

第 1 章

量子力学发展概述

20 世纪最有影响的物理科学进展应当包含广义相对论、量子力学。这当中，量子力学深层次的根本属性使得它处在一个最为独特的位置。它使物理学家们改变自己的观念，迫使自己重新审视事物的本性。量子力学发展至今已经超过一百年，但其基本思想内容和发展过程仍然不为普通大众所熟知。这里编录克莱普纳（Daniel Kleppner）和捷奇夫（Roman Jackiw）在科学杂志上的纪念量子力学 100 年的文章，对量子力学那场史诗般壮丽的历程做了较好的回顾与解读。

1.1 量子力学概况

量子力学虽然描述远离我们日常生活经验的抽象原子世界，但对我们日常生活的影响无比巨大。没有量子力学，就不会有化学、生物、医学以及其他每一个关键学科的引人入胜的进展。没有量子力学就没有全球经济可言，因为作为量子力学产物的电子学革命将我们带入了计算机时代。同时，光子学的革命也将我们带入信息时代。量子物理的杰作改变了我们的世界，科学革命为这个世界带来了福音，也带来了潜在的威胁。量子力学不是一步到位，而是历史上少有的天才荟萃在一起共同创造的。

量子的概念如此令人困惑以至在引入它以后的 20 年中几乎没有什么根本性的进展。有些物理学家花了 3 年时间创立了量子力学，但他们受自己

量子物理数学基础解读

做的事情困扰，甚至有时对自己的所作所为感到失望。或许一句话能最好地描述这个至关重要但又难以捉摸的理論的独特地位：量子理論是科学史上能最精确地被实验检验的理論，是科学史上最成功的理論。量子力学深深地困扰了它的创立者，即便是它本质上被表述成通用形式的多年后的今天，一些科学界的精英们尽管承认它强大的威力，却仍然对它的基础和基本阐释不满意。

普朗克 (Max Planck) 提出量子概念已有一百多年。在关于热辐射的经典论文中，普朗克假定振动系统的总能量不能连续改变，而是以不连续的能量子形式从一个值跳到另一个值。能量子的概念太激进了，普朗克后来将它搁置下来。随后，爱因斯坦 (Albert Einstein) 在 1905 年 (对他来说是非凡的一年) 认识到光量子化的潜在意义。不过量子的观念太离奇了，后来几乎没有根本性的进展。现代量子理論的创立则是新一代物理学家花了 20 多年时间的结晶。只要看一下量子理論诞生以前的物理学就能体会到量子物理的革命性影响。1890—1900 年的物理期刊论文基本上是关于原子光谱和物质的一些可以测量的属性的文章，如黏性、弹性、电导率、热导率、膨胀系数、折射系数以及热弹性系数等。由于维多利亚型的工作机制和精巧的实验方法的发展刺激，知识以巨大的速度累积。然而，在同时代人看来最显著的事情是对于物质属性的简明描述基本上是经验性的。成千上万页的光谱数据罗列了大量元素波长的精确值，但是谁都不知光谱线为何会出现，更不知道它们所传递的信息。对热导率和电导率的模型解释仅符合大约半数的事情。虽有不计其数的经验定律，但都很难令人满意。比如说，杜隆-珀蒂 (Dulong-Petit) 定律建立了比热和物质的原子质量的简单关系，但是它有时好使，有时不好使。元素周期表尽管为化学的繁荣提供了关键的组织规则，但也无任何理論基础。在众多伟大的革命性进展中，量子力学提供了一种定量的物质理論。

现在，我们原则上可以理解原子结构的每一个细节；周期表也能简单地加以解释；巨额的光谱排列也纳入了一个优雅的理论框架。量子力学为定量地理解分子、流体和固体、导体和半导体提供了便利。它能解释

诸如超流体和超导体等怪异现象，能解释诸如中子星和玻色（Bose）-爱因斯坦凝聚（在这种现象中气体所有原子的行为像一个单一的超大原子）等奇异的物质聚集形式。量子力学为所有的学科分支和每一项高技术提供了关键的工具。

量子物理实际上包含两个方面。一个是原子层次物质理论：量子力学，正是因为它我们才能理解和操纵物质世界。另一个是量子场论，它在科学中起到一个完全不同的作用，稍后我们再提及。

