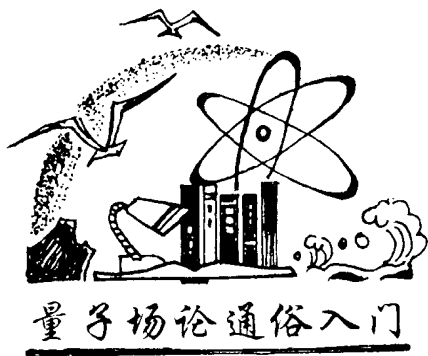




译者的话：最近应科学出版社之约，我们翻译了 2004 年诺贝尔奖得主、著名理论物理学家维尔切克（F. Wilczek）的一部高级科普著作《神奇的现实》（*Fantastic Realities*）。这本书是作者三十年来认真思考物理世界的产物，以丰富的内容、广博的知识、深邃的见解以及独特的视角向热爱物理的广大读者介绍了现代物理的方方面面。作者希望借此书拓展知识前沿，用美妙的现代物理概念丰富读者的生活，特别是激励更多的年轻人投身于物理学研究。

译书即将出版了，但却留下了一些遗憾之处。这是因为考虑到篇幅和难度，出版社决定舍弃原著中的某些章节，而这几章对于普及和

深化理解现代物理却是非常重要的。我们得到了原作者的首肯，从舍弃的章节中挑选了部分章节翻译发表。现在刊登的这一部分，专门讨论了量子场论的发生与发展。按照原书中作者的建议，我们取名为《量子场论通俗入门》。

狄拉克的方程游戏(上)

维尔切克 著

丁亦兵 乔从丰 李学潜 沈彭年 任德龙 译

“不可否认：这些数学公式是独立存在的，并且有着它们自己的智能；它们比我们更聪明，甚至比发现它的人更聪明；我们从它们那里得到的要比原来赋予它们的多得多。”

——H. 赫兹，关于麦克斯韦的电磁学方程

“我做的大量工作只不过是方程玩游戏，看看它们能给出什么。”

——P.A.M.狄拉克

“它恰恰给出了人们所需要的电子的特性。这对我来讲真是一笔出乎意料的奖金，完全出乎意料。”

——P.A.M.狄拉克 关于狄拉克方程

在所有的物理学方程中，狄拉克方程或许是最“不可思议”的。它的推导最直截了当，极少受实验的约束，是一个具有最奇异和最惊人影响的方程。

1928 年初（原始论文的接收日期是 1 月 2 日），一个刚从电力工程转行到理论物理的 25 岁的年青人保罗·阿德里安·莫里斯·狄拉克（Paul Adrien Maurice Dirac, 1902~1984）推导出了一个引人注目的方程，这个方程后来一直被称之为狄拉克方程。狄拉克的目标非常具体，即瞄准了当时的热门课题。他想写出一个能比已有的一些方程更精确地描述电子行为的方程。因为那些方程要么只考虑了狭义相对论，要么仅考虑了量子力学，但从未两者兼顾。

当时一些更有名气的和更有经验的物理学家也正在研究同样的课题。

不同于那些物理学家，也不同于伟大的经典物理学家牛顿和麦克斯韦，狄拉克并没有从对实验事实进行详细的研究开始。他只是利用几个基本的事实和所谓的理论上的必要条件来指导研究工作，其中的一些条件现在已经知道是错误的。狄拉克试图用一个简洁的、数学上自洽的方案来具体表达这些原理。诚如他所言，通过“方程游戏”，他无意中发现了一个特别简单、优美的答案。当然，这就是我们现在称之为狄拉克方程的方程式。

狄拉克方程的一些推论可与已有的实验观测数据做比较。它们很有效，解释了一些用别的方法都极难理解的结果。特别是下面就要说到的，狄拉克方程成功地预言了电子永不停息地自旋，因而它们相当于小磁铁棒。它甚至预言了自旋的速率和磁性强度。但有些结果似乎与显而易见的事实不一致。狄拉克方程明显地包含了这样的一些解，它们似乎描写常规的原子在一瞬间自发地消失成光猝发的方式。

