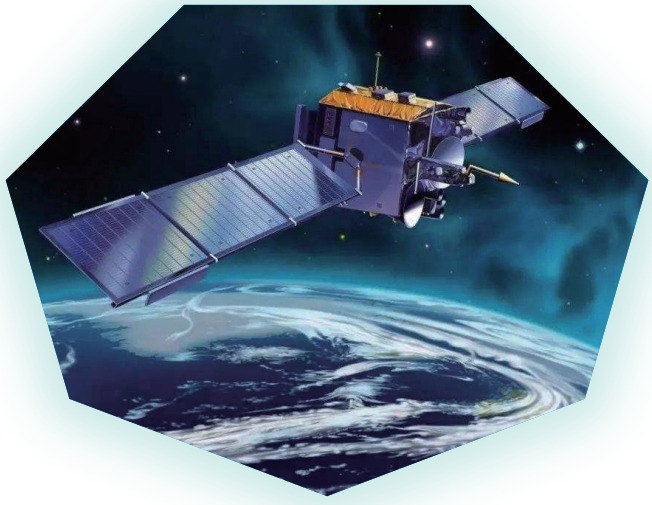
中国科技的梦想与荣光

量子通信

——世界信息科技的前沿阵地

李大光　翁永斌　著



河北出版传媒集团
河北科学技术出版社

图书在版编目（CIP）数据

量子通信 : 世界信息科技的前沿阵地 / 李大光， 翁永斌著. -- 石家庄 : 河北科学技术出版社， 2019.9

ISBN 978-7-5717-0050-8

Ⅰ. ①量… Ⅱ. ①李… ②翁… Ⅲ. ①量子力学—光通信—介绍—中国 Ⅳ. ①TN929.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第217312号

量子通信——世界信息科技的前沿阵地

李大光　翁永斌　著

出版　河北出版传媒集团　河北科学技术出版社

地址　石家庄市友谊北大街 330 号（邮编：050061）

经销　新华书店

印刷　北京兴星伟业印刷有限公司

开本　700 毫米 × 1000 毫米　1/16

印张　9.5

字数　120 000

版次　2020 年 4 月第 1 版

印次　2020 年 4 月第 1 次印刷

定价　35.00 元

序

中国科技在古代曾经灿烂辉煌，为人类文明做出过重大贡献。但是自明末之后，中国科技开始渐渐落后于西方。新中国成立之初，中国科技特别是高新技术领域几乎一穷二白，在极其困难的情况下，中国科技工作者发扬自力更生、艰苦奋斗精神，奋起直追。1964 年 10 月 16 日 15 时中国第一颗原子弹爆炸成功，1967 年 6 月 17 日 8 时中国第一颗氢弹空爆试验成功，1970 年 4 月 24 日 21 时中国第一颗人造卫星发射成功……以“两弹一星”为标志，中国开始了自身现代历史上第一次自主科技创新的历程。1978 年全国科学大会召开，中国迎来了“科学的春天”，在航空航天、超级计算机、海洋科学、超级工程、医药科技等众多领域取得了举世瞩目的成就。进入 21 世纪以来，我国科技发展突飞猛进，取得了一批引领世界的科技成果。正如习近平总书记在党的十九大报告中指出：“创新驱动发展战略大力实施，创新型国家建设成果丰硕，天宫、蛟龙、天眼、悟空、墨子、大飞机等重大科技成果相继问世。”一系列“叫得响、数得着”的科技成果，惊艳世界。这些科技成果既增强了我国综合国力，又为改善人民生活水平做出了重大贡献。

河北出版传媒集团领导高度重视宣传我国发展伟大成就，亲自谋划选题，指导河北科学技术出版社组织有关专家、科普作家编写了这套《中国科技的梦想与荣光》科普图书。这套书主要介绍了包括太空探索、北斗导航、中国天眼、量子通信、中国大飞机、深海探测、巨型计算机、中国高铁等近些年对中国乃至世界产生重大影响的科技成



果。在这套书中，读者在了解当代最前沿科学技术知识的同时，还会从中看到我国科学技术工作者“坚持、坚忍、坚韧”的可贵品格和“勤奋学习，自主创新”的精神；在生动有趣的科学故事中，读者可以了解到其中蕴含的科学思想、科学精神和科学方法，潜移默化中提高自己的科学素养；读者也会从科技工作者的勤奋、创新、拼搏和献身精神中受到鼓舞，并以更大的决心去迎接未来的挑战，为实现中华民族的伟大复兴而努力奋斗。

2019 年是新中国成立 70 周年，把新中国取得的科技成就宣传好，让更多的人了解中国科技发展历程，了解中国科学家艰苦奋斗、勇于创新的精神，在全社会形成爱科学、学科学、用科学的浓厚氛围，是一件很有意义的事情，我愿意向广大读者推荐这套科普图书。

中国工程院院士 

2019/9.

前 言

数千年来，人类一直依靠天生的直觉来认识自然界运行的原理。虽然这种方式让我们在很多方面误入歧途，譬如，曾一度坚信地球是平的，但从总体上来说，我们所得到的真理和知识，远远大过谬误。正是在这种虽缓慢、成效却十分积极的积累过程中，人们逐渐摸索总结出了运动定律、热力学原理等知识，自身所处的世界才变得不再那么神秘。于是，直觉的价值，更加得到肯定。但这一切，截止到量子力学的出现。

