散射的末态里产生出来的是 K^0 和 $\bar{K}^0$，在它们接着进行的衰变过程中，自然就会重新出现 K_S^0 的衰变方式。这就是短寿命的 K_S^0 在消失之后重新出现的“再生”效应，见图 7.13。

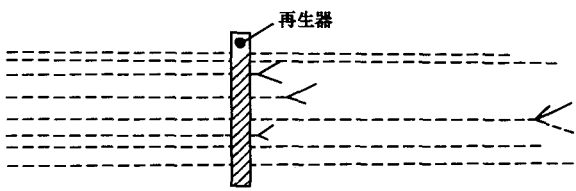


图 7.13 “再生”效应

还可以做以下比较详细的分析。运用半维象的处理，对于 K_L^0 和 K_S^0 这两个准稳定态，进行弱衰变的时间依赖可以写成

$$|K_L^0(t)\rangle = \exp(-iE_L t/\hbar)\exp(-t/2\tau_L)|K_L^0(0)\rangle$$

$$|K_S^0(t)\rangle = \exp(-iE_S t/\hbar)\exp(-t/2\tau_S)|K_S^0(0)\rangle$$

式中的 E_L 和 E_S 分别是它们的能量。考虑到 τ_L 比 τ_S 大得多，而

且我们所关心的主要是在几个 τ_S 的时间内系统的行为，可以取 $\tau_L \to \infty$ 的近似，并且定义能量差为

$$\Delta E = E_L - E_S$$

现在就能够把在 $t=0$ 时产生出 K^0 的初始条件写成

$$|\Phi(0)\rangle = |K^0(0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K_S^0(0)\rangle + |K_L^0(0)\rangle)$$

由此计算出在任意时刻，观察到系统转变为 $\bar{K}^0$ 介子的概率是[9]

$$|\langle \bar{K}^0 | \Phi(t)\rangle|^2$$

$$= \frac{1}{4}\left[1 + \exp\left(-\frac{t}{\tau_S}\right) - 2\exp\left(-\frac{t}{2\tau_S}\right) \cdot \cos\left(\frac{\Delta E}{\hbar}t\right)\right]$$

可以看出，这一式子右方方括号里的末项表现出一种振荡的效应。系统中含有 $\bar{K}^0$ 介子的概率呈现出一种反复的振荡。能量差 ΔE 就决定着这种“奇异数振荡”或者“超荷振荡”的频率。依赖于 ΔE 与 τ_S 的比值，这种振荡亦会表现出如经典力学的强迫振荡里的欠阻尼或者过阻尼的行为，见图 7.14。这种依赖于某一物理参数的变化而产生的振荡现象，正是量子力学里的态叠加原理所引起的干涉效应的典型表现。[12]从类似的效应测定的相应质量差是

$$\Delta E/c^2 = M(K_L) - M(K_S) = 3.5 \times 10^{-12}\ \mathrm{MeV}/c^2$$

我们看到，这一差值是 K^0 介子本身质量的 10^{-14} 倍，当然不会在

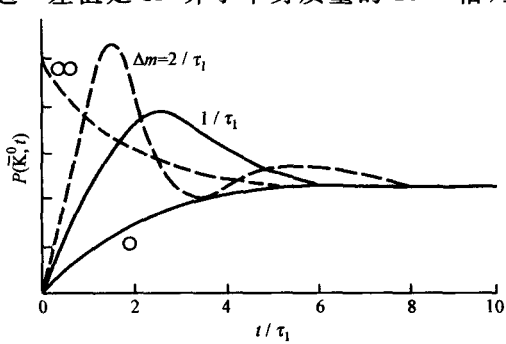


图 7.14　“奇异数振荡”的几种形式

粒子的惯性行为中被观察到。本来在德布罗意的波长公式 $\lambda = h/mv$ 里早就可以看到，量子力学里的质量参数决定着干涉效应的波长，现在我们又看到了这种性质的另一个例子。

在量子力学诞生三十年之后，物理学家们才想到运用粒子的叠加或者混合来解决中性 K 介子系统的问题。这是对于微观粒子性质的认识的一个重要的里程碑。中性 K 介子这个双重态并不是只有唯一的一种起作用的形式，在强作用过程中它以 K^0 和 $\overline{K}^0$ 的形式出现，在弱作用过程中则以 K_L^0 和 K_S^0 的形式出现。而按照量子力学，这两种表现形式或者说两种表象之间，存在着线性变换的关系。

我们也可以从另一个角度看这个问题。中性 K 介子这个双重态好像有一种两面性。在强作用过程中它以 K^0 和 $\overline{K}^0$ 的面目出现，在弱作用过程中则以 K_L^0 和 K_S^0 的面目出现。当我们观察到在散射过程中产生了一个 K^0 或者 $\overline{K}^0$ 的时候，不能够说它此后一直以这种面目进行衰变。反过来，我们亦不能够观察到一个 K_L^0 或者 K_S^0 的衰变过程，就断定它早先产生的时候必定就是这个样子。按照现代量子理论，物质或者粒子能够以不同的一些形式存在。微观对象在自由行进时所采取的存在形式，可以不同于它们同其他物质相互作用时所采取的形式，甚至有时候必定不同于它们同其他物质相互作用时所采取的形式。而人们对微观对象的观察，必须借助于同某种物质的相互作用。因此，不能够说微观对象在未受观察时，必定以受到我们观察时的那种形式存在。

为什么物质粒子能够以一些不同的形式存在，并且在不同的情况下发生不同形式之间的变换呢？这里的原因就在于量子力学里的态叠加原理。经典物理学的波动学里也有叠加原理，其中叠加的对象都是一些物理量，例如在机械波里的位移，在流体波动里的密度或者速度，在电磁波里的电场和磁场等等。但是，在量子力学里叠加的对象是本身并非物理量的概率幅，而微观对象的状态

又是由概率幅来描写的，概率幅的叠加可以使得系统的某些物理参数出现来回振荡的干涉效应，于是就产生出一些用经典物理学概念难以理解的结果来。粒子的混合就属于这一类效应。从中性K介子系统的“K^0-$\bar{K}^0$ 混合”或者“奇异数振荡”开始，粒子物理学已经在这个方向上取得了诸如“ϕ-ω 混合”，“中微子振荡”和“B^0-$\bar{B}^0$ 混合”等多方面的进展。

根据派斯的回忆，他曾经多次同爱因斯坦讨论过对量子力学的解释：“我们常常讨论他对客观实在的观念。我记得在一次散步中爱因斯坦突然站住，转身向着我，问我是不是真的相信，月亮只在我看着它的时候才存在。在这次散步的余下时间里，我们热衷于讨论，‘存在’这一术语对一位物理学家来说应当是什么意思。”[13]

可惜，派斯没有详细说明他们两人讨论的详细内容。然而，派斯亦已经指明这是对于量子力学的解释的讨论。爱因斯坦的基本态度是明显支持实在论的，所以他极不可能否定物质世界的客观存在，而很可能是讨论按照量子力学的观念，应当怎样来理解“实在”这一概念。

我们认为，与经典物理学里的研究对象的存在形式是单一而不可变化的不同，现在从中性K介子问题开始，量子力学给出了物质客体可以有不同存在形式的例子。我们现在观察到它以这种形式出现，并不能因此断定在此前或者此后它仍然维持着这种存在形式。这种在经典物理学中不可能出现的性质，就是中性K介子问题给我们的重要启示。在下一节里讨论的是与此相类似的另一个课题。

7.4　电磁场的各种量子状态

我们在第4.3节里已经提到：爱因斯坦在1905年讨论光电效

应那篇文章《关于光的产生和转化的一个试探性观点》里，把光在同物质相互作用时的性质，缺乏根据地外推到传播中的光。事实上，爱因斯坦在文章里断言，不仅在光电效应或者康普顿散射等“光的产生和转化”，即光与物质相互作用的过程中光是以光子的形式出现的，而且光在传播过程中亦是以光子的形式出现的。

我们在那一节里亦引述了一些物理学大师对于爱因斯坦这种观点的怀疑或者不接受的态度。尽管如此，从爱因斯坦这篇文章开始，光是由光子构成的，或者把光看做是光子气体、认为光束就是光子流的观念在物理学界里仍然占据了支配的地位。

1930 年，狄拉克出版了他的《量子力学原理》第一版[14]。在这一版的第一节里，狄拉克发挥了爱因斯坦的观点，声言“诸如光电效应和与自由电子的散射等现象表明了，光是由叫做光子的微粒组成的，每一个光子具有一份取决于光的频率的确定的能量和动量。这些光子表现得正如电子或者在物理学里已知的任何其他粒子的存在那样真实。”在第五节讨论互相干涉的两支分光束时又说了“一颗光子部分地在一分束部分地在另一分束”，“每一颗光子仅仅同它自己干涉”，“两颗不同光子之间绝不可能发射干涉”等等使用光子语言来描述干涉现象的话。

在狄拉克这本书后来的版本里[15]，第一章第 3 节干脆写出“光子的干涉”的标题，并且重复着类似的陈述。狄拉克就这样不仅把传播中的光看做是由光子所组成，而且认为光的干涉就是光子的干涉。

由于爱因斯坦和狄拉克的权威，这种把光束看做光子流的观点，以及在这一基础上对光的传播和干涉等现象的解释盛极一时，至今仍然有相当大的影响。

但是，按照爱因斯坦，光子是“局限在空间各点的”。这种在空间中定域的微粒怎么样能够同时既在一支分光束，又在相隔一段宏观距离之外的另一支分光束的问题，以及一颗光子微粒怎么样

可以在双缝衍射装置里同时穿越两条相隔一段宏观距离的狭缝的类似问题，曾经使得无数学习量子力学的学生和讲授量子力学的先生感到困惑不已。这一类的解说，业已成为理解量子力学基本原理的一大障碍。

当然，此外还有不使用光子语言的描述方法。例如，在费曼关于双缝衍射的描述里[16]，一颗颗的光子或者电子只在探测器的记录里出现，而整个干涉现象是用概率幅的叠加来说明的。

又如，1990 年巴仑泰(L. E. Ballentine)在他的量子力学教材里对狄拉克的上述断言表示了不同意见。他指出："严格说来，不是光子在干涉，既不是它们自己干涉也不是它们之间发生干涉，而是在电磁场中出现干涉图样。""要记得电场和磁场以及相应的量子力学算符(而不是光子的位置和动量)才是理论的基本变量。光子仅仅作为派生的量，即作为场的一种元激发进入理论。"不应当"仅仅把场看做是粒子流"，"不可能用一种光子气体去代替电磁场"等等。[17]

1991 年，本书作者在一篇哲学论文里明确指出[18]："干涉过程只适宜用相位确定的状态(相干态)来描述，在这种状态里是不适宜于使用粒子语言的。""具有确定相位的自由行进的光束，是不可以看做是由一定数目的光子所组成的光子流的。"

同年晚些时，苏达山(E. C. G. Sudarshan，1931—)等在一篇物理学论文里[19]，对这个问题做了比较详细的分析。论文两位作者指出："电场是不同单个光子相联系的。"观察到的"干涉图样不是一些单个光子的干涉图样，而是相干态之间的干涉。"

1995 年，量子光学的创始人，格劳伯(R. J. Glauber，1925—)在一篇短文[20]里，首先指出狄拉克写下那些"被当做圣经文句"的名言的时候，"没有意识到如此不成熟的陈述竟会造成多么严重的危害"。接着，他在评论近期围绕这个问题的几篇争论文章的时候指出，"最重要之点是在量子力学里干涉的不是粒子……

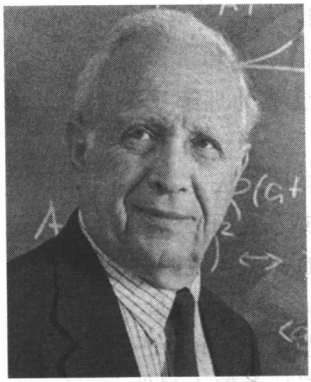


图 7.15 格劳伯(R. J. Glauber, 1925—)

而是概率幅。”“说光子自己干涉或者它们相互干涉都是没有意义的。”

最后,格劳伯下结论说:“总而言之,那几篇讨论文章以及狄拉克的名言本身,从根本上说都是错误的(out in left field)。为了纪念狄拉克,并且表示对他在物理学上的惊人贡献的尊敬,现在是把那句名言束之高阁(put to rest),并且原谅他在量子力学的早年岁月里写下那些从那时候起业已在物理学家当中引起混乱的过分简单的议论的时候了。”

由此可见,爱因斯坦和狄拉克所倡导的关于光束由光子组成或者说光束就是光子流的传统观念,的确存在严重的错误,已经受到了严厉的批评。

在传统的量子力学里,电磁场是描写电磁相互作用的算符,例如哈密顿算符里与电子的电荷耦合的库仑势或者与电子的磁矩耦合的磁场。在传统的量子力学里,没有对电磁场状态的描述,没有像写出电子的波函数 $\psi(x)$ 那样写出过光子的波函数。

这是因为,原则上不能在坐标空间里描写光子的运动。要描写光子的产生和消失,需要运用场的量子化方法,即运用光子的产生算符和吸收算符的方法。我们现在简单讲一讲电磁场的量子力学描写,或者说电磁场的量子状态的问题。这个问题不是适用于光与微观粒子散射那一类的量子电动力学问题,而是适用于描写光通过诸如空腔、分束器、滤光器、变频器以及干涉和衍射装置等光学器件的量子光学问题。

前面已经约略讲过量子电动力学的大意。但在这里不采用量子电动力学里那种明显表现出相对论协变性的形式,即不使用四

维电磁势 A_μ，仍然使用电场和磁场的概念。如同狄拉克建立量子电动力学的方法那样，这里也是从模拟量子力学的谐振子问题开始的。我们知道，量子力学里谐振子系统的哈密顿算符是两项的和，一项含有坐标的平方，另一项含有动量的平方。相似地，电磁场的总能量也是两项的和，一项含有电场的平方，另一项含有磁场的平方。于是，把电磁场按简正模展开的分量与谐振子里的坐标或者动量做适当的对应，就可以得到用谐振子问题的升降算符 a^+ 和 a 表示的场量，但现在把它们解释为光子的产生算符和吸收算符了[17]。a^+ 和 a 满足玻色子算符的对易关系我们在第 5.4 节里已经写过。

这样我们就得到了光子数本征态。例如，在最简单的单模情况，可以写出如下的光子数算符 N 和它的本征值方程

$$N = a^+ a$$

$$N \mid n\rangle = n \mid n\rangle$$

式中的 $|n\rangle$ 就是本征值为 $n(n=1,2,3,\cdots)$ 的光子数本征态。当然，我们采用的这套描写方法，并不意味着必须采用光子数的本征态来描写电磁场，而只是在光子数表象中展开以下的讨论。

我们知道，处在谐振子的定态 $|n\rangle$ 里的粒子，其坐标的平均值和动量的平均值都等于零。现在对应地，光子数本征态 $|n\rangle$ 的电场平均值和磁场平均值亦都等于零。由此可见，光子数本征态是与经典电磁场相距甚远的一种状态。

不仅如此，一般说来，根据测不准关系，任意状态中粒子的坐标和动量是不可能都取涨落为零的确定值的。与此相对应，处在任意状态中的电场和磁场，亦不可能都取涨落为零的确定值。例如，如果电场完全确定的话，磁场就会完全不确定，反之亦然。所以，根据电磁场的量子力学描写，不可能存在如经典电磁学描写的那种电场和磁场都完全确定的状态。

此外，量子力学里还有关于相位和粒子数的一道类似的测不

准关系式。根据这一关系式，在光子数本征态即光子数完全确定的状态上，场的相位是完全不确定的。从这个角度也可以看出，光子数本征态的确是一种非经典特性十分突出的状态。想当然地用具有确定光子数的状态的概念去描述光的传播、干涉和衍射等问题，注定是要遇到不可克服的困难的。

正是为了能够适当地描写光的传播、干涉和衍射等问题，格劳伯于 1963 年提出了相干态的概念。简单说来，相干态就是吸收算符 a 的本征态，用符号 $|z\rangle$ 表示。这里的 z 就是其本征值，相应的本征值方程是

$$a|z\rangle = z|z\rangle$$

相干态在光子数表象里的展开式是

$$|z\rangle = \exp\left(-\frac{1}{2}|z|^2\right)\sum_{n=0}^{\infty}\frac{z^n}{\sqrt{n!}}|n\rangle$$

由此可见，相干态由无限多个光子数本征态叠加而成，它是一种光子数很不确定的状态。并且，计算指出，相干态是电场和磁场的涨落都相当小的状态，而且也是场的相位高度确定的状态。事实上，相干态是适宜于描写激光器发出的光的状态。不过，由于吸收算符 a 不是厄密算符，本征值不同的相干态是不正交的，然而这套本征函数组仍然是完备的，只要注意乘上适当的归一化因子，相干态依然可以用来作为展开的基。[17]

以上我们从现代量子光学的进展论证了：运用光子语言来描述光的传播和干涉确实是不适当的。如果说在量子论创立早期的爱因斯坦和量子力学创立早期的狄拉克说了那些错话是情有可原的话，今天的物理学家再那样讲就太不应该了。

电磁场的各种量子状态的重要差别，在于接收到的光子计数的统计性质。例如，从一支激光器和一个白炽灯泡发出来的光，经过衰减和过滤之后，可以得到在强度和频率上都完全一样的两束光，但是两者的统计性质是大不相同的，而且这种差别是不难检测

到的。[21]

运用专门的仪器，可以检测到“激光”的光子到达时间序列是纯随机分布的，即在指定时间内两个光子相继到达的计数率不依赖于这一时间间隔的长短；或者说两个光子在任意时间间隔内相继到达的机会都是一样的。这是由于激光的光子到达时间序列服从的是泊松分布的缘故。这种随机的分布也叫做零关联分布。

如图 7.16，白炽灯泡或者处在热平衡状态的物体发出的光叫做“热光”(thermal light)，它的光子到达时间序列服从的是玻色分布。与随机分布比较起来，相邻的光子有挤近的倾向，或者说呈现出一种正关联分布，称为光子“成串”(bunching)效应。最早发现这种效应的时候，竟然有些物理学家声称量子力学出了毛病，后来很快弄清楚了，这正表现了玻色-爱因斯坦统计这种量子统计的特征。

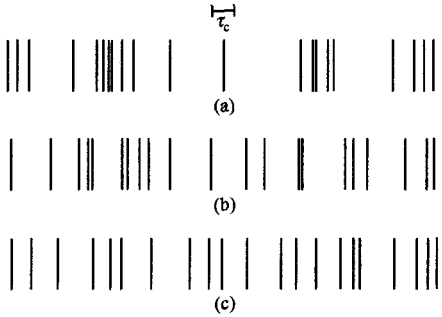


图 7.16　几种不同类型的光子到达时间的序列。(a)“热光”，呈正关联的“成串”效应；(b) 零关联即随机分布的“激光”；(c) 呈负关联的“反成串”效应

至于光子数本征态，它的光子到达时间序列与随机分布比较起来，相邻的光子有远离的倾向，或者说呈现出一种负关联分布，称为光子“反成串”(anti-bunching)效应。这种效应亦已得到了实验上的证实。[21]

因此，电磁场具有不同的量子状态，其中一些适宜于用光子语

言描述，另外一些则不适宜于用光子语言描述。即使是光子数本征态里的光子，一般亦不可以在坐标表象里描述它们的运动。而且，在电磁场与物质相互作用时必定以光子的形式出现，这乃是现代物理学已经达到了的共同认识。

有位作者为了反对以上的认识，论证光子概念适用于传播中的光，在一篇文章专门辟了一节“现代物理学中光子在介质中传输的应用”。这一节一开始就说：“现代物理学的发展不仅在实验上证明了光在传播中的粒子性，而且传播中光子的概念已经在……辐射输运过程的研究中得到了广泛的应用。”[22]

文献 [22] 举出文献 [23] 作例子质问说：“如果光在传播过程中不是以光子的形式存在，即这种光子输运过程不是客观的真实存在，原子弹和氢弹的研究成果根本无从谈起！面对真实发生的历史事实，面对一代物理学元勋以真实亲身经历书写的客观存在着的物理过程，又怎么能认为光子在传播的过程中是不存在的……呢？”

我们回答说，输运过程的实质是运动中的一种粒子接连同其他粒子发生碰撞，从而使其某种统计分布发生变化的过程。辐射输运方程描写的就是光由于受到各种物质粒子的碰撞（散射）而改变其能量分布状态的过程。在这里的决定性机制就是光同物质的相互作用，因此适用光子概念。

例如，在文献 [23] 第 34 页里列出的“光子的输运方程”是这样写的：

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}+e\Omega\cdot\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{r}}\right)n(\nu,\Omega)=N^{*}A'_{\nu}-c(N_{a}\sigma_{a}+N_{e}\sigma_{s})n$$
$$+N_{e}\sigma_{s}c\int \mathrm{d}\nu'\,\mathrm{d}\Omega' K(\nu,\nu',\Omega,\Omega')n(\nu',\Omega')$$

方程左方是光子密度函数的空间时间变化率；右方首项是物质粒子（原子或分子）发射光子的贡献；次项是物质粒子吸收光子的贡

献，以及电子对光子散射的贡献；末项描写同电子散射前后光子从初态变为末态所导致的贡献。

其实，光子输运方程就是在本书第 3.3 节里提到过的在经典统计物理学里的“玻尔兹曼积分微分过程”那一类型的方程，其中微分的是宏观变量，积分的是微观效果。上述方程描写的量 n 不过是由光在空间中的能量分布决定的光子密度分布函数，它是一个宏观物理量，并不描写单个光子的运动。在光没有同物质作用的时候，上式右方为零，光子输运方程退化为连续性方程，它不外是能量守恒定律的一种表达。因此，的确没有根据说光在传播中是以光子的形式存在的。

总之，输运过程的发生，全在于存在着光同物质的相互作用，因此输运过程与单纯的传播过程有着本质的区别。文献[22]把输运过程同自由传播混为一谈，把输运过程中光以光子的形式参加与物质的相互作用，说成是“证实了光在传播中的粒子性”，不能不说是对物理学基本概念的严重混淆。[24]

参 考 文 献

[1] 例如，参看：关洪，《量子力学基础》，北京：高等教育出版社，1999，§7.4。

[2] 参看：胡宁，《场的量子理论》，北京：科学出版社，1964，第六章。

[3] 参看：G. Wentzel, Quantum theory of fields (until 1947), in *Theoretical Physics in the Twentieth Century: A Memorial Volume to Wolfgang Pauli*, M. Fierz and V. F. Weisskopf (eds.), New York: Interscience Pub. Inc, 1960, pp. 48—77.

[4] 参看文献[1]，§9.4。

[5] M. Gell-Mann and Y, Ne'eman (eds.), The Eightfold Way, New York: W. A. Benjamin Inc., 1964. 这本文集收进了关于“八重法”对称性和夸克模型的一些早期文献。

[6] 《英汉高能物理学词汇》，北京：科学出版社，1981。

[7] 赵凯华主编，《英汉物理学词汇》，北京：北京大学出版社，2002。

[8] 这里的 C 代表电荷共轭变换，P 代表空间反演变换，CP 就是这两种变换的联合变换。实际上中性 K 介子的衰变过程中存在微弱的 CP 不守恒的效应，但其影响只占千分之一的量级，在初步近似中可以忽略。

[9] 参看文献 [1]，§ 9.4。

[10] R. P. Feynman, Theory of Fundamental Processes, New York: W. A. Benjamin Inc. 1962, p. 50.

[11] 参看文献 [1]，§ 9.4。

[12] 参看：关洪，《量子力学的基本概念》，北京：高等教育出版社，1990，§ 4.4。

[13] A. Pais, Rev. Mod. Phys. 51 (1979) 863.

[14] P. A. M. Dirac, The Principles of Quantum Mechanics, first edition, Oxford U. P., 1930.

[15] P. A. M. Dirac, The Principles of Quantum Mechanics, fourth edition, Oxford U. P., 1958.

[16] R. P. Feynman *et al.*, The Feynman Lecture on Physics, vol. III, Addision-Wesley, 1964.

[17] L. E. Ballentine, Quantum Mechanics, Singapore: World Scientific, 1998, Chapter 19.

[18] 关洪，关于"月亮在没人看它时是否存在?"的问题，《自然辩证法研究》，1991 年 7 卷 3 期，39。

[19] E. C. G. Sudarshan, T. Tony, The two-slit interferometer reexamined, Am. J. Phys. 59(1991)592—595.

[20] R. J. Glauber, Dirac's famous dictum on interference, Am. J. Phys. 63(1995)12.

