

理解科学丛书

1 小时科普

量子力学

朱梓忠 著

本书通过浅显的语言，介绍了量子力学的基本原理，主要讲述了普通量子力学的基本内容及其正统解释。本书尽量追求内容的逻辑性和完整性。

本书对于希望学习量子力学的学生和老师有参考意义，也可供从事自然科学相关工作的以及热爱科学的人士阅读。

清华大学出版社

朱梓忠 著

①
小时科普
量子力学

清华大学出版社
北京

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

1小时科普量子力学 / 朱梓忠著. — 北京: 清华大学出版社, 2018
ISBN 978-7-302-49968-8

I. ①1… II. ①朱… III. ①量子力学 - 普及读物 IV. ①O413.1-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第067746号

责任编辑: 鲁永芳
封面设计: 常雪影
责任校对: 刘玉霞
责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦A座 邮 编: 100084

社总机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者: 三河市金元印装有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170mm × 240mm 印 张: 16.5 字 数: 265千字

版 次: 2018年8月第1版

印 次: 2018年8月第1次印刷

定 价: 49.00元



产品编号: 078955-01

朱梓忠，厦门大学物理系教授。
1989年在复旦大学获博士学位。美国新泽西州立大学博士后，美国依阿华州立大学和能源部阿莫斯实验室博士后。东京大学、香港科技大学和台湾大学访问学者。长期从事基于量子力学基本原理的计算凝聚态物理学研究工作。主持过“863”项目子项目和多项国家自然科学基金项目，发表学术论文200多篇。目前参与两项国家重点研发计划。



理解科学丛书



原点阅读

清华大学出版社

原点阅读 (The Origin), 清华大学出版社旗下的图书品牌, 秉承“科学, 让个人更智慧, 让社会更理性”的理念, 致力于科学普及和科技文化类图书的出版, 传播科学知识、科学精神、科学方法, 展现科学的真实、独立、智慧、多变、宽容、动人及迷人。

前言

量子力学与相对论是 20 世纪人类科学发展的最高成就。它们的哲学基础是最深刻的自然哲学基础。了解量子力学的基本原理对于提高个人的科学素养有很大帮助。当今社会科技发展非常迅速，有很多事物如量子纠缠、量子通信、量子计算、量子密钥以及量子隧穿等，都含有非常新奇的量子力学概念。想要理解这些名词，掌握一部分量子力学的基本原理就变得很有必要。此外，提高科学素养也是很重要的，这样就不至于闹出“纳米是大米的一种”这样的笑话。很多人都听说过“量子”二字，但是对其意义却困惑不解。

撰写本书的最初动因源于我讲授“理论物理导论”课程的时候。当时有学生提问：“既然说牛顿力学在微观世界里是不对的，那么它到底错在哪里了？”我当时怔了一下，是啊，错在哪里了？对于这个看似“简单”的问题，我似乎也没有认认真真思考过。虽然我马上明白，一旦要说牛顿力学有时候不对了，那一定是牛顿的三个定律有时候不对了。所以，回答这个问题需要从解释牛顿三个定律有时候是不对的开始（本书也正是从这里开始的）。此后，对牛顿力学体系基本基石的思考以及对量子力学基本基石的思考就成为撰写本书的冲动。事情都是这样的：在经过了一段较长时间的“想写”与“不想写”的思想斗争后，最后由于很偶然的理由才终于开始真正动笔。只是由于教学和科研的任务很重，撰写的时间只有半年多一点，所以我唯一担心的是书中内容难免会有不恰当的地方。好在，本书的出版应该不会妨碍某个量子力

