

Quantum Mechanics

上帝与天才的游戏

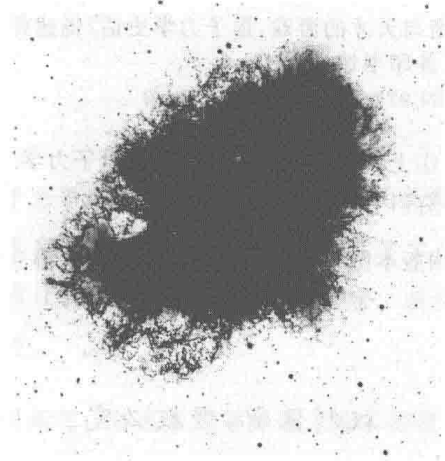
量子力学史话

杨建邺 著



SINCE 1897

商务印书馆
The Commercial Press



Quantum Mechanics

上帝与天才的游戏

量子力学史话



藏书
杨建邺 著

 商务印书馆
SINCE 1897 The Commercial Press

2017年·北京

图书在版编目(CIP)数据

上帝与天才的游戏:量子力学史话/杨建邺著. —
北京:商务印书馆,2017

ISBN 978-7-100-12878-0

I. ①上… II. ①杨… III. ①量子力学—物理学史—普及读物 IV. ①O413.1-09

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 007274 号

权利保留,侵权必究。

上帝与天才的游戏

——量子力学史话

杨建邺 著

商务印书馆出版

(北京王府井大街36号 邮政编码100710)

商务印书馆发行

北京冠中印刷厂印刷

ISBN 978-7-100-12878-0

2017年6月第1版

开本 787×960 1/16

2017年6月北京第1次印刷

印张 25

定价:59.00元

爱因斯坦：量子力学给人印象深刻，但是是一种内在的声音告诉我它并不是真实的，这个理论得到了很多了不起的结果，可是它并没有让我更接近“上帝”的秘密。我坚信上帝是不会掷骰子的。

玻尔：爱因斯坦，你怎么能够知道上帝不掷骰子？

霍金：上帝不但掷骰子，他还把骰子掷到我们看不见的地方……
(过几年之后霍金又说：我们找到了骰子。)

目录

前言	1
序篇	4
无奈之中：普朗克揭竿而起	10
普朗克其人 10	
无奈之中的抉择 12	
普朗克进退失据 16	
战争让普朗克饱受痛苦 20	
向前推进：爱因斯坦得不到理解	25
伯尔尼专利局的技术员 25	
一个启发性观点 28	
一片反对之声 33	
密立根歪打正着 35	
康普顿效应定乾坤 38	
福星降临：能斯特请教爱因斯坦	43
固体比热出现难题 43	
第一届索尔维会议 46	
第一届索尔维会议的重要作用 50	

新秀玻尔：命令原子如何运动 54

来到剑桥，又离开剑桥 54

来到卢瑟福的身边 57

转机 61

原子内部信息的传递者 65

伟大的突破 69

反响 74

无心插柳：弗兰克和赫兹谱新篇 79

弗兰克—赫兹实验 80

弗兰克和赫兹的错误结论 83

引起争论 85

玻尔原子理论最终获胜 87

初生牛犊：法国王子让爱因斯坦自叹弗如 90

路易·德布罗意其人 91

德布罗意的博士论文 93

爱因斯坦慧眼识英才 96

德布罗意的思路 97

物质波思想的实验验证 100

几点启示 105

绝境求生：海森伯和矩阵力学的崛起 107

走进物理学殿堂 107

“玻尔节”上遇玻尔 110

差一点得不到博士学位 115

哥本哈根之行，灵感突发 117

矩阵力学横空出世 119

拨云睹日：泡利不相容原理和电子自旋的发现 126

天才泡利 126

不相容原理—泡利原理 130

Kronig 的不幸 131

乌伦贝克和高斯密特运气好 133

谁更聪明：薛定谔方程还是薛定谔	139
维也纳大学出来的物理学家	139
机遇找上了薛定谔	143
惊喜和诅咒并存	147
殊途同归，各有千秋	151
灵机一动：“具有魔力”的狄拉克方程	155
狄拉克青少年时期	156
剑桥大学的研究生	158
初显身手，气度不凡	160
狄拉克方程和第一个意想不到的礼物—自旋	163
狄拉克方程的第二个意想不到的礼物—反粒子	167
荣获诺贝尔物理学奖	170
争长竞短：不确定性原理和互补原理	172
矛盾重重，争论不断	172
互补原理和哥本哈根学派的诠释	179
异军突起：玻恩的几率诠释	184
“我怎样成了一个物理学家”	185
哥廷根大学物理系主任	188
波函数的几率诠释	192
玻恩诠释给科学观念带来的冲击	195
爱因斯坦：上帝不掷骰子	201
量子论的初期探索	201
爱因斯坦与玻尔	207
第五届索尔维会议上的第一次交锋	210
第二次交锋—光盒佯谬	216
第三次交锋—EPR 佯谬	218
贝尔不等式和实验验证	222
生死未卜：薛定谔的猫和多世界诠释	225
薛定谔的猫	225

