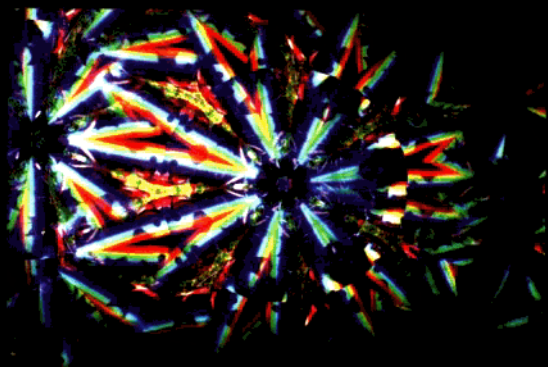


科学教育丛书

主编：郭永 赵仁

QIMIAODEWEIGUANSHIJIE

奇妙的微观世界



编著：赵仁

兵器工业出版社

科学教育丛书

奇妙的微观世界

赵 仁 编著

兵器工业出版社

内容简介

本书以量子力学的建立过程为线,介绍了什么是量子力学以及量子力学在原子世界中起着什么样的作用,并且详细阐述了量子力学建立过程中科学家们进行的学术大战,以及大战对科学发展起的作用。

本书的目的是使大学的文科学生和广大中学生通过对本书的学习知道什么是量子力学,量子力学有什么用处,以及量子力学已经在哪些领域取得了成果。

图书在版编目(CIP)数据

奇妙的微观世界/赵仁编著. —北京:兵器工业出版社, 2000. 8

(科学教育丛书/郭永, 赵仁主编)

ISBN 7-80132-845-0

I. 奇… II. 赵… III. 量子力学-普及读物

N. O413.1-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 69196 号

出版发行:兵器工业出版社

责任编辑:李翠兰 张凤英

社 址:100089 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销:各地新华书店

印 刷:华北工学院印刷厂印刷

版 次:2000 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1—1000 册

封面设计:李 晖

责任校对:赵 仁

责任印制:王京华

开 本:850/1168 1/32

印 张:22.75

字 数:582 千字

定 价:36.00 元(全四册)

《科学教育丛书》编委会

主 编	郭 永 赵 仁	
编 委	张丽春 张子珍 杨总富	
	袁 雯 郭 永 赵 仁	

总 序

科学教育,特别是自然科学教育,是提高人们素质的重要因素,是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需要的知识和技能,更重要的是使人获得科学的思想、科学的精神、科学的态度以及科学方法的熏陶,使人获得非生物本能的智慧,获得非与生俱来的灵魂。可以这样说,没有科学的“教育”,只是培养信仰,而不是教育;没有受过科学教育的人,只能称为受过训练,而非受过教育。而现阶段,我国的大学生接受“科学教育”方面非常薄弱,尤其作为未来教师的师范院校学生,知识面窄,文理交叉学科渗透不深,对当代科学研究的前沿了解甚少。诚然,当前科学技术的发展一日千里,人类的知识宝库正在快速地丰富扩展,把知识建成简明的逻辑体系,使学生能够比较快速地,而又系统地掌握前人已获得的知识,这是一种好的教学方法,是很必要的。但是不能把基本的科学思想和方法传授给青年人,则不能不令人感到这是教育工作的一种跛足现象,是不利于培养高师人材的。

由于历史原因,目前绝大部分的师范院校的学生是专业模式中培养的。而科学的发展对未来人才在知识结构的深度和广度上提出了更高的要求。知识结构单一、缺乏开拓性的学生在社会上是不受欢迎的。因此,在学校教育中,全面提高学生素质,培养学生的创造能力,已成为重中之重。特别是创造能力的培养,是未来素质教育的方向。

结合师范院校的特点,我们组织编写了这套《科学教育丛书》,作为师范院校学生进行科学教育的教材。这是一套有科学性、哲理性和趣味性的著作。各篇文章史料翔实,科学内容准确,观点鲜明,叙述生动流畅,对一些著名科学家的伟大发现作了精辟的分析,并注意介绍

