

上帝效应，科学中最奇特的现象

Quantum Entanglement

量子纠缠

(修订版)

〔英〕布莱恩·克莱格 著

刘先珍 译 张露露等 译校

爱因斯坦认为太神秘、太奇特，不可能成为真实的现象

科学可以这样看丛书

重庆出版集团 重庆出版社

量子隐形传输

量子加密术

量子计算机

时间旅行

量子纠缠

科学可以这样看丛书

量子纠缠 (修订版)

[英] 布莱恩·克莱格 著

刘先珍 译 张露露等 译校

重庆出版集团  重庆出版社

Copyright © 2006 by Brian Clegg
This edition arranged with St.Martin's Press,LLC.
Through Big Apple Tuttle-Mori Agency,Labuan, Malaysia.
Simplified Chinese edition copyright:
2016 Chongqing Publishing House
All rights reserved.
版贸核渝字(2016)第129号

本书中文简体字版由圣马丁出版公司授权重庆出版集团·重庆出版社在大陆地区独家出版发行,未经出版者书面许可,本书的任何部分不得以任何方式抄袭、节录或翻印。

图书在版编目(CIP)数据

量子纠缠 / (英) 布莱恩·克莱格著; 刘先珍译. — 修订本. — 重庆: 重庆出版社, 2018.7
ISBN 978-7-229-13039-8

I. ①量… II. ①布… ②张… III. ①量子论 IV. ①0413

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第020830号

量子纠缠 (修订版)

Quantum Entanglement

[英] 布莱恩·克莱格著 刘先珍 译 张露露等 译校

责任编辑: 周北川
责任校对: 廖应碧
封面设计: 王平辉
版式设计: 白一岑



重庆出版集团
重庆出版社 出版

重庆市南岸区南滨路162号1幢 邮政编码: 400061 <http://www.cqph.com>

重庆市国丰印务有限责任公司印刷

重庆出版集团图书发行有限公司发行

E-MAIL: fxchu@cqph.com 邮购电话: 023-61520646

全国新华书店经销

开本: 720×1000 1/16 印张: 14.5 字数: 189千

2011年6月第1版 2018年7月第2版第1次印刷

ISBN 978-7-229-13039-8

定价: 39.80元

如有印装质量问题, 请向本集团图书发行有限公司调换: 023-61520678

版权所有 侵权必究

爱因斯坦认为 太神秘、太奇特、 不可能为真实的现象

什么是纠缠？它是量子粒子之间的连接，是宇宙的结构单元。一旦两个粒子发生纠缠，当一个粒子发生变化，立即在另一个粒子中反映出来，不管它们是在同一间实验室，还是相距数亿光年。这种现象及其含义看起来是如此有悖于常理，以至于爱因斯坦本人称它为“幽灵一般的”，并且认为它将导致量子论的衰落。然而，科学家们后来发现，量子纠缠——“上帝的效应”，是爱因斯坦很少犯的——但也许是最大的——错误之一。

这意味着什么呢？更全面地了解纠缠的本质提供的各种可能性，读起来就像是出自于科幻小说：跨越星球的通信装置，无法破解的密码，在速度和功率方面让今天的计算机相形见绌的量子计算机，隐形传输，等等。

在《量子纠缠》中，资深科学作家布莱恩·克莱格描述了纠缠及其历史和应用。该书可读性强，引人入胜，全书不含公式。布莱恩·克莱格和阿米尔·艾克塞尔的书迷们以及那些对量子的各种奇异可能性感兴趣的人们，将会发现此书令人爱不释手。

To

Gillian, Rebecca, and Chelsea

谨以此书

献给

吉莉安、丽贝卡和切尔西

布莱恩·克莱格的其他作品：

光的历史：人类为光痴迷的奇特故事

科学第一人：罗杰·培根之生平

无限短史：对难以想象之概念的探寻

序

如果你认为科学是可以预测的、具有颠覆常识性的事物——也许有一点枯燥乏味——那是因为你还没有遇到量子纠缠。作为一种非常奇特且无处不在的物理现象，量子纠缠颠覆了常理，因此，本书称其为“上帝效应”。量子纠缠无法用常用的语言加以解释，它可在瞬间从宇宙的一端传到另一端。有人推测纠缠是生命的来源，也可以用来解释神秘的希格斯玻色子（Higgs boson）——上帝粒子的机理。从牢不可破的密码术到远距传物，纠缠都具有巨大的应用潜力。它是科学中最奇怪的效应，然而却很少有人听说过它。

