

从正电子谈起

黄涛

一、正电子的发现

电子已成为人们日常生活中所熟悉的客体,电灯、电视机、电子学、电子计算机等都离不开电子.电子带负电,(通常以电子所带的电荷定为 $-e$)其质量只有 0.51 MeV (相当于五十万电子伏特),它是氢原子重量的一千八百四十分之一.那么什么是正电子呢?顾名思义它是带正电的电子,确实如此,正电子的性质除了电荷与电子相反以外,其它所有性质与电子一样.人们称它为电子的反粒子.1932年,卡尔·安德逊(Carl Anderson)利用云室首次从宇宙线中发现了正电子的存在.由于这一发现,1936年安德逊获得了诺贝尔奖金.其实,早在1929—1930年(比正电子发现早两年)我国著名物理学家赵忠尧教授和英国、德国的两组科学家彼此独立而几乎同时首次发现硬 γ 射线在重物质中的特殊吸收.在进一步研究中,赵教授首次发现湮灭辐射.

现在已经知道,硬 γ 射线在重物质中的特殊吸收是 γ 射线在重原子核周围转化为正、负电子对所导致的.而湮灭辐射就是一对正负电子湮灭时所产生的光子.这些现象将在下面文章中详细讨论.五十年过去了,实践证明正电子的

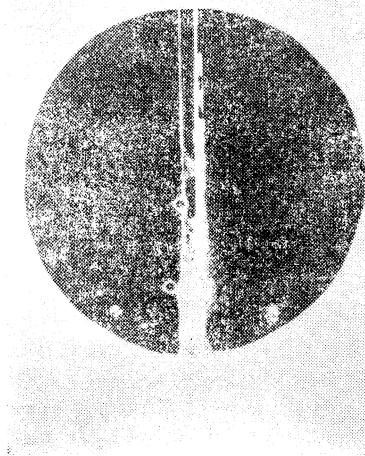


图1 正电子发现照片

发现在物理学史上是一个重要的里程碑.正是由于正电子的发现,证实了狄拉克理论的正确性,从而导至微观物理基本理论——量子场论——的诞生;正是由于正电子的发现,使人们认识到自然界中反粒子、反物质的存在.

在正电子发现廿三年以后,钱伯林(Chamberlin)发现了反质子,次年,赛格雷等又发现了反中子,此后人们还发现了一系列的反粒子.1959年我国著名科学家王淦昌所领导的研究组在杜布纳研究所发现的反西伽玛负超子就是一例.实验表明,每种基本粒子都

有它的反粒子.

今天,这些反粒子不再是在实验室中发现的个别事例,而是可以用作实验的手段去变革基本粒子,揭示基本粒子的性质、内部结构以及发现新粒子.例如正、负电子对撞机在近十年内起了重要的作用,1974年发现了 J/ψ 粒子,此后几年发现了粲介子和粲重子,1979年发现了三喷注现象表明胶子的存在,1981年发现了 η' 粒子和胶子球的存在,这些发现都是在正、负电子对撞机上所取得的重要成果.去年,西欧中心实现了质子、反质子束对撞成功,这一机器将以更大的能力变革基本粒子,因为它对应的实验室系的能量比目前用反质子束轰击静止的实验靶所能达到的能量要高出1500倍.这样高的能量为寻找新粒子提供了良好的条件.人们期望在这个机器上去发现中间玻色子 $W^\pm$ 和中性中间玻色子 Z^0 、黑格斯粒子、顶层子 t 、以及其它可能的粒子.此外,人们也期望在这个机器上做出更多的定量实验结果检验量子色动力学,得到更多关于强子内部结构的信息,从而为建立强相互作用基本理论规律进一步奠定实验的基础.既然现在反粒子束已在实验室中作为揭示微观世界奥秘的一种手段,可以相信在不久的将来会有更广泛的应用.