新思想、新概念诞生的历史背景和科学研究的基本方法。书中尽量减少数学公式,力求在科学思想上给读者以有益的启迪。为社会培养善于总结、勇于开拓、知识结构宽广的高素质复合型人才。

在编写过程中,我们参阅了大量资料。引用了有关专家学者的相应论文,在此,向这些书籍、报刊、杂志的作者与出版单位表示诚挚的谢意。

因水平有限,书中难免有不妥之处,望广大读者和专家们批评指导。

编 者

2000 年 5 月

目 录

导言	(1)
第一章 历史的回顾	(3)
第一节 量子力学建立的背景	(3)
第二节 量子力学建立的途经	(5)
第二章 旧量子论的建立	(18)
第一节 黑体辐射的研究	(18)
第二节 光电效应的研究	(29)
第三节 固体比热容的研究	(48)
第三章 玻尔理论	(51)
第一节 关于原子结构模型的探讨	(51)
第二节 玻尔的原子理论	(55)
第三节 爱因斯坦与玻尔有关量子力学问题的争论	(66)
第四章 德布罗意的物质波理论	(69)
第一节 德布罗意物质波的提出	(75)
第二节 物质波理论的实验验证	(80)
第五章 波动力学的建立	(80)
第一节 薛定谔简介	(87)
第二节 踏上科研路	(89)
第三节 创立波动力学	(93)
第四节 薛定谔的科学贡献及思想方法	(99)
第六章 矩阵力学的建立	(99)
第一节 矩阵力学建立的前夜	(102)
第二节 新力学的发现	(105)

第三节 殊途同归·····	(107)
第七章 狄拉克的工作·····	(107)
第一节 远大而崇高的理想·····	(108)
第二节 非凡的胆识·····	(111)
第三节 狄拉克方程的建立·····	(117)
第八章 量子力学解释理论的发展·····	(117)
第一节 波普尔对量子理论的实在论诠释·····	(117)
第二节 薛定谔对波函数的解释·····	(128)
第三节 玻恩的统计诠释·····	(128)
第四节 海森伯的测不准关系与测量理论·····	(129)
第五节 玻尔的互补原理·····	(130)
第六节 爱因斯坦与量子理论·····	(130)
第七节 玻姆的理论·····	(132)
第八节 定域隐参量理论及贝尔不等式提出·····	(133)
第九章 量子力学解释理论的新探讨·····	(135)
第一节 对量子力学互补性诠释的理解·····	(135)
第二节 量子力学中的可观测量、状态和测量·····	(146)
第三节 量子力学的对应原理·····	(158)
第四节 量子力学中的因果关系·····	(161)
第五节 量子力学的哲学解释·····	(171)
第六节 关于量子力学描述方法的几个问题·····	(173)
结束语·····	(177)
参考文献·····	(179)

导 言

科学教育是素质教育的重要环节,包括指导学生树立科学观念、掌握科学的思想方法和基础知识、形成科学的世界观和人生观等内容。在当今科学技术迅猛发展的形势下,为迎接新的科技革命的挑战,强化对学生的科学教育显得尤为重要。

科学教育的开展正是提高学生素质的有效途径,它要求我们从传统的教育思想、教育方法的束缚中解放出来,认识到科学发展的继承性。其中包括科学概念、原理、理论和研究方法的继承性,明确科学不只是像过去教材所描述的那样只是知识积累的结果,还包括科学思想和方法的结晶。在教学中不但教书,而且教人,教科学思想、方法和精神,培养具有科学思维能力、适应科学技术现代化的一代新人。

科学教育的一个重要方面是科学发展史的教育。科学的发展,带动着技术的进步,激发着生产的飞跃,不仅是一个时代科学发展的生动写照,而且指示着人类文明前进的方向。这样说来,科学家尤其是著名科学家,对人类文明进步的贡献是不可估量的。

由于物理学在科技革命和现代化建设中起的特殊作用,因此在科学教育方面扮演着越来越重要的角色。特别是,量子力学的建立,它使物理学经历了一场革命,它的建立使理论物理进展极为迅速,新的科学成果不断出现。因此,量子力学建立中所呈现的科学思想、科学方法、科学精神和科学争论更值得我们去借鉴和学习。

