

商务新知译丛



QED: 光和物质的 奇异性

〔美〕理·费曼 / 著



商务印书馆

商务新知译丛



QED:

光和物质波动性

[美] 理·费曼著 张钟译

商务印书馆

1994·北京

**QED: The Strange Theory of
Light and Matter**

by

Richard Feynman

商务新知译丛

QED: 光和物质的奇异性

〔美〕理·费曼 著

张钟静 译

商 务 印 书 馆 出 版

(北京王府井大街36号 邮政编码 100710)

新华书店总店北京发行所发行

北 京 外 文 印 刷 厂 印 刷

ISBN 7-100-01536-7/B·201

1994年2月第1版

开本 787×1092 1/32

1994年3月北京第1次印刷

字数 96 千

印数 2 000 册

印张 5 3/4

定价: 7.30 元

这个“阿丽克斯·毛特纳纪念讲座”（Alix G. Mautner Memorial Lectures）是为了纪念我的妻子阿丽克斯而设立的，她于1982年逝世。阿丽克斯的专业是英国文学，但她在很长时期里对许多科学领域一直保持经久不衰的兴趣。因此，以她的名义设立一个基金会，资助这样一个每年一次的系列讲座，向聪明而有兴趣的听众传播科学精神和成就，看来是很合适的。

我很高兴理查德·费曼同意由他开始这第一个系列讲座。我同他的友谊可以追溯到五十五年前，在纽约的发洛卡威（Far Rockaway）我们一起度过的童年时代。理查德认识阿丽克斯有二十二年了，而且她总是请求他想办法通俗地讲解“小粒子”物理，使她和其他非物理学家能够理解。

此外，我愿意在此向所有那些对阿丽克斯·毛特纳基金会做出贡献而使这些讲座得以开设的人表示感谢。

列那德·毛特纳
(Leonard Mautner)
洛杉矶，加利福尼亚
1983年5月

理查德·费曼以他看待世界的独特方式在物理学界成为传奇式的人物：他对任何东西都不想当然地认可，总是独自彻底地考虑和解决问题，他经常能对自然界的行爲得到一种新颖而深刻的理解——而且以令人耳目一新的简洁优美的方式表达出来。

费曼为学生讲解物理学的热情也是众所周知的。他拒绝了无数颇有声望的学会和组织的邀请，但对路过他办公室的学生请他去某个地方中学的物理学会讲点甚么，他却着迷似的有求必应。

这本书是一个冒险——就我们所知，还从来没有有人试着冒这种险。它以直接了当、真诚可信的方式对非专业的听众讲解了一个相当困难的课题——量子电动力学（quantum electrodynamics），它的设计是为使有兴趣的读者欣赏一种思维方式，就是物理学家在要解释自然界如何运行时所采取的思维方式。

如果你准备学习物理学（或者正在学呢！），那么这本书中没有一点内容是你最终要纠正或扬弃的：它的讲述是个完整的大纲，其中每个细节都是精确的，你可以按照这个大纲——无需任何修改——进行更深入的学习。如果你已经学习过物理学，本书则向你揭示，你过去在做所有那些复杂计算的时候，到底是

在做甚么！

理查德·费曼还是个孩子的时候，受过一本书的启迪而开始学习微积分，这本书的开头语是：“一个笨人会做的事，其他人也会做。”费曼也想把同样的话和他的这本书一起奉献给读者：“一个笨人能理解的东西，其他人也能理解。”

拉尔夫·莱顿

(Ralph Leighton)

帕萨德纳，加利福尼亚

1985年2月

致 谢

这本书号称是我在加利福尼亚州立大学洛杉矶分校主持量子电动力学讲座时的记录，由我的好朋友拉尔夫·莱顿整理、编辑。但实际上，本书稿对原讲座做了相当大的修改。莱顿先生在教学和写作方面的经验，对于我们想试着通过本书把物理学的核心内容介绍给范围更广的读者，起了相当大的作用。

4 许多“颇受欢迎”的科学普及之类的作品之所以看起来相当简洁，只是由于它们所写的东西与它们声称要写的是两码事，它们对于声称要写的东西作了相当大的歪曲。但是对我们论题所怀的敬意不允许我们也这样干。经过许许多多个小时的讨论，我们已经尽力做到了最大限度的明确、简洁而同时避免任何对真理的歪曲。

