

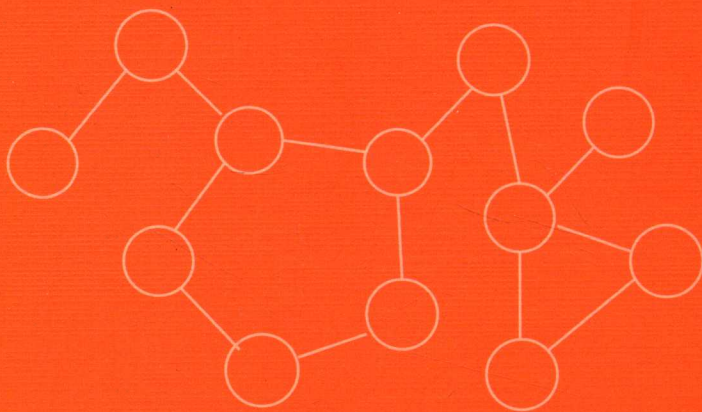


纠缠态

物理世界第一谜

ENTANGLEMENT
The Greatest Mystery in Physics

[美] 阿米尔·艾克塞尔 著 庄星来 译



上海科学技术文献出版社
Shanghai Scientific and Technological Literature Press

0413
96



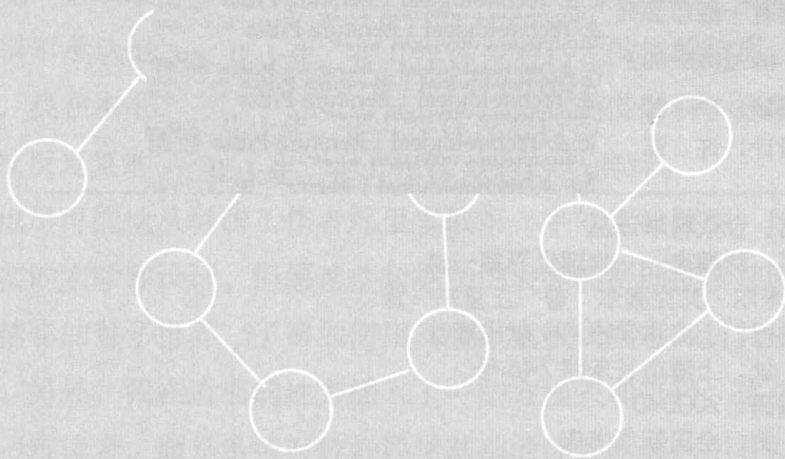
纠缠态

物理世界第一谜

ENTANGLEMENT

The Greatest Mystery in Physics

[美] 阿米尔·艾克塞尔 著 庄星来 译



上海科学技术文献出版社
Shanghai Scientific and Technological Literature Press

图书在版编目 (CIP) 数据

纠缠态——物理世界第一谜 / (美) 阿克塞尔著; 庄星来译. —上海: 上海科学技术文献出版社, 2016.6

(合众科学译丛)

