

量子力学新进展

第三辑

Recent Progress in Quantum Mechanics

Third Volume

曾谨言 龙桂鲁 裴寿镛 主编

Zeng Jinyan Long Guilu Pei Shouyong

清华大学出版社

量子力学新进展

第三辑

Recent Progress in Quantum Mechanics

Third Volume

曾谨言 龙桂鲁 裴寿镛 主编

Zeng Jinyan Long Guilu Pei Shouyong

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书由 8 个专题组成,从多个角度对量子力学近年来的发展进行了评述,内容涉及原子的激光冷却和囚禁,玻色-爱因斯坦凝聚,核磁共振量子计算机,微腔量子电动力学,量子博弈论,连续变量的量子信息处理,超位力定理以及量子力学系统 $N=4$ 超对称性等方面。作者是国内活跃于量子力学不同研究领域的专家和年轻学者。

对于从事量子力学和量子信息学研究的科技人员、大学物理教师、研究生和高年级学生,本书是一本有益的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

量子力学新进展(第三辑)/曾谨言,龙桂鲁,裴寿镛主编.——北京:清华大学出版社,2003
ISBN 7-302-06683-3

I. 量… II. ①曾…②龙…③裴… III. 量子力学—进展 IV. O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 041505 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

责任编辑: 朱红莲

版式设计: 肖 米

印 刷 者: 北京密云胶印厂

装 订 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印 张: 22 字 数: 437 千字

版 次: 2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06683-3/() · 297

印 数: 1~2000

定 价: 48.00 元

PREFACE

序 言

1900年12月14日,普朗克教授在柏林亥姆霍兹研究所召开的德国物理学会年会上宣读了划时代论文《论正常光谱能量分布定律》,提出了能量量子化的概念,并由此从理论上导出了他在此前不久所发现的与实验非常符合的黑体辐射定律,从而创立了量子论。后经过爱因斯坦、海森堡、薛定谔、玻恩、约当和狄拉克等一批杰出物理学家的努力,建立了现称之为量子力学的理论体系。20世纪,量子力学相继应用于基本粒子、原子核、原子和分子、固体和液体等各种物理系统,都取得了巨大的成功。可以毫不夸张地说,20世纪的科学是量子力学的科学。

历史上,以爱因斯坦和玻尔为代表的两方,在量子力学的基本问题上展开了激烈的论争,这种论争对量子力学的发展起到了巨大的推动作用。但由于争论的关键问题在当时无法用实验检验,长期以来争论一直停留在思辩性的层面上。近年来,一方面由于实验技术的进展,关于量子力学基本概念的一些论争已经可以用实验来直接检验,另一方面由于量子信息科学的发展,重新激发了人们对这些问题研究的热情。现今这些基本问题不再是局限于少数几个科学天才的论争,而是具有巨大的应用潜力。由于量子计算机的潜在的巨大能力,西方发达国家投入了大量的人力和物力开展研究,从而使这一领域得到了迅速发展。1935年爱因斯坦等为反驳量子力学的哥本哈根诠释而提出的EPR佯谬中所指出的量子力学的奇特性质即纠缠态所展现的非局域关联,现在已经被实验证实,并且在量子信息、量子计算、密集编码、量子离物传态等方面得到了广泛的应用。

回顾过去一个世纪,在量子力学的创始阶段,我国正处于帝国主义列强侵略和军阀混战的贫穷落后时期,民不聊生,根本谈不上科学研究。解放后,在

文化大革命的十年动乱期间,我们又失去了许多发展良机。改革开放后我国的经济取得了持续高速的发展,特别是最近党和国家实施科教兴国的战略方针,我们具有了前所未有的发展条件。相信我国的科学家一定會在量子力学这一新的发展阶段中作出重要的贡献。

这套量子力学新进展系列专辑从多个角度对量子力学的最新发展进行了专门的评述和介绍。这套专辑对于量子力学的研究和教学有重要的参考价值。相信它们对从事量子力学和量子信息研究的广大科技人员、研究生和高年级本科生会起到帮助作用。

适逢《量子力学新进展》出版之际,特写以上数语,与大家共勉。



清华大学校长
中国科学院院士
2003年1月11日

CONTENTS

目 录

1	量子物理学百年回顾	曾谨言	(1)
2	原子的激光冷却与囚禁和稀薄气体玻色-爱因斯坦凝聚的实现	王义道	(13)
3	核磁共振量子计算机与平行量子计算	龙桂鲁 肖丽	(110)
4	微腔量子电动力学的基本概念与方法	孙昌璞 王颖丹 李勇 张芑	(139)
5	量子博弈论	杜江峰 李卉 许晓栋	(188)
6	连续变量系统的量子信息处理 与非定域性	逯怀新 郝司夏 杨洁 陈增兵 张永德	(243)
7	超位力定理及其应用	丁亦兵	(286)
8	量子力学系统的 $N=4$ 超对称性	阮东	(318)

