

A Very Short Introduction

牛津通识读本

量子理论

Quantum Theory

[英国] 约翰·波尔金霍恩 / 著

张用友 何玉红 / 译

[英国] 约翰·波尔金霍恩 著 张用友 何玉红 译

量子理论

牛津通识读本·

Quantum Theory

A Very Short Introduction

图书在版编目(CIP)数据

量子理论 / (英)波尔金霍恩(Polkinghorne, J.)著;张用友,何玉红译. —南京:译林出版社, 2015.8

(牛津通识读本)

书名原文: Quantum Theory: A Very Short Introduction

ISBN 978-7-5447-5507-8

I. ①量… II. ①波… ②张… ③何… III. ①量子论
IV. ①O413

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第110113号

Copyright © John Polkinghorne, 2002

Quantum Theory was originally published in English in 2002.

This Bilingual Edition is published by arrangement with Oxford University Press and is for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan, and may not be bought for export therefrom.

Chinese and English edition copyright © 2015 by Yilin Press, Ltd.

著作权合同登记号 图字: 10-2014-197号

书 名	量子理论
作 者	[英国] 约翰·波尔金霍恩
译 者	张用友 何玉红
责任编辑	何本国
原文出版	Oxford University Press, 2002
出版发行	凤凰出版传媒股份有限公司 译林出版社
出版社地址	南京市湖南路1号A楼, 邮编: 210009
电子邮箱	yilin@yilin.com
出版社网址	http://www.yilin.com
经 销	凤凰出版传媒股份有限公司
印 刷	江苏凤凰通达印刷有限公司
开 本	635毫米×889毫米 1/16
印 张	15
插 页	4
版 次	2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷
书 号	ISBN 978-7-5447-5507-8
定 价	25.00元

译林版图书若有印装错误可向出版社调换
(电话: 025-83658316)

序言

李淼

对于我们的世界，科学家有两套体系来解释。

第一套体系已经存在了300多年，这就是牛顿的力学体系，机械论。事实上，这套体系的核心概念至少存在了2000多年，从亚里士多德开始，认为世界像一个大钟一样一旦上紧了发条，就有条不紊地运行下去，直到永远。这套体系与我们的日常经验吻合，里面的概念都可以用我们眼睛看到的具体事物来实现。

第二套体系存在了不到100年，严格说来是90年，这就是几位最幸运的天才在1925年前后发现的量子力学体系。根据这套体系，我们人眼看到的并不是世界背后最基本的元素，例如一个物体的状态不可以用它的位置和速度来描述。根据海森堡，我们可以谈一个粒子的具体位置，也可以谈它的具体速度，但不能同时谈它的位置和速度。这样，我们熟悉的简单决定论就失效了：当我们知道粒子的位置时，为了预言它下一刻的位置，就必须知道它的速度。不确定性原理告诉我们，这不可能。

不确定性原理完全违背了我们的直觉。但事情不会到此为止，量子论总是给我们带来无穷无尽的麻烦。比如纠缠，这个现象说，相隔遥远的测量结果会互相影响，并且这种影响看起来是瞬时的，这就是量子物体之间神秘的纠缠。但是，你却不能通过这种纠缠实现瞬时通信，更不能实现心灵感应。

还有很多我们无法理解的事情，例如，你无法区别两个电子，它们不同于两个人，可以叫作张三和李四。两个电子确实有两个，但不能被我们标记为甲电子和乙电子。在某个时刻你看到的两个电子，在下一个时刻你已经无法区分谁是谁了。

我们可以将量子世界的特点一直罗列下去，但这不是这篇序言该做的事情。其实，这也不是英国著名物理学家约翰·波尔金霍恩(John Polkinghorne)在这本小书中想做的事情。量子世界虽然不可思议，就像该书首页引用的费曼名言“我认为我可以肯定地说，现在没有人理解量子力学”所说的，但如果没有量子论，太阳不会燃烧，原子会四分五裂，我们熟悉的整个世界会四分五裂。