书名原文: ENTANGLEMENT: The Greatest Mystery in Physics

ISBN 978-7-5439-6998-8

I. ① 纠… II. ① 艾… ② 庄… III. ① 物理学—普及读物 IV. ① O4-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 057385 号

Entanglement: The Greatest Mystery in Physics

by Amir D. Aczel

Copyright © 2001 Amir D. Aczel

Simplified Chinese translation copyright © 2016

by Shanghai Scientific & Technological Literature Press

Published by arrangement with Da Capo Press, a Member of Persus Books LLC

through Bardon-Chinese Media Agency

博达著作权代理有限公司

All Rights Reserved

版权所有 • 翻印必究

图字: 09-2015-632

责任编辑: 李 莺

封面设计: 许 菲

丛书名: 合众科学译丛

书 名: 纠缠态——物理世界第一谜

[美] 阿米尔·阿克塞尔 著 庄星来 译

出版发行: 上海科学技术文献出版社

地 址: 上海市长乐路 746 号

邮政编码: 200040

经 销: 全国新华书店

印 刷: 上海中华商务联合印刷有限公司

开 本: 650×900 1/16

印 张: 14

字 数: 162 000

版 次: 2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5439-6998-8

定 价: 28.00 元

<http://www.sstlp.com>

敬告读者

量子论本身，尤其是量子纠缠的概念，对任何人来说都很难理解——即便对资深的物理学家和数学家来说也是如此。因此在编写本书的过程中，我有意将书中论及的各种观点和概念以不同的形式进行反复的解释和说明。这样做是有必要的，因为就连当今一些最具才智的科学家都要花费毕生的精力去探索“纠缠”现象；甚至，虽然这项研究已经进行了几十年，但几乎还没有什么人敢说自己完全理解了量子论。该领域内的物理学家知道如何将量子力学的规则运用到各种具体情况中，也能够通过计算做出精确度极高的预测，这在其他一些领域中是很难企及的。但是，这些聪明的科学家往往还是不得不承认他们尚未真正“理解”量子世界里发生的情况。正因如此，我在本书的不同章节中，从各种角度，或借助科学家们的论述，反反复复地对量子论以及纠缠态的概念进行解释。

我也尽可能地从科研工作者那里索取第一手的实验数据，用以描述真实的实验和设计。但愿这些数据和图表能够帮助读者理解那神秘而精彩的量子世界，了解如何用实验来生成纠缠态并对其进行研究的。另外，我在适当的地方插入了一些方程式和符号。这么做不是要刁难读者，而是希望有较好科学基础的读者能够从中获益更多。举个例子，在谈薛定谔的研究工作的章节里，我列出了著名的薛定谔方程的最简化（也是最局限）形式，以满足部分读者的好奇心和求知欲。当然，如果读者要跳过这些方程直接往下看，那也绝对没有问题，不会因此丢失信息或者影响阅读的连贯性。



本书所讲的是“科学”：科学的建构、科学背后的哲学依据、支撑起科学的数学基石，验证及揭示大自然奥秘的科学实验，以及那一群探索着自然界最奇异现象的科学家的生活。这些科学家是 20 世纪最伟大的人物，他们的生命轨迹贯穿了整整一个世纪。这一群人，锲而不舍地探索着大自然的同一个奥秘——量子纠缠，他们的科学生涯也因而彼此“纠缠”着，直到今日。本书记述了人们对纠缠现象的探索，这是历史上最精彩的科学悬疑故事之一。虽然有关纠缠现象的知识也带来了激动人心的新技术，但本书的重点并非列数在量子纠缠研究中发明的新技术。《纠缠态》讲述的是“现代科学”中一场历时百年的漫漫求索。

前言

“我怀疑，宇宙不仅比我们已料想的更奇怪，甚至比我们能料想的还要奇怪。”

——霍尔丹 (J.B.S.Haldane)

1972 年秋，我在加州大学伯克利分校就读本科，主修数学和物理，当时有幸参加了一场校内讲座，主讲者是量子论的奠基人之一沃纳·海森堡 (Werner Heisenberg)。虽说今时今日我对于海森堡在历史上扮演的角色心存异议——当时别的科学家因反对纳粹政策纷纷离去，而他却留下来帮助希特勒制造原子弹——但他的演讲给我的生活造成了深刻而积极的影响，使我对量子理论有了更深层次的理解，并且认识到这一理论在我们不断努力了解自然这一过程中所占的地位。

量子力学是整个科学世界中最奇特的领域。以我们地球上的日常生活为视角的话，量子力学看起来纯粹是无稽之谈，它所论述的是主宰微观粒子领域的自然法则（也涉及某些庞大的体系，比如超导体）。“量子”一词本身指的是很小的一份能量——微乎其微的一份。量子力学，也就是所谓的“量子论”，探讨的是构成物质的基本单位，即构成宇宙万物的极小粒子。这类粒子包括原子、分子、中子、质子、电子、夸克，还有光子——构成光的基本单位。所有这些物体（我们暂且称之为物体）都比人类的肉眼所能看见的东西要小得多。在这个层面上，突然之间，我们所熟悉的一切行为规律

