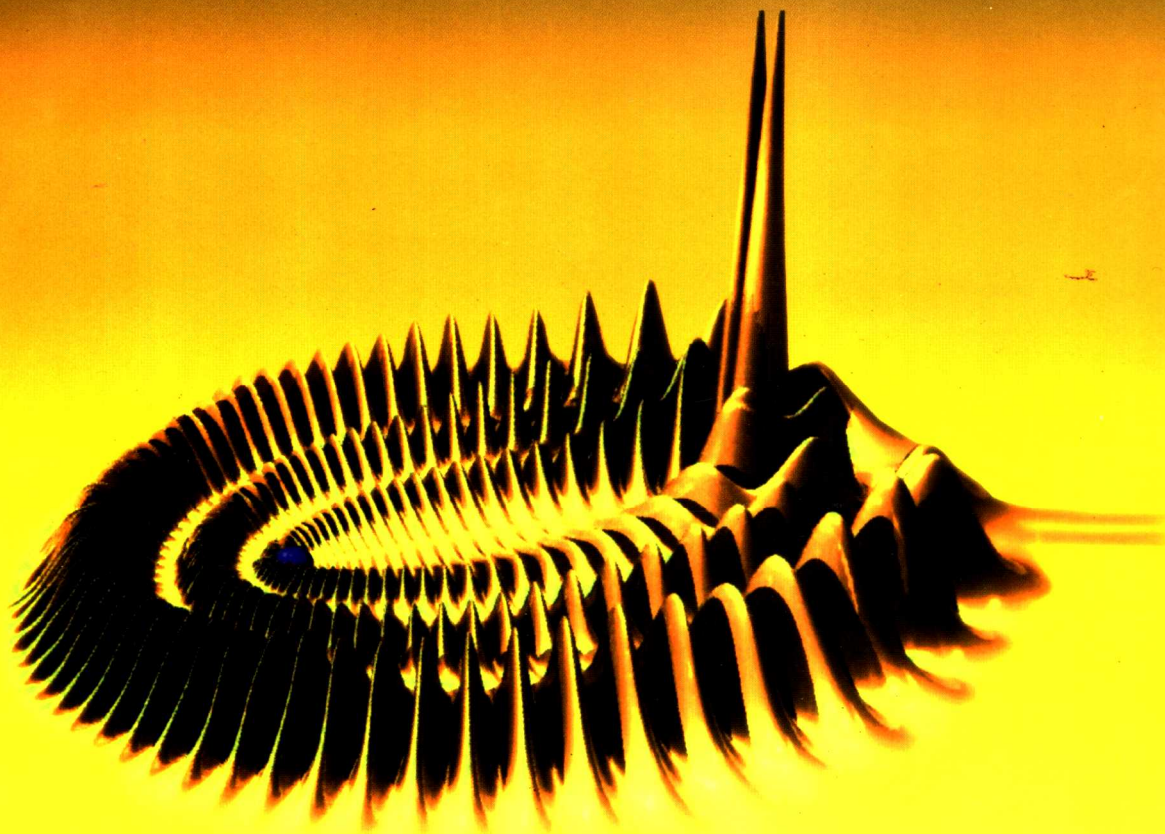


新量子世界

第一推动丛书
The New Quantum Universe

[英] 安东尼·黑 帕特里克·沃尔特斯 著
雷奕安 译



湖南科学技术出版社

Hunan Science & Technology Press

第一推动丛书
The New Quantum Universe
新量子世界

[英]安东尼·黑 帕特里克·沃尔特斯 著
雷奕安 译

 湖南科学技术出版社

Hunan Science & Technology Press

The New Quantum Universe

by Tony Hey and Patrick Walters

©Anthony Hey and Patrick Walters 2003

湖南科学技术出版社通过英国剑桥大学出版社独家获得
本书中文版中国大陆地区出版发行权。

本书根据剑桥大学出版社 2003 年版本译出。

著作权合同登记号:2004-18-007

第一推动丛书

新量子世界

著 者: [英] 安东尼·黑 帕特里克·沃尔特斯

译 者: 雷奕安

责任编辑: 吴 炜 戴 涛

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路 276 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系: 本社直销科 0731 - 4375808

