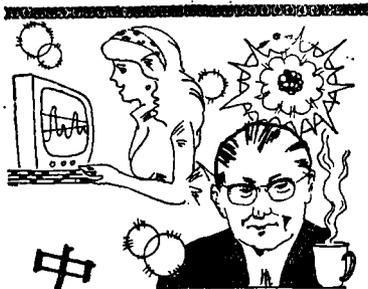


1930年12月泡利提出中微子的假设以来,已整整60年了。今天,中微子这个没有大小、没有质量(至少尚未测到)、没有电荷的“怪”粒子,不再是科学家的一种假设,而是充满整个宇宙的稳定粒子。它们与带电轻子、夸克以及电弱作用的传递子-光子,中间玻色子 Z^0 , W^\pm , 强色相互作用的传递子-胶子,引力作用的传递子-引力子一起,支配着整个宇宙。

一、中微子的引入——天才的假设

中微子的引入,还得从原子核的放射性说起。1886年,人们发现了原子核的放射现象。经过一些年的研究,人们证实 α 射线由氦核组成, γ 射线即为高能光子,而 β 射线可以是电子(β^-),也可以是正电子(β^+)。 α 衰变中的 α 粒子和 γ 衰变中的高能光子均有分立的能量,该能量等于原子核始末态(或称母核和子核)的能量差,并符合能量和动量守恒定律。但 β 衰变中的电子或正电子却有连续的能谱,能量的最大值为 β 衰变前后母核与子核之间的能量差,最小值为零,分布的峰值约在电子最大能量 E_{\max} 的 $1/3$ 处,(见图1)。现在要问,除了电子或正电子带走的那部分能量外,另一部分的能量到哪里去了?研究表明,在 β 衰变中不能解释的现象除了能谱外,还有原子核的自旋和统计。如果承认原子核 β 衰变中只放出一个电子(具有半整数 $1/2$ 自旋),则由角动量守恒原理,子核与母核的自旋之差应为半整数,它们所遵守的统计就应该不同,因为整数自旋的粒子遵守玻色统计,半整数自旋的粒子遵守费米统计。但实验表明, β 衰变中的子核与母核的自旋相差总是整数,并且遵守同一种统计。这个现象使当时的物理学家迷惑了。20年代,有些物理学家开始怀疑能量守恒定律,有的认为至少与 β 衰变有关的一些方面不能应用,有的甚至主张废弃。那么是否存在其它的替代办法呢?就在这危难之中,天才的物理学家泡利于1930年12月提出了一种新建议,他在给从事放射性研究的朋友的信中写道:“我偶然想到一个挽救守恒的非同寻常的办法……,这就是可能有一种电中性的粒子存在,……它具有自旋为 $1/2$, 并遵守不相容原理,……假定在 β 衰变过程中,这种粒子与电子一同放出,这两个粒子的能量之和保持不变,那末 β 能谱就变得可以理解了”,泡利还想到,这种粒子与物质作用很弱,以致在实验中很难



中微子六十年

童国梁
学部委员唐孝威教授主持

>◇物理学史◇<

探测到它。

以后,物理学家逐步深入地估计了这种新粒子的质量,明白这种粒子的质量为零(直到现在,还没有中微子的静止质量不为零的确实证据)。为了与查德威克发现的有质量的不带电的粒子——中子相区别,费米把泡利所假设的质量为零(或极小)的粒子取名为“中微子”(neutrino),按其意大利文的意思是“微小中性的一个”。

费米在泡利提出中微子假设之后,很快建立了 β 衰变理论,认为 $\beta(\beta^+)$ 衰变可看成原子核的一个中子(质子)放射出一个电子(正电子)和一个中微子的过程。在泡利的假设中, β^\pm 衰变中的电子、正电子和中微子都是自旋为 $1/2$ 的费米子。从相对论的狄拉克方程知道,每个自旋为 $1/2$ 的粒子都有一个反粒子与它组成对,如电子和正电子。质子和中子有它们的反粒子,中微子(ν)也有它的反粒子-反中微子($\bar{\nu}$)。于是 β^- 衰变可写成 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$, 而 β^+ 衰变可以写成 $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ 。

实验发现,在 β^- 衰变中放射的质子和电子不以完全相反的方向射出,而是以一定角度射出,两者在合成的方向上有一小的净动量,若无中微子存在的

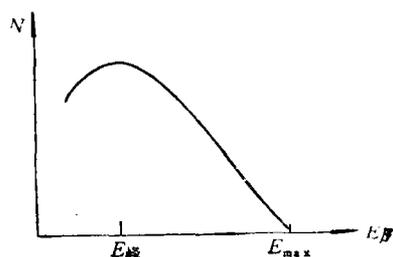


图1 β 衰变能谱

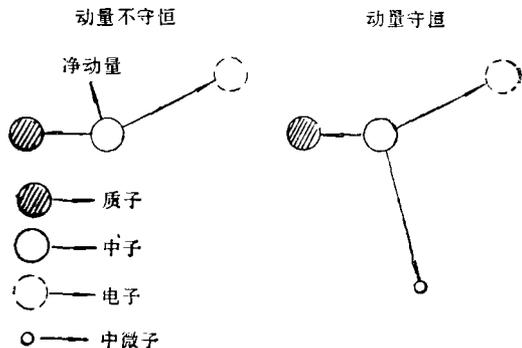


图2 中子 β 衰变 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

假设,此净动量可谓无中生有,违背动量守恒定律。若在电子和质子外,还有中微子生成,则中微子将向某一方向飞出,可与质子和电子合成,取得动量平衡(见图2)。换句话说,由于引入了中微子,动量守恒定律得以维持下去。

我们知道,一个孤立体系内的净重粒子数保持不变,那么是否也有一个“轻粒子数”守恒?如果不引入中微子就不能有这个规律。仍以中子衰变为例,中子的重子数为1,轻子数为0,衰变产物质子的重子数为1,轻子数为0;而电子的重子数为0,轻子数为+1,若不考虑到中微子的产生,那么衰变前后重子数是守恒的(即为+1),但轻子数就不守恒(衰变前,轻子数为0,但衰变后为+1)。若令中微子的轻子数为+1,反中微子的轻子数为-1, β^\pm 衰变过程中的轻子数守恒。

中微子与反中微子的存在,拯救了能量、动量和角动量守恒定律,也使轻子数守恒定律成为可能。既然那么迷人,物理学家就很难拒绝这种粒子的诱惑了。

二、这种美妙的粒子是真的存在吗?