[21] 参看文献 [12]，§ 7.4。

[22] 李宏芳，月亮在没人看它时是否真的不存在？《齐鲁学刊》，2004 年第 1 期，129 页。

[23] 黄祖洽，丁鄂江，《输运理论》，北京：科学出版社，1987。

[24] 详细分析见：关洪，论爱因斯坦《关于光的产生和转化的一个试探性观点》一文的得失，《自然辩证法通讯》，2005 年 27 卷 2 期，7 页。

第八章　在追求统一的道路上

8.1　从规范理论到电弱混合模型

规范变换的概念最早是由外尔1919年在讨论电磁场和引力场的一种统一模型时提出来的。他定义的“规范”(gauge)变换是四维空时度规的一种实指数变换，实质上相当于尺规长短和时钟快慢的变换，即空间时间尺度的实在变化。爱因斯坦收到了他送来的稿子，看出在这种变换下，相对论里用量杆测定的长度和用时钟记录的时间都将依赖于它们过去的历史，因而必定同经验事实相矛盾，但仍然推荐投出去发表。外尔工作亦有它的积极结果，即是从这种规范不变性推出了电荷守恒。这是第一次把电荷守恒定律同一种不变性联系起来。



图8.1　外尔(H. Weyl，1885—1955)

在量子力学诞生之后，很自然把规范变换的对象推广到量子力学里的波函数或者量子电动力学里的场算符。然而，真正的进展在于把外尔的实指数变换改为虚指数变换，即波函数或者场量相位的变换。1927年戈顿最早写下这种现代形式的规范不变公式。1929年，外尔指出在新的变换形式里，规范不变同电荷守恒

的联系仍然有效。为简单起见，我们在这里用复标量场 φ 作为例子，它的变换式是

$$\varphi(x) \to \varphi'(x) = \exp(i\varepsilon/\hbar c)\varphi(x)$$

式中的 ε 是一个常量。

不难看出，在上式的变换下，采取 φ 和 φ^* 的双线性形式的，描写标量场的拉格朗日量

$$L = -\frac{\partial\varphi^*}{\partial x_\mu}\frac{\partial\varphi}{\partial x_\mu} - \frac{m^2}{\hbar^2 c^2}\varphi^*\varphi$$

是不改变的。这种变换称为整体(global)规范变换。它的意义是，定义哪一种相位作为物理的场都是可以的。由于现在的相位 ε 不随空间坐标而变化，所以是一种整体的变换，即在全空间各点上的一种同步变换。

如果 ε 不是一个常量而是以空时坐标为变量的函数 $\varepsilon(x)$，就从整体规范变换推进到局域(local)规范变换

$$\varphi(x) \to \varphi'(x) = \exp[i\varepsilon(x)/\hbar c]\varphi(x)$$

这种变换的意义是，在空间中各个坐标点可以各自定义为是哪一种相位值描写实际的物理场。这时候，由于拉格朗日量 L 含有对场量 φ 的微商(为了从 L 导出 φ 所满足的采取微分方程形式的运动方程，它必定含有这样的项)，变换之后的 L 肯定多出了含对 $\varepsilon(x)$ 的微商的项，不再保持不变。

为了系统的总拉格朗日量在局域规范变换下保持不变，需要引入矢量场 A_μ，它满足如下的无穷小变换关系

$$A_\mu \to A'_\mu = A_\mu + \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_\mu}$$

这个为了保持局域规范变换不变而引入的四维矢量场 A_μ，就叫做规范场。

以上关于局域规范变换的讨论起源于电磁作用的讨论，在这种情况下，A_μ 对应于描写电磁场的四维矢量势，由上述的变换不

变性可以推出电荷守恒定律。以上施加于描写带电粒子的 φ 场的变换称为第一类规范变换，施加于电磁场 A_μ 的变换称为第二类规范变换。总的规范变换就指这两种变换的联合。电荷是一种可加量子数，对应的变换群是 U(1)群，这是最简单的情况。所以，1928 年外尔接受了这种新形式的规范变换的时候，这样评论说："我现在相信，规范不变性不是把电和引力而是把电和物质联结在一起了。"

下一步重要的进展是在 1954 年发表的杨振宁(1922—)-米尔斯(R. L. Mills, 1927—)关于非阿贝尔规范变换的工作。他们是以同位旋不变性为基础来展开讨论的。我们知道，同位旋空间里的转动不变性同普通空间里的转动不变性一样是用 SU(2)群来描写的。因此，同位旋的三个分量算符彼此是不对易即在乘法中不可交换的。于是，用 SU(2)群来描写的两个变换的先后次序，一般也是不可交换的。这就是"非阿贝尔群"的意思。以核子为例，质子和中子组成一个同位旋双重态，两者是在同位旋空间中的某一方向的分量的两个本征态。在这种情况下，与同位旋转动相联系的局域规范不变性的意思是，在普通空间中的每一点都可以各自定义同位旋空间的哪一个方向是质子和中子这两个本征态所在的方向，而不改变理论的物理内容。

这里有一个问题是，同位旋只是一种近似的对称性。例如，由于电磁作用的影响，质子和中子的质量存在着差异，因此同位旋并不是严格不变的。或者说，这种方案实际上不适用于同位旋转动不变性。不过，重要的是杨-米尔斯的工作开辟了非阿贝尔规范变换的先河，给出了规范场满足的方程以及含有规范场影响项的狄拉克方程，可以由此导出相应的守恒定律，提供了研究与高级的内禀对称性联系的规范理论的必备工具。例如，与电磁作用里简单的 U(1)规范理论不同，在与 SU(2)群联系的非阿贝尔规范理论里，为了保持局域的规范不变性，需要有三个规范场，对应着三个

零质量的矢量粒子，它们就是相应的相互作用的媒介。

由此产生了另一个问题：除了已经归属为电磁作用的媒介粒子光子以外，当时并没有发现有什么别的零质量矢量粒子。事实上，泡利在 1953 年亦做过类似的初步考虑，但由于看不到规范粒子与实际粒子的对应，就知难而退了。而且，在杨-米尔斯的方案里，与电磁场同电磁势的线性关系不同，规范场同规范势的关系是非线性的，在这一点上类似于广义相对论里的场方程，更增加了问题的复杂性。因此，长期以来，他们的方案只是作为一种理论上的可能性，不知道有什么实际的用处。

真正的转机是在 1971 年，特霍夫特(G. t'Hooft, 1946—)在他的老师维尔特曼(M. Veltman, 1931—)的工作的基础上，并且最后两人合作，终于证明了这一理论是可重正化的，给人们增强了信心。在弱相互作用方面，早就了解到在第 6.2 节里讲到的费米提出的四费米子相互作用虽然在当时和其后取得了很大的成功，但却是不可重正化的。于是就尝试把弱相互作用解释为实际上也是靠一些作为媒介的矢量粒子传递的，这些粒子起初叫做“中间玻色子”W^+ 和 W^-，后来称呼为“弱玻色子”即“弱作用规范玻色子”。在 1957 到 1958 年间，终于在实验上确定了弱相互作用采取 V-A

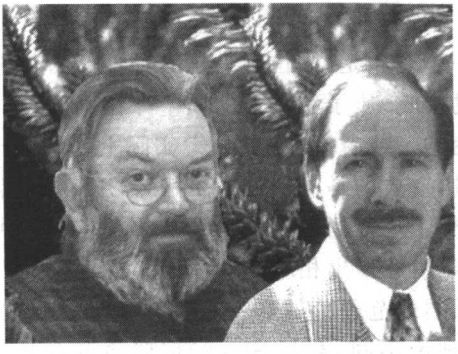


图 8.2 左：维尔特曼(M. Veltman, 1931—)；右：特霍夫特(G. t'Hooft, 1946—)

的协变形式。这一结果十分有利于矢量粒子 W^+ 和 W^- 的传递。因为，V 就代表矢量型的耦合，而 A 代表的是轴矢量，它的空间反演性质与普通的矢量相反，两者的差适足以描写 1955 年发现的宇称不守恒的弱作用过程。

例如，运用中间玻色子的媒介，可以把典型的 β 衰变过程看做是一个中子 n 转变为一个质子 p 同时放出一个带负电的 W^-，然后这个 W^- 再转变为一个电子 e^- 和一个反中微子 $\bar{\nu}$ 的过程。早期已经运用中间玻色子的概念来处理弱作用过程，而把费米的直接作用在低能区的近似有效性归因于那些中间玻色子的质量很大，对应着很短的力程。

另一个关键性的进展是所谓“希格斯机制”，主要是由希格斯(P. W. Higgs, 1929—)等人早几年提出来的。他们建立了一个基本粒子的模型，其中引入了“希格斯粒子”，它们是一些自旋为零的粒子，由于质量很大而不容易观察到。相应的标量希格斯场有一种特别的性质，场能量最低的状态不是场强为零的状态。换句话说，场能量最低的状态是场强并不为零的状态。用另一种语言讲，在真空状态里实际上充满了达到了“玻色凝聚”的希格斯粒子。“玻色凝聚”指系统里的绝大部分甚至全部玻色子都处在同样的能量最低的状态上，某些金属在低温下的超导电现象，就是这种“玻色凝聚”的一个例子，并且“希格斯机制”正是在超导机制的启发之下提出来的。通常把“希格斯机制”的效果称为“对称性自发破缺”，在这种情况中，系统的动力学方程是严格满足对称性要求的，但系统处在一种非对称的状态上，就使得这种对称性“破缺”了。

在类似电磁场的情况下，“希格斯机制”使规范场受到了屏蔽，表现出短程力的效果。这就好比使得本来是零质量的光子变得有质量了，同时仍然保持规范不变性。把这种机制推广到杨-米尔斯理论，引入了一种相应的希格斯粒子，就能够使得杨-米尔斯场的

力程变短，亦即是说相应的规范粒子成为有质量的了。与此同时，原来的局域非阿贝尔规范不变性仍然有效，或者像特霍夫特说的那样，“使得杨-米尔斯理论超导化了”(文献[2]，76 页)

1967 年，外因伯(S. Weinberg，1933—)尝试用加入了希格斯机制的杨-米尔斯理论去处理强相互作用。他使用的是当时已经取得了一定成果的 SU(2)×SU(2)群的对称性，其中一个 SU(2)指普通的同位旋变换群，另一个 SU(2)是手征同位旋变换群，即对粒子的左旋分量和右旋分量具有相反作用的同位旋变换群。但在他的理论里，需要人为地引入规范粒子的质量，结果使得理论是不可重正化的。[3]

外因伯在走过了这一段弯路之后，意识到这种理论方法适用的应该不是强作用对称性而是弱作用和电磁作用的对称性。他首先考虑的是第一代轻子，即左旋的电子、左旋的中微子(电子中微子)和右旋的电子。由于弱作用中宇称不守恒，中微子只有左旋分量而没有右旋分量。这也是第一次把左旋的和右旋的电子分拆开来处理。在这个方案里，除了严格的轻子数守恒之外，可能存在的最高对称性乃是 SU(2)⊗U(1)对称性；其中的 SU(2)描写新定义的“弱同位旋”转动不变性，而 U(1)可以看做是一种可加量子数“弱超荷”的守恒，“⊗”是“直乘”的符号。这里的弱同位旋和弱超荷显然是强作用里守恒的同位旋和超荷的模仿。于是，可以把这个 SU(2)群的三个规范粒子看做是传递弱作用的中间玻色子 W^+ 和 W^-，加上一个由 SU(2)群的结构所要求的中性中间玻色子 W^0，而 U(1)群的规范粒子则称为 B_μ，希望能够描写传递电磁相互作用的媒介。

但是，很快发现，B_μ 并不完全是电磁场的规范粒子，真正的矢量电磁势 A_μ 是它同 W^0 这两个中性粒子的如下混合

$$A_\mu = \sin\theta_W W^0_\mu + \cos\theta_W B_\mu$$

而与它正交的另一种混合才是传递弱作用的中性玻色子 Z：

$$Z_\mu = \cos\theta_W W_\mu^0 - \sin\theta_W \beta_\mu$$

式中的混合角 θ_W 称为外因伯角，我们在第 7.3 节里已经提到过这一类粒子混合的先例。于是，这种对称性机制就可以统一地描述电磁作用和弱作用，并且借助于希格斯机制，在保持规范不变性的同时，使带电的弱玻色子 W^+ 和 W^- 以及中性弱玻色子 Z^0 获得质量，而与 A_μ 联系的光子仍然是没有质量的。通过引入的 θ_W，可以拟合观察到的电磁作用与弱作用的相对强度，亦可以使三种弱玻色子的质量高到接近于 100 GeV 而暂时超出那时候实际观察的可能范围。



图 8.3　外因伯（S. Weinberg，1933—）

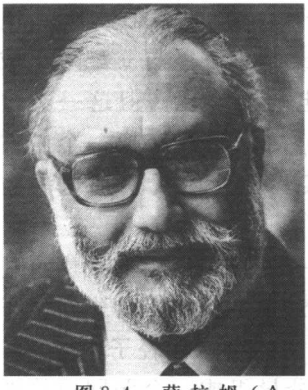


图 8.4　萨拉姆（A. Salam，1926—1996）

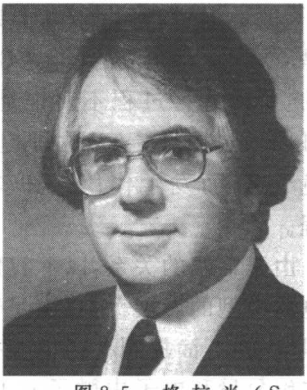


图 8.5　格拉肖（S. Glashow，1932—）

实际上，格拉肖（S. Glashow，1932—）在 1961 年已经初步提出过这种 SU(2)⊗U(1)对称性，而萨拉姆（A. Salam，1926—1996）和他的合作者亦在 1964 年开始沿着与外因伯相似的思路研

究了同样的问题。起初人们没有很认真地对待这种仅仅被当做一种可能的对称性方案的理论方法，问题在于虽然外因伯和萨拉姆都相信这一理论是可重正化的，但直到 1971 年才由特霍夫特严格证明了这一点。自此之后，被称为“电弱模型”(electroweak model)或者更加夸张的“电弱统一理论”(electroweak unified theory)的外因伯-萨拉姆模型的发展就势如破竹了。

电弱理论在统一描述了已知的各种弱作用过程之外，还预言了一类过去没有观察到的“中性流”过程。虽然早就有人提出过中性流的可能性，但在 $SU(2)\otimes U(1)$ 模型里第一次从严格对称性的要求预言中性流的存在。如同我们在费米的 β 衰变理论中看到的那样，重子流和轻子流都是改变一个单位的电荷的，或者说可以解释为由带电的弱玻色子 W^+ 和 W^- 传递的。现在根据对称性的要求，除了 W^+ 和 W^- 之外，还存在着中性的规范粒子 Z^0，当然就肯定会出现由它传递的中性流过程了。例如，电子 e^- 和 ν_μ(μ 子中微子)的散射过程，由于电子数和 μ 子数(ν_μ 的 μ 子数是 1，电子数是 0)是分别守恒的，即是说电子 e^- 是不可能与 ν_μ 配对组成弱流的，所以这种过程不可能通过带电弱流实现。但这一类过程却可以通过中性流实现，即电子与 ν_μ 之间通过交换一个中性弱玻色子 Z^0 而发生作用。1973 年，实验上开始观察到这一类的过程。

由于篇幅的关系，以下我们不再一一按照历史的次序讲述有关电弱模型的发展，而只满足于列出最后的结果。首先在轻子方面，早先在上面提到在弱电统一理论中的第一代轻子中，电子 e^- 的左旋分量和电子中微子 ν_e 的左旋分量组成一个弱同位旋的双重态 (e^-,ν_e)，剩下电子的右旋分量则是弱同位旋的单态。而 μ 子和 μ 子中微子 ν_μ 属于第二代轻子 (μ^-,ν_μ)，具有类似的弱同位旋安排。1976 年实验上意外地发现了质量比 μ 子高十几倍的一种“重轻子”τ(质量为 1778 MeV/c^2)，它与伴随着它的 τ 中微子组成

第三代轻子(τ,ν_τ),亦具有类似的弱同位旋安排。于是,我们一共有了三代构形类似的轻子。

电弱模型开始只考虑了轻子,后来加入了夸克。这样的模型意味着,只有轻子和夸克是构成物质的真正的基本实体。当然,此外还有与各种内禀对称性联系的规范粒子。在弱电统一模型里,三种颜色的夸克同轻子具有类似的安排。例如,第一代的三种颜色的夸克 u 和 d 的左旋分量,分别组成弱同位旋的双重态,而三种颜色的夸克 u 和 d 的右旋分量,则分别属于弱同位旋的单态。这样就可以恰当描写由夸克和反夸克组成的强子同轻子之间的、遵从 SU(2)×U(1)对称性的相互作用。但是,起先的第三种夸克 s 却缺乏与其配对组成双重态的第四种夸克,使得模型里出现一些不希望有的相互作用。1974年,丁肇中(1936—)等发现了在 3.1 GeV 的高能量处的一个宽度仅为 0.08 MeV 的狭窄高峰,相应于寿命相当长的似稳定粒子,命名为 J/ψ。很快就证认出,它就是人们期待着的第四种夸克 c 同它的反粒子组成的束缚态"粲偶素"(charmonium)。这个名称是对由正负电子对组成的"电子偶素"(positronium)的模仿,而"粲"(charm)则是为夸克 c 起的名称,它就是同 s 夸克配对组成双重态的粒子。在粲夸克 c 之后,又相继在 1977 年发现含有"底夸克"b 的介子 B(它的中性成员就是在第 7.3 节里提到过的 B^0),和在 1995 年发现存在"顶夸克"t 的证据。



图 8.6　丁肇中(1936—)

至此,与三代轻子相仿,夸克也分为不同的三代:(u,d),(s,c)和(b,t),似乎都已经品种齐全了。

运用电弱模型计算出来十种可以与实验比较的不同中性流过

程，由此测算出的外因伯角数据都很接近。新近统计的结果约为 $\sin^2\theta_W=0.231$。



图 8.7 鲁比亚(C. Rubbia, 1934—)

1983 年，经过专心的寻找，终于在预期的能量区域相继发现了带电的和中性的弱玻色子 $W^{\pm}$ 和 Z^0，它们的质量值分别约为 80.4 GeV 和 91.2 GeV，差不多是质子的一百倍了。这一成果主要归功于欧洲核研究中心(CERN)的实验物理学家鲁比亚(C. Rubbia, 1934—)。

这些理论预言的证实，为电弱统一模型奏响了凯歌。以至于它取得了“标准模型”(standard model)的美名，并且被誉为基本粒子理论的一项“里程碑式的进展”。[4]派斯为此评论道：“从伦琴到鲁比亚，我们现在到达了物质世界内部最深的一点，即大约 10^{-16} 厘米(W 和 Z 的康普顿波长)，在这一点上，现时的理论和实验已经互相结合，互相渗透了。”(文献[1]，782 页)

8.2 标准模型前后

标准模型确实是一项杰出的成就。但是，在它的创立者和崇拜者把它几乎捧上了天的同时，亦出现了一些异样的声音。例如，对标准模型的建立做过重要贡献的特霍夫特就这样说过：“当弱力的新规范理论为大家所接受之时，外因伯和萨拉姆竟都毫不忌惮地把它宣称为弱力和电磁力的一种‘统一’；而且为了避免任何误解，又加了一句：‘自从麦克斯韦把电和磁统一起来之后的一项最伟大的统一。’”他还说：“我一直持有如下的看法：外因伯-萨拉姆模型并不完全值得如此歌功颂德。这个新理论不是以两种不同的

规范场 SU(2)和 U(1)作为其出发点的吗？这不是一种统一。”（文献[2]，156 页）

我们认为，特霍夫特这种把标准模型仅仅看成是一种“弱力的规范理论”的说法不无道理。因为，描写电弱模型的基本框架只是 SU(2)和 U(1)这两者的“直乘”，即是说把这两个群简单地拼接在一起，除了以“外因伯角”为表征的粒子混合之外，并没有任何其他的牵连。说它是一种“统一”，的确是很勉强的。依照实际的情况，与其把外因伯-萨拉姆模型叫做是“电弱统一理论”，不如看做是一种“电弱混合模型”更为妥当。

况且，外因伯自己也晓得他们的模型并非尽善尽美。他说过：“我们知道标准模型并不是最终的答案，因为它有明显的缺陷，而且我不得不说，那是美学上的缺陷。……它包含好几十种不同种类的场，可我们并不知道为什么要有这些场而不是其他场。另外，还有表示某些自然常数（例如电子的质量）的大约 18 个参数出现在标准模型的方程里，可是在这种理论里却不能对它们做出说明。”（文献[4]，79 页）

霍耳顿在一篇讨论狭义相对论诞生历史的文章里，在评论“在爱因斯坦之前一年发表的，并作为当时物理学中最优秀著作代表的”、洛伦兹关于电子论的一篇“大论文”的时候说，“这篇洛伦兹声称是以一些‘基本假设’而不是‘特设假定’为基础的论文里，事实上却包含着十一个特设（*ad hoc*）假定。”他在逐一指出这十一个假定之后指出：“正是由于这些理由，爱因斯坦后来认为：‘作为一个对于过去一直是相互独立的种种假说的令人吃惊地简单的总结和概括’，狭义相对论超出了麦克斯韦-洛伦兹的电动力学理论。”[5]

把对于一百年前的这一段历史的评价同标准模型的实际情况相对比，我们觉得后者在“美学上”确实不像是爱因斯坦从第一性原理出发导出的相对论，而更像是洛伦兹的电子论那样的依赖于

十余个特设假定拼凑起来的一种暂时性的模型。例如说，为什么外因伯角取 $\sin^2\theta_W \approx 0.23$ 那样的数值？对于这一类问题的探索，将会寻找出真正的统一理论，这就是我们在下面要讲的一个主题。

另一个令人困惑的问题是，为什么夸克和反夸克不像由它们组成的各种重子和介子那样可以单独存在，即是说不可能观察到自由状态的夸克呢？在往下展开之前，我们先讲一讲早几年的一个插曲，即费曼提出的部分子模型。[6]

1968 年春天，费曼开始考虑两个强子的高能碰撞问题，例如两个质子或者一个 π 介子同一个质子碰撞那样的问题。他相信在碰撞能量很高的情况下，入射粒子同靶粒子的强相互作用会表现出一种简单的机制。这是因为，按照相对论里的长度收缩，以可与光速比较的速度迎头相撞的两个球状粒子，互相看对方就像看到一个扁平的圆盘一样。而且，这两个粒子相互发生作用的时间也是非常短的。

1968 年 6 月，费曼进一步设想每一个强子都由一些微小的组分粒子构成。起初他没有认定它们是不是一些已经知道了的粒子，而只是笼统地称呼为“部分子”(parton)，并且在每一个强子里面部分子的数目也是不确定的。费曼认为这些部分子在强子里面是接近于自由地运动的。于是，当两个强子发生高能碰撞时，在那么短的时间里面肯定来不及把强子里面的多个部分子牵扯进来，只会发生入射粒子中的个别部分子同靶体粒子中的个别部分子之间的作用。于是，两个强子发生高能非弹性碰撞的概率，就应当等于分别处于入射体和靶体中的任意两个部分子的弹性碰撞概率之和。经过初级散射的部分子，又会产生比较复杂的次级散射，最后造成总的非弹性散射的效果。这就是费曼的“部分子模型”的基本物理思想。

然而，部分子模型首先得到实际应用的，却不是强子-强子碰

撞问题，而是电子同质子的深度非弹性散射问题。1968 年 8 月，费曼到了斯坦福直线加速器中心(SLAC)，了解到这方面的进展情况，马上领悟到这正是他的部分子模型用武之地。

回顾在 7.1 节的最后，我们已经提到了运用电子-核子的弹性散射作为探测核子内部电荷和磁矩分布的一种手段。能量很低的电子打不进核子的内部，它所"看到"的只是作为一个整体的核子，事实上就如同看到一个点粒子一样。能量逐渐增高的入射电子能够逐渐深入核子的内部，就会探测到以"形状因子"表达的内部分布的信息。现在，入射电子的能量再提高，就进入了非弹性散射、即产生一些新的末态粒子的区域，应该能够给出更加深入细致的内部结构信息。

SLAC 的物理学家们从对于实验结果的理论分析，已经得到了称为"标度定律"(scaling law)的、非弹性散射截面里的各项结构因子对于一些运动学参数的依赖关系。这里讲的各项结构因子，可以看做是在弹性散射截面里的各项形状因子的对应物。具体说来，与在弹性散射里的各项形状因子仅仅是动量传递的函数不同，在非弹性散射里的各项结构因子是入射粒子的能量损失 ν 和过程中的四维动量传递 q^2 这两个变量的函数。粗略地讲，标度定律说的是，当 ν 和 q^2 都趋向无限大时，各项结构因子只依赖于两者的某种比值而与它们的绝对大小无关。

费曼得悉这种现象之后，很快运用简洁的部分子模型解释了标度定律。然后，如果把部分子认作是夸克的话，就可以把描写非弹性散射截面的强子结构因子具体化为强子内部各种夸克的分布函数，这种方法取得了大致合理的结果。因此，一时间就把部分子模型的成功看做是夸克存在的一种实在的证据。虽然后来发现事情并没有那么简单，实际上部分子并不完全等价于夸克，例如，部分子也可能包括有下文将要提到的"胶子"。

下一个问题自然是，既然有证据认为夸克在强子内部近似于

自由地运动，那么为什么它们不会跑出来成为独立存在的夸克呢？为了说明夸克的这种性质，早期流行过一种“袋模型”(bag model)，把强子设想为束缚在一个不可穿透的口袋里的一群自由运动或者接近于自由运动的夸克以及反夸克。在设定了口袋的压强和表面张力等唯象参数之后，亦能够推导出一些合理的半定量结果。不过那显然不是一种人们期待已久的、关于强相互作用的动力学方法。

真正的进展就是在上一章里提到过的量子色动力学(QCD)，它是规范场理论在电弱模型的成功的启发下的拓展。顾名思义，量子色动力学的基本思想是在夸克所具有的红、绿、蓝三种颜色的色自由度上做文章，它假定了在这个三维的颜色空间里，存在着一种类似于原来的味 SU(3)群 $SU_f(3)$ 的色 SU(3)群 $SU_c(3)$ 对称性。不过，与原来的 $SU_f(3)$ 近似对称性不同，这回的 $SU_c(3)$ 是一种可以用非阿贝尔规范场描写的严格对称性。早先的杨-米尔斯理论和电弱混合用到一种 SU(2)群的对称性，它具有三种自旋为 1 的规范粒子，通过希格斯机制使它们获得非零的质量。现在的量子色动力学用的是 $SU_c(3)$ 群的对称性，它相应具有八种静止质量为零、自旋为 1 的，称为“胶子”(gluon)的规范场粒子，不存在着希格斯机制。八种粒子的这种取名表示夸克是靠这些胶子粘合在一起形成强子的。即是说，认为夸克之间的强相互作用是通过胶子 g 传递的；或者说，把强相互作用归结为夸克与胶子的作用。这样一来，就取代了从汤川开始，认为强相互作用主要靠 π 介子等传递的那种早期的唯象性介子场论。

与在 $SU_f(3)$ 对称性里三种味夸克以及它们的反粒子组成介子八重态相似，现在在 $SU_c(3)$ 对称性里的胶子八重态，对应着三种色荷(红、绿、蓝)与它们的反色荷(反红、反绿、反蓝)的结合。换句话说，胶子负责在夸克之间传递和转换色荷，所以它们本身都是负载着颜色的。(与胶子相伴的那种完全没有颜色的矢量粒子属

于八重态之外的单态。)可是,由夸克或者还有反夸克组成的强子,即观察到的重子和介子都是完全无色的,即是说处于色单态。

QCD 最重要的贡献是解释了夸克之间距离很近时的“渐近自由”现象。这是格罗斯(D. J. Gross, 1941—)和威尔泽克(F. A. Wilczek, 1951—)以及珀立策(H. D. Politzer, 1949—)于 1973 至 1974 年做出的成果。

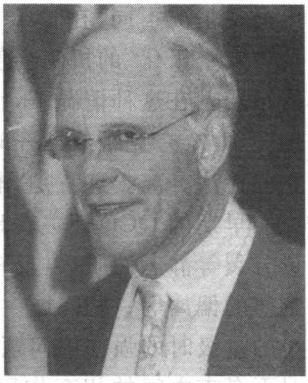


图 8.8　格罗斯(D. J. Gross, 1941—)

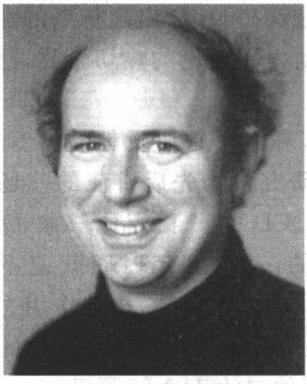


图 8.9　威尔泽克(F. A. Wilczek, 1951—)

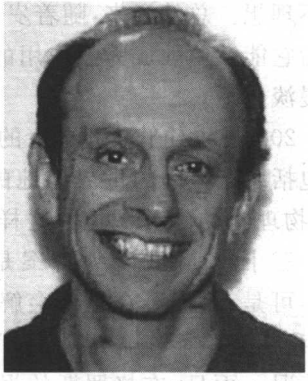


图 8.10　珀立策(H. D. Politzer, 1949—)

大家知道,处在电介质中的一个电荷,由于会把介质中的相反电荷吸引到它的周围,抵消了它原来的一部分电荷,使得在远处看起来它的电荷变小了。不过,当两个电荷逐渐接近时,这种介质极化的屏蔽效应会逐渐变弱,使得它们之间的电作用逐渐变强,最后能够几乎完全消除掉屏蔽效应。在量子电动力学里,“真空极化”的机制亦会产生相似的效应。然而,与量子电动力学里光子没有

电荷的情况不同，在量子色动力学里，由于夸克和胶子都带有色荷，“真空极化”的机制会使得两个夸克在很接近时的相互作用变得很弱。在这种情况下，它们的行为就会近似于自由粒子。相反地，当两个夸克距离拉开时，就会经受到越来越强的束缚力，使得它们无法分离。这就是“渐近自由”的意思。

早期的 QCD 还成功地解释了强子的磁矩和强子多重态的质量分裂等静态性质，以及轻子同强子深度非弹性散射中对于标度定律的偏离等一些问题。不过，对于距离超过了例如一个核子大小的量级时的强作用问题，渐近自由不再生效，并且由于在这种情况下夸克之间的相互作用变得很强，亦不适宜用微扰论去计算。于是就产生了一类量子色动力学的“非微扰”方法，但取得的进展并不理想。总的说来，随着岁月的消逝，在 QCD 出现初期的那种以为它能够单独成为强作用的真正动力学理论的热切希冀，已经慢慢淡化了。