印 刷: 长沙化勘印刷有限公司

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址: 长沙市青园路 4 号

邮 编: 410004

出版日期: 2005 年 5 月第 1 版第 1 次

开 本: 787mm×1020mm 1/16

印 张: 20

字 数: 327000

书 号: ISBN 7 - 5357 - 4268 - 8/N·130

定 价: 42.00 元

(版权所有·翻印必究)

现在，科普读物的出版和发行已经成为图书出版商和发行商的重要利润来源。要出一本“好卖的”科普读物，一般的做法是把单词量控制在 100000 左右（大约 200 页），并且不要使用太多图表或照片。目标读者群是受过一定教育，并对科学有一定兴趣的读者。这一出版领域的另一分支是科普工具书的出版，如百科全书、地图集等。我们面向的读者群处于这两个极端之间。我们希望我们出的书不仅仅能够使上面说的“受过教育的”读者感兴趣，也能，而且更重要的是，激起年轻读者们的好奇和思考。我们认为，让年轻的读者了解一点物理学的激动人心之处是非常重要的，因为这可能使年轻人以后去接受物理学的挑战，从事有关的研究。在当今这个世界上，年轻人有很多很多的选择，人家一般都会认为像自然科学和数学这样的学科是很“难”的。当然，要想理解这些学科，不付出努力是不行的，要想真正掌握它们，更是要付出数年的艰辛。所以我们不可能保证读者能够很快收获颇丰。但我们可以保证的是，学好数学和自然科学，一定能够使我们更深入地了解这个迷人的世界——我们生活的世界，一个量子的世界。还有一点需要指出，那就是我们好像进入了一个怪圈，由于我们越来越依赖于科学和技术，这个世界变得在技术上也越来越脆弱了，因为了解我们所依赖的这些技术的人越来越少。但是我们的文明必须延续，因此我们必须激励年轻人接受科学的挑战。这些年轻人才是我们这书的真正目标读者群。我们希望我们采用的文字，大量的图表、彩色照片，著名科学家的传记等，本身也很有意思，能得到“受过教育的”读者的欢迎。

我们第一本讲解量子力学的书《量子世界》（*The Quantum Universe*），出版于 1987 年。当时的迫切需要是，把量子力学的奇异原理介绍给普通的读者，因为这一理论是日常生活中用到的很多“高技术”设备的工作基础。因此，简单地介绍了量子力学基本原理之后，我们更注重解释如何从量子力学的角度来理解原子、原子核、所有的化学元素以及天上的星星。量子力学使似乎不可思议的硅芯片成为现实，也是我们今天看到的成千上万的激光器件的基础。它不仅仅能解释星星的结构，也使我们能够理解在我们的太阳和其他恒星中，巨大的能量是怎么产生的。由于在基本原理层面上，量子理论非常奇怪，很难理解，因此我们将特意避免讨论各种哲学方面的问题，并根据理查德·费曼（Richard Feynman）的意见，采取了一种注重实效的做法。我们侧重说明这一

、理论的实际结果是什么，不管看起来有多么奇怪。自从量子力学在 20 世纪 20 年代由尼尔斯·玻尔 (Niels Bohr)，埃尔文·薛定谔 (Erwin Schrödinger)，沃纳·海森堡 (Werner Heisenberg)，保罗·狄拉克 (Paul Dirac) 等创立以来，除了应用更为广泛以外，这么多年似乎并没有什么新的发现。

但让我们吃惊的是，在最近的 15 年里，量子技术突然进展迅速。虽然没有出现新的实验事实挑战传统的量子理论的权威性，但的确有了很多激动人心的新发现。主要的进展是，我们可以越来越熟练地控制量子体系。因此我们相信，我们正在亲眼目睹科学王国中一个崭新的学科——“量子工程学”——的诞生。这一学科的名字本身，就意味着在这个新世纪里，我们将越来越熟练地在量子尺度上控制和操作物质，并将引起另一类新的引人入胜的应用——“纳米技术”——的出现。这对半导体工业来说，显然具有非常重大的意义。我们将看到，摩尔定律很快就要失效了。摩尔定律是指，计算机芯片里面晶体管的数目，也就是芯片计算速度和存储量，每隔 18 个月就会翻一番。再过大约 10 年，硅芯片上的特征尺寸（晶体管或导线）将变得非常小，以至于硅片上单个原子或电子的性质将对芯片产生决定性的影响。这些量子物质不能通过经典理论描述。如果量子工程师们不能提供替代的有竞争力的新技术，摩尔定律就要失效了，每 18 个月升级一次计算机也没有必要了。已经出现的一种可能的替代技术是“量子计算”。量子计算机不像在现行的“经典”计算机上那样把信息严格限定为“1”和“0”，它允许在算法中使用量子位——“qubits”（量子位），大致相当于一个存储位上同时存着 1 和 0——来进行计算。这一发现导致了一个崭新的研究领域——“量子信息理论”——的诞生和发展，并且很有可能已经在密码学中得到了实际应用。虽然我们这书的原意是讲解量子力学，但是为了适应技术的发展，我们大量改写和更新了有关量子技术应用的章节。另外，我们加了新的一章“量子工程学”，专门介绍纳米技术和量子信息论的基本原理和应用。

