



## 粒子和反粒子

一直到二十世纪二十年代,人们所知道的“基本”粒子只有三种:电子、光子和作为氢原子核的质子。

**第一个反粒子——正电子的发现** 量子力学的发展,推动了粒子物理的发展。1928年,英国物理学家狄拉克从相对论和量子力学的一般原理出发,得到了一个描写单个电子的相对论波动方程,后来人们把它叫做狄拉克方程。这个方程有两种解:一种解它的总能量 $E$ 是正的( $E>0$ );另一种解它的总能量是负的( $-E<0$ )。人们在解释具有负能量的态的问题上遇到了很大的困难。如果存在负能态,那末粒子将一步步地向更低能量的负能态跃迁,不断放出能量,这样,在现实世界中将不可能存在稳定的电子。

为了克服这一困难,狄拉克在1930年提出空穴假设,认为现实世界中,几乎所有的负能态都被粒子所占据,正能级的粒子无法向下跳。所有的正能级都没有粒子,这就代表一个真空状态。如果正能级有一个粒子,那就代表一个能量为 $E$ 、电荷为 $-e$ 的电子。如果某个负能级少了一个粒子,出现一个空穴,这样的物理状态与真空状态相比,多了一个能量为 $E$ 、电荷为 $e$ 的粒子,所以代表一个带正电荷的粒子。狄拉克当时想像这种空穴所代表的、带有正电荷的粒子可能是质子。后来通过不少科学家的努力,认识到这些空穴不会是质子,而是一种质量同电子相同、电荷同电子相反的粒子,叫做正电子。1932年,美国物理学家安德逊用云雾室在宇宙线中果真发现了质量和电子相同,电荷和电子相反的正电子(见本刊总第2期肖健同志的文章)。

按照狄拉克理论,能量大于 $1.02\text{MeV}$ (和两个电子的静止质量相对应的能量)的光子,在原子核的电场中可能转化为一对正负电子。反之,一对正负电子相遇能够湮没,转化为两个或三个光子。这些也都在实验上得到了证实。

同年,英国物理学家查德威克发现了中子,使得“基本”粒子家族的成员扩充到五个:光子、电子、正电子、质子、中子。由于质子和中子存在于原子核内,因而也统称为核子。

**核子也应该有它的反粒子** 随着正电子的发现,掀起了一个寻找反粒子的热潮。

我们知道,“基本”粒子都象小陀螺那样在旋转,就是说有自转角动量(也叫自旋)。角动量的大小以 $\hbar$ 为单位( $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ),取这种单位时,光子的自旋是1,电子、正电子、质子和中子的自旋都是 $\frac{1}{2}$ 。狄拉克方程就是描写自旋是 $\frac{1}{2}$ 的粒子的波动方程,它很快被推广应用于描写核子,又预言了核子也应该有它的反粒子。

1933年到1947年间,有一段关于介子的曲折故事(见本刊总第7期争鸣同志的文章),人们终于弄清楚:1936年在宇宙线中发现的 $\mu^\mp$ 是不参与强相互作用的自旋为 $1/2$ 的粒子, $\mu^+$ 是 $\mu^-$ 的反粒子;1947年用核乳胶在宇宙线中找到的自旋为0的 $\pi$ 介子( $\pi^\mp, \pi^0$ )才是传递强相互作用的粒子, $\pi^+$ 是 $\pi^-$ 的反粒子, $\pi^0$ 的反粒子就是它自身。这样一来,“基本”粒子家族又增添了新的成员。但是,预言已久的反质子、反中子却长时间没有找到。虽然当时在宇宙线中寻找反质子有了一点迹象,但不能肯定,这很使人焦急。看来比核子轻的粒子都有了反粒子。那末,象核子那样重的粒子是否也有它的反粒子?狄拉克方程是否也可应用于核子呢?