这本书不能看作普及量子论的科普书，但它还是某种形式的科普。它不为完全不懂量子论的人解释量子论，但它梳理了量子的基本概念和性质。与普通量子科普书不同的是，作者想告诉我们量子世界是如何令人惊讶，物理学家如何试图把握这个理论，如何提出不同的解释，比如哥本哈根解释、新哥本哈根解释、隐变量、贝尔关于量子的非实在论的工作，甚至还有多世界解释——我们的世界通过事物之间的互相作用不断地分裂成更多的世界，等等。因此，这本书不仅应该推荐给普通人，更应该推荐给物理系的学生和物理系的教授阅读。

确实，阅读了这本小册子之后，我又重新理解了过去以为已经理解的各种理论，多世界也好，测量问题也好，意识在量子世界扮演的角色也好。反正，这是一本值得任何对自然抱有好奇心的人静下心来认真看一遍的书。我个人觉得这本书不那么容易懂，却还是要推荐给大家，书中的每句话都是作者认真思考过的。

最后，想谈一谈作者本人，约翰·波尔金霍恩。我们读研究生的时候，一些对量子场论和粒子物理学感兴趣的同学就已经熟悉他的名字了。他研究过夸克，以及粒子作用的一些性质。当我陷入超弦理论时，我还阅读了他和别人合著的一本关于粒子散射的名著。尽管他的物理学成就足以引起任何一位同行的敬意，让我觉得不可思议的是，他在中年时放弃了专业物理学家身份，成为一名专业牧师。当然，在成为专业牧师后他并没有放弃物理学，例如你手中的这本书就是他在2002年出版的。

当他退出物理学界时，他47岁，这是1977年，那时我快高中毕业了。他说，他在25年的物理学职业生涯中已经做了能够对物理学做的事，他的最重要的研究也许已经做了，因此，神职工作应该是最美的第二个职业生涯。确实，他在第二个职业生涯中做得十分出色，56岁时担任了剑桥三一教堂的院长，同时担任皇后学院院长，直到66岁退休。

波尔金霍恩除了专著外还写了几本科普著作，写得最多的还是科学与宗教的关系，一共26本，还获得了邓普顿奖金。他认为存在自由意志，这一点我很喜欢，因为我也相信人有自由意志。但他不认为自由意志与量子世界的随机性有关，我却坚定地认为人的自由意志与量子有关，不一定是简单的随机性，也许与霍金的“无界理论”有些关系，我不确定。不管怎样，他是我的一个榜样，成功地实现了第二个职业生涯，当然，我不是有神论者，我的第二个职业生涯将是什么我还很模糊。作为序言，我扯得有点远了，但我觉得了解作者本人对阅读他的著作有帮助。

谨以此书纪念

保罗·阿德里安·莫里斯·狄拉克

1902—1984

我认为我可以肯定地说，现在没有人理解量子力学。

——理查德·费曼

致谢

感谢牛津大学出版社工作人员在书稿付印过程中提供的帮助,并且特别感谢谢利·考克斯在第一稿中给予的许多有帮助的建议。

约翰·波尔金霍恩
于剑桥大学皇后学院

前言

20世纪20年代中期，人类发现了现代量子理论。该理论带来了自艾萨克·牛顿时代以来人类认识物理世界本质的最重大变革。人们发现，曾经被认为是具有清晰、确定过程的地方，在亚原子基础上，其行为是模糊的、断断续续的。与这个革命性变化相比，狭义相对论和广义相对论的伟大发现，似乎仅仅是对经典物理的有趣改变。事实上，相对论的创始人阿尔伯特·爱因斯坦发现现代量子力学是如此不符合他的形而上学旨趣，以至于他直到临终时都在执拗地反对量子力学。可以毫不夸张地说，量子理论是20世纪最杰出的智力成果之一，而且它的发现对我们理解物理过程来说是一次真正的革命。

正因为如此，享受量子理论不应该成为理论物理学家独有的乐趣。虽然完整地描述这个理论需要使用它的自然语言——数学，但是，对于准备花一些精力来读完一个卓越发现的普通读者来说，它的许多基本概念还是可以被理解的。写这本书的时候，我考虑的就是这样的读者。本书正文不包含任何数学方程。在后面的简短附录中，我总结了一些简单的数学见解，它们可以给那些有能力消化更多知识的读者提供进一步的启示。（该附录的相关条目在正文中以粗体形式交叉指引。）