随着量子信息的飞速发展，量子走进人们的视野，量子科学受到越来越多的关注。近年来，量子信息技术方兴未艾，不少人认为人类正站在下一代量子革命的门槛上，量子力学正在催生变革性技术。20世纪物理学革命诞生了两大科学理论，即相对论和量子力学。作为物理世界的百岁“幽灵”，量子力学自1900年诞生以来催生了许多重大发明——原子弹、激光、晶体管、核磁共振、全球卫星定位等。带来这些成果的“第一次量子革命”改变了世界面貌，成为社会跨越发展的基石和动力。在21世纪，大家对量子信息非常感兴趣，这个领域主要的奠基和框架也来自100年前左右的理论发现和突破，主要是量子力学。2014年，英国《自然》杂志吹响“第二次量子革命”的号角。以量子信息技术为代表的量子调控，是量子力学的最新发展，带来了“二次革命”。这是一次巨大的飞跃，人类对量子世界的探索已从单纯“探测时代”走向主动“调控时代”，将在量子计算、量子通信、量子网络、量子仿真等领域实现突破，成为解决人类对能源、环境、信息等需求的重要手段。量子技术的确是一个很神奇的科学技术，它终究会给这个世界带来天翻地覆的变化。

量子理论被认为是继牛顿经典力学后，人类科学的颠覆性发现。与一个世纪之前人类刚刚涉足量子领域的时候相比，如今爱因斯坦的



观点似乎得到了更为广泛的共鸣。量子力学越是在数理上不断得到完美评分，就越显得我们的本能直觉竟如此粗陋不堪。人们不得不承认，虽然它看起来依然奇异而陌生，但是量子力学在过去的 100 年里，已经为人类带来了太多革命性的发明创造。正像詹姆斯·卡卡廖斯在《量子力学的奇妙故事》一书的引言中所述：“量子力学在哪？你不正沉浸于其中吗。”量子通信就使我们沉浸在量子力学之中。它是利用了光子等粒子的量子纠缠原理而产生的一种新式通信方式。量子信息学告诉人们，在微观世界里，不论两个粒子间距离多远，一个粒子的变化都会影响另一个粒子的现象叫量子纠缠，这一现象被爱因斯坦称为“诡异的互动性”。科学家认为，这是一种“神奇的力量”，可成为具有超级计算能力的量子计算机和量子保密系统的基础。量子通信是经典信息论和量子力学相结合的一门新兴交叉学科，与现在成熟的通信技术相比，量子通信具有巨大的优越性，具有保密性强、大容量、远距离传输等特点。量子通信不仅在军事、国防等领域具有重要的作用，而且会极大地促进国民经济的发展。

中国在量子技术开发上处于世界领先地位。在量子通信的国际赛跑中，中国属于后来者。经过多年的努力，中国已经跻身于国际一流的量子信息研究行列。在城域量子通信技术方面，建设完成了合肥、济南等规模化量子通信城域网及“京沪干线”大尺度光纤量子通信骨干网。2017 年成功在相距约 1200 千米的两个地面地点接收到从卫星发出的光子。2018 年还利用卫星实现了在中国和欧洲之间共享量子密码的钥匙信息。随着中国量子技术的普及，未来核心信息网络将用量子技术打造，由此而彻底解决基础设施的信息安全问题。量子卫星上天、量子计算云平台启动、“京沪干线”启航，在这场“第二次量子革命”中，微观世界的这些中国“探梦者”的创新步伐已经走在世界量子技术领域的前沿。

李大光

2019 年 8 月 1 日

目 录

一、量子科技与量子黑科技…… 1

量子、量子理论与量子力学 …… 1

量子理论 …… 8

量子技术及其黑科技 …… 17

当今世界量子技术发展现状 …… 28

二、量子技术给人类带来实惠… 36

量子技术在现实生活的应用 …… 36

量子技术在计算机领域的应用 …… 45

量子通信的发展与应用 … 52

三、没有“幽灵”的量子通信… 57

通信“绝对安全”的梦想 … 57

量子技术促进量子通信发展 …… 61

基于量子纠缠理论的量子通信 …… 66

量子通信对“棱镜门”说再见 …… 79

四、量子科学实验卫星…… 84

“墨子号”科学实验卫星 … 84

基于卫星的量子通信 …… 91

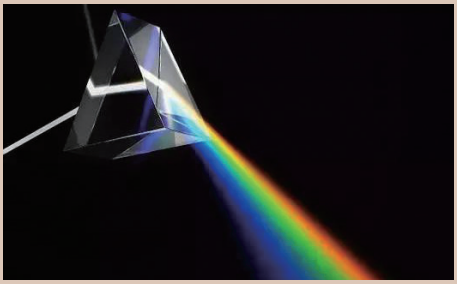
量子通信卫星的中国贡献 … 98

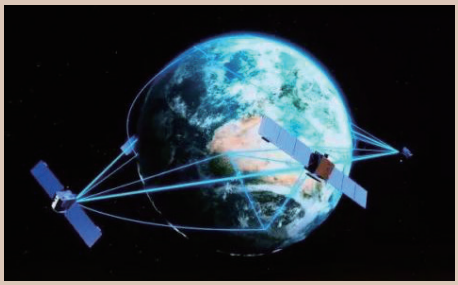
五、量子保密通信在民用领域用途广泛…… 105

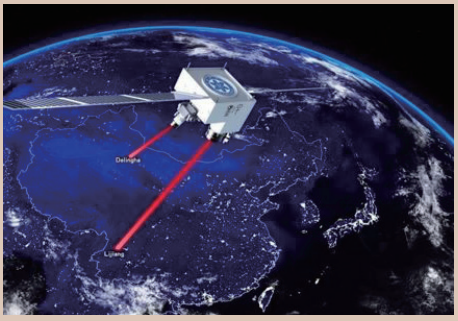
“京沪干线”开启量子通信时代 …… 105

量子通信在国民经济领域的应用 …… 112

量子通信行业化发展前景







广阔 …… 118

六、量子技术在军事领域大有可为…… 120

量子技术将颠覆未来战争 … 120

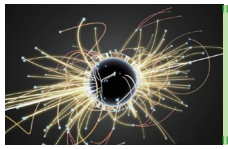
量子通信军事作用价值巨大 …… 127

国家信息安全的“终极武器” …… 131

量子通信的军事竞争日益激烈 …… 136

后记 …… 143





一、量子科技与量子黑科技

量子和量子科技是21世纪最尖端的科技。或许你认为量子力学距离你的生活很遥远，但这只不过是你的误解而已！事实上，我们如今应用的所有科技产品几乎都涉及量子力学。由于我们通常认为相对论是爱因斯坦一个人的成果，个人英雄主义的光辉形象让相对论深刻地扎根在人们的脑海中，这就导致了相对论的知名度大于量子力学。但事实上，量子力学在目前的科学应用方面远大于相对论。

