

En 纠缠态 物理世界第一谜 tanglement

THE GREATEST

[美] 阿米尔·艾克塞尔(Amir D. Aczel) 著
庄星来 译



上海科学技术文献出版社

科学图书馆

科学新文献

En

纠缠态

物理世界第一谜

[美]阿米尔·艾克塞尔(Amir D.Aczel) 著 庄星来 译



上海科学技术文献出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

纠缠态: 物理世界第一谜/(美)阿米尔·艾克塞尔著; 庄星来译.
—上海:上海科学技术文献出版社, 2011. 1
ISBN 978-7-5439-4647-7

I. ①纠… II ①阿… ②庄… III. ①物理学—普及
读物 IV. ①04-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第255655号

Entanglement

Copyright © 2001 Amir D. Aczel

Copyright licensed by Four Walls Eight Windows, part of the Avalon Publishing
Group

This edition arranged with Andrew Nurnberg Associates International Limited
Copyright in the Chinese language translation (Simplified character rights only) ©
2008 Shanghai Scientific & Technological Literature Publishing House

All Rights Reserved

版权所有, 翻印必究

图字: 09-2006-785

责任编辑: 张 树 李 莺

美术编辑: 徐 利

纠 缠 态

——物理世界第一谜

[美]阿米尔·艾克塞尔(Amir D. Aczel) 著

庄星来 译

*

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市长乐路746号 邮政编码200040)

全 国 新 华 书 店 经 销

江 苏 常 熟 市 人 民 印 刷 厂 印 刷

*

开本740X970 1/16 印张10.25 字数183 000

2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5439-4647-7

定价: 25.00元

<http://www.sstlp.com>

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——但是这两种性质从来不能同时被表现出来。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那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英里,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所赖以生存的空间,数学家们称那个世界为“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，而这一象本身又是由量子体系的数学分析中推导出来的。

海森堡 1972 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,决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”是奇特的量子理论的最诡异的一个方面;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”。

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个一个世纪。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。

目 录

前言	1
敬告读者	1
第一章 神秘的和谐力	1
第二章 序幕	4
第三章 托马斯·杨的实验	9
第四章 普朗克常量	16
第五章 哥本哈根学派	20
第六章 德布罗意导波	26
第七章 薛定谔和他的方程	30
第八章 海森堡的显微镜	39
第九章 惠勒的猫	44
第十章 匈牙利数学家	51
第十一章 爱因斯坦登场	56
第十二章 波姆与阿哈朗诺夫	67
第十三章 约翰·贝尔的定理	78
第十四章 克劳瑟、霍恩、西摩尼的梦	84
第十五章 阿莱恩·阿斯派克特	99
第十六章 激 光 枪	107
第十七章 三粒子纠缠	114
第十八章 十千米实验	132
第十九章 隐形传态：“斯科特，开始传送！”	135
第二十章 量子魔术：这一切究竟说明了什么？	139
致谢	142
注解	146
参考文献	148

第一章

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,老实地拿他的博士学位,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深奥的论文。

日内瓦。尼古拉斯·吉辛(Nicholas Gisin)结识了约翰·贝尔,研读了他的论文,也在琢磨贝尔提出的问题。他也在争先恐后地探索同一个至关重要的问题:这个问题会对实在的本质带来深刻的启发。贝尔理论根植于人类对物理世界的探究,它将爱因斯坦 35 年之前提出的论点重新发掘出来。要真正理解这些深奥的思想,我们必须回到过去。

第二章

序 幕

“这无边的寰宇存在已久，它独立于我们人类，像一个巨大的永恒的谜在我们眼前铺展，但其中至少有一部分是我们考察的。”

——阿尔伯特·爱因斯坦

“量子力学的数学表达并不复杂，然而要将数学表达同物理世界的直观描述联系起来却十分困难。”

——Claude N. Cohen-Tannoudji

《圣经·创世记》中写道：“上帝说：要有光。就有了光。”接着上帝又创造了天地以及其间的万物。人类对光和物质的探索可以追溯到文明的起源；光和物质是人类生存体验中最基本的组成部分。爱因斯坦告诉我们，它们两者的本质是相同的：光和物质都是能量的存在形式。人们一直都想了解这些不同的能量形式是怎么一回事。物质的本质是什么？光又是什么？

古埃及人和古巴比伦人，以及他们的后继者：腓尼基人和希腊人，都曾试图了解物质、光、视觉图像及颜色的奥秘。希腊人率先以现代人的智慧来观察世界，他们对数字和几何非常好奇，同时渴望了解自然界的内部运作和外环境，因此他们最早提出了物理和逻辑的观念。

