

哲人石
丛书

Philosopher's Stone Series

当代科普名著系列



你错了，爱因斯坦先生！
牛顿、爱因斯坦、海森伯和费恩曼探讨量子力学的故事

Harald Fritzsch

**YOU ARE
WRONG,
MR EINSTEIN!**

*NEWTON, EINSTEIN,
HEISENBERG AND
FEYNMAN DISCUSSING
QUANTUM MECHANICS*

哈拉德·弗里奇 著

S·L·格拉肖 作序

邢志忠 邢紫烟 译



上海科技教育出版社

哲人石
丛书

Philosopher's Stone Series

当代科普名著系列

你错了， 爱因斯坦先生！

牛顿、爱因斯坦、海森伯和
费恩曼探讨量子力学的故事

哈拉尔德·弗里奇 著

S·L·格拉肖 作序

邢志忠 邢紫烟 译



上海科技教育出版社



Sie irren, Einstein!
Newton, Einstein, Heisenberg und Feynman diskutieren
die Quantenphysik

by

Harald Fritzsche

Copyright © 2008 by Piper Verlag GmbH, Munich, Germany
Chinese (Simplified Characters) Translation © 2012 by
Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House
Arranged with Piper Verlag GmbH, Munich, Germany
through HERCULES Business & Culture GmbH, Germany

ALL RIGHTS RESERVED

上海科技教育出版社

业经 Piper Verlag GmbH, Munich, Germany 授权
并通过 HERCULES Business & Culture GmbH, Germany 协助
取得本书中文简体字版版权

责任编辑 郑华秀 装帧设计 汤世梁

哲人石丛书

你错了,爱因斯坦先生!

——牛顿、爱因斯坦、海森伯和费恩曼探讨量子力学的故事

哈拉尔德·弗里奇 著

S·L·格拉肖 作序

邢志忠 邢紫烟 译

上海世纪出版股份有限公司 出版发行
上海科技教育出版社

(上海冠生园路393号 邮政编码200235)

网址: www.ewen.cc www.sste.com

各地新华书店经销 丹阳教育印刷厂印刷

ISBN 978-7-5428-5336-3/N·835

图字 09-2011-484 号

开本 850×1168 1/32 印张 6.125 插页 2 字数 141 000

2012年3月第1版 2012年3月第1次印刷

印数 1-4 400 定价:19.00 元

内容提要

对绝大多数人而言,量子力学似乎是一门与日常生活毫不相干而且神秘莫测的学科,只有物理学家才能理解它的真谛以及它所描绘的量子世界。但事实并非如此。其实我们每个人都可以轻松地领会量子物理学的基本原理,并从中感知和欣赏那些存在于我们的视野之外、趣味横生的量子现象。在科学化和文明化的现代社会,量子力学至关重要,因此它理应被大众所了解。

作者在本书中模仿了伽利略《关于两大世界体系的对话》(*Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*)一书的写作风格,以虚拟的对话形式,让五位不同时代的物理学家展开一系列关于量子力学的起源和发展的热烈讨论,文笔生动有趣、通俗易懂。参与讨论的是牛顿、爱因斯坦、海森伯、费恩曼以及作者本人的化身哈勒尔教授,他们的身份象征了从经典力学到量子力学,再到基本粒子物理学的历史发展脉络,而他们的话题涵盖了现代物理学的很多基本概念和原理。牛顿起初对量子物理学一无所知,但是在讨论过程中,他慢慢地也变成了一位量子物理学家。爱因斯坦虽然为量子理论的创立做出过杰出贡献,但后来却不断地质疑这一理论的基础和推论,因此他不得不经常面对海森伯、费恩曼和哈勒尔的批评。刚开始完全不了解量子力学的读者会像牛顿那样从讨论中学到很多东西,也会像爱因斯坦那样惊叹于相对论和量子力学相结合的产物(量子场论)在基本粒子物理学领域所取得的巨大成功。