几年的时间里，狄拉克和其他物理学家都在与一个异乎寻常的佯谬奋争。一个方程因其能正确无误地解释很多精确的实验结果且又能极端漂亮地去引导物理而被认为是“显然正确”的——但又怎么

会具有明显灾难性的错误呢？

狄拉克方程已成为基础物理赖以运转的支柱。在保持对其数学形式信任的同时，物理学家不得不重新审视方程中那些符号的意义。这是令人困惑的、伤透脑筋的重新审视，在其间，沃纳·海森堡(Werner Heisenberg)在给他的朋友沃尔夫冈·泡利(Wolfgang Pauli)的信中写道，“现代物理最可悲的篇章就是狄拉克理论和允许其存在”，并且“为了不致因狄拉克而烦恼，我决定改变一下去做些别的事情……”。正是在这个时刻，真正的现代物理开始了。

一个引人瞩目的结果是对反物质的预言——更精确地讲，应该存在一种新的粒子，它具有与电子相同的质量和相反的电荷，并且能与电子湮灭成纯能量。1932年，卡尔·安德森(Carl Anderson)通过细心地检查宇宙射线径迹很快地找到了这种类型的粒子。

更为深入涉及的结果是我们将完全重写描述物质的基础。在这种新物理中，粒子只是瞬息存在。它们可以自由地产生和消灭；确实，它们的短暂存在和转化是一切相互作用的源泉。真正基础的东西是无所不在且具转换能力的以太：量子场。这些就是构成我们极其成功的现代物质理论基础（经常被毫无诗意地称为标准模型）的概念。尽管狄拉克方程本身被彻底地重新解释并广泛地推广，但它从没有被抛弃，仍是我们理解自然的核心支柱。

1. 狄拉克的问题和自然的统一

狄拉克发现的直接原因以及他考虑这个问题的方法是调和两个成功的高级物理理论的需要，当时这两个理论已经有些不同步。到1928年，爱因斯坦的狭义相对论诞生已有20多年，已经被很好地理解和完全地证实。（这里，描述引力的广义相对论不在我们的讨论范围之内。引力在原子尺度上非常微弱，可以忽略。）另一方面，尽管海森堡和薛定谔的新量子理论是个相当年轻的理论，它们已提供了对原子结构的深入了解，并且成功地解释了很多原先很难理解的现象。显然，他们抓住了原子中电子动力学的基本特征。困难在于，海森堡和薛定谔给出的方程不是以爱因斯坦的相对论力学为基础，而是以牛顿的古老的力学作为出发点。对所有速度比光速小得多的系统，牛顿力学是一个非常出色的近似，它包括了原子物理学和化学中的许多有趣的情况。然而，能用新量子理论处理的那些原子光谱的实验数

据非常精确，以致对“海森堡-薛定谔预言”的微小偏离也能观测到。所以存在着强烈的“实用”动机去寻找一个基于相对论力学的、更精确的电子方程。不仅年轻的狄拉克，而且还有其它几位资深物理学家也在寻找这样的方程。

事后，我们能察觉到更多的既古老又基本的二重性在起作用，如：光相对于物质；连续相对于分立。这些二重性为实现对自然界统一描述的目标设置了巨大的障碍。在狄拉克和他的同代人试图调和的理论中，相对论是光和连续的产物，而量子理论是物质和分立的产物。在狄拉克的革命按其规律发展之后，在思路拓展的观念混合物，即我们称其为量子场论中，所有的二重性都被协调了。

光/物质和连续/分立这些二重性有着深刻的含义。最早的有感知力的原始人类就注意到了它们。古希腊人已经清晰地把它们表述了出来，并为此展开了辩论，但毫无结论。特别是，亚里士多德把火和土作为初始元素——光相对于物质。他反对原子论者，赞同充满基本物质的空间（“自然憎恶真空”）——维护连续，反对分立。

这些二重性并没有因经典物理的成功而消除；实际上，它们的矛盾更尖锐了。

牛顿的力学最适合描述刚体在空间中的运动。牛顿本人在很多地方猜测过这些二重性的哪一面可能占首要地位，而牛顿的追随者们则强调他的“坚硬的、有质量的、不可穿透的”原子是自然的基本组分。甚至用粒子作为光的模型。

