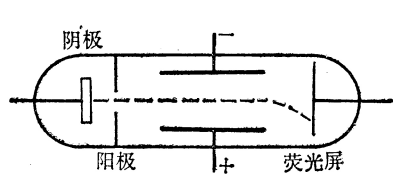


五彩缤纷的基本粒子(一)

徐德之

自从汤姆逊于 1897 年发现电子以来,人们在寻找基本粒子的历程中取得了丰硕的成果,新的粒子和新的物理现象层出不穷。到现在为止已找到了大约 300 种基本粒子。按照它们的相互作用的性质可分为四类:一、光子,它只参加电磁作用。二、轻子,它们是只参加电磁作用和弱作用的费米子。三、介子,它们是能参加强、电磁、弱作用的玻色子。四、重子,它们是能参加强、电磁、弱作用的费米子。除此而外还有中间玻色子和胶子等规范粒子(我们也可以把中间玻色子、胶子和光子看成一类,因为它们都是规范粒子,起着传递相互作用的作用。),但它们的存在只有旁证,而没有直接的证据。这里我们简单地来介绍一下这些粒子的发现过程和有关的物理现象。

1. 第一个露面的成员——电子 19 世纪末人们发现了一种能使荧光屏发亮的阴极射线。为了了解这种射线的本质,J.J. 汤姆逊于 1897 年做了一个实验。他把能产生这种射线的阴极装在一只真空玻璃管的一端,由它产生的阴极射线打在管子另一端的荧光屏上。在射线经过的路上放置一对金属板。当金属板带电时,射线就发生了偏转(图 1)。根据板上的电性和射线的



偏转方向,可以判断出这是一种带负电的粒子流。当时确定粒子的方法是测出它的

图 1

荷质比,即它所带的电荷和它的质量之比。汤姆逊测得此带负电粒子的荷质比比所有已测过的离子的荷质比都要大几千倍,(比如氢离子的荷质比大 2000 倍)所以他断定这是一种与离子不同的新的粒子,它带的电荷为基本电荷,质量则比氢离子小 2000 倍。这就是人们发现的第一个基本粒子——电子。后来的很多实验都证明了电子的存在,并测得其质量为 0.511MeV 。

2. 电磁场的粒子——光子 人们早就认识了电磁场的波动性。19 世纪末以前用电磁场的波动理论几乎解决了所有的光学问题。但应用此理论来解释黑体辐射的能量分布时,理论和实验发生了不可调和的矛盾。为了解决此矛盾,普朗克于 1901 年提出了一个假设,他设频率为 ν 的电磁波的能量只能是 $h\nu$ 的整数倍, h 称为普朗克常数,其值为 6.59×10^{-27} 尔格·秒。这意味着存在一个最小的能量单位,我们称它为能量子。用了这个假设后理论和实验符合得很好。但这样的假设

和传统的经典概念是不相容的,所以普朗克自己也不敢坚持它。但后来人们发现这种假设还能很好地解释光电效应,所以爱因斯坦于 1905 年明确地提出了光有粒子性这种粒子就是光子,它的能量为 $h\nu$ 、动量为 h/λ 。用光的粒子性还可解释康普顿散射等实验,所以光的粒子性是有坚实的物理实验基础的。

3. 原子核的组份——质子和中子 电子被发现后,人们就认识到原子是由带负电的电子和另外一种质量很大的、带正电的粒子——离子所构成的,正负电荷的量是相等的,所以原子呈中性。但电子在原子中是怎样分布的呢?最早汤姆逊设想电子一粒一粒均匀地埋在带正电的离子中,但这种设想很快为卢瑟福的实验否定了。1911 年卢瑟福用 α 粒子*去轰击金箔,并测量散射后的 α 粒子的角分布,结果发现大角度散射的几率比较大。从理论分析可知,只有当电子在正离子外运动,而 α 穿过正离子和电子之间的空隙时,才会发生这样的散射。于是卢瑟福提出了这样的原子模型:正离子是原子的核,电子则绕着核转。当时已知道的最轻的原子是氢,所以他认为氢的离子是一种基本粒子,后来称为质子,其它的原子核应包含着质子。后来在 1919 年,他用 α 粒子去轰击氮,果然打出了一个质子。以后,从别的原子核中也打出了质子,这证明了原子核中的确有质子。

但原子核不应该仅有质子组成,因为原子核的质量并不与所带的正电量成正比,如氢核的电荷为氢核的两倍,但质量都为四倍。所以原子核中一定还有其它的物质。卢瑟福认为这种物质是一种质量和质子差不多的、中性的粒子,他称之为中子。但寻找中子的实验都告失败,原因显然是因为它是中性的,没有留下直接可见的踪迹。