量子力学的多世界诠释	229
魔术大师：怪才费曼和费曼规则	237
迷人的科学风采	237
另辟途径	243
奇妙的费曼图	248
出师不利	250
终于走上坦途	255
规范理论：多彩的粒子物理学	258
安德森意外在实验中发现正电子	260
汤川秀树和介子理论	265
规范场理论和规范粒子 W^\pm 和 Z^0	272
奇才盖尔曼—夸克	279
寻找上帝粒子	282
引力之谜：钱德拉塞卡、霍金和量子引力	290
钱德拉塞卡欲哭无泪	290
霍金辐射和黑洞不黑	303
量子引力探密	314
人间奇迹：量子技术和工程	321
奇妙的量子隧道效应	322
普利希娜小姐和激光	332
奇妙的超导和超流	344
纳米技术	363
量子计算机	367
参考书目	372
中英人名对照表	376
量子力学大事年表	382

前 言

20 世纪初，物理学家开始探索原子、原子核以及基本粒子这个无声无形的世界，继理论和实验探讨之后，出现了一个新的王国——量子力学（Quantum Mechanics）。

我们可以毫不夸张地说量子力学是历史上最成功的理论。它的起源可以追溯到一百多年以前，但是直到 20 世纪末，由于量子工程和技术广泛运用，而且与人们日常生活息息相关，介绍“量子”方面的书才逐渐增多，众多读者才慢慢熟悉“量子”（quanta）这个词。

量子力学始于普朗克的量子论（创立于 1900 年），接着爱因斯坦向前大大推进了量子论，玻尔的进入更是大大加快了量子理论的进展。在量子理论对这光怪陆离的世界的描述中，人们习惯的定律经常失效。一个粒子可以同时处于多个位置，还可以无阻碍地穿过障碍物；所有的物体都有“波粒二象性”，它既是粒子又是波；两个分得很开的物体也可以进行某种“纠缠”（entanglement），类似“精神性”的合作。如此种种，使得量子理论听起来总是令人不可思议。量子理论的创立者之一丹麦物理学家尼尔斯·玻尔（Niels Bohr, 1885—1962, 1922 年获得诺贝尔物理学奖）就曾经说过：“如果一个人没有被量子力学弄糊涂，那他就还没有真正懂得量子力学。”

1988 年获得诺贝尔物理学奖的莱德曼（Leon Lederman, 1922—）在他写于 1993 年的《上帝粒子——假如宇宙是答案，究竟什么是问题》一书中谈到量子力学引起的种种困惑时写道：

这件事引发了一个更加深刻的问题，人类的大脑是否已为理解量

子物理学的神秘做好了准备呢？这个问题直到 20 世纪 90 年代还困扰着一些非常优秀的物理学家。理论家帕格尔斯（Heins Pagels，年前悲惨地死于一次登山事故）¹在他写得非常好的《宇宙密码》（*The Cosmic Code*）一书中指出：“人的大脑可能还没有进化得足够完善，以至于现在还无法理解量子实在。”他可能是对的，尽管他的几个同行似乎自认为比我们中的其他人进化得更加完善一些。

正因为如此，多少年来，量子理论的神秘面纱使得它始终不为科学研究领域以外的大众所了解。

实际上，量子理论是门非常实用的学科，早在第二次世界大战之前，它的原理就已经被运用于超导、分析金属和半导体的电学和热学性质。战后，晶体管 and 激光器这两个运用量子理论原理的广为人知的装置，更是极大地推动了信息革命的发展。

现在，我们的周围到处都是直接或间接运用量子理论的技术和装置。从最简单的 CD 唱片机到庞大的现代光纤通信系统，从无水涂料到激光制动车闸，从医院的核磁共振成像仪到隧道扫描显微镜，量子技术已经成为一种具有极大商业利润的行业，因量子理论的成功运用而获得的巨大收益占据了工业国家国民生产总值的很大一部分。

