

中微子是否存在静止质量,对天体物理、粒子物理等都有重大影响.它引起了科学工作者的极大兴趣,实验物理工作者正千方百计想从实验上来确定它.

### 一、问题的起由

三十年代初,在做 $\beta$ 衰变实验时,发现 $\beta$ 谱是连续的.我们知道,衰变前后的原子核分别处于一定的能态,它们的能量差就应等于衰变产物的能量,如果衰变产物仅是一个粒子,则该粒子的能量应为一个定值.但实验上却发现物质衰变出的 $\beta$ 粒子的能量从零一直到

两能级之差的能量值都有分布.我们知道,能量守恒律是千真万确的,那么,除能谱终端以外,其余电子所应带的能量损失于何处?实验确定,该能量并不损失于电子行进过程中,也不是损失于与探测器的相互作用中,只能认为它以一种新的形式损失掉.1933年,Pauli在Soivay会议上正式提出了中微子假设,认为原子核在发射 $\beta$ 粒子的同时伴随发射出一种中性的微小粒子——中微子,它与 $\beta$ 粒子一起统计性地分配衰变核给与的能量.这一假设,完全解释了 $\beta$ 谱的连续性.同时他提出,中微子的质量是很小的,充其量不会超过电子的质量.紧接着,F. Perrin根据连续谱的形状得出结论,中微子就像光子一样,它的静止质量为零,但中微子的自旋为 $1/2$ .从此以后,所有实验证据指出,中微子的静止质量是非常小的,可能就等于零.因此,为了简化起见,在经典的 $\beta$ 衰变计算中,是把中微子的静止质量忽略不计的.但是,在 $\beta$ 衰变的当今理论和其它弱相互作用中,以及天体物理中,中微子静止质量的设想占有重要位置.

首先,按照两分量中微子理论,如果轻子数是守恒的,那么中微子的静止质量应该为零.但是实验上已确定包含在 $\beta$ 衰变中的中微子与 $\mu$ 子衰变中的中微子是两种不同的粒子,新发现的 $\tau$ 子的中微子也可能是

不同的.这不禁引起人们考虑是什么特征和性质使这些轻的中性粒子有所不同?是不是可能因质量关系?

著名的“太阳中微子谜”的实验引起这样的猜想,是否是因为中微子具有质量,且不同的中微子之间存在质量差,因而使中微子衰变或振荡,使测量电子中微子数时比预料的约少 $2/3$ ?所有这些问题,有待实验作出回答.

现有的实验给出三种中微子的质量范围或质量限如下:

$$14\text{eV} < m(\nu_e) < 46\text{eV} \quad m(\nu_\mu) < 0.52\text{MeV} \\ m(\nu_\tau) < 250\text{MeV}$$

在历史上,对电子中微子质量的测量如表1所列.

表1 电子中微子质量测量的历史记录

$m(\nu_e)$	方法	年代
$<250\text{eV}$	磁谱仪	1952年
$<300-500\text{eV}$	磁谱仪	1969年
$\approx 320\text{eV}$	静电积分谱仪	1969年
$380\text{eV}$	$S_i(L_i)$ 谱仪	1972年
$<55\text{eV}$ (90% C. L.)	磁谱仪	1972年
$35\text{eV}$ (90% C. L.)	磁谱仪	1976年
$14 < < 46\text{eV}$	磁谱仪	1980年
$<65\text{eV}$	$S_i(L_i)$ 谱仪	1981年

### 二、测量方法

#### 1. 中微子振荡法

如果中微子有非零质量,它就会导致中微子振荡或衰变.电子中微子到 $\mu$ 子中微子变换的几率为

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta_c \sin^2 \left( \frac{m_1^2 - m_2^2}{4E} L \right) \quad (1)$$

或

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta_c \sin^2 \left( 1.27 \Delta^2 \frac{L}{E} \right) \quad (1')$$

这里  $\Delta^2 = m_1^2 - m_2^2$ ,  $m_1, m_2$  分别为两类中微子的质量,  $E$  为中微子能量,  $L$  和  $t$  分别表示中微子产生后所经历的路程和时间.当两类中微子的质量都为零或相等时,则互换几率  $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = 0$ , 否则就有互换的可能性.实验可利用加速器产生的中微子,也可用太阳中微子来做.当测到这种振荡时,得知两类中微子之间存在质量差,也说明它们具有非零质量,但不能得出它们各自质量的绝对值.