二、空穴和正电子

在微观世界里,电子的运动遵从薛定谔方程,当电子的能量、动量愈来愈高,运动速度接近光速时,描述非相对论性电子运动的薛定谔方程就有局限性.为此,1928年狄拉克提出了相对论性电子运动方程,人们称它为狄拉克方程.狄拉克的理论立即取得了很大的成功:它自然地给出了电子的自旋为 $\hbar/2$,狄拉克方程以描述自旋为 $\hbar/2$ 粒子作为特征,它可以描述质子、中子等一切自旋为 $\hbar/2$ 的费米子;它可以得到电子的磁矩值,更确切地说它可以给出一切自旋为 $\hbar/2$ 费米子的正常磁矩,亦即迴转因子 $g=2$;它应用到氢原子(一个电子围绕着质子作轨道运动),自然地解释了氢原子谱的精细结构;它与电磁场理论相结合可以描述光被电子的散射、两个高速电子的散射以及电子为原子核库仑场的散射.就在狄拉克理论取得成功的同时,立即发现了这一理论本身存在严重的困难——负能困难.所谓负能困难来自于在狄拉克方程的解中存在无穷多的负能量态(或者说负质量态),这些态在物理上是无法理解的,因为物理真实态总是具有正能量的.那么问题就产生了:第一是这些负能态在物理上对应什么样的状态;第二是处于正能态上的电子将

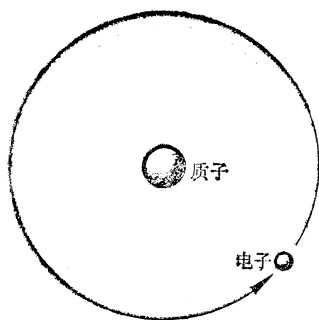


图2 氢原子

这个电子将从正能态跳向负能态而放出光子，因为电子有一种本性，只有处于能量最低态才是最稳定的。这

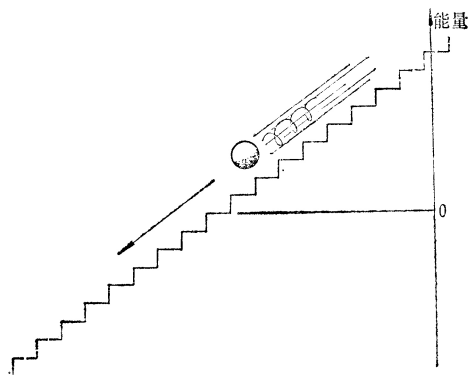


图3 皮球从楼梯上滚下来，一阶一阶一直滚向无穷的深渊

好像一个皮球从楼梯上滚下来，一直滚到最低处才能稳定（见图3）。这样氢原子的处于正能态的电子将是不稳定的，它与电磁场相互作用的结果将放出光子跳到负能级上，然而它不能停止，因为它将继续放出光子跳到更负的能态上，无休止地继续这一过程。这不仅对氢原子而且对所有的原子电子都无法处于稳定的状态，这是一个不可思议的图像。当时有人称处于这些负能态的电子为“笨驴电子”。

狄拉克为了解决这一困难，1929年提出了“空穴理论”，他假定在真空中所有的负能态全部为电子所占据，称为“负能电子海”，这些无穷多个负能电子的电荷、惯性以及与电磁场的作用将不造成任何可观察效应。由于电子满足费米统计规律，遵从泡里不相容原理，每个态上只能被一个电子所占据，这无穷多的电子就分别占据在无穷多的负能级上，全部占满（见图4）。这一理论的直接后果有两个：第一保证了氢原子（包括所有原子）的稳定性，因为负能态全部为电子所占据，那么处于正能态上的电子再不会跳到负能态上去；第二，由于负能态全部为电子所占据，那么处于负能电子海中的某一电子如吸收电磁辐射能量而跳到正能态上去成为正常电子，那么在这同时负能海中就出现一个“空穴”，可以见到负能海中“空穴”将与正常电子同时

不是稳定态。这将产生什么后果呢？例如氢原子，原子核是质子一个电子绕着原子核运动（见图2），这个电子具有正能量，观察到的氢原子是稳定的，可是按照狄拉克理论，存在有无穷多的负能态，