19世纪初期，一个截然不同的光的图像获得了巨大的成功，基于这个图像，光是由波组成的。物理学家们都相信，应该存在一种连续的、充满空间的以太来承载这些波。法拉第(Faraday)和麦克斯韦(Maxwell)的发现改进和强化了这个观点，将光等价于电磁场的作用，而电磁场本身就是充满空间的连续实体。

如同路德维格·玻尔兹曼(Ludwig Boltzmann)所做的那样，麦克斯韦本人还成功地展示，如果气体是由许多很小的、分立的、明显分离开的原子组成，且这些原子可在除去原子之外的空虚的空间中运动，那么所观察到的气体的性质，包括很多令人惊奇的细节，都可以得到解释。此外，汤姆孙(J. J. Thomson)从实验上，亨德里克·洛伦兹(Hendrik Lorentz)从理论上，都证实了作为物质基本组元的

电子的存在。看来电子是牛顿所欣赏的那种不可消灭的粒子。

这样在 20 世纪开始时,具有两种完全不同的理论特色的物理就不得不令人不舒服地共处了。麦克斯韦的电动力学是一个没提到质量的电磁场和光的连续理论。而牛顿的力学则是分立粒子的理论,它们唯一强制的性质是质量和电荷^①。

早期的量子理论沿着这种二重性的分叉向两个主要分支发展,但有一些交汇的迹象。

一个分支是处理光的,它始于普朗克关于辐射理论的工作,而在爱因斯坦的光子理论中达到了顶峰。它的中心结论是光以不可分割的最小单位,即光子的形式出现,光子的能量和动量正比于光的频率。当然,这个分支就确立了光的类粒子的一面。

第二个分支始于玻尔的原子理论,而于处理电子问题的薛定谔波动方程处达到了巅峰。它确定绕原子核运动的电子的稳定组态与波振动的规则模式有关。这个分支建立起了物质的类波特性。

这样一来,基本的二重性问题就缓解了。光有点像粒子,电子有点像波。但鲜明的对比依然存在。特别是有两个差别将光和物质明确地区别开来。

首先,如果光是由一些粒子组成的,那么它们必须是一些很奇特的具有内部结构的粒子,因为光可以被极化。为合理地处理光的这种特性,它的粒子必须具有某种相应的性质。若只说明一束光是由如此如此多的具有这般这般能量的光子组成,这些事实会告诉我们光束有多亮,是什么颜色,但不能告诉我们它是怎样极化的,因此这种对光束的描述是不充分的。要得到完整的描述,还必须能够说出光束有什么样的极化方式,这意味着每一个光子必须以某种方式携带能保持光的极化记录的箭头。这似乎使我们背离了基本粒子的传统观念。如果存在箭头,它是由什么构成的?为什么它不能与粒子分离开来?

第二点而且也是更为深刻的一点,即光子是瞬时即逝的。因为当你打开手电筒时,光可被辐射;也因为你用手盖住了手电筒,光可被吸收。所以光的粒子可以被产生或消灭。光以及光子的这种基本的和熟悉的特性使我们远远背离了基本粒子的传统观念。物质的稳定性似乎要求不可消灭的组分,它们具有与瞬时即逝的光子根本不同的性质。

狄拉克方程和由它引发的危机最终迫使物理学

家去超越所有这些二重性。其结果导致了一个统一的物质观念,这当然是人类才智最伟大的成就之一。

2. 早期的报偿: 自旋

狄拉克力图调和量子力学和狭义相对论。他认为——我们现在知道这是错误的——量子理论需要一类被数学家称之为“一阶方程”的特别简单的方程。不必介意他为什么会这样想,或者准确地说一阶意味着什么;他想要的是在一定程度上非常精确的、有可能最简单的一类方程。这就产生了压力,因为找到一个既在这种意义下简单又与狭义相对论要求相容的方程是不容易的。为构造这样一个方程,狄拉克不得不放宽讨论的措辞。他发现采用单个的一阶方程不能达到他的目的——他需要一个复杂关联着的四个方程的系统,实际上“我们所指的”狄拉克方程正是这样的一个系统。