作者简介

哈拉尔德·弗里奇(Harald Fritzsch),国际著名理论物理学家与科普作家。早年就学于民主德国,1969年移居联邦德国,1971年在慕尼黑工业大学获得博士学位。曾经工作于美国斯坦福大学、加州理工学院和欧洲核子研究中心,1980年成为慕尼黑大学久负盛誉的索末菲讲席教授,2008年退休。他与诺贝尔物理学奖得主盖尔曼(Murray Gell-Mann)合作多年,共同为量子色动力学(描述强相互作用的理论)做出了意义深远的奠基性工作。他在大统一理论、味物理学、中微子物理学等许多领域都做出了原创性的重要贡献。他的科普著作被译成多种文字出版,影响十分广泛,其中《夸克》(*Quarks*)和《改变世界的方程》(*Eine Formel verändert die Welt*)中译本拥有众多读者。在20世纪80年代,他制作的题为《微观世界》(*Mikrokosmos*)的电视系列片在德国常播不衰,影响广泛。

序言

弗里奇让四位伟大的科学家复生,并展开了关于量子理论的起源和发展的热烈对话。他们讨论的话题包括:普朗克(Planck)不情愿地引进的量子(quanta)概念,玻尔(Bohr)发明的特设的量子规则,薛定谔(Schrödinger)和海森伯(Heisenberg)共同发现的量子力学(quantum mechanics),以及量子力学和爱因斯坦(Einstein)的狭义相对论(special theory of relativity)相结合的丰硕成果——相对论性量子场论(relativistic quantum field theory)。他们的对话揭示出这些早期的科学成就如何将我们引向如今已取得巨大成功的“标准模型”(standard model),后者几乎为所有已知的基本粒子现象提供了一个显然正确的、完备的而且前后一致的描述。

我将简要回顾量子物理学的某些方面,我们是如何得到它们的,以及还存在哪些未解之谜。所有的自然现象都是由四种基本力产生的:引力、电磁力和两种核力——一种是弱相互作用力,另外一种 is 强相互作用力。在爱因斯坦整个人生的后几十年,他对核力的态度几乎是敷衍了事,不闻不问。与此相反,他却竭尽全力去构建一个关于引力和电磁力的统一理论,但没有成功。我们必须承认,我们所获悉的关于核力的知识对其他大部分的科学学科几乎不会产生直接的影响。原因在于对那些学

科而言，原子核同电子一样可以被看做具有特定质量和电荷的类点粒子(pointlike particle)。通过这种理想化的处理，可用薛定谔方程完美地描述每种化学元素的原子。实际上，该方程提供了一个基本的理论框架，支撑着诸如化学、生物学和地质学等许多自然科学分支。当然，懂得了基本规则并不会使这些学科的挑战性降低，就像懂得了国际象棋的规则并不会使人人都成为国际象棋大师一样……但这终究是一个好的开端。

尽管引力在这四种力中最弱，但它的效应却最显而易见。引力解释了地球上和天空中的运动现象。它把属于我们的大气和海洋挽留了下来，并让我们站在地面上。然而，与其他几乎所有现象有关的却是电磁力：它使原子结合在一起，然后使它们组合成诸如分子、老鼠和山脉等。我们自己本质上是电磁生物，我们所看到的、感觉到的、听到的、品尝到的、触摸到的或者制造出来的一切东西也都是电磁力作用所致。引力和电磁力合起来解释了这个世界的几乎所有特性，不管是大尺度的还是小尺度的。这样看来，爱因斯坦忽视核力或许是有道理的。