曾谨言

北京大学物理系, 北京 100871

相对论和量子力学的提出, 是 20 世纪物理学的两个划时代的里程碑。爱因斯坦提出的狭义相对论, 改变了牛顿力学中的绝对时空观, 指明了牛顿力学的适用范围, 即只适用于速度 v 远小于光速的物质的运动 ($v/c \ll 1$, $c \approx 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$, 是真空中光速)。量子力学则涉及物质运动形式和规律的根本变革。20 世纪前的经典物理学 (经典力学, 电动力学, 热力学与统计物理学等) 只适用于描述一般宏观条件下物质的运动, 而对于微观世界 (原子和亚原子世界) 和一定条件下的某些宏观现象 (例如, 极低温下的超导、超流、玻色-爱因斯坦凝聚等), 则只有在量子力学的基础上才能说明。量子物理学一百年的历史证明, 它是历史上最成功、并为实验精确检验了的一个理论^[1~3]。量子物理学对说明极为广泛的许多自然现象, 取得了前所未有的成功^[2]。物质属性及其微观结构这个古老而根本的问题, 只有在量子力学的基础上, 才能在原则上得以阐明。例如, 物体为什么有导体、半导体和绝缘体之分? 又如, 元素周期律的本质是什么? 原子与原子是怎样结合成分子的 (化学键的本质)? 所有涉及物质属性和微观结构的诸多近代学科, 无不以量子力学作为其理论基础。量子物理学还引发了极为广泛的新技术上的应用。据估计, 基于量子力学发展起来的高科技产业 (例如, 激光器、半导体芯片和计算机、电视、电子通讯、电子显微镜、核磁共振成像、核能发电等), 其产值在发达国家国民生产总值中目前已超过 30%^[1]。可以说, 没有量子力学和相对论的建立, 就没有人类的现代物质文明。

历史的经验值得注意。在量子物理学提出一百年后, 对它走过的历程做一个简要回顾, 不仅可以加深我们对量子物理学的理解, 并且对物理学的进一步发展, 也可从中得到有益的启示。

在 19 世纪末,物理学家中普遍存在一种乐观情绪,认为对复杂纷纭的物理现象的本质的认识已经完成。他们陶醉于 17 世纪建立起来的力学体系,19 世纪建立起来的电动力学以及热力学和统计物理学。麦克斯韦于 1871 年在剑桥大学就职演说中提到:“在几年中,所有重要的物理常数将被近似估计出来,……给科学界人士留下来的只是提高这些常数的观测值的精度”^[1]。据统计,在 1890~1900 年期间,充陈物理学期刊的是:原子光谱(各种元素的光谱线波长数据)以及物质各种属性的测量结果,如粘滞性(viscosity)、弹性(elasticity)、电导率(electric conductivity)、热导率(thermal conductivity)、膨胀系数(coefficient of expansion)、折射系数(refraction coefficient)和热弹系数(thermoelastic coefficient)等。值得注意的是,这些描述本质上是经验性的。

然而自然科学总是在不断地发展,在充满喜悦的气氛中,一些敏锐的物理学家已逐渐认识到经典物理学中潜伏着的危机。20 世纪伊始,W. 汤姆森(Kelvin 勋爵)就指出^[4]:经典物理学的上空悬浮着两团乌云。第一团乌云涉及电动力学中的“以太”(aether)。当时人们认为电磁场依托于一种固态介质,即“以太”,电磁场描述的是“以太”的应力。但是,为什么天体能无摩擦地穿行于“以太”之中?为什么人们无法通过实验测出“以太”本身的运动速度^①?第二团乌云则涉及物体的比热,即观测到的物体比热总是低于经典物理学中能量均分定理给出的值。例如,固体比热(固体被看成由许多原子组成,诸原子在各自的平衡位置附近作小振动),按经典物理学中的能量均分定理,应为 $3R$ [$R = (8.314510 \pm 8.4) \times 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 是气体常数],而实验观测值总是低于此值($3R$ 只是高温极限值,即 Dulong-Petit 值)。又例如双原子分子(具有三个平动自由度,两个转动自由度,还有一个振动自由度,包含动能项和势能项),按能量均分定理,比热应为 $\frac{7}{2}R$ 。但在常温下,其观测值为 $\frac{5}{2}R$,而当温度 $T \rightarrow 0 \text{ K}$ 时,则趋于零。看来这些问题都涉及在温度不是很高的情况下体系的部分自由度被冻结的问题。这个谜团只有在后来建立起来的量子物理学中才能阐明。这些现象在本质上都涉及物质体系的能量量子化。

任何重大科学理论的提出,都有其历史必然性。在时机成熟时(实验技术水平,实验资料的积累,理论的准备等),就会应运而生。但科学发展的进程往往是错综复杂的,通向真理的道路往往是曲折的。究竟通过怎样的道路,以及在什么问题首先被突破和被谁突破,则往往具有一定的偶然性和机遇。