量子、量子理论与量子力学

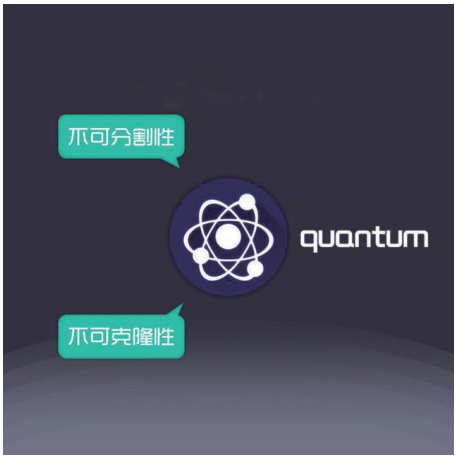
我们大家都知道，世间万物都是由基本的原子、电子等基本粒子构成。你或许经常听说，电子、原子、质子、中子等粒子，这些粒子就是构成我们宏观世界的最基本粒子。你或许听到“量子”二字几乎都是和量子力学、量子通信，或者量子纠缠连在一起的。但是“量子”到底是什么东西？它比电子、原子还小吗？

量子是什么

量子英文名称来自拉丁语quantus，意为“有多少”，代表“相当数量的某物质”。我们知道电磁波的传播粒子是光子，所以光子就是电磁波的量子，也就是光量子，简称光子。因为光子是构成电磁波的最基本的单位，所以就是量子。其实，量子是一个物理概念，并不是具体的实在粒子。任何物质都是由一个最基本、不可再分的单位构成，而这个最基本的单位就是这个物质的量子。可见，一个物理量如果存在最小的

不可分割的基本单位，则这个物理量是量子化的，并把最小单位称为量子。

通俗地说，量子是能表现出某物质或物理量特性的最小单元。在物理学中，按物理运动规律的不同，将遵从经典运动规律（牛顿力学、电磁场理论）的那些物质所构成的世界称为“经典世界”，将遵从量子力学规律的那类物质所构成的世界称为“量子世界”，量子就是量子世界中物质客体的总称。它既可以是光子、电子、原子、原子核、基本粒子等微观粒子，也可以是爱因斯坦凝聚（BEC）、超导体、“薛定谔猫”等宏观尺度下的量子系统，其共同特征就是必须遵从量子力学的规律。



量子是什么

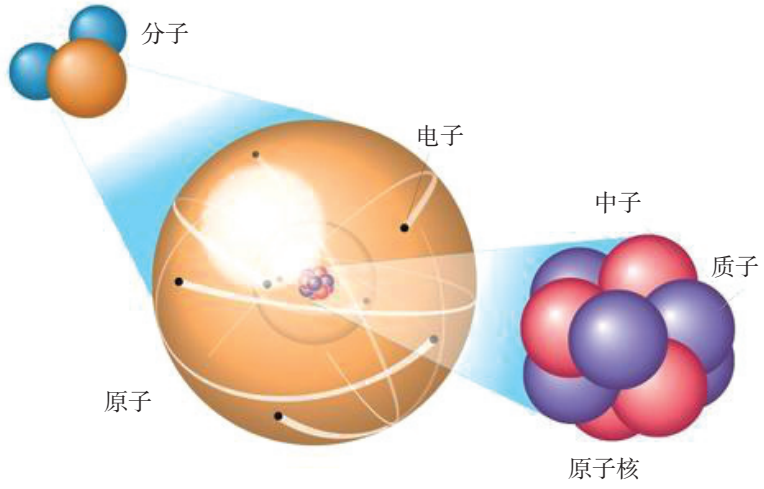
其实，量子又是一个数学概念，是能量、动量等物理量中最小的、不可分割的基本单位，为“相当数量的某物质”。量子这个数学概念的意思究竟是什么呢？就是“离散变化的最小单元”。什么叫“离散变化”？我们统计人数时，可以有一个人、两个人，但不可能有半个人、1/3 个人；我们上台阶时，只能上一个台阶、两个台阶，而不能上半个台阶、1/3 个台阶。这些就是“离散变化”。对于统计人数来说，一个人就是一个量子。对于上台阶来说，一个台阶就是一个量子。如果某个东西只能离散变化，我们就说它是“量子化”的。

跟“离散变化”相对的叫作“连续变化”。例如你在一段平路上，你可以走到 1 米的位置，也可以走到 1.1 米的位置，也可以走到 1.11 米的位置，如此等等，中间任何一个距离都可以走到，这就是“连续变化”。

显然，离散变化和连续变化在日常生活中都大量存在，这两个概念本身都很容易理解。

有的人可能会把量子和分子、原子、电子之类的物质混在一起，认为量子是比电子更小的物质，其实这是不正确的。实质上，两者是不同范畴的概念。按物质的构成来说，分子、原子、夸克等是构成物质的粒子；而在能量传播来说，量子是在能量传播过程中能量的发射和吸收的最小单元，它不是连续的，而是一份一份的，而且在实验中量子可以有多种形态，它可以是原子，也可以是光子，甚至是分子。这种“量子化”物理量的数值是离散的，而不是连续地任意取值。例如，在原子中，电子的能量是可量子化的。这决定了原子的稳定性和发射光谱等一般问题。因此，量子跟原子、电子根本不能比较大小，因为量子的本意是一个数学概念。正如“5”是一个数字，“3 个苹果”是一个实物，你问“5”和“3 个苹果”哪个大，这让人怎么回答？正确的回答只能是：它们不是同一范畴的概念，你该怎样比较它们的大小？两者没有可比性。

