

第一推动丛书

原子中的幽灵



★精选世界科学名著★ ★精选世界科学名著★

原子中的幽灵

●《第一推动丛书》第一辑●《第一推动丛书》第一辑●

□〔英〕戴维斯 布朗合编 □易心洁译 □洪定国校

★湖南科学技术出版社★

★精选世界科学名著★ ★精选世界科学名著★

第1期 (2013年1月) 第1期

原子中的幽灵



中国科学院物理研究所 中国科学院物理研究所 中国科学院物理研究所

原子中的幽灵

中国科学院物理研究所 中国科学院物理研究所 中国科学院物理研究所

中国科学院物理研究所 中国科学院物理研究所 中国科学院物理研究所

中国科学院物理研究所 中国科学院物理研究所 中国科学院物理研究所

中国科学院物理研究所 中国科学院物理研究所 中国科学院物理研究所

〔英〕戴维·布朗合编 易心洁译 洪定国校 湖南科学技术出版社

原子中的幽灵

●《第一推动丛书》第一辑 ●《第一推动丛书》第一辑●

总 序

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比较起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难的进步。这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因

素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人智士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知作了艰苦卓绝的奋斗，中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而应该说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和

接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了。但是，毋庸讳言，在一定的范围内，或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的后果的接受和承认，而不是对科学的原动力，科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上是不隶属于服务于神学的，不隶属于服务于儒学的，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学的。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化的地域差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是传播科学的精神，科学的思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步作一点推动。丛书定名为《第一推动》，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现，自身如何成为自身的主宰。

《第一推动》丛书编委会

前 言

尼·玻尔曾经指出：谁不为量子理论所震惊，谁就不理解量子理论。在 20 年代，当量子理论的蕴涵开始充分显露时，肯定有一股强烈的震惊与迷惑之感，在它的同代人当中回响。量子理论不仅与 19 世纪经典物理学相冲突，而且它根本性地改变了科学家们关于人与物质世界关系的观点。因为按照玻尔对量子理论的解释，“外在”世界的存在不是自身独立的，而是无法摆脱地与我们对它的感知纠缠在一起的。

毫不奇怪，有些物理学家发现上述观念是难于接受的。带有讽刺意味的是，在量子理论发展的早期曾起重要作用的爱因斯坦却成了抨击它的急先锋。他直到 1955 年去世，仍然确信：在量子理论的表述形式中少了一种实质性的成分；没有他所坚持的这一成分，我们关于原子范围

内物质的描述，就会不可避免地保持其固有的不确定性，因而是不完全的。在与玻尔的长期友好交往过程中，爱因斯坦反复试图证明量子理论的不完全性。他提出过许多有极高天赋的论据，有些曾引起科学家们的极大关注。但是，每一次，玻尔都很快地设法找到了一个雅致而有说服力的反驳。渐渐地，人们越来越感觉到：爱因斯坦的驱除原子中幽灵的探索是徒劳的。

但是今天，量子论战远未消失。近几年有人做了一系列检验性实验，阿莱因·阿斯派克特及其法国同事们所做的实验是其顶峰。这促使人们以新的眼光来看待玻尔—爱因斯坦之争。

对于量子理论解释兴趣的复苏，激发我(J. 布朗)考虑就这一主题搞个专题广播节目。我与泡尔·戴维斯教授讨论了这一想法，他同意为英国广播公司第3台提供一个专题节目。我们采访了对量子力学概念基础有特殊兴趣的几位领头物理学家，了解他们从阿斯派克特的实验结果和量子理论其它近期进展中提出什么启示。

在一个专题广播节目内可资使用的时间，自然十分有限，所以，只有采访中的若干简短片断才能编到最后的节目里。尽管如此，广播3台关于《原子中的幽灵》的广播节目，仍激起了听众的极大兴趣，因此，我们感觉到：以较完全与更永久的形式把这些采访内容编书出版，将是十分值得的。

除了第一章之外，本书内容都是以广播部的原始采访录音为基础的。在校订中，为使对话更符合出版要求，我们不得不作些修改。但是，我们力图尽量保持其对话特

征。这本书是特为一般读者写的，所以，我们写了第一章，对于采访中所讨论的概念作个介绍。如果你已经熟悉其中许多内容，你可以直接跳到第二章，并查阅书后的索引与术语汇编，它们说明了书中的技术术语与论据。