在最初发现之后超过75年的应用过程中，量子理论被证明

是卓有成效的。目前人们自信且成功地将它应用于夸克和胶子（当代原子核物质基本成分的候选物）的讨论中，尽管这些物质最多只有量子先驱者们所关注的原子的亿分之一大。然而，依然存在一个深刻的矛盾。关于这一点，本书开篇引语有一些生动夸张的表述，代表了伟大的第二代量子物理学家理查德·费曼的看法，但事实显然是，虽然知道怎么得出结论，但我们对这个理论的理解尚不够充分。接下来我们将看到，重要的解释性问题仍然没有解决。要最终解决它们，不仅需要物理洞察力，还需要形而上学的决断。

年轻时，我有幸在保罗·狄拉克讲授其著名剑桥课程的时期，跟在他身边学习量子理论。狄拉克讲座的素材与他的拓荒之作《量子力学原理》基本一致。《量子力学原理》是20世纪科学出版物中真正的经典著作。狄拉克不仅是我个人认识的最伟大的理论物理学家，他纯粹的精神和谦逊的态度（他从没有丝毫强调过自己对物理学基本原理的巨大贡献）也使他成为一位励志人物和科学圣人。谨以本书纪念他。

目录

- 致谢 1
- 前言 2
- 1 经典物理的缺陷 1
- 2 曙光显现 14
- 3 日益加深的困惑 38
- 4 进一步发展 54
- 5 相聚 71
- 6 教训与价值 78
- 术语表 87
- 数学附录 81
- 索引 103
- 英文原文 109

经典物理的缺陷

现代物理科学的首次繁荣在1687年达到顶峰，其标志是艾萨克·牛顿的《自然哲学之数学原理》的出版。此后，力学作为一门成熟科学得以建立，并且能够以清晰确定的方式描述粒子运动。这门新兴科学看起来是如此地无懈可击，以至于在18世纪末，最伟大的牛顿力学继承者皮埃尔·西蒙·拉普拉斯做出了那个著名的断言：如果拥有无限的计算能力，并且知道某一时刻所有粒子的位置，人类就可以利用牛顿方程预测整个宇宙的未来，并且可以同样确定地反推宇宙过去。实际上，这个有些骇人听闻的机械论断言始终摆脱不了人们对其狂妄自负的强烈怀疑。首先，人类自身就不能像时钟一样按部就班地自动工作。其次，牛顿力学的成就虽然毫无疑问非常引人瞩目，但其并没有囊括当时已知物理世界的方方面面，仍然有一些未解决的问题在威胁着对牛顿力学体系自足性的信心。例如，牛顿发现的普适的引力平方反比定律（万有引力定律）的本质和起源是什么？这是一个牛顿自己也拒绝给出假设来回答的问题。另外，光的本质问题也没有解决。这方面，牛顿倒是在一定程度上给出了一个推测性的看法。在《光学》一书中，牛顿倾向于认为光是由一束小粒子流组成的。这种微粒说与牛顿从原子论方面看待物理世界的倾向是一致的。

光的本质

现在看来，对光的本质的理解，直到19世纪，人们才取得真正的进步。19世纪伊始，即1801年，托马斯·杨给出了一个非常有说服力的证据，表明光具有波动性，这也证实了一个世纪以前与牛顿同时代的荷兰人克里斯蒂安·惠更斯的推测。杨氏实验的核心是我们今天称作干涉现象的效应，典型的例子就是光干涉实验中出现的明暗交替条纹。具有讽刺意味的是，牛顿本人已经发现了类似实验现象，今天我们称其为牛顿环。这类效应是波的特征，是按照如下方式发生的：两列波的叠加方式依赖于它们之间的相互振动。如果它们是同步的（物理学家的说法是相位同步），则波峰与波峰相互重叠，从而实现两列波间最大程度的相互加强。这种现象表现在光上就是明条纹。然而，当两列波完全不同步时（物理上指相位不同步），一列波的波峰与另一列波的波谷将会相互重叠，进而相互抵消。表现在光上，就会得到暗条纹。因此，明暗交替的干涉条纹的出现，毫无疑问地证实了波的存在。杨氏实验的结果似乎已经回答了光的本质问题，即光是一种波。