亚里士多德(公元前 300 年)认为太阳是天空中的一个正圆，无瑕无疵，完美无缺。昔兰尼埃拉托斯特尼(Eratosthenes of Cyrene, 约公元前 276—前 194 年)测量了埃及南部的塞印(Syene, 即今天的阿斯旺[Aswan])的日照角度和同一时刻遥远的北方城市亚历山大(Alexandria)的日照角度，从而推算出地球的周长。他的计算结果与地球的实际周长 25 000 英里(40232.5 千米)惊人地接近。

古希腊哲学家亚里士多德和毕达哥拉斯(Pythagoras)在著作中写到了光及其

可感知的特性;他们为光的现象大感惊异。腓尼基人在历史上首先发明了玻璃镜片,可以用来放大图像和聚集光线。考古学家已经在地中海东部地区(曾为腓尼基领土)发现了距今3000年的放大镜。有趣的是,镜片的原理恰恰在于光线在通过玻璃时会减慢速度。

罗马人从腓尼基人那里学到了玻璃制造工艺,罗马人的玻璃制造业发展成为古代世界上的重要工业之一。古罗马的玻璃品质相当高,乃至可以用于制作棱镜。塞内加(Seneca,公元前5—公元45年)最早描述了棱镜以及白光通过棱镜时分解为各种有色光的现象。同样,这一现象也是基于光线传播速度的原理。我们没有发现古代测量光速的实验。似乎古人认为光是在同一时刻到达不同的地点的,因为光的速度太快了,他们察觉不到光从光源传播到目的地过程中的极其短暂的时间间隔。第一次测量光速的尝试发生在1600年后。

伽利略是最早测量光速的人。和从前一样,光的实验和玻璃制造技术紧密相联。五世纪罗马帝国灭亡以后,许多罗马贵族和工匠逃散到威尼斯湖区,建立了威尼斯共和国。他们带去了玻璃制造工艺,因此穆拉诺岛(Murano)上的玻璃制造业得以发展。伽利略使用的望远镜质量非常之好——甚至远远超过了最早在荷兰制造的望远镜——因为他的镜片是用穆拉诺玻璃做的。借助这种望远镜,他发现了木星卫星和土星光环,并且断定银河是由大量的恒星组成的。

1607年,伽利略在意大利的两个山头上进行了一次实验。两个山头上各有一名实验员手持灯笼,一名实验员先打开灯笼,另一个山头上的实验员看见亮光后立即打开自己的灯笼。第一个实验员要测量出从他打开第一盏灯笼到他看见第二盏灯笼的亮光之间的时间差。伽利略精心策划的实验失败了,因为从打开第一盏灯笼到看见第二盏灯笼亮光之间的时间差太微小了。我们还应当注意到,这里要测量的时间间隔很大程度上取决于打开第二盏灯笼的人的反应速度,并不纯粹是光线从一个山头传播到另一个山头实际需要的时间。

差不多70年后,也就是1676年,丹麦天文学家罗默(Olaf Römer)第一个计算出了光速。他借助伽利略发现木星卫星的天文观测方法,设计出一个复杂而巧妙的方案,记录下木星卫星每一次被遮蔽的时间。他知道地球围着太阳转,因而地球相对于木星及其众卫星的位置是不断变动的。罗默注意到木星的卫星每次被木星遮蔽的时间间隔是不均等的。由于地球和木星都围着太阳转,它们之间的距离在变化,因而光从一颗木星卫星传播到地球所用的时间也在变化。利用卫星被遮蔽的时间差值,以及有关地球和木星的公转轨道的知识,罗默算出了光的传播速度。他估算出来的结果,140000英里/秒(225308.16千米/秒),与光的实际传播速度

186 000 英里/秒(299 792 千米/秒)还有相当大的差距,不过考虑到当时的年代,以及 17 世纪钟表的精确度,他的成就——第一次测“定”了光速并且第一次证明了光速并非无穷大——是科学史的一座里程碑。

1638 年笛卡儿(Descartes)在《屈光学》一书中谈到光学问题,提出了光的传播定律:反射定律和折射定律。他的著作中蕴含了物理学领域中最受争议的概念:以太。笛卡儿假设光通过一种媒介传播,他将这种媒介称作以太。此后三百年内,科学一直无法摆脱“以太”的影响,直到爱因斯坦提出了相对论,才将“以太”彻底击败。

克里斯蒂安·惠更斯(Christiaan Huygens, 1629—1695)和罗伯特·胡克(Robert Hooke, 1635—1703)提出了光的波动说。惠更斯曾在荷兰受教于笛卡儿,16 岁便成为当时最伟大的思想家之一。他发明了摆钟,在机械方面还有其他成就。他最重大的贡献则是提出了有关光本质的理论。惠更斯认为罗默发现的有限光速说明光必定是一种通过某种媒介而传播的波。基于这种假设,惠更斯建立了一个完整的理论,他将那种媒介设想为以太,由众多微小的有弹性的粒子组成。当这些粒子受到刺激而震动时,就形成了光波。