一个最后的念头与一个提醒注意的评注：当我们委派采访任务时，有些参与者（不公布其姓名）表达了这样的观点：对于量子理论应作何解释，现在不存在实际的疑虑。至少，我们希望此书将表明：这种自我满足是没有理由的。

我们深深感激所有参加了此项工作的人们，特别要感谢鲁多尔夫·佩尔斯爵士，他评论性地阅读了第一章。我们还要感谢承担转抄原始录音带内容这一繁重任务的曼蒂·尤斯特雷斯。

J. 布 朗

P. C. W. 戴维斯

1986 年元月

目 录

第一章 奇妙的量子世界	(1)
什么是量子理论?	(1)
起 源.....	(2)
波或粒子?	(4)
所有这一切, 意味着什么?	(10)
爱因斯坦—波多尔斯基—罗孙 (EPR) 实验	(12)
贝尔定理	(14)
阿斯派克特实验	(16)
实在的本性	(17)
测量佯谬	(23)
薛定谔猫佯谬及更糟的情况	(25)
实用主义观点	(27)
精神支配物质	(28)
多宇宙解释	(31)

统计解释	(34)
量子势	(34)
第二章 阿莱恩·阿斯派克特	(36)
第三章 约翰·贝尔	(41)
第四章 约翰·惠勒	(52)
第五章 鲁多尔夫·佩尔斯	(62)
第六章 大卫·多奇	(73)
第七章 约翰·泰勒	(93)
第八章 大卫·玻姆	(104)
第九章 巴席尔·海利	(120)
术语汇编	(132)
参考文献	(136)
索 引	(138)

第一章 奇妙的量子世界

什么是量子理论？

“量子”一词意指“一个量”或“一个离散的量”。在日常生活范围里，我们已经习惯于这样的概念，即：一个物体的性质，如它的大小、重量、颜色、温度、表面积以及运动，全都可以从一物体到另一物体以连续的方式变化着。例如，在各种形状、大小与颜色的苹果之间并无显著的等级。

然而，在原子范围内，事情是极不相同的。原子粒子的性质，如它们的运动、能量和自旋，并不总是显示出类似的连续变化，而是可以相差一些离散的量。经典牛顿力学的一个假设是：物质的性质是可以连续变化的。当物理学家们发现这个观念在原子范围内失效时，他们不得不设计一种全新的力学体系——量子力学，以说明标志物质的原子特征的团粒性。这样，量子理论就是导出量子力学的基础理论。

考虑到经典力学在描述所有物体（从弹子台球到恒星与行星）的动力学方面的成就，它在原子范围内被新的力学体系所取代，被视为一种革命性转变，是不足为奇的。不过没多久，通过对只有用量子理论才能理解的广泛现象的论证，物理学家们证实了这个理论的价值。这类现象如此之多，以至今天量子理论常常被誉为一种前所未有的最有成效的科学理论。

起 源

由于德国物理学家普朗克（Max Planck）发表的一篇论文，量子理论在 1900 年蹒跚地起步了。当时普朗克正从事于研究 19 世纪物理学悬而未决的一个问题，即关于热物体的辐射热能在各波长上的分布问题。在某些理想条件下，此能量是按某种特征方式分布的。普朗克证明：只有假设物体以离散包或离散方式发射电磁辐射，才能对这些特征方式作出说明。他称这种离散包或离散束为量子。当时不知道为何有这种不连续性，只是特设地被迫接受而已。

1905 年，量子假说受到爱因斯坦的支持，他成功地说明了所谓光电效应。在这种效应中，他观察从金属表面置换出电子的光能量。为了说明这种具体方式，爱因斯坦被迫将光束看成是后来称为光子的离散的粒子流。光的这种描述似乎完全跟传统的观点相冲突。按照传统的观点，光（与所有的电磁波一样）由连续的电磁波组成，它们依据著名的麦克斯韦电磁理论传播，而这个理论在半个世纪以前就牢固建立起来了。光的波动性早在 1801 年就被托马斯·杨（Tomas Young）用其著名的“双缝”装置从实验上予以证实。

然而，波——粒二象性并不局限于光。当时，物理学家们也关注原子的结构。尤其是，他们为电子围绕一个核运动却又不发射辐射所困惑。因为从麦克斯韦电磁理论知道，沿弯曲路径运动