在 21 世纪未来的日子里，量子技术将提供更多惊人的进展，例如在纳米技术装置领域，它的目标是设计和制造分子尺寸的机器，其潜在运用包括医学、计算机以及新型奇异材料的构造；量子技术专家已经可以俘获单个原子了，并且还可以利用可控的电磁场操纵原子，进行量子雕刻甚至是晶体的单原子成像；还有正处于设想中的量子计算机、量子运输……真是前途无量！

本书除了介绍量子力学艰难成长过程 and 为之做出了卓越贡献的物理学家们，还将以适当的篇幅介绍量子力学带来的伟大的技术革命。

当读者看完这本书以后，也许能更深刻体会莱德曼说的一段话：

作为一门在 20 世纪 90 年代占统治地位的精妙的理论，量子力学行得通。它在原子领域行得通。它在分子领域行得通。它在复杂的固

1 这悲惨的一年是 1988 年。——译注

体、金属、绝缘体、半导体、超导体，以及已应用它的任何领域内都行得通。但对我们来说更重要的是，量子理论是我们目前在研究原子核、原子核结构及其下面的更基本的物质——在那里我们将遇到“原子”和上帝粒子——中所拥有的唯一工具。也正是在那里，量子理论的概念性难题将扮演一个重要的角色，虽然这些难题常常被大多数物理学家视为只是“哲学问题”而避而不谈。

序 篇

19世纪末，经典物理学获得了全面的发展和巨大的成功，形成了以经典力学、电磁场理论和经典统计力学为三大支柱的物理理论体系。这一理论体系，可以说已经达到了相当完整、系统和成熟的地步，因而有一种乐观主义的情绪认为，物理学已经充分掌握了理解整个自然界的原理和方法。相当多的物理学家深信，已经发现的物理定律适合于任何情况，是永远不变的；此后的工作，无非是把以原子概念为基础的物质力学理论，同以太理论结合起来。这后一步工作一旦完成（他们也深信不疑它必将迅速完成），那物理学家就没有什么事可以干了，剩下的只需将物理常数的测量往小数点后面移几位。

这种过分乐观情绪最有名的证据，是德国物理学家麦克斯·普朗克（Max Planck, 1858—1947, 1918年获得诺贝尔物理学奖）在1924年慕尼黑的一次演讲中所说的例子，普朗克说：

当我开始研究物理学时，我可敬的老师菲利普·冯·约里（Phillip von Jolly, 1809—1884）对我讲述我学习的条件和前景时，他向我描绘了物理学是一门高度发展的、几乎是尽善尽美的科学。现在，在能量守恒定律的发现给物理学戴上桂冠之后，这门科学看来很接近于最终稳定形式。也许，在某个角落里还有一粒尖屑或一个小气泡，对它们可以去进行研究和分类，但是，作为一个完整的体系，那是建立得足够牢固的；而理论物理学正在明显地接近于如几何学在数百年中所已具有的那样完善的程度。

1888年，美国物理学家阿尔伯特·迈克尔逊（Albert Abraham Michelson,



美国物理学家迈克尔逊正在观察“以太飘移”。

1852—1931, 1907 年
获得诺贝尔物理学奖)
在克里夫兰召开的一
次会议上说:“无论如
何,可以肯定,光学比
较重要的事实和定律,
以及光学应用比较有
名的途径,现在已经了
如指掌,光学未来研究
和发展的动因已经荡
然无存。”

1894 年,在芝加哥大学的一次公开演讲中,他更进一步把这种盲目乐观情绪扩展到了整个物理学领域,他漫画式地描述说:

物理科学的比较重要的基本定律和事实全都被发现了,而这些定律现在已被如此稳固地确立,以致因新的发现使它们被替代的可能性是遥远的。虽然任何时候也不能担保,物理学的未来不会隐藏比过去更使人惊讶的奇迹,但是似乎十分可能,绝大多数重要的基本原理已经牢固地确立起来了,下一步的发展看来主要在于把这些原理,认真地应用到我们所注意的种种现象中去。正是在这里,测量科学显示了它的重要性——定量的结果比定性的工作更为重要。一位杰出的物理学家指出:未来的物理学真理将不得不在小数点后第六位去寻找。

迈克尔逊的意思明显地是说,物理学已经无事可干了,剩下的事只需将物理常数的测量往小数点后面移几位。

当然,在世纪之交,并不是所有物理学家都像约里、迈克尔逊那样乐观得忘乎所以。美国物理学家理查德·费曼(Richard Phillips Feynman, 1918—1988, 1965 年获诺贝尔物理学奖)就说过:

人们经常听说,19 世纪后期的物理学家认为,他们已经了解了所有有意义的物理规律,因而以后所能做的只是去计算更多的小数位。某人可能这么说过一次,其他人就争相传抄。但是彻底阅读当时的文献表明,他们中的许多人都对某些问题忧虑重重。

费曼的话有道理。当一部分人沉湎于过分乐观的情绪中时，物理学的发展却与这种情绪背道而驰。在 19 世纪末到 20 世纪初这段不太长的时间里，由于一系列实验中的新发现，一场激烈的物理学乃至整个科学的革命迅速爆发，并以极快的速度渗透到物理学各种最基本的思想和原理之中。因此也有很多物理学家“忧虑重重”。

1881 年是十分重要的一年，这年 8 月，美国《科学》杂志发表了年轻物理学家迈克尔逊的文章。文章中迈克尔逊声称，他根据詹姆斯·麦克斯韦（James Clark Maxwell, 1831—1879）去世前不久所设计的实验方法，首次证实“静止以太的假设被证明是不正确的；必然的结论是：这种以太的假设是错误的”。

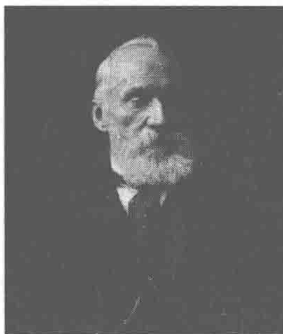
接着，1895 年德国慕尼黑大学教授威廉·伦琴（Wilhelm Conrad Röntgen, 1845—1923，1901 年获得诺贝尔物理学奖）发现了 X 射线，1896 年法国物理学家安托万·亨利·贝克勒尔（Atoine-Henri Becquerel, 1852—1908）和居里夫妇（Pieere Curie, 1859—1919; Marie S. Curie, 1867—1934）发现放射性（他们三人因此获得 1903 年诺贝尔物理学奖），1897 年英国的约瑟夫·约翰·汤姆逊（Joseph John Thomson, 1856—1940，1906 年获得诺贝尔物理学奖）发现电子，这些发现真是让物理学家又惊又喜。喜的是得到了这些了不起的发现，如英国物理学家洛奇（O. J. Lodge, 1851—1940）所说：

当前的物理学正处于一个令人惊异的活跃时期，每月、每周，甚至每天都有进展。过去的发现犹如一长串彼此无关的涟漪，而今天它们似乎已经汇成一个巨浪，在巨浪的顶峰上，人们开始看到某种宏大的概括。日益炽烈的焦虑，有时简直令人痛苦。人们觉得自己像一个小女孩，长时期在一个已成废物的风琴上胡乱弹奏着琴键。突然，琴箱里一种看不见的力量，奏出了有生命的曲子。现在，他惊奇地发现，手指的触摸竟能诱发出与思想相呼应的音节。他犹豫了，一半是因为高兴，一半是因为害怕，他害怕现在几乎立即可以弹出的和声，会震聋自己的耳朵。

惊的是这些发现有许多无法使用经典物理理论解释——“震聋了自己的耳朵”。尤其是 1895 年至 1900 年德国和英国一批物理学家在热辐射理论方面的突破性研究，都严重地冲击着经典物理学传统的思想。

物理学面临严重的危机。这正是：“溪云初起日沉阁，山雨欲来风满楼！”

到 20 世纪之初，连素以保守著称的英国著名科学家开尔文（Kelvin，1824—1907）也感受到了暴雨前呼啸而来的山风。1900 年 4 月 27 日，他在皇家学会的题为《19 世纪热和光的动力学理论上空的云》演讲中承认：



英国物理学家开尔文爵士。

动力学理论断言热和光都是运动的方式，可是现在，这种理论的优美性和明晰性被两朵“乌云”遮得黯然失色了。第一朵“乌云”是随着光的波动理论而开始出现的，菲涅耳和托马斯·杨研究过这个理论；它包括这样一个问题：地球如何通过本质上是以太这样的弹性固体而运动呢？第二朵“乌云”是麦克斯韦-玻尔兹曼关于能量均分的学说。

这就是在现代科学史上大有名气的“两朵乌云”说。第一朵乌云涉及的是力学、电磁理论中最基本的物理思想，即经典力学中的时空观的问题。经典力学需要一个绝对的时空框架，而这一框架在麦克斯韦光辉的电磁理论中似乎找到了证实：电磁波载体以太就是物理学家寻觅已久的物化了的绝对空间。

