



科技部科技计划科普化示范项目
北京市科学技术委员会科普专项资助



爱因斯坦的幽灵

(第2版) 量子纠缠之迷

郭光灿

高山

著

EINSTEIN'S GHOST
PUZZLE OF QUANTUM
ENTANGLEMENT

理工大学出版社
INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



爱因斯坦的幽灵

量子纠缠之谜

(第2版)

郭光灿
高山 著

EINSTEIN'S GHOST
PUZZLE OF QUANTUM
ENTANGLEMENT

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

爱因斯坦的幽灵：量子纠缠之谜 / 郭光灿，高山著. —2 版. —北京：北京理工大学出版社，2018.1

（芦笛曲丛书）

ISBN 978-7-5682-4997-3

I. ①爱… II. ①郭… ②高… III. ①量子论 IV. ①O413

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 287112 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / （010）68914775（总编室）

（010）82562903（教材售后服务热线）

（010）68948351（其他图书服务热线）

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大彩印有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 12

字 数 / 175 千字

版 次 / 2018 年 1 月第 2 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 48.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文稿编辑 / 张慧峰

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

《芦笛曲丛书》项目组

组 长 李 普

副组长 范春萍

成 员 （按姓氏汉语拼音排序，将不断有新成员加入）

陈润生*	董光璧	樊潞平	高 山	郭光灿*
郭艳玲	胡俊平	黄永明	霍裕平*	姬十三
解思深*	匡廷云*	李喜先	李永葳	刘 茜
刘育新	刘 夙	罗 勇	欧阳钟灿*	欧阳自远*
邱成利	史 军	唐孝威*	唐云江	武夷山
杨志坚	叶 青	尹传红	张家铝*	钟 掘*

主 持 范春萍 唐云江

注：标“*”者为中国科学院或中国工程院院士

历久弥新，日新又新，惊赞敬畏

(代再版序言)

范春萍

“希尔伯特这个吹笛人所吹出的甜美芦笛声，吸引着无数老鼠跟着他投入了数学的深河。”希尔伯特(David Hilbert)的学生加传记作者外尔(Hermann Weyl)这轻轻一语，讲出了人类文明及科学进程中无比传神的故事，美妙诱人。“笛声”和“深河”的魅力百年萦绕，历久弥新。

我被这个带着情境和既视感的摄魂故事捕获，成为希尔伯特的一只另类老鼠，去鼓动科学家们吹笛子，或引进科学的迷人摄魂曲，然后助力传播。

这是我做科普图书出版的心路历程和内在动力，经我手出版的许多原创或引进版科普书，都若隐若现着“希尔伯特”们的悠扬笛声。

《芦笛曲丛书》是我于2006年在“科技部科技计划科普化示范项目”支持下开始策划组织、2007年正式启动的前沿科技科普丛书出版项目。当时策划了10本，我做策划编辑兼责任编辑，邀《科学世界》主编唐云江做丛书主持。

2008年底，我因工作调动离开出版社，项目进度受到影响。除2009年出版的《基因的故事：解读生命的密码》和《爱因斯坦的幽灵：量子纠缠之谜》、2010年的《再造一个地球：人类移民火星之路》之外，其余7本由于未达到我对芦笛摄魂度的预期而未能按期出版。之后，有的书稿返修，有的换选项、换作者，又由于作者们、主持人以及我自己新工作的忙碌而拖延下来。

毫不夸张地说，第一批出版的3本书无论从创意、内容还是行文质量都完全可以与国际上最好的科普书媲美。但是，出版之初3本书的命运却并不相同。大概与大众传媒世纪之交对“21世纪是基因科技的世纪”的渲染，以及我国新世纪航天工程的巨大成就有关，《基因的故事》《再造一个地球》两书一出版即获得广泛赞誉和各种奖项，进入各种发行推广目录、反复重印，而在专业圈子得到甚高评价的《爱因斯坦的幽灵：量子纠缠之谜》，却因公众离量子力学过远、基本没听说过“量子纠缠”而受到冷遇。