目 录

讲座前言	1
编录者序	2
致 谢	4

1. 引言	1
2. 光子：光的粒子	39
3. 电子和它们的相互作用	85
4. 松散的结尾	139

阿丽克斯·毛特纳对物理学很好奇，常常要我给她讲解。我想这事我能应付得来，正如在加州理工学院有一群学生每星期四到我这里来一个小时讨论物理问题我能应付得来一样，可结果，我最感兴趣的这部分却没成功：我们老是在讨论量子力学那些古怪的概念时给窘倒了。我告诉阿丽克斯，我不能只花一个小时或一个晚上把这些概念给她解释清楚——这需要花很长时间，但我答应她，总有一天我会准备一系列的讲座来讲解这个课题。

我准备了几个讲座，然后去新西兰试试如何——因为新西兰反正远得很，即使讲砸锅了，也没甚么了不起。噢，新西兰人认为讲得还不错，所以我猜这讲座还可以——至少对新西兰是这样。现在我在这里讲的就是我确实为阿丽克斯准备的讲座，但很遗憾，现在，我不能直接讲给她听了。

我愿意给大家谈的是物理学中已经为人所

知的部分，而不是未知的部分。人们总是要求我们讲解“统一”——把这个那个理论统一起来这一类工作的最新进展，而不给我们机会向他们讲解我们已经掌握得很好的一个个理论。他们总是想了解我们尚不知道的东西。所以，与其用一些半生不熟、我们尚且一知半解的理论把你们弄得晕头转向，还不如象我所愿意的那样给你们讲讲一个我们已经彻底掌握了的课题。我喜欢物理学的这一个领域，而且认为它是绝妙的——那就是量子电动力学。

我这几个讲座的目的是尽可能准确地描述关于光和物质的奇妙理论——或者更明确地说，是关于光与电子的相互作用。要讲完我想讲的所有内容，需要很长的时间。好在我们分四次讲，我会好好利用这些时间，把所有内容都弄清楚。

物理学在过往的历史中，尝试将众多现象综合为很少几个理论。例如，在早期，人们观察到运动的现象和热的现象；还有声、光和重力的现象。但在牛顿（Sir Isaac Newton, 1642-1727）解释了运动的规律以后，人们很快发现，这些过去看起来毫不相干的现象，其实是同一事物的侧面。例如，声音现象完全可以理解为空气中原子的运动。所以声音就不再被看作是运动之外的甚么事了。人们还发现，从运动规律出发，热现象也是容易理解的。用这个方式，一大堆物理学理论被综合成一个通俗易懂的理论。不过万有引力理论除外，它不能用运动规律来理解，甚至在今天它也还是与其他理论毫

无联系。迄今，万有引力不是借助其他现象所能理解的。

在把运动、声和热这几种现象综合起来之后，人们又发现了我们称之为电现象和磁现象的几种现象。1873年，这些现象同光和光学现象被麦克斯韦（James Clerk Maxwell, 1831-1879）的一个理论综合在一起，麦克斯韦提出光就是电磁波。所以在这个阶段，有运动定律、电和磁的定律和万有引力定律。

1900年前后，一种解释物质到底是甚么的理论出现了。它被称为物质的电子理论——认为原子中有很小的带电粒子。这个理论逐渐演化发展，认为原子中有一个重核，并有电子绕它旋转。

人们想借助力学定律，就是说想仿照牛顿利用运动定律探究出地球如何绕日运行的办法来理解电子绕核旋转，这个努力是彻底失败了：它做的所有预言都是错的。（附带说一句，相对论大致也是在这段时间里提出来的，你们大家都把它理解成是物理学中的一场革命。但与牛顿运动定律不能用于原子这个发现比起来，相对论只是个小修正。）建立另一个体系取代牛顿定律花费了很长时间，因为原子水平上的现象是很奇怪的。要领悟在原子水平上发生的事情，人们必须抛弃常识。最后，在1926年，用来解释电子在物质中的“新型行为”的一种“非常识性”理论建立起来了。这个理论看来好象荒诞不经，但事实上当然绝非如此：它就叫做量子力学。“量子”这个词是指自然界那个违背常识的特别的

一面。我准备和你们谈的，就是关于这一面的问题。

量子力学的理论还解释了所有各类现象的细节，例如为甚么一个氧原子和两个氢原子合成水，等等。这样，量子力学就也为化学提供了背景理论。所以说基础的理论化学实际上就是物理学。