1692 年,艾萨克·牛顿(Isaac Newton, 1643—1727)完成了论述光的本质和传播的著作《光学》,该书手稿在他家一场大火中付之一炬,因此重写,之后直到 1704 年才出版。这部著作严厉批判了惠更斯的理论,认为光不是波,而是由无数微粒组成的,不同颜色的光有不同的传播速度。根据牛顿的理论,彩虹由七种颜色组成:红、黄、绿、蓝、紫、橙、靛。每一种颜色都有自己的传播速度。牛顿把光的七种颜色比作八音盒的七个主要音程。该书的一次次再版,使得牛顿对惠更斯理论的批判不断延续,激化了光是粒子还是波的争论。奇怪的是,牛顿身为微积分的发现者,又是有史以来最伟大的数学家之一,对罗默关于光速的发现却只字不提,也从未对波动理论表示过应有的重视。

不过,牛顿在笛卡儿、伽利略、开普勒(Kepler)、哥白尼(Copernicus)的基础上,建立了经典力学,并且由此建立了因果关系的概念。按照牛顿第二定律,动力等于质量乘以加速度: $F = ma$ 。加速度是位置的二阶导数(因为加速度是速度的变化率;速度又是位置的变化率)。因此牛顿的定律是包含一个(二阶)导数的方程,又叫(二阶)微分方程。微分方程在物理学里非常重要,因为它描述了变化。牛顿运动定律是一种因果律的表述,解决的是原因和结果的问题。假如我们知道一个宏观的物体的起始位置和速度,又知道作用于该物体的力的大小和方向,那么我们就可以推测出一个将会出现的结果:这个物体在将来某一时刻的位置。

牛顿这优美的力学理论可以预见落体的运动,也可以推断星球的运行轨道。我们可以利用这些因果关系来预言一个物体的运动方向。牛顿的理论像一座宏伟的大厦,它揭示了宏观的物体——我们日常生活中接触到的物件——是如何从一个地点运动到另一个地点的,只要它们的速度或质量不是太大。假如物体的速度接近光速,或者质量相当于巨型星球,牛顿的经典力学便会失去效用,取而代之的应当是爱因斯坦的广义相对论。值得注意的是,爱因斯坦的广义相对论和狭义相对论是对牛顿力学的完善,即便是在牛顿力学仍然相当适用的情况下也能成立。

假如观察的对象是非常微小的电子、原子、光子等微粒,牛顿的理论同样不能起作用,它反而会使我们失去因果的概念。量子世界并不具有我们从日常生活中所了解的因果关系结构。另外,对于运动速度接近光速的微粒,应当使用相对论性量子力学(relativistic quantum mechanics)。

经典物理学中一个至关重要的原理——同时也和我们要讨论的话题密切相关——是动量守恒定律。物理量的守恒定律早在三个多世纪就已经为物理学家所了解。牛顿在1687年发表的《自然哲学的数学原理》一书便阐述了质量和动量的守恒定律。1840年,德国医师迈尔(Julius Robert Mayer)提出了能量守恒的推断。当时迈尔在一艘由德国驶向爪哇的轮船上做随航医生。在热带地区为船员疗伤时,他注意到从他们伤口流出的血液比他在德国见到的血液要红。迈尔此前接触过拉瓦锡(Lavoisier)的理论,拉瓦锡发现人体组织从血液中获取氧,将糖分氧化,从而产生热量。迈尔认为在气温较高的热带地区,人体需要产生的热量少于较为寒冷的北欧地区,因而热带地区的人血液中有更多的氧,其血液也因此更红。迈尔由人体与环境能够进行热量交换的现象,推断出能量是守恒的。焦耳(Joule)、开尔文(Kelvin)、卡诺(Carnot)用实验的方法也得出了同样的结论。在此之前,莱布尼兹已经发现了动能可以转化为势能,反过来势能也可以转化为动能。

任何形式的能量(包括物质)都是守恒的——也就是说,能量不可能无中生有。动量、角动量(angular momentum)、电荷也是如此。动量守恒在本书所要讨论的主题中占有非常重要的位置。

假设一个滚动的台球击中了另一个静止的台球,滚动的球对静止的球就会有一个特定的动量——其质量与速度的乘积, $p = mv$ 。这个乘积,即台球的动量,在该系统中必然守恒。一个球击中另一个球时,其速度会减慢,而被击中的球则同时开始运动。此刻这个双球系统的速度与质量的乘积必定和两球相撞之前相等(静止