随着19世纪物理学的发展，人们对光的波动性的认识似乎变得更加清晰。汉斯·克里斯蒂安·奥斯特和迈克尔·法拉第的重要发现表明，电和磁这两种初看上去似乎特征迥异的现象，事实上彼此紧密相关。将电和磁以统一的方式进行描述的电磁理论最终由詹姆斯·克拉克·麦克斯韦完成。麦克斯韦是一位天才，说他可以与牛顿齐名并不为过。1873年，麦克斯韦在《论电和磁》一书中，给出了著名的电磁理论方程，该方程至今仍是电磁理论的基石，而《论电和磁》也是科学出版史上开创时代的经

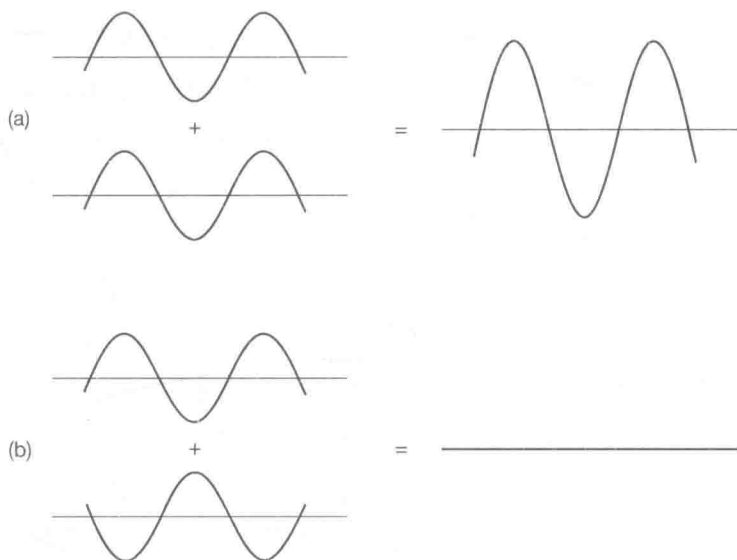


图1 两列波的叠加：(a) 完全同步；(b) 完全不同步

典巨著。麦克斯韦认识到这些电磁方程拥有波类型解，并且这些波的速度由已知的物理常数决定。而实际上，这些波的速度就是光速！

这个发现被视为19世纪物理学最伟大的胜利。光是电磁波的事实似乎被完全证实。麦克斯韦和同时代人认为这些波是弥漫于宇宙的弹性介质的振动，这种介质随后被称为以太。在一篇百科全书式文章中，他说以太是整个物理理论中证实最充分的物理对象。

我们把牛顿和麦克斯韦的物理学称为经典物理。到19世纪末，它已经成为一个壮观的理论大厦。当元老们，如开尔文勋爵，开始认为人们现在已经知道了所有物理学的重大思想，留待解决的只是以更高的准确性去处理细节时，简直一点也不令人吃

惊。在19世纪八九十年代，德国的一个年轻人在思考他的学术事业时，被警告不要研究物理学。最好是到别的学科看看，因为物理学已经走到了路的尽头，没留下多少真正值得研究的东西了。这个年轻人的名字叫马克斯·普朗克，幸运的是他没有理会给他的建议。

事实上，在经典物理华丽的外表上已经开始显露出一些缺陷。在19世纪80年代，美国人迈克尔逊和莫雷已经做了一些聪明的实验，试图证明地球在以太中的运动。其思想如下：如果光确实是该介质中的波，那么测量到光速应该取决于观测者如何相对于以太移动。想象一下海上的波浪。从一艘船上观测到的它们的视觉速度，取决于这艘船是随着这些波浪运动还是逆着这些波浪运动，前者的速度要小于后者。设计这个实验的目的是比较光在两个相互垂直方向上的速度。只有当地球在进行测量时碰巧与以太相对静止，这两个速度才有望相同，而这种可能性可以通过在几个月后重复这个实验予以排除，那时地球在它的轨道中就向不同的方向运动了。实际上，迈克尔逊和莫雷探测不出任何速率上的差别。解决这个问题需要爱因斯坦的狭义相对论，该理论彻底摒弃了以太。这个伟大的发现并不是我们现在的关注点，不过应该注意到，相对论虽然意义重大且令人惊讶，却并没有放弃经典物理所具有的清晰性和确定性。这就是为什么我在前言中说狭义相对论所要求的革命性思想比量子理论所要求的要少得多。