量子与分子的区别。量子是统筹的范围，分子却是单个的概



分子、原子结构

念。换句话说，原子、电子、质子、中子等这些物质本身就是粒子，而量子却对应着不同的粒子。例如，光是由许多光子组成的，所以光子其实就是光的量子；阴极射线是由一系列电子组成的，因此电子就是阴极射线的量子。

量子概念的提出

量子概念的提出很有意思，一开始普朗克发现了黑体辐射的不连续性不能通过经典力学来解释。在经典物理学中，根据能量均分定理：能量是连续变化的，可以取任意值。19 世纪后期，科学家们发现很多物理现象无法用经典理论解释。当时德国物理界聚焦于黑体辐射问题的研究，就是一个完全黑的东西，这个完全黑的东西会吸收一切光线。但是科学家发现，光被黑体吸收不是连续的。因为人们一开始不知道光是由光子构成的，所以认为黑体吸收光线应该是连续的。但是实验数据却表明，黑体吸收光线是一份一份的，并不是连续的。

1900 年左右，M · 普朗克试图解决黑体辐射问题，他大胆提出量子假设，并得出了沿用至今的普朗克辐射定律。普朗克提出：像原子作为一切物质的构成单位一样，“能量子”（量子）是能量的最小单位。物体吸收或发射电磁辐射，只能以能量量子的方式进行。普朗克在 1900 年 12 月 14 日的德国物理学学会中第一次发表能量量子化数值、一个分子摩尔（mol）的数值及基本电荷等。其数值比以前更准确，提出的理论也成功解决了黑体辐射的



普朗克

问题，标志着量子力学的诞生。

第一个意识到量子概念的普遍意义并将其运用到其他问题上的是爱因斯坦。他建立了光量子理论解释光电效应中出现的新现象。光量子论的提出使光的性质的历史争论进入了一个新的阶段。自牛顿以来，光的微粒说和波动说此起彼伏，爱因斯坦的理论重新肯定了微粒说和波动说对于描述光的行为的意义，它们均反映了光的本质的一个侧面：光有时表现出波动性，有时表现出粒子性，但它既非经典的粒子也非经典的波，这就是光的波粒二象性。主要由于爱因斯坦的工作，使量子论在提出之后的最初十年里得以进一步发展。

之后的爱因斯坦推广了量子化概念，认为一束光是一个个光子构成的，并且一份份地被黑体吸收。爱因斯坦继承了普朗克的量子概念，并成功解释了光电效应。黑体吸收光线之所以不是连续的，是因为光子是一个个具体的实在粒子，所以它们会一份份地被黑体吸收。黑体辐射的不连续性，就体现在光是由光量子（光子）构成的。1905 年，德国物理学家爱因斯坦把量子概念引进光的传播过程，提出“光量子”（光子）的概念，并提出光同时具有波动和粒子的性质，即光的“波粒二象性”。

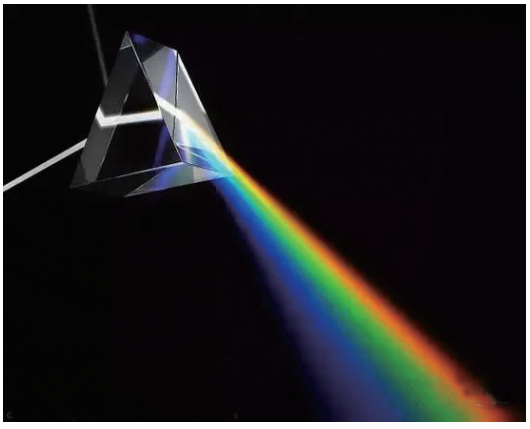
量子假设的提出有力地冲击了经典物理学，促进物理学进入微观层面，奠基现代物理学。20 世纪 20 年代，法国物理学家德布罗意提出“物质波”概念，即一切物质粒子均具备波粒二象性；德国物理学家海森堡等人建立了量子矩阵力学；奥地利物理学家薛定谔建立了量子波动力学。量子理论的发展进入了量子力学阶段。1928 年，英国物理学家狄拉克完成了矩阵力学和波动力学之间的数学等价证明，对量子力学理论进行了系统的总结，并将两大理论体系——相对论和量子力学成功地结合起来，揭开了量子场论的序幕。

量子假说与物理学界几百年来信奉的“自然界无跳跃”直接矛盾，因此量子理论出现后，许多物理学家不予接受。普朗克本人也十分动摇，

后悔当初的大胆举动，甚至放弃了量子论，继续用能量的连续变化来解决辐射的问题。但是，历史已经将量子论推上了物理学新纪元的开路先锋的位置，量子论的发展已是锐不可当。

量子的波粒二象性

量子物体（如光子和电子）具有分裂的个性——有时它们的行为像波，有时又像粒子。它们的表现取决于你设计实验时，是以波还是粒子来看待它们。例如，我们知道，粒子的运动是有轨迹的，而波的特点是在整个空间弥漫，没有确定的轨迹。当你把量子物体当作粒子看待（如用粒子探测器探测它），想知道它的运动轨迹，那它就表现得像个粒子。假如你在设计实验的时候，想看看它的波的特性，如干涉、衍射等，它就表现出波的特性。



波粒二象性

在量子力学中有一个著名的双狭缝实验。它之所以著名，是因为展示了量子的许多奇怪特征。下面我们就以它为例子来谈谈。假如你在一个水池里设置一个有两条竖直狭缝的屏障，然后用手指蘸一下水产生水波，水波会穿过两条狭缝。穿过两狭缝的水波会在屏障后面互相干涉，形成一个干涉图案。如果你把屏障从水里拿出，朝狭缝发射一堆子弹，它们就会直接穿过这条或那条狭缝，在屏障后留下两条分明的弹痕，而不会产生干涉图案。这是经典的波和粒子在双狭缝实验中的表现。但诡异的是，微观粒子譬如电子，可以同时表现出两者。