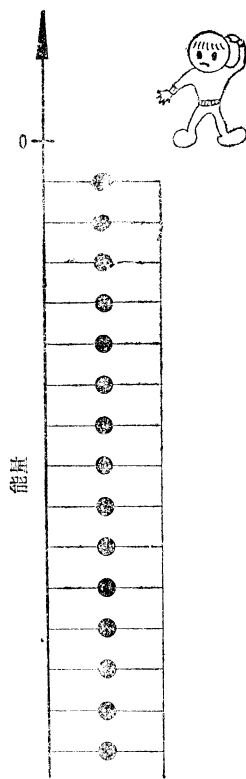


图4 无穷多个电子把无穷多个负能级全部占满，座无虚席

产生；反之，一个正常电子也可以返回到海中的“空穴”，也就是说“海”中的“空穴”与正常电子同时产生，同时湮灭。显然“空穴”态具有正能量，而且所有性质与电子相同，仅电荷相反，这就是说“空穴”态相应于带正电荷的电子。当时，这些思想既不可信又不自然，因为并没有发现这样带正电荷的电子。当时质子已发现，它是带正电荷的自旋为 $1/2$ 的粒子，狄拉克试图将“空穴”解释为质子，这显然是不合理的，因为质子的质量要比电子大得多，而且这种解释也会导至氢原子的不稳定。因此，一个必然的推论是自然界中存在一种与电子所有性质相同，电荷相反的粒子——正电子。尽管1932年安德逊发现它时并不知道狄拉克理论，然而正电子发现这一事实本身确实证实了狄拉克理论的正确性。

三、正电子发现的深远影响

正电子的发现不仅证实了狄拉克理论的正确性，而且它与狄拉克理论一起引起了物理学概念上的根本变化。

预言了反粒子和反物质的存在。狄拉克理论的正确以及正电子的发现，告诉人们所有的粒子都有它的反粒子，正电子、反质子、反中子、……等。实验上相继发现了这些反粒子。人们很自然地要问，有没有反质子、反中子组成的反原子核？有没有反原子核与正电子组成的反原子？有没有反原子组成的反物质？廿多年前，人们就在实验室中产生了反氦核 ($\bar{\text{He}}$) 和反氢核 ($\bar{\text{H}}$)。可是在宇宙空间中会不会存在反物质世界呢？多年来，人们期望从宇宙线中得到反物质的信息，因为如果宇宙空间中存在反物质世界，那么从那个星体上发射出的射线中将主要是反原子核及各种反粒子。可是在宇宙线实验中所观测到的反质子仅占千分之几甚至万分之几，至于反原子核至今还没有从宇宙线中得到确切的结果。据报道，1978年曾观测到在银河系中心区域存在着大量的正电子，这有可能预示着银河系中反物质的存在。如果弄清宇宙空间中反物质世界是否存在，

将帮助人们研究宇宙线的起源以及宇宙世界的奥秘。

粒子和反粒子间存在着对称性——电荷共轭对称性。1937年克拉默斯(Kramers)提出了电荷共轭变换,在这个变换下带正电荷的粒子变换为负电荷的反粒子,变换后的粒子仍遵从狄拉克方程。这个变换又称为正、反粒子变换。这个变换在粒子物理中起了很大的作用,它与空间反射和时间反演组合在一起是粒子物理中精确的对称性,这就是所谓CPT守恒律。我们知道,在弱作用中不保持空间反射对称性,即通常所说的宇称不守恒(宇称不守恒是1956年由李政道、杨振宁提出并在1957年在吴健雄的实验中得到证实),