正如我们说过的，在以前出版的关于量子力学书中，我们采纳了费曼的建议，避免提出诸如“但是怎么会是这样呢？”之类的问题。但是，最近的 15 年里，人们对理解量子力学这一理论越来越感兴趣了，因为毕竟这一理论解释了我们生活的世界的基本物理原理。因而我们另加了一章“量子谬误”，向读者介绍尼尔斯·玻尔与阿尔伯特·爱因斯坦之间那一场没有完结的争论。玻尔创立了量子力学的正统“哥本哈根学派”理论，也是这一理论最有力的支持者。根据玻尔的解释，不确定性和不可预测性是量子理论的内秉属性，而量子体系的

实际物理观测值是可以讨论的。玻尔的长期朋友和同事，阿尔伯特·爱因斯坦，一直不同意这一正统理论，并穷其余生与玻尔争论不休。他把他对哥本哈根诠释的反对总结为一句众所周知的名言：“上帝不掷骰子！”在一场冗长而没有结论的争论之后，爱因斯坦直到去世那一刻仍然不相信量子力学理论。他去世不久，爱尔兰物理学家约翰·贝尔（John Bell）提出了一个方案，来判别玻尔的正统量子力学理论和爱因斯坦喜欢的决定论。用来验证“贝尔不等式”的实验现在已经有了结果。结果证明量子力学是正确的。看起来爱因斯坦应该再好好想想。因为贝尔的结果对量子力学理论非常重要，所以我们也以直观的方式介绍了贝尔不等式。我们的讲解非常接近约翰·贝尔自己在日内瓦作的一个报告。在任何关于量子力学理论的讨论中，都会提到的另一个很重要的小东西是薛定谔的猫。薛定谔猫佯谬问题以生动的方式说明了量子力学的所谓“测量问题”。我们讨论了流行的休·埃弗雷特（Hugh Everett）的量子力学“多世界”理论，和沃切克·祖莱克（Wojtek Zurek）等提出的“退相干”机制，以在某种程度上解释量子测量问题。

最后，作为一个轻松的“编后记”，我们讨论了科幻小说里面对量子力学的处理。赫伯特·乔治·韦尔斯（H. G. Wells）首先在他的科幻小说《解放的世界》（*The World Set Free*）中描述了原子弹爆炸的世界末日景象。在量子力学发展早期，科幻小说作者就一直努力把我们对原子的最新认识写进小说情节里。而现代的科幻小说家已经把多宇宙理论和纳米科技当成了他们的标准理论基础的一部分。最后，在迈克尔·克莱顿（Michael Crichton）的新书《时间线》（*Timeline*）中，量子计算机、远程传物（teleportation）、时间旅行等编织在一起，开拓了科幻小说发展和探索的一片新天地。

著名的理论物理学家和作家保罗·戴维斯（Paul Davis）曾经预言：

19 世纪是机械时代，20 世纪在历史上将被称为信息时代。

我相信 21 世纪将会是量子时代。

在下一个 10 年里，我们就能看出这一预言如何实现，以及实现到什么程度。当然，我们相信，这种由量子力学支持的，即将到来的纳米技术革命，对我们社会的影响，至少会与目前的生物信息学大发展产生的影响一样深刻。我们希望这本书能够为激发未来新一代量子工程师的兴趣和梦想做出贡献。