*

*

*

量子理论的突破,首先出现在黑体辐射能量密度随频率的分布规律上。1900 年,

^① 对于第一个问题的回答是:电磁场本身就是物质存在的一种形式。作为实物的(material)“以太”是不存在的。对后一问题的阐明,则由爱因斯坦的狭义相对论(1905)给出。

普朗克(1858~1947)有机会看到黑体辐射能量密度在红外波段(低频区)的精密测量结果,了解到维恩半经验公式在低频区与观测有明显偏离,他提出了一个两参数公式(后来被称为普朗克公式)

$$E(\nu)d\nu = \frac{c_1 \nu^3 d\nu}{e^{c_2 \nu/T} - 1} \quad (1.1)$$

式中 $E(\nu)d\nu$ 表示在频率范围 $(\nu, \nu+d\nu)$ 和单位体积中的黑体辐射能量, c_1 与 c_2 是两个参数。普朗克公式在全波段都与观测极为符合(图1)。在高频区,普朗克公式就化为维恩公式:

$$E(\nu)d\nu = c_1 \nu^3 e^{-c_2 \nu/T} d\nu \quad (1.2)$$

两者都与观测结果很吻合。但在低频区($e^{c_2 \nu/T} - 1 \approx c_2 \nu/T$),普朗克公式化为

$$E(\nu)d\nu = \frac{c_1}{c_2} T \nu^2 d\nu \quad (1.3)$$

它比维恩公式有较大改进。此处应当提到,瑞利(1900)及金斯(1905)根据经典电动力学和统计物理理论曾经得出一个黑体辐射公式

$$E(\nu)d\nu = \frac{8\pi kT}{c^3} \nu^2 d\nu \quad (1.4)$$

爱因斯坦首先注意到普朗克公式的低频极限式(1.3)与瑞利-金斯公式(1.4)相同($c_1/c_2 = 8\pi k/c^3$, k 为玻尔兹曼常数)^①。但瑞利-金斯公式在高频极限是发散的,与实验尖锐矛盾,历史上称为紫外灾难(ultra-violet catastrophe)。如果黑体辐射能量密度真的像瑞利-金斯分布那样,人的眼睛盯着炉子内的热物质看时,紫外线就会使眼睛变瞎^[1]。

普朗克提出的如此简单的一个公式,能在全波段与观测结果如此惊人地符合,很难说是偶然的。实验物理学家们相信这里必定蕴藏着一个非常重要、但尚未被人们揭示出来的科学原理。经过近两个月的探索,普朗克发现,如作如下假定,则可以从理论上导出他的黑体辐射公式(1.1)。这假定是:对于一定频率 ν 的辐射,物体只能以 $h\nu$ 为单位吸收或发射它, h 是一个普适常数(后来人们称之为普朗克常数)。换言之,物体吸收或发射电磁辐射,只能以“量子”(quantum)的方式进行,每个“量子”的能量为 $\epsilon = h\nu$,称为“作用量子”(quantum of action)。从经典力学来看,能量不连续的概念是绝对不允许的。所以尽管从这个量子假设可以导出与实验观测极为符合的普朗克公式,在相当长一段时间中普朗克的工作并未引起人们的重视。

首先注意到量子假设有可能解决经典物理学所碰到的其他困难的是年轻的爱因斯坦

^① M. Planck. *Ann der Physik*, 4(1901), 553. 黑体辐射公式为 $E(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$, 与式(1.1)比较, 参数 $c_1 = 8\pi h/c^3$, $c_2 = h/k$, k 为玻尔兹曼常数。

(1879~1955)。他(1905)试图用量子假设去说明光电效应中碰到的疑难,提出了光量子(light quantum)概念^[5]。他认为辐射场就是由光量子组成。每一个光量子的能量 E 与辐射的频率 ν 的关系是

$$E = h\nu \quad (1.5)$$

他还根据他同年提出的狭义相对论中给出的光的动量和能量的关系 $p=E/c$, 提出光量子的动量 p 与辐射的波长 λ ($\lambda=c/\nu$) 有下列关系

$$p = h/\lambda \quad (1.6)$$

采用光量子概念之后,光电效应中出现的疑难随即迎刃而解。由于对光电效应的研究和数学物理理论的卓越贡献,爱因斯坦获得 1921 年诺贝尔物理学奖。在此之前,普朗克由于对基本作用量子的突出贡献,获 1918 年诺贝尔奖。爱因斯坦以及德拜(1907)还进一步把能量不连续的概念应用于固体中原子的振动,成功地解决了当温度 $T \rightarrow 0\text{K}$ 时,固体比热趋于零的现象。至此,普朗克提出的能量不连续的概念才逐渐引起物理学家的注意。