2007—2017年，是科学蓄力、技术爆发、科技指标翻天覆地般指数蹿升

的10年。10年间，与《基因的故事》相关的基因技术狂飙突进，基因治疗、基因编辑、基因工程等都取得巨大进展也遭遇巨大争议、引发更大关注。与《再造一个地球》相关的航天工程奇迹连连：欧洲航天局（ESA）的“罗塞塔号”（Rosetta）飞船2004年起经10年飞行，于2014年把“菲莱”（Philae）探测器送达“丘留莫夫—格拉西缅科”（Churyumov-Gerasimenko）彗星表面；美国航天局（NASA）的“新视野号”（New Horizons）2006年起飞经9年多飞行于2015年飞掠冥王星后飞向柯依伯带，2011年起飞的“朱诺号”（Juno）经近5年飞行于2016年进入木星轨道，1997年起飞的“旅行者1号”（Voyager 1）经40余年漫漫长旅脱离太阳系磁场边界，1997年起飞的“卡西尼号”（Cassini）经6年多飞行于2004年抵达土星轨道、进行了13年多的探测工作后于北京时间2017年9月15日燃料将尽时、在科学家控制下坠入土星大气焚毁而演绎“壮丽终章”（Grande Finale）；多国争相探测月球，争相探测火星。更加可喜也令人震惊的是量子技术的突破，量子通信卫星、量子计算机等的成功，把“量子纠缠”这个连科学家都解释不清的“幽灵现象”推到了公众面前。

2017年，得到“北京市科普社会征集项目”的支持，《芦笛曲丛书》得以修订再版。这套书做的是前沿科普，首版时反映的就是直至出版之前的前沿发展状况。10年中各个领域都发生了很大变化，修订给了丛书继续跟上前沿的机会。这真是可喜可贺的大好事。

科学大神卡尔·萨根有言：“宇宙现在是这样，过去是这样，将来也永远是这样。只要一想起宇宙，我们就难以平静——我们心情激动，感叹不已，如同回忆起许久以前的一次悬崖失足那样令人晕眩战栗。”其实，自然和科学的各个领域无不如此。

大哲学家康德说过：“有两样东西，越是经常而持久地对它们进行反复思考，它们就越是使心灵充满常新而日益增长的惊赞和敬畏：头上的星空和心中的道德律。”只要留心阅读好书，美妙的自然、神奇的科学、精致的心灵，无不引发我们“日益增长的惊赞和敬畏”。

《基因的故事》《再造一个地球》《爱因斯坦的幽灵》3本书的再版开了个好头，以此为契机，我们将再度启动《芦笛曲丛书》，继续推出更多好书以飨读者。新启动的《芦笛曲丛书》由我和唐云江共同主持，张慧峰担任策划编辑。

总 序

今天，我们按动手机号码，可以和世界上任何地方的人通话；我们敲击电脑键盘，可以足不出户而知天下；我们开车行驶在大漠荒山，可以用GPS导航……科学已经无处不在，它改变着我们的生活，也改变着我们的思想和行为。

作为人类认识自然、与自然对话的一种方式，科学令人好奇和神往……

当早期的人类直面这个丰富多彩的世界的时候，世界混沌一片、浑然一体，一代一代的先辈，用观察、计数、分类、测量、计算、思辨、实验、解析、模拟……数不清的办法探索世界的奥秘，这也就是在各个时代有不同内容和不同表现形式的科学。

起源于生产实践，以技能技巧、经验积累为原初形态的技术，在当代社会与科学融为一体。

如今，科学技术作为人类社会实践的重要领域之一，成为复杂的巨系统工程，成为衡量一国综合国力的重要指标，成为推动社会进步的一种无与伦比的力量。科学需要全社会的理解、关注和参与，需要以公众科学素质的提高作为保障。

然而，科学也常使我们茫然和困惑：它带来的不都是福音，也有灾难和恐惧；同时，前沿科技发展越来越快，精深而艰涩，越来越远离我们的直觉和经验。加之科学的领域越来越宽，分类越来越细，甚至相同学科不同方向的科学家之间都很难明了对方的工作了。