从前，科学似乎简单直接。在19世纪下半叶，曾因支持进化论而获得“达尔文（Darwin）的坚定追随者”之称的英国自然教授托马斯·赫胥黎（Thomas Huxley）将科学描述为“仅仅是经过处理并组织过的常识罢了”。然而，在接下来的一个世纪当中科学上所发生的变革，尤其是在物理学上的变革证明他真的是大错特错了。

就拿量子电动力学来说吧，这个理论解释了物质和光的相互作用。量子电动力学是理查德·费曼（Richard Feynman）在一次公开演讲中描述的。理查德·费曼是20世纪美国杰出的物理学家，他被认为是活跃在科学界的少数几个真正的天才之一。（如果你从未听过费曼的演讲，那就想象一下托尼·柯蒂斯（Tony Curtis）朗读下述语句的情景）：

从常识的角度来看，量子电动力学理论将自然描述得非常荒谬，但它与实验结果非常吻合。因此，我希望你能够接受自然的本来面目——荒谬。

我将饶有兴趣地将这荒谬之处告诉你，因为我发现这让人心情愉快。请不要封闭自己，因为你无法相信自然是如此奇特。只需听我娓娓道来，而且我希望你在这个过程中与我一样心情舒畅。

本书的主题量子纠缠将使得费曼备受鼓舞的荒谬性和愉悦感上升到了新的水平。纠缠本身就已经非常引人注目了，但更令人称奇的是最近发现的对该奇特现象在现实世界中的应用。请准备好体验惊异和神奇吧。

深入讨论

在本书成文时期，量子纠缠是一个正快速发展的领域，几乎每周都有新的发现。如果你想更深入地阅读，请访问“通俗科学”网站：www.popularscience.co.uk，了解有关纠缠发展的专题报告及推荐的其他探索量子世界和延伸开的更广泛的科学和数学的书籍。

我在本书中略去了参考文献编号，以免打断本书的流畅性。不过，从203页尾注一节开始，我提供了引用、文献来源及论文等详细的参考文献，以帮助更加深入地阅读。

关于艾丽斯和鲍勃的注记

在研究量子纠缠的科学家中存在一个由来已久的惯例，即将纠缠过程一端的所有者称为艾丽斯（Alice），而将另一端的所有者称为鲍勃（Bob）。通常，在此空洞的情景内，艾丽斯试图向鲍勃发送一个信息。

该惯例起源于密码学，其中同样的名字〔同时还包括其他小角色，如窃听者夏娃（Eve）〕已在这些角色中使用了很多年。随着时光的流逝，这些名字的真正出处已经为人们所遗忘，显然，他们只是创造出来为几何图形暗点A和B提供更有意义的标签而已，对某个特别年龄段的人来说，听到“鲍勃”和“艾丽斯”，不禁就会想起现在已经非常过时的一部1969年的电影《鲍勃、卡罗尔、泰德和艾丽斯》（*Bob & Carol & Ted & Alice*），但同时也不堪再继续回忆下去。

有它值得保持的实际价值，但艾丽斯和鲍勃在量子纠缠中的作用纯粹是习惯性的，并不传递任何有价值的东西——所以，就不要绞尽脑汁地去回想这部电影了，它们不会再在本书中出现。

目录

1 □ 序

1 □ 关于艾丽斯和鲍勃的注记

1 □ 第一章 纠缠的开始

27 □ 第二章 量子的对决

44 □ 第三章 成双成对的光

75 □ 第四章 秘密的纠缠

97 □ 第五章 布利什效应

122 □ 第六章 虚幻的机器

169 □ 第七章 镜子啊镜子

182 □ 第八章 神奇啊神奇

204 □ 注 释

216 □ 致 谢

217 □ 译后记

第一章 纠缠的开始

人们通常会发现，法律就是这样一种的网，触犯法律的人，小的可以穿网而过，大的可以破网而出，只有中等的才会坠入网中。

——威廉·申斯通 (William Shenstone), 《人与风俗论文集》
(*Essays on Men, Manners, and Things*)