到五十年代,加速器发挥了强有力的作用,反质子终于在1955年被美国塞格莱等物理学家找到了。

**建造多大能量的加速器** 从狄拉克理论推知,反质子有如下的特性:(1)反质子有和质子相同的静止质量( $938\text{MeV}/c^2$ , $c$ 是光速);(2)有和质子大小相等,符号相反的电荷;(3)应当是稳定的,不会自发衰变;(4)在加速器中只能和质子成对产生,不会单独产生;(5)遇到质子时能发生湮没,转变成若干个介子。为了产生一对质子和反质子,需要加速器把质子加速到多大的能量呢?从理论上讲,至少要花费 $2\text{GeV}$ 的能量。如果让反应后的四个粒子(原先的两个质子和新产生的一对正反质子)平均都带有 $1\text{GeV}$ 的动能的话,那末入

射质子的能量(指动能)至少是 6GeV. 美国加州大学的物理学家根据这种估计,在 1947 年设计了一个能量大于 6GeV 的加速器,于 1954 年在贝克莱实验室建成,命名为 Bevatron, 取意为 GeV 量级的加速器,当时的能量是 6.2GeV.

物理学家们进一步考虑: 6.2GeV 动能的质子轰击铜靶,和铜靶中的质子相碰撞,如果产生了反质子,怎样来探测它? 他们想到: (1)反质子既然不会自己衰变,就可以走过较长的距离;(2)反质子带负电,利

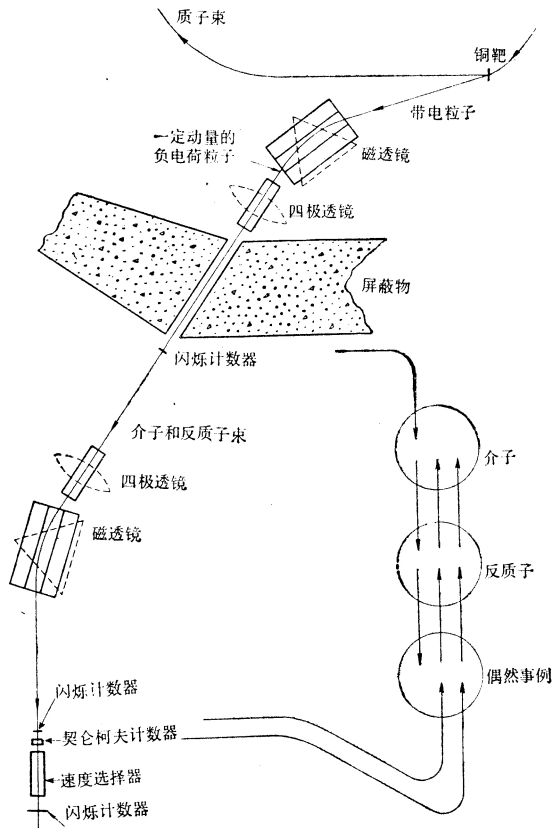


图1 寻找反质子的实验装置

用磁场可以把它和带正电的粒子区分开来;(3)如果让反质子通过一定的磁场,由粒子偏转的轨道半径可以确定它的动量.从动量和速度的关系就可求出反质子的质量.但这还不够,还要考虑到实际情况.因为质子打靶时产生大量的动量和质子相仿的介子.为了避免误认,必须把带负电的介子和反质子区分开.考虑了这些因素后,塞格莱等物理学家设计了一套实验装置(图1).

**实验装置** 让从加速器中加速的质子束轰击铜靶1,出来一大堆粒子,带正电、带负电的都有.在靶的前方放一个磁透镜2,磁场方向垂直于纸面,从里向外.磁透镜的作用有二,一是把带正电的粒子甩向图的左边,被屏蔽物4吸收掉;二是由于磁透镜具有固定的磁场,

不同动量的带电粒子被弯曲的程度不同,让带有确定动量的带负电的粒子进入后面的磁透镜3,其它动量的粒子被屏蔽物4所吸收.磁透镜3使粒子流聚焦成一细束.这一束流既含有反质子也有大量鱼目混珠的介子.根据预言的反质子的质量和选定的动量  $(1.19 \frac{\text{GeV}}{\text{c}})$

可以计算出反质子的速度是光速的 78%. 介子的质量比反质子的质量小得多,计算得的介子速度接近光速.利用这一速度差别就可以区分鱼目和珍珠.