都失去了效应。进入这个新奇的微观世界后，我们会体验到种种困惑和诡异，就好像爱丽丝在仙境中探险一般。在虚幻迷离的量子世界中，粒子就是波，波就是粒子。因此，光线既是一束起伏跳荡过空间的电磁波，同时又是一串向着观察者飞速运动的微粒，因为有一些量子实验和量子现象揭示了光的波动性，而另外一些实验和现象则揭示了光的微粒性——但是这两种性质不能被同时表现出来。而在我们尚未对光进行观察和实验之前，光同时既是电磁波又是粒子。

在量子领域里，一切都是模糊的——我们所探讨的每一个对象，光也好，电子也好，原子也好，夸克也好，都是朦胧的。“不确定性原理”（uncertainty principle）主宰着整个量子力学领域，所有的事物都无法准确地被看见、触摸或了解，只能透过概率的薄雾去感知。从本质上说，对实验结果进行科学的预言，这只是以概率的形式表达出来的统计结果——我们所能预测的只是某个粒子最有可能处在的位置，而并非其精确的位置。同样，我们也无法准确地测定某个粒子的位置及其动量。更糟糕的是，这弥漫于整个量子世界的迷雾不会消散，因为根本就没有什么未被发现的“隐变量”（hidden variables），如果有的话，我们对自然边界线那边的量子世界的情况就会有更加准确的了解。那种不确定性，那种模糊状态，那种种的可能性，那种弥散性，是挥之不去的——这一切神秘莫测、难以捉摸、若隐若现的元素正是神奇的量子领域不可或缺的组成部分。

更令人费解的是量子系统有一种神秘的叠加态。一个电子（带负电的基本粒子）或光子（光的量子）可以同时处于两种或两种以上的状态。我们再也不能说“在这里或者在那里”，在量子世界里

我们只能说“既在这里，又在那里”。从某种意义上说，一个光子，也就是照射在一个带有两个孔的屏幕上的一束光的组成部分，可以在同一时间穿过两个孔，而不是像预期的那样只穿过其中的一个。在环绕原子核的轨道上运行的电子，在同一时刻，可能处于好几个不同的位置。

在这离奇的量子世界中，最神秘莫测的现象还数所谓的“量子纠缠”。两个相隔甚远的粒子，其距离可以达到数百万甚至数十亿公里，彼此神秘地联系在一起，其中一方发生的任何状况都会立即引发另一方产生相应的变化。^[1]

三十年前我从海森堡的讲座上所学到的就是，我们必须摒弃从经验以及感官得来的有关世界的先入之见，而让数学来做我们的向导。电子所存在的空间迥异于我们赖以生存的空间，数学家们称这个世界为“希尔伯特空间”(Hilbert space)，其中还活跃着别的微粒以及光子。这个由数学家而非物理学家创立的希尔伯特空间，似乎很好地描述了量子世界的神秘规律，而从我们囿于日常经验的眼光来看，那些规律纯属无稽之谈。研究量子系统的物理学家要依靠数学来预言实验的结果或者现象，正是因为他们无法依靠自然形成的直觉经验去感知一个原子、一条光线，或者一串粒子内部所出现的状况。量子理论挑战着我们的“科学”理念——因为我们无法真正直观地理解微粒的奇怪运动。同时，它严重地质疑着我们所谓的“实在”(reality)观念。在彼此“纠缠”乃至虽然远隔万里却能行动一致的粒子的世界中，究竟什么叫做“实在”？

以数学理论构建的美丽的希尔伯特空间、抽象的代数学以及概率理论——这些我们用以探索量子现象的数学工具——使我们可以预言实验的结果，并且准确到令人瞠目结舌的地步；但这些工具并

不能让我们理解种种现象产生的具体过程。深奥的量子体系当中究竟发生了什么状况，这其中的奥秘也许人类的智慧远远不能企及。我们仅能借助量子力学的某种数学解释来预测一些结果，而这些预测从本质上说都只是统计数字。