纠缠，这是一个含义丰富的词语。它让人想到被羊毛球缠住的小猫，或者两个人之间复杂的人际关系。但是，在物理学中，它指的是一个非常特殊而又奇特的概念。它是如此奇异而又重要，因此，我把它称为“上帝效应”。一旦两个粒子发生纠缠，那么不管它们处于何处，两个粒子之间都保持着强大的直接关联，利用这种关联可以实现看似不可能完成的任务。

为了进一步了解量子纠缠，我首先需要阐述“量子”这个词。我们研究的“量子”，是构成现实事物的微小能量和物质。一般而言，对于大量存在的同种结构的微粒，不管是光的光子、物质的原子还是亚原子粒子（如电子），量子都是它们的组成微粒。

同量子打交道意味着我们研究的是某些数量特定的可测量对象，而不

是连续变化的量。实际上，量子化事物和连续事物之间的差别类似于数字信息（基于0秒和1秒的量子）和模拟信息（可承载任何数值）之间的差别。在物理世界中，量子通常是非常小的单元，正如量子跃迁是非常小的变化一样——这一点与其在日常用语中的意义颇为不同。

作为本书的核心，量子纠缠现象就是这种微小粒子之间的关联，但正是这些费解的微小粒子构成了我们周围的世界。在量子层面上，粒子可以被完全地连接起来，而被连接的对象（如光子、电子、原子）实际上就成为同一事物的组成部分。即使这些纠缠的粒子后来被分隔到宇宙相反的两端，它们仍然保持着这种奇异的关联。一个粒子发生的变化立即在其他粒子中反映出来——不管它们之间相隔多远。上帝效应无处不在，这令人感到不安。

这种不受限制的关联使量子纠缠得到引人瞩目的应用。在数据加密中，这种关联可使密钥的传送不被截获。这种关联在量子计算机的运行中也起到根本作用——在量子计算机中，每个比特都是单个亚原子粒子；量子计算机的计算性能超过任何传统计算机，这样的程序恐怕要运行和宇宙的寿命一样久。纠缠还使远距传输有了可行性，即从一个地方向另一个地方传输粒子，甚至物体，而不通过两个地方之间的空间。

纠缠为距离相隔的两个粒子建立起亲密的连接，这种违背常理的能力不仅使我们觉得奇怪，而且物理学家也一样觉得奇怪。阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein）对量子论起源有直接的贡献，而在量子论中，纠缠是必然的。但是，爱因斯坦对纠缠的远距作用方式（纠缠的粒子不通过任何东西连接）很不安。他在致同行科学家马克斯·玻恩（Max Born）的一封信中，将量子论不受空间阻隔的能力称为“可怕的远距效应（*spukhafte Fernwirkungen*）”，即幽灵一般的远距作用。

你认为这种物理学是合理的，我却没有充分的理由来解释我

对其的态度。我无法真正地相信量子论，因为物理学应该表现出时间和空间的真实情况，不受幽灵一般的远距作用的影响，而量子论与这一观点不一致。

埃尔温·薛定谔(Erwin Schrödinger)在《剑桥哲学学会会刊》(*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*)的一篇文章中，将“纠缠”的英语单词“entanglement”带入到物理学领域中。有趣的是，虽然薛定谔是德国人，但他当时在工作和发表文章时都是使用英语——这也许是他选择英语词汇表示该现象的原因——而德语中对这种现象的表达“Verschränkung”，与他选择的英语单词有着截然不同的意义。

“entanglement”这个英语单词有着微妙的负面含义，它给人一种失去控制和陷入困境的感觉。而德语单词“Verschränkung”更具结构性也更中立——它的含义是折叠、以有序的方式交叉。绳子打结、混乱缠在一起可称为“纠缠”(entanglement)，而仔细编织的挂毯则是“Verschränkung”。实际上，这两个单词都不是很理想。量子纠缠现象也许并非像“entanglement”一词所暗示的那样无序，但“Verschränkung”的意味略显苍白，“entanglement”较之意味更强，也更能体现本质。

