

量子力学浅说

Liangzi

lixue

qianshuo

Liangzi

lixue

qianshuo

科学知识普及小丛书

量 子

力 学

浅 说

王发伯 编

LIANGZI

LIXUE

QIANSHUO

1

湖南科学技术出版社

量子力学浅说

王发伯编

责任编辑 陈青山

*

湖南科学技术出版社

湖南省新华书店发行

益阳人民印刷厂印刷

*

1979年10月第1版第1次印刷

字数: 43,000 印数: 1—14,000 印数: 2.75

统一书号: 13204·10 定价: 0.15元

序 言

世界是物质的，物质是处在不断的运动和变化之中。自从有了人类以来，人们就长期同客观物质世界打交道，朝夕相处。于是，物质世界的各种现象引起人们的反映。人们在长期的生产斗争和科学实验中，对物质世界进行认识，探讨和研究，由浅入深，从低级到高级，从宏观到微观，即从宏大的物质世界到组成物质的基本单元。人们认识客观世界的目的，在于掌握运用物质的运动规律，进而改造物质世界。通过人们的长期实践和认识，在各个知识领域中都获得了大量的带规律性的东西。就物理学这个领域来说吧，物理学是研究物质各种基本的、普遍的运动规律的科学，是其他自然科学和各种工程技术的基础。大约从十六世纪中期起，在不到三个半世纪的时间内，物理学逐渐发展成为一门内容丰富并具有系统性和精确性的学科，确立了速度比光的速度小得多的物体和电磁场的宏观运动规律，适用于这样一个范围内的物理学，人们统称之为古典物理学或经典物理学。当

13032/06

(1)

时自然界发生的各种物理现象，都可以应用古典物理学中的定律来获得圆满的解释，都不会超出这些定律的范围。因此，在十九世纪八十年代，不少的人相信物理学的发展已经达到了完整的地步，认为人们对客观世界的认识，已接近完成的阶段，物理学基本上是一门已完成了的科学，断言尔后对于物理学的研究，实际上是不会有多大的进展，只是把实验和计算做得更精确而已。

客观物质世界果真被人们认识完毕了吗？绝对不会的，停止的论点必然是错误的。到十九世纪末，当人们深入到物质的微观结构时，具体地说，也就是深入到象分子和原子这样的领域时，相继发现许多由于微观客体引起的现象，显然不符合宏观物体的运动规律；用以前建立起来的认为是很完善的古典理论和定律，来解释这些现象，就解释不通。于是，物理学出现了严重的困难。例如，各种元素的原子发射和吸收的特征光谱线的波长分布、热辐射现象、光电效应以及低温下固体的比热等，都是古典物理学理论无法说明的事实。要解决这些困难，非进行新的变革不可。从1900年开始，理论工作者一步一步地放弃古典物理的概念，大胆地提出新的设想，经历了大约四分之一个世纪的时间，逐步阐明了原子结构、电子和电磁场的微观运动规律，这时人们认识到，无论是微观粒子或是电磁场的光量子，都具有波动性的一面

和粒子性的一面。另一方面,通过相对论,人们对时间、空间、物质运动相互联系的认识,有了深刻的理解,开阔了人们的眼界,正是:“山穷水复疑无路,柳暗花明又一村”。本世纪初物理学中的巨大变革,集中体现在相对论和量子力学的建立,它们相互结合在一起,构成了近代物理学的理论基础。

经典力学又称为牛顿力学,它是研究宏观物体在低速运动条件下运动规律的科学;狭义相对论(常简称为相对论),它是研究高速运动物体运动规律的科学;量子力学又称为波动力学,它是研究微观物体(如分子、原子、基本粒子等)运动规律的科学。相对论原理不但适用于宏观世界,而且也适用于微观世界。运用相对论原理的量子力学称为相对论量子力学;不考虑相对论原理的量子力学称为非相对论量子力学。本书介绍的内容属于非相对论量子力学的内容。

这本小册子准备向读者介绍有关量子力学方面的一些基础知识:量子力学的研究对象,它对现代科学技术发展的作用和影响,它产生的历史背景,它的基本原理和一些最简单的应用,以及它的适用范围。