这叫人忍不住要说一句：“既然这个理论不能帮助我们了解实际发生的现象，那么它肯定是不完整的。其中肯定缺少了什么东西——肯定有一些变量被忽略了，只要在方程中加入那些变量，我们对量子的认识就会变得完善起来，从而能对量子物理现象做出满意的解释。”其实，身为提出相对论并引发时空革命的20世纪第一科学巨人的爱因斯坦，就曾对当时方兴未艾的量子论提出过这样的挑战，他认为量子力学是一种优秀的统计学理论，但还不足以完整地描述一种物理实在。他的名言“上帝不掷骰子”，表明他相信量子论还有一个更深的非概率的层面有待发现。1935年，他与同事波多斯基（Podolsky）及罗森（Rosen）一起，宣布了对量子物理学的挑战，指出这一理论是不完备的。这三位科学家立论的依据就是不可思议的量子纠缠现象，而这一现象本身又是由量子体系的数学分析中推导出来的。

海森堡1927年在伯克利演讲时，提到他建立量子理论中的矩阵力学（matrix mechanics）的过程。矩阵力学是他在量子力学领域的两大贡献之一，另一贡献就是测不准原理。海森堡回忆说，1925年他决定探索矩阵力学方法之初，自己甚至连矩阵乘法（一种基本的高等数学运算）都不会。不过，他自己通过摸索掌握了这种运算法则，接着就建立了自己的理论。这样，科学家们便通过数学运算得出了量子世界的种种行为规则。薛定谔（Erwin Schrödinger）也是在数学的引导下得到了一种异曲同工然而更为简便的量子力学算

法——波动方程 (wave equation)。

多年来，我一直密切关注着量子理论的发展。我曾在几种著作中探讨过数学和物理学领域内的各种奥秘悬疑：《费马大定理》(Fermat's Last Theorem) 讲述的是对一个由来已久的问题的神奇验证；《上帝的方程式》(God's Equation) 说的是爱因斯坦的宇宙常数 (cosmological constant) 和宇宙扩张；《神秘的阿列夫》(The Mystery of the Aleph) 描述了人类为理解“无穷大”而作出的种种尝试。然而，我一直都想探讨的量子秘密，却迟迟未能落笔。最近《纽约时报》上刊登的一篇文章，终于让我找到了写作这本书的动力和灵感。这篇文章讨论了爱因斯坦和他的两位同事向量子理论提出的质疑，他们认为能够容许像“纠缠态”这样的“不真实”现象存在的理论必定是不完备的。

70 年前，爱因斯坦和他的科学界同仁用种种假想实验，证明量子力学所描述的微粒世界的种种奇特规律实在太过诡异，不可能是真实的。别的姑且不论，据爱因斯坦指出，依量子力学理论，对一个粒子的测量行为会同时改变另一个粒子的物理特征，不管两个粒子相隔多远；他认为这种“远距离作用”，即“量子纠缠”，是非常荒诞的，绝不可能存在于自然界中。他挥舞着假想实验的武器，指出假如这种效应果真存在的话，会产生哪些奇怪的结果。然而，即将发表在《物理评论快报》(Physical Review Letters) 上的三篇论文所描述的实验，却证明了爱因斯坦的观点存在着多么大的偏差。这几个实验不仅表明了纠缠态确实存在——这一点先前已经得到了证实——而且还证实了这种效应可以用来建立不可破解的密码……^[2]

以我对爱因斯坦的生平及科研工作的研究，我发现即便是爱因斯坦自己以为（在宇宙常数问题上）出了错的时候，他其实往往还是对的。而在量子领域中，爱因斯坦实际上是该理论的建设者之一。我非常清楚，《纽约时报》所指涉的爱因斯坦 1935 年的论文，非但没有犯错误，而且事实上还孕育了 20 世纪最重大的物理学发现——用物理实验揭示的真实的量子纠缠现象。“量子纠缠”是奇特的量子理论最诡异的一个方面；本书所要讲述的就是人类对量子纠缠的探索过程。

相互纠缠的物体（粒子或光子）能够彼此关联，是因为它们在生成的过程中就以某种特殊的方式被捆绑在一起。例如，一个原子中的一个电子的能量下降两个能级时，该原子所释放出的两个光子之间就存在纠缠效应（能级与原子中电子的运行轨道有关）。虽然这对光子的运动方向都是不确定的，但它们总是面对面地出现在母原子的两边。这样的成对光子或微粒，在产生的过程中就被联系在一起，它们会永永远远地互相纠缠。一旦其中的一方发生改变，另一方——无论它在宇宙的哪一个角落——也会同时发生变化。