2004 年，对于渐近自由的理论解释做了首要贡献的格罗斯，在包括北京在内的世界各地的几处研究机构先后讲演的一场报告《物理学的未来》里是这样谈论 QCD 的：“我们能够解 QCD 吗？三十年前，我以为答案是肯定的，花上五年时间就差不多了。可是，我们至今也不会解 QCD。在大距离处，相互作用力很强，我们还不能作解析处理。”[7] 这几句话反映了今天 QCD 的实际情况。而且，在格罗斯的报告谈到的二十五个问题里面，标准模型和量子色动力学并没有放在一起，而是分别属于第七和第九个问题的。

然而，另外一些一流的物理学家却抱着更加雄心勃勃的指望。例如，与外因伯和萨拉姆齐名的格拉肖，在 1979 年的诺贝尔物理奖受奖演讲里是这样说的：“今天我们已经有了一个基本粒子物理的‘标准理论’……”“我们粒子物理的……图像的一部分是弱电作用的统一……，另一部分是夸克假设……，还有一部分是量子色动

力学发展成为一种有预测能力的有效的强作用理论……"[9] 如果说在那段时间里人们对 QCD 正怀着美好的憧憬的话，二十年后的 1998 年，在已经表明 QCD 的"预测能力"并没有当初想象的那么强的时候，外因伯仍然这样讲："电弱理论和量子色动力学一起构成了所谓的标准模型。"(文献[4]，187 页)

我们觉得，把电弱模型同量子色动力学都纳入"标准理论"的说法不免有点夸张。虽然两者都以局域规范场方法和带颜色的夸克模型为基础，但所采用的对称群和要解决的问题都是不一样的，并且两者之间并没有什么实质性的关联。不过，这也许反映了有一些研究者急切地想要在趋向统一理论的道路上发起冲刺的愿望。

从上面所讲内容可看到，电弱模型的对称群 $SU(2)\otimes U(1)$ 和量子色动力学的对称群 $SU_c(3)$ 之间，并没有任何的交叠，甚至亦没有发生任何形式的混合。从这个角度看，硬把它们拉在一起是没有什么说服力的。真正跨出把电磁作用、弱作用和强作用统一起来的真正一步，是在外因伯-萨拉姆模型取得成功之后不久提出来的所谓"大统一理论"(Grand Unified Theory，简称 GUT)。

大统一理论的基本思想是要找到一个能够容纳上述描写强作用的 $SU_c(3)$ 和描写电弱作用的 $SU(2)\otimes U(1)$ 这两个群的直积 $SU_c(3)\otimes SU(2)\otimes U(1)$ 的一个较大的非直积对称群，以便构造一个这三种基本相互作用统一起来的规范理论。大统一理论可以选取一些不同的对称群方案，其中最简单的也是最有代表性的是 SU(5) 方案，它是格拉肖和乔治(H. M. Georgi，1947—)在 1974 年最先提出来的。我们以下只讨论这种理论方案的大意和主要结果。

在以往的种种内部对称性理论里，按照对称群的不可约表示安排了各种重子多重态、介子多重态和轻子多重态。而 GUT 开始打破了这种格局。例如在 SU(5) 的基本表示里，同时安排了轻

子和几种颜色的夸克。既然要统一地描写强相互作用和弱相互作用，这种安排是不可避免的。在 SU(5)方案里，只有唯一的一个耦合常数，统一地描写三种相互作用的强度。

然而，实际上我们观察到的三种相互作用的强度又相差甚远。这是为什么呢？理论上的解释是真正的大统一只在超高能量($>10^{15}$ GeV)的区域上才得以实现。或者说，从宇宙学的角度看，在大爆炸初期的超高温状态中，这三种基本相互作用的强度都是一样的。在大爆炸之后宇宙逐渐冷却的过程中，三种相互作用逐渐分化开来，最后形成现在这种有强有弱的局面。这种相互作用的分化又是同各种粒子和物质的生成过程相伴随的。所以，GUT 在早期宇宙演化问题上有重要的应用。

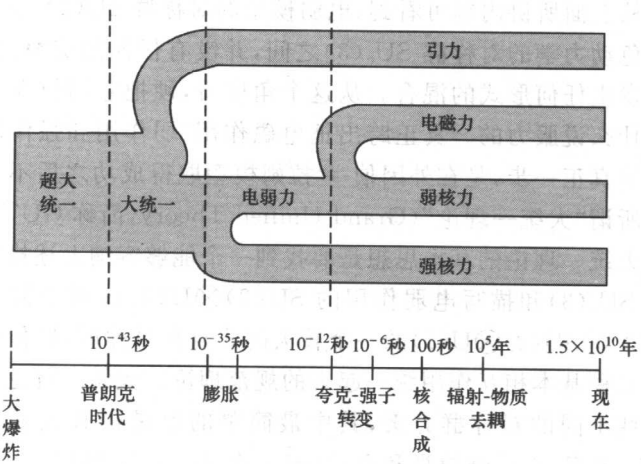


图 8.11 四种基本相互作用在不同的能量尺度处趋向统一

对于我们今日地面上的物理学，GUT 的主要成果是预言了外因伯角的数值 $\sin^2\theta_W=3/8$。虽然这一结果距离观察值还有一段距离，但经过理论上的修正，特别在与下文将要谈到的超对称性结合之后，亦能够得到与实验值大致符合的结果。这才是真正把

弱作用的电磁作用统一起来的关键所在。此外，GUT 可以给出粒子电荷量子化的解释，例如为什么质子和电子的电荷刚好相反的原因。

可是，有所得必有所失。GUT 既然把夸克和轻子放到了同一个多重态，重子数 B 和轻子数 L 自然就不再守恒。因此，大统一的代价就是物质失去了稳定性，原来认为绝对稳定的质子也会衰变。例如，按照 GUT，一定会出现 $p \longrightarrow e^+ + \pi^0$ 的衰变过程。在 SU(5)方案的 24 个规范粒子之中，包含了 QCD 的 8 个胶子以及电弱模型里的 4 个规范粒子，剩下来的 12 个规范粒子，就是命名为 X 的一些额外的规范粒子，它们负责着夸克和轻子之间的转变。正是由于这些 X 粒子的存在，使得重子可以衰变为轻子。

于是，在 20 世纪 70 年代后期，在几个国家里兴起了实验上探测质子衰变的一股热潮。上述 GUT 方案预言的质子寿命约为 $10^{29} \sim 10^{30}$ 年，当然不可能通过守候单个质子的衰变来测定。（我们所在的宇宙亦只有大约 10^{10} 年的历史。）但如果使用大量的氢原子，例如上千吨的水，约莫有 10^{32} 个氢原子，就可望在一年里观察到可观的质子衰变的事件。为了避免宇宙辐射的干扰，实验是在地下深处进行的，测得的质子寿命下限为 10^{31} 年，比上述预言长得多。这一结果被认为是 GUT、起码是上述 GUT 模型的致命伤。

查阅新近的《粒子物理总汇》[8]里面的数据，就可以发现除了按照传统做法列出了实验上确认了的各种粒子的数据之外，还列出一些理论上认为应当存在而实验上未曾发现的粒子。例如“希格斯粒子”和“轴子”(axion)；甚至还有理论上并没有预言其存在的“重的带电轻子”，“重的中性轻子”，“第四代夸克”和“自由夸克”等等。而且在上面这些粒子的条目标题上都注明了 searches 或者 searches for 的字样，表示正在寻找之中。

我们不禁要问，这样做是不是太不严肃了。从一百年前开始，每一种新粒子的发现，都是要经过实验确认的。实验上没有发现

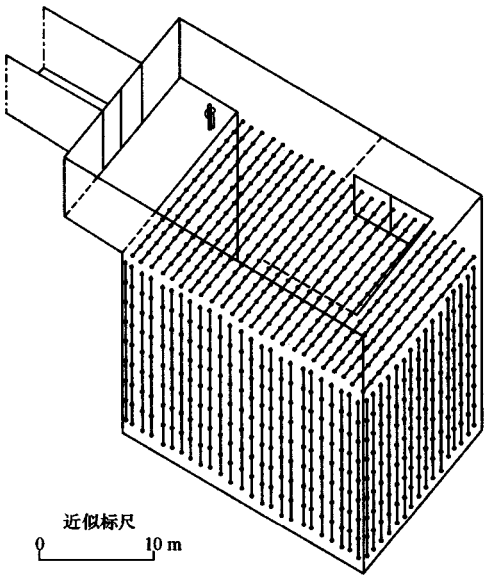


图 8.12 探测质子衰变的一种装置。它设在地下约 570 米深的一个废矿内，注入近万吨水，使用了两千多只光电倍增管

的对象是不能够列进核素表和基本粒子表的。而且，化学里的原子周期表中不可能写上未发现的新元素；生物学里的动物志和植物志里，也是不可能写上没有确切证据的新物种的。物理学怎么变成这个样子了？试想一下，如果物理学的这种做法合乎科学规范的话，是不是也可以在我国的动物志里写上“神农架野人，searches for”，“喜马拉雅雪人，searches for”，“天池怪兽，searches for”等条目；还有国外的“北美大脚怪，searches for”，“尼斯湖怪兽，searches for”等等呢？

8.3　从超对称、超弦到 M 理论

上一节里面讲到的部分子模型，袋模型，量子色动力学和大统一理论，都是在弱电模型取得成功的先后几年，亦即在 1970 年前后的几年内提出来的。那真是基本粒子理论模型像雨后春笋似地蓬勃生长的一个黄金年代。现在我们要讲的是在那个年代里提出来的最后一项重要的新进展——超对称性(supersymmetry)。

迄今为止，在我们所讲到的一切内禀对称性里，由相应对称群的不可约表示描写的每一个多重态的各个粒子的自旋都是相同的。例如在最早的味 $SU_f(3)$ 八重法里的自旋量子数分别为 1/2 和 3/2 的重子多重态，自旋为零的赝标量介子多重态，自旋为 1 的矢量介子多重态等等。而在那之后不久提出来的、包含了 $SU_f(3)$ 和描写自旋的 SU(2) 的 SU(6) 对称性的超多重态里，每一个 $SU_f(3)$ 多重态的自旋量子数也是完全一样的。

超对称性的基本思想就是要打破这种限制，在一个多重态里安排一些自旋量子数不同的粒子，特别是自旋量子数相差 1/2 的粒子。于是，在这种安排里，整数自旋和半整数自旋的粒子，或者说玻色子和费米子共处于一个超多重态里面。并且，这些玻色子和费米子是配对出现的，两者具有相同的质量值。

然而，自然界里不曾发现过存在着这样配对的玻色子和费米子。所以这些伴侣粒子都是一些假想的粒子。例如，与光子配对的是称为“光微子”(photino)的一种自旋为 1/2 的费米子。其他规范粒子如：胶子有它的伴侣“胶微子”(gluino)；W 和 Z 弱玻色子有伴侣“W 微子”(wino)和“Z 微子”(zino)等等。这些没有发现的伴侣粒子的名称显然是对中微子(neutrino)的模仿。相似地，电子亦有其自旋为零的伴侣粒子“超电子”(superelectron)；与中微子和夸克配对的自旋为零的伴侣粒子则被称为“超中微子”(su-

perneutrino)和“超夸克”(superquark)。这样一来,粒子的数目一下子就加了倍。而且,至今在实验上没有发现任何一种这样的伴侣粒子的存在。当然,人们可以说其中的原因是这些粒子的质量非常之高,现在还无法观察到。

不仅如此,在现今可以利用的能量尺度内,还没有任何清楚无误的实验结果支持超对称性的预言。然而,人们希望超对称性在能量更高的区域、例如 TeV 尺度内严格成立,为粒子质量的分裂和对称性的分化等现象给出更深刻的理论说明。

所以,超对称性理论的当前用途不在于对现时的实验结果作出预言,而是可能具有更基本的意义。我们讲过,自旋是物理学里第一个内禀变量,但它仍然处在普通的时间-空间里。因此,不同自旋粒子的这种配对关系,必然有助于我们对空时对称性质的深入了解。特别是,当超对称性从早期的整体对称性发展到局域对称性,即是说它同标准模型以及 QCD 结合而成为一种规范理论之后,会有利于消除原来理论中的一些困难以及找到不同的对称性分化开来的原因。

此外,在超对称性这种不同自旋的组合中,自然会出现自旋量子数为 2 的规范粒子,给迄今我们还没有提到的引力相互作用提供了理论上的可能性。这是因为,与电磁波的基本振动模式是偶极振动不同,引力波的基本振动模式是四极振动,与此相适应,引力波的量子——引力子(graviton)是自旋量子数为 2 的粒子。在超对称性理论里,引力子也有一种称为“引力微子”(gravitino)的、自旋量子数为 2/3 的伴侣粒子。虽然我们在本书里不准备展开对引力作用和相关的宇宙学问题的详细讨论,但是物理学家们在已经有希望把强作用、电磁作用和弱作用统一起来的时候,必然要追求一种把剩下来的最后一种基本相互作用——引力相互作用也包揽进来的超级统一理论。所以,在下文里将要讲到的超弦理论和 M 理论,都是包含了超对称性的“超”字开头的统一理论。

弦理论(string theory)或者简称“弦论”的基本思想，是把基本粒子看做是一根根微小弦线的本征振动状态，而不是在“场论”那里的点粒子。最早提出弦论模型的是南部阳一郎，尼尔森(H. Nielsen)和苏斯金(L. Susskind)。他们在1970年发现，如果用微小弦线的振动模式来模拟基本粒子，它们之间的强相互作用就可以用两百年前欧拉建立的β函数精确描写。因为这些弦线非常微小，所以它们远看起来仍然像是一些点粒子。

这种初步的弦模型取得了一定的成功，但亦有严重的不足之处。并且，那几年正是QCD初创的时期，它一度被认为是强作用理论的最有希望的候选者，弦论没有引起太多的注意。1974年施瓦兹(M. Schwartz, 1932—)等和谢尔克(J. Scherk)亦认识到了，弦的振动模式自然会出现自旋量子数为2的矢量粒子，适宜于描写传递引力的“引力子”。因此，弦论不单是强相互作用，而且亦可能由此建造出一种包含了引力相互作用的量子理论。1977年，又发现了弦论可以包含超对称性，从而成为一种把两者结合起来的“超弦”理论。

直到1984年，情况才发生根本性的变化。在那一年里格林(M. Green)和施瓦兹证明了超弦理论有足够的能力容纳全部四种基本相互作用，而不会产生冲突。于是，弦论进入了被称为“第一次超弦革命”的第一个高潮时期，取得了一批出乎人们意料之外的重要成果。

除了包含了超对称性之外，超弦理论的“超”还体现在它是在一种“超空间”中展开的。这里讲的超空间指的是超出普通的三维空间和一维时间，即普通“空时”之外的高维空间。早在1919年，卡鲁扎(T. Kaluza)就提出过一种五维空间的理论，试图对爱因斯坦在四维空时里的引力理论中增添位置容纳四维电磁势的第五维空间，把它同麦克斯韦的电磁学理论统一起来。1926年，克莱因在改进这种五维的统一场论的同时，设想确实存在着多出来的第

五维空间，不过它没有像普通的空时那样伸展开来，而是在每一个空时坐标点处卷缩起来。克莱因考虑了量子化条件，估计卷缩起来的第五维空间的尺度只有大约 10^{-30} 厘米，确实微小到远远超出我们的直接观察的能力。虽然那种朴素的五维空间的统一场理论没有取得成功，但这种高维空间"卷缩"的概念却在半个世纪之后的超弦理论里复活了。

举一个浅显的譬喻。如果把一条洗脸的毛巾铺平，那么离远看它像就是一块二维平面。但在近处观察，却可以看到在每一个经线和纬线的交汇点上，都挂着一个小小的线圈。这些线圈就可以当做是卷缩起来的第三维空间。我们将会看到，卷缩起来的高维空间虽然不直接参加在普通空时里的运动，它的几何构造却可以决定着另外的一些物理性质，例如内禀空间的对称性质和参加各种相互作用的性质。

具体说来，起初的超弦理论是在十维空间中实现的。除了伸展开来的三维空间和一维时间之外，其余六维都形成在各个四维空时坐标点上卷缩起来的一些封闭的几何体。这种卷缩的尺度的数量级接近于所谓"普朗克长度"，它的定义是（h 是普朗克常数，G 是引力常数，c 是光速）

$$\sqrt{hG/c^3} \approx 1.6 \times 10^{-33} \text{ 厘米}$$

一般认为，这一尺度是通常的空间概念保持有效的极限。

弦论的基本假设是，基本粒子的性质是由弦的不同振动模式决定的，不同的粒子实际上表现为在作为基本单元的同一根弦上奏出的不同音调。这就有点像回到了毕泰戈拉的"万物皆数"或者他基于琴弦长度而发展起来的音律学说了。不过，超弦不仅仅是在普通空间中振动着，它的这种振动还受到卷缩着的多维空间的几何结构的制约。例如，粒子的质量和电荷以及其他描写相互作用性质的轻子数、重子数、奇异数、同位旋等等，都是由这些卷缩着的多维几何体的构形决定的。于是，过去认为互不相干的普通空

时和内禀空间，在弦论里则在高维空间中统一起来了。

不仅如此，甚至存在有几个世代的夸克等等，也是由这些卷缩几何体的拓扑性质（它上面有几个贯穿的孔洞以及这些孔洞的穿插性质）决定的。虽然现在还不能够准确地求出这些问题的解，但亦找到了一些几何模型，可以得到非常接近于标准的电弱模型和量子色动力学所需要的各种粒子，而且成功地将引力也归入了量子力学的框架。

面对着这些揭示了更深层意义的料想不到的进展，过去一度怀疑甚至排斥弦论的一些著名的理论物理学家逐渐改变了态度。例如，格拉肖在 1997 年回忆道，在 80 年代中期，“弦理论家们曾经狂热而野心勃勃地宣布他们将很快回答物理学的所有问题。现在他们谨慎多了。我在 80 年代的许多批评都没有意义了。”他又说，“我们这些不是弦理论家的人在最近十年里没有什么进展……有许多问题明显不能在量子场论的框架中解决……它们可能由别的东西解决，而据我所知，那东西就是弦论。”[10]

当然，弦论还不是一种已臻成熟的理论。它还没有建立一套精确的数学方程，对于一些特定的模型也只能给出一些近似解。特别是，根据一些基本的要求，包含局域超对称性的超弦理论可以采取五种不同的形式。我们在这里只限于写出这五种数学模型的名称：Ⅰ型，ⅡA 型，ⅡB 型，杂化 O(32)型和杂化 $E_8 \times E_8$ 型。它们的结论除了共同点外，亦存在着巨大的差别。那么怎么样来决定在这五种模型之间的取舍呢？

1995 年又迈出了重要的一步。在那一年里威滕（E. Witten，1951—）指出，五种超弦模型尽管看起来具有不同的基本结构，但可以从一种更加广泛的理论推演出来。而且，新理论真正需要的空间要在原来的十维之外再加到十一维，其中包含了普通的四维空时和卷缩起来的七维内禀空间。新理论还可以包含一种十一维的超引力理论。或者说，那五种超弦模型和新加入的十一维超引

力模型都是这种新理论在不同的情况下的近似。于是，弦论进入了被称为“第二次超弦革命”的又一个高潮。



图 8.13 威滕(E. Witten, 1951—)

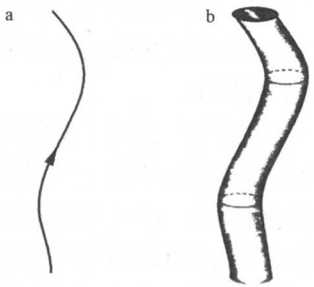


图 8.14 点粒子的移动路径是线状的(a)，弦圈的移动路径是管状的(b)

威滕把这种在弦论的基础上发展起来的十一维空间理论叫做“M 理论”。这里的 M 可以读成 Membrane(膜)，Magic(魔幻)，或者 Mystery(秘密)；恰好这几个汉语译名的拼音也是以字母 m 打头的。在这种理论里，基本的单元可以是一维的弦线，也可以是二维的膜，例如从一维的弦圈延伸而成的二维柱面，或者形状像一个手镯那样的闭合环面。它还可以是像液滴那样的三维的“团块”。这些弦圈、柱面、环面和团块，都可以进行不同模式的振动，给出各种粒子的状态。

回顾在发现核裂变之初，物理学家已经提出过“液滴模型”，用液体团块的某种模式的振动的激发来模拟重核的自发分裂。现在，我们在 M 理论里亦可以找到各种乐器的振动模式。例如弦乐器靠的是弦线的振动，钟和鼓等靠的是膜片的振动，而古时的磬和木鱼以及现代的木琴和马林巴等则靠的是团块的振动。四百年前开普勒把寥阔天空中行星的运动看做是“天界的和声”，如今的弦

理论家们又把最微细的物质粒子看做是弦线、膜片和团块的振动。

我们在这一节里不可能详细介绍弦理论和 M 理论的动力学基本要素，只限于再讲一讲有关空间概念的两个问题。按照这种理论，甚至连我们在其中生活的三维空间和一维时间，也是从卷缩着的高维几何体生长出来的。可以设想，在我们今天的宇宙创生之初的大爆炸开始的那一刻，所有十一维空间都是卷缩在一起的，那就是发生大爆炸的原点。那是一个所有弦或者膜之间的相互作用极为强烈，量子涨落效应亦极为剧烈的环境，是广义相对论和量子力学的效应都占着主导地位的一个温度极高的大熔炉。由于在这个熔炉里面，到处发生着弦或者膜的随机碰撞，就有可能在一些维度的空间里发生激烈的涨落甚至突破，其结果使得有三维空间和一维时间挣脱束缚而伸展开来，成为我们宇宙形成的摇篮，发展出世上万物驰骋的一个大舞台；而其余七维空间则在随后的膨胀和冷却的环境中，保持着原来的卷缩形态，成为决定着各种粒子性质的内禀空间。[11]

同这个问题密切相关的是，舍弃了点粒子模型的弦论或者 M 理论，必然有利于消除原来量子场论里的发散困难，尽管还没有能够恰当地解决引力量子化这个难题。我们可以通过经典电磁学的对比来说明一下。从基础物理学里知道，一个没有空间大小的点电荷，它在其附近所产生的静电势，在接近点电荷处是库仑发散的；一根有限长度的均匀带电的直线，它在其附近所产生的静电势，在接近这条直线处是对数发散的；但是，一块均匀带电的平面，它在其附近所产生的静电势，在接近这个平面处是有限而不发散的。所以，新的理论会有助于克服量子场论里的发散困难，就不难得到理解了。

“第二次超弦革命”的主将威滕这样说过：“弦理论包容着我们关于空间-时间的概念和在物理学基本概念里的一种根本变革的种子。”[12]他又说：“几十年来理论物理学里分隔甚远的一些论题，

新近已经汇聚成为一个单一理论的几个部分了。结果得到的就是现在依然神秘莫测的'M 理论',它将会改变我们对量子力学所起作用的理解。"[13]

也许有读者会问,弦论或者 M 理论里的弦线或者膜片,它们是一种更深层次物质构造的实体呢,抑或仅仅是一些数学结构?我们觉得现在回答这个问题为时尚早。在我们这本书的前面几章里说过,物理学家们要承认原子或者其他实体是一种物质组分,是需要取得实验上的证据的,哪怕是探测夸克在强子中的存在,以及通过双星系统的辐射阻尼来探测引力波那样的间接证据。目前物理学家们的希望只是能够在不远的将来能够从更高能量范围的实验证实超对称性的一些预言。至于极其微细的弦似乎离我们的观测能力太遥远了。它们是不是"物质无限可分"的又一个新的层次,还没有什么确实的证据。这不是光靠信念就可以解决的一个问题,不然就有滑入以为观念决定一切的危险了。要知道,"唯心主义"(idealism)本来就是"观念"(ideal)至上的意思哩。

最后还是引用威滕的一句话作为本节的结束:"认识 M 理论究竟是什么——它的物理表现是什么——至少会像历史上的任何一次伟大的科学变革一样,极大地改变我们对自然界的认识。"(转引自文献[10],305 页)

8.4 量子物理学和经典物理学的统一[14]

量子力学已经有八十年的历史了,关于量子力学解释的争论,从来没有停息过。在这方面,人们津津乐道的是玻尔和爱因斯坦两位大师之间尖锐对立的论辩。虽然他们离世已有四五十年了,那仍然是研究者们喜欢反复讨论的话题。不过,大多数物理学家并不清楚其中的细节,常常满足于在他们的谈论里引用一些简单化的结论。其实,玻尔和爱因斯坦都在不同的方面和在不同的程

度上，企图运用经典物理学的概念去理解或者说明量子力学的基本原理。在这方面，他们两人虽然各有得失，但总体说来，不过只是“五十步笑百步”而已[15]。

大部分物理学家不太关心这方面的争论是因为，长期以来，包括 EPR 论证，互补原理，薛定谔猫和隐变量理论这一类的争论，似乎只是一些对他们日常从事的工作没有什么关系，将来亦不会落到实处的空谈而已。

20 世纪 60 年代初，贝尔(J. S. Bell，1928—1990)出人意料地在这方面取得了突破，发表了能够通过实验来检验关于量子力学基本问题的争论谁是谁非的“贝尔不等式”。从那时起的两个十年内，成功地进行了一批专门设计的实验，明确地支持量子力学的普遍有效性，而不利于爱因斯坦在“EPR 论证”里提出的“定域实在性”判据。[16]一时间，舆论好像完全倒在了玻尔一边。

那时候快要接近世纪之末了。人们已经把下一步进展的希望目光，投向了未来的世纪。然而，就在 20 世纪最后的十多年里，又异军突起地冒出了量子力学的一种新解释，即“多历史解释”或者称为“消干历史方法”(decohering histories approach)。这种新解释是在消干效应(decoherence effect)[14]研究的基础上建立起来的，它使得玻尔关于必须先有经典物理学理论才能够有量子理论，必须依靠经典物理学的概念才能够理解量子力学的基本观点变得完全过时了。

例如，1992 年，霍尔甘(J. Horgan)在《科学美国人》上发表了一篇题为“量子革命”的文章，其中说道：“虽然多世界解释[下文将要谈到]长期以来被当做更像是科学幻想而不是科学本身而受到了冷淡的对待，但新近盖尔曼和他的合作者以一种改进了的形式而使这一解释复活了。他们称呼其理论为多历史解释，并且强调那些历史只是‘潜在’的，而不是在物理上实现了的。据说盖尔曼曾预言道，到 20 世纪末时，这种观点将在这一领域内占据支配的

地位。”[17]

实际上，盖尔曼早在 1979 年就说过：“[量子力学的]一种适当的哲学描述竟被推迟了这么久的这一事实，无疑是由于玻尔对整整一代物理学家洗了脑(brainwashed)，使他们以为这一任务早在五十年前已经完成了的缘故。”[18] 显然，在盖尔曼看来，从总体上说，玻尔对于量子力学的正确理解，不是起到积极促进的而是起到消极阻碍的作用。

盖尔曼在 1994 年出版了一本《夸克和美洲豹》[19]，该书第 11 章“量子力学的当代观”，讲的就是他所参与建立的量子力学新解释。而这一章的最后一句话又是这样写的：“我们在努力建构量子力学的现代诠释的目的，是想终止玻尔所说的时代。玻尔曾经说：‘如果一个人说他可以思考量子物理学而不会感到迷惑，这不过说明他一点也不懂量子物理学。’”

按照盖尔曼在这一章里的叙述，量子力学的这种新解释继承了费曼创立的路径积分方法里运用空间-时间中的历史来表述量子力学的做法；亦发扬了在埃弗里特(H. Everett Ⅲ)提出的多世界解释里，物理世界有多种可能选择的思想。