不过电磁力和引力无法解释太阳和恒星是如何发光的，也不能解释构成人体的化学元素是怎样产生的。如果没有对原子核的深入了解，我们就不会面对核能所带来的希望和危险。这一切都始于1897年放射性的发现以及那之后不久原子核本身的发现。科学家们发现原子核是由两种粒子组成的：中子和质子——它们通过很强的短程核力结合在一起。对宇宙线的研究揭示了其他看来是基本的粒子：正电子、 μ 子、 π 介子和好几种所谓的奇异粒子(strange particle)。越来越强大的粒子加速器的设计、开发和投入运行，导致了几百种其他粒子的发现。它们的数目太多了，不可能都是基本粒子。

我们已经知道，这些粒子中的大多数根本不是基本的。所有强相互作用的粒子[叫做强子(hadron)]都是由夸克(quark)组成的，

夸克之间通过交换胶子(gluon)而束缚在一起。比方说,质子是由两个上夸克(up quark)和一个下夸克(down quark)组成的束缚态,而奇异粒子只不过是含有奇异夸克(strange quark)的束缚态。(然而,我们不可能观测到单个夸克或胶子。)把夸克结合在一起的力,即色相互作用力或量子色动力学(QCD),是一种与数学上的SU(3)群有关的规范理论(gauge theory)。把核子结合在一起形成原子核的核力只是把夸克结合在一起的色相互作用力的微弱的剩余效应,就像把原子结合在一起形成化合物的化学力其实只是把原子结合在一起的电力的微弱的剩余效应一样。

我们的相互作用力四剑客中的最后一位是弱相互作用力,它容许质子变成中子,从而使得太阳能通过核聚变过程产生能量,也使得死亡已久的恒星能够制造出构成人体的元素。它还容许中子在 β 衰变的过程中变成质子,而 β 衰变是三种天然放射性形式中的一种。如今我们知道弱相互作用力和电磁力是密切相关的,有些人把这种相关性说成是这两种力的统一。这两种力无法分开来理解,而只能合在一起在电弱理论(electroweak theory)的框架中来理解。电弱理论基于另外一种规范理论,这种规范理论涉及自发破缺的规范群SU(2) $\times$ U(1)。在这种理论中,无质量的光子与很重的弱相互作用的传播子(mediator)W玻色子和Z玻色子联系在一起。电弱理论已经通过了种种实验检验。实际上,它的建立和发展产生了包括我本人在内的八位诺贝尔奖获得者。

电弱理论连同量子色动力学是如今取得巨大成功的标准模型的两个组成部分。标准模型基于作用在三个基本费米子家族上的规范群SU(3) $\times$ SU(2) $\times$ U(1),而每个费米子家族是由一对夸克和一对轻子(lepton)组成的。尽管标准模型取得了很多实验上的成功,但仍然存在许多令人烦恼的问题没有得到解决。我开列其中的一部分难题,以此为这篇简短的序言画上句号:

问题(一):怎样处理被标准模型忽略掉的引力?虽然这种力极其微弱,因此和基本粒子现象没有什么关系,但在量子世界里不可能仍旧只是一种经典的力。因此建立引力的量子理论至关重要。这项任务也许已经在超弦理论(super-string theory)的框架内实现了,但是到目前为止这个雄心勃勃的理论既没有被实验证实,也没有被证伪。

问题(二):是什么导致了弱电对称性的破缺,从而使得弱相互作用力很弱,并给出了大多数粒子的质量?希格斯机制(Higgs mechanism)提供了一个简单的解释,但是它也导致了一个深刻的理论问题。许多有独创性的解决方案被提了出来,例如超对称和彩(technicolor)模型,但没有一个答案是令人信服的。正在大型强子对撞机(LHC)上开展的实验将会引导我们朝着正确的答案前进,或许我们沿着这条途径会发现那个令人难以捉摸的希格斯玻色子。