1931 年,约里奥·居里夫妇在用 α 轰击铍时发现,从放在一段距离外的、没有受到 α 轰击的含氢物质中放出了质子。质子是带正电的,所以很容易地被观察到了。但在铍和含氢物质之间没有发现任何带电粒子,这表明铍在 α 粒子轰击下放出了一种中性粒子,含氢物质中的质子就是被它打出来的。当时已知的中性粒子只有光子,所以居里夫妇以为它是光子,但进一步的理论计算表明这是不对的。和卢瑟福曾经一起工作过的查德威克根据卢瑟福的想法马上指出,这就是十年前卢瑟福曾经讨论过的中子、并且根据铍在 α 轰击

* α 粒子为由两个质子和两个中子构成的氦核,它带着两个单位正电荷,质量约为氢原子质量的四倍。

下放出中子后形成的碳核的反冲值,用能动量守恒定律算得它的质量的确和质子差不多.于是中子的存在得到了证明,而原子核的构成也清楚了,它是由质子和中子构成的.

4.粒子的孪生兄弟——反粒子 反粒子的存在首先是在理论上预言的. 1928年,狄拉克提出了高速运动的电子所满足的量子力学方程——狄拉克方程.他发现此方程的解有两类:一类能量为正的,可以从零到正无穷大;另一类能量为负的,可以从零到负无穷大.这样,电子可以处于能量从负无穷大到正无穷大之间的任意一个态上.但我们知道处于高能态上的粒子会自发地跳向低能态.现在,电子没有最低能态,它就会无止境地跳向更低的能态,因此它就没有一个稳定状态了,这显然是与事实不符的.

当时,泡利的不相容原理已提出(1925年).这条原理是说,在一个量子力学态上只能有一个自旋为 $1/2$ 的费米子.

狄拉克考虑了泡利原理后,提出了一个解决负能困难的想法.他认为负能态都被电子占据了,所以在正能态上的电子不能再向它跃迁,这样,就可以有稳定的电子态,由负能级引起的困难就解决了,并且还预言了存在反电子.这个反电子是负电子海洋中的一个空穴.因为负电子背景没有直接可观察到的效应,所以当此背景缺了一个电子而形成空穴时,我们能测量到的只是这个空穴状态相对于负电子海洋(真空态)的差别.现在它相对于真空态少了电荷 $-e$ 、能量 $-E$,这就是多了电荷 $+e$ 、能量 $+E$,所以这是一个处于电荷为 $+e$ 、能量为 $+E$ 状态的粒子,狄拉克称它为反电子.因为狄拉克方程在描写电子的运动方面很成功,所以狄拉克坚信反电子是存在的.1932年美国物理学家安德逊在云雾室中的确找到了反电子.以后,对其它的粒子也找到了各自的反粒子.正反粒子的质量、寿命、自旋、同位旋等量子数是一样的,但电荷、奇异数等量子数则反号.

5.神秘的能动量携带者——中微子 20世纪以来,人们对原子核的放射性进行了大量的研究,发现有一种过程放出一个电子,使原子核变成另一种元素的原子核(称 β 衰变).既然原子核中没有游离的电子,那么自然地就认为电子是由中子放出的.中子放出电子变成质子.初看起来这是一个两体衰变: $n \rightarrow p + e$,但一分析就可清楚这是不对的.首先,角动量显然是不守恒的.其次,实验发现这样的过程也不满足能动量守恒定律.为了使能动量守恒, p, e 有一定的能量,但实验上测得它们的能量有一个分布.为了解决此矛盾,泡利于1931年提出 β 衰变是三体衰变,除了衰变出 p, e 外,还有一个中性粒子.因为中子和质子的质量差很小,所以此粒子的质量很小.费米按三体衰变方式,用量子力学方法计算了 Bi^{210} 的 β 衰变中电子的

能谱(见图2),它和实验符合得很好.

费米的计算结果虽然和实验符合得很好,但要找到这种中性粒子(称中微子)却很不容易,一个原因是

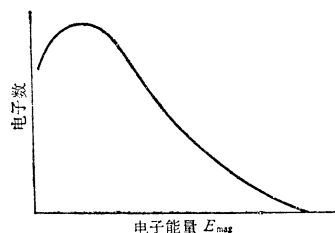


图 2

它是中性的,不会留下可直接看到的径迹;另一个原因是它和别的物质的作用很弱,它可以很顺利地穿过地壳,所以“捕捉”到它的机会很小.为了

“捉”到它应从两方面着手:一方面增强中微子流的强度(只要使 β 衰变数目增多即可)和加大靶的体积,以增加碰撞的机会;另一方面完善探测手段,以保证准确无遗地把发生的反应捕捉到,并排除非中微子事例.1955—1956年间物理学家柯万和雷尼斯成功地找到了反中微子.不仅如此,后来人们还发现中微子不止一种.