在费曼的路径积分方法里，作用量为 S 的系统，从初态到末态的跃迁振幅，等于对从初态到末态的所有可能路径的、以 $S/\hbar$ 为相位的某种相位因子之和。一方面，这种求和或者积分是在整个空间-时间中进行的，所以无疑是一种空时描述。事实上，1948 年，费曼为此正式发表的第一篇文章取名为“非相对论性量子力学的空间-时间方法”，就鲜明地表示了他的这种立场。另一方面，费曼亦证明了，从他的路径积分可以推导出薛定谔方程，所以这也肯定是一种因果联系。其实，从路径积分可以直接算出跃迁振幅，不仅可以用来代替薛定谔方程的功效，而且在有些情况下(例如规范场论或者量子引力理论)，表现出它的适用性比后者更加普遍。

回顾玻尔在 1927 年在著名的《科莫演讲》里第一次讲到“互

补”这个字眼时的原话是：“量子理论的本性使我们不得不把空时标示(space-time coordination)和因果要求(claim of causality)这两种作为不同经典理论表征的联合，看做是描述的互补而又互斥的两个特征，它们分别代表着观察和定义的理想化。”[20]

由此可见，费曼创立的“路径积分”，实际上已经从根本上否定了玻尔关于对微观对象不可能同时给出空时标示和因果描述的“互补原理”[21]。要注意的是，一方面，路径积分里的空时标示，当然不是经典力学里的空时标示。费曼讲的路径，也不是经典力学里的质点轨道。因为，经典轨道是在空间-时间中画出的一条确定不疑的轨迹，它本身就是理论计算的结果；而费曼的路径则只是一些可能的途径，计算中要对它们的全体进行求和(积分)，将所有部分振幅叠加起来，所得到的总振幅才是真正的结果。另一方面，路径积分里的因果描述，当然也不是经典力学里的因果描述。因为，后者对应的是为坐标或者动量等具体物理量而设的牛顿运动方程，而前者对应的则是与其完全不同的、为前所未闻的概率幅而设的薛定谔方程。总之，费曼的路径积分，实质上是一种历史性的描写。不过，它描写的不是系统经历的一种真实的历史，而是各种可能历史的振幅的叠加。

1957 年，埃弗里特提出“相对态表述”，后来称为“多世界(many world)解释”。在这种解释里，为了调和系统演化的连续性和测量过程的突然跳跃这两个方面的矛盾，认为在某一测量结果实现的同时，也实现了其他所有可能的测量结果。因为，在这一瞬间，同原来状态对应的一个世界，分裂成多个同被测量变量的各个本征态相对应的那么多世界，每一个世界对应着一个可能的测量结果。在这里没有波函数的坍缩，而只有世界的分裂。每一个世界都是同样真实的。我们之所以看到某一个测量结果，是因为我们正好生活在同这一观察结果相对应的世界里。在其他的世界，对应着其他的测量结果，只不过我们看不到就是了。

多世界解释免除了经典物理学的观察装置和系统外部的观察者的需要，以便于处理整个宇宙的量子状态。但那些原则上不可观察的许多个其余宇宙的存在，亦引起了激烈的争论。后来，按照盖尔曼的做法，把“多世界”改造成“多种宇宙可选择的历史”，“即一个给定的系统可以有不同的历史，每一种宇宙历史有它自己的概率；没有必要使人们心神不安地去接受都具有相同真实性的多个‘平行的宇宙’。”这样就继承了多世界解释里的合理内容[19]。

值得指出的是，费曼和埃弗里特两人在开始做以上所讲的工作的时候，先后都是惠勒（J. A. Wheeler，1911—）的研究生，并且都得到了后者的大力支持。而且，在费曼起初做的电磁理论模型里，还按照惠勒的建议，采用了一部分超前解。惠勒没有因为超前解不满足因果律就不准费曼使用，也没有因为存在着许多原则上不可观察的世界而不许埃弗里特毕业。惠勒这种充分解放思想的态度，给他的学生们以极大的鼓励，终于做出了一个又一个惊人的贡献。



图 8.15 惠勒(J. A. Wheeler，1911—)

后来，在费曼的量子场论里不再含有古怪的超前解，而在盖尔曼的量子力学新解释中，亦不存在一个以上的真实世界。科学研究本来就应该允许大胆的探索，开始的时候完全不应当有什么顾忌。一个成功的理论在深入演进的过程中，自然会剔除表面上看起来是荒唐的成分，发展其中合理的核心内容。费曼这样说过：“事实上，科学真正存在所必需的，是在思想上不承认自然界必须满足像我们的哲学家所主张的那些先入为主的要求。”[22]费曼一系列开创性的研究成果，就是他这句话的一个极好注解。

按照费曼的观点，量子力学与经典物理学之间最重要的区别

在于，量子力学遵从的是用态函数或者跃迁振幅表示的概率幅度的叠加规则，而经典物理学则服从概率叠加的规则。换句话说，在量子力学里存在着概率幅之间的干涉，而经典物理学里则不存在这样的干涉项。

简单地说，消干效应指一个量子物理学系统，由于与其环境不可避免的相互作用，使得系统所处的、由某个观察量的多个本征态相干叠加而成的状态，不可逆地消去了各个干涉项，使系统的行为表现得就像经典物理学系统一样。

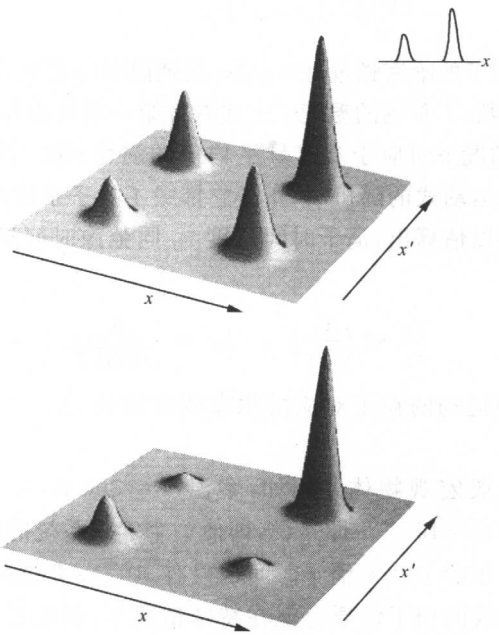


图 8.16　消干效应示意图。由一大一小的两个波包构成的量子系统，由于与环境的不可避免的涨落的影响，消去了干涉项，表现为经典系统

要指出的是，上面所说的量子系统，实际上就是任意的物理系统，不仅包括微观对象，而且还包括宏观对象，甚至整个宇宙那样

的系统。这里采取冯诺意曼的观点，认为宏观系统亦能够用量子力学描写，都可以用薛定谔方程求解它的演化过程。

在一个便于计算的模型里，把环境看做由大量谐振子组成，并且化成一个等效的标量场。设在坐标表象里，在标量场里运动的、质量为 m 的粒子的密度矩阵为 $\rho(x,x')$，从路径积分等方法可以推演出它的演化方程（主方程）

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{i}}{\hbar}[H,\rho]-\gamma(x-x')\left(\frac{\partial\rho}{\partial x}-\frac{\partial\rho}{\partial x'}\right)$$
$$-\frac{2m\gamma kT}{\hbar^2}(x-x')^2\rho$$

式中 H 是粒子的哈密顿量，$\gamma=\eta/2m$ 是弛豫率（η 是黏性系数），k 是玻尔兹曼常数，T 是场的温度。上式右方第一项可由薛定谔方程导出，在经典情况下对应于观察量平均值的演化；第二项是耗散项；末项是布朗运动式的随机项，正是它摧毁了量子系统的相干性。

由此可以估算出，消干时间尺度 τ_{D} 同弛豫时间尺度 $\tau_{\mathrm{R}}=1/\gamma$ 的比率为

$$\frac{\tau_{\mathrm{D}}}{\tau_{\mathrm{R}}}\approx\left(\frac{\lambda_{\mathrm{T}}}{\Delta x}\right)^2,\quad \lambda_{\mathrm{T}}=\frac{\hbar}{\sqrt{2mkT}}$$

λ_{T} 是同做热运动的粒子对应的德布罗意波长，Δx 是坐标变化的分布宽度。

对于一般宏观物体。例如：室温 $T\approx300$ K，$m\approx1$ g，$\Delta x\approx1$ cm，有 $\tau_{\mathrm{D}}/\tau_{\mathrm{R}}\approx10^{-40}$。即是说，即使一个宏观系统的弛豫时间 τ_{R} 相当于宇宙年龄 10^{17} s，消干时间也只有 10^{-23} s 那么短，事实上不可能建立有效的相干性质。但在特殊情况下，例如低温（10^{-3} K）下的韦伯型引力波天线，$\Delta x\approx10^{-19}$ cm，$m\approx100$ kg，消干过程会变得很缓慢（$\tau_{\mathrm{D}}/\tau_{\mathrm{R}}\approx10^{-2}$），必须当成量子振子看待。对于一个电子，$m\approx10^{-27}$ g，在原子（$\Delta x\approx10^{-8}$ cm）尺度上下必须用量子力学描写。[23]

从上面简略的介绍已经可以看出：首先，消干效应一般涉及到的，不是像能级跃迁那样的状态改变，而只是各个本征态之间干涉项的消失。其次，消干效应不是像弛豫、耗散一类的热学效应。因为，那些效应是由上述方程右方第二项引起的，而消干效应则属于最后一项。这一项对应着布朗运动式的随机涨落，它导致的结果是不能够用统计物理学的系综平均方法算出来的。因此，消干效应的机制，有别于过去惯用的能量-动量机制。例如，过去认为在粒子束实验里，在一定条件下干涉条纹的消失是由于粒子的能量-动量受到了干扰。现在已经证实，一般说来，这是不能用能量-动量分析来说明的一种更微妙的效应。

长期以来消干机制没有受到重视，其中有两个主要原因。一个是哥本哈根解释的消极影响，使人们误以为遵循玻尔的教条就能够在原则上解决量子力学的一切问题。另一个原因是从近代物理学诞生时起建立的许多模型，都在一定程度上设想宏观系统是可以近似地看做同环境隔绝的。的确，过去从能量-动量的角度看，认为微观系统是娇气的，经不起外界的一点扰动。现在，从消干效应的角度看，反过来认识到宏观系统才是真正娇气的，它们在一瞬间就会丧失了量子相干的性质。

消干方法的成果，去除了以往在量子力学的“测量理论”，以及“量子跳跃”，“主体和客体不可分”等问题上的神秘色彩。现在我们知道，消干效应是在一段或长或短的时间里发生的过程，不存在什么不可分析、不可约简和非因果性的量子跳跃，也不需要在薛定谔方程之外再加上波函数坍缩的假设。消干效应是自然发生的，根本不需要观察者的主观介入。我们在测量中看到的微观对象的粒子性和测量结果的经典性质等结果，乃是由消干过程产生出来的，没有根据说在此之前就存在着那样的性质。

量子力学新解释的主要思想，是在 80 年代中期开始的几年之内，分别由几组作者从不同的角度提出来的。其中最早是格里费

斯(R. B. Griffiths)在 1984 年提出的“一致性历史解释”。另外两组独立的作者是奥姆内(R. Omnès)以及盖尔曼和他的合作者哈特(J. Hartle)。现在已经弄清楚,这几位作者提出的解释,尽管起初出发考虑的角度有差别,在基本精神上却是相同的,这一点也得到了他们自己的认同。例如,奥姆内在 1995 年是这样说的[24]:“目前在一些地方研究着量子力学的一种新近的解释;它有几种不同的名称:一致性历史解释,消干历史解释或者逻辑解释,并且已经使得量子力学的解释成为一种标准的演绎性理论。这种新解释同哥本哈根解释不同的关键之处在于,如今经典物理学的事态在动力学和逻辑学的两个方面,都完全由量子原理推导出来。……新的解释在认识论方面的结论,与哥本哈根解释的结论相距甚远……”

按照祖瑞克(W. H. Zurek)[25]、盖尔曼等人提出的新解释,是在多世界解释的基础之上,加进了三种关键性的机制:一个量子系统有多组可选择的粗粒历史的概念;在选定的一组历史内的消干效应;和趋向经典极限的近似决定性。

粗粒历史(coarse-grained history)的意思是,一个量子系统有许多自由度,它们的全部对应着一种精粒历史(fine-grained history)。我们在前面讲的消干效应里所涉及到的一个或者少数个观察量,只占了系统的一小部分自由度。在消干效应的理论模型里,要对精粒历史里面所有没有涉及的自由度求和或者平均。于是,我们所能见到的就只是一种粗粒历史。所谓可选择的历史,就是多种不同历史都有各自的实现概率的意思。

按照盖尔曼的说明,精粒历史之间的干涉一般不会消失,因此得不到相应的概率描写。而通过消干机制,可以使得粗粒历史之间的干涉项消失。或者说,是随机发生的涨落使历史产生分岔。那么,一系列由于消干效应而先后选择了的粗粒历史,就构成了系统的一组“消干历史”。原则上别样的历史也有一定的发生的概

率，但我们观察到的只是其中的一种[19]。

当然，我们这里用几句话所勾画的，只是一幅过分简化的速写。实际上，按照奥姆内，在这个过程中的各个阶段，系统要经受发生在不同时刻的一系列特定的限定。这些限定只是潜在的而不是在物理上实现了的，因此所研究的只是一些可能发生的事件；这一系列"可能事件"又必须满足"一致性"的要求，这也就是"一致性历史"的意思。并且，这里所做的一般性说明，还不一定是已经确立无疑的普遍原理，而大都是通过一些具体模型得出的结论。

大家知道，量子力学的哥本哈根解释的主要对立面，是主张量子力学的理论预言一般只是对多次重复的观察结果而言的统计解释或者叫做系综解释（参看文献[15]和[16]）。盖尔曼认为，从新的观点看来，那种统计解释并没有错，但是它依赖于一位外部的观察者，所以其适用范围受到了限制，他建议把那种解释称为"被测系统的量子力学近似"。新的解释则能够描述整个宇宙的量子态，或者"多种宇宙可选择的历史"[19]。

总之，按照这种新的解释，普天之下只有一部物理学，它就是统一地描述了宏观世界和微观世界的量子力学。量子力学的概念和定律是全部物理学的基础，由此可以导出经典物理学的概念和定律。在这里完全不需要使用什么普朗克常数 $h\to 0$ 或者能级量子数 $n\to\infty$ 的"极限"近似，起到关键作用的就是消干效应。

1927 年，玻尔在《科莫演讲》里讲过："我们对于实验资料的解释在本质上是以经典概念为基础的。"他后来在回顾《科莫演讲》时又说："相信最终用一些新的观点来代替经典物理概念就可以避开原子理论的困难，那也许是一种误解。"（文献[20]，45，16 页）显然，在玻尔看来，以量子力学为主体的原子理论，必须依靠经典物理学概念，才能得到正确的理解。

后来，按照费曼等人的意见或者根据量子力学的统计解释，量子力学的基本概念是完全独立于经典物理学的[22]。试想一想，量

子力学里关于系统的状态用作为概率幅的态函数描写的规定，关于用希尔伯特空间里的算符描写动力学变量，和关于态的演化遵循薛定谔方程等基本假设，有哪一条是“以经典概念为基础”的呢？

现在，得益于盖尔曼等人的努力，我们的认识又达到了一个新阶段。量子力学的新解释反过来告诉我们，经典物理学是可以从量子力学推导出来的，只有量子力学才是物理学唯一的理论基础。也可以说，包括经典物理学的整部物理学都在量子力学的基础上统一起来了。这样一来，玻尔的那种观点，就变得完全过时了。

参 考 文 献

[1] A. Pais. Inward Bound: Of Matter and Force in the Physical World. New York: Oxford University Press, 1986；中译本：关洪、杨建邺、王自华、傅冬梅译，《基本粒子物理学史》，武汉：武汉出版社，2002，§15e，§21e。

[2] G. t'Hooft，《寻觅基元——探索物质的终极结构》，冯承天译，上海：上海科技教育出版社，2002。

[3] S. Weinberg, The making of the standard model, *Eur. Phys. J.* C34 (2004) 5.

[4] S. Weinberg, Facing Up: Science and Its Cultural Adversaries, Cambridge: Harvard University Press, 2001；中译本：《仰望苍穹——科学反击文化对手》，黄艳华、江向东译，上海：上海科技教育出版社，2004。

[5] G. Holton, On The Origins of the Special Theory of Relativity, *Am. J. Phys.* 28(1960) 627；根据另一版本的中译文，见：《纪念爱因斯坦译文集》，赵中立，许良英编，上海：上海科学技术出版社，1979，322 页。

[6] J. Mehra, The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman, Oxford U. P., 1994, chapter 23.

[7] D. Gross，物理学的未来，李斌译，《科学文化评论》，2005 年 2 卷 5 期，65 页。

[8] 由“粒子数据组”(Particle Data Group)编撰的《粒子物理总汇》(Review of Particle Physics)每双数年份在指定期刊上发表一次。详细情况可查

阅网站 http://pdg.lbl.gov。

[9] S. L. Glashow,趋向统一理论——织锦中的几根线头,译文载:《诺贝尔奖金获得者讲演集·七十年代物理学》,上海:知识出版社,1986,533—545 页。

[10] B. Greene,《宇宙的琴弦》,李泳译,长沙:湖南科学技术出版社,2002,204—209 页。

[11] 参看:关洪,《空间——从相对论到 M 理论的历史》,北京:清华大学出版社,2004,第十一章。

[12] E. Witten, Reflection on the fate of spacetime, Phys. Today, April 1996, 24.

[13] E. Witten, Duality, spacetime and quantum mechanics, Phys. Today, May 1997, 28.

[14] 本节内容是下述文章的简缩:关洪,消干效应和量子力学新解释的意义,《物理》,2002 年 31 卷 3 期,179 页。

[15] 参看:关洪,《一代神话　哥本哈根学派》,武汉:武汉出版社,2002,第 5.1 节。

[16] 参看:关洪,《量子力学的基本概念》,北京:高等教育出版社,1990。

[17] J. Horgan, Quantum philosophy, Scientific American, 267 (1992) 1, 72.

[18] 引自:D. Home, M. A. B. Whitaker, Ensemble interperetation of quantum mechanics, Physics Report, 1992, 210—223.

[19] M. Gell-Mann,《夸克与美洲豹》,杨建邺等译,长沙:湖南科学技术出版社,1998。

[20] 《尼耳斯·玻尔哲学文选》,戈革译,北京:商务印书馆,1999,46 页。

[21] 关洪,勇于向传统观念冲击的理查德·费曼,载:《三思评论·第一卷》,南昌:江西教育出版社,1999,100—105 页。

[22] R. P. Feynman, The Character of Physical Law, Cambridge: MIT Press, 1965;中译本:《物理定律的本性》,关洪译,长沙:湖南科学技术出版社,2005,155 页。

[23] 详细资料可查阅网站:www.decoherence.de。

[24] R. Omnès, Consistent interpretation of quantum mechanica, Rev.

Mod. Phys., 64(1992), 339; A new interpretation of quantum mechanics and its consequences in epistemology, Found. Phys., 25 (1995), 605.

[25] W. H. Zurek, Decoherence and the transition from quantum to classical, Physics Today, 10(1991), 36.

第九章　从物质构成论到物质生成论的演变

9.1　物质粒子是生成的而不是构成的

在第 8.4 节里讲的量子力学消干效应机制里，任何物理系统起初都是用 ψ 函数描写的，它在普通空间中一般采取弥散分布的形式，会产生作为量子力学特征的干涉效应。后来，由于系统所不可避免地受到自然环境的无规涨落的影响，经过或长或短的一段“消干时间”之后，就会丧失了相干性，变成了经典系统。按照这一机制，像在空间中的局域化的电子那样的粒子，也是发生了消干效应的结果。

于是，在消干效应的专设网站 www. decoherence. de[1] 的主页上，我们看到这样的宣言：

Decoherence...

- is a consequence of quantum theory that affects virtually all physical systems
- arises from unavoidable interaction of these systems with their natural environment
- explains why macroscopic systems *seem* to possess their familiar classical properties
  - * **No additional classical concepts are required for a consistent quantum description**

- explains why certain microscopic objects ("particles") *seem to be localized in space*
  - * **There are no particles**
- explains why macroscopic systems are usually found in their energy eigenstates (and therefore *seem* to jump between them)
  - * **There are no quantum jumps**

……

这里惊世骇俗的话语"没有粒子",指的当然不是完全不存在这种东西,而是指它们不是基本的实体,而只是消干效应的产物。换句话说,粒子不是物质世界的本原,它们是有关量子状态局域化的结果。同样,"没有量子跳跃"指的亦不是不存在这种现象,而是指量子跃迁不是玻尔所讲的不可分析和不可约简的东西,而只是可以用消干效应说明的结果。

其实,在现代物理学里,已经逐渐转向了粒子不是原来一直存在着而是在有关过程中产生的观念。例如,在外场的影响下,一个γ光子可以转化为一对电子-正电子对

$$\gamma \longrightarrow e^- + e^+$$

这就是粒子和反粒子"对产生"(pair production)的过程。这一对电子并不是原先那个γ光子的构成成分,而是在这一过程中生成的。

这种生成或者产生的语言,已经在现代物理学里有了广泛的运用。[2]

譬如,"光生"(photoproduction)过程,指的是在光子的打击下,产生出新粒子的过程。下面表示的是光生π介子的过程,即一个γ光子击中质子p,产生出核子(质子p或中子n)加上一个π介子的反应过程:

$$\gamma + p \begin{cases} \longrightarrow p + \pi^0 \\ \longrightarrow n + \pi^+ \end{cases}$$

实际上，在普通的光电效应里放出的光电子（photo-electron），也是一种“光生”电子。

又如，在高能或者超高能的强子碰撞过程中，可以产生数目很大的末态粒子。在能量较低时，主要产生的是一些 π 介子；能量较高时，也可以产生一部分 K 介子以及重子和反重子。这种过程称为“多重产生”（multiple production）。在这种过程中产生的大量末态粒子，显然不可能是数目只有两个的初态粒子的构成部分。

在第 6.3 节里，已经讲过费米率先运用量子场论方法处理 β 衰变的工作。这是场论里的产生算符和消灭算符的第一次成功运用。费米说，在他的理论里，“电子可以创生也可以消失”。此后，物理学家们就开始使用旧粒子吸收和新粒子产生的语言，配上适当的守恒律，去描写各种微观过程。在新的理论里，不再认为现今看到的东西早先必定已经存在。这种关于粒子生成的新观念，就这样从根本上免除了在原子核内部储存电子的必要性。

我们现在进一步论证，在任意的粒子衰变过程中，所有末态粒子都是在过程当中产生出来的。为了得到这个结论，只需要证明如下的衰变过程是不可能的：

$$A \longrightarrow A + \text{其他粒子}$$

可以证明，这种衰变过程不可能同时满足过程前后能量和动量守恒的定律，以及各个粒子的能量-动量关系的要求。可是，在一般的参照系里，譬如在母体粒子 A 运动着的实验室参照系里，牵涉到的方程数目比较多，证明相当麻烦。

最方便的方法是使用系统的动量中心参照系，即系统总动量为零的参照系。在这个参照系里，衰变前的初态只有一个母体粒子 A，它当然是静止不动的。于是，系统的能量就由其静止质量 m_A 决定，即等于 $m_A c^2$。那么，假若在过程末态里除了初态粒子 A

还有其他粒子的话，末态的能量就必定会大于初态能量 $m_A c^2$。因为，末态的总能量必定要加上“其他粒子”的能量，而这份能量必定要大于其静止能量。即使是光子那样的“其他粒子”，它亦不可能是静止不动的，于是，仅仅从末态粒子必定具有大于零的动能，就可以判定这种衰变过程必定不满足系统总能量守恒的要求了。

上面我们严格论证了，衰变过程的末态里不可能包含有原来的母体粒子，因而任何衰变过程的末态粒子，都是在过程中产生出来的。

下面我们再讨论散射过程。举最简单的康普顿散射为例，即电子与光子散射的过程。在一些物理学著作或者教科书里常常说，康普顿散射是一个电子与一个光子散射的过程；或者说，在这个过程中一个电子先吸收了一个初态光子，然后这个电子再放出一个末态光子。这些说法其实是不确切的。我们没有任何理由说散射过程放出来的末态电子就是原来初态里的那个入射电子，而只能说康普顿散射过程的初态是一个电子和一个光子，末态也是一个电子和一个光子。

首先，按照量子力学里的粒子全同性原理，各个电子都是完全一样的，而且没有办法给它们贴上标签。所以没有任何根据说现在看到的这个电子就是刚才的那个电子。如果你不愿意接受这种主要从操作意义出发的推理的话，下面将给出基于量子电动力学理论的论证。

我们画出描写康普顿散射的最简单的两个费曼图：图 9.1(a)和(b)。这两个都是二阶微扰的图，图中下方空时点 1 和上方空时点 2 之间的连线代表中间态的虚过程。我们可以说，其中的图(a)表示初态电子在空时点 1 先吸收一个初态光子，然后再在空时点 2 放出一个末态光子；另一个图(b)表示初态电子先在空时点 1 放出一个末态光子，然后再在空时点 2 吸收一个初态光子。但这种先后次序的说法的成立是有条件的，条件就是空时点 1 先于空时

点 2，即是说 $t_1<t_2$。可是，费曼图的各个顶角即关节点的空时坐标是要在全空间-时间中积分的，除了 $t_1<t_2$ 之外，还包括 $t_2<t_1$，即空时点 2 先于空时点 1 的情形。如果我们在图中明确标出时间轴的方向的话，对应于后一种情形的图形里，代表电子的线条是一条来回折返的折线。按照费曼图的规则，代表电子的线段是顺着时间轴方向的，而逆着时间轴方向的线段则代表电子的反粒子即正电子。

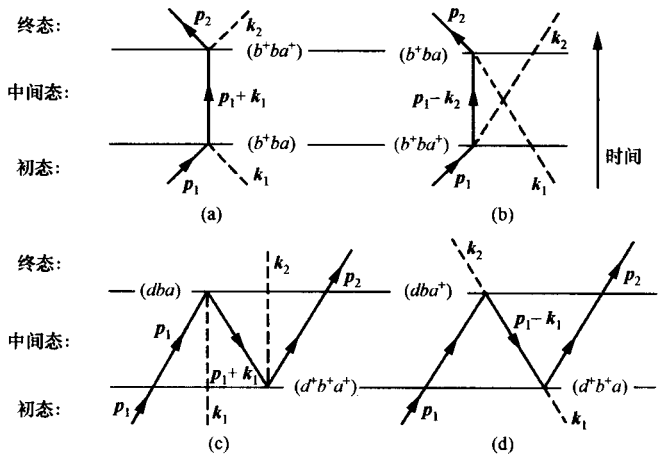


图 9.1　描写康普顿效应的最低阶费曼图

例如，把图 9.1(b)里的两个关节点的时间顺序颠倒过来就得到图(d)，它表示的是先在下方空时点 2 处初态光子转化为电子-正电子对，其中的电子后来放出去成为末态电子。然后，在上方空时点 1 处那个正电子与初态电子发生湮没，放出一个末态光子。在这个图里初态电子在空时点 1 就消失了，而末态电子是从空时点 2 放出来的；在空时点 2 上发生的是初态光子转变为电子对的虚过程，两个空时点 1 和 2 之间那段线段表示的不是电子而是逆着箭头方向行进的正电子。对于把图 9.1(a)里的两个关节点的

时间顺序颠倒过来而得到的图(c),可以做类似的分析;在图(c)的那两个顶角上发生的是"真空极化"的虚过程,即从真空中同时产生一个光子和一对电子-正电子对的过程或者它的反过程。