下面是一些致谢。我们在这里再一次感谢我们的家人，感谢他们无私的支持和包容——Marie Walters, Jessie Hey, Nancy Hey, Jonathan Hey 和 xii Christopher Hey。我们也非常感谢我们的同事，特别是 Phil Charles, Malcolm Coe, Jeff Mandula 以及 Steve King，他们审阅了我们的初稿，并提出了宝贵的意见。我们要感谢南安普敦市的 Maggie Bond 和 Juri Papay，他们在帮助我们获得那些新的照片和授权方面，为我们提供了大量宝贵的帮助。我们也感谢剑桥大学出版社的 Rufus Neale 和 Simon Mitton，是他们提出了这书的创意，还有 Simon Capelin 和 Jacqueline Garget 等这一项目的其他人员，在这一复杂项目的整个过程中，他们都很高兴地为我们提供了大量帮助。最后，Tony Hey 希望在这里特别感谢英国工商部的 Ray Browne 和南安普顿大学的 Juri Papay，感谢他们对科学事业的极大热情，也感谢他们投入的精力和实质支持，帮助我成功地完成了这一书。

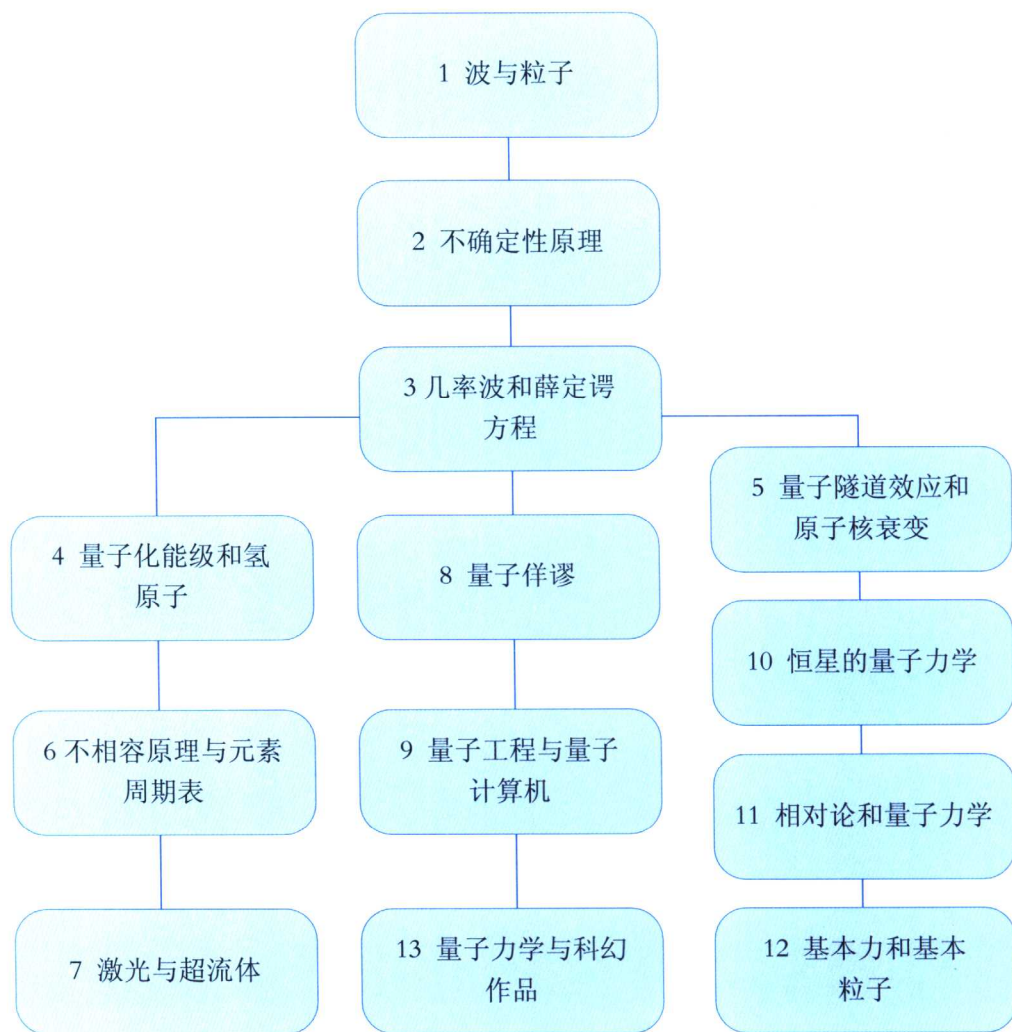
诗人们总说，科学家看不见星星的美丽——星星在科学家眼里仅仅是一堆^{xiii}聚集的气体原子。没有什么是“仅仅是”。我能看见沙漠夜空里的星星，也能感觉到它们。但是我是不是看见的比别人少，或者多些？广袤的天空激起了我的幻想——盯着这个旋转的天空，我用我的大眼睛能捕捉 100 万年以前发出的光线……或者可以通过帕洛马山（美国加利福尼亚州西南部。——译者注）上的大眼睛（望远镜）来观测这些星星，望远镜能把大量从同一光源发射的光聚集到一起，也许本来这些光就是在一起的。这是一幅什么图像，或者说这意味着什么，或者说为什么这样？我们知道一点宇宙，并不影响宇宙的神秘性。因为宇宙比以前任何一个艺术家能想象的都要奇妙得多。为什么现在的诗人们不说这个呢？