假如你朝狭缝发射电子，甚至像发射子弹一样控制好，一次发射一个，起初屏障后面开始形成两条明显的“弹痕”，说明电子表现得像粒子；但随着你发射的电子渐多，弹痕也渐渐模糊起来，最后竟然在屏幕上显示出明暗相间的干涉图案，这时它又表现得像波了，好像每个电子同时穿过了两条狭缝，并与自身干涉。

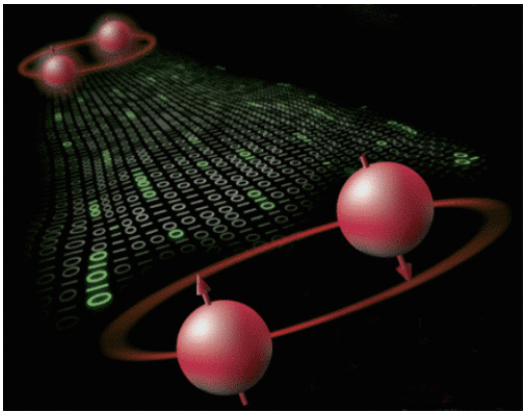
按照不确定性原理，可以这样解释：因为电子是一个量子物体，我们不能确切地知道它的位置。电子有机会穿过一条狭缝，也有机会穿过另一条狭缝——因为两者都是可能的，所以它实际上同时经历了两个过程。换句话说，确实是每个电子同时穿过了两条狭缝，并与自身干涉。

假如你在两狭缝边上各放置一个粒子探测器，来观察电子到底穿过了哪条狭缝。你的意图可以得逞，比如电子击中探测器的探头，不断发出明亮的闪烁。但是，等你把头探到屏障后面，就会发现干涉图案竟然消失不见了，只留下像弹痕一样的两条直截分明的狭缝投影。

按前面的解释，这是因为你知道了电子穿过哪个狭缝之后，它不再处于叠加态，所以只能选择一条路径，通过一条狭缝。电子的波动行为消失了，表现得完全像粒子。如果你对上述解释还感到头疼，那么请想一想这个事实，或许多少受些安慰：物理学家其实也不太能接受这样的解释，他们一直都在为这个明显的悖论想破脑壳。

量子的“特异功能”

量子有一项“特异功能”，那就是不可测量。这就是海森堡的测不准原理。量子一直处于飞速运动状态，如果科学家用工具控制它、非要它停下来对它进行观察和测量，它就会改变原来的属性。量子的这种“特异功能”，让科学家们看到了量子通信的无量前途——几乎零损耗、零延时的超快速度；绝佳的保密性能——光是这两点，就远远超越传统通信。近 20 多年来，在各国科学家的共同努力下，量子通信技术已取得



测不准原理是量子力学的基础

了多项突破性进展。

量子理论

量子理论与相对论并称为现代物理学的两大基石。量子理论为人们从微观层面理解宏观现象提供了理论基础，为人们提供了新的关于自然界的观察、思考和表述方法。量子论揭示了微观物质世界的基本规律，为原子物理学、固体物理学、核物理学、粒子物理学以及现代信息技术奠定了理论基础。它能很好地解释原子结构、原子光谱的规律性、化学元素的性质、光的吸收与辐射、粒子的无限可分和信息携带等。尤其它的开放性和不确定性，启发人类更多的发现和创造。

量子理论是量子物理学范畴。量子物理学是研究微观粒子运动规律的学科，是研究原子、分子以至原子核和基本粒子的结构和性质的基本理论。

量子理论的突破首先出现在黑体辐射能量密度随频率的分布规律上。1900 年 10 月，由于普朗克解释黑体辐射现象，将维恩定律加以改良，又将玻尔兹曼熵公式重新诠释，得出了一个与实验数据完全吻合的普朗克公式来描述黑体辐射。普朗克提出能与观测结果很好地符合的简单公式，实验物理学家相信其中必定蕴藏着一个尚未被揭示出来的科学原理。

普朗克发现，如作以下假定则可从理论上导出其黑体辐射公式：对于一定频率 ν 的辐射，物体只能以 $h\nu$ 为能量单位吸收或发射它，h 称为普朗克常数。换言之，物体吸收或发射电磁辐射，只能以量子的方式进行，每个量子的能量为 $E=h\nu$，称为作用量子。

从经典力学来看，能量不连续的概念是绝对不允许的。但是在诠释这个公式时，通过将物体中的原子看作微小的量子谐振子，不得不假设这些量子谐振子的总能量不是连续的，即总能量只能是离散的数值（经典物理学的观点恰好相反）。普朗克进一步假设单独量子谐振子吸收和放射的辐射能是量子化的，这一观点严重地冲击了经典物理学。量子理论涉及物质运动形式和运动规律的根本变革。

首先注意到量子假设有可能解决经典物理学所碰到的其他疑难问题的是爱因斯坦。他试图用量子假设去说明光电效应中碰到的疑难问题，提出了光量子概念，认为辐射场就是由光量子组成。每一个光量子的能量 E 与辐射的频率 ν 的关系是 $E=h\nu$。采用光量子概念之后，光电效应中出现的疑难问题随即迎刃而解。至此普朗克提出的能量不连续的概念，才逐渐引起物理学家的注意。就这样，一位谨慎的物理学家普朗克掀起了 20 世纪初量子物理学革命的帷幕。

1923 年，法国物理学家德布罗意提出了“物质波”假说，将波粒二象性运用于电子之类的粒子束，把量子理论发展到一个新的高度。1925—1926 年，薛定谔率先沿着物质波概念成功地确立了电子的波动方程，为量子理论找到了一个基本公式，并由此创建了波动力学。

几乎与薛定谔同时，海森堡写出了以“关于运动学和力学关系的量子理论的重新解释”为题的论文，创立了解决量子波动理论的矩阵方法。1925 年 9 月，玻恩与另一位物理学家约丹合作，将海森堡的思想发展成为系统的矩阵力学理论。不久，狄拉克改进了矩阵力学的数学形式，使其成为一个概念完整、逻辑自洽的理论体系。