1.2 量子力学的建立与内容

1.2.1 旧量子论

量子革命的导火线不是对物质的研究，而是辐射问题。具体的挑战是理解黑体（即某种热的物体）辐射的光谱。烤过火的人都很熟悉这样一种现象：热的物体发光，越热发出的光越明亮。光谱的范围很广，当温度升高时，光谱的峰值从红线向黄线移动，然后又向蓝线移动（我们不能直接肉眼看见这些）。结合热力学和电磁学的概念似乎可以对光谱的形状作出解释，不过所有的尝试均以失败告终。

然而，普朗克假定振动电子辐射的光能量是量子化的，从而得到一个表达式，与实验符合得相当完美。但是他也充分认识到，理论本身是很荒唐的，就像他后来说的：“量子化只不过是一个走投无路的做法”。普朗克将他的量子假设应用到辐射体表面振子的能量上，如果没有新秀爱因斯坦，量子物理恐怕至此结束。1905年，爱因斯坦毫不犹豫地断定：如果振子的能量是量子化，那么产生光的电磁场的能量也应该是量子化。

尽管麦克斯韦（Maxwell）理论以及一个多世纪的权威性实验都表明光具有波动性，爱因斯坦的理论还是蕴含了光的粒子性行为。随后 10 多年的光电效应实验显示仅当光的能量到达一些离散的量值时光才能被吸收，这些能量就像是被一个个粒子携带着一样。光的波粒二象性取决于你观察问

量子物理数学基础解读

题的着眼点，这是始终贯穿于量子物理且令人头痛的实例之一，它成为接下来 20 年中理论上的难题。辐射难题促成了量子理论的第一步，物质悖论则促成了第二步。

众所周知，原子包含正负两种电荷的粒子，异号电荷相互吸引。根据电磁理论，正负电荷彼此螺旋式地靠近，辐射出光谱范围宽广的光，直到原子坍塌为止。接着，又是一个新秀玻尔（Bohr）迈出了决定性的一步。1913 年，玻尔提出了一个激进的假设：原子中的电子只能处于包含基态在内的定态上，电子在两个定态之间跃迁从而改变它的能量，同时辐射出一定波长的光，光的波长取决于定态之间的能量差。结合已知的定律和这一离奇的假设，玻尔扫清了原子稳定性的问题。玻尔的理论充满了矛盾，但是为氢原子光谱提供了定量的描述。玻尔认识到他的模型的成功之处和缺陷，凭借惊人的预见力，他聚集了一批物理学家创立了新的物理学。那位年轻的物理学家花了 12 年时间终于实现了他的梦想。

开始，发展玻尔量子论（习惯上称为旧量子论）的尝试遭受了一次又一次的失败，但接下来一系列的进展完全改变了这一思想进程。

1.2.2 建立量子力学

1923 年德布罗意（Louis de Broglie）在博士论文中提出光的粒子行为与粒子的波动行为应该对应存在。他将粒子的波长和动量联系起来：动量越大，波长越短。这是一个引人入胜的想法，但没有人知道粒子的波动性意味着什么，也不知道它与原子结构有何联系。然而德布罗意的假设是一个重要的前奏，接下来很多事情就要发生。

1924 年夏天，又一个前奏出现了。玻色提出了一种全新的方法来解释普朗克辐射定律。他把光看作一种无（静）质量的粒子（现称为光子）组成的气体，这种气体不遵循经典的玻尔兹曼（Boltzmann）统计规律，而遵循一种建立在粒子不可区分的性质（即全同性）上的新的统计理论。爱因斯坦立即将玻色的推理应用于实际有质量的气体从而得到一种描述气体中

粒子数关于能量的分布规律，即著名的玻色-爱因斯坦分布。然而，通常情况下新老理论将预测到原子气体相同的行为。爱因斯坦在这方面再无兴趣，这些结果也被搁置了 10 多年。但它的关键思想——粒子的全同性，是极其重要的。