经过磁透镜3聚焦的束流通过屏蔽物4的孔道,打到闪烁计数器5. 闪烁计数器5的作用相当于一个“停表”的作用,记录粒子通过的时间.为了避免粒子束跑的路程太长了队伍要乱,于是让它们再经过一个磁透镜6,把队伍整顿一下;又为了避免其它地方跑来的不速之客混入队伍中冒充反质子,让它们再通过一个关卡: 动量选择磁透镜7,动量不同的,把它们从队伍中除掉.然后又让粒子通过另一个闪烁计数器8,纪录第二个时间.从第一个“停表”到第二个“停表”的路程安排成整整 40 英尺. 反质子通过这段路程的时间是 51 毫微秒,(十亿分之一秒);介子通过这段路程的时间是 40 毫微秒.从两个“停表”纪录的时间长短,就可以把反质子从大量的介子中区分出来.

那么,会不会有一种偶然的巧合,比如说有一个介子触发了第一个“停表”,经过 51 毫微秒时间之后,碰巧有另外一个介子触发了第二个“停表”,这就容易被误认为反质子.为了排除这种偶然的巧合,需要有一套用别的办法测定速度的装置来进行核对.因此在第二个“停表”8之后放了一个长形的速度选择器10.它是一个所谓契仑柯夫计数器.计数器10设计成只纪录速度为光速的 75—78% 的粒子.这里速度范围放宽了,是考虑了反质子经过闪烁计数器等,能量要损失,速度要减慢.为防守更严密些,结果更可靠些.在契仑柯夫计数器10的前后都设有岗哨,在前的也是个契仑柯夫计数器9,作用是当粒子的速度超过光速的 78% 时,它给出警告讯号,通报来者不是反质子.在后的又是一个闪烁计数器11.它只记录在束流方向来的粒子,通报来者是来自正确的束流方向,而不是从旁的方向来的.

通过这样的重重关卡和岗哨就可以把反质子和其他粒子区别出来了.但为了最后证实反质子,还必须通过示波器观测一组特殊的扫描图形.这图形应满足下面四个条件: (1)两个“停表”指出粒子按正确速度飞行;(2)速度“监视”器9没有给出警告讯号;(3)速度选择器10纪录到有一个速度在光速的 75—78% 之间的粒子通过;(4)闪烁计数器11指示出粒子从正确的方向来的.一旦观测到了这样的扫描图形,就可确定有一个带负电的,质量和质子质量相同的反质子通过了装置.

1955 年 10 月,塞格莱等宣告发现了反质子,当时

他们用这种装置已观测到六十个这种事例。平均加速器工作一小时，才有四个这种反质子事例。并且在四万个介子事例中才夹杂着一个反质子事例。

**还要抓住反质子** 上面的实验只是观测到了反质子。是不是能抓到一个反质子呢？这是可能的。前面说过，反质子遇到质子时能发生湮没，转化为若干个能量较高的介子，根据这个性质，塞格莱和意大利的物理学家合作，用乳胶片来找这种事例。他们把乳胶片放到有反质子的束流中照射，然后经过显影、定影等，再用高倍显微镜看，可看到许多粒子的黑色径迹。他们一共找到了二十多条反质子径迹，并找到一个代表质子和反质子湮没的事例——“星”。在这事例中，反质子进入乳胶片后，一路上使乳胶中的原子电离，自身损失能量，速度逐渐降低直到静止。这时立刻被乳胶中的原子核俘获并和其中一个质子湮没。湮没时，放出大量能量使原子核粉碎。从径迹长度，颗粒密度可确定湮没时释放的总能量相当大，除非有另一个质子和反质子一起湮没，否则，就不会放出这么多能量，这样，可以说确实抓住了一个反质子，并记录下它和质子湮没时的全景。

从这里可以看出，做一个像找反质子那样的实验，要经过理论上的预先考虑，实验上的周密设计；要有能量适当的加速器，精良的仪器设备；还要从多方面来核实所得的结果。这是一件十分细致、复杂和艰巨的工作。在反质子预言了二十多年之后，经过艰巨的工作，塞格莱等终于找到了它。原来不相信会存在反质子而打了赌的人，在雄辩的事实面前纷纷服输。一年之后，1956年，美国的物理学家柯克等又利用同一加速器，找到了反中子。中子是电中性的，中子和反中子不是电荷相反，而是重子数相反，重子数是核子的另一种“荷”，核子的重子数是+1，反核子的重子数是-1。因此反质子不仅可以和质子，还可以和中子发生湮没。反中子也类似。