的粒子定会辐射电磁能的，如果此辐射是连续的，那么原子的轨道电子就会迅速损失能量而螺旋式地落进核内（见图 1）。

1913 年尼·玻尔 (Niels Bohr) 提出：原子的电子也是“量子化”的，即量子化的电子可以处于某些固定的能级上而不损失能量。当电子在能级间跳跃时，电磁能以分离的量被释放或吸收。事实上，这些能量包就是光子。

可是，电子以这种不连续方式行动的原因，当时并没有揭示出来，直到后来发现了物质的波动性质才知道其所以然。

克林顿·戴维孙及其他人的实验工作以及路易斯·德布洛衣的理论工作导致这样一种概念，即：电子与光子一样既可按波行事，又可按粒子行事，究竟如何则取决于具体的环境。按照波动模式，玻尔提出的原子能级对应于围绕着核的驻波模式，极其相似于一个腔，这个腔可以使它对不同的分离乐曲产生共鸣，电子波也可以按一些确定能量的模式振动着。仅当此模式变更时（这对应于从一个能级向另一能级的一次跃迁），才有一个电磁扰动随其发生，即伴随着辐射的发射或吸收。

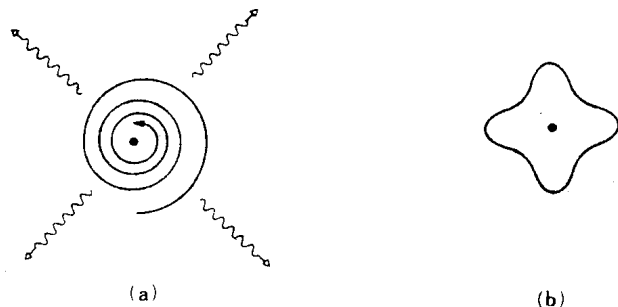


图 1 经典原子的坍塌 (a) 牛顿和麦克斯韦预言，一个原子的轨道电子会稳定地辐射电磁波，因而会损失能量并螺旋式进入核。(b) 量子理论预言存在着离散的不辐射的能级，在这种能级中，与电子相关联的、正好“适于”绕核运动的波形成了驻波图样（这波必定在径向也是“合适的”），这使人想起一种乐器上的各种曲调。

不久，人们就明白了：不仅电子，而且所有的亚原子粒子都具有类似的似波性，显然，由牛顿表述的传统力学定律，以及麦克斯韦电磁定律，在原子及亚原子粒子的微观世界中完全失效了。为了说明这种波——粒二象性，到 20 年代中期，一个新的力学体系——量子力学——由埃尔温·薛定谔和维尔纳·海森伯独立地发展起来了。

新理论成效壮观，它很快地帮助科学家们说明了原子结构、放射性、化学键以及原子光谱的细节（包括种种电磁效应）。这个理论经过泡尔·狄拉克、恩里科·费米、马克斯·玻恩，以及其他一些人的精细加工，最终导致对于核结构与核反应、固体的电性质与热学性质、超导电性、物质的基本粒子的产生与湮灭、反物质存在的预言、某些坍缩恒星的稳定性，以及更多的未列举事例，作出了令人满意的说明。量子力学也促成了包括电子显微镜、激光器和晶体管在内的实际硬件尽可能大的发展。极端灵敏的原子实验已经以令人惊讶的精确度证实了存在着微妙的量子效应。50 年来，未发现任何实验否定量子力学的预言。

这一系列巨大成就，使量子力学被遴选为一个真正值得注意的理论——以科学上史无前例的精细程度正确地描述着世界的理论。当今大多数职业物理学家，如果不是几乎不加思索地，就是完全信赖地应用着量子力学。然而，这个富丽堂皇的理论大厦却是建立在一种深刻的与不稳定的佯谬之上的，这个佯谬使得一些物理学家断言：这个理论最终是无意义的。

这个问题在 20 年代末和 30 年代初就已经很快地为众人所知了。问题与理论的技术方面无关，而是涉及到理论解释。

波或粒子？

量子的奇异性能够容易地从这样一种方式显示出来，即：象一个光子这样的物体，既可以显示出似波性又可以展示出似粒子

性，使光子产生衍射和干涉图象，这是光的似波本性的一个可靠检验。但是，在光电效应中，光子却效法着投掷椰子果核，把电子从金属中敲出来，在这个效应中，光的粒子模型似乎更合适些。