最后，请允许我说明我讲这门课的主要目的。我的目的不是叫你们如何应付考试，甚至不是让你们掌握这些知识，以便更好地为今后的你们面临的工业或军事工作服务。我最希望的是，你们能够像真正的物理学家们一样，欣赏到这个世界的美妙。物理学家们看待这个世界的方式，我相信，是这个现代化时代真正文化内涵的主要部分。（也许有一些别的学科的科学会反对我的说法，但我相信他们绝对是错误的。）也许你们学会的不仅仅是如何欣赏这种文化，甚至也愿意参加到这个人类思想诞生以来最伟大的探索中来。

——理查德·费曼



路线图



这本书的所有章节都相互关联,分成三条主线。大致说来,左边的主线与固态物质遵循的量子力学理论有关;右边的主线与解释恒星和基本粒子性质的量子力学理论有关;中间主线讨论量子佯谬和量子工程学,后面谈了这些理论在科幻作品中的实现。

图 1.2 1984 年 2 月 7 日,宇航员布鲁斯·麦克坎德勒斯 (Bruce McCandless) 在人类第一次无系留太空行走活动中,漂浮在太空中。原则上可以说,宇航员是在航天飞机旁边独立绕地球飞行的一个航天器。麦克坎德勒斯后来说:“这对 Neil (尼尔·阿姆斯特朗) 来说也许是一小步,但对我来说简直是一大飞跃!”

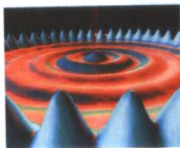


图 2.9 一条过山车轨道上,车子停在最低点。海森堡不确定性原理不允许一辆量子过山车呆着不动。这辆过山车必须永远地在最低点附近前后不停地运动。



图 3.6 这张电子显微照片显示了一个粉尘螨 (dust mite) 家庭,它们看起来好像正在安详地在原野里吃草。放大倍率大约是 200 倍。

图 4.13 量子围栏里面的电子密度波。这一张 STM 图显示了铜表面上 48 个铁原子构成的一个圆圈。铜是电的良导体,表面电子被限制在铁原子环内。这张 STM 图显示了围栏内电子密度的驻波图案。



路线图	1
第一章 波与粒子	1
科学与实验	1
光与量子力学	5
双缝实验	7
第二章 海森堡和不确定性	15
观察电子	15
海森堡不确定性原理	19
不确定性与照相术	22
费曼的量子路径概念	25
分形:奇妙的数学	27
第三章 薛定谔和物质波	31
德布罗意的物质波	31
薛定谔方程	33
电子与中子光学	37
第四章 原子与原子核	42
卢瑟福的原子核模型	42
量子化的能级	48
氢原子	53

图 5.10 这张 STM 图揭示了锑化铋的螺旋线结构如何在砷化镓衬底上生长。如果能够生长出这种原子级别的精细结构,我们就可以开发出新一代的光电元件。

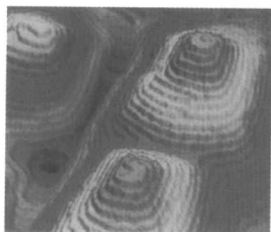
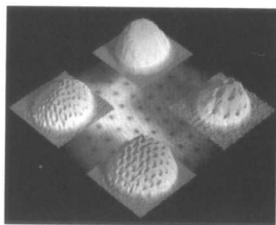


图 6.9 地球资源卫星 (Land-sat) 拍摄的圣弗朗西斯科湾的照片,硅谷和圣约瑟在右下方。图上可以清晰分辨出,中间靠左位置平行于海岸线倾斜向上的,位于臭名昭著的地震断裂带上的圣安德鲁斯湖。