光谱

量子革命的第一个线索实际上出现于1885年，虽然当时并没有被认识到。这个线索源自一名瑞士教师巴耳末的数学涂鸦。

他当时正在思考氢光谱，也就是从白炽气体发射出来的光经过棱镜后分裂成的一组分离的彩色条纹。不同颜色对应于所涉及光波的不同频率（振荡速率）。通过摆弄数字，巴耳末发现这些频率能够用一个非常简单的数学公式来描述（见数学附录1）。在那个时代，该发现似乎仅仅是一种好奇。

随后，人们试图用他们当时对原子的认识去理解巴耳末得出的结果。1897年，汤姆孙发现原子中的负电荷由微小粒子携带，这些微小粒子最后被命名为“电子”。用以平衡的正电荷被假定为只是简单地分布在原子中。这个观点被称为“梅子布丁模型”，电子相当于梅子，正电荷相当于布丁。光谱频率从而对应于电子在正电荷“布丁”中的各种振荡方式。然而，以在经验上令人满意的方式使这个观点实际起作用是极其困难的。我们将会看到，对巴耳末的古怪发现的正确解释，最终使用了一套非常不同的观点。同时，原子的本质可能太令人费解，因而这些问题没有引起大范围的关注。

紫外灾难

更加明显具有挑战性和迷惑性的是另一个被称为“紫外灾难”的难题，这个难题最先由瑞利勋爵于1900年发现。紫外灾难源自19世纪另一个伟大发现——统计物理的应用。这里，科学家们试图理解和掌握复杂系统的行为，复杂系统中具体的运动状态可以呈现很多不同的形式。这种系统的一个例子就是由许多不同分子组成的一种气体，其中每个分子处于各自的运动状态。另一个例子就是辐射能，它可能由许多不同频率的能量组成。追踪如此复杂的系统中正在发生的所有细节是不可能的，但是，它们整体行为的一些重要方面仍可以被计算出来。事实就

是这样，因为整体行为是对许多个体成分运动状态的一个粗粒化平均的结果。在这些可能性当中，最有可能的那一个起支配作用，因为它表现出压倒一切的最大可能。基于最概然估计，克拉克·麦克斯韦和路德维希·玻尔兹曼得以证明，人们能够可靠地计算一个复杂系统整体行为的特定整体性质，例如，已知气体的体积和温度来计算气体的压强。

瑞利将统计物理的这些技术应用到黑体辐射问题上，研究能量是如何分布在不同频率之间的。所谓的黑体就是能够对入射到身上的辐射全部吸收，并能将它们全部再发射出去的物体。黑体的平衡态辐射光谱问题似乎是一个相当另类的问题，但实际上，在非常好的近似下黑体是可实现的。因此，这是一个从理论上和实验上都可以研究的问题，例如研究一个特制烤箱内部的辐射。这个问题可以通过以下已知事实来简化：该问题的答案仅取决于黑体的温度，而不取决于黑体结构的任何其他细节。瑞利指出，直接应用屡试不爽的统计物理思想将导致灾难性的结果。计算结果不仅与测量的光谱不一致，而且根本没有任何意义。计算结果预言，集中在高频处的能量将会无限大。这个令人尴尬的结论被称为“紫外灾难”。它的灾难性足够清晰：“紫外”是“高频”的另一种说法。灾难的出现是因为经典统计物理学预见到，系统的每个自由度（这里指辐射能够波动的每种特定方式）都将接受相同的固定能量，该能量大小仅取决于温度。频率越高，对应的振荡模式的数量就越多，结果就是高频区的任何东西都不受控制，进而堆积出无限能量。这个问题不只是经典物理学光鲜外表上的一个难看的瑕疵，更确切地说，它是大厦裂开的一个巨大漏洞。

一年内，已在柏林担任物理教授的马克斯·普朗克发现了一