学行家再写一本更加有用的量子力学书籍。

上述的例子——给学生上量子力学课程的老师可能并没有认真思考过量子力学——让我们明白，能够熟练地运用量子力学的数学框架求出各种物理量其实并不需要我们完全理解量子力学中蕴含的道理。甚至可以大胆地猜测，能够熟练运用量子力学知识但是并没有认真思考过量子力学，这可能是物理系、化学系和材料系等学过量子力学课程的学生中比较普遍存在的现象。本书并不会认真地给出量子力学的诸多数学公式（反之会尽量回避），所以它不会帮助读者获取已知数学框架下的更多的计算技巧。但是，对于希望理解量子力学中的基本道理的读者来说，本书或可提供参考。我会尽量把故事叙述得简单一些，目的也是要照顾到那些完全没有学过量子力学的朋友。如果你认为自己是量子力学的行家，那么要么没有必要阅读本书，要么可能需要容忍书中一些不够严谨的叙述，毕竟只有数学公式才能完整地表达一个物理量所有的含义。经典力学与牛顿力学这两个名词在书中的含义是一样的，而牛顿运动方程就是指牛顿第二定律的运动方程。

我曾经说：“牛顿力学有时候错了”，这马上遭到另一位老师的强烈不满。她说：“不能说牛顿力学错了，牛顿还发明了微积分呢！”我充分理解她对牛顿力学的崇拜。可能如果我改成说，牛顿力学在某些情况下不是很好用，那就不会引起歧义了。所以，为了生命安全，建议各位以后千万不要说牛顿力学错了，而应该说：“牛顿力学在某些情况下好像不太好用”。现在大家都明白，说牛顿力学有时候不适用了（或错了），完全不是说牛顿不够伟大，这只是历史的缘故。在牛顿时代，如果你真的写出了薛定谔方程，那么它根本就没有地方得到验证。而在物理学界，没有办法验证的理论是会被忘却的。牛顿在四大领域有伟大的贡献：①发明了微积分；②由于微积分的发明而写出了万有引力公式；③牛顿力学体系的建立（即三大定律等）；④光学方面的许多重

要贡献。任何一个人作出以上任一项成就都将名垂青史，更何况牛顿同时作出了这么多伟大的贡献。近代物理学之父伽利略有一句名言：大自然这本书是用数学语言写成的。事实上，微积分便是牛顿为了处理基本力学问题（如瞬时速度）而发明的一种强有力的数学工具。只有通过这种新的数学工具，牛顿才能很好地表达他心中的物理世界。量子力学作为一种比牛顿力学更为“优越”的理论体系，也是历史发展到一定阶段的产物。但量子力学不是对牛顿力学的修正，而是完全的革命。可以说，量子力学的基石已经完全不同与于牛顿力学的基石，希望读者看到这一点。量子力学所运用的主要数学工具也与牛顿力学有所不同了。

有朋友的小孩问道：“为什么世界上最著名的一些人物都是物理学家？像爱因斯坦、牛顿……杨振宁这样的人。”其实道理很简单，因为物理学家所发现的都是自然界中最为基本的规律，而且这些基本规律是永恒的和普适的，它们对人类认识自然、改造自然有着根本意义上的重要性。对此，我认为可以补充道：“在过去的三百年间，关于谁是当时最有钱的人，早已被人们所忘记。没有人还记得两百年前谁是最富有的人。即便是现在最有钱的人，也将很快被人们所遗忘。”这并非在鼓励获取一个永恒的名声，只是叙述了一个事实而已。这也不是鼓励大家都去学物理，因为这世界上有很多分工，无论哪一行都需要有人去做。

做科学普及工作的“果壳网”曾经做过调查问卷，调查中国的科学家为什么不愿意参与科普，最终得到的前三大原因分别是：怕媒体、没动力、没渠道。让人欣慰的是，只有9%的科学家认为科学家不应该做科普，这不是他们的责任。中国科学院科学传播局也做了这方面的调查，调查中有很高比例的科学家表示“不能再给我们加任务了，我们已经忙死了”。我基本上赞同同行们的意见，撰写本书确实也花了不少精力。很明显，这本书并不会在科学上取得任何具体的成绩，它不是学术著作，也不是科学进