波动性与粒子性的共存，很快就导致了关于自然界的一些令人吃惊的结论。让我们考虑一个熟知的例子，假设一束偏振光射向一片偏振材料（见图 2）。标准电磁理论预言：如果光的偏振面平行于该材料的偏振面，光就完全透过，但是，如果二者成直角，则无光透过。在某居中角度时，则有部分光透过。例如，成 45° 时，透射的光强准确地为原光强之半，实验证实了这一点。

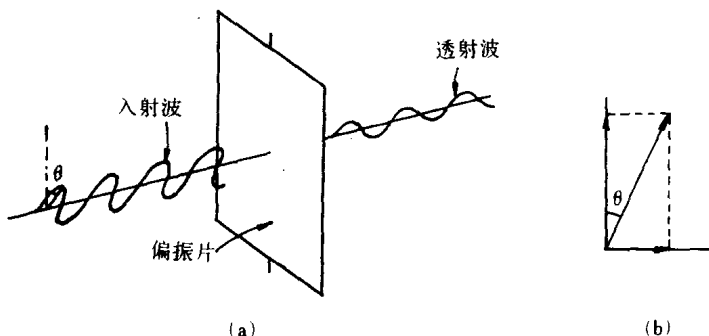


图 2 可预示性的失效。(a) 经典上，一个偏振光波通过偏振片时，其强度将减弱为 $\cos^2\theta$ ，出射波沿“竖直”方向偏振。如果把光视为全同的光子流，那么，这现象只能这样说明，即假设有些光子通过了，有些被挡住了，其几率分别为 $\cos^2\theta$ 与 $\sin^2\theta$ ，这是不可预示的。(b) 注意：入射波可视为“竖直”偏振波与“水平”偏振波的一种迭加。

现在，如果减弱入射光束的强度，以致一次仅一个光子穿过此偏振片，这时，我们就遇到难题了，因为一个光子不可能分割，任一给定的光子必定是或者通过了，或者被挡住了。当角度为 45° 时，平均起来，必定是一半光子穿过去了，而另一半则被挡住了。但是，哪种光子穿过了，哪种光子没穿过？由于具有相同能量的所有光子被假定是相同的，从而是不可分辨的，这迫使我们得出

这样的结论：光子的穿越纯粹是一个随机过程。虽然，任何一个给定光子穿越的机会是 50 对 50（几率为 $1/2$ ），可要预先预言哪些具体的光子会穿过去，是不可能的。只能给出打睹的几率。当角度改变时，此几率可以在从 0 到 1 之间跟着改变。

这个结论是引人入胜的，也令人不安。量子物理学发现之前，世界被看成是完全可预言的，至少在原则上是如此。尤其是，如果做相同的实验，人们就期望得到同样的结果。但是在光子与偏振片的情况中，人们可以非常清楚地发现：两个相同的实验产生着不同的结果，正如一个光子穿过了偏振片，而另一个相同的光子却被挡住了。显然，这个世界根本不是可完全预言的。一般地说来，在未做出一次观察之前，我们不可能知道一个给定光子的命运会是怎样？

这些概念暗示：在光子、电子和其他粒子的微观世界中，存在一种不确定性要素。1927 年，海森伯以其著名的不确定性原理量化了这种不确定性。这原理的一种表述与试图同时测量一个量子物体的位置和运动有关。具体地说，如果想要非常精确指定电子的位置，我们就不得不弃绝有关它的动量信息；反过来，我们可以精确地测量电子的动量，但这样一来，它的位置就变得不确定了。恰恰就是试图将一个电子钉在具体地点的作用，对其运动引进了一个不可控与不确定的扰动；反之亦然。再者，对我们关于电子运动和位置的知识的那种不可避免的约束，并不只是实验制作粗陋的结果；它是自然界所固有的。显然，电子并非简单地同时具有位置与动量。

由此得出，在微观世界中存在一种内在的模糊性，只要我们企图测量两个不相容的可观察量（如位置和动量），这种模糊性就会显示出来。这种模糊性的后果之一就是摒弃了电子（或光子、或任何其他东西）在空间沿特定路径或轨道运动的直观概念。对于遵循一确定轨道的一个粒子来说，每一时刻它必定具有一个位置（路径上的一点）和一个速度（路径的切矢量），但是一个量子粒