图 7.17 受到扰动的铷原子凝聚态的激涡“格阵”。铷原子的旋转模式是,每一个原子有一个量子化的旋转(即最小角动量。——译者注)。从这些图可以看出,顶部的图上激涡最少,第二少的是右下方,再到其余两幅,图形越来越复杂,激涡越来越多。



波函数与量子数	57
光与原子俘获	61

第五章 量子隧道效应	63
势垒穿透	63
波的隧道效应	65
量子隧道效应的应用	67
核物理与阿尔法衰变	74
核反应与爱因斯坦质能关系	78
放射性,核裂变和原子弹	80
放射性年代测定	88

第六章 泡利与元素	90
电子自旋与泡利不相容原理	90
元素	95
金属,绝缘体与半导体	98
晶体管与微电子	104

第七章 量子合作与超流体	113
激光	113
玻色凝聚与超流体氦	120
冷原子	125
超导电性	130
量子霍尔效应	136

图 8.2 非偏振光通过一面垂直偏振镜以后,变成了垂直偏振光。

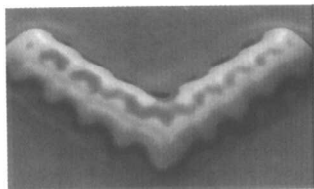
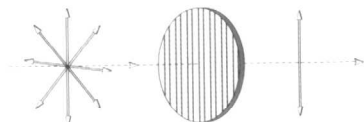


图 9.4 通过一次装配一个原子制造出来的人造分子。这个分子由 8 个铯原子和 8 个碘原子构成。

图 10.1 将地球放在相同比例的本星顶部云层背景上的一张剪贴图。图的右上部可以看见那颗巨大的红斑。

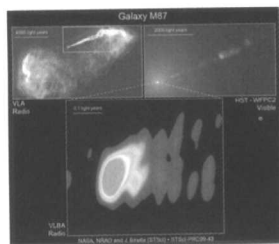
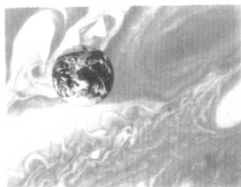


图 11.13 利用欧洲和美国的很多射电望远镜,包括从新罕布什尔一直到夏威夷的十台射电望远镜组成的甚长基线阵,天文学家们拍摄到了据信是 M87 星系中心一个巨大黑洞附近的一束强大宇宙射流的形成。

第八章 量子跃迁 137

麦克斯·波恩和量子几率 137

光子与偏振光 140

约翰·贝尔与 EPR 佯谬 146

薛定谔之猫 152

量子力学的多宇宙诠释 154

退相干理论 156

第九章 量子工程 159

理查德·费曼和纳米技术 159

从摩尔定理到量子点 163

量子信息学 170

量子计算机 174

量子输运等等 182

第十章 恒星之死 184

一颗不成功的恒星 184

氢的燃烧 186

红巨星和白矮星 191

中子星和黑洞 195

第十一章 费曼规则 200

狄拉克与反粒子 200

费曼图和虚粒子 205

零点运动与真空涨落 208

霍金辐射与黑洞 210

图 12.10 CERN 的欧洲大气泡室 (BEBC)。里面填充的是液氦, 或者是液氖和液氦的混合。包围云室的是超导铌钛合金线圈, 它能在云室内部产生一个非常强大的磁场。

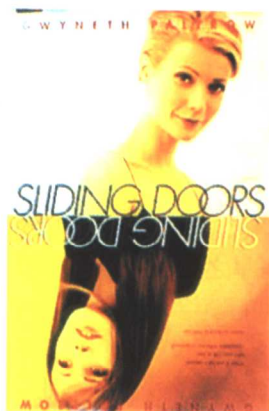


图 13.3 “并行宇宙”电影《双面情人》的海报。由格温妮丝·帕特洛 (Gwyneth Paltrow) 出演的女英雄的姜巴点是, 她是否追上了一辆列车。

第十二章 弱光子与强胶子	216
修正后的双缝实验	216
粒子物理学的诞生	222
弱光子和希格斯真空	229
夸克和胶子	235
超导体、磁单极和夸克禁闭	238
标准模型之后	242