巨大的鸿沟横亘于科学和人文之间，横亘于科学界与公众之间。

本丛书是国家科技部“科技计划科普化示范项目”，并入评“‘十一五’国家重点图书出版规划项目”。丛书旨在向公众普及前沿科学技术知识，使每年巨额投入的各类科技计划成果在提高国家科技水平和科技能力的同时，也能以科普的形式，让自主创新的成果进一步惠及广大公众，对提高公众的科学素质、促进公众理解科学、吸引公众关注以至投身科技事业有益。另外，通过示范项目，引导形成科学家关心公众科学素质、承担社会科普责任、热

心参与科普事业的氛围，在科学家、工程师中发现和培养科普作家，探索科学家、科普作家、出版机构三结合的科普创作新模式。

然而，科技的前沿在哪里？一日千里、艰深难懂的前沿科技何以科普？

前沿，像是科技疆域的地平线，你站得越高，地平线越绵长，线外的未知领域也越广阔。科技的脚步在前行，科技的疆域在拓展，前沿的领域在扩张……

如何从科学的腹地出发，沿着崎岖的小路，理清前沿的发展线索，抓住最重要的前沿领域，成为对丛书成败的第一个考验。

前沿科普与成熟知识科普的最大不同在于前沿是发展的，是每日每时都可能变化的。前沿科普的作者一定要是一线科研工作者或能够理解一线工作和科研进展的人。于是动员一线科学家参与丛书的写作成为对丛书成败的第二个考验。

这是一项行动，一项一线科学家参与科普，参与前沿科普的开风气之先的示范性行动。

我们是幸运的，读者是幸运的。首批丛书有10位院士承诺参与，并积极投入到丛书特别是各自承担的分册的策划和著述中。

考虑到身处科研一线的院士们工作繁忙，我们为每一位院士挑选了一位科普助手，由两个人共同完成一本书的写作。两位作者思路、见解的融合，工作方式以及叙事、论理风格的互相接纳是对丛书成败的又一个考验。

更加幸运的是，试验取得了初步成功。丛书的前三本已经出版了，接下来还将有新书陆续出版。

这套丛书设定为一套开放的书系，将不断有新书加入。在此，诚邀广大一线科研工作者加盟著述（可以是一线科研人员个人独立著述，也可以是一位一线科研人员与一位科普作者合作著述），使丛书所覆盖的前沿领域越来越宽广，为读者提供更多的精神食粮。

正如数学家外尔所言：“希尔伯特这个吹笛人所吹出的甜美的芦笛声，吸引着无数老鼠跟着他投入了数学的深河。”我们也希望这套丛书能像一支支芦笛曲，催生出读者对科学的向往和追随……

E ntanglement

目 录

●	引言 从伯特曼先生的袜子说起	001
●	第一章 幽灵出世	005
	1.1 EPR 密码	005
	1.2 弹子球游戏	007
	1.3 电子版本	010
	1.4 自旋门	015
	1.5 答案藏在图中	017
	1.6 诸多神秘性	022
●	第二章 失落的世界	025
	2.1 先定的和谐	026
	2.2 寻找漏洞	030
	2.3 可想象，但不可见	034
	2.4 失乐园	039
●	第三章 迷雾重重	042
	3.1 追踪纠缠者	043
	3.2 实在通行证	047

3.3	玻尔之踵	050
第四章	坍缩之路	055
4.1	不确定的世界	055
4.2	测量问题	058
4.3	薛定谔猫的命运	061
4.4	多世界丛林	063
4.5	求助引力	070
4.6	构造新理论	072
第五章	超光速狂想曲	077
5.1	经典禁令	077
5.2	坍缩的同时性	082
5.3	失败的案例	085
5.4	量子禁令	089
5.5	不相容性疑难	091
5.6	检验基础	095
5.7	探寻绝对	098
5.8	禁令解除后的猜想	101
第六章	掷骰子的上帝	107
6.1	被冷落的非连续性	108
6.2	溯本求源	111
6.3	王者归来	116
6.4	粒子云	121
6.5	纠缠的图像	125
6.6	上帝的赌博	129
6.7	同一个世界	135