1926 年薛定谔发现波动力学和矩阵力学从数学上是完全等价的，由此统称为量子力学，而薛定谔的波动方程由于比海森堡的矩阵更易理解，成为量子力学的基本方程。1928 年，狄拉克将相对论运用于量子力学，又经海森堡、泡利等人的发展，形成了量子电动力学，量子电动



力学研究的是电磁场与带电粒子的相互作用。

“上帝会不会掷骰子”

量子理论如今已经经过了百年的风风雨雨，但它的发展还远没有终结，路途如此坎坷，甚至让人觉得到了一种“山重水复疑无路”的地步。量子理论的发展也不像牛顿力学、相对论那样，很快就得到了认可，并成为一个相对完善的理论。而量子理论，在发展的道路上虽然奇景不断，但从它曲折的发展历史上看，量子理论的每一个分支总是越走越艰难。至今，新的流派和分支还在不断地出现。也许“上帝”为人类设置了最后一道不可逾越的机关，这是人类认识的极限，是认识中的“量子”，最终人类无法超越它，人类也就最终不能穷尽大自然的奥秘，永远无法看到“上帝”他老人家的真实面孔。

量子力学

量子理论的提出严重地冲击了古典物理学。20 世纪早期，法国物理学家德布罗意在普朗克—爱因斯坦的光量子论和玻尔的原子论的启发下建立了量子力学理论。量子力学在现代科学技术中的多个领域中均有应用和突出贡献，而量子通信技术也是基于量子力学发展而来的，对未来科学技术和文明的进步具有重要意义。

量子力学的源起

量子力学（Quantum Mechanics），为物理学理论，是研究物质世界微观粒子运动规律的物理学分支，主要研究原子、分子、凝聚态物质，以及原子核和基本粒子的结构、性质的基础理论。作为研究微观世界的一门科学理论，量子力学与相对论一起构成现代物理学的理论基础。量子力学不仅是现代物理学的基础理论之一，而且在化学等学科和许多近代技术中得到广泛应用。

19 世纪末，经典力学和经典电动力学在描述微观系统时的不足越



一张传说中集中了地球上三分之一智慧的照片

来越明显。量子力学是在20世纪初由马克斯·普朗克、尼尔斯·玻尔、沃纳·海森堡、埃尔温·薛定谔、沃尔夫冈·泡利、路易·德布罗意、马克斯·玻恩、恩里科·费米、保罗·狄拉克、阿尔伯特·爱因斯坦、康普顿等一大批物理学家共同创立的。量子力学是区别于经典力学、相对论（宏观低速、高速世界），研究微观量子世界的一门物理学分支。

量子力学的起源是在1900年，德国科学家普朗克在研究“黑体辐射”问题时，发现必须把辐射携带的能量当作离散变化的，才能推出跟实验一致的公式。1905年，爱因斯坦引进光量子（光子）的概念，并给出了光子的能量、动量与辐射的频率和波长的关系，成功地解释了光电效应。其后，他又提出固体的振动能量也是量子化的，从而解释了低温下固体比热问题。1913年，玻尔在卢瑟福原有核原子模型的基础上建立起原子的量子理论。按照这个理论，原子中的电子只能在分立的轨道上运动，在轨道上运动的时候电子既不吸收能量，也不放出能量。原子具有确定的能量，它所处的这种状态叫“定态”，而且原子只有从一个定态到另一个定态，才能吸收或辐射能量。这个理论虽然有许多成功之处，但是对于进一步解释实验现象还有许多困难。



自从普朗克提出量子这一概念以来，经爱因斯坦、玻尔、德布罗意、海森堡、薛定谔、狄拉克、玻恩等人的完善，提出了一个又一个新概念，一步一步扩展了量子力学的应用范围。到 1930 年，被绝大多数物理学家视为理解和描述自然基本理论的量子力学理论大厦基本建立起来，能够对微观世界的大部分现象做出定量描述了。

量子力学是研究原子、分子以至原子核和基本粒子的结构和性质的基本理论，是近代物理的基础理论之一。20 世纪前的经典物理学只适于描述一般宏观条件下物质的运动，而对于微观世界（原子和亚原子世界）和一定条件下的某些宏观现象则只有在量子力学的基础上才能说明。另一方面，物质属性及其微观结构只有在量子力学的基础上才能得以解释。所有涉及物质属性和微观结构的问题，无不以量子力学作为理论基础。

量子力学就是在克服早期量子理论的困难和局限性中建立起来的。在普朗克—爱因斯坦的光量子论和玻尔的原子论的启发下，法国物理学家 L. 德布罗意分析了光的微粒说与波动说的发展历史，并注意到几何光学与经典粒子力学的相似性，根据类比方法设想实物（静质量 $m \neq 0$ 的）粒子也和光一样，具有波粒二象性，且这两方面必有类似的关系相联系，而普朗克常数必定出现在其中。他假定与一定能量 E 和动量 p 的实物粒子相联系的波（称为“物质波”）的频率和波长分别为 $\nu = E/h$，$\lambda = h/p$，称为德布罗意关系式。他提出这个假定一方面是企图把作为物质存在的两种形式（光和 $m \neq 0$ 的实物粒子）统一起来；另一方面亦是为了更深入地理解微观粒子能量的不连续性，以克服玻尔理论带有人为性质的缺陷。德布罗意把原子定态与驻波联系起来，即把束缚运动实物粒子的能量量子化与有限空间中驻波的波长（或频率）的离散性联系起来。

量子力学的发展

奥地利物理学家 E. 薛定谔注意到了德布罗意的工作，1926 年初他

提出了一个波动方程——薛定谔方程，是含波动函数对空间坐标的二阶微商的偏微分方程。薛定谔把原子的离散能级与微分方程在一定的边界条件下的本征值问题联系起来，成功说明了氢原子、谐振子等的能级和光谱的规律。1927 年，W. 海森堡提出了微观领域里的不确定性关系，他认为任何一个粒子的位置和动量不可能同时准确测量，要准确测量其中的一个，另一个就将是不确定的，这就是所谓的“不确定性原理”（也称“测不准原理”）。它和玻恩的波函数概率解释一起，奠定了量子力学诠释的物理基础。