量子力学由于能够解释物质所有的化学性质和其他各种性质而获得极大的成功。但关于光和物质的相互作用还是存在问题。就是说必须将麦克斯韦的电和磁的理论加以改造，使之与已经建立起来的新的量子力学相适应。这样，在1929年，一种新的理论——关于光和物质相互作用的量子理论——终于由一些物理学家建立起来了。它的名字倒是怪可怕的，叫做量子电动力学。

但是这个理论曾有过让人头疼的麻烦。如果你粗略地进行计算，这理论能给你相当合乎逻辑的结果。但要是想进行更精确的计算，你会发现修正值（你原以为计算越精确，修正值会越小吧！例如一系列的修正值中，下一个会比上一个小）事实上很大——事实上竟然是无穷大！原来，这个理论不允许你把任何一个量计算得超过一定的精度。

顺便说一下，刚才我给你们概括讲的那些，我把它称为“物理学家的物理学史”，这种物理学史从来是不正确的。我刚才给你们讲的是物理学家给他们的学生讲的形式化的神话故事一类的东西，学生又把这些讲给他们的学生。我刚才讲的这些不一定同真实的历史发展有甚么联系，说真的，我并不大知道真实的历史过程到底

是怎样发生的。

无论如何，我还是要接着讲这段“历史”。P.狄拉克（Paul Dirac）利用相对论建立了电子的相对论——不过他没有把电子与光相互作用的影响考虑在内。狄拉克的理论是说，电子有一个小的磁矩——就象是一个小磁体的力那类东西，它的强度正好为某种单位制的1个单位。后来，大约到了1948年，实验发现实际值应该是接近于1.00118个单位（最后一位的不确定量约为3）。当然，电子要与光相互作用，这是众所周知的，所以有某个小修正值正在意料之中。人们还期望这个修正值从量子电动力学这个新理论的观点看来也是可以理解的。但计算的结果，这个修正值不是1.00118，而是无穷大——实验告诉我们，这结果是错的！

好了，在量子电动力学中如何进行计算这个问题被J.施温格（Julian Schwinger）、朝永振一郎和我本人于1948年前后解决了。施温格是第一个使用一种新的“壳层游戏”（shell game）计算这个修正值的。他算出的理论值是1.00116，与实验值已经相当接近，这说明我们的思路是对的。最后，我们终于有了可以用来进行计算的关于电和磁的量子理论了。我打算给你们讲的就是这个理论。

量子电动力学的理论到现在已经经受了五十多年的检验，检验的条件越来越广泛、检验的精度越来越高。现在，我可以骄傲地说，在实验和理论之间，不存在重大分歧。

这里我给你们几个最近得到的数据，让你们约略领会一下这个理论如何备受艰辛地通过检验：狄拉克数的实验值是1.00115965221（最后一位数的不确定量大约为4），而理论值为1.00115965246（不确定量约为实验误差的五倍）。为了使你对这个精确度有个概念，我给你打个比方：如果你在测量洛杉矶到纽约的距离时精确到了这个程度，那你就是精确到了人的一根头发那么细。在过去的五十多年里，量子电动力学就是这样从理论和实验两个方面精巧灵敏地经受着考验。顺便说一句，我刚才只是举了一个数据给你们看。实际上量子电动力学中，其他东西的测定值也差不多是这样精确，它们与理论值同样符合得相当好。这个理论的内容一直在非常大的尺度范围内——从地球大小的一百倍到原子核大小的百分之一——经受着考验。我介绍这些数据是为了吓唬你们，迫使你们相信这个理论大概不会太差。下面，我会给你们讲这些计算是怎么做的。

对于量子电动力学所描述的现象，其范围之宽广，我想再一次加深你们的印象。反过来说容易点，让我反着说：它能描述物理世界的所有现象，只是万有引力作用——那种把你们束缚在椅子上的作用（实际上，现在把你们束缚在椅子上的是万有引力再加上你们的礼貌，我想）——和放射性现象（它们涉及到核的能级跃迁）除外。这样，如果我们把万有引力和放射性（更恰当地说，是核物理）除开不算，剩下来的是甚么呢？汽车中汽油的燃烧、发泡起沫、盐或铜的硬度、钢的刚性。事