展，它就是科普作品，只是很多地方比一般的科普书更加深入一些而已。你只要粗略地翻一翻本书就清楚了，它没有数学上的推导，出现的公式也是最基本的那些。而物理的语言是数学，没有数学推演其实就不是物理（如果有不同意见，请轻喷。下同）。书中的内容当然基本上是已知的，但是所有内容都是经过作者思考和理解之后再叙述的。有些概念还在发展中，有些概念作者理解得还不准确，请读者批评和指正。如果读者能反馈意见给我，笔者将无比感激（笔者的 email: zzhu@xmu.edu.cn）。原则上，我可以把本书写得再厚一点，但是这样做将违背本书所希望达到的目标，那就是，在很短的时间内科普量子力学的基础知识。理所当然，我们只能科普普通的量子力学，比较高等的部分只是做了一定的选择（根据作者个人的意见）。

物理学是建立在一些基本原理和基本概念之上，经过数学的演绎和实验的探索而发展和完善起来的学科。所以，理解物理学的基本原理和基本概念就显得尤为重要。书中对量子力学的主要原理和概念进行了思考和剖析，有些是哲学意义上的思考。希望能够将这些思考和叙述传递给学物理的学生、相关的科技工作者和大众。由此，也期待读者能够在本书的基础上继续作更加深入的思考。量子力学叙述起来在很多方面好像有悖于日常的经验，如何浅显地解释量子力学的基本原理就成为本书写作上的挑战。作者将尽量使用简单的叙述和语言来讨论比较复杂的概念，希望读者也能把思维放开一些。

著名的物理学家费恩曼曾经断言：“我想我可以放心地说，没有谁理解量子力学。”惠勒在给友人的信中也写道：“2000年12月是物理中最伟大的发现——量子论——诞生一百周年。为了庆贺它，我建议用一个标题：量子论——我们的荣耀和惭愧。为什么说荣耀，因为物理学所有分支的发展都有量子论的影子。为什么说惭愧，因为一百年过去了，我们仍然不知道量子化的来

源。”惠勒是一位著名的物理学家，普林斯顿大学的荣誉退休教授。所以，很多时候本书无法告诉你为什么在某个地方会出现某种量子化，以及为什么两个粒子会处于纠缠态等类似的问题。本书只是帮助你了解目前基本的量子力学的正统解释和数学框架。笔者的意图是：既希望本书对攻读量子力学课程的大学生们有所启迪（如数学框架方面），也希望能够向一部分大众普及量子力学的基本原理。当然，到底能够在多大程度上完成这个任务，只能有待于时间的验证。

期待本书能够为从事自然科学相关工作的，以及热爱科学的人士提供消遣。最后，应该说，阅读本书从1小时到1个月都是合适的。

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 总论	2
1.2 量子	7
1.3 经典物理学和量子力学	8
1.4 什么时候必须用到量子力学	10
第 2 章 经典物理学的困境	15
2.1 牛顿三个运动定律遇到了问题	16
2.1.1 对牛顿第一定律的讨论	16
2.1.2 对牛顿第二定律的讨论	19
2.1.3 对牛顿第三定律的讨论	21
2.2 量子论创立之前的经典物理学	22
2.3 经典物理学遇到的困难	25
第 3 章 旧量子论时期	29
3.1 新世纪来临：普朗克的突破	30
3.2 光电效应	36
3.3 有核原子模型	39
3.4 玻尔的原子理论	42
3.5 波粒二象性	50

第 4 章 量子力学的创立	61
4.1 海森伯的矩阵力学	62
4.2 薛定谔的波动力学	66
附：狄拉克和他的 q 数形式	71
4.3 量子力学的基本假设和数学框架	77
4.4 薛定谔方程	85
4.5 波函数的几率解释	89
4.6 测不准关系	94
4.7 爱因斯坦与玻尔的争论	98
4.7.1 爱因斯坦和玻尔在量子力学的解释方面的争论	101
4.7.2 在测不准关系上的争论	103
4.7.3 关于量子力学完备性的争论	104
 第 5 章 更多的量子力学基础	 107
5.1 波函数坍缩	108
5.2 态叠加原理	110
5.3 薛定谔的猫	112
5.4 泡利不相容原理	117
5.5 量子隧道效应	124
5.6 1 小时可以大致科普量子力学吗?	126
 第 6 章 非定域性和量子纠缠	 129
6.1 EPR 悖论	130
6.2 量子纠缠	134
6.3 博姆的隐变量理论，贝尔不等式	139
6.4 量子密码	149
6.5 量子隐形传态	153
6.6 量子通信	156
6.7 量子计算	160