量子论认为纠缠应该存在，而爱因斯坦认为这个预测正表明了量子论毫无道理可言。对爱因斯坦来说，纠缠这个概念是一个魔咒，挑战着他关于“世界到底由何组成”的观点。这是因为纠缠似乎违背了定域性这个概念。

定域性是一种显而易见的原则，我们通常潜意识地肯定着这个原则。如果我们想要对与我们没有直接接触的某物施加作用——推它一下，向它传递一则信息，或其他任何作用——我们都需要通过另一些东西将目标物体与我们联系起来。通常，这些东西涉及直接接触，比如我伸手去够咖啡杯，拿起咖啡杯，把它移到嘴边。但是，如果我们想对远距离的某物施加作用，而

不跨过这中间的距离，我们就需要将媒介物从一个地方传送到另一个地方。

想象一下，你对着一听放在篱笆上的罐头扔石头。如果你想把罐头打下来，你不能只是看着它，然后依靠某种神秘力量让它跳到空中，你必须朝它扔一块石头。你的手扔出石头，石头飞过空中，撞到罐头上；只要你瞄得准（而且罐头没有被楔在篱笆上），罐头就会被打下来，你就可以得意一把了。

同样，如果我想与房间另一头的某人讲话，我的声带振动，推动最近的空气分子。这些空气分子发出一系列声波，使分子波动穿过两人之间的距离，直到最后振动到达另一人的耳朵，使他的耳膜振动，这样，他就听到了我的声音。在第一个例子中，石头是媒介物，而在第二个例子中，媒介物是声波；但在两个例子中，实质上都存在某物从A移动到B。这需要移动——移动需要时间——这是定域性的关键所在。定域性表明，如果不通过媒介物，你无法对一个遥远的物体施加作用。

各种证据显示，人们天生就认为远距离作用力是反常的。对婴儿的研究表明，他们并不接受远距作用，而是认为一个物体要对另一个物体施加作用，两者必须接触。

这似乎是一个夸张的断言。毕竟，婴儿几乎无法告诉我们这就是他们的想法，而且也没有人能够记得自己出生几个月时是如何看待世界的。研究者找到一个十分巧妙的方法来解决这个难题：研究者不停地重复某一特定的场景，使婴儿感到厌倦，然后在重复许多次之后，对这一场景的某些方面进行微小的改变，再观察婴儿如何反应。如果新的运动中有可见的接触作用，婴儿的反应较小；如果新的运动中有远距作用，婴儿则有较大的反应。如果用手推玩具，使其移动，婴儿并没有什么反应；如果玩具自己动起来，婴儿则会多看几眼。虽然我们的确无法直接推断婴儿不喜欢远距作用，但是，观察结果表明婴儿注意到了远距作用，并且整个事情让他们感觉异乎寻常。

下一次，当你观看魔术师操控远处的物体时，你可以试着观察一下自己的反应。当魔术师的手移动时，球（或任何他正在控制的物体）也在移动。你的大脑抵制看到的景象。你知道这里面肯定有名堂，肯定有什么东西将手的动作和物体的移动联系在一起，不管是直接（譬如，通过非常细的线）或间接（也许在你盯着魔术师的手时，有人藏起来在暗中移动物体）。你的大脑坚信远距作用是不真实的。

然而，尽管远距作用看起来不真实，但这并不排除其真正发生的可能性。如果我们懂得更多，我们就会不再满足于表面现象，而是进一步去观察那些貌似自然的东西。与猫狗不同，我们在很小的时候就知道电视屏幕后面没有真正的小人。同样，现代的孩子都学过引力，引力本身就像远距作用。我们知道引力可以从很远的距离外施加作用，然而彼此吸引的两个物体之间并不存在显然的联系。引力似乎对定域性的概念提出了一个主要的挑战。

随着牛顿世界观（Newtonian）的形成，万有引力的概念也出现了。但早在古希腊时期，那时还没有任何引力的概念出现，人们就已经意识到了其他明显的远距作用。琥珀在被布摩擦之后可以吸引重量轻的物体，比如将纸片吸过来。磁石（一种天然的磁体）可以吸引金属；当将它们放在软木上浮于水面之上，磁石会旋转，最后指向某个特定的方向。在以上两个情况中，都没有什么明显的联系使作用发生。被吸引的物体朝着发出引力的物体（如浮在水面上旋转的磁石以及静电）运动，带静电的琥珀就像施展魔法一样召唤它的“纸屑随从”。