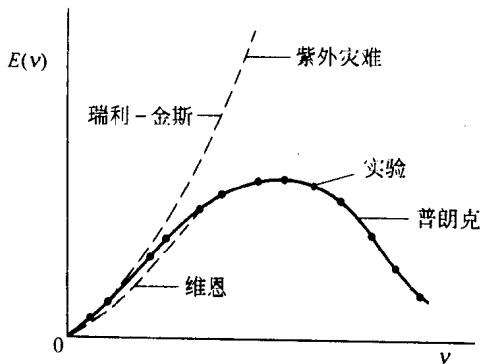


图 1 黑体辐射能量密度 $E(\nu)$ 随频率 ν 的变化

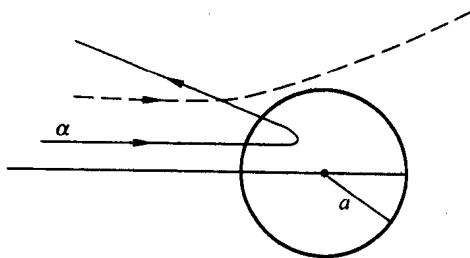


图 2 卢瑟福的 α 粒子对原子的散射

量子理论的第一个突破来自辐射(radiation, 包括光)的实验和经典理论的矛盾。它的第二个突破则来自物质(matter, 即实物粒子)及其与辐射的相互作用的实验与经典理论的矛盾^[3]。

J. J. 汤姆孙(1896)发现电子后,曾经提出过如下原子模型:正电荷均匀分布于原子中(原子半径约 10^{-10}m),而电子则以某种规则排列镶嵌其中。1911 年卢瑟福根据 α 粒子对原子散射实验中出现的大角度偏转现象(见图 2,汤姆孙模型对此完全无法解释),提出了原子的“有核模型”:原子的正电荷以及几乎全部的质量都集中在原子中心很小的区域中(半径 $< 10^{-14}\text{m}$),形成原子核,而电子则围绕原子核旋转(类似行星绕太阳旋转)。此

模型可以很好地解释 α 粒子的大角度偏转,但却遇到了如下两大难题:

(1) 原子的稳定性问题。电子围绕原子核旋转的运动是加速运动。按照经典电动力学,电子将不断辐射能量而减速,轨道半径会不断缩小,最后将掉到原子核上去,原子随之塌缩(其寿命估算约为 $\tau \sim 10^{-12}$ s)^[1],并相应发射出一个很宽的连续辐射谱,这与观测到的原子的线状光谱矛盾。此外,卢瑟福模型原子对于外界粒子的碰撞也是很很不稳定的。但现实世界表明,原子稳定地存在于自然界。矛盾尖锐地摆在人们面前,如何解决呢?

(2) 原子的大小问题。19世纪统计物理学的估算,原子的大小约为 10^{-10} m。在汤姆孙模型中,根据电子的空间排列构形的稳定性,可以找到一个合理的特征长度。而在经典物理的框架中来考虑卢瑟福模型,却找不到一个合理的特征长度。根据电子质量 m_e 和电荷 e ,在经典电动力学中可以找到一个特征长度,即 $r_e = e^2/m_e c^2$ (经典电子半径) $\approx 2.8 \times 10^{-15}$ m $\ll 10^{-10}$ m,完全不适合用以表征原子大小。何况原子中电子的速度 $v \ll c$,光速 c 不应出现在原子的特征长度中。

此时,丹麦年轻物理学家玻尔(1885~1962)有机会(1912年)来到卢瑟福的实验室,深深为这些矛盾所吸引。他深刻地认识到,在原子世界中必须背离经典电动力学,应该采用新的观念。他一开始就深信作用量子(quantum of action) h 是解决原子结构问题的关键。首先,把 h 引进卢瑟福模型中,按照量纲分析,即可找到一个合理的特征长度

$$a = \hbar^2/m_e e^2 \approx 0.53 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (1.7)$$

(后来人们称之为玻尔半径)。在解决原子的稳定性问题时,玻尔有机会(1913年初)了解到原子线状光谱的规律(氢原子光谱的巴耳末线系,光谱的组合规则等),发现了原子光谱与原子结构之间的本质联系,终于提出了他的原子量子论^[6]。这理论包括了下列两个极为重要的概念(假定),它们是对大量实验事实的深刻概括:

(1) 原子能够,而且只能够稳定地存在于与离散的能量($E_1, E_2, \dots$)相应的一系列的状态中。这些状态称为定态(stationary state)。因此,原子能量的任何变化,包括吸收或发射电磁辐射,都只能在两个定态之间以跃迁(transition)的方式进行。