两个方程是最受欢迎的。而四个方程一开始就是一个大问题。

首先,看看好的一面。

尽管玻尔理论对原子光谱给出了一个不错的粗糙的解释,但仍存在着很多细节上的偏离。其中一些偏离与能够占据每一条轨道的电子数目相关,另一些则涉及原子对磁场的响应,显示于原子的谱线移动。通过对实验证据的仔细分析,沃尔夫冈·泡利证明了,只有严格限制占据任意给定轨道的电子数目,玻尔模型才能描写复杂原子,尽管只是粗糙的描述。这就是著名的泡利不相容原理的起源。今天我们知道这个原理的形式是“只有一个电子可以占据一个给定状态。”但泡利的原始提议没有这么简洁;它有一些使人烦恼的难懂的文字。可以占据一个给定玻尔轨道的电子数不是一个,而是两个。泡利晦涩难懂地提到一种“经典上不可描述的两重性”,但——不用说——没有给出任何理由。

1925 年,两个荷兰大学生塞缪尔·哥德斯密特(Samuel Goudsmit)和乔治·乌伦贝克(George Uhlenbeck)提出了一种磁响应问题的可能解释。他们展示,假如电子确实是个微小的磁体,则偏离就会消失。他们模型的成功要求所有电子必须具有他们计算出来的相同的磁性强度。他们接着建议了一个电子磁性的机制。电子当然是带电荷的粒子。做圆周运动的电荷产生了磁场。所以如果电子由于某些原因永远绕自身的轴旋转,它们的磁性就可能得到解释。这种电子内禀自旋还会有一个额外的好处。

如果旋转速度是量子力学所允许的最小值^②，则泡利的“两重性”就可以解释了。自旋的大小不能随意变化，只有方向向上或向下方的选择。许多知名的物理学家都对哥德斯密特和乌仑贝克的观点持怀疑态度。泡利本人也试图劝阻他们不要发表他们的工作。一则，他们的模型似乎要求电子以极高的速度旋转，在电子表面，速度可能超过光速。再则，他们也没有给出是什么东西把电子维系在一起。如果它是电荷的延展分布，而且所有的电荷都同号，则它将会飞散开——而靠引入离心力，旋转只会使问题更糟。最后，在他们对电子磁性强度和自旋大小的要求之间存在着定量上的不匹配。这两个量的比率由一个称为回转磁比，记为 g 的因子所决定。经典力学预言 $g=1$ ，然而为了拟合数据，哥德斯密特和乌仑贝克假定 $g=2$ 。除去这些十分合理的异议，他们模型的结果与实验观测一致的记录继续顽强地保持着！

进入到狄拉克的理论。在低速情况下，他的方程组有这样的一类解，在方程的四个函数中，只有其中的两个对方程的解有可观的贡献。这是一种不同的两重性。在这里，它是由于落实基本原理而自动出现的，并且确定无疑不是必须特别引入的。更奇妙的是，不需要做进一步的假设，狄拉克就可以用他的方程算出电子的磁性，得到 $g=2$ 。狄拉克写于 1928 年的杰作没有一个废字。在展示这个结果时，他简单地说道“磁矩正是在自旋电子模型中所假设的”。几页之后，他推演出进一步的必然结果，并简明地总结道“这样在一级近似下，目前理论给出的能级与 C.G.达尔文 (C.G.Darwin) 所得到的能级相同，它们与实验是一致的。”他的这些结果有着强烈的说服力，用不着夸大。从那以后，就离不开狄拉克方程了。无论产生什么样的困难——有些困难挺大、挺明显——它们都将是争斗的场合而不是丢弃的机会。这种璀璨宝石般的深刻见解将是无价之宝。

正如我所提到的，尽管他善于思维的出发点非常与众不同和更加抽象，狄拉克以哥德斯密特、乌仑贝克以及他们模型的实验成果开始了他的论文。只有在第二段，他确实显露他的才能。他所讲的完全切合我上面所强调的主题。