几乎与此同时，W. 海森堡与 M. 玻恩和 E. 约当建立了矩阵力学。矩阵力学的提出，与玻尔的量子论有很密切的关系，特别是玻尔的对应原理思想对海森堡有重要影响。它继承了量子论中合理的内核（如原子的离散能级和定态、量子跃迁、频率条件等概念），同时又摒弃了一些没有实验根据的传统概念（如粒子轨道运动的概念）。海森堡特别强调，任何物理理论中只应出现可观测的物理量（如光谱线的波长、光谱项、量子数、谱线强度等）。矩阵力学中赋予每一个物理量（如粒子的坐标、动量、能量等）以一个矩阵，它们的代数运算规则与经典物理量不同，两个量的乘积一般不满足交换律。不久薛定谔就发现矩阵力学和波动力学是完全等价的。紧接着 P. 狄拉克和 E. 约当提出一种称为变换理论的更普遍的形式，指出矩阵力学和波动力学只不过是量子力学规律的无限多种表述形式中的两种。

现代物理学的“异端”

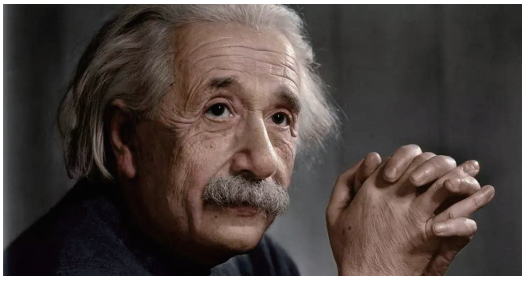
诺贝尔物理学奖获得者、丹麦物理学家 L. 玻尔曾说：“没有被量子理论震惊的人，就没有理解它。”1925 年，物理学上一个新理论横空出世，这一理论以惊人的速度推翻了传统物理学长期以来一直持有的关于物质的观念。它几乎毫不费力地解决了几个世纪以来许多长期存在

的、难倒了无数物理学家的根本问题——什么是物质？是什么使它结合在一起？为什么物质会以无穷多样的形式出现，如气体、金属、岩石、液态、水晶、陶瓷、闪电和星星等？

量子力学从根本上改变人类对物质结构及其相互作用的理解。早在19世纪20年代，一些科学家还对“原子的存在”持有严重的保留意见。他们对在实验室中不能被看到或者不能被直接测量的东西嗤之以鼻，认为那些不可见的、不可测量的东西不具有存在性。在1925年到1926年间，E. 薛定谔、W. 海森堡和其他几位科学家已经提出了一个完整的对氢原子的数学描述，这些描述具有惊人的精确度，它们可以从纯数学的角度解释氢原子的所有性质。

1930年，量子物理学家P. 狄拉克宣布：化学中的一切东西都可以从量子力学中推导出来，只要有足够的时间，量子力学可以推导出宇宙中所有物质的化学性质。自此以后，化学不再是一门基础学科，它实质上已成为一门“应用物理学”。量子理论在这一阶段迅速崛起，它不仅明确解释了原子世界的奇异属性，同时也使得爱因斯坦的工作成就黯然失色了几十年，甚至连爱因斯坦本人当时也承认，自己是一个“老古董”。可以这样说，当时很多物理学家视量子力学为物理学中的“异端”。

事实上，在几乎所有的层面上，量子理论都站在了爱因斯坦理论的反面。爱因斯坦的广义相对论是一种宏观宇宙理论，它通过时空结构将星系、恒星和行星联系起来，根本上它是一种几何宇宙理论。与此比较，量子理论是一种微观宇宙理论，在这个“微观宇宙”中，亚原子粒子被“类粒子力”聚在一起，原子由原子核



爱因斯坦

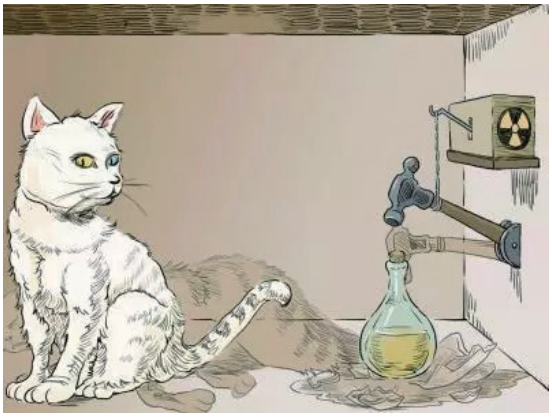
和围绕原子核旋转的电子组成，原子核又由中子和质子组成，所有大约100种不同类型的原子或元素构成了我们已知的所有物质形式。

归纳起来，量子理论和爱因斯坦的几何宇宙理论之间的主要区别有如下几点，这也是量子理论大体上具有的几种特性：一是力是由被称为“量子”的离散的能量包交换产生的。二是不同的力是由不同的量子交换产生的。三是我们绝不可能同时知道亚原子粒子的速度和位置（测不准原理）。四是粒子可以有一个有限的概率，“遂穿”或者通过“量子飞跃”穿透障碍。量子理论中的很多特性已经在实验中证实了以上四点。比如，W介子、π介子已经在原子加速器实验的碎片中发现了；再比如成功印证了“测不准原理”的“双缝实验”以及成功演示量子“遂穿”的实验等。

当然，关于量子力学目前还存在很多争论，斥之荒谬的也有，说它是伪科学的也有。但是，如果量子理论是不正确的，那么所有的电子器件，包括电视机、计算机、收音机等将会停止工作。另外，根据“麦克斯韦方程”，在原子中旋转的电子应该在微秒内失去能量跌入原子核，那么也就不存在构成我们身体的原子（当然也就不存在我们），而量子理论解释了是什么阻止了原子的崩溃。因此，我们存在的事实就是量子力学正确性的活生生的证明。