第 7 章 高等一点点的量子力学	165
7.1 自旋是什么	166
7.2 非相对论性量子力学的第三种形式	171
7.3 相对论性量子力学	178
7.4 量子力学看起来应该是这样的	179
7.5 密度泛函理论	183
7.6 量子力学的随机性、叠加性和非定域性	186
第 8 章 今日的量子	191
8.1 量子力学和相对论的不相容	192
8.2 当今的物理学	198
8.3 量子力学的学习方法	204
8.4 谈谈诺贝尔奖	209
8.5 爱因斯坦对量子力学的看法	214
8.6 杨振宁对量子力学的贡献	218
参考书目	226
附录 A 量子力学发展简史	228
A.1 量子论创立之前经典物理学在热辐射现象上的进展	228
A.2 旧量子论的诞生和发展	229
A.3 量子力学的创立和完善	234
附录 B 对称性与守恒定律	239
人名的中英文对照	242
后记	249

第1章

引论

1.1 总论

量子力学的巨大影响远远超出了人类科学史上的任何一种理论，值得一个有科学素养的人去认真地了解它。

量子力学奠定了原子弹、核技术、半导体工业等许多重要领域的基础，如今又在量子计算、保密通信等现代高科技领域大显身手。

量子力学研究的是微观世界物质粒子的运动规律，是物理学一个最重要的分支。量子力学的研究对象涉及原子、分子和凝聚态物质，而且包括原子核和基本粒子等。量子力学在化学、材料学和生物学等学科以及许多近代技术中均得到了广泛的应用。它与相对论一起被认为是现代物理学的两大基本支柱。量子力学已经取得了惊人的成功，至今还没有发现一项量子力学的理论预言是错的。当今全球经济的大约 $1/3$ 依赖于以量子力学为基础而发展起来的学科，例如半导体物理学、原子物理学、固体物理学、量子光学、核物理学和粒子物理学甚至于包括化学和宇宙学等。

19 世纪末，人类在生产实践中发现旧有的经典物理学理论无法解释微观系统的一些实验事实。于是，经过物理学家们的努力，在 20 世纪初（主要是 20 年代）创立了量子力学，解释了经典物理学不能解释的现象。量子力学从根本上改变了人类对物质结构及其相互作用的理解。现在，除了需要透过广义相对论描写的引力之外，迄今所有的基本相互作用都可以在目前的量子力学（量子场论）框架内描述。

量子力学是同 20 世纪一起来到人间的。奇妙的是，量子力学甚至有一个大家公认的诞生日，那就是：1900 年 12 月 14 日。这一天，德国伟大的物理学家普朗克在柏林德国科学院物理学年会上宣布了他的伟大发现——能量量子化假说，即标志着量子论的诞生。量子论给我们提供了新的关于自然界的表述方法和思考方式。它能很好地解释原子结构、原子光谱的规律性、化学元素的性质、光的吸收与辐射等。人们将量子的发现称为人类科学和思想领域中的一场伟大的革命。继普朗克发现量子之后，量子力学的发展远远超出了任何一个最能幻想的科幻小说家的想象。