“为什么大自然为电子选择这样一个特殊的模型而不满足于点电荷，这个问题依然存在。人们想

要找出先前将量子力学用于点电荷的方法中的一些不完备性，当这些不完备性被移除后，整个二重性现象将成为不需要任意假设的必然结果”。

因此，狄拉克本身不是在提供一个新的电子模型。恰恰相反，他是在定义一种新的不可约的物质性质，它是事物天生固有的，特别是在相对论和量子力学自洽地起作用时，甚至在无结构点粒子这种最简单的可能情况下，这种特性也能出现。电子恰好是物质的这种最简单形式的具体表现。狄拉克保留了哥德斯密特和乌仑贝克“自旋”中的一些有价值的性质，特别是它的固定大小和它的磁性行为，它们有助于描述已观测的事实，但却是在深刻得多的基础上。他们模型的随意性和令人不满意的特征都被摆脱了。

我们正在寻找一个箭头，它将是物质基本组元的一个必要和不可分割的部分，比如光子的极化。情况就是这样！

电子的自旋可推演出许多实用的结果。它是铁磁性的起因，并使通电线圈中心处的磁场增强，它构成现代动力技术（电动机和发电机）的核心。通过操控电子自旋，我们可以在非常小的体积内贮存并读取大量信息（磁带、磁盘驱动）。甚至小得多的和更不易使用的原子核自旋也在现代技术中起着很大的作用。用无线电波或磁场操控这样的自旋，并感知它们的响应，是医学上非常有用的磁共振成像（MRI）的基础。如果没有这种只能通过最基础的认识才能带来的对于物质的精妙控制，这种应用将是不可想象的（确实如此！）。

通常的自旋，特别是狄拉克对磁矩的预言，在基础物理后续的发展中也有着巨大影响。波利卡普·库什 (Polykarp Kusch) 和他的合作者在 20 世纪 40 年代发现了对狄拉克 $g=2$ 的结果的微小偏离。它们提供了一些最早的虚粒子效应的定量证据，这是量子场论的一个深奥而且典型的特征。对质子和中子来说，与 $g=2$ 的明显偏离早在 20 世纪 30 年代就被观测到了。这是一个早期的迹象，它暗示：质子和中子不是与电子有着相同意义的基本的粒子。但是，我正在超前于我们的故事了……。

3. 巨大的惊奇：反物质

现在是坏的一面。

狄拉克方程由四个分量组成。也就是说，它含有四个分离的波函数以描述电子。正如我们刚才讨

论的，两个分量具有诱人 and 直接的成功解释，它们描写电子自旋的两个可能方向。相比之下，额外的一对分量乍看起来是很有问题的。

事实上，额外的两个方程含有负能的解（对自旋的任意一个方向）。在经典（非量子）物理中，额外解的存在会令人为难，但不一定是灾难性的。因为在经典物理中可以简单地不选用这些解。当然这样做回避了为什么大自然不选用它们的问题，但这是一个逻辑自洽的做法。在量子力学中，这种选择恰好是不能用的。在量子物理学中，一般地讲，“不禁戒的那些都是必须要的”。在手边的这个具体例子中，这一点是非常具体和精确的。在适当的情形下，电子波动方程的所有解都代表着电子的可能行为。在狄拉克方程中，从电子的其中的一个正能解出发，你就可以计算出它放出一个光子并跃迁到其中的一个负能解的速率。总体上，能量必须守恒，但那不成问题——它只不过意味着发射出的这个光子的能量会比放出它的电子的能量还要高！不管怎么说，这个速率快得离谱，比一秒短得多。所以你不能总是忽略负能解。由于从来没有观测到过电子异常地放出比它初始的能量还要多的能量，基于这一事实，狄拉克方程的量子力学存在着一个严重的问题。

狄拉克非常清楚这个问题。在他的原始论文里，他简单地承认道：“对第二组解 W （能量）为负值而言。在经典物理中可以通过随意舍弃 W 为负的那些解来克服这个困难。在量子理论中则不能这么做，因为，一般地说，一个微扰会引起从 W 为正态到 W 为负态的跃迁。……所以这样得到的理论仍然只是一种近似，但它似乎在没有随意假设的情况下，已能足够好地解释所有的两重性现象。”然后就把问题放在那里了。这就是前面已经引述过的、激起海森堡向泡利发泄的环境。