在9.1(c)和(d)这两个图里,可以明白地看到,康普顿散射过程的这些最低阶振幅里,放出的末态电子有一定机会肯定不是原来的初态电子。即是说,在这些振幅描写的过程当中,初态电子已经消失了或者说被吸收了,末态电子肯定是在散射过程中产生的。所以,由包含了这些部分振幅的总振幅描写的散射过程中,不能够说放出的末态电子一定就是原来初态电子的延续。对于高阶微扰的图形,亦可以做类似的分析,而且图形的阶次越高,在中间态里出现电子对产生或者湮没的机会就越多。

那么,一个自由存在的粒子是不是始终都是它自己呢?也不一定。例如,一个自由的质子确实有机会转变成一个中子加上一个 π^+ 介子的"虚状态",然后再变回一个质子。那么就很难把后来的质子认作一定是原来的那个质子了。一个自由的中子亦有机会转变成一个质子加上一个 π^- 介子的"虚状态",然后再变回一个中子。

总之,无论在衰变和散射过程,或者在自由存在的进程当中,粒子无时无刻都有可能发生变化,即从无到有地产生,或者从有到无地消失。

最后再提一下,从宇宙起源的角度看,所有种类的粒子都是在大爆炸之后逐渐生成的。起初产生的是零质量的光子还有中微子和反中微子,以及静止质量比较小的电子和它的反粒子即正电子。在宇宙逐步膨胀同时逐渐冷却的过程中,依次产生出核子和氘、氦等轻核和较重的核。并且在继续冷却之后产生出原子和分子。[3]所以,我们的宇宙本来就不是由一些现成的零部件组合构成的,而是在演化的进程中生成各种各样的粒子。

由此可见,粒子的本性不是"可分"的"分",而是"生成"的

“生”。自古以来认为原子之类的粒子是组成物质的本原的观念，已经受到了强烈的挑战。在现代物理学里，已经有越来越多的证据不利于物质世界的构成论(constitutism)，而有利于物质世界的生成论(generatism)的观点。

9.2　关于生成论和辩证法的讨论

“生成论”的学说是金吾伦提出来的[4,5]，由此引起了一场被归入所谓“三大论战”的争论[6]。本书作者从现代物理学的成就论证生成论已经取代了构成论的文章发表之后[2]，亦受到了在文献[6]的作者授意下写出的一篇文章的批评[7]。那篇批评文章里说：“自然科学的问题终归要由科学实验做出最后的检验。但是，重要的是学会用‘矛盾的统一’的观点去观察世界……”文献[6](136页)也旗帜鲜明地宣称，其作者的观点“是基于辩证唯物主义的对立统一律，即一切事物都是对立的统一。”所以，在这一节里。我们专门谈一谈有关辩证法的哲学问题。

虽然，文献[6](140页)承认“‘构成’是对立的统一的一种可能的形式，而不是它的唯一形式。”文献[4]也说：“现代物理学中的确也出现了一系列……不能够用‘构成’观念解释的粒子的产生、消灭和相互转化的现象。”然而，他们只限于承认“构成和生成都是自然界客观存在着的现象”，而把生成论观点说成是一种“简单的泛化做法”[4]，甚至贬为“完全是一种过了时的‘陈旧之论’。”(文献[6]，154页)

我们在这里要论证的是，“生成”不仅仅是一种自然界里的“现象”，而且是辩证法里面的一个重要的范畴，并且是辩证法发展的头一个具体的概念，头一个高级形式的概念。辩证法的丰富内容不是只用一两句话就可以概括无遗的，因为辩证法本身不是静止的而是流动的，它的概念和范畴是不断运动和发展的。

恩格斯在《反杜林论》里面这样说过："辩证法在考察事物及其在头脑中的反映时，本质上是从它们的联系、它们的连结、它们的运动、它们的产生和消失方面去考察的。"(文献[8]，25 页)他又在编入《自然辩证法》文集的一份手稿里写道："辩证的思维，不过是自然界中到处盛行的对立中的运动的反映而已，这些对立，以其不断的斗争和最后的互相转变或向更高形式的转变，来决定自然界的生活。"(文献[8]，553 页)按照恩格斯上面所讲的意思，人们常常讲的"一分为二"或者"对立统一"的双方，除了"互相转变"之外，还必定会发生"向更高级形式的转变"。这种"向更高级形式的转变"，不能简单地归于对立双方的"统一"，这一点常常是唯物辩证法的普及读物所没有谈到的。

这种对立着和斗争着的正反双方"向更高级形式的转变"，采取的就是"正、反、合"的发展形式。这种"正、反、合"的辩证逻辑或者说矛盾运动的形式，在马克思的主要著作《资本论》里得到淋漓尽致的发挥。注意这里所讲的"合"，不是一般所讲的正反双方的"结合"或者"合并"，亦不是"正—反—正"式的回归，而是上升到一种新的逻辑形式或者一个新的认识阶段。

在黑格尔的辩证法里，第一套"正、反、合"的概念的德语原文是 Sein-Nichts-Werden，汉语翻译是"有—无—变"[9]或者"存在—无—变易"。[10,11]与其中的"变"或者"变易"的原文 Werden 相应的英语单词有：to become，to grow，to happen，becoming，growing，developing 等等[12]；译成汉语应该是：发生，产生，变为，成为，变成，生成，变易，等等。由此可见，"变"或者"变易"只是德语单词 Werden 的一种释义，把它译为"生成"亦未尝不可。

事实上，在马克思主义经典文献的中文版里老早就使用了这样的译名，并不是我们的首创。例如，在我国普遍发行的、列宁《黑格尔"逻辑学"一书摘要》的中译本里[13]，就有这样的翻译。在列宁摘引的黑格尔《逻辑学》原文和列宁本人的注释的中译文里，多

次出现“生成”这一词汇。例如，在文献[13]105页里就有“存在—无—生成”的语句。

按照黑格尔，纯粹的存在和纯粹的无都没有任何规定性，因而都是空洞的概念。只有上升到“变易”或者“生成”的阶段，才达到“具有一种规定性的存在”，即“特定存在”（文献[11]，178页）。按照我们的理解，黑格尔正是在这种意义上，把“生成”看做是“第一个具体的思想，因而也是第一个概念”。所以，生成绝不仅仅是什么“现象”而已，它是辩证法哲学里“第一个具体的思想规定，同时也是第一个真正的思想规定。”（文献[11]，176页）

不但如此，在黑格尔的著作里，我们还找到了意思更加贴近“生成”的用语。在黑格尔《逻辑学》里有一节的标题，在中文本里的译文是：“变的环节：发生与消灭。”（文献[9]，96页）而《黑格尔全集》德文版原文里这一节的标题是 *Moment des Werdens*；正文开始处是：Das Werden, Entstehen und Vergehen, ...。[14] 我不揣冒昧把这个标题译为“变的要素”；正文开始处译为“变，即生成和消失。”这里的 Entstehen und Vergehen 相当于英语里的 genet and disappearance，其中的 genet，一般作“发生”解，亦可理解作“生成”。于是，Entstehen und Vergehen 的意思就是“发生与消逝”或者“生成与消失”。在黑格尔《逻辑学》的这一节里，对“发生”或者“生成”指从无到有的变化，以及“消逝”或者“消失”指从有到无的变化，都作了详细的解说。例如：“两者都是变，它们虽然方向不同，却仍然相互渗透、相互制约。一个方向是消灭；有过渡到无，但无又是它自己的对立物，过渡到有，即发生。这个发生是另一个方向；无过渡到有，但有又扬弃自己而过渡到无，即消灭。”（文献[9]，97页）

所以，从以上的这些理解来看，变易就是发生和消灭，或者生成和消失。现代理论物理学里的产生和消灭算符恰好同变易的这两种要素相对应。所以，从费米运用量子场论方法成功地处理了

β衰变过程开始，后来的相对论协变的量子电动力学的费曼方法，一直到规范场理论，都深刻地体现了辩证法的思想。

我们以为，genet 更加确切地表示了“生成”的意思。它的词根与意思也是与“发生，产生，生成”的 generate 是相同的。我们为生成论拟定的外语名称 genaratism 亦出自同一词根（见文献[2]的英语标题），表明了它具有正宗的辩证法渊源。

当然，我并不是说自然科学的规律必须符合某种哲学原理才能够成立。我们更加注重恩格斯说过的这两句话：“……像唯心主义一样，唯物主义也经历了一系列的发展阶段。甚至随着自然科学领域中每一个划时代的发现，唯物主义也必定要改变自己的形式……”[15]

在这方面，我们还欣然同意费曼讲过的两句话：“我们不会狂妄到要求大自然做出改变来迎合我们的意愿。”和“事实上，科学真正存在所必需的，是在思想上不承认自然界必须满足像我们的哲学家所主张的那些先入为主的要求。”[16]应该说，这样的见鲜是符合于唯物主义原理的。

此外，本书第 7.1 节讲过，1950 年罗森布鲁斯就已经用场论方法推导出电子对有内部结构的质子和中子的弹性散射截面公式。接着，霍夫斯塔特从 20 世纪 50 年代中期开始，运用高能电子散射方法对质子和中子的电磁结构进行了系统的实验研究，并且于 1960 年前后取得了确定的结果。并且，霍夫斯塔特正是由于这项贡献，获得了 1961 年的诺贝尔物理学奖。所以，这方面的进展应该是广为人知的。

还有，从内部对称性的角度对基本粒子内部构成的研究亦已早就开始了。我们在第 7.2 节里讲过，费米和杨振宁在 1949 年就提出了 π 介子结构的核子-反核子模型。到 1956 年，坂田昌一又往前推进一步，提出了强子结构的坂田模型。虽然坂田过分地依靠他要求“物的逻辑”同“形的逻辑”相吻合的思想，一定要把已经

发现的物质粒子去填充 SU(3)群的三维表示，而没有像盖尔曼那样，敢于设想三种那时候还没有发现，而且将来也很可能不能够单独发现的夸克作为组成强子的基础粒子。在这方面，坂田明显受到了他所信奉的哲学信条的束缚。不过，坂田模型仍然不失为基本粒子内部对称性研究上的一个重要的阶段性成果。这主要指的是：第一，他们首先提出用 SU(3)群来描写包容了同位旋和奇异数在内的对称性；第二，他们由此发现的介子八重态，到现在仍然是有效的。后来，盖尔曼的“八重法”，也是早在 1961 年就提出来的。

由此可见，对于质子和中子以及其他强子的内部构造在理论上和实验上的研究，长期以来一直是国际粒子物理研究的重要方向，并不是像文献[6](144—147 页)所描写的那样，到 20 世纪 60 年代中叶才在人们的脑子里突然冒出来的。在那之前和之后在这方面取得的突破，实际上都是物理学本身的发展水到渠成的结果。[17]

9.3　没有任何物理学规律支持“物质无限可分”

在第 1.4 节里已经从哲学的角度论证过，“物质无限可分”之类的命题，“不是辩证法而是被辩证法大师们斥之为‘无聊’的一种‘单调的无限’。”(“单调的无限”即旧译“恶无限性”)在这一节里，我们再从科学方面，进一步对这一问题进行分析。

事情从薛晓舟和张会 1996 年出版的《现代物理学哲学问题》说起。他们在这部著作里评论道，“从哲学上说，物质是无限可分的论断，决不比物质是有限可分的命题真理性更大。物质无限可分的观点，在实践上永远是不能证实的，因为任何做出的实验都是有限的。无限可分实际上只是有限可分的外推；人们一般地，并不反对逻辑上的外推，但逻辑上的外推并不能保证命题的真理性。

物质是有限可分的论点，永远是不能证伪的。因为即使夸克、轻子，将来实验揭示可分亿万次，也得不出有限可分是错误的结论，亿万次并不能保证命题的真理性。物质是有限可分的论点，永远是不能证伪的。因为即使夸克、轻子，将来实验揭示可分亿万次，也得不出有限可分是错误的结论，亿万次毕竟是有限数！

“因此，我们认为粒子结构具有无限层次性，或者说物质结构是无限可分的论点，在物理学上是缺乏根据的，在哲学上是外推的，因而这个论断是不可取的。相比之下，物质结构具有有限层次的论点，真理性程度倒是更大些。”[18]

薛晓舟以上的观点受到了这样的批评说：“按照……这种逻辑，‘凡人皆死’这一命题也将是形而上学，因为由‘张三已死’和‘李四已死’……并不能证明‘王五也将死’。因而一切全称肯定和全称否定的命题，都将是‘形而上学’”。（文献[6]，159 页）

不过，我们现在讲的是科学而不是逻辑。仅仅依靠单纯的逻辑推理，是不能够求出科学规律来的。到了今天，“凡人皆死”的命题，决不仅仅是一种逻辑的推论，也不仅仅是一种统计学的结论，而是建立在从人体器官的衰退，免疫系统的失效到细胞凋亡，蛋白质合成差错，和 DNA 修复困难等各个层次的生物学普遍规律基础上的科学论断。

对比之下，今天没有任何物理学的规律支持“物质无限可分”的命题。因此，既然“物质无限可分”的命题不是建筑在物理学原理或者定律的基础之上的，它就不属于物理学或者自然科学，而仅仅是一种哲学信念。

总之，“物质无限可分”的命题与“凡人皆死”的命题，虽然都采取了全称判断的形式，但前者仅仅是一种哲学信念，后者则是一种科学论断，其性质是完全不同的。或者，用薛晓舟的话说，这两个命题的“真理性程度”是完全不一样的。因此，用“凡人皆死”来为“物质无限可分”所作的辩护，完全没有什么说服力。

最后，我们愿意举出一些粒子理论里的论证，说明已经有了不利于“物质无限可分”这一哲学命题的初步证据。

现在列出的基本粒子的数目有两三百，特别是把“共振态”也算做粒子之后，似乎看不到这种共振态随着能量增高的发展有停止的趋势。但是，我们在第 8.1 节里亦讲到了，基础粒子的数目并不多。事实上，除了规范粒子以外，夸克和轻子都只存在着三代双重态，这一数目是很有限的。下面就讲一讲夸克和轻子各自存在着不多不少的三代双重态这一事实的证据。

第一个证据是 π^0 介子的衰变。实验上发现，π^0 介子几乎全部通过电磁作用衰变到两个光子的末态。在夸克模型之前，可以认为 π^0 介子通过强作用转变为质子-反质子的中间态，然后这一粒子对再通过电磁作用消灭为两个光子。在提出颜色自由度之前的夸克模型里，π^0 介子本身就是 u 夸克对和 d 夸克对的叠加态，可以通过这些夸克对的消灭转变为两个光子。但是，从这两种模型计算出来的 π^0 介子衰变率都比观察值小得多。后来在引进了夸克的颜色自由度之后，u 夸克和 d 夸克都各自有三种颜色的状态，π^0 介子衰变的中间态数目就成倍增加了。再计及到每种夸克所带的电荷值，就能够得出与观察数据符合得很好的衰变率。

现在，我们从强子的层次深入到夸克的层次，从味空间的自由度进到色空间的自由度，就能够在理论上成倍地增加 π^0 介子的衰变率，取得了与实验符合的结果。那么我们不禁要怀疑，假若按照“物质无限可分”的思想，夸克之下还可以“分”下去，进入到一个更深的层次，那么会不会影响到在夸克层次已经取得良好符合的 π^0 介子衰变率的结果呢？这无论如何是一件值得担心的事，是“分”下去的一个不利的因素。

此外，对于电子-正电子对撞机上产生强子和产生 μ 子对的截面之比，亦能够作类似的分析，支持有三种颜色的夸克模型。这种过程产生的机制是电子-正电子对先湮没为一个虚光子，这个虚光

子通过转化成为夸克-反夸克对，再通过强作用产生数目不定的强子。另外，考虑同样的初态即电子-正电子对转化为 μ 子-反 μ 子对末态的过程，在这一过程中没有强作用的参加。计算指出，这两种有强作用参加和没有强作用参加的过程的截面之比，决定于不同中间态的夸克电荷平方之和。在能量较低时考虑三种原始的夸克已经足够，而在能量逐渐增高时则需要计及其他品种的夸克，都能够获得与实验符合的结果。假若还有比夸克更深的层次，这一解释还能够成立吗？这是又一个不利的因素。

另一方面，轻子的代的数目也是受到限制的。在第 9.1 节的末尾已经提到，在宇宙创生的早期，最先产生的粒子是质量最小的电子和正电子，以及无质量的光子以及中微子和反中微子。而宇宙膨胀早期的（以秒计的）“年龄”与宇宙系统的（以 10^{10} K 计的）“温度”之间的关系，由一个取决于当时可能存在的粒子品种的数目的因子决定，其中最重要的是中微子的可能品种的数目（那时候尚不可能产生多少质量较大的 μ 子等轻子）。随后，宇宙膨胀和冷却到了一定的阶段，就会产生出比较多的质量较大的质子和中子。中子与质子数目的比例，对宇宙最早期膨胀的机制是很敏感的。早期产生的质子，大多数成为后来的氢核；而绝大多数中子则成为最早产生的氦里面的组分。所以，观察到的宇宙中氦的丰度，成为了宇宙间存在着多少不同品种的中微子的一个指标。

根据天文学的观察和计算，原初的氦的丰度接近于 0.24，相当于中子与质子的比例为 1∶7。这一结果与只有三种中微子，亦即轻子的“代”数为 3 的现况相符。

此外，从 Z^0 粒子的衰变的计算也可以知道，Z^0 粒子观察到的寿命亦支持不多不少存在着三种中微子的结论。另外，还有宇宙学方面的论据，说明“基础粒子”品种的数目不可能是无限的。[19]

由此可见，在物理学里不能轻言“无限”。现在有充分的根据认为，夸克和轻子等“基础粒子”都只有三代双重态，并不可能是无

限多。假如还能够发掘出更深层次的“可分”构造，上面所说的这些论证依然会有效吗？

许多物理学家不相信物质是无限可分的。例如，费曼说过：“如果我们真的……发现这么多个层次，一个在一个的底下，那有多烦人啊。”（文献[16]，175 页）在第一章里我们还引述过他的另一句话：“我相信认为空间是连续的理论是错误的，因为我们会得出这些无限大以及其他困难，并且我们还留下了是什么决定所有粒子的大小这样的问题没有解决。我宁愿怀疑当深入到无限小的空间时，几何学的那些简单的观念会变得不对。”（文献[16]，181 页）事实上，许多物理学家亦相信，进入到普朗克长度的尺度，空间的性质就会发生剧烈的改变，包括空间不再是连续的而是“量子化”的，不可以进一步细分。或者，按照从超弦理论发展出来的 M 理论，当空间-时间分得越来越细的进程中，终将从另外的一种形式产生出替代现今描写能级分布的空间-时间坐标。即是说，空间-时间亦不是“无限可分”的。

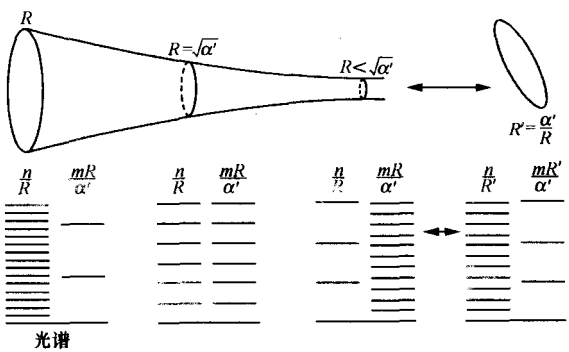


图 9.2　弦圈在柱面上的缠绕和非缠绕的两种形式的运动的两种能级分布随柱面半径 R 的变化。当 R 从大变小到一定限度，系统的能级分布就好像是在变大了的 $1/R$ 情况下的重演。这意味着原来的空间细分到一定限度，就会以另一种形式产生出新的空间标度

9.4 20世纪的微观物理学已经从构成论演变到生成论

1976年初，德国刊物《自然科学》1月号发表了海森伯的一篇文章《基本粒子是什么?》[20]；接着，美国刊物《今日物理》3月号又以《基本粒子的本性》为题，发表了这篇文章的英文版[21]。可是，海森伯已经在这一年的元旦日逝世，他再也看不到这两期刊物了。

海森伯的这篇文章用了不少篇幅论述基本粒子物理学的哲学问题，也许可以看做是他在这方面的临终遗言了，很值得我们注意。这篇文章开头的摘要里说："要谈什么基本粒子的组成部分，是没有意义的。"这句话里的"组成部分"的英文是 constituent parts，也许译作"构成部分"更加合适，因为人们常常是把"组成"这一词组同英语单词 composition 相对应的，而且后者亦有"构成"的意思。于是，我们可以把海森伯这篇文章的主题理解作：基本粒子是怎样构成的谈论，已经是没有意义的了。顺便说一下，我们为"构成论"拟定的外语名词 constitutism，同海森伯所用的单词 constituent 是从同一词根衍生出来的。(参看文献[2]的英语标题)那么，按照上面的理解，"构成论"的观点显然是已经过时的了。

海森伯在文章的"最重要的实验结果和它们的理论解释"这一节里，详细地阐述了以上的见解。例如，他说，"在50年代和60年代的实验中……发现了许多长寿命的粒子，而对于这些粒子由什么组成的问题，不再能做出明确的回答，因为这个问题没有理性的意义。比如说，一个质子可以由中子和 π 介子或者由 Λ 超子和 K 介子或者由两个核子和一个反核子合成。……所有这些陈述都是同样正确或者同样错误。基本粒子和复合粒子的区分从此根本消失了。"这里的"组成"的英文是 consist of，这一词组亦有"构成"的意思。

在"哲学问题"这一节里，海森伯也讲到，"'组成'一词只有当

粒子能以比它的静止质量小得多的能量分裂为它的组成部分时才多少有一点意义，否则'组成'一词就失去了意义。"

海森伯还说，我们"……在暗中总是隐藏着康德的两难推论：一方面很难设想物质可以一次又一次地分割下去，但是另一方面也很难设想，这种分割必然有朝一日到达一个终点。这个两难推论最终是来源于，我们错误地认为我们的直觉也能够应用到很小很小的环境中去。……德谟克利特的原子观念……容易理解而且比较直观，它决定了物理学家的思想方法，甚至决定了那些不愿与哲学打交道的物理学家的思想方法。……我们不可避免地在使用一种渊源于这种传统哲学的语言。我们问：质子由什么东西组成？人们能够分割电子吗？抑或它是不可分的？光量子是简单的还是复合的？如此等等。但是，所有这些提法都是错误的，因为'分割'或'组成'等词已在很大程度上失去了它的意义。"

"因此我们必须容忍这样的事情，就是在十分大和十分小的尺度内的实验经验不再提供我们直观的图像。然后我们才能理解前面说过的无限小的两难推论在基本粒子物理学里已以一种非常微妙的方式解决了，这是一种既非康德亦不是古代哲学家所能想到的方式：这就是说，'分割'一词失去了它的意义。"

以上海森伯关于粒子是可分还是不可分的议论，意思十分清楚。他认为，这是一个"已在很大程度上失去了它的意义"的问题；而且，"分割"或"组成"等词已经不再是描写粒子的适当用语。按照我们的理解，现代物理学已经超越了关于物质是否无限可分的争论。或者说，物质是否无限可分的问题已经不再是一个合适的论题。就像在量子力学出现之后，电子究竟是微粒还是波动的问题，亦不再是一个合适的论题。因为，建立了量子力学的精确描写方式就够了，不需要亦不应该用经典物理学的微粒和波动的概念去描写电子。

有一个浅显的譬喻很能说明问题[22]：当一名小学生首先学到

自然数，他知道了 1，3，5……是奇数，2，4，6……是偶数。一切都很好。但是，当他学到分数的时候，向老师提出了这样一个问题：分数 3/2 是一个奇数还是一个偶数？这就是一个不合适的问题，或者像海森伯所说，这是一个“错误”的问题。已经进到了一个新的领域，就应当接受新的规则，不应当老是抱着原来的框框不放。按照海森伯，关于物质是不是无限可分的问题，这种“提法”本身就是“错误”的。

我们注意到，以上所举海森伯文章的译文里几处出现的“分割”，英文里都是 divide，dividing 或者 division。而且，“一分为二”这一词组，在一本《汉英词典》里的英译就是 one divides into two[23]，在《中国大百科全书》里亦是 division of one into two[24]。所以，海森伯这篇文章的原文里几处出现的 divide，dividing 或者 division，不宜译成“分割”（与汉语“分割”对应的英语词组是 cut apart，它明白地表示出切割的意思），直接译成“分”更加合适。而且，海森伯讲的这个“分”，就是“一分为二”里 的“分”。

总之，按照我们所理解的海森伯的意思，站在现代物理学所达到的高度看来，物质粒子是否“无限可分”的哲学争论已经失去了意义。即是说，那只是一个过了时的话题。

海森伯不止一次谈到过这个话题。例如，他在 1972 年参加在意大利国际理论物理中心（ICTP）举行的“20 世纪中物理学家关于自然的概念的发展”的研讨会上所做的报告“量子理论历史中概念的发展”里，着重谈到“分立定态”、量子力学的“态”和“基本粒子”这三个概念。[25]在讲到“基本粒子的概念”时，海森伯说，“1928 年以前，每个物理学家都知道，基本粒子意思指的是什么。”后来“发现了电子自旋，使这个图像大大改变了。”再后来，“1928 年狄拉克发展了电子的相对论理论并发现了正电子，情况就完全改变了。”“我觉得这个反物质的发现恐怕是本世纪物理学中所有巨大跃进中的最大跃进。这是一个无比重要的发现，因为它改变了我

们关于物质的整个图像。”

海森伯举例说：“例如，按照狄拉克的新观念，我们可以说氢原子不一定要由质子和电子构成。它也可以暂时由一个质子，两个电子和一个正电子构成。实际上，在考虑到量子电动力学的更精密的细节时，这些可能性确实起到某种作用。”“如果我们知道，在极高能量的碰撞中，任何数目的粒子都可能产生，唯一条件是初始的对称性与终末的对称性相同，那么我们还得假定，任何粒子实际上是一个复杂的复合系统，因为在某种程度的真实性上我们可以说，任何粒子实际上是由任何数目的其他粒子所构成。”“所以狄拉克的发现的最惊人的结果之一是：基本粒子的旧概念完全崩溃了，基本粒子不再是基本的了。它实际上是一个复合系统，说得更确切些是一个复杂的多体系统，就像一个分子或者任何其他这样的对象真正具有的复杂性一样。”

海森伯由此得出的结论是：“我们经常问：‘这个物体由什么构成？’……我想我们已经从狄拉克那里懂得了：这是个错误的问题。”“我想这是个错误。其所以是错误，因为即使夸克存在，也不能说质子就是由三个夸克构成。我们必须说，它可能暂时由三个夸克构成，也可能暂时由四个夸克和一个反夸克，或者五个夸克和两个反夸克构成，等等。而在质子中应该都含有（would be contained）所有这些组态……”

的确，在第 9.1 节里论证康普顿散射的入射电子未必是出射的电子，所画出的费曼图就涉及电子-正电子这种粒子对的产生，这正是从狄拉克的理论推演出来的结论。

其实在这个问题上，有不少著名的物理学家持有相同或者相近的看法，认为在现代物理学里，“构成”或者“组成”的观念已经不再适用。

例如：外斯柯夫（V. F. Weisskopf，1908—2002）早就说过：“经典物理的一个主要特色是每一过程的可分性。每一个物理过

程都可以看成是由一系列部分过程组成的。至少在理论上，每一过程都可以在时间上和空间中一步一步地跟踪。绕核电子的轨道可以看做是许多微小位移的连接而成。一定电荷的电子可以是由一部分一部分较小的电荷所组成。如果我们要了解我们在自然界中看见的事实：质、特定性和个体性，经典物理的这一特点必须抛弃才行。"[26]在他看来，只有在经典物理学里才可以谈论物理过程和物质粒子的可分性，那样的说法在量子物理学里是没有意义的。

又如，外因伯新近在提到那种"认为事物以现行的方式运作是由于其成分的性质决定的"的观点时说，这种观点"实际上，在物理学中……可能已经走完了它的历程。就好像谈个别'基本'粒子的硬度或者温度或者智力根本就没有意义一样，对粒子是由其他粒子构成这种叙述也不可能给出一种精确的含义。我们确实在不精确地讲，一个质子是由三个夸克组成的，可是如果你非常仔细地考察一个夸克，你就会发现它被夸克、反夸克和其他粒子围绕着，偶尔地结合成质子；因此，至少在短暂的一瞬间我们可以说夸克含有(contains)质子。"[27]

外因伯在这里明确指出，物理学里认为物质由其组分粒子"构成"的观念亦已经不再是合适的观念了。因为，你可以说质子里面含有夸克，我也可以说夸克里面含有质子。事实上，运用狄拉克创立的反粒子概念，在量子场论里可以认为夸克有一定机会是含有三个夸克和两个反夸克的组态，或者是含有一个质子和两个反夸克的组态。而且，外因伯在这里使用的单词 contain 是与海森伯一样的。而文献[27]的中译本里"我们可以说夸克相当于质子"的译文是不对的，那不是外因伯的意思。

于是，我们看到，从 20 世纪初年出生的海森伯，到 21 世纪初年仍然健在的外因伯，在否定构成论的观点上，达到了统一的认识。

总而言之，从放射性的发现开始，历史上那种不可分割、不可

改变的原子概念就发生了演变。随后，在现代量子理论的建立和微观物理学实验的发展的基础上，特别是反粒子的理论预言和实验证实之后，物质由其组分粒子构成，或者物质一定可以分为构成它们的微小单元的概念已经失去意义了。特别是，物质是否无限可分，不再是一个合适的问题。物质粒子是在物理过程当中产生或者消失的，这是20世纪下半叶达到的认识。在20世纪诞生和成长起来的微观物理学，已经从构成的观念演变到生成的观念。生成论已经代替了构成论，这就是我们的结论。

参考文献

[1] 请查阅网站：http://www.decoherence.de。

[2] 参看：关洪，从现代物理学看构成论到生成论的转变，《自然辩证法研究》，2002年18卷11期，10页。

[3] 参看：S. Weinberg，《最初三分钟——宇宙起源的现代观点》，冼鼎均译，北京：科学出版社，1981，第五章。

[4] 金吾伦，《物质可分性新论》，北京：中国社会科学出版社，1988。

[5] 金吾伦，《生成哲学》，保定：河北大学出版社，2000。

[6] 参看：何祚庥，《三大论战——现代物理学研究中的哲学问题》，北京：北京师范大学出版社，2000，129—164页。

[7] 李宏芳，从现代物理学看粒子到场的转变——兼评"从现代物理学看构成论到生成论的转变"一文，《自然辩证法研究》，2003年19卷8期，85页。

[8] 《马克思恩格斯全集》第二十卷，北京：人民出版社，1971。

[9] G. W. F. Hegel，《逻辑学》(上卷)，杨一之译，商务印书馆，1974。

[10] G. W. F. Hegel，《小逻辑》，贺麟译，商务印书馆，1981。

[11] G. W. F. Hegel，《逻辑学》，梁志学译，商务印书馆，2002。

[12] The Pocket Oxford German Dictionary, Oxford University Press, 1962.