(2) 原子在两个定态(分别属于能级 E_n 和 E_m ,设 $E_n > E_m$)跃迁时,发射或吸收的电磁辐射的频率 ν_{nm} 由下式给出

$$\nu_{nm} = (E_n - E_m)/h \quad (1.8)$$

简言之,玻尔量子论的核心思想有两条:一是原子的具有离散能量的定态概念,一是两个定态之间的量子跃迁概念和频率条件。

如果说原子能量量子化概念还可以从普朗克-爱因斯坦的光量子论中找到某种启示,定态和量子跃迁概念及频率条件则是玻尔很了不起的创见,是他对原子稳定性和原子线状光谱规律作了深入分析后概括出来的。按照经典电动力学,具有特征频率 ν_c 的荷电体

系,所发射出的电磁辐射的频率应为 $n\nu_c$ ($n=1,2,3,\cdots$),即总是特征频率的整数倍。玻尔的重要贡献在于把原子线状光谱与原子在两个定态之间的量子跃迁联系起来,即把原子辐射的频率与两个定态的能量之差联系起来。这就抓住了原子光谱的组合规则的本质。组合规则(波数 $\tilde{\nu}=1/\lambda=\nu/c$)

$$\tilde{\nu}_{mn} = T(m) - T(n) \quad (1.9)$$

正是频率条件(1.8)的反映。把光谱项 T_n 与原子的离散的定态能量 E_n 联系起来, $T(n)=-E_n/hc$,其物理意义就十分清楚了。

当然,仅仅根据玻尔的两条基本假定,还不能把原子的离散能级定量地确定下来。玻尔处理这个问题的指导思想是对应原理(correspondence principle),即大量子数极限下,量子体系的行为应该趋于与经典体系相同。他根据对应原理的思想,求出了氢原子的能级公式,并导出了角动量量子化条件。

玻尔的量子论首先打开了人们认识原子结构的大门,取得了很大成功,但它的局限性和存在的问题也逐渐为人们认识到。首先,玻尔理论虽然成功地说明了氢原子光谱的规律性,对于更复杂的原子(例如氦原子)的光谱,就完全无能为力。光谱学中,除了谱线的波长(波数)之外,还有一个重要的观测量,即谱线的(相对)强度,玻尔理论未能提供处理它的系统方法。其次,玻尔理论只能处理周期运动,而不能处理非束缚态(例如散射)问题。从理论体系来讲,能量量子化概念与经典力学是不相容的,多少带有人为的性质,其物理本质还不清楚。这一切都推动早期量子论的进一步发展。量子力学就是在克服早期量子论的困难和局限性中建立起来的。

*

*

*

在普朗克-爱因斯坦的光量子论(光具有波动粒子两重性, $E=h\nu$, $p=h/\lambda$)和玻尔的原子论的启发之下,法国物理学家德布罗意(1892~1987)仔细分析了光的微粒说与波动说的发展历史,并注意到几何光学与经典粒子力学的相似性,根据类比的方法,他设想实物粒子(静质量 $m \neq 0$ 的粒子)也具有波动性,即和光一样,也具有波动粒子两重性。这两方面必有类似的关系相联系,而普朗克常数必定出现在其中^[7]。他假定,与一定能量 E 和动量 p 的实物粒子相联系的波(他称之为物质波, matter wave)的频率和波长分别为

$$\nu = E/h, \quad \lambda = h/p \quad (1.10)$$

他提出这个假定的动机,一方面是企图把作为物质存在的两种形式(光和 $m \neq 0$ 的实物粒子)统一起来,另一方面是为了更深入地理解微观粒子能量的不连续性,以克服玻尔理论带有人为性质的缺陷。德布罗意把原子定态(stationary state)与驻波(stationary wave)联系起来,即把实物粒子束缚运动的能量量子化与有限空间中驻波的波长(或频率)的离散性联系起来。例如,长度为 L 的两端固定的弦振动的驻波波长为 $\lambda=2L/n$, $n=1,2,3,\cdots$ 。虽然从尔后建立起来的量子力学来看,这种联系还有不确切之处,能处理的问题也

很有限,但它的物理图像是很有启发性的。例如,氢原子中作稳定的圆周运动的电子所相应的驻波的形状如图3所示。绕原子核传播一周之后,驻波应光滑地衔接起来,这就要求圆周长是波长的整数倍,

$$2\pi r = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.11)$$

r 是圆轨道半径。用 $\lambda = 2\pi r/n$ 代入德布罗意关系式(1.10),可求出粒子动量 $p = nh/2\pi r = n\hbar/r$, 因而角动量