1935 年，爱因斯坦跟他的两位同事，罗森和波多斯基，研究了一种符合量子力学规则、由两个不同粒子构成的系统，结果发现这个系统会发生纠缠。爱因斯坦、波多斯基和罗森于是从彼此分离的粒子之间的这种理论上的纠缠现象，推断说如果量子力学允许如此诡异的相互作用存在的话，这理论一定缺少了什么东西，一定是不完备的。

1957 年，物理学家戴维·波姆（David Bohm）和亚克·阿哈朗诺夫（Yakir Aharonov）分析了吴健雄和萨克诺夫（I.Shaknov）大

约十年之前所做的一个实验的结果，结论显示彼此分离的系统之间的纠缠效应可能确实存在于自然界中。1972年，两位美国物理学家，约翰·克劳瑟（John Clauser）和斯图亚特·弗里曼（Stuart Freedman），找到了实验证据，证明了量子纠缠真的存在。几年后，法国物理学家阿莱恩·阿斯派克特（Alain Aspect）及其同事为纠缠现象找到了更具说服力并且更为完整的实验证据。这两批科学家都受到了在日内瓦工作的爱尔兰物理学家约翰·贝尔（John S. Bell）的启发，在贝尔的重要理论发现的基础上，着手证明爱因斯坦-波多斯基-罗森三人的思维实验是对一种真实物理现象的描述，而非为证明量子论不完备而刻意提出的荒谬想法。量子纠缠的存在为量子力学提供了有力的证据，同时冲垮了一种狭隘的“实在观”。

目 录

前 言	001
敬告读者	001
第一章 神秘的和谐力	001
第二章 序 幕	005
第三章 托马斯·杨的实验	012
第四章 普朗克常量	021
第五章 哥本哈根学派	027
第六章 德布罗意导波	035
第七章 薛定谔和他的方程	040
第八章 海森堡的显微镜	053
第九章 惠勒的猫	060
第十章 匈牙利数学家	070
第十一章 爱因斯坦登场	077
第十二章 波姆与阿哈朗诺夫	093
第十三章 约翰·贝尔的定理	105
第十四章 克劳瑟、霍恩、西摩尼的梦	115

第十五章	阿莱恩·阿斯派克特	137
第十六章	激光枪	148
第十七章	三粒子纠缠	157
第十八章	十千米实验	183
第十九章	隐形传态：“斯科特，开始传送！”	187
第二十章	量子魔术：这一切究竟说明了什么	193
致 谢		197
注 解		202
参考文献		206

神秘的和谐力

“要想披戴伽利略的荣光，光凭遭受来自严酷权威的迫害是不够的，你还必须正确。”

——罗伯特·帕克（Robert Park）

此时此地发生的某种情况能够同一时刻在万里之外引起某种反应，这可能吗？我们在实验室里进行某种测量，而同一时刻，在10英里（16千米）以外，或世界的另一头，乃至宇宙的彼端，一个类似的行为也在发生，这可能吗？令人惊奇的是，与我们所拥有的关于宇宙运作的直觉经验恰恰相反，这种现象确实存在，这就是本书要讲述的“量子纠缠”。“纠缠”中的双方无法逃脱地联系在一起，无论它们之间的距离多么遥远。本书记载了一群科学家，他们穷毕生之力来证明这种量子论所预言的、由爱因斯坦引起科学界广泛关注的诡异效应确实是自然界所固有的现象。

这群科学家对“纠缠效应”进行了研究，以确凿的证据证实了“纠缠”是一种真实存在的现象，同时也发现了这种现象中其他同样令人困惑的方面。我们想象一下：爱丽丝（Alice）和鲍勃（Bob）是一对幸福的夫妇，一次爱丽丝出差离开了家，鲍勃遇见了大卫（Dave）的太太卡罗尔（Carol），正好大卫也不在卡罗尔身边，他跑到世界的另一头去了，离另外三个人都很远。结果鲍勃和卡罗尔纠缠到一起，他们都忘记了各自的配偶，只觉得他们俩本来就是天造