#### 2. 反冲核法

对于 $\nu_e$ ,测量 $\beta$ 衰变中或电子俘获中的核反冲动能;对于 $\nu_\mu$ ,则在静止或飞行的 $\pi$ 衰变中测量.反冲核法测电子中微子质量是基于发射 $\beta$ 粒子或俘获电子与反冲核、中微子之间的能量、动量关系的基础上的,测出电子和反冲核的能量、动量,从而确定中微子所带走的能量、动量,进而确定其质量.这个方法的固有困难是要制备极薄的反冲表面,测量反冲核能谱的精度

也不可能达到很高，但在历史上还是由该方法测量了  $\beta$  衰变中中微子所带走的能量、动量，得  $E = pc$  的关系，和光子一样，静止质量为零。

### 3. 能谱形状法

通过对  $\beta$  谱的终端能量附近的谱形的研究，来确定电子中微子的静止质量。因为

$$N(p_i) = AF^2 \{ w_1(E_0 - E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_\nu^2} + w_2(E_0 - E^* - E) \cdot \sqrt{(E_0 - E^* - E)^2 - m_\nu^2} \} + B$$

这里  $N(p_i)$  是对动量  $p_i$  时的计数， $A$  为常数  $F$  为库仑因子， $w_1$ 、 $w_2$  分别为  $\beta$  跃迁到基态和激发态的分支比， $E_0$  为  $\beta$  谱终端能量， $E^*$  为激发态能量， $m_\nu$  为中微子质量， $B$  为本底。当以  $\sqrt{\frac{N}{p^2 F}}$  对  $\beta$  能量  $E$  作居里描绘时，若  $m_\nu = 0$ ，则得到一直线，当  $m_\nu$  有不同的值时，则居里描绘的能量终端区将出现不同的弯曲曲线。如图一所示实验上就是测量终端能区附近的曲线

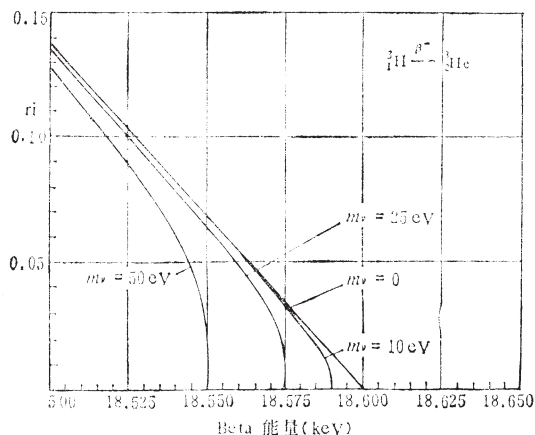


图1 不同的中微子质量对  $^3\text{H}\beta$  谱居里描绘的影响  
形状来确定中微子质量的。确定  $m(\nu_e)$  的精度取决于以下几个因素：能量分辨率  $\Delta E$ ，要求  $\Delta E \leq m(\nu_e)$ ；统计误差  $\sqrt{1/N}$ ，应通过提高亮度来提高计数率；在 高能区，减少本底极为重要。

$\beta$  谱的测量可用  $\beta$  磁谱仪或  $S_i(L_i)$  半导体谱仪。磁谱仪有好的能量分辨率，但效率较低，且要对跃迁到不同激发态的成分（能量和强度）作修正。 $S_i(L_i)$  谱仪测  $\beta$  衰变的优点是探测效率高，近于 100%；当把源注入半导体内部后再测量时无需进行终态原子结构修正。但它明显的缺点是能量分辨率受探测器中离子对的统计因子的限制，对于终端能量为 18.6keV 的  $^3\text{H}\beta$  衰变，最好的情况下， $\Delta E$  不小于 250eV。

中微子质量测量的工作，很多国家的实验工作者正在抢时间做，预料在较短的时间内将会有实验结果陆续发表。