

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。它使物理学家们改造他们的观念；迫使他们重新审视事物的本性。量子力学发展至今已经超过一百年，但它的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 Daniel Kleppner 和 Roman Jackiw 在科学杂志上的纪念量子力学一百年的文章，对量子力学那场史诗般壮丽的历程作了较好的回顾与解读。

1.1 量子力学概况

量子力学是为描述远离我们的日常生活经验的抽象原子世界而创立的，但它对我们日常生活的影响无比巨大。没有量子力学作为工具，就不可能有化学、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的，是历史上少有的天才一起创造的。

量子的概念如此地令人困惑以至于在引入它以后的 20 年中，量子理论几乎没有什么根本性的进展，后来一些物理学家花了三年时间创立了量子力学。这些科学家为自己所做的事情所困扰，甚至有时对自己的所作所为感到失望。或许用下面的一段观察资料能最好地描述这个至关重要但又难以捉摸的理论的独特地位：量子理论是科学史上能最精确地被实验检验的理论，是科学史上最成功的理论。量子力学深深地困扰了它的创立者，然而，直到它本质上被表述成通用形式。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。

Max Planck 提出量子概念已有一百多年。在他关于热辐射的经典论文中，Planck 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。量子的概念太激进了，Planck 后来将它搁置下来。随后，Einstein 在 1905 年（这一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。现代量子理论的创立则是崭新的一代物理学家花了 20 多年时间的结晶。只要看一下量子理论诞生以前的物理学就能体会到量子物理的革命性影响。1890 年到 1900 年间的物理期刊论文基本上是关于原子光谱和物质其他一些

基本的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的刺激，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实。虽有不计其数的经验定律，但都很难令人满意。比如说，Dulong-Petit 定律建立了比热和物质的原子质量的简单关系，但是它有时好用，有时不好用。在多数情况下，同体积气体的质量比满足简单的整数关系。元素周期表尽管为化学的繁荣提供了关键的组织规则，但也无任何理论基础。在众多的伟大的革命性进展中，量子力学提供了一种定量的物质理论。

现在，我们原则上可以理解原子结构的每一个细节，周期表也能简单自然地加以解释，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、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 Bose-Einstein 凝聚（在这种现象里气体中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。量子力学为所有的科学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。一个是原子层次的物质理论：量子力学，正是因为它我们才能理解和操纵物质世界。

量子力学基础原理解读

另一个是量子场论，它在科学中起到一个完全不同的作用，稍后我们再回到它上面来。

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（这些不是我们能直接看见的）。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，Planck 假定振动电子辐射的光的能量是量子化的，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，就像他后来所说的那样：“量子化只不过是一个走投无路的做法”。Planck 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 Albert Einstein，量子物理恐怕要至此结束。1905 年，他毫不犹豫地断定：如果振子的能量是量子化的，那么产生光的电磁场的能量也应该是量子化的。

尽管 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，Einstein 的理论还是蕴含了光的粒子性行为。随后十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观察问题的着眼点，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。辐射难题促成了通往量子理论的第一步，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，正负电荷彼此将螺旋式地靠近，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 Niels Bohr 迈出了决定性的一步。1913 年，Bohr 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，Bohr 扫清了原子稳定性的问题。Bohr 的理论充满了矛盾，但是为氢原子光谱提供了定量的描述。他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。一代年轻的物理学家花了 12 年时间终于实现了他的梦想。

开始时，发展 Bohr 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。接着一系列的进展完全改变了思想的进程。

1.2.2 建立量子力学

1923 年 Louis Victor de Broglie 在他的博士论文中提出光

的粒子行为与粒子的波动行为应该是对应存在的。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 de Broglie 的假设是一个重要的前奏，很多事情就要发生了。

1924 年夏天，出现了又一个前奏。Satyendra N. Bose 提出了一种全新的方法来解释 Planck 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 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）上的一种新的统计理论。Einstein 立即将 Bose 的推理应用于实际的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 Bose-Einstein 统计。然而，在通常情况下新老理论将预测到原子气体相同的行为。Einstein 在这方面再无兴趣，因此这些结果也被搁置了十多年。然而，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 年元月到 1928 年元月：Wolfgang Pauli 提出了不相容原理，为周期表奠定了理论基础。Werner Heisenberg、Max Born 和 Pascual 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。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 Schrodinger 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——Fermi-Dirac 统计。人们进一步认识到所有的粒子要么遵循 Fermi-Dirac 统计，要么遵循 Bose-Einstein 统计，这两类粒子的基本属性很不相同。Heisenberg 阐明测不准原理。Paul A. M. Dirac 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。Dirac 提出电磁场的量子描述，建立了量子场论的基础。Bohr 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都是年轻人。1925 年，Pauli 25 岁，Heisenberg 和 Enrico Fermi 24 岁，Dirac 和 Jordan 23 岁。Schrodinger 是一个大器晚成者，36 岁。Born 和 Bohr 年龄稍大一些，值得一提的是他们的贡献大多是阐释性的。Einstein 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观念，他关于 Bose-Einstein 统计的论文是他对理论物理的最后一项贡献，也是对物理学的最后一项重要贡献。

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

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，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，Samuel Goudsmit 和 George Uhlenbeck 就提出了电子自旋的概念，Bohr 对此深表怀疑。10月，Bohr 乘火车前往荷兰的莱顿参加 Hendrik A. Lorentz 的 50 岁生日庆典，Pauli 在德国的汉堡碰到 Bohr 并探询 Bohr 对电子自旋可能性的看法，Bohr 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，Einstein 和 Paul Ehrenfest 在莱顿碰到了 Bohr 并讨论了自旋。Bohr 说明了自己的反对意见，但是 Einstein 展示了自旋的一种方式并使 Bohr 成为自旋的支持者。在 Bohr 的返程中，他遇到了更多的讨论者。当火车经过德国哥廷根时，Heisenberg 和 Jordan 接站并询问他的意见，Pauli 也特意从汉堡赶到柏林接站。Bohr 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 Heisenberg 得到了氢原子 Schrödinger 方程的近似解，建立了原子结构理论的基础；John Slater，Douglas Rayner Hartree 和 Vladimir Fock 随后又提出了原子结构的一般计算技巧；Fritz London 和 Walter Heitler 解决了氢分子的结构，在此基础上，Linus Pauling 建立了理论化学；Arnold Sommerfeld 和 Pauli 建立了金属电子理论的基础，Felix Bloch 创立了能带结构理论；Heisenberg 解释了铁磁性的起因。1928年，George Gamow 解释了 α 放射性衰变的随机本性之谜，他

表明 α 衰变是由量子力学的隧道效应引起的。随后几年中，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。Bohr 和 Heisenberg 是倡导者的重要成员，他们信奉新理论，Einstein 和 Schrödinger 则对新理论不满意。要理解这些混乱的原因，必须掌握量子理论的关键特征，总结如下（以 Schrödinger 的波动力学为例）：

1.2.3.1 基本描述：波函数

系统的行为用 Schrödinger 方程描述，方程的解称为波函数。系统的完整信息用它的波函数表述，通过波函数可以计算任意可观察量的可能值。在空间给定体积内找到一个电子的几率正比于波函数幅值的平方，因此，粒子的位置分布在波函数所在的体积内。粒子的动量依赖于波函数的斜率，波函数越陡，动量越大。斜率是变化的，因此动量也是分布的。这样，有必要放弃位移和速度能确定到任意精度的经典图像，而采纳一种模糊的几率图像，这也是量子力学的核心。

对于同样一些系统进行同样精心的测量不一定产生同一结果，相反，结果分散在波函数描述的范围內，因此，电子