叠加态和薛定谔的猫

量子力学有多难懂，看看这只出名的猫就知道了。想象一只猫和一小瓶氰化物被放置在一个密闭的盒子里。瓶子上方有一把用电子开关控制着的锤子。如果开关被随机发生的量子事件（例如铀原子的衰变）触发，锤子就会砸下来，把盛有氰化物的瓶子砸碎，猫就会一命呜呼。这个由奥地利物理学家薛定谔1935年设想的思想实验，是用来说明叠加态的概念的。



薛定谔猫

这只悲催的猫被赋予了量子世界的特异功能——量子叠加，在这猫身上，宏观世界的因果律业已坍塌，只剩下一连串的概率波。所以，在被观测之前，这猫都是既死又活、生死叠加。铀原子的衰变遵循量子规律，所以它的波函数有两个解：衰变或不衰变。根据量子理论，在进行测量之前，这两种可能性都是存在的。事实上你可以认为，在测量之前，铀原子同时衰变又不衰变，处于两者的叠加态之中。因为猫的命运维系于铀原子的衰变情况，所以你不得不承认，当铀原子处于衰变和不衰变的叠加态时，猫也将处于一种活和死的叠加态。即是说，在我们打开箱子观察之前，这只猫处于既死又活的状态。

尽管从未见过行走于生死边界的猫，但实验室的科学家却异口同声地证实他们见过薛定谔之猫的幽灵，你想象不出它活着的样子，但它却实际存在。有了微观世界的真实发现，又有团队谋划着把薛定谔之猫彻底带到宏观世界，挑战量子世界的边界。可迄今为止，量子理论尽管取得了伟大成就，但它仍然是物理帝国的一团乌云。也许，只有这两个世界真正携手的那一天，薛定谔之猫才能好好地安睡于天堂。

叠加态是量子计算机的基础。传统的计算机只对 0 和 1 操作。1 比特的信息，就是 0 或 1。但是量子计算机直接对 1 量子比特进行操作，而 1 量子比特是 0 和 1 两种状态的任意叠加，这种叠加形式几乎是无限的。这正是量子计算机与传统计算机的运行速度不可同日而语的原因。

量子技术及其黑科技

量子技术在工业领域的应用前景也十分美好。科学家认为，量子力学理论将对电子工业产生重大影响，是物理学一个尚未开发而又具有广阔前景的新领域。时下半导体的微型化已接近极限，如果再小下去，微电子技术的理论就会显得无能为力，必须依靠量子结构理论。

什么叫作量子技术

一般而言，从技术本身（实际上是经典技术）来看，我们把技术的要素主要分为经验性要素、实体性要素与知识性要素。技术是由这三类要素相互作用生成的。经验性要素主要是经验、技能等这些主观性的技术要素，主要强调技术具有实践性。实体性要素主要以生产工具、设备为主要标志，主要强调技术具有直接变革物质世界的能力，变革天然自然、人工自然或技术人工物。知识性要素主要是以技术知识为标志，强调现代技术受技术理论和科学的技术应用的直接影响。

其实，量子技术也包括这三类要素，量子经验性要素、量子实体性要素和量子知识性要素。量子经验性要素表明量子技术的使用也需要有人的经验的积累，但它并不构成量子技术的主要性要素，这一要素的作用可以忽略。量子实体性要素是量子知识性要素的载体，表现为量子技术人工物（量子技术客体）。量子知识性要素主要是指量子技术是量子力学和量子信息论等量子理论的应用。没有量子理论就不可能有量子技术，也不可能凭宏观的技术经验发明出量子技术人工物。激光器、晶体管与扫描隧道显微镜等，它们都是量子理论的直接或间接的发明物，量子信息技术更是量子理论的产物。因此，量子技术必定是量子理论的应用。

实际上，量子技术已正在形成相当大的一个高技术群。道林（Jonathan P. Dowling）和密尔本（Gerard J. Milburn）在《量子技术：第二次量子革命》



中，将量子技术分为五大类：量子信息技术、量子电机系统、相干量子电动学、量子光学和相干物质技术。量子信息技术包括量子算法、量子密码学、量子信息论；量子电机系统包括单自旋磁力共振显微镜方法；相干量子电动学包括超导量子电路、量子光子学、自旋学、分子相关量子电子学、固态量子计算机；量子光学包括量子光学干涉仪、量子微影术和显微镜方法、光子压缩、非相互作用成像、量子隐形传态；相干物质技术包括原子光学、量子原子引力梯度测量仪、原子激光。这里的分类中，也有交叉，比如，量子隐形传态不仅可以用光子偏振等实现，也可以利用原子等微观粒子的性质来实现，量子隐形传态可以归入量子信息技术之中。比如，戴葵等在《量子信息技术引论》中，将隐形传态归入量子信息技术。通常的技术是经典技术，它能够在经典力学的框架中得到理解。

对于量子技术来说，有两种力学推动它的产生：一是从实践上来看，技术创新推动器件的小型化，最终这些器件将在长度上到达纳米尺度，在作用量上到达普朗克常数的尺度。按照莫尔定律，计算机芯片的集成度每 18 个月将翻一番。当集成电路线宽小于 0.1 微米时，量子效应开始影响电子的正常运动，解决问题的一种途径只能利用量子力学理论来解决。二是从更基础的意义上看，量子力学的原理给我们在经典的框架内改进器件的性能提供了可能。如果以普朗克为代表的起始于 20 世纪初的第一次量子革命，主要是检验量子力学是否正确和完备，仅有少量的基于量子力学的量子技术产品的问世，那么，第二次量子革命起始于 20 世纪末，通过利用量子力学的有关规律和原理，发展新的量子技术。量子技术在于利用量子科学的规律来组织和控制微观复杂系统的组成。显然，量子技术就是量子科学的应用。

于是，我们可以作如下的界定：量子技术就是建立在量子力学和量子信息论基础之上的新型技术。没有量子理论就不可能有量子技术，也