问题(三):宇宙学家和天文学家已经做出了很多令人吃惊的新发现,包括:我们的宇宙是平坦的,它膨胀得越来越快,宇宙中的大部分质量是暗的,且并非由任何已知的粒子构成的。我们现在知道,宇宙包含大约70%的暗能量、25%的暗物质和仅仅5%的普通物质,如标准模型所描述的那样。因此人们提出了两个意义深远的问题:什么是暗能量?什么是暗物质?前一个问题似乎很难处理,而暗物质的问题则可以通过几种有希望的途径来研究:通过大型强子对撞机产生并探测暗物质;或者当它经过地下深处的探测器时观测它的相互作用;或者在空中观测它的间接效应。

问题(四):标准模型比它初看起来的样子要更为错综复杂。它含有许多可调节的参量,其数值必须通过实验来确定。比方说,各种夸克和轻子的质量和它们的混合就涉及至少20个独立参量(其中大部分参量已经得到了测量)。对于这些参量而言,它们的取值似乎没有任何规律或者理由。毫无疑问,(我们希望)存在尚未被发现的物理原理,使我们最终能够从这些第一性原理出发来计算这些参量,或者至少能发现它们

之间的某些关系。

或许在遥远的未来，这本书的新版可能会让那些设法解决这些难题中的任何一个或者全部难题的人复生，他们会在我们中间或者会是我们的继承人。不过，在此期间，仍然有很多工作要做。

谢尔登·李·格拉肖(Sheldon L. Glashow)*

波士顿大学

美国马萨诸塞州

* 世界著名的理论物理学家，美国科学院院士，1979年诺贝尔物理学奖获得者。主要研究领域是基本粒子和量子场论。——译者

图书在版编目(CIP)数据

你错了,爱因斯坦先生!:牛顿、爱因斯坦、海森伯和费恩曼探讨量子力学故事 / (德)弗里奇(Fritzsche, H.)著;邢志忠,邢紫烟译. —上海:上海科技教育出版社,2012.3

(哲人石丛书·当代科普名著系列)

书名原文:Sie Irren, Einstein! —Newton, Einstein, Heisenberg und Feynman Diskutieren die Quantenphysik

ISBN 978-7-5428-5336-3

I. ①你... II. ①弗... ②邢... ③邢... III. ①量子力学-普及读物 IV. ①0413.1-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第000849号

目 录

序言

引言	1
第一章 量子理论的起点	9
第二章 原子	21
第三章 波与粒子	35
第四章 量子振子	53
第五章 氢原子	61
第六章 自旋:一个新量子数	71
第七章 力与粒子	79
第八章 元素周期表	91
第九章 狄拉克方程与反粒子	99
第十章 电子和光子	109
第十一章 色夸克和胶子	119
第十二章 中微子振荡	133
第十三章 粒子的质量	141
第十四章 自然界的基本常量	147
第十五章 结局	157
物理学家小传	159
译后记	167

引 言

量子物理学是一门以分子、原子和原子核为研究对象的学科。正是利用这门学科，人们才得以制造出激光器、晶体管、隧道显微镜和移动电话。在当今世界，超过三分之一的国民生产总值源于量子物理学。从事宇宙学和天体物理学研究的物理学家运用量子物理学来探究宇宙的起源和恒星的动力学。量子物理学也为基本粒子物理学奠定了基础。

1963年，我进入莱比锡大学攻读物理学。我在第三学期上了经典力学课，教授所采用的是朗道(Lev Landau)和栗弗席兹(Evgenij Lifschitz)的教材，非常好。这门课给我的印象是，任何物理现象都可以用经典力学精确计算出来，起码原则上如此。经典力学的方程相当简单，它们能够唯一地确定一个物理系统的未来。你可以用最小作用量原理推导出这些方程式。该原理指出，只要考虑到一个系统所有可能的变化并用一个作用量来描述它们(此作用量往往是一个简单的量)，那么这个系统的时间演化行为就完全确定。凡是在自然界可实现的演化事件，都由那个最小作用量来做主。

一年后学习量子力学课程时，我感到很震惊。我发现物理世界并非像我当初所想象的那样确定而明了。现在什么都不确定了，只能用概率说话。概率是可以严格计算出来的，但不确定性依然存在。在量子力学中，最小作用量原理是无效的。我在理解量子物理学的细节方面遇到了很大困难。