本书通过对量子力学建立过程中科学教育功能的分析,使我们能够得到一些启迪:

(1) 寻找不同现象之间的联系,在统一思想指导下,建立统一的科学理论。这一科学思想,必将引导人们,在一定的领域内建立起概括面广泛而深刻的统一理论,推动科学技术的深入发展。

(2) 科学发现, 不仅在于内容本身的前所未有, 而且在于方法上的创新。对称性原理方法、类比方法、类比模型法、建立假说以及数学表述的应用, 是探索真理的桥梁, 应该充分利用它们, 去揭示新事物的性质和规律, 并不受方法的束缚。

(3) 未知世界常表现出传统观念所意想不到的属性, 这就需要有丰富的想象力和深刻的洞察力, 在纷繁的现象中, 全面审查旧理论的成败, 细致衡量各种可能解释的利弊, 把握本质, 大胆地猜测、假设, 需要有革故鼎新的勇气和探索精神。

(4) 广博的知识是科学创造的必要条件, 也是驰骋想象力和洞察力的必要前提。具有丰富知识和经验的人才有条件产生新的联想和独到的见解。在科学技术发展史上, 由于具有广博的知识, 从其它学科领域中得到启发解决本学科领域中疑难问题的事例是层出不穷的。当前新兴学科、交叉学科和边缘学科不断兴起, 具有广博的知识更显重要。

(5) 和谐是完善的理论的必要要素。自然是和谐的, 反映自然的科学理论也应该是和谐的, 一种理论可能已经具有某些重大的实用价值, 但是在理论的框架上如果还潜在着某些不和谐的因素, 那么必定没有反映未知世界的全部特征, 也就必定有进一步探索、改造直至扬弃的必要。

总之, 量子力学的发展, 为我们提供了很好的科学教育的素材。对它进行总结和挖掘, 并把其中体现的科学思想、科学精神和科学态度教给学生, 培养他们的科学信念科学研究方法, 科学教育工作者责无旁贷。

第一章 历史的回顾

第一节 量子力学建立的背景

在 19 世纪末,经典物理学理论已经发展到相当完备的阶段。几个主要学科——力学,热力学和分子运动论,电磁学以及光学——都已经建立了完整的理论体系,在应用上也取得了巨大成果。其主要标志是:物体的机械运动在其速度远小于光速的情况下,严格遵守牛顿力学的规律;电磁现象总结为麦克斯韦方程组;光现象有光的波动理论,最后也归结为麦克斯韦方程组;热现象有热力学和统计物理的理论。在当时看来,物理学的发展似乎已达到了巅峰。于是,多数物理学家认为物理学的重要定律均已找到,伟大的发现不会再有了,理论已相当完善了。以后的工作无非是在提高实验精度和理论细节上作些补充和修正,使常数测得更精确而已。英国著名物理学家开尔文在一篇瞻望 20 世纪物理学的文章中,就曾谈到:“现在已经基本建成的科学大厦中,后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了。”

然而,正当物理学界沉浸在满足的欢乐之中的时候,从实验上陆续出现了一系列重大发现。如固体比热,黑体辐射,光电效应,原子结构……这些新现象都涉及物质内部的微观过程,用已经建立起来的经典理论进行解释显得无能为力。特别是关于黑体辐射的实验规律,运用经典理论得出的瑞利—金斯公式,虽然在低频部分与实验结果符合得比较好,但是,随着频率的增加,辐射能量单调地增加,在高频部分趋于无限大,即在紫色一端发散,被埃伦菲斯特称为“紫外灾难”,对迈克尔逊—莫雷实验所得出的零结果更是令人费解,实验结果表明,根本不存在“以太漂移”。这引起了物理学家的震惊,反映出

经典物理学面临着严峻的挑战。这两件事被当时物理学界的权威称为“在物理学晴朗的天空的远处还有两朵小小的,令人不安的乌云。”然而就是这两朵小小的乌云,给物理学带来了一场深刻的革命。