湖南师范学院 王发伯

1979年7月

目 录

一、量子力学的研究对象和作用	(1)
(1) 量子力学的研究对象	(1)
(2) 量子力学的作用	(4)
二、量子力学是怎样产生的	(8)
三、量子力学中的一些基本原理	(25)
(1) 波函数	(25)
(2) 薛定谔方程	(32)
(3) 态叠加原理	(37)
(4) 力学量的算符表示	(39)
(5) 测不准关系	(45)
(6) 全同粒子不可区分	(50)
(7) 泡利原理	(56)
四、量子力学的一些简单应用	(58)
(1) 在一维无限深势阱中运动的粒子	(62)
(2) 势垒贯穿	(67)
五、量子力学的适用范围和发展	(75)

一、量子力学的研究对象和作用

(1) 量子力学的研究对象

量子力学是描述微观粒子运动规律的理论，它是在许多实验事实的基础之上建立起来的科学。任何一门科学都来源于实践，都建立在客观事实的基础之上，是对客观规律的概括和总结。在十九世纪中期以前，人们所接触和研究的对象，都是宏观世界中的物理现象。什么是宏观现象呢？顾名思义，是指人们的感觉器官所能直接感觉到的比较大的物体中所发生的现象。例如在力学中研究的质点、质点组和“刚体”，就作为一个整体来考察它的运动。这些整体，包含着大量的物质单元——原子和分子。我们只考察它的整体运动，而不去讨论它的基本组成部分，如原子和分子的运动。人们最先研究的对象，是宏观世界的各种现象。在研究宏观世界的物理现象中所发现的定律，叫古典物理学的定律。例如：大家都比较熟悉的力学中的牛顿三定律，电学中的库仑定律、欧姆定律和电磁感应定律，光学中的光的反射定律

和折射定律等等。总之，古典物理学是研究宏观世界中的物理现象。随着生产技术的提高，仪器的日益改进，人们能够研究的范围，也一天比一天扩大。当人们的研究领域深入到组成物质的基元时，即研究分子、原子和由少数“基本粒子”构成的“小”体系的物理现象时，我们就称之为微观物理学，或称为量子物理学。现在公认的量子物理学的基本数学理论称为量子力学，所以量子力学是研究微观粒子运动规律的基础理论，是研究原子世界所需要的一种新的力学。但是，不能认为“量子物理学”是某种与宏观世界毫无关系的东西。实际上，整个物理学都可以看成是量子物理学，因为，如果我们知道了支配基本粒子的定律，那么，原则上也就可以预言由大量基本粒子构成的宏观物理体系的行为，这也就是说，古典物理学的定律包括在微观物理学的定律之中，因此，古典物理学的定律，应是量子物理学定律的一种近似或极限情形，量子物理学的定律比古典物理学的定律应用的范围更广泛，它更准确、更全面地反映了客观世界的规律，所以，从这种意义上来说，量子力学在宏观世界中也与在微观世界中一样适用。我们知道，物理学的古典理论应用于宏观体系时的特点，往往是忽略体系行为的细节，所以古典物理学的定律是自然界的近似定律。

为了把量子力学的研究对象，说得更清楚一点，还需要谈一下什么是微观物理学的问题。通常将人们的感觉器官不能直接感觉到的微小物体，叫做微观物体。微观物体中所发生的现象叫做微观现象，通常所说的微观世界，是指微观现象和微观物体的总称。例如，我们不能直接感觉到原子、电子、原子核等微粒以及这些微粒的运动，无疑它们是属于微观世界的。在物理学中，说一个物体或一个基本粒子是大还是小，那就必需把这些物体同另一个标准量的物体进行比较后，才能说出它们的大小。例如一个原子的直径，大约为 10^{-8} 厘米，即一亿分之一厘米；而原子核的大小，约为 10^{-13} 厘米，即十万亿分之一厘米，两者相差十万倍，但它们都为微观领域。由于在微观领域中，存在着完全不同于宏观领域的突出特点，即表征微观粒子的一些特征物理量，如能量、角动量、电荷、自旋等等。对它们不能取任意的数值，而只能取一系列的特定的分立数值，或称之为不连续量子化的一些数值。在微观世界中，不连续性和突变性是一种极其普遍的特性，所以常常将微观世界定义为量子定律起作用的领域，而宏观世界则受古典定律的支配。当然，随着科学技术的突飞猛进，各个领域和科学界限的划分，也会不断变化，各种概念的含意也会不断变化。但总的趋势，是以规律性的类型或性质为基础，来对各