几年之后我来到位于美国帕萨迪纳的加州理工学院从事

科学研究工作。在那里我经常和对量子物理学做出过很大贡献的费恩曼(Richard Feynman)讨论物理。费恩曼不止一次跟我说:“没人真懂量子力学,就连我自己也没搞懂。”

我因而意识到应该以更深刻的方式理解量子物理现象,并开始思考这门学科的根本所在。令我着迷的是,量子力学无法对一个物理事件做出断定,而只能给出它将发生的概率。这一点恰如原子和分子的稳定性这个事实可归因于概率解释。倘若什么都像经典力学描述的那样可以严格确定,分子和原子就不会有稳定的状态。

我觉得量子力学绝不仅仅令物理学家着迷。我试图通过这本书和读者分享量子力学的魅力。在物理学史上,始终存在一些举足轻重的发展阶段,使我们得以深入理解物质的结构及其动力学。

牛顿(Isaac Newton)意识到,苹果从树上落下与行星绕太阳运动的原因都可追溯到同一原理,即有质量的物体之间的引力效应。法拉第(Faraday)和麦克斯韦(Maxwell)解释了为什么电、磁和光现象也有相同的起源,即电磁场。

爱因斯坦(Albert Einstein)在其相对论中指出,空间和时间具有相同的属性。在广义相对论(general relativity)中,爱因斯坦把这种想法用于引力,发现空间和时间都是弯曲的,并且引力其实不是力,而是时空弯曲的结果。这种关于引力现象的新观点给物理学家出了难题——迄今为止,量子引力理论实际上尚没有建立。

量子力学的建立也是物理学发展史上一个举足轻重的阶段,或许是最重要的阶段。在20世纪人类所取得的科学成就中,量子力学成就最大。物理学中的许多现象,例如原子、分子和原子核的大小以及原子和原子核的化学键或稳定性,都无法在经典力学的框架内得到理解,但量子力学让我们搞明

白了这些现象。

量子物理学是 20 世纪初由柏林洪堡大学的普朗克 (Max Planck) 开创的, 历时二十余年, 但人们始终没有领会它的基本原理。随后一群为数不多但聪明绝顶的青年物理学家仅用了大约三年时间就在普朗克、玻尔 (Niels Bohr) 和索末菲 (Arnold Sommerfeld) 的思想基础上创立了描述原子和量子过程的新理论——量子力学。这其中尤其要提到海森伯 (Werner Heisenberg)、泡利 (Wolfgang Pauli) 和薛定谔 (Erwin Schrödinger) 这三位青年才俊, 他们在 1928 年分别只有 27 岁、28 岁和 36 岁。

学物理的学生要借助数学工具, 特别是微分方程和泛函分析, 来学习量子力学。在这样一本科普书中, 当然不可能涉及很多数学, 所以我对量子力学的描述不可能面面俱到。但是我希望用这样一种方式把量子力学介绍给读者, 使得他或她能够理解该理论的基本特征。这是没有数学也可以做到的, 故本书中几乎不采用数学公式。

有些过程在量子物理学中是允许的, 但它们依照经典力学的定律却不可能发生。人们可以利用量子力学来计算这些过程, 并发现这些理论结果与实验结果符合得极好。

量子物理学引入了一个新的自然常量, 它就是普朗克 (作用量) 常量, 通常用 h 表示, 其测量值为 6.6×10^{-34} 焦·秒 (焦 = 瓦 × 秒)。用诸如“焦”这样的宏观物理单位来表达普朗克常量, 它的数值是非常小的。这就意味着量子物理现象在宏观世界不起任何作用。之所以叫做“作用量常量”, 是因为该常量描述了一个作用量, 即能量与时间的乘积。这一点很容易理解, 因为一个过程的作用量是由某一时间内起作用的能量来表征的。假如时间很短, 那么作用量也就很小。