● 第七章 无用之学?	138
7.1 不可能的任务	138
7.2 纠缠制胜	140
7.3 隐形传态	145
7.4 计算天才	150
7.5 量子密码术	157
● 跋 爱因斯坦 2.0	161
● 附：量子信息研究的最新进展	167
● 推荐读物	178

引言

从伯特曼先生的袜子说起

物理学家贝尔有一位有趣的同事叫伯特曼，他有一个很奇怪的习惯。伯特曼喜欢穿两种不同颜色的袜子，并且每只脚上穿的袜子的颜色都是随意的。但是，两只袜子的颜色之间总存在一种关联。当看到他一只脚上穿的是粉红色的袜子时，便可以确定他另一只脚上的袜子不是粉红色，而不必去实际看一下。对于一只袜子的观察，可以立即得出关于另一只袜子的信息。然而，两只袜子之间是相互独立的，它们颜色的关联源于过去的一个共同原因，那就是伯特曼先生的决定。这种关联在宏观世界中司空见惯，没什么奇怪的。它是我们最熟悉的，也是完全可以理解的。

那么，宇宙万物之间的关联是否都是由过去的某个原因预先决定的呢？当两个粒子相互作用后分开很远时，它们之间还会存在关联和影响吗？别忘了，宇宙比我们所能想象的还要奇怪。

20 世纪 60 年代，贝尔发现，微观粒子之间存在着更为神秘的超光速关联。当测量一个粒子时，另一个与之关联的粒子会瞬时改变状态，无论它们相距多么遥远。尽管大多数人都宁愿看到世界平淡无奇（他们希望每天都有新鲜事发生），但这听起来还是有些天方夜谭。和我们一样，贝尔开始也不相信存在瞬时的超距作用。他设想微观粒子只是更小的小球，它们具有确定的性质，正如袜子具有确定的颜色一样，不论观察与否。而当两个小球相互作用后分开很远时，它们之间也不存在瞬时的关联和影响。当

测量一个粒子的状态时，这种测量影响只能以有限的小于等于光速的速度向外传播，并经过一定延时后才能到达另一个粒子。然而，让贝尔惊奇的是，由这些最自然不过的假设所导出的结论（一个简单的不等式）却与量子理论的预言相矛盾！推导中用到的逻辑和数学都是严格的，不会有问题；而量子理论是迄今为止人类关于自然的最基本的理论，它已经为大量实验所验证，也不应当怀疑。的确，物理学家们很快证实，贝尔不等式直接与实验结果相矛盾。因此，微观粒子之间确实存在某种超越时空的神秘纠缠，这种纠缠是伯特曼的袜子所不具有的。

贝尔的发现被认为是 20 世纪科学最深远的发现之一。它究竟意味着什么呢？它对我们关于世界的常识图像会产生剧烈的冲击吗？它对实在的本性又会有怎样深刻的蕴涵呢？本书将引领读者一起去探索这奇妙的量子纠缠世界。在那里，不确定性和超距作用将成为主角。

本书的第一章首先介绍量子纠缠问题的起源和它的神秘性所在。从爱因斯坦等人的 EPR 论证到薛定谔首次将纠缠引入物理学，从玻姆的 EPR 自旋版本到贝尔的不等式发现，用浅显的实例分析和形象化的图形说明引出微观粒子之间所存在的神秘纠缠。之后，概括性地列出了量子纠缠现象的诸多神秘性质，为全书后面的讨论奠定基础。

从第二章开始，详细介绍人们试图揭开量子纠缠之谜的各种努力。

第二章首先试图用人们最熟悉的经典图像来解释量子纠缠现象，这是爱因斯坦所选择的道路。本书讨论了已有论证所可能存在的逻辑和实验漏洞，并着重介绍了爱因斯坦的追随者玻姆所提出的隐变量理论。这些分析显示，牛顿和爱因斯坦所珍爱的经典世界已成为一个失落的世界，它不是真实的。