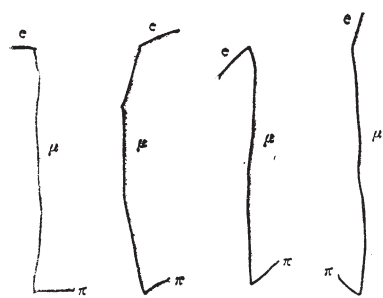
1937年人们曾在宇宙线中发现一种自旋为 $1/2$ 的粒子,称为 μ 子,它的性质和电子很像.从各种已知的量子数守恒条件来说,它应能发生如下的衰变: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu$,但实验上始终没有发现这种衰变.实验测定, μ 的衰变中98.6%是 $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_\mu$,1.4%是 $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_\mu \gamma$.为解释第一个过程是禁戒的,最简单的办法是引进一种守恒的量子数.这里引进了一个 μ 数和一个 e 数,并令 μ^- 的 μ 数为1; e 数为零,而电子的 μ 数为零; e 数为1.反粒子的 μ, e 数反号.这样,第一个过程显然是禁戒的,因为 μ, e 数都不守恒.但其余两个过程也要被禁戒了,因为不管 ν 的 μ, e 数是多少, $\nu \bar{\nu}$ 的 μ, e 数总为零,所以这两个过程的 μ, e 数也不守恒.为解决此困难,人们大胆地猜想其中的 ν 和 $\bar{\nu}$ 是两种粒子,而不是互为反粒子.如设一种为 ν_μ ,它的 μ 数为1, e 数为零;另一种为 ν_e ,它的 μ 数为零, e 数为1,于是后两个过程为 $\mu^- \rightarrow e \nu_\mu \bar{\nu}_e$ 和 $\mu^- \rightarrow e \bar{\nu}_\mu \bar{\nu}_e \gamma$.它们的 μ, e 数都是守恒的,所以是允许发生的.这样的猜测对不对呢?这必须由实验来回答.

下面我们将要讲到,1947年发现了一种传递强作用的粒子—— π 介子,它几乎百分之百地衰变为 μ 子和中微子: $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$.如果我们的猜测是对的,则为使 μ, e 数守恒,这里的 $\bar{\nu}$ 应为 $\bar{\nu}_\mu$,而用它来和质子发生碰撞时只有过程 $\bar{\nu}_\mu p \rightarrow \mu^+ n$,而没有过程 $\bar{\nu}_\mu p \rightarrow e^+ n$.1962年莱德曼、施瓦茨和斯坦贝尔格证实了这一点,于是两种中微子被确立了.1975年发现了重轻子后,人们认为也应有相应的中微子 ν_τ ,但迄今还没有得到明确的证据.

6.被人们误解的粒子—— μ 子 原子核中的核子(质子和中子)是被一种很强的力束缚在一起的.1935

年,日本的汤川秀树提出核子之间的强作用力是由一种质量约为电子质量 200 倍的玻色子来传递的,就象电磁作用是由光子来传递的一样。1937 年,安德逊和尼特迈耶尔在宇宙线中发现了一种质量为 $200m_e$ 的带电粒子。由于其质量介于电子和质子之间,所以他们称之为介子。这一发现使当时的物理学家们非常兴奋,以为它就是汤川秀树所预言的粒子。但经过十年细致的研究,发现这种粒子的行为不象是一种强作用粒子。它能在物质中飞行很长的距离,这表示它和核的作用力很弱,因而是无法把核子结合在一起的,可见这种粒子不是汤川预言的粒子。实际上它的性质和电子很相近,所以后来将它和电子一起划入轻子类,这就是 μ 子。1975 年又发现了重轻子 τ , 它的性质和 μ 、 e 一样,都是不和其它粒子发生强作用的费米子,所以也放入轻子类。但它的质量为 1.78GeV , 比许多重子质量还要大。所以轻子这个名词已失去它原来的意义,只表示这样一类粒子。

7. 核力的传递者—— π 介子 既然 μ 不传递强作用,那么是什么粒子传递的呢? 1947 年,鲍威尔、奥切



埃利尼及莱梯斯等人用乳胶片探测带电粒子的新技术,在宇宙线中又发现了一种介子。他们得到了一些相同事例的照片(见图 3)。

图 3

进来粒子的径迹只有 70 微米左右。在它终端产生了一个带电粒子,它的径迹的长度几乎每张照片上都是 400 微米左右,这说明它的能能量是确定的,所以这是一个二体衰变的产物,另一个粒子是中性的。测定了这些径迹的长度和电离密度,就可以确定衰变出的带电粒子即为 μ 子,而进来的粒子是一种质量约为 $300m_e$ 的新粒子,他们称之为 π 介子。它和核子有很强作用,所以他们断定这正是汤川秀树预言的粒子。这种粒子有三种电荷态: π^+ 、 π^0 、 π^- 。

(待续)