第十三章 后话——量子物理与科幻小说

序言: 原子与原子核	249
核能和科幻作品的“黄金时代”	253

姜巴点, 多宇宙理论和薛定谔猫	258
-----------------	-----

纳米科技与量子计算机	263
结语	272

尾声	275
----	-----

术语表	276
-----	-----

引文来源	283
------	-----

索引	290
----	-----

照片来源	296
------	-----

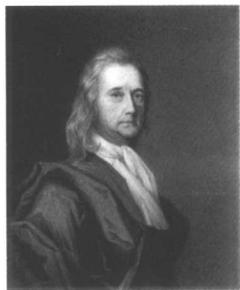
译后记	300
-----	-----

第一章 波与粒子

……我想我可以相当有把握地说，
没有人理解量子力学。

——理查德·费曼

科学与实验



艾萨克·牛顿 (Isaac Newton, 1642~1727) 在 1704 年出版了他的著作《光学》，解释了彩虹的出现，并提出了光的“粒子”理论。在他的 1687 年出版的著作《自然哲学的数学原理》(Mathematical Principles of Natural Philosophy) 中，牛顿建立了力学和引力的基本理论。这些理论一直到 19 世纪中叶都是整个科学体系的基础。

科学是对我们每天看见的东西的一种特别解释。它起源于一个问题的出现和我们的好奇心。有些东西让科学家觉得奇怪。他们不能用通常的理论解释。更努力的思考或者更仔细的观察也许能够解决这个问题。但是如果这样仍然不行的话，科学家们的想像力就被激发了。科学家们会问：是不是我们需要以一种完全不同的方式来看待这个问题？科学家们永远在寻找更好的解释。更好的意思是，任何一种新的解释不仅仅要讲清楚新的问题，还需要与以前所有仍然有效的各种解释相容。任何一种科学解释或者“理论”的标志是，它必须能够做出成功的预言。也就是说，任何严肃的科学理论，必须在任意指定的一组条件下，预言将会发生什么情况。任何一种新的科学理论，除了必须成功地解释科学家们已经观察到的各种现象以外，还必须能够正确预言没有做过的试验的结果。只有做到这一点，该理论才会被科学家们广泛接受。对新的科学思想的严格检验，正是区别科学与其他知识类学科的关键，比如历史学，经济学，或者是某些伪科学比如占星学。

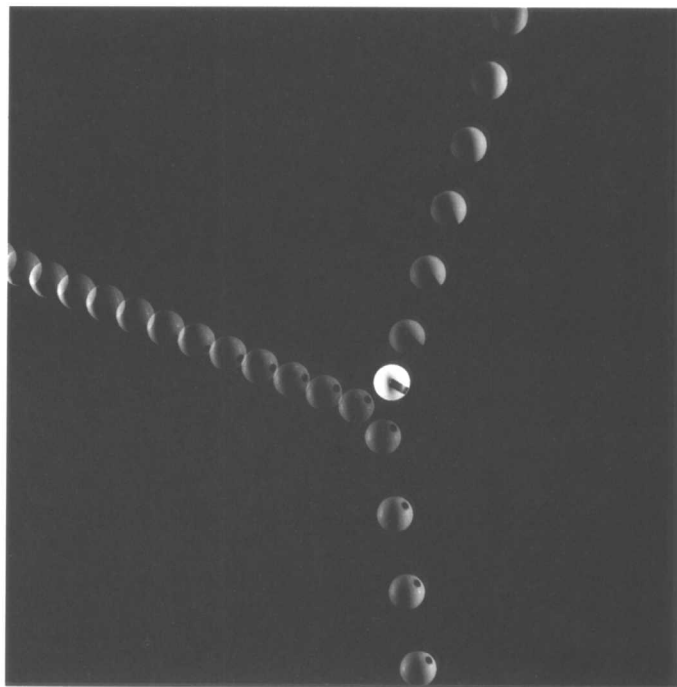


图 1.1 一张台球碰撞的多次曝光照片。台球的运动完全可以用牛顿定理计算出来，但是我们在观看电视上的斯诺克比赛，或者自己玩的时候，根据感觉就可以判断台球会怎么运动。