表1列出了世纪之交物理学上有重大意义的实验发现。

表1

年份	人物	贡献
1895	伦琴	发现X射线
1896	贝克勒尔	发现放射性
1896	塞曼	发现磁场使光谱线分裂
1897	J·J 汤姆逊	发现电子
1898	卢瑟福	发现 α, β 射线
1898	居里夫妇	发现放射性元素钋和镭
1899~1900	卢梅尔和鲁本斯等人	发现热辐射能量分布曲线偏离 维恩分布率
1900	维拉德	发现了 γ 射线
1901	考夫曼	发现电子的质量随速度增加
1902	勒那德	发现光电效应基本规律
1902	里查森	发现热电子发射规律
1903	卢瑟福	发现放射性元素的蜕变规律

这些新的物理现象,打破了沉闷的空气,把人们的注意力引向更深入、更广阔的天地。这一系列新发现,跟经典物理学的理论体系产生了尖锐的矛盾,暴露了经典物理理论中的隐患,指出了经典物理学的局限性。物理学只有从观念上,从基本假设上以及从理论体系上来一番彻底的变革,才能适应新的形势。由于这些新发现,物理学面临大发展的局面:

1. 电子的发现,打破了原子不可分的传统观念,开辟了原子研究的崭新领域;

2. 放射性的发现,导致了放射学的研究,为原子核物理学作好必要的准备;

3. 以太漂移的探索,使以太理论处于重重矛盾之中。为从根本上抛开以太存在的假设,创立狭义相对论提供了重要依据;

4. 黑体辐射的研究导致了普朗克黑体辐射定律的发现。由此提出了能量子假说,为量子理论的建立打响了第一炮。

总之,在世纪之交的年代里,物理学处于新旧交替的阶段。这个时期,是物理学发展史上不平凡的时期。经典理论的完整大厦,与晴朗天空的远方漂浮着两朵乌云,构成了 19 世纪末的画卷;20 世纪初,新现象、新理论如雨后春笋般不断涌现,物理学界思想异常活跃,堪称物理学的黄金时代。这些新现象与经典理论之间的矛盾,迫使人们冲破原有理论的框架,摆脱经典理论的束缚,在微观理论方面探索新的规律,建立新的理论。

第二节 量子力学建立的途径

建立量子力学的两条途径历来引人注目:一是海森伯的矩阵力学,一是薛定谔的波动力学。它们的确是这场活动的主流。但是从历史上看,特别是从方法上分析,应该说还有狄拉克的工作,他在海森伯初期结果的基础上另辟蹊径。上述三人的工作在量子力学发展中各有其独特的地位。

2.1 海森伯等人的工作

在量子力学建立过程中,海森伯、玻恩等人的工作直接继承了旧量子论的成果,而指引他们前进的思想是玻尔的对对应原理。

玻尔在 1913 年就原子结构提出两点公设时曾考虑到,量子数 n 愈来愈大时,相邻的能级之间的能量差愈来愈小,因而就会趋于经典的连续性。因此他断言,就大轨道而言,量子理论和经典理论应该一致。他借助于爱因斯坦对辐射强度的统计解释,在大量子数情况下把量子跃迁几率和经典轨道的傅里叶分量的振幅联系起来。玻尔在 1918 年明确表述了他的这些认识。这就是后来所谓的对应原理。就对应原理的中心思想而言,它所指明的是,在某种极限情况,经典力学的描述是量子力学描述的一个近似。

海森伯从当时玻尔模型所遇到的困难中看出,只计算能量是不够的,还必须算出跃迁几率,他分析了玻尔对应原理的物理内容,认为对大轨道而言电子轨道概念必须保留,但是这时电子轨道图像是由发射的频率和强度给出的,这就是所谓轨道的傅里叶展开式。他由此得到启发:不应当把微观力学定律写为电子的位置和速度的方程,其中振幅通过发射的强度而与跃迁几率联系起来。沿着这个思路,海森伯提出,应该建立一个类似于经典力学的量子力学,在其中仅仅出现可观察量之间的关系。这就是海森伯的“可观察量原则”。按这个原理,他从过去把注意力只放在定态的能量上的做法变为同时还把注意力放在定态之间的跃迁上。他由玻尔的对对应原理的内容开始,寻求与经典力学的对比,这集中表现在他的《运动学和力学关系的量子力学再解释》一文中。他先从“运动学”角度找出量子力学中如何表示对应于经典力学中轨道概念 $x(t)$ 的量。他把经典概念 $x(t)$ 写成傅里叶展开式:

$$x_{(n,t)} = \sum_n A_{n(n)} e^{i\omega(n)t}$$

他在量子力学中找出对应于上式等号右边的部分的量是

$$\sum_n A_{n,n-\alpha} e^{i\omega(n,n-\alpha)t}$$

这里所依据的是,从对应原理所假定的在大轨道情况下两者的一致推广到所有情况下的对应。接着海森伯又找到对应于 $x^2(t)$ 和 $x(t)y(t)$ 的量,他发现,对应于 $x(t)y(t)$,在量子力学中有

$$c_{(n,n-\beta)} = \sum_n A_{(n,n-\alpha)} B_{(n-\alpha,n-\beta)}$$

可以看出这就是矩阵乘法中积的矩阵元的计算法则。在这个基础上,海森伯又从“动力学”方面进行类比,得到了用量子化条件的情况下解运动方程。由于海森伯找到用量子力学表示的量子化条件和对应于 $x(t)$ 的量,所以他就可以用可观察量类似旧量子论那样进行动力学问题的计算了。正是在这篇文章的基础上,通过玻恩、海森伯

等人的共同努力,建成了矩阵力学。

从上述过程可以看出,在矩阵力学建立过程中,对应原理确实起了很大的作用。对应原理认定在极限的情况下,经典力学应该是量子力学的近似,即在这种极限情况下,量子描述要能过渡到经典描述。海森伯的作法表明,他认为那些在极限情况下在数量上有过渡关系的经典力学量的类比,利用经典力学和旧量子论的成果建立了量子力学。对应原理提出的极限情况下的过渡由海森伯推广到一般情况下的类比,并且他把两者结合起来。这种类比是保证极限过渡关系成立情况下的类比。这种过渡是相互类比的两个描述概念在极限情况下描述效果上的相互一致。海森伯把类比和极限过渡结合起来,从而使类比推理的结果的可靠程度提高了。值得注意的是,尽管另一条建立量子力学的途径不是直接利用对应原理的具体物理内容,但是也同样使用了类比加极限过渡的方法,并找到了体现这种过渡的关系式,他们也取得了成功。因此可以说,对应原理在建立量子力学的不同途径中都起了重要作用。就对应原理的具体物理内容而言,它只是一个假定,但就它的中心思想而言,它反映的是新旧理论之间的关系的一种要求。它指导人们充分利用经典力学的成果,从经典力学向量子力学过渡。正如玻姆所指出的:“满足对应原理的问题决不是无关紧要的,事实上我们将看到,满足对应原理。”值得指出的是,在对应原理提出之前,狭义相对论已经建立,它与牛顿力学的联系已在实际上表现出了新旧理论之间的极限过渡关系。现代物理学的两大支柱——相对论和量子力学——和经典物理理论之间都存在着极限过渡关系,因此我们应该注意对应原理的普遍意义的研究。

2.2 薛定谔等人的工作

薛定谔虽然也采取了类比加极限过渡的方法,但在具体做法上却和海森伯迥然不同。他们是从两个不同的侧面入手的。

薛定谔所继承的是德布罗意和哈密顿的工作。哈密顿在 1828~1837 年间,注意到力学与光学的类似,曾用几何光学的方法研究力

学。他把这两者的类比推广为：“光波矢量相当于粒子的动量，光频率相当于粒子的能。但是哈密顿这样做完全是在数学形式上进行的，并不涉及光的物理本性，只涉及它传播的几何性质。德布罗意在 1923~1924 年间受到关于 X 射线本性争论的启示，并考虑到自然界分为辐射和物质两部分。既然由于爱因斯坦提出光量子假说后，人们把辐射看成是具有波粒二象性的，并且能够解释已有的实验事实，那么，是否物质及其微粒也具有波粒二象性呢。所以他指出，物体的运动和波的传播是分不开的，每个运动都伴随一个波。这被称为物质波假说。他依据相对论和光量子学说提出式子：