一个过程的作用量在经典力学中可以取任意值, 但在量

子物理学中却并非如此。量子物理学中的作用量只能是 h 的整数倍——作用量总是不连续的。不可能存在诸如 $h/3$ 的作用量——自然界是以 h 为单位量子化的。普朗克发现了这种奇特的现象。他以一个振子为例,认定它的能量不可以任意变化,而只能取离散值。普朗克把这一假说用于炽热物体的辐射。把一块铁加热,它会开始发光发热。没有人能够用数学语言来描述这种辐射过程,但普朗克做到了。他找到了一个方程,成功地描述了该辐射现象。

爱因斯坦采纳了普朗克的假说,并于 1905 年指出,光是由量子组成的,这种量子是如今被称做光子的一类粒子。1905 年以前,光一直被认为是一种波动现象,而此时有必要把光既看成粒子又看成波。德布罗意(Louis de Broglie)甚至走得更远,他于 1923 年指出,所有的粒子同时也是波。

让我来举个例子,以便把经典力学和量子力学之间的区别说清楚。地球到太阳的距离原则上可以是任意的,但这一点并不适合氢原子中的电子的轨道。电子在确定的轨道上运动,也就是说电子的轨道是量子化的。倘若电子获得相应的能量,它就可以从一条轨道跃迁到另一条轨道。量子世界不像经典力学,这里不存在连续的跃迁。我们以后会看到,电子甚至没有确定的轨道,有的只是概率分布。

量子力学中那些描述电子在原子内部运动的物理量,特别是电子的位置和速度,是无法被精确测量的。测量本身总是存在不确定性,它取决于海森伯所发现的不确定关系(uncertainty relation)。人们无法精确描述原子内部的物理过程,只能给出某个过程发生的概率有多大。

我们无法完全确定电子的位置和速度。倘若你想要相当精确地知道电子的位置,它的速度就很不确定;反之,如果你想要精确地知道电子的速度,它的位置就很不确定。不确定

度的大小取决于不确定关系，特别是普朗克常量 h 。

对宏观物体而言，比如一辆运动的汽车，也存在不确定关系。但是量子物理学所给出的不确定度太小了，以至于可以被忽略。这就解释了为什么在我们的宏观世界里可以完全不考虑物理现实的量子特性。

然而在原子物理学中却做不到这一点。正是不确定度决定了氢原子的大小。在氢原子中，电子位置的不确定度可由氢原子的直径给出，大约等于 10^{-8} 厘米。所有氢原子的大小都相同。

我现在考虑一个假想的氢原子，它比正常的氢原子要小得多，其内部电子的空间也更狭窄。由于不确定关系，该电子的速度具有更大的不确定度，所以平均而言它比在正常氢原子中运动得快得多。该氢原子的能量比正常氢原子的能量要大一些。但是在自然界有一个重要的原则：每个物理系统都会尽量处在能量最低的状态。因此，假想的、尺寸较小的氢原子是不稳定的，它会释放能量，尺寸增大，直到它的大小达到正常氢原子的大小。

我们也可以考虑一个虚拟的、比正常原子大 100 倍左右的原子。要获得这样的原子，我们就不得不把电子拉得远离原子核，因而就不得不耗费能量。与上面的例子类似，虚拟的大原子要比正常的原子具有更高的能量，它也会释放能量而转变成正常的原子。正常的原子处于能量最低的状态，无法再强迫电子释放出更多的能量。所以说不确定关系决定了原子的大小，具有普适性。这种普适性存在于宇宙的任何地方：地球上的氢原子和遥远星系中行星上的氢原子一样大。

出现在不确定关系中的物理量是动量而非速度。动量等于速度乘以粒子的质量，比如电子的质量。因而原子的大小依赖于电子的质量。倘若电子的质量比它的实验观测值小