第三章介绍人们离开经典世界后理解量子现象的第一次努力，即玻尔的互补性思想。尽管这一思想曾经作为量子理论的正统观点，它实际上却是一团迷雾。这种观点本身的实证性决定了它的末路；它拒绝对现象背后的实在进行更深层次的探究，从而

也无法帮助我们理解量子纠缠的本质。

冲破互补性迷雾之后，第四章带领读者踏上真实的量子坍缩之路。以通俗易懂的语言介绍了量子理论对量子纠缠现象的描述和解释，不确定性在这里被清晰地展现出来。同时，通过薛定谔猫佯谬引出量子理论本身所存在的测量问题。为了解决这个难题，一些物理学家选择“捷径”进入多世界丛林，而清醒的人们则沿着完善量子理论的坍缩之路前行。尽管这条道路艰险而漫长，但是它通向真实的世界，只有在那里量子纠缠之谜才能被最终揭开。

第五章详细探讨了量子纠缠和量子坍缩所表现出的不可思议的超距作用，那是一首令人激动的超光速狂想曲。一方是相对论对超距作用的最严厉的禁令，另一方则是狂放不羁的量子坍缩的同时性。这引出了量子理论与相对论不相容的世纪难题。尽管目前的量子理论禁止超距作用表现出来，但它的存在本身已违背了相对论的精神。这一不相容性问题甚至被称为 20 世纪末物理学晴空中的一朵乌云。它预示了我们的时空观念将经历一次比相对论和量子理论更为深远的革命。为此，一些物理学家试图检验相对论的基础，并利用量子坍缩的规律去探寻自然的绝对性。一个更伟大的梦想是利用量子超距作用来实现真正的超距通信，这需要同时超越相对论和量子理论，其冒险性可见一斑。无论如何，思想的盛宴最终都要接受实验的真实性检验。

至此，量子纠缠世界的两大主角——不确定性和超距作用都已登场，但这一切究竟意味着什么呢？最终我们需要的是理解。尽管量子理论在实验证实和技术应用上获得了前所未有的成功，但是它一直以来都以不可思议和难以理解著称。可以说，它是人类所发现的科学理论中最成功的，同时也是最不可理解的理论。不用说普通读者，就是物理学家也大多止步于理解，而更关注于计算。

为此，第六章介绍了量子理论的一种新的理解，并给出了量子纠缠之谜的一个可能答案，那就是：这一切都是因为上帝掷骰子；不确定性和超距作用可能源于运动本身所固有的随机性和非连续性。这是一次思想的历险，其目的是要重新找回量子的

本性——非连续性。从久远的芝诺悖论到牛顿的惯性，我们在经典世界的底层出人意料地搜寻到非连续性存在的蛛丝马迹。真实的运动很可能不是连续的，而是根本上随机的、非连续的。这是一幅清晰的量子图像，它是不确定性、量子纠缠和超距作用这一切的始源，也是理解它们的基础。

为了避免实用主义者的责难，本书最后一章重点介绍了量子纠缠的奇妙应用。先通过两个有趣的例子让读者初步领略到量子纠缠的神奇能力；它可以完成逻辑上不可能完成的任务，也可以赢得最聪明的数学家都无法获胜的游戏。之后，从量子密码术到完全保密的量子通信，从量子计算机到未来的量子互联网，用通俗的语言和实例向读者展现了量子纠缠的各种令人激动的最新应用。实际上，基于量子纠缠，一门新的交叉学科——量子信息科学已经诞生。尽管很多研究目前仍处于实验阶段，我们有理由相信，量子信息时代即将到来。

爱因斯坦曾经说过，逻辑可以使你从 A 到达 B，而想象则可以带你到任何地方。然而，他自己怎么也不相信量子纠缠这种似乎与相对论相抵触的现象，并斥之为“幽灵般的超距作用”。但是，越来越多的实验都已经证实了量子纠缠现象的真实存在。为此，我们必须改变对实在本性的常识看法。尽管对于如何改变，人们至今仍争论不休，但一幅新的更为奇异的世界图景正呈现在我们眼前。让我们现在就步入奇妙的纠缠世界吧！