将近两年后的 1929 年年底，狄拉克提出一个建议来解决这个问题。这个建议利用了泡利不相容原理，根据这个原理，不会有两个电子满足这个波动方程的同一个解。狄拉克所提议的是一个关于真空的全新概念。他提议我们所认为“空”的空间实际上被负能电子挤得满满的。事实上，按照狄拉克建议，“空”的空间实际上含有满足所有负能解的电子。这个建议最大的优点是解释了引起麻烦的、从正能解到负能解的跃迁。一个正能电子不可能跃迁到一个负能解，因为总是有另外一个电子已

经占据在那里，而泡利不相容原理不允许第二个电子加入。

我们认为的真空实际上已经充满了东西的这种说法，乍听起来让人感到不可思议。但仔细想想，有什么不可以的呢？进化把我们塑造成能够感知对我们赖以生存和繁衍的世界上的方方面面。因为那些几乎不会受我们影响的、世界上不变的方面在这里是不起作用的，我们幼稚的感知力觉察不到它们似乎不应该是特别奇怪的。不管怎样，我们没有理由去期盼：有关什么是怪诞的或不大可能发生的幼稚直觉会对构建微观世界基本结构模型提供可靠的指导，因为这些直觉起源于一个完全不同领域的现象。但是我们必须接受它的到来。一个模型的有效性必须根据模型结果的成效和精确度来判断。

所以狄拉克对冒犯一般常识毫不畏惧。他十分恰当地将精力集中于他建议的可观测的结果。

因为我们正在考虑这样的观点：“空”的空间的常规状态远非空虚，那么用一个不同的、比较含糊的字来表示它是有帮助的。物理学家喜欢用的词是“vacuum（真空）”。

在狄拉克的建议中，真空充满了负能电子。这使真空成为一个具有自身动力学特性的介质。例如，光子可以同真空相互作用。可能会发生的一件事是，如果你将光照在真空上，只要光子具有足够的能量，那么一个负能电子就可以吸收其中一个光子，跳到正能解中。这个正能解作为一个常规的电子将被观测到。但在末态的真空中也产生了一个空穴，因为原本被负能电子占据着的解不再被占有了。

空穴的思想，就动力学真空而言，是惊人的创新概念，但并非前所未有。狄拉克利用了与含有很多电子的重原子理论的类比。在这样的原子中，有些电子对应于这样的波动方程的解，在那里，电子被紧紧地束缚在带大量电荷的原子核附近。要把这样的电子打出来需要大量的能量，所以在通常情况下，它们表现为原子不发生变化的一面。但如果其中一个这样的电子吸收了一个高能光子（X 射线光子）从原子中被弹射出来，那么原子正常状态的变化就以这个电子的缺失为标志。相对比之下，提供负电荷的电子的缺失就像一个正电荷。这个有效正电荷会沿着失去电子的轨道运动，所以它具有带正电粒子的性质。

基于这个类比和其他一些举手之劳的观点

(hand-waving arguments)，在这篇几乎没有方程式的短短的论文中，狄拉克提出真空中的空穴是带正电的粒子。那么，一个光子将一个真空中的负能电子激发到正能态的过程就可以被解释为一个光子产生了一个电子和一个带正电的粒子(空穴)。反过来，如果事先存在一个空穴，那么一个正能电子就可以发射出一个光子并占据空的负能态。这被解释为一个电子和一个空穴湮灭为纯能量。这里，我涉及的是一个光子被发射出来，但这只是一种可能性。还有可能发射出多个光子，或其他任意形式的辐射，它们带走了释放出的能量。

狄拉克第一篇空穴理论论文的标题为《电子和质子的理论》。当时质子是唯一知道的带正电的粒子。所以试图把这种假定的空穴认定为质子是很自然的。但不久这种认定引起了十分严重的困难。确切地说，我们刚才讨论的两种过程——电子-质子的产生和电子-质子的湮灭——从来没有被观测到过。第二个过程更有问题，因为它预言氢原子会在几微秒时间内自发地自我湮灭——幸亏它们不是这样。