[13] 列宁，《哲学笔记》，北京：人民出版社，1960，81—257页。

[14] G. W. F. Hegel, Werke 5, Wissenschaft der Logik, Frankfurt am

Main: Suhrkamp, 1986, S. 111.

[15]《马克思恩格斯选集》第四卷,北京:人民出版社,1972,224 页。

[16] R. P. Feynman,《物理定律的本性》,长沙:湖南科学技术出版社,2005,55,155 页。

[17] 参看:关洪,层子模型前后——关于声称以马克思主义哲学指导物理学研究的案例分析,《自然辩证法通讯》,2006 年 28 卷 2 期。

[18] 薛晓舟、张会,《现代物理学哲学问题》,开封:河南大学出版社,1996,158 页。

[19] 我就这个问题请教了郭汉英教授。他的回答是:"如果我们的观察宇宙的确渐近于德西特(de Sitter)宇宙,那么后者的视界熵就为前者提供了一个熵界。那么,"基础粒子"的数目就不可能是无限的。"详细的论证可参看:D. N. Schramm, S. Turner, Big-bang nucleosynthesis enter the precision era, Rev. Mod. Phys. 70 (1998), 303—318.

[20] 海森伯,基本粒子是什么? 范岱年译,载:《现代物理学参考资料》(第三集),北京:科学出版社,1—8 页。

[21] W. Heisenberg, The nature of elementary particles, Physics Today, 3 (1976), 32—39.

[22] 这一譬喻引自以下著作:E. Nagel, The Structure of Science — Problems in the Logic of Scientific Explanation, Hackett Pub. Co., 1979, pp. 303—304;中译本:《科学的结构——科学说明的逻辑问题》,徐向东译,上海:上海译文出版社,2002,362—363 页。

[23]《汉英词典》,北京外国语学院英语系编,北京:商务印书馆,1980,810 页。

[24]《中国大百科全书·哲学》,北京:中国大百科全书出版社,1987;其中条目"'一分为二和'合二而一'的争论"的英译是:discussion on the division of one into two and the combination of two into one。

[25] W. Heisenberg, Development of concepts in the history of quantum theory, in *The Physicist's Conception of Nature*, J. Mehra (ed.), Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1973;中译文"量子论历史中概念的发展",侯德彭译,载:《现代物理学参考资料》(第三集),北京:科学出版社,9—15 页。引文根据原文做了修订。

[26] V. F. Weisskopf,《二十世纪物理学》,杨福家等译,北京:科学出版社,1979,28 页。

[27] S. Weinberg, Facing Up: Science and Its Cultural Adversaries, Cambridge: Harvard University Press, 2001, p. 111;中译本:《仰望苍穹——科学反击文化对手》,黄艳华,江向东译,上海:上海科技教育出版社,2004,90—91 页。引文根据原文做了修订。

附录　现代物理学中的因果性和决定性

A1　经典物理学中的因果性和关联[1]

从亚里士多德的“四因说”到今天的分析哲学和逻辑研究，哲学家们为因果性写下了不计其数的论述，企图对原因和结果给出一种精细而确定的解说。然而，在现代科学著作里，却很少用到因果性这个字眼。早在七十多年前，罗素就这样讲过：

“所有各个学派的一切哲学家都把因果性当做是科学的基本公理或前提之一，可是，奇怪得很，在像引力天文学那样进步的科学中，‘原因’这个词却从未出现过。……在我看来，为什么物理学已经不再寻求原因的理由是，事实上并没有这样一种东西。我相信，因果律是像君主政体那样一种过去时代的遗物，它之所以能够如上所说的在哲学家们当中得以通过考查而残存下来，只不过因为被误认为没有害处的罢了。”[2]

我们想，罗素所以这样说，是因为在现代已臻成熟的各门学科里，早就运用了更加精密和确切的方式来描写研究对象的状态及其演化的规律，一般不再需要使用因果性之类有欠明晰的哲学用语的缘故。换句话说，现代科学已经超越了因果性的范畴，使它变成“残存”在哲学和像社会科学那样的未成熟科学里的历史“遗物”。不过，由于人们头脑里根深柢固地残留着原因和结果的思考框架，更由于他们常常习惯性地把一些非因果性的关联当做是因果联系，由此产生出一些不必要的误解。

所以，关键的问题是要区分因果性(causality)和关联(correlation)这两个概念。关联的意义比因果性广泛得多，有因果性的关联，也有非因果性的关联。在20世纪中叶被当做辩证唯物主义的权威著作里作为一条原理提到的，“把自然界……看做有内部联系的统一整体，其中各个事物、现象是有机地相互联系着、相互依赖着、相互制约着的”[3]这种陈述里的“联系”、“依赖”和“制约”，就是一种最广泛意义上的关联，因而也是一种最低级形式的关联。

例如，在原始人看来，到处都有这种广泛的关联。他们还分不清哪些是因果性的，哪些不是因果性的，因而时常发生混淆。他们在没有掌握多少事物发展的规律而缺乏真正的因果认识的同时，又总会出现像卜筮和占星术那样的把偶然的关联当做因果关系的迷信行为。可是，即使到了今天，迷信活动仍然拥有一定的市场。这也是因为，在许多情况下，特别在社会关系的领域内，要做出因果性的精确判定，仍然是一件很不容易的事的缘故。

关联可以是空间性的，也可以是时间性的。例如，在正午十二点的时刻，我们可以预言，过十二小时一定是黑夜，再过十二小时一定是白天……等等。这种昼夜交替的规律，就是一种确定性的关联，它表现出一种决定性的联系。不过，它不是一种因果性的联系，因为昼夜的出现是受同一原因支配的两种互相关联的结果。又如，要知道当地晴天的第二天会是晴天还是雨天，或者北京是晴天的时候广州会是晴天还是雨天，就只能给出统计性的答案。至于这种统计性的关联属于因果性还是非因果性的关联，那就要看人们掌握的科学理论达到什么样的程度了。此外，如果大量事件的统计分布出现了纯随机的结果，我们就说这是一种统计性的零关联，亦即是两者之间不存在什么实质关系。可以说，上面所引述的“各个事物、现象”之间的“联系”、“依赖”和“制约”，其中绝大部分都会属于这样一种零关联。

我们认为，一般说来，在经典物理学里纯粹的关联常常出自对

感觉材料的初步整理，例如编目录那样的整理；而要达到因果性的认识则必须依靠某种动力学理论。

设观察到事件 A 的原因是事件(或事件组)B，而 B 的原因又是 C，C 的原因又是 D ……等等，这一个个(或者一组组)的事件形成了一串接续不断的因果链。为了简单起见，我们在这里将不拟讨论表现为首尾相接的封闭式因果链和有分支的因果链，而只讨论无分支无循环的一串串因果链。那么，这种因果链必定存在着唯一的一个始端，它是一系列因果关系的开始，本身不能够再有原因。因为，如果它有一个原因的话，就不会再是因果链的始端了。

在蒙昧的人群里，由于无法在物质世界当中找到一种满意的解释，总是把因果链的始端归于上帝的旨意或神祇的力量。在近代科学的初创时代，即使是牛顿那样的伟人亦未能免俗，把太阳系的起始运动归之于神力的推动。一直到 20 世纪初大家才弄明白了，作为一门科学出发点的初始命题，是不可能通过逻辑论证的方法去证明的。这些初始命题如果不是从另一门科学搬过来的话，那就必定具有公理的性质。[4,5]那么，这些作为逻辑起点的公理式的命题，自然是不能再追问其原因。因此，把这些命题认作为因果链的始端，实在是再合适不过了。

例如，作为物理学第一部分的力学，它的第一条定律是惯性定律。这条定律就具有公理的性质，它是既不可以通过逻辑推理的方法去证明，也不可以在一般意义上运用实验去直接验证的。这条定律的正确性，只能靠由它得出的无数推论是否与经验事实相符合而得到证实。[5]惯性定律的内容是说：当一个质点在不受外界影响时，必定会保持着它的静止或匀速直线运动的状态。在这里，我们引进了“状态”这个概念。在牛顿力学里，一个质点的运动状态是用它的速度或者动量(质量乘速度)来描写的。按照惯性定律，在不受外界影响时，质点的运动状态是不会改变的。至于为什

么不会改变，这是一个不应该问的问题。因为，惯性定律既然具有公理的性质，它就是没有原因的。换句话说，惯性定律就是有关因果链的不再有原因的始端。在这里，问题的关键是选择好适当的状态描写或状态参数。例如，为什么要用速度而不是位置或者加速度来描写质点的运动状态，这是一个必须依靠经验事实而不能光靠想象或者信念去解决的问题。

在复杂的系统里，也可以找到类似的解释。例如，有一盒理想气体，当达到平衡状态时，它的压强 p，体积 V 和温度 T 之间存在着如下的关系式

$$pV = nRT$$

式中的 R 是摩尔气体常数，n 是气体的物质的量（摩尔数）。上式就叫做理想气体的状态方程。在宏观的层次上，处在平衡状态的气体为什么满足这一方程，是无法找出原因的。而且，满足上式的几个状态参数 p，V 和 T 之间，也只是存在着纯粹的关联，而没有什么因果关系。

一般说来，在对宏观系统进行现象性描写的热学或者平衡态热力学理论里，所给出的都只是一些状态参数之间的关联。然而，当我们深入到微观层次时，这些关联还是可以得到进一步解释的。例如，气体的状态方程是可以由分子的热运动来做出解释的。我们可以说：在温度较高的情况下，因为气体分子的平均速度比较高，所以，当气体体积固定时，其压强会随着增高。有关的详细论证和计算，要用到气体动态理论或者更严密的统计物理学理论。但是，这种微观解释并不是一种因果性解释，而只是微观层次上的一种进一步的关联，即是把描写分子运动的一些微观物理量的统计平均值，分别同宏观状态的几个状态参数对应起来，把宏观参数之间的关联，替换为微观量的平均值之间的关联。所以，在平衡状态中，仅仅存在着纯粹关联的关系。只有当平衡状态受到外界干扰，其中一个（或一些）参数发生变化，因而引起其他参数的变化

时，才表现出因果性的联系。因此，只有在系统随时间演化的过程中，才谈得到因果关系。研究系统状态随时间演化的规律的物理学理论，就叫做动力学。

现在我们回到力学理论。上面所说的惯性定律，其实是研究机械运动的动力学的第一条定律。但是在动力学之前还有运动学。运动学是对系统运动现象的单纯描绘，而不过问它为什么会有这样的运动。换句话说，在运动学里只给出不同的状态参数之间，还有它们同时间之间的关联，而不涉及因果关系。在伽利略建立他的运动理论的时候，为了同亚里士多德划清界线，有意避免谈论运动的原因。他在《关于两门新科学的谈话》一书中专门声明道："现在看来还不是研究自然运动的原因的时机……本书作者的目的，仅在于研究和证实加速运动的某些性质，而不管这种加速度的原因是什么。"[6]所以，伽利略的这部著作，表面上看起来很像是一部运动学。严格地讲，运动学还不是真正的物理学，而只是为动力学所做的准备工作。况且，要建立什么样的运动学，根本上还是由动力学的要求决定的。[7]马克思讲过："物理学家是在自然过程表现得最确实、最少受干扰的地方考察自然过程的，或者，如有可能，是在保证过程以其纯粹形态进行的条件下从事实验的。"[8]一个物理系统的确可以"最少受干扰"地存在，使物理学家能够把它近似地当做是孤立系统来处理，研究它的"纯粹形态"及其演化。上面讨论过的质点的惯性运动和气体的平衡状态这两种情况，就是两个很好的例子。

在以复杂得多的系统为研究对象的学科里，就没有这么好的条件。例如，生物学和社会学里的研究对象，都是不可能不受外界的干扰和影响而孤立地存在的。在那里的状态及其演化，都表现出复杂得多的形式，在这些学科里，还不能对所研究的一般系统的未来行为作出精确的预言，亦即还没有找到能够取代因果性这一哲学观念的确切替代物。所以，我们以下将限于讨论物理学里的

因果性和关联的表现。

如上所述，物理系统状态的保持是无原因的，而状态的变化才是有原因的，其原因就是外界的影响。在物理学里把这种影响称为系统所受到外界的作用或者力。

可是，在现代物理学文献里，几乎没有提到因果性这个名词。常见的唯一例外是在相对论里。由于任何能量或信号的传递速度，都受到不可能比光速 c 更快的限制，所以，只有当两个事件的空间分隔 Δx 和时间间隔 Δt 满足不等式 $\Delta x \leqslant c\Delta t$ 时，它们之间才可能有相互影响或相互作用的传递，从而发生因果联系。因此，一般把这道式子叫做因果性条件。除此之外，在现代物理学的著作里，很难再找到关于因果性的明显叙述。这样的因果性条件也体现了，原因必须先于结果发生，那些彼时彼地所发出的影响来不及传到的事件，一定不会是此时此地发生的事件的原因。

在物理学里，描写系统受到外界影响或相互作用时状态的变化，用的是状态随时间演化的运动方程。例如，在非相对论质点力学里，用的就是牛顿第二定律：

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

这是对于时间 t 的一阶微分方程。式中的 m 是质点的质量，$\boldsymbol{v}$ 是它的速度；而 $\boldsymbol{F}$ 则是它所受到的外力，亦即系统同外界的相互作用的一种表述。从上式可以看到，当外力 $\boldsymbol{F}$ 为零时，质点的速度 $\boldsymbol{v}$ 保持恒定，这就是惯性定律即牛顿第一定律所描写的情况。

上式只给出质点速度 $\boldsymbol{v}$ 的变化，而没有涉及到它的位置 $\boldsymbol{x}$ 的移动。进一步，由于质点的速度等于其位置 $\boldsymbol{x}$ 对时间的导数，即 $\boldsymbol{v}=\mathrm{d}\boldsymbol{x}/\mathrm{d}t$，所以牛顿第二定律也可以写成

$$m(\mathrm{d}^2\boldsymbol{x}/\mathrm{d}^2t)=\boldsymbol{F}$$

这就是常见形式的，作为位置 $\boldsymbol{x}$ 对时间 t 的二阶微分方程的牛顿第二定律。现在，只要知道了某一初始时刻 t 质点的初始位置 $\boldsymbol{x}$ 和初始速度 $\boldsymbol{v}$，在了解了质点受力的情况下，就可以通过这一方

程解出任意时刻 t 的质点位置 $x(t)$ 和速度 $v(t)$ 来。

所以，我们说，牛顿第二定律这道运动方程，精密而确切地给出了外界相互作用同质点运动状态的变化之间的关系。一般说来，原则上从运动方程已经可以预言，系统状态为什么会发生变化和将会发生怎么样的变化。通过运动方程，我们已经获得了比因果性的抽象范畴具体得多和精确得多的知识，所以不必再提到原因和结果的概念。这就是我们在上面讲的，现代物理学已经“超越”了因果性范畴的意义。

当然，物理学家在处理每一个问题时，都不可避免地做出一定的简化和近似。只要这种合理的简化能够在一定的近似程度上得到同经验事实相符合的结果，就不必进行更繁复的考虑。事实上，任何一种科学理论都必须做出某种程度的简化，都不可能无遗漏地考虑全部“各个事物、现象”之间的联系。在古代，人们把星相、阴阳、节气、时辰等等看得非常重要，各种事物的吉凶都要受到这些因素的支配。在近代动力学理论里，已经筛去了那些非因果性的纯关联或者零关联，而找到了真正的因果联系。

我们指出，以上的论述除了反映了许多物理学家的共同观点之外[9]，不少科学哲学家亦程度不同地主张，科学中的因果关系是由运动方程来表示的。例如，弗兰克(P. Frank，1884—1966)就把牛顿运动定律当做“因果性定律的数学形式”的首选例子[10]。纳格尔(E. Nagel，1901—1985)则更明白地指出[11]，“系统的状态”的定义不能先于相应的“因果性”理论给出来，而“因果关系”指的就是一些“线性微分方程”，它们给出了物理系统的状态是怎么样依赖其他因素的影响而随时间变化的。

在物理学的其他分支里，也可以作出类似的分析。例如，在流体力学里，可以建立速度分布或者密度分布的运动方程，用来研究液体或气体受到扰动后的运动情况。在电磁学里，麦克斯韦方程组描写了电荷和电流的运动会怎么样引起电磁场的变化。这些运

动方程都采取线性微分方程的形式，它们分别给出了在受到外界影响时流体运动和电磁场随时间的变化。

最后，在经典分析力学里，还发展了用哈密顿函数或者拉格朗日函数等形式来表达系统的动力学性质。这两种形式在量子力学和量子场论里有着广泛的运用。

A2　量子物理学中的因果性和关联[12]

微观物理学里的因果性和决定性，同人们已经认识到的其他任何领域里的因果性和决定性，都存在着很大的差别。例如，在第4.3节里讲过，放射性原子核的衰变完全是随机发生的，各个衰变事件之间并不存在着任何关联，没有任何理论能够预言个别的放射性原子核会在什么时刻发生衰变。所以，一般说来，在微观物理学的范围内，个别事件的发生完全是无因果的和非决定性的。放射性衰变的指数定律是一种统计规律，它表示由大量同类事件的观察数据表现出来的一种统计决定性(statistical determinism)。由此可见，不应当武断地说微观物理学完全是非决定性的。事实上，作为微观物理学理论的量子力学本质上仍然是一种决定性的理论；不过它决定不是个别事件是怎样发生的，而是大量事件的统计规律或者统计分布。

上一节说过，在经典物理学里，系统的状态是由一些物理量所满足的条件或者关系来规定的。这些条件或者关系是否满足，是可以通过对这些物理量直接进行测量来验证的。而在量子力学里，情况起了根本的变化。在量子力学里用来描写粒子状态的态函数即波函数 $\psi(x)$，本身并不是什么物理量或者一些物理量之间的关系。量子力学里的态函数 $\psi(x)$，仅仅代表测量粒子的位置时得出结果为 x 的概率(密度)$P(x)$的幅度即概率幅。用公式表示就是

$$P(x) = |\psi(x)|^2$$

或者，更普遍地说，对于系统对用算符 A 表示的力学变量进行许多次测量，所有各次观察结果的平均值$\langle A\rangle$是

$$\langle A\rangle = \frac{\int \psi^*(x) A\psi(x)\mathrm{d}x}{\int \psi^*(x)\psi(x)\mathrm{d}x}$$

一般说来，在进行这种测量时，每一次的观察结果必定是一系列可能的数值(算符 A 的本征值)当中的一个。但是，没有任何一种理论可以确切地预言单次测量会出现什么样的观察值。所以，我们说，对物理量进行单次测量所得到的观察数值，是没有因果关系可以追寻的。例如，在某一时刻观察到粒子在位置 x 出现，一般并不可以追问它刚才在什么位置上。仅凭这一点论证，就能断定微观粒子的轨道描写是不可能的。量子力学所能够预言的，只是用上式表示的，大量这样的同类测量所得到的多次观察结果的统计平均；以及可以由此推导出来的，在这些大量的测量事件当中，每一种可能的观察结果出现的频度(frequency)即概率(probability)。总之，量子力学所决定的对象，不是单次测量的结果，而是大量同类测量事件的观察结果的统计分布。所以我们说，这正体现了微观物理学中本质上的统计决定性。

在量子力学里，系统的状态是由系统的哈密顿算符 H 决定的。一般说来，哈密顿算符 H 包含了系统内部的相互作用以及它所受到的外界作用，它不仅决定着系统的静态性质，而且还决定着系统状态的演化。具体说来，态函数 $\psi(x)$对时间的依赖，是由薛定谔方程

$$\mathrm{i}\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = H\psi$$

描写的($\hbar$ 是约化普朗克常数)，它就是量子力学里的基本运动方程。像经典物理学里的各种基本运动方程一样，薛定谔方程也是

一道包含有对时间的微商的线性微分方程。按照上面所讲，描写状态怎样随时间演化的运动方程，就表现了系统状态变化的因果规律。所以，薛定谔方程就是量子力学里因果关系的体现。可是，满足薛定谔方程的不再是任何物理量，而仅仅是作为概率幅的态函数 ψ。由于 ψ 原则上不描写系统在未受测量时的表现，这就意味着，量子力学里的因果性，从根本上不同于以往人们认识到的任何形式的因果性。一般说来，不仅在量子力学里对任何物理量的观察值是没有因果关系可以追寻的，而且在进行测量之前该物理量一般是没有确定数值的。在量子力学里，具有直接的因果规律可循的，只是作为概率幅的态函数 $\psi(x)$。除此之外，在量子力学里再没有什么别的基本因果关系。对于这个问题，玻恩曾经言简意赅地讲过："粒子运动遵循概率定律，而概率本身按照因果律传播。"[13] 纳格尔也写道："对于由 ψ 函数定义的量子力学状态描写说来，量子力学是一种完全决定性的理论。"（文献[11]，306 页）以上这些陈述，就代表着对量子力学里的因果性和决定性的现代理解。

处在某一状态的系统里，可以存在着这样那样的关联。例如，在单粒子情况下，它的能量和动量必定满足一定的关系，这就是一种纯粹的关联而不是因果关系。又如，对于两粒子系统的情况，在质量中心参照系中，两个粒子的动量 $\boldsymbol{p}_1$ 和 $\boldsymbol{p}_2$ 必定是大小相等而方向相反的。我们只要测量了粒子 1 的动量 $\boldsymbol{p}_1$，那么不必进行测量就知道粒子 2 的动量一定是 $\boldsymbol{p}_2 = -\boldsymbol{p}_1$。这也是处在同一状态中的一种纯关联的关系，并不代表着什么因果规律。

我们可以在质量中心系或者动量中心系里，对二体散射问题作出如下的分析：每一次观察事件中，散射粒子将沿什么方向射出，是无法作出预言的。因而，个别事件的发生完全是非因果的。但是，只要知道了相互作用势 U，我们就可以运用薛定谔方程算出大量观察事件的散射粒子射出方向的统计分布（角分布）等等。这

种从散射前的状态(初态)出发,对散射后的状态(末态)的统计分布作出的预测,就是量子力学里因果定律的运用。

上面已经充分地说明了,什么是量子力学里的因果性规律。然而,刚才讲的单粒子的能量和动量之间的关联,以及二体散射中两粒子动量之间的关联甚至出射粒子的角分布,在经典力学里亦同样存在着,并不是量子力学所特有的。那么,量子力学里有没有一种全新形式的关联呢?我们愿意指出,全同粒子系统的统计性关联就是这样一种没有先例的、在量子力学里首次出现的关联形式。

莱布尼茨有一句名言说,没有两片完全一样的树叶。的确,宏观的物体都是各不相同的。如果单凭肉眼难以分辨,我们还可以采取对宏观物体贴上标签或者记上号码的办法来加以区别。在有些情况下,虽然实际上做不到,我们还是在想象中对所研究的对象采取了这种办法。例如,在经典统计物理学的计算里,对于本来是完全相同的许多原子或分子,就采取了编号的办法来进行统计。但是,事实上对原子和分子等微观粒子是没有办法贴上记号的,除非把它变成另一种粒子。所以,在经典统计物理学里,实际上对于微观粒子采取了只适用于宏观物体的一些办法,因而是一种不彻底的理论。

量子力学里的全同性原理,第一次彻底地反映了同类微观粒子的全同性质。根据全同性原理,所有电子都是完全相同的;它们是不可分辨、不可标记或者编号的。而且,由于概率幅是量子力学里的基本量,这种全同性必然表现在概率幅即态函数的性质上。因此,量子力学里的全同性原理的表述是:"系统内任意两个全同粒子互相交换,都不改变系统的状态。"然而,只有这条原理是不够的。在实际运用的时候,还需要补充上对称化公设:"由全同粒子组成的系统,按照这些粒子的本性,或者总由对任意两个粒子交换都是对称的全对称态函数描写,或者总由对任意两个粒子交换都