第一章 幽灵出世

Entanglement

提起纠缠，人们可能会立刻想到一团缠结的线绳，或是人与人之间复杂的关系。本书所要讲述的量子纠缠是微观世界中的一种物理现象，即奇妙有趣又神秘莫测。通俗地讲，它是某种类似心灵感应的现象，只不过纠缠的主体是微观粒子，而不是生活在宏观世界中的人。自然是极美的，而描述她的物理学当然不会枯燥无味。为了理解这种不可思议的纠缠现象，让我们先从它的源头说起。

1.1 EPR 密码

1935 年 5 月的一天早晨，爱因斯坦像往常一样准时来到普林斯顿高等研究院的办公室。他来普林斯顿小镇快两年了，已经熟悉并开始喜欢这个恬静的“世外桃源”。办公桌上放着他和助手波多尔斯基、罗森一起刚刚发表在《物理评论》上的论文。他拿起来看了看，脸上露

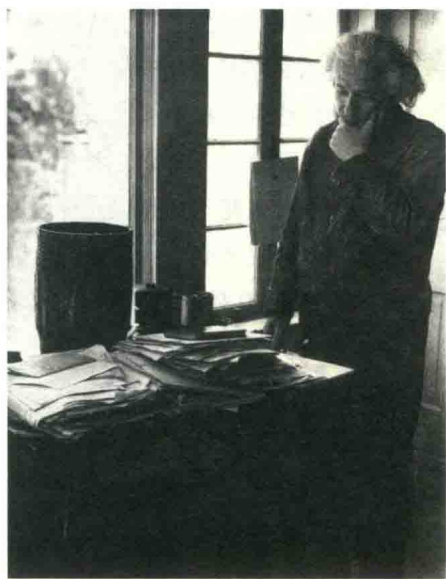


图 1.1 爱因斯坦



图 1.2 爱因斯坦和玻尔

出孩子般顽皮的微笑——这回他终于可以战胜老对手玻尔了。与此同时，在大西洋彼岸的哥本哈根大学玻尔研究所，爱因斯坦的文章立刻引起了物理学家玻尔的关注和不安。这对他来说简直是个晴天霹雳！玻尔立刻放下所有的工作，他说：“我们必须睡在问题上。”

爱因斯坦和玻尔是 20 世纪两位最伟大的物理学家，他们都为量子理论的建立做出了奠基性的贡献。然而，他们对于这个理论的含义却一直争论不休。这一争论被称为“关于物理学灵魂的论战”。不管这场争论的细节和结局如何，正是 1935 年这篇著名的 EPR 论文不经意间打

世纪之谜

EPR 论文发表之后，在物理学界引起了很大的反响。但是，人们起初并不理解 EPR 论文的精髓，而玻尔精心准备的反驳也有些所答非所问。物理学家薛定谔在给爱因斯坦的信中形象地描述了这一情况：“这就好像一个人说，‘芝加哥有点冷’；而另一个人回答说，‘那是一种错误的见解，佛罗里达非常热。’”爱因斯坦也回信抱怨道：

“几乎所有人都不从事实去看理论，而是从理论去看事实。他们不能从曾经接受的概念之网中解脱出来，而只是在其中以一种奇异的方式跳来跳去。”实际上，EPR 论文所揭示的是 20 世纪物理学的两大基石——相对论和量子理论之间存在着深刻的矛盾。简单地说，这两个理论至少有一个是错的，或者两者都有问题。爱因斯坦将这一矛盾称为悖论，它就是今天人们常说的 EPR 悖论。爱因斯坦既是相对论之父，又是量子理论的奠基人。他最了解这两个理论，当然也最清楚“鞋子究竟在哪里夹脚”。在爱因斯坦看来，答案是明显的，相对论是对的，而量子理论是错的，至少不完备。然而，上帝比爱因斯坦所能想象的还要狡黠。今天，相对论和量子理论的不相容性问题已成为当代物理学基础中的一个最大难题。我们将在第五章详细讨论这一世纪之谜。