随后，一系列事件纷至沓来，最后导致一场科学革命。从 1925 年 1 月到 1928 年 1 月：泡利 (Wolfgang Pauli) 提出了不相容原理，为周期表奠定了理论基础。海森堡 (Werner Heisenberg)、玻恩 (Born) 和约尔当 (Jordan) 提出了量子力学的第一个版本——矩阵力学。人们终于放弃了通过系统的方法整理可观察的光谱线来理解原子中电子的运动这一历史目标。薛定谔 (Erwin Schrodinger) 提出了量子力学的第二种形式，波动力学。在波动力学中，体系的状态用薛定谔方程的解——波函数来描述。矩阵力学和波动力学貌似矛盾，实质上是等价的。电子被证明遵循一种新的统计规律——费米-狄拉克 (Fermi-Dirac) 统计。人们进一步认识到所有的粒子要么遵循费米-狄拉克统计，要么遵循玻色-爱因斯坦统计，这两类粒子的基本属性很不相同。海森堡阐明测不准原理，狄拉克提出了相对论性的波动方程用来描述电子，解释了电子的自旋并且预测了反物质。狄拉克提出电磁场的量子描述，建立了量子场论的基础。玻尔提出互补原理 (一个哲学原理)，试图解释量子理论中一些明显的矛盾，特别是波粒二象性。

量子理论的主要创立者当时都是年轻人。1925 年，泡利 25 岁，海森堡和费米 24 岁，狄拉克和约尔当 23 岁。薛定谔是一个大器晚成者，36 岁，玻恩和玻尔年龄稍大一些。值得一提的是他们的贡献大多是阐释性的，爱因斯坦的反应反衬出量子力学这一智力成果深刻而激进的属性：他拒绝自己发明的导致量子理论的许多关键的概念，关于玻色-爱因斯坦统计的论文是他对理论物理的最后一项贡献。

创立量子力学需要新一代物理学家并不令人惊讶，开尔文 (Lord Kelvin) 在祝贺玻尔 1913 年关于氢原子论文的一封信中表述了其中的原因。他说，玻尔的论文中有很多真理是他所不能理解的。开尔文认为基本的新物理学必将出自无拘无束的头脑。

量子物理数学基础解读

1928年，量子革命结束，量子力学的基础本质上已经建立好了。后来，派斯（Abraham Pais）以轶事的方式记录了这场以狂热的节奏发生的革命。其中有一段是这样的，1925年，古德斯米特（Samuel Goudsmit）和乌伦贝克（George Uhlenbeck）就提出了电子自旋的概念，玻尔对此深表怀疑。10月，玻尔乘火车前往荷兰的莱顿参加洛仑兹（Hendrik A Lorentz）的50岁生日庆典，泡利在德国的汉堡格碰到玻尔并探询玻尔对电子自旋可能性的看法。玻尔用他那著名的低调评价的语言回答说，自旋这一提议是“非常、非常有趣的”。后来，爱因斯坦和埃伦费斯特（Paul Ehrenfest）在莱顿碰到了玻尔并讨论了自旋。玻尔说明了自己的反对意见，但是爱因斯坦展示了自旋的一种方式并使玻尔成为自旋的支持者。在玻尔的返程中，遇到了更多的讨论者。当火车经过德国的哥廷根时，海森堡和约尔当接站并询问他的意见，泡利也特意从汉堡格赶到柏林接站。玻尔告诉他们自旋的发现是一个重大进步。

量子力学的创建触发了科学的淘金热。早期的成果有：1927年海森堡得到了氢原子薛定谔方程的近似解，建立了原子结构理论的基础；斯莱特（John Slater）、哈特里（Douglas Rayner Hartree）和福克（Vladimir Fock）随后又提出了原子结构的一般计算技巧；伦敦（Fritz London）和海特勒（Walter Heitler）解决了氢分子的结构，在此基础上，鲍林（Linus Pauling）建立了理论化学；索末菲（Arnold Sommerfeld）和泡利建立了金属电子理论的基础，布洛赫（Felix Bloch）创立了能带结构理论；海森堡解释了铁磁性的起因。1928年伽莫夫（George Gamow）解释了 α 放射性衰变的随机本性之谜，他表明 α 衰变由量子力学的隧道效应引起。随后几年中，贝特（Hans Bethe）建立了核物理的基础并解释了恒星的能量来源。随着这些进展，原子物理、分子物理、固体物理和核物理进入了现代物理的时代。

1.2.3 量子力学要点

伴随着这些进展，围绕量子力学的阐释和正确性发生了许多争论。玻