真是值得欢呼雀跃呀！可是高兴得太早了。

如果真有绝对静止的以太，那么由于地球的运动，就应该可以测出以太相对地球的“飘移”运动。可惜到 1887 年，迈克尔逊和莫雷（E. W. Morley，1838—1923）再次用精确无误的实验证实：以太飘移（ether draft）是不存在的。

明白了这一无可怀疑的现实后，越来越多的物理学家们认识到了大事不妙，问题严重。当时世界物理学界最负盛望的亨德里克·洛伦兹（Hendrik Antoon Lorentz，1853—1928，1902 年获得诺贝尔物理学奖）忧心忡忡地说：“我现在不知道怎样才能摆脱这个矛盾。”



奥地利物理学家玻尔兹曼。

开尔文更是沮丧地说：“在我看来，第一朵‘乌云’恐怕是非常浓厚的呢。”直到爱因斯坦于1905年提出狭义相对论后，这一朵乌云才消散开来，阳光明媚。这方面的详细情况与本书关系不太大，不作详述。

第二朵乌云涉及的是经典力学的第三根支柱——热力学和分子运动论，也就是固体“比热”的困难。早在1819年，法国物理学家、化学家杜隆（P. L. Dulong, 1785—1838）和法国物理学家珀蒂（A. T. Petit, 1791—1820）在他们的文章里，发表了关于固体物质比热的实验结果：所有固体的比热都有相同的、固定的数值。这个规律被称为“杜隆-珀蒂定律”。1868年，玻尔兹曼（Ludwig Edward Boltzmann, 1844—1906）用分子运动论中极为重要的一个定理“能量均分定理”来解释杜隆-珀蒂定律，结果非常成功。

开始，物理学家只发现少数固体的比热有一点点偏离杜隆-珀蒂定律，因此没有造成严重的困扰。但到了19世纪末，随着低温技术的发展，实验逐渐发现温度降到很低时，固体的比热普遍地明显下降。这种实验结果无疑是对经典统计物理学的基本原理，尤其是能量均分定理提出了挑战，而且是一个严重的挑战。所以开尔文把这一困难与以太飘移困难并列，称之为“第二朵乌云”。他还断言说：气体比热的预测值与观察的明显偏离，“绝对足以否定”经典统计力学。

在20世纪到来的那一年，即1900年，量子论诞生了。这是人类文明史、科学史上一件惊天动地的大事：它开创了物理学的一个崭新的时代。但在当时，包括提出量子论的普朗克本人，都绝对没有想到量子论居然在物理学里掀起了滔天巨浪，把原有的经典物理学世界稀里哗啦地砸个乱七八糟，让所有的物理学家在兴奋、迷惘和痛苦中度过了大半个世纪。

一个世纪过去后的今天，我们虽然知道由量子论发展

出来的量子力学能够解释和预言数不清的物理学问题，由它发展出来的技术早已改变了人类文明生活，但这并不意味着我们真正理解了量子力学。对量子力学的建立做出重大贡献的费曼曾说：“没有人明白量子力学。”他还说：“从常识的观点来看，量子电动力学描述自然的理论是荒唐的，但它与实验非常符合。”

人类的常识 (common sense) 是人类几万年生活、文化的积淀，当我们带着常识进入光怪陆离的量子世界时，常识会步步为营、层层设防地抵制量子力学新概念的“入侵”，以至于人类至今也没有能够完全理解量子世界稀奇古怪的行为。因此，在开始进入量子世界以前，为了避免读者走进令人灰心的死胡同，建议读者先尽量满足于接受观察到的实验事实，不要急于问“为什么会如此”这样的问题，因为谁也不能回答你。大自然就是这样的，没有人知道为什么，至少目前没有人知道为什么。大自然比任何一个科学家想象的都要奇妙得多。以至于爱因斯坦讲过的一句话“上帝是微妙的 (Subtle is the Lord) ……”，到现在还留在普林斯顿大学富康楼的一个教室里。记住这一点。只有当你首先相信了解量子力学以后，你才会安心地往下看那些更加古怪的内容，如薛定谔的猫、多宇宙诠释，等等。

现在，我们从 19 世纪末和 20 世纪初德国一位伟大的物理学家普朗克，以及他如何克服热辐射中出现的困难而引出量子论讲起。



美国著名物理学家费曼。