是反对称的全反对称态函数描写。”(文献[13],第二章)这句话里讲的第一种情况的粒子称为玻色子,例如光子;第二种情况的粒子称为费米子,例如电子。

我们先以属于费米子的电子为例。设有两个没有相互作用的电子组成一个系统,它们的位置记为 x_1 和 x_2。那么,如果有多个单粒子状态 $\psi_i(x)$可供选择的话($i=1,2,3\cdots$),这个系统满足上述原理和公设的可能状态只能采取以下形式:

$$\psi_i(x_1)\psi_j(x_2)-\psi_j(x_1)\psi_i(x_2),\quad i\neq j$$

当交换指标 1 和 2 时,上式差一个负号,这就是反对称的意思。注意其中的条件 $i\neq j$。因为当 $i=j$ 时,上式等于零;因此我们就可以得到两个电子不可能处在同一状态的结论。这一陈述亦称为泡利不相容原理。顺便提一下,上式所表示的状态里,已经不能说哪一个电子处在状态 ψ_i,哪一个电子处在状态 ψ_j,而只能说有一个电子处在状态 ψ_i,另一个电子处在状态 ψ_j。这正是上面所说的,全同粒子不可以编号这种量子性质的体现。

人们有时候把这里所讲的两个电子不可能处在同一状态的性质,说成是一种“泡利排斥力”的效应。其实这种说法是很不恰当的。因为,这两个电子之间并不存在通常称为“力”的相互作用。这种两个电子不能处在同一状态的“排斥”效应,完全是由于系统处在反对称状态下的一种非因果性统计关联,而不是互相推斥的结果。泡利不相容原理,是量子力学基本原理的一种体现,因而也是用经典物理学的概念所无法恰当理解的。

“泡利排斥力”的提法,正反映了人们把脑海中根深柢固的经典物理学观念照搬到微观粒子上的习惯倾向。沿着那条习惯的思路,有人也许会提出这样一些问题:一个电子怎么会“知道”某一状态已经被别的电子所占领,因此转而“选择”另一状态呢?为了做到这一点,它们之间存在着什么样的“信息传递”方式呢?这种把电子当成经典粒子,甚至进行“拟人式”思考的想法,很容易使人误

入歧途，把纯粹的统计性关联当做是因果关系，从而做出一些荒谬的结论来。

对于玻色子情况，亦可以做类似的讨论。在第 7.4 节里已经谈到过“电磁场的各种量子状态的重要差别，在于接收到的光子计数的统计性质”，这正是观察到的玻色子接连到达时间的非因果性统计关联的一个典型例子。由于篇幅有限，我们就不在这里详细阐述了。

1935 年，爱因斯坦、波多尔斯基(B. Podolsky)和罗森(N. Rosen)发表文章，对量子力学的完备性提出质疑。在这篇文章里，是以处在一定状态下的两粒子系统为例，对于两个粒子的指定力学变量测量值之间的关联进行分析来展开论证的。[14]

根据玻姆后来对 EPR 论证所做的改进，此后大家讨论的都是两个粒子之间的自旋关联。设有两个电子，它们的自旋变量(沿 z 轴的分量)分别是 q_1 和 q_2，描写自旋朝上和朝下的单电子态函数分别是 ψ_+ 和 ψ_-。那么，描写总自旋为零的两电子系统的(自旋单态)态函数可以写成

$$\psi_+(q_1)\psi_-(q_2)-\psi_-(q_1)\psi_+(q_2)$$

只要系统一旦处在这个自旋状态上，即使后来两个电子在空间中运动到分开得很远，也不会影响到它们的自旋性质。在系统的自旋单态上，由于上式前后两项的系数相等，所以，任何一个电子处在自旋朝上的状态 ψ_+ 或自旋朝下的状态 ψ_- 的概率都是 1/2。那么，当对系统中的一个电子的自旋进行测量时，得到朝上或者朝下的结果的机会都是一样的。这意味着，在许多次这样的测量事件中，将会有一半事件出现自旋朝上的结果，其余的一半事件出现自旋朝下的结果。可是，对于个别测量事件将会出现什么样的结果，则是无法做出确切预言的。

另一方面，对于处在自旋单态的整个系统，由上式可以看出，无论取式中的前项还是后项，两个电子总是分别处在 ψ_+ 和 ψ_- 这

两个状态上；亦即是说，两个电子的自旋取向总是相反的。（也只有这样，才能保证系统的总自旋为零。）于是，当测量到一个电子的自旋朝上（或朝下）时，我们不必进行进一步的实际测量，就可以肯定另一个电子的自旋必定是朝下（或朝上）的。这种两个电子之间的自旋关联，就是一种典型的 EPR 关联。

EPR 的文章里，在进行了本质上与上述内容相当的论证之后，宣称给出了“对于一个体系没有任何干扰，我们能够确定地预测一个物理量的值”的例子。（这里所讲的“一个体系”指文中所说的未经测量的“第二个体系”，相当于上面讲的第二个电子。）他们还认为，“对应于这一个物理量，必定存在一个物理实在的元素。”以此为基础，推出了“量子力学对物理实在的描述”是不完备的结论。

然而，按照我们上面所述，这里所讲的完全是处在一定状态下的全同粒子系统的、非因果性的统计关联。当对系统中的一个电子进行测量的时候，必然扰动了整个系统的状态，因而不能认为在测量过程中对系统的任何部分“没有任何干扰”。问题在于，当两个电子共处于同一状态中时，应当把整个系统看做一个整体，而不能把它简单地分解为其性质与整体状态无关的一个个部分。玻尔正是在这个意义上，运用“整体性”的观念去回答爱因斯坦，以维护量子力学的完备性的。[15]

人们在讨论 EPR 关联时，常常提出这样的问题：没有被测量的第二个电子怎么会“知道”对第一个电子测量到的自旋分量是朝上还是朝下，从而“决定”它自己采取哪一种与其相反的自旋取向呢？它们之间是否存在着一种超光速的相互影响或者信息传递呢？这又是把微观粒子当做宏观物体，把纯粹的统计性关联当做因果性联系的一个例子。我们在上面说过，在关于泡利不相容原理的讨论中已经蕴含了类似的问题，不过长期以来被“泡利排斥力”之类的似是而非的观念掩盖着罢了。

爱因斯坦把整个系统分拆成一个个部分来进行分析所依据的观念，被称为“可分隔性”或者“定域实在性”。在80年代初关于检验贝尔不等式的实验给出公认的否定结果以后，一般认为，爱因斯坦的“可分隔性”或者“定域实在性”已被否决。可是，按照我们的观点，全同粒子系统的统计性关联，特别是本节里讨论的两个电子之间的自旋关联，本身就是一种非定域性的关联。例如，处在自旋单态的两电子系统，它们之间的自旋关联是不会由于距离分隔而受到影响的。一方面，处在这一状态上的两个电子没有任何相互作用，因而这种关联是非因果的纯统计性效应；另一方面，这种关联表现为一种远距离的相关，因而也是一种非定域性的效应。

总而言之，量子力学里全同粒子系统的统计性关联，本质上就是一种不必依赖于任何相互作用的、非因果性和非定域性的关联。可惜的是，在讨论这个问题的许多论著里，都把非定域性的关联同非定域性的因果性混为一谈，一说到非定域性就同信息的传递搅到一起。其实，我们完全不必讳言量子力学里非定域性关联的存在。而且，由前面的论证可以知道，这种关联正是量子力学有别于经典物理学的重要特征之一。

A3 三种类型的统计决定性[16]

什么是决定性(determinism)？一种有代表性的讲法，把决定性看做是一种百分之百的确定关系。例如，在一本较近期出版的《科学史词典》中，关于决定性条目的释文是：[17]

> “通常说来，决定性的意思是，对于发生的每一件事情，都存在着一些条件，只要给出这些条件，就不会发生别样的事。”

以上所指的，只是一种拉普拉斯式的决定性，或者被哲学家称为完全决定性。其实，如果我们把上述关于决定性的解释中指个

别事件的“事情”的含意进行扩展，推广到某种事件发生的可能性或概率(probability)，或者不同事件发生的统计分布，就可以界定一种非完全决定性，即统计决定性。在各个科学领域内的统计决定性，可以表现为因果性的关联，亦可以表现为非因果性的关联。这里要讨论的，除了普通的统计关联以外，主要是因果式的统计决定性。对于物理科学讲来，则指建筑在动力学基础上的统计规律性，即由一定相互作用支配下的运动方程所描写的系统性质及其演化的统计决定性。

尽管人们已经认识到，在历史学和经济学，在生物学和医疗学，以及在经典统计物理学和量子力学里，都在某种程度上受到统计决定性的支配，这几种不同领域内的统计决定性的共同点是，它们确定的都不是个别事件是怎样发生的，而是关于在一定条件下发生的大量事件中，各种不同表现结果的统计分布及其演化规律；然而，这些不同的科学领域内出现的几种统计决定性，在观察方式、数学描写、因果关系和理论处理等几个方面，都存在着本质上的差异。在以往的有关哲学著作里，一般只是笼统地把统计决定性作为完全决定性的对立物而加以论述，而对于统计决定性内部存在的一些原则区别，却从来没有得到过认真的系统分析，从而使人们在这方面的认识，仍然停留在一种含混和肤浅的阶段上。

上世纪以来，以概率论为基本数学工具的统计方法，已经在互不相干的许多学科里得到了广泛应用。我们把统计方法在经济学和人口学等社会科学，以及生物学和医学等自然科学上的应用，称为普通统计。此外，还有在经典统计物理学里运用的统计方法，以及在量子力学里所运用的统计方法。这三种统计方法，所处理的虽然都是由大量个别对象组成的总体的数量方面的特性；但是，它们所涉及的对象的性质，观察的结果，因果联系的形式，以及数学上的描述方式，都各自具有不同的特点。以下我们把在上述三个领域内表现出的统计决定性，分别称为统计决定性Ⅰ，统计决定

性Ⅱ，和统计决定性Ⅲ，逐一进行详细的剖析。

一、统计决定性Ⅰ——宏观对象的统计方法

在普通统计学里，诸如在社会和经济的统计，在试样和产品的统计，以及在医学、教育学和人口学的统计里，被调查和检验的每一个对象都是宏观的存在物。这些宏观的个体对象都具有确定的各项指标，只要调查或检验的项目足够多，指标的取值足够精确，原则上每个个体都可以赋予互不重复的一组指标作为它的独特标记。换句话说，作为被调查的个体的宏观对象是各不相同并且可以逐个进行区分辨认的。这是这种统计决定性的第一个主要特点。

在这种统计方法里，设在样品的每次调查或检验中，得到第 i 个对象的指标为 $x_i(i=1,2,\cdots,N$，为简单起见，这里只讨论单个调查指标的情形)。这里一共 N 个指标即测量值 x_i 之中，一般总有重复的情形。我们用 n_k 表示指标 x_i 的重复次数，它亦即是这一指标出现的相对频度(frequency)，而对应的绝对频度则定义为概率：

$$P_k = \frac{n_k}{N}$$

于是，对这 N 个对象指标调查的平均值公式就可以表示成

$$\langle x\rangle = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i = \sum_{x} P_k x_k$$

在上式的第一个求和式里的 x_i 是可以有重复的，而第二个求和式里的 x_k 则是各不相同的。以上讲的就是概率的频度解释。它是唯一的一种具有明确操作意义的概率解释。

在以上的描写中，大量同类事件按不同方式发生的总概率，等于按各种方式发生的各个概率之和。所以，在这里概率是遵守着叠加法则的基本量。例如，一个对象从初始状态 A 变化到终末状

态 C，可能通过两种不同的中间途径 B_1 和 B_2 进行。设通过 B_1 和 B_2 的概率分别为 P_1 和 P_2，那么，这类事件发生的总概率为

$$P = P_1 + P_2$$

这种概率叠加的规则同人们日常生活的经验，以及从宏观物体轨道运动方式所得出来的认识是相容的。这是普通统计的第二个主要特点。

与此相关，普通统计的第三个特点是认为，每种个别事件的结果都是有确定的原因可以追寻的。亦即是说，构成人们观察数据的频度或概率，就是受到已知和未知原因支配的某种事件发生次数的表现。其中的未知原因，虽然由于人们能力的限制暂时未能掌握，但是他们相信每种事件的发生总是受到某些确切原因决定的结果。

例如，在医学统计里，能够从许多个人健康状况的变化，调查出社会人群中各种疾患的发病率、存活率与死亡率等数据。而且，任何个人的患病和死亡都是有原因的。假若我们已经掌握了一门理想的医学，那么，这种原因总是可以认识到的。即使患者生前未能得到确诊，在死后进行检验，总能找出是由于哪一些系统或者哪一些器官失效而导致死亡的。所以，每一桩死亡事件，或者更一般地讲，每个人的生老病死，都是受到可以查明的因果关系支配的。

可是，目前的医学和生物学没有成熟到这个程度。在这些领域内，对于某些疑难病例，至今还找不出确定的原因。所以，人们在很大程度上，只能满足于对大量医疗案例的统计关联结果的分析研究。相反的情况是，在经典物理学里，例如在质点力学里，我们通过运动方程的解，而不需要使用什么统计方法，就能够对所研究的个别对象的运动变化做出确切的预言。由此可见，上述那种运用概率统计的方法来寻找事件发生的可能原因的做法，常常是人们在不掌握个别事件出现结果的确切原因的情况下，不得已而采取的一种权宜之计。

此外，还有一种情况，例如在某项社会调查或者产品检验中，由于研究对象的数量太大，人们不可能也不必要对每一个个体进行详细的调查和检验。在这种情况下，通常采用抽样的方法，选出一些有代表性的个体样品，通过对这些样品的调查或检验，就可以达到掌握关于全体的了解的目的。（在执行产品的破坏性检验时，当然只能使用抽样的办法。）这种运用归纳统计的方法，根据选定的部分样品的测定数据，来估算全体对象达到指定要求的百分比的做法，也只是由于条件所限而采取的简便手段。

总之，在普通统计里所表现出的统计决定性，只是建筑在个体因果决定性基础上的一种派生现象。

二、统计决定性Ⅱ——经典统计物理学中的统计方法

在第三章里已经叙述过气体动态理论和后继的统计物理学理论的建立过程和一些典型例子，我们在这里主要对其中运用的统计方法的特点进行分析。

经典统计物理学的计算，是建筑在假定宏观物理系统的每个组分粒子，都遵循着牛顿力学的运动规律，亦即每个微观个体都受完全决定性支配的基础之上的。在这方面，统计决定性Ⅱ和统计决定性Ⅰ具有共同的特点。按照这条假定，只要了解到某一初始时刻每个粒子的坐标和动量以及它们所受到的相互作用，原则上就可以根据已经掌握的动力学方程，预言出每个粒子的将来的任意时刻的坐标和动量。

可是，这种关于每个微观个体都服从某种因果定律的演化图景，只是一种理论上的想象。实际上，由于系统所含粒子的数目非常庞大，不可能对它们的坐标和动量逐一进行测量。我们既不可能在指定时刻同时测量所有粒子的初始坐标和动量，也不可能实时监视所有粒子后来的坐标和动量的变化。在这一点上，统计决定性Ⅱ又是与统计决定性Ⅰ不相同的。只是由于早期对物理系统

的宏观参数的测量数据，同理论上对相应的各种可能的微观状态的统计平均结果基本符合，以及长期以来对经典物理学理论的依赖，才使人们对这条假定保持着信心。

如上所述，在经典统计物理学里，并不可能也不需要对每个微观个体的状态进行测量。这些微观状态，只出现在统计平均的计算过程当中。而每次对物理系统进行测量所得到的，就是作为理论上的统计平均结果的一个宏观量（例如气体的压强和温度）。由此可见，统计决定性Ⅱ与统计决定性Ⅰ在具体操作的意义上，存在着巨大的实质差别。

统计物理学开始的时候，是运用概率方法进行统计平均而取得成功的。例如，不同的宏观状态所对应的微观状态数目，就同它出现的概率成比例。在这种计算里，使用的是传统概率论的数学方法，这种方法是以概率为满足叠加法则的基本量的。在这一点上是与普通统计相同的。

后来，吉布斯在20世纪初又提出了系综方法。统计系综是由处在相同的宏观条件下的许多个组分和大小都完全相同的系统组成的集合。每个这样的系统就是这个系综中的一个成员，它们虽然都处在相同的宏观条件下，却可以有各不相同的微观状态。有人把系综比喻为孙悟空拔出一撮毫毛所变成的许多个一模一样的孙猴子。它们不是表演着整齐划一的团体操，而是在同一时刻里各自做出千姿百态的自选动作。系综方法里的统计平均，就是用对大量系综成员的平均来代替对个别系统的各种微观状态的平均，所以又叫做系综平均。

要注意的是，经典统计物理学里的这种系综，只是供统计平均计算用的一种理论模型，它只存在于人脑里面。实际的测量工作只需要对单个的宏观系统进行。系综概念的提出，是以同一种类的微观粒子都是相同的这一性质为基础的。与此相反，我们知道，宏观对象是各不相同的，所以不可能在普通统计里建立系综的概

念。可是，在经典统计物理学的计算里，对同一种类的微观粒子是编上号码来进行处理的。这种做法反映了，在观念上虽然认为它们是彼此相同的，但又设想它们是可以互相辨别的。所以，这种微观粒子的相同性在理论上是不彻底的。

三、统计决定性Ⅲ——量子力学的统计方法

与以上所讲的两种情况都不相同，微观现象中的统计性即统计决定性Ⅲ，不是建筑在个别事件的因果规律之上的，而是一种全新类型的、本质上的统计性。

我们说过，在微观物理学里，因果联系一般只表现在像指数式衰变律那样的统计性规律上，而个别事件发生的具体方式，则是找不出原因的。所以我们说，微观现象的统计性，是一种本质上的统计性。这是它的第一个主要特点。

与此相关的是，在量子理论里，例如同一种原子核那样的同一种粒子，不仅都是相同的，而且是不可辨别的，包括不可以给它们编上号码。量子力学里的粒子全同性原理，就反映了这一点。那么，各个原子核既然是完全相同而不可辨别的，就不应当有老少强弱之分。从这个角度看，处在完全相同的外界条件下的两个完全一样的原子核为什么衰变有先后，也是不可能找出什么具体原因来的。

统计决定性Ⅲ的第二个主要特点是，与上面讲过的两种统计决定性都不相同，量子力学里的基本量不是概率 P，而是概率幅 ψ。亦即是说，在量子力学里遵守着叠加法则的是概率幅 ψ 而不是概率 P。例如，一个微观粒子从初始状态 A 变化到终末状态 C，可能通过两种不同的中间途径 B_1 和 B_2 进行。设通过 B_1 和 B_2 的概率幅分别为 ψ_1 和 ψ_2，那么，这类事件发生的总概率幅为

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

对这一式子的左方和右方分别取绝对值平方就得到相应的总概

率为

$$P = P_1 + P_2 + (\psi_1^* \psi_2 + \psi_2^* \psi_1)$$

式中运用了在上一节里给出的每一项概率等于相应的概率幅的绝对值平方的公式。拿这一公式同上面给出的概率叠加公式比较，可以看到概率幅叠加法则的结果多出了括号里的“干涉项”。这个干涉项的出现正是量子力学区别于经典物理学的关键之处。

由于在量子力学里，唯一能够用运动方程来描写随时间演化的因果联系的，只是概率幅 ψ 而不是任何具体的物理量，而 ψ 函数的意义又全在于它是反映对大量微观事件测量结果的统计分布情况的概率幅度；所以，在量子力学里自然得不到对个别微观事件的因果性描述了。

第三，依照量子力学，每次测量一个动力学变量的结果，只可能是与该力学量相对应的算符 F 的所有本征值当中的一个。与上面所讲的统计决定性Ⅱ相反，量子力学和普通统计的共同点是每次测量得出的是某一个特征值，而平均值则是由它们计算出来的。不同的是，量子力学里的概率是由理论直接算出来的，而不是建筑在个别事件的因果规律之上的派生结果。

最后，量子力学既然是一种关于全同粒子的统计性理论，它必定也可以使用系综方法。量子力学里的系综概念，同经典统计物理学里的系综是一样的。不过，既然在量子力学里，每次测量到的是一个本征值而不是平均值，它所使用的系综就不是一种仅仅用来计算的想象，而是需要在测量过程中实现的。具体说来，为了积累计算实验平均值所必需的足够多的观察数据，需要对在同样的宏观条件下制备出来从而保证处在同一状态的许多个系统进行多次的测量。这种做法就是量子系综的实现。（参看文献[13]，第2.3节）

四、统计决定性分析

通过以上对统计决定性Ⅰ，统计决定性Ⅱ和统计决定性Ⅲ的具体解剖，我们看到了一幅丰富多彩的图象。这三种统计决定性虽然都反映了由大量个体组成的整体所表现的统计性质，但是它们之间存在的差别，在某些方面其实并不比它们同完全决定论的差别更小。以下列出一张简明的表格，按以上所说的五个方面来表示这几种统计决定性之间的异同。

统计决定性	统计性	每次测量	理论的基本量	系综方法	同类个体对象
Ⅰ	派生	个别值	概率	无	各不相同
Ⅱ	派生	平均值	概率	有	相同但可辨别
Ⅲ	本质	个别值	概率幅	有	相同且不可辨别

总而言之，在哲学上简单地把统计决定性看做无从分析的“铁板一块”，或者粗暴地把它当成违反某种原理的“异端邪说”，都是不利于科学，更不利于哲学本身的发展的。

A4 规律性、决定性和因果性辨析[18]

一、需要对规律性、决定性和因果性分别作出解说

在我国长期被当做辩证唯物主义权威著作的文献[3](第142页)里写道：

> “决定论是关于一切事件和现象的有规律的、必然的联系及其因果制约性的学说。”

在这句话里，一下子把决定性、规律性、必然性和因果性这四个概念端出来。而当我们去查看这部辞典中对规律性、必然性和因果性这几条辞条的解释时，却发现其中除了诸如“本质联系”和

“普遍依存”之类的原则性指示之外，主要就是这几条条目释文的互相参照，不能够由这种循环式的解说对这几个重要概念的实质内容，分别找出清楚而确切的规定来。而且，在直到近年国内出版的一些重要辞书里的有关条目，基本上都沿用着与此相同或相近的一些解说[19]，这种情况显然是不能令人满意的。不过，近来在国内外的哲学界和物理学界亦发表了谈论到甚至专门论述统计决定性的不少文献[20]。在附录最后这一节里，我们试图依据现代科学的成就，并且在总结附录前面三节讨论的基础上，进一步厘清这几个哲学概念的本来涵意和整理它们之间的从属关系。

在 A1 和 A2 两节里讲过了，决定性有两种形式，一种是因果式决定性，一种是非因果式决定性。一般把非因果式决定性称为关联。或者，由于实际上因果式决定性也表现为一种关联，即因果性的关联，所以亦把非因果式决定性专称为“纯关联”，即非因果式的关联，以示区别。在那两节里，分别讨论了经典物理学和量子物理学里因果性和关联的不同表现形式。

在 A3 节里又讲到，决定性划分为完全决定性和非完全决定性两种。前者决定的是发生确定的某种事件，而后者决定的是某种事件发生的可能性即统计概率，所以后者又称统计决定性。在那一节里还从不同的几个角度，对在普通统计学、经典统计物理学和量子力学里的三种不同统计决定性的特征做了分析。

由于因果性的观念早已深入人心，而人们常常不习惯从纯关联的视角去看问题，所以往往会把一些纯粹的关联误认为因果关系。其实，非因果式的关联也有几种不同的表现形式，值得我们注意和研究。

例如，让两个受试者 A 和 B 相向而立，试验者 C 在两人中间持一纸牌。那么，A 看到纸牌正面时，B 必定看到反面；反过来，A 看到反面时，B 必定看到正面。这种结果，就是一种完全相反的关联，即百分之百的负关联。又如，让 A 和 B 并排而立，试验者在两

人面前持一纸牌。那么，A 看到正面时，B 必定亦看到正面；反过来，A 看到反面时，B 必定亦看到反面。这种结果，则是一种完全相同的关联，即百分之百的正关联。这两种关联都呈现了确切的决定性或者说完全的决定性，但 A 和 B 的观察值之间，并不存在因果性的联系。这就是两个非因果性关联的例子。

一般的关联没有这么简单。一般说来，对于只有两种相反测量值的情况，两个受试者的测量结果有时候是相同的，有时候是相反的，这时候只能得到统计性的关联。例如，如果你向一对夫妇调查某一个只有正反两个答案的民意测验项目，那么两人的回答可能是相同的，也可能是相反的，不能说明什么问题。然而，当你对许多对夫妇做了这样的调查之后，就可以统计出呈现某种关联的结果。假如一对对夫妇意见相同的回答比意见相反的多，就称为正关联；意见相反的比相同的多，就称为负关联。用“关联度”来做定量的描述，正关联的关联度从 0 到 100%，负关联的关联度则从 0 到 −100%。上面讲的完全相同和完全相反的两个例子，就是关联度等于 +100% 和 −100% 的两种极端情况。

最后，如果把两个受试者 A 和 B 隔离开来，让两人分别观看由两个试验者独立出示的两张一样的纸牌。那么，A 和 B 两人看到的牌面，有时是相同的，有时是相反的。如果两边的试验没有受到事先约定或者现场干扰的影响，并且进行了足够多次的话，A 和 B 两人看到的牌面相同和相反的次数应当趋于相等。这种随机取样的结果叫做零关联，相应的关联度等于零，表明完全丧失了决定性，就会出现纯随机的非决定性。

关于不完全决定性即统计决定性，本章的前面几节已经做了比较详细的讨论。并且，我们早在第 1.2 节里已经引述过马克思在他的《博士论文》里，对伊壁鸠鲁“超出决定论”的赞许。所以，尽管一些自称为“马克思主义者”的作者不承认和不容忍任何形式的非决定性[21]，但那决不符合马克思本人的见解。

二、非决定性的随机性也是一种规律性

在第 3.4 节和第 4.2 节里我们已经讲到过，在 1905 年里，爱因斯坦对做布朗运动微粒平均位移的理论研究结果，以及许外德勒对实际的放射性衰变事件对严格指数定律的偏差的理论研究结果，都得到了实验的证实。而在数学上讲，这两种理论处理实际上都是随机过程的应用。亦即是说，在这两种情况下，布朗微粒的各次位移和放射性元素的各次衰变的发生，都是零关联的。或者说，我们完全不可能预测布朗微粒的下一次位移的距离和放射性元素下一次衰变的时刻。这正是完全的非决定性的表现。

此外，在第 7.4 节里亦指出了："'激光'的光子到达时间序列是纯随机分布的，即在指定时间内两个光子相继到达的计数率不依赖于这一时间间隔的长短；或者说两个光子在任意时间间隔内相继到达的机会都是一样的。"这是现代物理学里既有理论分析亦有实验验证的又一种随机过程的例证。至于与物理学实验密切相关的误差分析，就是以数学上的随机过程理论为基础的。假使像那些厌恶或者害怕非决定性的哲学家们所说，随机序列根本无规律可言，那行之有效的误差分析理论岂非要全部作废了?!