**更重的粒子是否有反粒子** 1947年以后，陆续发现了许多所谓奇异粒子，不仅有质量较轻的 $K^+$ 、 $K^0$ 介子和它们的反粒子 $K^-$ 、 $K^0$ ，还有质量比核子还重的超子 $\Lambda^0$ 、 $\Sigma^+$ 、 $\Sigma^0$ 、 $\Sigma^-$ 和 $\Omega^-$ 。现在，电子、 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子、 $K$ 介子核子都有了它们的反粒子。是不是超子也有它们的反粒子呢？物理学家们继续寻找反粒子。1959年在基辅举行的国际高能物理会议上，我国物理学家王淦昌教授宣布了联合原子核研究所的10GeV加速器上利用泡室找到了 $\bar{\Sigma}^-$ 超子( $\Sigma^-$ 的反粒子)；同时美国物理学家阿尔瓦莱茨小组也在Bevatron上找到了 $\bar{\Lambda}^0$ ( $\Lambda^0$ 的反粒子)。之后，1960年找到了 $\bar{\Sigma}^+$ ( $\Sigma^+$ 的反粒子)，1962年找到了 $\bar{\Sigma}^-$ ( $\Sigma^-$ 的反粒子)。1971年找到了 $\bar{\Omega}^-$ ( $\Omega^-$ 的反粒子)。现在相对于强相互作用来说是稳定的十多个粒子，全都找到了和它们相对应的反粒子(见图2，图中采用了现在惯用的统一符号，符号上

面一短横表示反粒子，正负号表示粒子或反粒子的实际电荷。这样， $\Sigma^-$ 的反粒子记成 $\bar{\Sigma}^+$ )。

**何处存在反物质** 每个粒子都有它相对应的反粒子。这说明物质世界存在着一种正反对称性，这种“基本”粒子的实验总结出来的对称性质是否可以继续推广？是不是也存在反原子核、反原子和反物质？人们相信是存在的。在实验上也已找到反氦核( $\bar{d}$ ，由一个反质子和一个反中子组成)、反氦核( $\bar{H}^3$ )和反氦-3核( $\bar{H}e^3$ )。

宇宙空间是否存在反物质？何处存在反物质？这是现代科学研究的课题之一。现在有几种手段来进行探索：一种是在宇宙线中寻找从宇宙空间跑来的反原子核。通常是把乳胶片加上磁场用气球或人造卫星带上天去受宇宙线的轰击，然后回收分析，但一直到现在还没找到。另一种是通过对 $\gamma$ 射线暴丛的观测。所谓 $\gamma$ 射线暴丛就是在天空某些特定方位发现有能量在MeV上下的 $\gamma$ 光子在很短的时间(0.1—100秒)内强度有猛烈的增加。已发现的约四十多处，平均每年有五、六起。有人认为这是像彗星或小行星那样大小的固体反物质块和普通星体相碰撞的结果。还有一种是用望远镜进行观测。人们发现有的河外星系在中心部分有大量物质向外抛掷，有的还有明显的喷嘴。有人想像这可能是反物质与物质湮没的迹象。

阮同泽

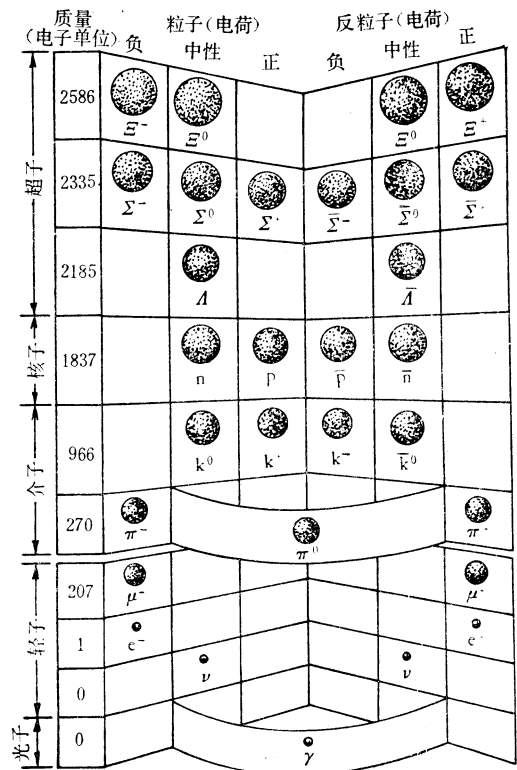


图2 粒子和反粒子