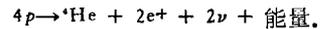
中微子和反中微子的引入,在物理学上是何等重要。但探测这种粒子是十分困难的。它不参加强相互作用、电磁相互作用,甚至不参加引力作用只参加几率极小的弱相互作用。对于能量为 MeV 量级的中微子,截面 $\sigma \sim 10^{-43} \text{cm}^2$,它在水中的平均自由程约为 10^{20}cm ,或为 100 光年,可见这种相互作用的微弱。

为了提高中微子相互作用的反应率,有两种途径:一是增加靶子原子核的数目,一是增加入射中微子的流量。我国学者王金昌曾首先提出测量 K-俘获原子的反冲来确定中微子存在的间接方法。1959年,以雷恩斯和柯万为首的美国物理学家小组才第一次观察到这种中微子相互作用。他们利用 1000 兆瓦的反应堆作为反中微子源,其铀裂变产物是富中子性的并发生大量的 β 衰变,放射电子和反中微子。每次裂变平均产生能量为 1 Mev 的反中微子,此反应堆可提供 $10^{13} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的反中微子束。他们用氯化镭和水作靶,探测反应 $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ 。

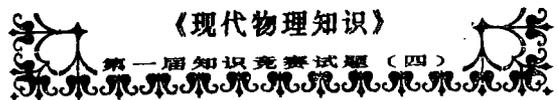
所产生的正电子因电离过程而很快静止,并与探测介质中的电子形成电子偶素。电子偶素湮灭成两个 γ 光子。这些光子通过康普顿散射产生快电子,被液体闪烁体吸收。这个过程总共需要 10^{-9} 秒 (ns),于是反应所产生的正电子发生一个迅发脉冲而被闪烁体记录下来。在反应中产生的中子与水溶液中质子连续碰撞而慢化,慢化后的中子与镭碰时发生辐射吸收,放射出总能量为 9 Mev 的三个或四个光子。在实验中,反应发生后,马上 (10^{-9} 秒) 出现两个各为 0.5 Mev 的光子(迅发脉冲),几微秒 (10^{-6} 秒) 后出现三个(或四个)总能量为 9 Mev 的光子(缓发脉冲)。由于没有一种基本粒子的一次相互作用会产生这样讯号组合,所以一旦探测到这样的讯号组合,就能得出一个反中

微子被质子吸收的结论,即确认了反中微子的存在雷恩斯的这个实验被人们称为 20 世纪物理学的重要实验之一。

上面介绍的反中微子 ($\bar{\nu}$) 的探测,是实验中确认中微子的重要事件。那么,如何在实验中探测中微子 (ν)? 首先让我们把眼光放向宇宙。根据现代天体理论,太阳的能量来自氢核聚合。所谓质子-质子反应,反应的分支可以有不同的细节,但其本质都是四个氢核转变为一个氦核的过程。在这个过程中放出的能量维持了太阳中心 1500 万度的高温。为了保持反应过程中的电荷守恒和轻子数守恒,反应过程应为



所以在太阳中,每消耗两个氢原子核,便有一个中微子产生。在氢融合成氦时,有 0.71% 的质量转变为能量。根据垂直于太阳光的地球表面吸收到的太阳能 ($7.12 \text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。可以推知太阳每秒钟辐射的能量 ($3.78 \times 10^{26} \text{J}/\text{s}$) 每秒钟消耗 3.6×10^{38} 个氢核,放出 1.8×10^{39} 个中微子,已知日地的距离 (≈ 1.4 亿公里),又可推出地球表面可得到的太阳中微子流强为 $6.6 \times 10^{10}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。太阳有如此丰富的中微子,物理学家自然想利用探测反中微子类似的方法去探测,但需利用 $\nu + n \rightarrow p + e^-$ 反应。物理学家选用 ${}^{37}\text{Cl}$ 元素作靶,其核包含 17 个质子和 20 个中子。这时反应为 $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ 。 ${}^{37}\text{Cl}$ 中的一个中子吸收了中微子后变成质子并放出一个电子。实验上采用四氯化二碳 (C_2Cl_4) 为探测介质,氩是惰性元素,一旦生成,便自动脱离氯化物分子,最后聚合为小的氩气泡。 ${}^{37}\text{Ar}$ 具有放射性,即使只收集到极少量,亦能因它的放射性而加以识别,美国物理学家戴维斯等人就是利用这种技术探测到了中微子,并且证明,中微子可以引起的现象(产生 ${}^{37}\text{Ar}$ 不能由反中微子(雷恩斯等使用的由反应堆中产生的)再现,这些事实表明确实存在两种不同的中微子,即中微子与反中微子(待续)。



1 标准模型理论中有 ___ 个参数。在实验中定得很准的有 ___、___、___、___、___; 定得相当准的有 ___、___、___; 准确度不高的有 ___、___、___、___、___; 准确度比较差的有 ___、___。

2 概述杨关于彗核的“沙堆模型”理论。



• 参赛标记 •