对于这些现象，古希腊的不同学派予以了不同的解释。其中一个学派，即原子论者，认为所有事物要么是原子，要么是真空——并且没有事物能够通过真空施加作用，所以在引发效应和发生效应的两个物体之间，一定存在连续的原子链。其他古希腊哲学家将远距作用归因于共鸣作用，他们认

为某些材料彼此间存在内在的吸引力，就像一个人吸引另一个人一样。古希腊思想中还有第三种解释——超自然力量的作用，而第二种解释仅仅是第三种解释的一个变体。第三种解释认为存在某种东西，可以提供某种神秘的力量来产生这些效应。在古代，作为占星术的原理，这种观点广受推崇。即使没有科学证据的支撑，占星术依然盛行了很长时间，在占星术的观点中，星球具有超自然的力量，影响着我们生活的方方面面。

大约两千年后，牛顿将这些现象描述为一种显然的远距离作用——引力——的结果，展示出他卓越的才智。然而，在没有任何中介物的情况下，一个物体如何影响另一物体？对于这个问题，牛顿的解释并不比古希腊人强多少。他在1688年出版的著作《数学原理》（*Principia Mathematica*）一书中提到：

迄今为止，我们用引力作用解释了天体及海洋的现象，但还没有找出这种作用的原因。这种作用力必定有一个来源，它能渗透到太阳与行星的中心，而且它的力不因此而受丝毫影响；如力学作用一样，它所发生的作用与它所作用着的粒子表面的量无关，而是取决于它们所包含的固体物质的量；它还可以朝所有方向施加作用，并传递到极远的距离……

但迄今为止，我还无法从各种现象中找出引力的这些特性的原因，我也不构造假说。因为，凡不是来源于现象的推断，都应称其为假说；而假说，无论是物质的还是非物质的，无论它是具有力学原理还是具有神秘特质，在实验哲学中都没有地位。在这种哲学中，特定的命题都是由现象推导而出，然后才用演绎法推广到一般情况……引力的确存在，它按照我们所解释的规律起作用，并且它足以解释天体和海洋的运动。对于我们来说，这已足

够了。

这段引述包含了牛顿（Newton）最著名的名言之一，即“我不构造假说”（I frame no hypothesis 拉丁语原文为“*hypotheses nonfingo*”）。科恩（Cohen）和惠特曼（Whitman）翻译的《原理》（*Principia*）现代版本指出“*fingo*”是一个贬义词，暗示了编造，而不是词义明显为中性的“构造”。牛顿想表达的是引力确实存在，而并不打算提供一个非经验性的猜想来说明引力是如何作用的。有些人依然认为引力与占星术一样具有某些神秘的机理，但大多数情况下人们对引力的作用方式避而不谈，直到爱因斯坦出现。

爱因斯坦的研究有一个基本原理：光的传播速度是最快的。在第五章，我们将重新回顾这条基本原理的论证（以及超光速所带来的启示）。但是在那个时候，相对论为远距作用敲响了丧钟。自1676年以来，人们就知道，光以有限的速度传播。当时，丹麦天文学家奥列·罗默（Ole Roemer）第一次有效地测定了光速（目前测定为186 000英里/秒左右。1英里大约等于1.609千米。责编注）。爱因斯坦证明了运动速度无法超越这个限制。任何东西，甚至引力，都无法传播得比光快。这是一种极限状态。

我们仍然无法准确知道引力是如何作用的，但在21世纪初，实验终于证明了爱因斯坦关于速度极限的理论——引力确实以光速运动。假如太阳突然消失了，我们在8分钟之后才会看到它消失的状况，并且在那时我们才会感知到太阳引力消失造成的灾难性后果。在这种情况下，定域性起着作用。

至少情况似乎如此。直到一位不太知名的北爱尔兰物理学家约翰·贝尔（John Bell）通过实验证明了纠缠的存在。纠缠是真正的远距作用，迄今为止都一直困扰着许多科学家。当然，如今我们对宇宙有了更复杂的认识，而且我们必须面对一个事实，那就是“距离”本身的概念也许并不像过