地设的一对，注定要厮守终生。与此同时，从未谋面的爱丽丝和大卫鬼使神差地也接上了头，他们彼此远隔千山万水，连面也没有见过，却突然变得像夫妻一样心意相通，两情相悦。如果将故事中的4个人物换成4个粒子，分别标作A、B、C、D，那么上述的咄咄怪事便会真的发生。假如粒子A和B相纠缠，C和D相纠缠，那么我们就可以借助仪器令B和C纠缠起来，从而导致相互分离的A和D之间产生纠缠态。

利用纠缠效应，我们还可以将一个粒子的状态“隐形传输”到一个遥远的地方，就像电视连续剧《星际旅行》中的科克舰长瞬间被送回“伟业号”飞船一样。当然，目前为止还没有人能够“隐形传输”一个大活人，但是一个量子体系的状态已经可以在实验室里进行“隐形传输”了。更有甚者，这种令人难以置信的现象现在还应用到了密码技术和计算机领域中。

在领先时代的技术领域中，纠缠效应常常被扩大到三个以上的粒子中去。比如，可以创造出一些三粒子体系，每一个体系中的三个粒子都100%相关，也就是说无论其中哪1个粒子发生变化，都会同时引起其他两个粒子的类似改变。这样的三个粒子于是无可逃脱地纠缠在一起，无论它们飞到宇宙的哪一个角落。

1968年的一天，物理学家阿伯纳·西摩尼（Abner Shimony）独坐于波士顿大学的办公室中，他着了魔似的被一篇论文给吸引住了，这篇论文发表在一家不起眼的物理杂志上已有两年。论文的作者是爱尔兰籍的物理学家约翰·贝尔（John Bell），在日内瓦从事研究工作。很少有人能够真正理解贝尔的想法，也没有多少人真正想去理解他，而西摩尼恰恰是这少数人中的一员。他知道贝尔在那篇论文中所阐述和证明的原理，可以用于证实两个粒子能否发生

远距离协作。正巧，就在此前不久，他的同事：波士顿大学的查尔斯·威利斯（Charles Willis）教授问他愿不愿意收一位名叫迈克尔·霍恩（Michael Horne）的学生做博士生，指导其统计力学方面的博士论文。西摩尼答应见一见这位学生，但并不太想在任教波士顿大学的头一年就带博士生，他说自己在统计力学方面实在提不出什么好的研究论题。但是，他拿出了贝尔的论文，因为他觉着霍恩可能会对量子力学的基本原理感兴趣。结果，就像西摩尼描述的那样，“霍恩非常聪明，他一下子就发现了贝尔提出的问题大有文章可做。”迈克尔·霍恩把贝尔的论文带回家去研究，同时开始借助贝尔的原理着手设计实验。

无独有偶：在纽约的哥伦比亚大学里，约翰·克劳瑟（John F. Clauser）不约而同地在研读贝尔的这篇论文。他也被贝尔提出的问题所吸引，并且发现了实验的可能性。克劳瑟读过爱因斯坦、波多斯基、罗森三人共同发表的论文，认为他们的想法非常有道理。贝尔的理论显示了量子力学与爱因斯坦及其同事所提出的量子力学“定域隐变量”解释之间的分歧，而这种分歧是有可能用实验来显示的，克劳瑟为此雀跃不已。虽然他对实验的可行性还有怀疑，但他遏制不住检验贝尔预言正确性的欲望。当时他还是研究生，听过他的想法的人都劝他放弃这个念头，老老实实在地拿他的博士学位，不要钻进科学幻想里去。然而，克劳瑟比别人更加清楚，量子力学之门的钥匙就藏在贝尔的论文中，他决心要找到它。

大西洋彼岸。数年后，阿莱恩·阿斯派克特（Alain Aspect）在奥塞的巴黎大学光学研究中心底层的实验室里忙得不亦乐乎。他想率先实施一项别出心裁的实验：证明分别位于实验室两端的两个光子能够即时地发生相互影响。阿斯派克特的灵感同样来自贝尔那篇