$$J = rp = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.12)$$

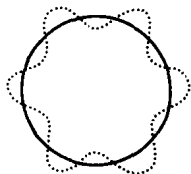


图 3

这正是玻尔的**角动量量子化条件**。这样,根据驻波条件就很自然地得出了角动量量子化条件,从而可以说明粒子能量的离散性。

物质波假设提出之后,人们自然会问,实物粒子既然是波,那么,为什么人们在过去长期的实践中把它们看成经典粒子,并没有犯什么错误?为说明这一点,追溯一下人类对于光的本性认识的历史是有启发的。在17世纪,牛顿的光的微粒说占统治地位;到19世纪,由于光的干涉和衍射实验成功,光的波动性才为人们确认。但只当光学仪器的特征长度与光波长可相比拟的情况下,干涉和衍射现象才会显示出来。例如,对比一下光的针孔成像和圆孔衍射实验的关系是有趣的。针孔成像可用光的直线传播来说明,即用几何光学来处理是恰当的。这是由于“针孔”的半径(例如0.1mm)比可见光波长(400nm~700nm)仍然大得多的缘故。如把针孔半径 a 不断缩小,当 a 接近于光波长 λ 时,针孔成像将不复存在,而代之以圆孔衍射图像。此时用几何光学来描述很不恰当,而必须代之以波动光学。对于德布罗意的物质波,情况也类似。由于 h 是一个很小的量,从宏观的尺度来看,物质粒子的波长一般是非常短的,其波动性并未显示出来^①。但到了原子世界中,物质粒子的波动性就会表现出来。此时如仍用经典粒子力学去处理就不恰当,而必须代之以一种新的波动力学。

实物粒子的波动性的直接实验证实是1927年才实现的。Davisson和Germer^[8]用一束具有一定能量和动量的电子射向金属镍单晶表面,观测到了电子衍射的现象,并证实了德布罗意关系 $\lambda = h/p$ 是正确的。后来,无数的事实都表明,不仅是电子,而且质子、中子、原子、分子等都具有波动性。波动性是实物粒子普遍具有的。特别是最近(1999年)观测到 C_{60} 分子束的衍射^[9], C_{60} 是迄今已观测到波动-粒子两重性的质量最重和结构最复杂的实物粒子。

^① 宏观世界中,处于热平衡下的实物粒子,总是具有一定的热运动能量。对于非相对论情况,粒子能量 $E = p^2/2m$ 。如用 $E \approx kT$ 来估算粒子的热运动能量,则 $p \approx 1/\sqrt{2mkT}$,因而 $\lambda \approx h/\sqrt{2mkT} \propto 1/\sqrt{mT}$,与温度 T 和粒子质量 m 有关。由此可以理解,为什么只有在极低温下,才有可能观测到宏观量子态,例如,金属超导态、超流态和BEC(玻色-爱因斯坦凝聚体)。可参阅Nature, 416(2002), 3月14日出版的一期上关于BEC的一系列综述文献。

*

*

*

奥地利年轻物理学家薛定谔(1887—1961)注意到了德布罗意的工作,他在苏黎世做了一个报告,介绍了物质波的思想。德拜对他提出:“你讲了半天波动,但是波动方程呢?”^[1]。不久(1926年初),薛定谔就提出了一个波动方程^[10](后来人们称之为薛定谔方程),它是含波动函数对空间坐标的二阶微商的偏微分方程。薛定谔把原子的离散能级与微分方程在一定的边界条件下的本征值问题联系在一起,成功地说明了氢原子、谐振子等的能级和光谱规律。与此几乎同时,但稍早几个月,海森堡(1901~1976)与玻恩和约当建立了矩阵力学^[11]。矩阵力学的提出,与玻尔的量子论有很密切的关系,特别是玻尔的对对应原理思想对海森堡有重要影响。海森堡特别强调,任何物理理论中,只应出现可以观测的物理量(例如光谱线的波长(波数)、光谱项、量子数、谱线强度等)。它一方面继承了玻尔量子论中合理的内核,例如原子的离散能级和定态、量子跃迁和频率条件等概念,但同时又摒弃了一些没有实验根据的传统概念,例如粒子轨道运动的概念。在矩阵力学中,赋予每一个物理量(例如粒子的坐标、动量、能量等)以一个矩阵,它们的代数运算规则与经典物理量不同,两个量的乘积一般不满足交换律。量子体系的有经典对应的各力学量(矩阵或算符)之间的关系(矩阵方程或算符方程),形式上与经典力学相似,但运算规则不同。矩阵力学成功地解决了谐振子、转子、氢原子等的离散能级、光谱线频率和强度等问题,引起物理学界普遍重视。但当时的物理学家对于矩阵代数很陌生,接受矩阵力学是不大容易的。庆幸的是,薛定谔的波动力学也几乎同时提了出来,它的核心是波动方程,这是所有物理学家都熟悉的数学工具。对这一点,物理学家(特别是老一辈物理学家)特别感到欣慰。不久,薛定谔就发现了矩阵力学和波动力学之间的联系,它们只是用了不同的数学语言来表述,而在实质上是完全等价的^[12]。紧接着狄拉克和约当提出一种称为变换理论的更普遍的形式^[13],他们指出矩阵力学和波动力学只不过是量子力学规律的无限多种表达形式中的两种。后来,人们统称之为量子力学。