种领域和科学界限进行分类。微观物理学现在是相对论性量子理论占主导地位,因此,微观物理学的研究对象,基本上只是“最简单的”粒子,以及它们的相互作用和它们的运动规律。量子力学通常包括非相对论量子力学和相对论量子力学两部分。非相对论量子力学的研究对象是速度远小于光速的微观粒子;而相对论量子力学的研究对象是高速运动的微观粒子。

(2) 量子力学的作用

由于量子力学是研究微观粒子运动规律的理论基础,因此,凡是涉及到微观世界的各种物理现象,涉及到微观世界中各种基本粒子的相互作用,都必需用到量子力学的有关理论。今天量子力学的作用,已超出了物理学的范围,凡从事各种科学研究的人,只要深入到微观世界,涉及到物质的根本结构有直接关系的各个方面,都必需了解和掌握量子力学这一重要的理论,因为它对现代科学技术发展的作用和影响是极为深刻而广泛的。在二十世纪,物理学中的一个重要成就,是比较彻底地弄清了人们通常所见到的各种物质的行为和性质。地球上不同条件下发生的物质现象,几乎都可以认为是电子和原子核之间的电吸引力,以及各种巨大物体之间的引

力所产生的量子力学结果。利用量子力学的理论，使我们能深刻地认识自然界所发生的各种现象，了解产生这些现象的根本原因，进而从理论上计算出组成各种物质结构的基元——分子和原子的大小、形状和能量；气体、液体和固体在不同温度下的各种性质。

量子力学的另一重要作用，是对氢原子光谱的定量解释。我们知道，氢元素是自然界中各种元素中最轻的一种，列在元素周期表中的第一位，也是最简单的一种元素，原子核外只有一个电子。在量子力学理论建立之前，丹麦物理学家玻尔在卢瑟福所提出的核模型的基础上，发展了量子概念，提出了有关原子结构的假设，对氢原子光谱进行过详细研究并取得重要成果。他采用半经典半量子论的方法，成功地解释了氢原子的光谱线系，计算出了氢原子的能量，是原子结构理论发展中的重大步骤。但是，由于玻尔理论未抓住原子现象最本质的特性，没有揭露出微观粒子的波粒二象性，所以仍未彻底地解决氢原子的问题。应用量子力学，能使玻尔最初提出的量子化规则有了一个牢固的基础。利用单个电子受质子引力场作用的非相对论量子力学，就可以推导出氢原子的性质、光谱和跃迁几率等各种问题。量子力学也能对氦原子的性质进行定量的解释。氦原子是列于元素周期表第二号元素，除了氢元素外，要算它最简单了，

它的原子核外有两个电子，用经典理论来处理氢原子是无能为力的，就是利用玻尔——索末菲早期提出的量子化规则也不能解决问题。此外，在量子力学建立前，化学键的问题，是物理学和化学所面临的重大难题之一，特别是为什么会形成共价键，为什么共价键具有饱和性，古典物理理论和化学理论都无法加以解释，而量子力学能以非常简单的方式，说明化学键的形成，使物理和化学统一了起来。所以，量子力学的建立，不仅解决了古典理论无法解决的问题，而且还广泛地扩展了物理学研究领域，使各门学科更紧密地联系了起来，使人们对物质世界的认识发生了革命性的变化。总之，量子力学解决了原子结构和运动的问题，给化学元素周期律奠定了物理基础，阐明了原子的结构和变化的规律，对分子的结合及其性质也作了理论解释，进而给量子力学应用于化学的研究开辟了道路，建立了量子化学这门新兴的学科，并且已用来指导实践，用理论来“设计”具有指定性能的分子，使有机合成工业发生了革命性的变化。量子力学和相对论用来研究原子核物理现象，建立了原子核理论，它成功地说明了一些原子核结构和碰撞转化现象中的重要规律，在其理论指导下，原子弹、氢弹、反应堆都被制造了出来，现在正向受控热核反应进军，最终解决人类的能源问题。量子力学、相对论与电磁理