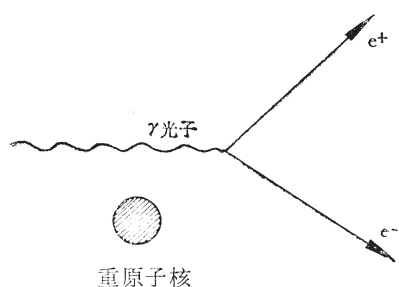


图5 在重原子核的电场中,正、负电子对产生

电荷共轭变换与空间反射联合在一起也在弱相互作用过程中不守恒,然而电荷共轭变换、空间反射、时间反演组合在一起仍然是守恒的。注意到电荷共轭变换使得电荷符号变号,很自然地得到结论,只有那些中性的介子(如 π^0 、 ρ^0 、 $\dots$)及光子,其正反粒子都是自身。这时,它们是电荷共轭变换的本征态。此外,正粒子和反粒子正好构成一个中性复合系统,在电荷共轭变换下是不变的,例如正、负电子组成的复合系统,层子、反层子组成的复合粒子 π 、 ρ 、 ψ 等都是电荷共轭变换的本征态,具有确定的电荷共轭宇称。

粒子对的产生和湮灭。在狄拉克的“空穴”理论中,无穷多个负能级填满了电子海,如果海中电子受激发跳到正能级上,这相当于一个电子和一个“空穴”同时产生;反之,如果负能海中有一个空穴,那么正能级上的电子放出光子会跳回到电子海中,这相当于一个电子和一个“空穴”同时湮灭。前面已经说明“空穴”就是正电子,因此正、反粒子对同时产生和湮灭。粒子对的产生和湮灭过程都已在实验中发现。例如能量大于两个电子质量(即大于1.02兆电子伏)的光子在重原子核的电场中可以转成为一对正、负粒子对(见图5);反

之,一对正、负电子相遇也能够湮灭转化为光子。

真空的物质性。前面已指出,狄拉克理论假定所有负能级都被电子占据,那么处于正能级上的电子就不能无休止地跌下负能深渊中去,这样一个由无穷多电子填上的电子海就是狄拉克理论中的真空,而一切物理现象就是以这一电子海洋为背景,也就是说真空中这无穷多电子并不造成直接观测的效果。那么很自然地要问,如何才能探测到真空负能海的存在呢?为此,可以设法使真空中均匀分布的电子改变一下,即可产生可观察的物理效应,这就是真空极化效应。例如在真空中若存在一个质子,由于质子带正电荷,它将引起负能电子海中电子分布的改变,在质子周围产生感应场,当质子运动时,这个感应场也跟随运动而形成一体,这就是通常所说的物理上观测到的质子都是“穿衣服”的质子。或者说在质子周围存在着许多虚粒子对“云”。正是由于这种真空极化效应使得氢原子的 $2s_{1/2}$ 态的能级位置相对于 $2p_{1/2}$ 态的位置发生移动,称为兰姆移动。理论计算结果与实验很好地符合。此外还有一些其它实验如电子反常磁矩也在相当高精度下观测到真空极化效应。这样,正电子的发现和狄拉克理论也揭示了真空的物质性,随着时间的推移,人们对真空的物质性认识更加深刻,今天已有更多的事实表明真空不空,它具有非常复杂和丰富的内容,而且可以说我们对物质结构的认识将有赖于我们对真空的认识。

四、结 语

从正电子的发现到今天已经历了整整半个世纪的时间,人们对物质世界的认识已经起了深刻的变化。基本粒子家族已不只是电子、质子、中子,而是有几百个成员的大家族;反粒子也不只是正电子,而是每个粒子都有它的反粒子;“真空”和“基本粒子”这些不科学的术语都已成为历史,“基本粒子”是由层子和反层子组成的复合粒子;人们对物质世界的认识是无穷的,今天人们正探索层子、反层子是由哪些更基本的成分如亚层子组成的;粒子物理理论也已从量子电动力学发展到量子场论,从核力的介子交换理论到量子色动力学,从费米弱相互作用理论到温伯格-萨拉姆弱、电统一理论,进而探讨四种相互作用统一理论的可能性。回顾历史,瞻望未来,人们一定会更深入地揭示出物质结构本质的丰富多彩的图象,对人类作出应有的贡献。