量子力学提出后它不仅成功地阐明了原子结构问题,而且打通了理解尺度较大的分子和固体、液体和气体物理,以及更小尺度的原子核物理的道路。例如,Heitler 和 London 对氢分子结合机制的研究,开辟了理解原子之间作用力(化学键)的道路,物理和化学两个领域的分界线实际上已经消失。布洛赫的能带论的提出,阐明了固体有金属、半导体和绝缘体之分。海森堡对金属电子相互作用的研究,说明了某些元素的强磁性。伽莫夫用粒子的势垒隧穿(tunneling)概念,说明了 α -衰变的机制,这一点对后来核能的利用有重要意义。在这短短几年中的一系列发现,标志着物理学历史上一个空前成就的时期,被公认为是物理学的一个英雄时代。参加过这一阶段工作的 Condon 这样描述当时令人眼花缭乱的情景,“事情以这样快的步伐发生,以致所有物理学家,不论年长的或年轻的,都患了极度的精神上的消化不良症”^[14]。

众所周知,薛定谔波动方程是关于实物粒子波动的非相对论性理论。狄拉克(1902—1984)在1927年关于电磁场量子化的工作^[15]对此作了补充。这样,涉及非相对论性的实物粒子与电磁场作用的所有问题,原则上都可以解决。量子理论往纵深发展的很重要一步,是狄拉克于1928年提出的相对论性波动方程(狄拉克方程)^[16]。这个方程的主要成果之一,是对氢原子光谱的精细结构和电子的自旋的本质给予了满意的描述。另一个重大成果是预言反物质的存在,并为后来实验所证实。在狄拉克上述两项工作的基础上,在20世纪30年代诞生了量子场论,构成了量子力学发展的另一个大领域。关于量子场论及以后粒子物理的发展的概括情况,可在文献[3]中找到,将不在本文中讲述。关于非相对性量子力学理论的后期进展中,还应提到费恩曼(1918—1988)在20世纪40年代的路径积分(path integral)理论^[15]的工作。量子力学与经典力学的密切关系,在路径积分中展现得格外清楚。如果说海森堡的矩阵力学是经典正则力学的量子对应,薛定谔的波动力学则与经典力学中的雅可比-哈密顿方程有密切的关系。概括起来,它们都与经典力学的哈密顿形式有渊源关系。与此不同,费恩曼的路径积分理论则与经典力学的拉格朗日形式有密切关系,其突出的优点是易于推广到相对论情况,所以在量子场论中有广泛的应用。

* * *

尽管量子力学在提出后的短短几年中,取得如此辉煌的成就,令人欢欣鼓舞,但是关于量子力学的诠释及适用范围,却出现了激烈的争论^[14]。特别是薛定谔方程中的“波函数”的物理含义是什么?玻恩通过对散射实验中粒子的角分布的分析,提出了“波函数的几率诠释”^[18]。它得到了无数实验的支持。玻尔相信,“量子理论诠释的关键在于,必须把彼此矛盾的波动与粒子这两种描述协调起来”。他认为,“波动-粒子二象性(wave-particle duality)是辐射(radiation)和实物粒子(material particle)都具有的内禀的和不可避免的性质”。“波动与粒子描述是两个理想的经典概念,各自有其适用范围。在特定的物理现象的实验探索中,辐射与实物都可展现其波动性或粒子性。但这两种理想的描绘中的任何单独一方,都不能对所研究的现象给出完整的说明”。为了表达这种彼此不相容,而为了完整描述又都是必要的逻辑关系,玻尔提出了“互补性原理”(complementarity principle)。海森堡则沿着另一种思路来考虑,他把问题简单反过来问:量子理论本身决定什么东西能被实验观测到?经过计算,他得出如下惊人的结论:“正如人们能从数学表达看出那样,……人们无法知道一个粒子同时的坐标和动量”,即测量坐标或动量的任何实验,必然导致对其共轭变量的信息的不确定性。两个变量的不确定度之乘积不能小于由普朗克常数给出的一个量。特别是对于一个实物粒子的正则坐标 q 和正则动量 p ,它们的不确定度满足

$$\Delta q \Delta p \geq \hbar/2 \quad (1.13)$$

这个关系给出了在微观世界中应用经典粒子的坐标和动量概念时应受到的限制,后来人

们称之为海森堡不确定度关系(uncertainty relation),它展示了量子力学和经典力学规律的本质上的差异。

爱因斯坦对波函数的几率诠释持反对意见,他倾向于决定论性的(deterministic)描述。他有一句广泛被人们引用的名言。

"I can't believe that God plays dice."(我不相信上帝在掷骰子)