$$P = \frac{h\nu}{c} n \quad \text{即} \quad p = \frac{h}{\lambda} n$$

并致力建立一种新的力学。薛定谔继承了哈密顿和德布罗意的思想及做法，他提出了一个象征性的比例式，即通常力学：波动力学 = 几何光学：波动力学。他强调，旧力学中的一些现象必须用描述一种确定的波动运动的方法来描述。这一点与德布罗意强调新力学要给波以主要地位的思想是一致的。薛定谔在这样的思想指导下，类比于经典波动理论着手建立波动力学：他对经典波动方程 $\nabla^2 p - \frac{1}{u^2} p' = 0$ 中 u 的取值加以讨论。他从雅可毕形式的哈密顿原理在形式上完全等同于费马定理这个前提出发，推出 $u = \frac{c}{\sqrt{2m(E-U)}}$ 。他进而考虑用光信号的群速度和相速度来描述粒子运动，得出这样一个条件。我们知道群速度是指一群频率和相速度不同的波形成的高峰的传播速度。但是这些波的频率和相速度不同，所以波包会很快地弥散开来。因而这样用一群的群速度描述质点速度的做法只在一个特定的瞬间才可行，这就是说，只在一个特定的情况下波动描述才和质点描述相一致。在得到这个特定条件之后，薛定谔也把它推广到所有情况。这个条件反映出薛定谔方法客观上体现着对应原理的极限过渡思想。接下去，薛定谔把这个条件代入波动方程，考虑其中函数的

形式从而得到方程 $\nabla^2\psi + \frac{8\pi^2m}{h}(E-U)\psi=0$ 。现在称它为定态薛定谔方程。当薛定谔寻求的物理意义时,假定电荷密度 $\rho=-e\psi\bar{\psi}$,借助这个假定,他从方程得出了与塞曼效应和斯塔克效应实验结果完全相符的计算结果。后来玻恩对 $\psi\bar{\psi}$ 给出了几率解释。

为什么薛定谔和海森伯遵循同样原理,都采用类比加极限过渡的方法,却走上了如此不同的道路,建立了量子力学的两种不同的形式呢?从上面的介绍看,这是由于微观客体具有波粒二象性,这使得他们走上两条不同的道路,各自经历了一个曲折的过程。然而从认识的角度看,两条道路又是多么相似的一个辩证过程;海森伯的路起于旧量子论,那些工作是从研究辐射开始的,当时人们认为辐射是连续的,所以这条路本来起源于连续性对象的研究。由于普朗克、爱因斯坦、玻尔等人的工作,人们开始把非连续性看成微观客体的更本质的特性,所以海森伯侧重于微观客体的粒子性(间断性、非连续性),着意以这种粒子性为根据建立体系,建立起与质点力学的类比,后来采用了适用于这个目的的数学工具——矩阵,从而建立了矩阵力学。薛定谔的路开端是德布罗意的假说,它是从非连续性的实物出发,假定实物粒子有连续性一面——波动性。薛定谔侧重于微观客体的波动性,着意建立波动性描述,因而把波动性作为类比依据,寻求与经典波动理论的类比,这导致他选择了经典波动理论所采用的数学工具——微分方程,从而对立了波动力学。尽管两者各从波粒二象性的一个方面入手,后来又都重视和各自出发点相反的一个方面,但是因为波动性和粒子性是微观客体同时具有的属性,它们分别反映了客体的连续性和非连续性。所以虽然形成这样不同的途径,但是从任何一个侧面展开的研究工作,都不得不或迟或早地涉及另一个侧面,并把两者结合起来以完成对微观客体的统一描述。海森伯侧重粒子性,但在抛弃用轨道概念描述微观客体的做法,转到从能量和跃迁几率方面去研究时,实际上就采用了后来才认识到的用几率描述波动性的