把质子视为空穴的看法还牵涉到一个逻辑上的困难。基于方程的对称性，可以证明空穴必须具有和电子相同的质量。但是，一个质子当然应该具有比电子大得多的质量。

1931年，狄拉克收回早先认为空穴就是质子的观点，接受了他自己的方程的逻辑结果，并提出了一个动力学真空的要求“一个空穴，如果存在的话，会是一种实验上尚未发现的新的基本粒子，它具有与电子相同的质量和相反的电荷。”

1932年8月2日，一位美国实验家卡尔·安德森正在研究宇宙射线在云雾室留下的径迹的照片，他注意到一些径迹，它们如同所预期的电子那样的失去能量，但却被磁场偏转到相反的方向。他把这个现象解释为暗示着一种新粒子的存在，现在称之为反电子或正电子，它具有与电子相同的质量但相反的电荷。具有讽刺意味的是，安德森完全不知道狄拉克的预言。

在距狄拉克的房间几千英里之外的圣约翰(Saint John)，狄拉克的空穴——他的理论设想及其修订版的产物——被发现了，是从帕萨迪娜(Pasadena)的天空降下来的。所以从长远的观点看，“坏”消息结果成为“更好”的消息。负能的青

蛙成为正电子王子。

如今正电子已不再是令人惊奇的东西，而是一种工具。一个著名的应用是拍摄正在活动的大脑的照片——PET扫描，即正-负电子断层摄影术。正电子是如何进入你头部的呢？它们是通过注射把一些特殊的分子偷偷地送入的，这些分子包含有一些原子，它的放射性核将衰变出产物之一的正电子。这些正电子走不了多远就会与附近的电子发生湮灭，通常会产生两个光子，它们穿过你的颅骨跑出，就可以被探测到。然后你可以重建原始分子的去向，映射出新陈代谢，也可以研究光子在出射过程中的能量损失，得到一个密度分布图，最后得到脑组织的图像。

另一著名的应用是用于基础物理。你可以同时将正电子和电子加速到很高能量，并把两束粒子引到一起。然后正电子和电子会湮灭，产生高度密集形式的“纯能量”。在过去的半个世纪中，基础物理绝大部分进展都是基于世界各地一系列大型加速器上的这类研究，其中最新最大的是位于日内瓦之外CERN(欧洲核子研究中心)的LEP(大型电子-正电子)对撞机。稍后我会讨论这个物理的极具魅力的要点。

狄拉克空穴理论的物理思想，如我提到的，具有部分早期重原子研究的根源，也大规模地反馈到固体物理中。在固体中，我们有一个尽可能低能量的电子的参考组态或基本组态，在那里电子占据了上至一个确定能级的所有可能的状态。这个基本组态类似于空穴理论中的真空。也存在着一些较高能量的组态，在那里一些低能态没被任何电子占据。在这些组态中，有一些通常会被电子占据的空位或“空穴”——这是它们在技术上的称谓。这样的空穴在很多方面的行为都像带正电的粒子。固体二极管和晶体管都是基于对处于不同材料界面处的空穴和电子密度的巧妙控制。也有一种可巧妙地把电子和空穴引导到一个它们可以结合(湮灭)的地方的可能性。这使你可以设计出一个能非常精确控制的光子源，导致了诸如LED(发光二极管)和固体激光这样的现代技术支柱。

在1932年后的若干年中，许多附加的反粒子事例被观测到。事实上，对每一个已经发现的粒子，其相应的反粒子也都被发现了。有反中子、反质子、反 μ 子(μ 子本身是一个非常类似于电子的粒子，但

是更重一些)、各类反夸克、甚至反中微子以及反 π 介子、反K介子^③……。其中的很多粒子都不遵从狄拉克方程,有一些粒子甚至不遵从泡利不相容原理。所以反物质存在的物理原因必须是很普遍的——比最早导致狄拉克预言正电子存在的论据要普遍得多。

事实上,存在一个非常普遍的论点:如果你同时运用量子力学和狭义相对论,则每一个粒子必须有一个相应的反粒子。这个论点的严密的表述需要高深的数学背景或者极大的耐心。在这里大概地说明为什么反物质是同时运用相对论和量子力学的合乎情理的结果将会是令人满意的。