论统一起来，形成了量子电动力学，在说明电子和电磁场相互作用方面，取得了与实验相符合的结果。量子力学和统计物理学结合，建立了量子统计物理学，对固体、液体和等离子体中各种物理性质的研究，起着极为重要的作用。总之，量子力学的基本理论，今天已渗透到自然科学的各个领域，推动现代科学技术日新月异地向前发展。

二、量子力学是怎样产生的

量子力学是现代物理学的重要基础理论之一，是研究和探讨微观世界的重要工具，它同其他科学理论一样，不是凭空捏造的，也不是从天上掉下来的，而是由于当时生产力的不断发展，科学技术的突飞猛进，人们对客观世界的认识不断深入的过程中产生出来的。从宏观领域深入到微观世界时，人们不断发现一些如黑体辐射、光电效应和在低温下固体的比热等问题，用旧的古典理论无法解释这些实验事实，甚至根据古典理论进行定量计算还得出很荒谬的结果，古典物理学理论面临严重困难，于是就必需寻找和发现新的理论，用新理论来解释旧理论无法解释的新现象。

从十八世纪起，由于生产力的推动和社会上的迫切需要，物理学开始有了极迅速的发展，同时还分别形成了许多分支，在力学、热学、电磁学和光学方面，都发现了许多定律，逐步形成了一个比较完整的古典理论体系。人们运用这些古典理论，成功地解释了各种物理现象，解决了不少生产中的实际问题。这种状况，大约一

直延续到十九世纪八十年代，古典物理学几乎没有遇到什么重大的难题，发展得非常顺利，于是就有一部分物理学家对这种情况有些自满起来，并且不正确地把古典理论当作物理学的“最终理论”，认为物理学基本上是一门已完成的科学，今后对物理学的研究实际上是不会有有多大成果的了。为什么当时会有一些物理学家产生这种形而上学的看法呢？从当时的情况分析起来看，一方面是可能因为人们的思想受当时生产力发展水平的限制，而科学实验上也还没有出现对古典物理学提出挑战的新事实；另一方面，辩证唯物主义思想还没有广泛地被人们所接受。

到了十九世纪末和二十世纪初，生产力的发展促使物理学进入了对微观现象深入研究的新阶段，结果发现许多实验事实无法用古典理论来解释，其中存在着尖锐的矛盾。在这种事实面前，古典理论的“完美无缺”和“最终理论”的神话开始被打破，迫使人们不得不跳出旧的束缚，提出一些新的革命性的假设，来解释新的微观现象。然而，起初的假设，就整个体系来说，仍然没有完全跳出古典物理学的框框，而是在古典理论的基础上加上一些量子化条件，或者大胆地提出了量子化的问题，却未抓住微观粒子波粒二象性的本质，所以，仍然带有很大的局限性，人们把这一段时期的理论称为旧量

子论。大量的事实表明，微观现象与宏观现象有着根本的区别，它们各自服从不同的客观规律，因而旧量子论革命的不彻底性是必然的。但是，在旧量子论中提出的那些有用的新假设，对后来量子力学的产生却起了积极的促进作用。

古典物理学首先碰到的难题是黑体辐射问题，许多物理学家从不同的方面，运用古典理论，都没有办法来完满地解释这个问题，理论与实验结果总是不符。什么是黑体辐射问题呢？我们知道：任何物体都能向外界辐射电磁波，也能吸收和反射外界其他物体发射来的电磁波，这种电磁波与我们常见的光波和无线电波，本质上是一样的，只不过波长不同而已。在一定温度下，物体发出的这种电磁波，我们一般称为热辐射。处于不同温度下的物体，各自向外辐射能量，也各自吸收和反射外来的能量，这样就产生了能量的交换，显然，辐射、吸收和反射能量的本领，对不同温度的不同物体是不相同的。当一个物体辐射的能量等于它吸收外来的能量时，这个物体就处于热平衡状态。如果一个物体能百分之百的完全吸收投射在它上面的辐射，这样的物体，我们就叫它为绝对黑体。我们常有这样一个经验，黑色的物体比白色的物体吸收光的本领大一些，白色的物体比黑色的物体反射光的本领大一些。所以夏天穿白色的衣服比