量子力学的发展主要可以分为两个阶段，即1900年至1925年的旧量子论时期和1925年以后的量子力学理论的正式创立和完善阶段。

1. 关于正统的量子力学理论创立之前的旧量子论时代（1900—1925年）

旧量子论主要包括普朗克的量子假说、爱因斯坦的光量子理论和玻尔的原子理论。关于旧量子论的创立，普朗克作出了非常特殊的贡献，取得了划时代意义的突破——第一个窥见了“量子”。人们在研究黑体辐射时，发现维恩公式只在短波范围成立，而瑞利公式只在长波范围适用，这两个公式当时各自独立地在各自的频率区域内成立。1900年10月，普朗克“无意”中凑出了一个公式，它很自然地在短波区域趋于维恩公式，而在长波区域趋于瑞利公式。1900年10月19日，普朗克在柏林物理学会的会议上提出了上述公式。这个公式被发现与实验数据符合得非常好。普朗克非常清楚公式的背后一定隐藏着重要的“东西”，这最终促成了上面提到的1900年12月14日量子假说理论的诞生。所谓的“量子”，就是辐射能量的释放和吸收都是不连续的，而是一小份一小份地进行。普朗克把这每一小份能量称为一个“量子”。

1905年，爱因斯坦引进光量子的概念，并给出了光子的能量、动量与辐射的频率和波长的关系，成功地解释了光电效应。此外，爱因斯坦又提出固体的振动能量也是量子化的，从而解释了低温下固体比热的问题。可以看到，爱因斯坦对早期量子理论的发展起到了举足轻重的作用。1913年，玻尔在卢瑟福有核原子模型的基础上建立起原子的量子理论，按照这个理论，电子只能在分立的轨道上运动。玻尔是旧量子论时代的领袖人物，团结和鼓励了一大批在量子力学领域取得辉煌成就的年轻人。在人们认识到光具有波动和微粒的二象性之后，1923年法国物理学家德布罗

量子力学的发展可主要分为两个阶段，即从1900年至1925年的旧量子论时期以及1925年以后的正式创立和完善阶段。

爱因斯坦是量子力学理论解释的最著名的质疑者，但是他自己对量子力学的发展作出了重要的贡献。

意提出了物质波这一概念。他认为一切微观粒子均伴随着一个波，就是所谓的德布罗意波，这最终帮助了量子力学波动力学形式的诞生。显然，旧量子论是同普朗克、爱因斯坦、玻尔以及索末菲等人的名字紧紧联系在一起的。更加具体的讨论会在相关章节中展开。

2. 关于正统的量子力学理论的创立

1925年，德国物理学家海森伯（W. Heisenberg，曾译为海森堡）建立了量子力学的第一个数学描述——矩阵力学。1926年，奥地利科学家薛定谔提出了描述物质波连续时空演化的偏微分方程——薛定谔方程，从而给出了量子力学的另一个数学描述——波动力学（狄拉克也有一种形式，但通常不被提起）。1948年前后，费恩曼还创立了量子力学的第三种形式——路径积分形式。历史上，正统的量子力学理论的发展有两条路线（后来费恩曼的路径积分形式除外）：一条是从普朗克的量子论到玻尔的原子结构的量子论，再到爱因斯坦的辐射量子论，最后到海森伯的矩阵力学；另一条是从普朗克的量子论到爱因斯坦的光的波粒二象性，再到德布罗意的电子的波粒二象性，最后到薛定谔的波动力学。矩阵力学和波动力学都是逻辑上完备的量子力学体系，二者早被证明是等价的，不过只是数学形式上的不同而已。

量子力学正统理论的发展（从1925年开始）是同海森伯、薛定谔、玻恩、约尔当*、泡利、狄拉克以及德布罗意等人的名字紧紧联系在一起的（这里只列出代表性人物，当然还有其他人），他们完成了把旧量子论转变成一种真正的量子理论这一艰苦的工作。20世纪20年代的物理学风起云涌，重大理论突破不断出现，很快就建立了量子力学比较完善的理论体系。这也使得后来的许多聪明人只能作为“旁观者”而叹息那种激动人心的大发现的时候。

* 本书 Jordan 均译为约尔当。

量子力学正式创建的标志是海森伯的量子力学矩阵力学形式和薛定谔的量子力学波动力学形式的建立。