薛定谔也极力反对“几率波”观点。他倾向于认为:波函数本身代表一个实在的物理上的可观测量,一个粒子可以想象为一个物质波包。在1927年Solvey会议之后,以玻尔和海森堡为代表的观点^[19,20](Copenhagen诠释)成为量子力学的正统诠释。Copenhagen诠释的关键是波函数的统计诠释,它的两个理论支柱就是玻尔的互补性原理和海森堡的不确定度关系。以爱因斯坦和薛定谔为代表的另一方,针对Copenhagen诠释提出了很尖锐的批评。这集中反映在两篇著名的文献中,后来被称为薛定谔猫佯谬^[21]和EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)佯谬^[22]。薛定谔猫佯谬一文中,首次提出“纠缠态”(entangled state)一词(指多粒子体系或多自由度体系的一种不能表示为直积形式的叠加态),并用一个假想试验来说明,把叠加波函数的几率诠释应用于宏观世界,会得出何等荒谬的结论。他对量子力学规律是否适用于宏观世界提出质疑。EPR一文则针对波函数的几率诠释,以叠加态来说明“波函数对物理实在的描述是不完备的”,并坚持定域实在论(local realism)的观点,用纠缠态来说明“量子力学对物理实在的描述是不自洽的”。后来,玻姆用两个自旋为1/2的粒子的自旋纠缠态,把EPR佯谬更为简明地表述出来^[23]。

在20世纪60年代中期,这场争论有一个很大的转折。Bell基于定域实在论和存在隐变量(hidden variable)的观点,分析了自旋单态下的两个自旋为1/2的粒子,对于这两个粒子的自旋沿不同方向的投影的关联,他得出了一个著名的不等式(Bell不等式)^[24]。根据这个不等式,可以在实验上检验究竟是正统量子力学正确,还是定域实在论正确。A. Aspect等人的实验观测^[25]以及后来所有有关实验都证明,量子力学的预言是正确的,而定域实在论给出的不等式和隐变量的观点与实验相悖。

"All modern experiments confirm the quantum predictions with unprecedented precision, and... a local realistic explanation of nature is not possible."^[2]

针对薛定谔提出的“量子力学规律对于宏观世界是否适用”的问题,相继出现了一系列理论和实验工作。Zeh与Zurek^[26]等提出用退相干(decoherence)的机制,来说明为什么在宏观世界中实际上观测不到薛定谔猫所处的那种纠缠态。他们认为,只有当体系与世界其他部分完全隔绝的情况下,其量子态的相干叠加性才能得以保持。事实上,宏观体系不可避免与周围环境相互作用,在一般条件下,宏观体系将非常快速地失去其量子态的相干叠加性。近年来,实验工作者还做了一系列有价值的工作,相继在介观尺度^[27]和宏观尺度^[28]上实现了Schrödinger-Cat-like state。

但应该指出,尽管在量子力学基本理论诠释的长期争论中,爱因斯坦和薛定谔并没有占上风,但人们公认,是他们首先认识到量子力学的深层次含义。爱因斯坦首先认识到量子物理会给我们的世界观带来很大的改变^[2],特别随机性会扮演一种新的和比以往更重要的角色。

“would lead to a major change in our view of the world, particularly by giving randomness a new and much more fundamental role than before.”

EPR 佯谬的争论促进了人们对于宏观量子叠加态,特别是纠缠态,进行了大量实验上和理论上的研究,并由此孕育着一门新兴学科——量子信息论(quantum information theory)的诞生,它涉及量子计算(quantum computation)、量子密码学(quantum cryptography)、量子远程传态(quantum teleportation)、量子对策论(quantum game theory)等。

* * *

与任何一门自然科学一样,我们应该把量子力学看成一门还在发展中的学科。除了量子信息论领域之外,量子力学正逐步渗透到生命科学领域,其前景实在难以预测。尽管迄今所有实验都肯定了量子力学的正确性,但这只表明:它在人类迄今实践所及的领域是正确的。量子力学并非绝对真理,量子力学并没有,也不可能,关闭人们进一步认识自然界的道路。量子力学与广义相对论之间的矛盾并未解决^[29]。量子力学理论的争论,或许是一个更深层次的争论的一部分。在进一步探索中,人们对自然界中物质存在的形式和运动规律的认识,也许还有更根本性的变革。

参考文献

- 1 M. Tegmark & J. A. Wheeler. *100 Years of Quantum Mysteries*. Scientific American, 2001(284): 68-75
- 2 A. Zeilinger. Nature. 2000(408): 639-641, *The Quantum Centennial*
- 3 D. Kleppner & R. Jackiw, *One Hundred Years of Quantum Physics*. Science, 2000(289): 893-898
- 4 W. Thomson, *19th Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light*. Phil. Mag. 1901 (2): 1
- 5 A. Einstein. Ann. der Physik, 1905(17): 132
- 6 N. Bohr, *On the Theory of Atomic Constitution*. Phil. Mag. 1913(26): 1, 471, 857
- 7 L. de Broglie, Comptes Rendus, 1923(177), 507; Nature, 1923(112): 540
- 8 C. J. Davisson & L. H. Germer. Nature, 1927(119): 558
- 9 M. Arndt et al.. Nature, 1999(401): 680
- 10 E. Schrödinger, Ann. der Physik, 1926(79): 36, 489; 1926(80): 437; 1926(81): 109