考虑一个粒子,让我们给它一个名字(同时强调它可以是任何东西),不妨称之为一个什穆(shmoo),以非常接近光速的速度向东运动。根据量子力学,它的位置实际上存在一些不确定性。所以你会发现这样的一些几率:如果测量什穆的位置,在初始时刻,它处在期望的平均位置偏西一些的地方,稍后又在期望平均位置偏东一些的地方。这样,在这段间隔内,它走得比你预期的要长一些——这意味着它走得更快。但是因为预计的速度基本上是光速,为容纳这个不确定性需要更快的速度,它预示着将违反狭义相对论,在该理论中粒子的速度不能大于光速。这是一个佯谬。

用反粒子,你可以摆脱这个佯谬。这就需要精心策划,让一些怪诞的想法协调一致,这是人们想

出的如何做这件事的唯一方法,它似乎就是大自然的方式。是的,其中心思想是:不确定性确实意味着,你能在狭义相对论告诉你不会出现什穆的地方发现它——但你观测到的那个什穆不一定就和你要找的那个一样!因为也有可能在稍后的时刻会有两个什穆,一个原来的和一个新的。为了使其自洽,还必须存在一个反什穆,用来平衡电荷,抵消可能与额外的什穆相关联的其他守恒量。能量的平衡又怎么样呢——是不是我们取出的能量比投入的更多?这里,常常就像在量子理论中那样,为避免矛盾,在考虑测量某物意味着什么时,你必须是明确的和具体的。测量什穆位置的一种方法是用光照射它。但是要精确测量快速运动的什穆的位置,我们必须使用高能光子,那时也存在这样的可能性,这样的—一个光子会产生一个什穆-反什穆对。在那个情形下——封闭的什穆圈——当报告你的位置测量结果时,你可能论及的是别的什穆!

(丁亦兵、乔从丰、任德龙,中国科学院研究生院 100049;李学潜,南开大学物理学院 300071;沈彭年,中国科学院高能物理所 100049)

①这就是说:为了预言粒子的运动,就需要知道它的电荷和质量,不能多也不能少。电荷的值可以为零,此时粒子只有引力相互作用。

②在量子力学中,分立的自旋只允许有一定数值。这与对允许的玻尔轨道的约束是密切相关的。

③有趣的事是光子是其自身的反粒子。这对带电粒子来说是不可能的,而光子是电中性的。

科苑快讯

类星体创造了星系吗

类星体和星系哪一个形成在前呢?长期以来,天文学家们认为年轻的星系滋养了位于中心的黑洞,一直到黑洞变成类星体。类星体是质量极大、威力极强的能量源。但是现在科学家们发现,一颗没有挂靠主星系的类星体显然在大量地制造出新恒星。该发现表明,类星体至少创造了某些星系,或许并不是星系创造了类星体。“如果能够得到证实,这将是一项极为重大的成果,会导致有关早期宇宙新观点的诞生,”马里兰大学帕克分校的天文学家克里斯托弗·雷诺兹(Christopher Reynolds)说。

通常,一颗类星体位于比太阳系更小的区域里,所释放的热量和能量异常巨大,甚至比整个星系还要明亮。类星体的部分能量是以接近光速的物质射流形式释放的。巨型恒星发生爆炸而灭亡时被称为超新星,这时所释放的

光线特别明亮而短暂;而类星体是不同的,它们会永久地照耀下去。

更值得注意的是,这些天文学家们观察到一个小型的伴星系,仅位于约2.2万光年之外,那里的恒星正在以极快的速度形成。该类星体的一道射流直接对准这个星系,因此研究小组认为这道射流将物质射入该星系,促进了恒星的形成过程。天文学家们还发现,HE0450-2958和这个伴星系正在慢慢地互相靠拢。在几百万年的时间里,类星体和伴星系将会合并在一起。这也许可以解释为什么有些类星体会被星系包围着:星系并没有形成类星体,相反,是类星体把星系吸引过来的。不久前,研究小组在《天文学与天体物理学》(Astronomy & Astrophysics)杂志在线版上报道的这些发现。

(胡德良编译自美国《科学》杂志网站 1 December 2009)