在 17 世纪的时候，艾萨克·牛顿和其他一些伟大的科学家，提出了一套能够描述物体运动的美妙的理论。这一整套理论框架被称为“经典力学”，涵盖的范围是包括台球到行星在内的所有物体的运动。牛顿这套用力、动量、加速度等术语描述的运动理论，最后被归纳为“牛顿运动定理”。我们日常用的各种机械设备、玩具等，都是根据这套理论制造出来的，因此我们在日常生活中很熟悉经典力学的这些原理。比如，我们都知道如何预测两个台球互相碰撞的结果。也许经典力学最叹为观止的应用应该是太空探测。到现在这个时候，如果看见宇航员和航天飞机并排漂浮在太空中，而不是悲剧性地往下掉到地球上，谁也不会感到奇怪了。而在 100 年以前，这些并不是那么“显然”的。在朱尔斯·维纳（Jules Verne）的著名科幻小说《月球旅行记》（*A Trip Around the Moon*）中，空间飞行器上的一名乘客很惊奇地发现，他们扔在飞行器外面的，发射的时候死去的一条狗的尸体，与他们一起，一直并排飞行到月球。今天，也许你对牛顿理论的细节不了解，但你知道它是对的。这是我们日常经验的一部分。

图 1.2 1984 年 2 月 7 日, 宇航员布鲁斯·麦克坎德勒斯 (Bruce McCandless) 在人类第一次无系留太空行走活动中, 漂浮在太空中。原则上可以说, 宇航员是在航天飞机旁边独立绕地球飞行的一个航天器。麦克坎德勒斯后来说: “这对 Neil (尼尔·阿姆斯特朗) 来说也许是一小步, 但对我来说简直是一大飞跃!”

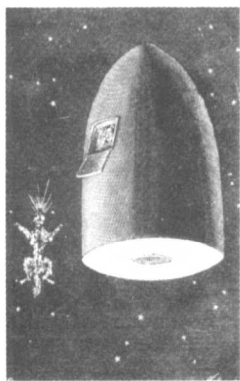
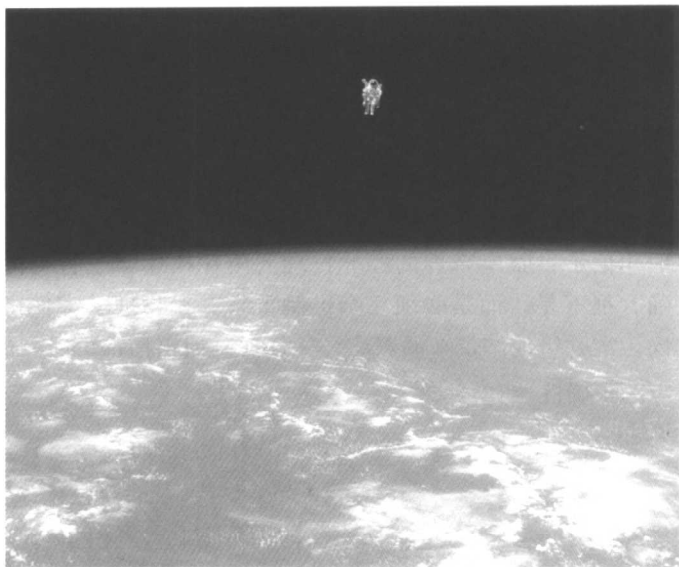


图 1.3 朱尔斯·维纳 1865 年出版的著名科幻小说《月球旅行记》中, 狗“卫星”在发射的时候就死了, 并被扔在飞行器外边。空间飞行器上的一名乘客很惊奇地发现, 狗的尸体与他们一起, 一直并排飞行到月球。

在我们的大多数人接触到量子力学的时候, 所有这些日常经验, 都会成为理解量子力学基本概念的障碍。在研究原子和分子时, 很小尺寸上的物质并不按照我们熟知的方式运动。经典力学已经不够用了, 我们需要一套崭新的不一样的理论。这套理论就是量子力学。这套理论非常巧妙, 它不仅仅有效地解释很小尺度上量子范畴内的各种现象, 在大尺度上, 它的预言与牛顿经典力学也完全相同。一个原子是一个典型的量子体系, 从经典力学出发将完全无法理解。根据一般的看法, 像太阳系里面行星绕着太阳运行一样, 原子中电子围绕原子核在轨道上运行。可实际上, 带负电荷的电子绕带正电荷的原子核运行, 这样一个简单模型是不稳定的! 根据经典物理的理论, 电子将螺旋地向中心运动, 结果就是, 原子崩溃了。这样一个很好的让人听起来感觉舒服的模型, 甚至不能保证真实原子的稳定存在, 更不用说预言原子有什么性质了。重要的是, 首先我们必须明白, 根本就不存在一个能描述原子里面电子行为的简单图像。