事实上，生物学家正在尽其所能地借助化学对生命做出解释，而正如我已经说过的，化学背后的理论就是量子电动力学。

我必须澄清一件事：在我说物理世界的所有现象都可以用这个理论解释时，我们并不真的知道是不是这样。我们所熟悉的大部分现象都涉及极大量的电子，要我们这贫乏可怜的头脑去跟踪如此复杂的事物，那可太难了。在这种情况下，我们可以运用这个理论粗略地估算出甚么情况应该发生，并粗略地估算出在这种复杂的环境中，真真正正发生的到底是甚么。但是，如果在实验室里安排一个在简单的环境下只涉及仅仅几个电子的实验，我们就可以很精确地计算出甚么情况可能会发生，而且也可以很精确地把它测量出来。我们无论何时做这种实验，量子电动力学的理论总是表现得很好。

我们物理学家老是在检验，查看这个理论是不是有甚么毛病。这种查看是一种游戏，因为如果真有甚么毛病，那就很有意思了！但到目前，我们还没发现量子电动力学有甚么问题。所以我说，它是物理学的一颗珍珠——我们最骄傲的财富。

量子电动力学还是那些试图解释原子核现象的新理论的原型。如果你想把物理世界设想成一个舞台，那么演员可不只是原子核外的电子，还要有核内的夸克、胶子等等——数十种基本粒子。虽然这些“演员”的亮相一个与另一个大不相同，但它们的表演却都依照一定的风格——奇怪而特别，这就是“量子”风格。在这个系

列讲座的最后，我要讲一点关于核粒子的内容。而在此之前的大量的时间，我只打算讲光子——光的粒子——和电子，以使内容保持简而不繁。因为正是它们作用的方式才是重要的，而且是很有意思的。

现在你们已经知道我打算讲些甚么了。下一个问题是，你们会理解我将要给你们讲的内容吗？去参加科学讲座的所有听众都清楚，他们不会理解讲座的内容，但是，讲演者也许系了一条色彩鲜艳的漂亮领带可供观赏。在我这里，那可就错了！（费曼没结领带。）

我准备给你们讲述的是我们对研究生院三、四年级的物理系学生教授的内容——你们以为我把这些内容解释给你们，你们就能理解吗？不！你们别打算能够理解它。那么，为甚么我还要用所有这些东西来打扰你们呢？如果你们不可能理解我准备给你们讲的东西，为甚么你们还要从头到尾坐在这儿听呢？我的任务是甚么——我的任务就是要你们相信，不要由于你们不能理解就离开。你们该知道，我的物理系研究生也不理解它。而这是因为我本人也不理解它。没人理解它。

关于“理解”，我想稍微讲几句。在我们讲课时，有许多原因使得听众不理解讲授者所讲的内容。一个原因是，讲授者的语言糟糕——他词不达意，或是讲得颠三倒四，这当然使听众难于理解。不过，这是小事，我会尽最大努力来避免我的浓重的纽约口音。

另外一个可能性是——特别当演讲者是物理学家时，他们经常以稀奇古怪的方式运用一些普通的词，例

如，他们常常在本专业的意义上使用“功”呀、“能”呀——甚至，你将会看到，他们还使用“光”呀这类的词。所以当我在讲物理学上“功”的时候，它的意思和我在街头巷尾谈论的“功劳”的“功”可不是一码事。在这个讲座中，我也许会使用一个这类的词而没注意到我不是以它通常的意义在使用它。我将尽最大的力量使自己警觉这个问题——这是我的任务。不过，这是个容易犯的错误。

你们或会认为，再一个使你们不懂我讲述内容的原因是，在我描述自然界如何工作时，你们不懂得自然界为甚么这样工作。但是你们要知道，没人懂得这一点。我不能解释自然界为甚么以这样奇特的方式行事。

最后，还有一种可能性：在我讲了一些内容之后，你们就是不能相信它，你们不能接受它，你们不喜欢它。一个小小的障碍落下来，你们就不再听下去了。我在对你们讲述自然界是怎么样的一——而如果你们不喜欢它，你们就要按照你们的方式去理解了。物理学家学会了正确对待的正是这样一个问题：他们学会了承认，对于一个理论，他们喜欢与否无关宏旨。重要的是这个理论所给出的预言能否与实验符合。一个理论是否在哲学上令人喜爱，或是否容易理解，或是否能从常识的观点看来完全合乎逻辑，所有这些都无所谓。从常识的观点来看，量子电动力学描述自然的理论是荒唐的。但它与实验非常符合。所以我希望你们按自然界本来的面目接受自然界；它本来是荒唐的，就接受它是荒唐的。