所以，作为非决定性典型的随机性决不是没有规律的，零关联就是它的规律。随机性不是随随便便，乱七八糟，毫无规律可言。说某一种自然过程是随机发生的，这就说出了它所遵从的一种规律。对随机性既有理论上的计算，又有实验上的检验，还存在着应用的可能，怎能把它排除在规律性范畴之外呢？

随机性(randomness)，在物理学上又译为无规性，指的是没有规则的意思。每个放射性原子各自进行衰变，不存在任何互相制约的规则，这就是一种明确的规律。所以，我们得到的结论是，规律性里面既包含了决定性，也包含着非决定性；承认事物和过程的规律性，不一定就是决定论。

我们看到，近年有不同的研究者分别对原子的自发辐射[22]和放射性核素的衰变[23]，进行了这方面的实验，并且得到了相应过程的随机性的直接证据。在这两项工作中，分别对反复激发的一个原子先后发出的许多次光辐射的时间序列，和一块放射性物质先后发生的许多次核辐射的时间序列进行研究，结果检测不出有任何关联式样的存在。亦即是说，这些结果初步直接证明了有关的序列，都是良好的随机数序列。（反过来，如果发现这些数据序列有任何形式的非零关联，那就起码可以做出一种概率性的预测，即是说起码存在着一种统计式的决定性了。）

随机数序列是一种理想的、其内部不存在着任何关联的数列，例如它是在计算机上进行蒙特卡罗等计算方法时所必需。此外，还可以用这种完全无关联的随机数序列，编制原则上不可破译的通信密码。但是，目前在计算机上以电子技术方法为基础而产生的随机数列，都达不到这种理想，因而被称为伪随机数（pseudo-random number）。如果证实了例如放射性衰变那样的自然过程，的确会产生出理想的随机数序列，无疑就会给有关的技术带来积极的推动。我们相信，这种应用方面的前景，可能是近年深入钻研这个问题的动机之一。

三、规律性、决定性和因果性的从属关系

每门实验科学在其初始阶段，都是从对关联的认识开始的。处在描述性阶段的学科，研究的都是各种关联。在物理科学里运动学的描写，也属于这种阶段。此外，像气体状态方程和固体弹性定律等物性学规律，显然也属于非因果性的纯关联。物理学发展到建立动力学理论，写出基本的运动方程，就可以算出处在已知外界影响或作用之下的系统状态的变化，从而作出因果式的预言。

要注意的是，在不同的动力学理论里，满足运动方程的基本量是不一样的。在经典力学里，这些基本量是坐标和动量之类的物

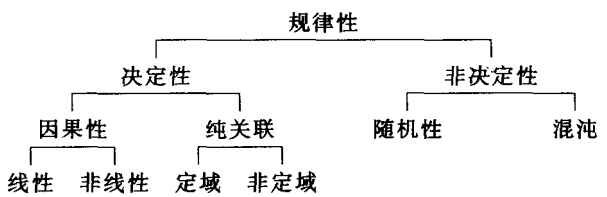
理量，因此所给出的是轨道式运动的因果描述。而在量子力学里，满足运动方程的基本量不是任何物理量，而只是作为概率幅的态函数。因此，在这种新型的动力学理论里，只出现概率幅演化的因果描述。因为概率幅的意义全在于，它的模方代表着对系统进行多次测量时所得到的观察值出现的频度，所以量子力学原则上不给出例如粒子轨道运动那样的个别系统行为的因果性描写。

此外，在量子力学里粒子全同性原理的引入，又导致了在经典物理学里不可能出现的，诸如泡利不相容性和以贝尔不等式为代表的 EPR 效应等一些新型的统计性的纯关联，使得对非因果性关联的研究，占有越来越重要的地位。

依靠对经验材料的简单描述和整理，停留在理性认识的这种低级阶段，仅能得出它们之间的一般性关联；只有建立起动力学理论，达到了理性认识的这种高级阶段，才有可能发现其中的因果性联系。所以，因果性和纯关联的划分，不是固定不变的。随着新的科学理论的建立和旧理论的废弃，会认识到原先的一些一般性关联其实是因果关系，而原先误认的一些因果关系也会退化为纯粹的关联。

至于脱离科学理论而主张的因果性，例如认为一切决定性都必定可以归结为因果联系的主张，亦不过是一种主观的信念。上面已经讲过，现代物理学的成就不支持这种唯因果论的信念。所以，我们不同意把决定性局限为因果关系的简单化观点。

综上所述，我们所提出的基本看法，可以用以下的一幅等级体系图表示，说明所提到的一些哲学概念之间的包容和区别的关系：



如上图所示，规律性包括了决定性和非决定性，决定性又包括了因果性和纯关联。因此，决定性和因果性都不是普遍存在的。这就是我们的主要结论。

此外，按照上一节的分析，决定性可分为完全决定性和统计决定性两类；而后者又可以再分成统计决定性Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ等三种本质上不相同的形式，分别代表普通统计、经典统计物理学和量子力学里的统计决定性。因此，对于刚刚提到的每一种决定性形式，都可以画出以上所表示的一幅平面图形，那么整个体系就形成一套上下重叠的多层面立体图形了。

至于图上所表示，因果性又区分为线性的和非线性的，关联亦区分为定域的和非定域的，这些更精细的划分，就不在这里谈了。此外，图上又表示，非决定性除了随机性之外，还可以采取混沌的形式，也不一定十分合适。总之，在这个基本框架内的所有这些具体问题，只是写出来供参考探讨，都不是什么定论。

面对着新世纪的来临，我们的哲学应当从丰富的现代科学成果中汲取有益的营养，努力做出新的总结和概括，从而发展出唯物主义的新形式。

参 考 文 献

[1] 本节内容是下述文章的简缩：关洪，成素梅，卢遂现，因果性和关联，《自然辩证法通讯》，1995 年 17 卷 5 期，7 页。

[2] B. Russell, On the Notion of Cause, in *Mysticism and Logic*, Norton & Co., 1929, p. 180.

[3] 罗森塔尔，尤金编，《简明哲学辞典》中译本，北京：三联书店，1973，487—491 页。

[4] 关洪，崔世治，试论热力学初始规定的公理性质，《中山大学学报·自然科学版》，1983 年 2 期。

[5] 关洪，力学的基本概念(Ⅰ)惯性定律，《大学物理》，1984 年 11 期。

[6] Galileo Galilei, Dialogues concerning Two New Sciences, H. Crew and

A. de Salvio translated, Macmillan Co., 1914, pp. 166—167.

[7] 关洪,空间和时间的动力学本性,《物理通报》,1991 年 11 期。

[8]《马克思恩格斯全集》第二十三卷,北京:人民出版社,1972,第 8 页。

[9] 例如:M. Born, Natural Philosophy of Cause and Chance, Oxford U. P., 1949.

[10] P. Frank,《科学的哲学——科学和哲学之间的纽带》,许良英译,上海:上海人民出版社,1985,第十五章。

[11] E. Nagel, The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation, Hackett Pub. Co., 1979, chapter 10;中译本:《科学的结构》,徐向东译,上海:上海译文出版社,2002,第十章。

[12] 本节内容是下述文章的简缩:关洪,成素梅,卢遂现,微观领域中的因果性和关联,《自然辩证法通讯》,1996 年 18 卷 5 期,11 页。

[13] 参看:关洪,《量子力学的基本概念》,北京:高等教育出版社,1990,77 页。

[14] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Physical Review, 47(1935), 777;译文引自:《爱因斯坦文集》第一卷,许良英译,北京:商务印书馆,1976;有关介绍参看文献[13],第 7.1 节。

[15] 玻尔关于整体性讲得比较清楚的一段话是:"真正量子现象所特有的整体性特点,是在下述情况中得到逻辑表示的:任何明确规定的再分划的尝试,都会要求对实验装置进行一种和所研究现象的定义不相容的改变。"参看:玻尔,《原子物理学和人类知识论文续编》,郁韬译,商务印书馆,1978,第 6 页。

[16] 本节内容是下述文章的简缩和改写:关洪,成素梅,统计决定性分析,《哲学研究》,1995 年 12 期,44 页。

[17] 我们随便找一找,就看到三种有广泛影响的现代专业辞书采取这种说法。它们是:The Encyclopedia of Philosophy, P. Edwards (ed.), Macmillan Pub. Co., 1967; Dictionary of the History of Science, W. F. Bynum *et al.* (ed.), Princeton U. P., 1981; A Dictionary of Marxist Thought, T. Bottermore (ed.), Blackwell Reference, 1983.

[18] 本节内容是下述文章的简缩和改写:关洪,成素梅,决定性、规律性和因果性辨析,《自然辩证法通讯》,1998 年 4 期,69 页。

[19] 例如:《中国大百科全书·哲学卷》,中国大百科全书出版社,1987;《哲学大辞典·马克思主义哲学卷》,上海辞书出版社,1990。

[20] 例如:李明华,历史决定论的三种形式,《中国社会科学》,1992 年第 6 期。《哲学概念辨析辞典》,中央党校出版社,1993,其中的"决定论"辞条里,已经把统计决定论列为决定论的几种重要表现形式之一。此外,在国内外都有不少物理学家承认和研究量子力学里的统计决定性。例如:E. Bitsakis, Quantum Statistical Determinism, Foundations of Physics, 18(1988), 331,这篇文章专门论述了量子力学里的统计决定性;王正行,《在解题中学习近代物理》,北京大学出版社,2004,这本教材 115 页里亦有"统计性的因果关系"的提法。

[21] 例如:庞元正,《决定论的历史命运——现代科学与辩证决定论的建构》,北京:中央党校出版社,1996;同一作者此前的几篇文章里,亦有相同的说法,见:非决定论泛起的社会文化背景,《哲学研究》,1992 年 2 期;决定论与非决定论之争的现实意义,《求是》,1992 年 7 期;现代科学证实了非决定论了吗?《中国社会科学》,1993 年 6 期。

[22] Flipping a quantum mechanical coin, Science News, 146 (1994) July, 16, 47.

[23] R. Aguayo *et al.*, Throwing nature's dice, Am. J. Phys., 64 (1996), 752.

基本参考文献

[1] 关洪. 物理学史选讲. 北京:高等教育出版社,1994

[2] Boorse H A, Motz L (ed.). The World of Atom, vols. I—II. New York: Basic Books, Inc, 1966

[3] Magie W F(ed.). 物理学原著选读. 蔡宾牟译. 北京:商务印书馆,1986

[4] Pais A. Inward Bound:Of Matter and Force in the Physical World. New York: Oxford University Press, 1986;中译本:基本粒子物理学史. 关洪,杨建邺,王自华,傅冬梅译. 武汉:武汉出版社,2002

[5] Amaldi E. From the Discovery of the Neutron to the Discovery of Nuclear Fission. Physics Reports, 1984, 111: 1—332

[6] MacKinnon E M. Scientific Explanation and Atom Physics. Chicago: The University of Chicago Press, 1982

[7] Gillispie C C (ed.). Dictionary of Scientific Biography, vols. 1—16. New York: Charles Scribner's Sons, 1970—1980

人名索引

（限本书正文中人名，按照汉语拼音字母和外语原文字母混合排序）

A

艾修斯(Aetius) 5，9，11
阿尔瓦雷兹(L. W. Alvarez) 201
安培(A. M. Ampère) 56
阿那克萨戈拉(Anaxagoras) 9，10，11，22
阿那克西曼德(Anaximandros) 5，6
阿那克西美尼(Anaximenes) 5
安德森(C. D. Anderson) 189，206
亚里士多德(Aristotle) 4，10，11，22，36，310，314
阿伏伽德罗(A. Avogadro) 56，57，68

B

巴仑泰 (L. E. Ballentine) 239
巴耳末(J. J. Balmer) 135
巴克拉(C. Barkla) 108
贝克(H. Becker) 179
贝克勒耳(H. Becquerel) 98，108—110
贝尔(J. S. Bell) 275
伯努利(D. Bernoulli) 47—49，59，61，66，86
贝特(H. A. Bethe) 165，215
比勒尔(E. S. Bieler) 202
布隆德洛(R. Blondlot) 98，99
布尔哈夫(H. Boerhaave) 46
玻姆(D. Bohm) 146—148，322
玻尔(N. Bohr) 126，128，134—138，148，149，151，168—171，173，174，193—195，197，206，274—277，281，283，284
玻尔兹曼(L. Boltzmann) 76，78，79，80，83，84，122，155
玻普(F. Bopp) 148
玻恩(M. Born) 143，149—154，158，161，162—166，193，212，319

玻色(S. N. Bose) 123
波斯科维奇(R. J. Boskovic) 50
博特(W. Bothe) 179
玻意耳(R. Boyle) 35, 37, 38, 44
布拉格(W. H. Bragg) 140
布赖特(G. Breit) 204
布儒斯特(D. Brewster) 68
布朗(R. Brown) 89, 90
邦格(M. Bunge) 166
拜斯-巴洛特(C. H. D. Buys-Ballot) 72

C

康尼扎罗(S. Cannizzaro) 56
卡诺(N. L. S. Carnot) 47
卡森(B. Cassen) 204, 208
查德威克(J. Chadwick) 180, 182, 184, 185, 196, 202
查理(J. Charles) 52
克劳修斯(R. Clauxius) 70—75, 86
科克饶夫(J. D. Cockcroft) 190
康普顿(K. T. Compton) 125, 126, 169, 192, 193
康顿(E. U. Condon) 204, 208
科斯特(D. Coster) 137
库仑(G. A. Coulomb) 46
柯朗(R. Courant) 153, 157
克鲁克斯(W. Crookes) 102, 103, 113
居里夫人(M. Curie) 109, 110, 113, 192
居里(P. Curie) 109, 110, 114

D

道尔顿(J. Dalton) 51—57
戴维孙(C. J. Davisson) 143, 144,
德布罗意(L. de Broglie) 140—143, 145—147
德布罗意(M. de Broglie) 140
德拜(P. Debye) 123, 127, 155, 169
德耳索(J. J. Delsaux) 90
德谟克利特(Democritus) 11—15, 33, 35
笛卡儿(R. Descartes) 31—33, 38, 41, 42, 49, 131
丁肇中 255
第奥根尼·拉尔修(Diogenes Laertius) 9, 11, 22
狄拉克(P. Dirac) 149, 154, 155, 159, 160, 168, 184—189, 194, 198, 212, 213, 238—242
杜隆(P. L. Dulong) 118
戴孙 (F. J. Dyson) 217

E

艾卡特(C. Eckart) 158
埃仑费斯特(P. Ehrenfest) 173
爱因斯坦(A. Einstein) 87—89, 91, 93, 123—127, 136, 140, 143, 151, 155, 157—160,

191，193，194，198，213，237—240，242，257，269，274，275，322，324，335
艾利斯(C. D. Ellis) 193，197
埃尔萨瑟(W. Elsasser) 143，144
埃尔斯特(J. Elster) 114
恩培多克勒(Empedokles) 4
恩格斯(F. Engels) 24，102，294，296
伊壁鸠鲁(Epikouros) 12—14，33—35，44，334
欧几里得(Euclides) 18
欧拉(L. Euler) 45，49，59
埃弗里特(H. Everett Ⅲ) 276—278

F

法拉第(M. Faraday) 96，100，101
费米(E. Fermi) 160，191，197—200，221，225，289，295
费曼(R. P. Feynman) 16，160，166，215—217，233，239，258，259，276—278，283，296，301
佛雷(H. M. Foley) 214
傅里叶(J. B. J. Fourier) 47
弗兰克(J. Frank) 143，162
弗兰克(P. Frank) 316
富兰克林(B. Franklin) 102
菲涅耳(A. J. Fresnel) 53
弗洛里希(H. Fröhlich) 208

G

伽利略(Galileo Galilei) 30，35，36，314
伽伐尼(L. Galvani) 82
伽莫夫(G. Gamow) 191
伽森狄(P. Gassendi) 33—36，195
盖吕萨克(J. L. Gay-Lussac) 55，56
盖革(H. W. Geiger) 111，130—132
盖特尔(H. Geitel) 114
盖尔曼(M. Gell-Mann) 222，226—228，233，275，276，282—284，297
乔治(H. M. Georgi) 263
盖拉赫(W. Gerlach) 169
革末(L. H. Germer) 143，
吉布斯(J. W. Gibbs) 85，329
格拉肖(S. Glashow) 253，262，263，271
格劳伯(R. J. Glauber) 239，240
哥耳德斯坦(E. Goldstein) 97，103
公孙龙 22，23
戈顿(W. Gordon) 186，247
高德斯密特(S. Goudsmit) 173
高伊(L.-G. Gouy) 90
格林(M. Green) 269
格里费斯(R. B. Griffiths) 281
格罗斯(D. J. Gross) 261，262

H

哈斯(A. E. Haas) 133—135

哈雷(E. Halley) 190
韩(M.-Y. Han) 230
汉森(H. M. Hansen) 135
赫拉帕斯(J. Harapath) 62—64, 66—70
哈特(J. Hartle) 282
黑格尔(G. W. Hegel) 23, 26, 294, 295
海森伯(W. Heisenberg) 8, 149, 150—154, 157, 171, 173, 174, 184, 185, 187, 194, 195, 198, 202—204, 213, 221, 302—306
海特勒(W. Heitler) 57, 208
亥姆霍兹(H. von Helmholtz) 70, 71, 101
海明威(E. Hemingway) 84
赫拉克利特(Herakleitos) 5
赫舍耳(W. Herschel) 97
赫兹(G. R. Hertz) 103, 106
赫维西(G. von Hevesy) 137
希格斯(P. W. Higgs) 251
希尔伯特(D. Hilbert) 153, 157
希托夫(W. Hitorf) 97
霍夫斯塔特(R. Hofstadter) 220, 296
霍耳顿(G. Holton) 29, 257
胡克(R. Hooke) 44, 45, 49, 59, 191
霍尔甘(J. Horgan) 275
惠更斯(C. Huygens) 131

I

池田峰夫(M. Ikeda) 225
伊万宁柯(Д. Д. Иваненко) 184

J

金斯(J. H. Jeans) 128
金吾伦 293
约里奥-居里夫妇(J. Joliot and I. Curie) 180, 181, 200, 201
约丹(P. Jordan) 153, 154, 198, 212, 213
焦耳(J. P. Joule) 69
乔伊斯(James Joyce) 228

K

卡鲁扎(T. Kaluza) 269
考夫曼(W. Kaufmann) 104
开尔文(Kelvin, 又见: W. Thomson) 117, 119
克默(N. Kemmer) 208, 209
开普勒(J. Kepler) 66
基尔霍夫(G. R. Kirchhoff) 119
克莱因(O. Klein) 186, 213, 269, 270
克拉默斯(H. A. Kramers) 138, 150, 151, 171, 193
克仑尼希(A. K. Krönig) 70, 71
克仑尼希(R. Kronig) 171—173
库恩(W. Kuhn) 152

库尔鲍姆(F. Kurlbaum) 120
库什(P. Kusch) 214

L

兰姆(W. E. Lamb) 214
朗道(L. Landau) 160
兰德(A. Landé) 170, 171
郎之万(P. Langevin) 93, 143
老子 2, 5, 6
拉普拉斯(P.-S. M. de Laplace) 46, 64, 74
拉摩尔(J. Larmor) 105, 169
劳厄(M. Laue) 108
拉瓦锡(A. L. Lavoiser) 51
劳伦斯(E. O. Lawrence) 190
莱布尼茨(G. Leibniz) 18, 19, 191, 320
勒纳德(P. Lenard) 103, 106, 124, 128
列宁(В. И. Ленин) 24, 294
留基伯(Leucippus) 11, 12
刘易斯(G. N. Lewis) 125
洛必达(G. L'Hospital) 18
李政道 231
梁启超 3, 20
伦敦(F. W. London) 57
洛伦兹(H. A. Lorentz) 104, 105, 107, 128, 169, 258
洛施密特(J. Loschmidt) 77, 81, 85
卢克莱修(Lucretius) 10, 14—16, 22, 30, 35
卢梅尔(O. Lummer) 119

M

马赫(E. Mach) 19, 82, 84, 94
马尔科夫(A. Markov) 92
马斯登(E. Marsden) 130, 132
马克思(K. Marx) 13, 26, 33, 35, 294, 314, 334
麦克斯韦(J. C. Maxwell) 64, 68, 70, 72, 74—79, 86, 102, 118, 123, 128, 198, 269
迈厄(A. M. Mayer) 129
迈特纳(L. Meitner) 192
门捷列夫(Д. И. Менделеев) 58
密立根(R. A. Millikan) 107, 124, 126, 188
米尔斯(R. L. Mills) 249
墨子 19
莫塞莱(H. G. J. Moseley) 132
莫特(N. F. Mott) 165, 197

N

内格里(C. Von Naegeli) 90
长岗半太郎(H. Nagaoka) 128, 129, 134
纳格尔(E. Nagel) 316, 319
南部阳一郎(V. Nambu) 230
李约瑟(J. Needham) 21
尼曼(Y. Ne'eman) 226
能斯特(W. Nernst) 127, 194

钮兰兹(J. A. R. Newlands) 57, 58
牛顿(I. Newton) 35, 39—45, 49, 52, 59, 63, 66, 100, 131, 190, 191, 196, 210
尼科耳孙(J. W. Nicholson) 134
尼尔森(H. Nielsen) 269
西岛和彦(K. Nishijima) 222
奈(M. J. Nye) 100

O

小川修二(S. Ogawa) 225
大贯义郎(Y. Ohnuki) 225
奥姆内(R. Omnès) 282, 283
奥本海默(J. R. Oppenheimer) 164, 188
奥斯特华尔德(W. Ostwald) 82, 84, 95

P

派斯(A. Pais) 222—234, 237, 256
帕尔森斯(A. L. Parsons) 168
帕斯卡(B. Pascal) 37
泡利(W. Pauli) 145, 149, 150, 153—155, 158, 160, 164, 170, 171, 191, 196—198, 213, 250
佩兰(J. B. Perrin) 93, 94, 114, 128, 184
珀蒂(A. T. Petit) 118
皮奇安尼(O. Piccioni) 234
普朗克(M. Planck) 81, 119—124, 126, 133, 138, 157, 194
柏拉图(Plato) 7, 8, 14
普吕克尔(J. Plücker) 97
波多尔斯基(B. Podolsky) 322
庞加莱(J. H. Poincaré) 91, 98, 129
泊松(S.-D. Poisson) 64
珀立策(H. D. Politzer) 261
珀普尔(K. Popper) 166
珀威尔(C. F. Powell) 207
普雷森特(R. D. Present) 204
普鲁斯特(J. L. Proust) 52
普劳特(W. Prout) 58, 59, 183
毕泰戈拉(Pythagoras) 6, 270

R

瑞利(J. W. Rayleigh) 67, 120, 122
莱因斯(F. Reines) 201
里瑟福(R. C. Retherford) 214
里特(J. Ritter) 97
里兹(W. Ritz) 135
伦琴(W. C. Röntgen) 98, 107
罗森(N. Rosen) 322
罗森布鲁斯(M. N. Rosenbluth) 220, 296
鲁比亚(C. Rubbia) 256
鲁本斯(H. Rubens) 120
罗素(B. Russell) 13, 310
卢瑟福(E. Rutherford) 110—115,

117，128—134，138，179—181，183，184，188，192

S

坂田昌一(S. Sakata) 207，296，297
萨拉姆(A. Salam) 253，254，256，262
谢尔克(J. Scherk) 269
薛定谔(E. Schrödinger) 144，149，155—158，161，162
舒斯特(A. Schuster) 103
施瓦兹(M. Schwartz) 269
许外德勒(E. R. von Schweidler) 115，116，335
施温格(J. S. Schwinger) 216，217
辛普里丘(Simplicius) 5
斯雷特(J. C. Slater) 193
斯莫鲁绰夫斯基(M. Smoluchowski) 93
索迪(F. Soddy) 112，113，117
索末菲(A. Sommerfeld) 137，148—150，157，169，170，194
斯特恩(O. Stern) 169
斯托克斯(G. Stokes) 75，108
斯通尼(G. J. Stoney) 101，103，107
苏达山(E. C. G. Sudarshan) 239
孙中山 3，4
苏斯金(L. Susskind) 269

T

谭嗣同 3
泰勒斯(Thales) 4
托马斯(L. H. Thomas) 173
托马斯(W. Thomas) 152
汤姆孙(G. P. Thomson) 144，145
汤姆孙(J. J. Thomson) 103，106，107，110，124，128—130
威廉·汤姆孙(W. Thomson，1824—1907，又见"开尔文") 85
特霍夫特(G. t'Hooft) 250，252，254，256，257
朝永振一郎(S. Tomonaga) 216，217
托里拆利(E. Torricelli) 3，6

U

乌仑贝克(G. E. Ulenbeck) 172
尤里(H. Urey) 185

V

范德格拉夫(R. J. van de Graaff) 190
范登布罗克(A. J. van den Broek) 132，183
范德瓦耳斯(J. D. van der Waals) 86
瓦尔雷(C. Varley) 102
维尔特曼(M. Veltman) 250
维拉德(P. Villard) 111

冯诺意曼(J. von Neumann) 146, 174, 200, 280
伏打(A. Volta) 82

W

瓦尔顿(E. T. S. Walton) 190
王充 3
王夫之 3
王淦昌 201, 202
瓦特斯顿(J. J. Waterston) 62, 64—68, 70, 71, 85, 118
外因伯(S. Weinberg) 252, 254, 256, 257, 262, 306
外斯柯夫(V. F. Weisskopf) 305
温策尔(G. Wentzel) 164
外尔(H. Weyl) 151, 187, 188, 247
惠勒(J. A. Wheeler) 278
维克(G. C. Wick) 200
维谢尔特(E. Wiechert) 103, 108
维德曼(G. Wiedemann) 102
维恩(W. Wien) 119, 150
维格纳(E. Wigner) 16, 198, 203, 204
威尔孙(C. T. R. Wilson) 107
威尔泽克(F. A. Wilczek) 261
威滕(E. Witten) 271—273
伍德(R. W. Wood) 99
伍斯特(A. Wooster) 193

X

薛晓舟 297, 298

Y

杨振宁 225, 231, 249
杨(T. Young) 85
汤川秀树(H. Yukawa) 206, 208, 210, 260

Z

塞曼(P. Zeeman) 104—106
张会 297
张载 3
祖瑞克(W. H. Zurek) 282

[General Information]
书名=原子论的历史和现状　　对物质微观构造认识的发展
作者=关洪著
页数=３４９
ＳＳ号=１１８４９９８４
出版日期=２００６．１１
出版社=北京大学出版社

书名
前言
目录
第一章　古代原子论思想
１．１　什么是物质的本原？
１．２　从种子论到原子论
１．３　“物质可分论”未必是原子论
１．４　“物质无限可分论”符合辩证法吗？
第二章　近代原子论的复兴
２．１　伽森狄和原子论的复兴
２．２　玻意耳和牛顿的气体静态模型
２．３　伯努利的气体动态模型
２．４　道尔顿和化学原子论的确立
第三章　从气体动态理论到统计物理学
３．１　两位先行者赫拉帕斯和瓦特斯顿
３．２　气体动态理论的发展
３．３　玻尔兹曼和统计物理学的建立
３．４　分子大小和布朗运动
第四章　微观物理学的诞生
４．１　电子发现的前后
４．２　放射性的发现和决定性的危机
４．３　量子概念的提出和连续性的突破
４．４　从卢瑟福的原子模型到玻尔的量子论
第五章　微观粒子的量子力学描述
５．１　德布罗意波及其反响
５．２　海森伯的矩阵力学和薛定谔的波动力学
５．３　从爱因斯坦论光的二象性到玻恩对波函数的概率诠释
５．４　第一种非经典的内禀变量——自旋
第六章　从中子的发现到同位旋的建立
６．１　核物理学的发展和中子的发现
６．２　狄拉克方程和正电子的发现——１９３２奇迹年
６．３　泡利提出中微子假说和费米建立β衰

变的量子场论
6．4　核力，介子和第一种内禀空间——同位旋
第七章　量子场论的发展和新粒子的发现
7．1　量子场论的发展
7．2　粒子“动物园”的建立和管理
7．3　中性K介子问题
7．4　电磁场的各种量子状态
第八章　在追求统一的道路上
8．1　从规范理论到电弱混合模型
8．2　标准模型前后
8．3　从超对称、超弦到M理论
8．4　量子物理学和经典物理学的统一
第九章　从物质构成论到物质生成论的演变
9．1　物质粒子是生成的而不是构成的
9．2　关于生成论和辩证法的讨论
9．3　　没有任何物理学规律支持“物质无限可分”
9．4　20世纪的微观物理学已经从构成论演变到生成论
附录　现代物理学中的因果性和决定性
A1　经典物理学中的因果性和关联
A2　量子物理学中的因果性和关联
A3　三种类型的统计决定性
A4　规律性、决定性和因果性辨析
基本参考文献
人名索引