

# 自然界存在 3 种不同类型中微子的实验证据

何景棠

(中国科学院高能物理研究所)

## 一、证实电子中微子存在的实验

中微子是泡利于 1930 年为了解释核的  $\beta$  衰变中电子的能量是一个连续谱而假设存在的粒子,可是人们一直未能从实验上证明中微子的存在。1941 年,王淦昌先生建议用原子核的 K 电子俘获测原子核的反冲能量来证明中微子的存在。由于抗日战争时期,在中国不可能进行实验,王淦昌只好将他的建议从贵州寄给美国《物理评论》,文章于 1942 年发表。许多实验组采用王淦昌的建议,经历了 10 年,在 1952 年实验获得成功,间接证明了中微子是一个客观存在的粒子。

1956 年,莱因斯和考万利用核反应堆作中微子源,产生反应:

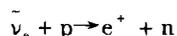


图 1 是莱因斯等人实验所采用的装置。采用二氧化钚和水作靶、中子慢化剂和吸收体,采用液体闪

烁体作探测器,探测由这个反应产生的正电子和中子;正电子湮灭产生两个能量为 0.511MeV 的  $\gamma$  射线,由于两个  $\gamma$  射线同时产生,因此,利用这两个同

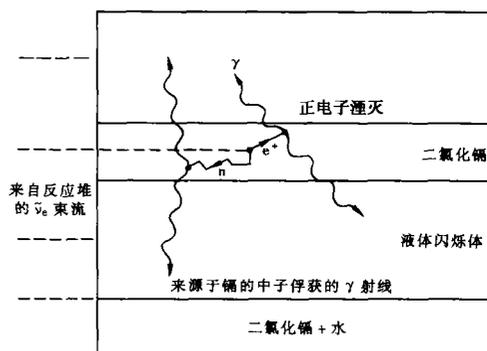


图 1 莱因斯和考万证实存在电子中微子的实验装置示意图

烁体的研究,电子波的波长只有  $0.004\mu\text{m}$ ,比可见光短 10 万倍左右,因而利用电子波来代替可见光制成了电子显微镜。现有的电子显微镜能直接看到如蛋白质一类的大分子。电子显微镜是利用电子波通过轴对称的不均匀电场和磁场组成的静电透镜、磁透镜,使电子波折射后重新聚焦成像并达到放大的作用的。电子显微镜的高放大倍数和分辨本领,使它在现代工农业生产和科学研究中日益成为一种重要的工具。在医学和生物方面,可以用它来研究病毒和细胞组织的精细结构,还可以用来研究蛋白质及其他有机物质的分子结构;在金属物理方面,电子显微镜可以用来研究各种合金材料的结构、晶体的缺陷、位错和材料断面分析;在地质、矿物、冶金、化学、建筑材料以及半导体材料的研究中,电子显微镜也有着极广泛的应用。电子显微镜又分为透射式和扫描

式。随着近代物理学的发展,根据量子力学中的隧道效应,又研制出了扫描隧道显微镜 (STM),导致了显微领域里的一场革命,并在它的基础上研制出一系列的扫描探针显微镜(如原子力显微镜、磁力显微镜和激光力显微镜等)。STM 的出现使人类第一次可以实时地观测单个原子在物质表面的排列状态和与表面电子行为有关的物理性质和化学性质。

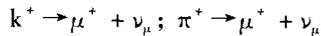
物理学普遍存在于高级的、复杂的物质运动(及机构)之中,从微观世界到天体宇宙,从家用电器到工业设备,从信息探测到过程控制,例子不胜枚举。可以认为,物理学是除数学以外一切自然科学的基础,也是当代工程技术的重大支柱。所以,物理学是工院校学生的一门重要的基础课。只要我们认识到高级、复杂与基础的关系,我们也会从学习物理学中得到乐趣。

时产生的  $\gamma$  射线作瞬时符合, 作为记录事例的触发信号。随后, 中子经过慢化, 被镉核吸收, 同时放出  $\gamma$  射线。由于中子慢化需要时间, 因此, 利用两个  $0.511\text{MeV}$  的  $\gamma$  射线作瞬时快符合, 然后与延时发射的中子俘获高能  $\gamma$  射线作慢符合来选取事例, 证实存在  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  反应。这是存在电子中微子的直接证据。

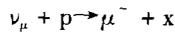
由于上述实验的成功, 莱因斯获得 1995 年诺贝尔物理学奖。

## 二、证实 $\mu$ 中微子存在的实验

$\beta$  衰变放出中微子,  $\mu$  子衰变也放出中微子, 究竟这两类过程放出的中微子是不是同一类中微子? 斯坦博格、莱德曼和施瓦茨于 1960 年设计了一个实验作了上述检验。他们首先设计和建造了  $\mu$  中微子束流: 利用高能加速器的高能质子打击靶产生次级粒子  $k$  介子和  $\pi$  介子, 让  $k$  介子和  $\pi$  介子通过偏转磁铁, 可以选择  $k$  介子和  $\pi$  介子的电荷符号, 例如可以选择  $k^+$  介子和  $\pi^+$  介子, 这些介子随后在衰变通道中衰变:



衰变通道的后部是一个吸收体, 它的厚度足够长, 可以把  $\mu$  子全部吸收掉。由于  $\nu_\mu$  是弱作用粒子, 它与吸收体几乎不产生作用而通过吸收体, 所以从吸收体出来的几乎是纯的  $\mu$  中微子束。斯坦博格等人采用平板火花室作为探测器, 平板作为靶物质,  $\nu$  与靶物质相互作用产生  $\mu^-$ :



式中  $x$  为任何强子。由于  $\mu^-$  只有电磁相互作用没有强相互作用, 因此射程较长, 可以穿透多层平板, 而在火花室中留下放电的径迹。

如果  $\nu_\mu$  和  $\nu_e$  是同一类粒子, 那么  $\nu_e$  与靶相互作用产生电子:



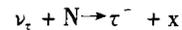
由于电子穿过平板时会产生电磁簇射, 因此在火花室中会看到电子产生的簇射径迹。斯坦博格等人的实验结果是在实验误差范围内, 只看到  $\mu$  子的径迹, 而没有看到电子产生的簇射。结论是核  $\beta$  衰变产生的中微子与  $k, \pi$  介子衰变产生的中微子是两种不同类型的中微子。后来人们把核  $\beta$  衰变产生的中微子称为电子中微子, 而把  $k, \pi$  介子衰变产生的中微子称为  $\mu$  中微子。

由于在世界上第一次建成  $\mu$  中微子束流并用实

验证实存在两种类型的中微子, 斯坦博格、莱德曼和施瓦茨获得了 1988 年诺贝尔物理学奖。

## 三、证实 $\tau$ 中微子存在的实验

1976 年, 佩尔发现了  $\tau$  轻子。根据 3 代轻子的分类, 与  $\tau$  轻子相对应, 应该存在一个  $\tau$  中微子。从  $\tau$  轻子的  $3\pi$  和  $5\pi$  衰变, 人们测量到  $3\pi$  或  $5\pi$  的能量和动量, 利用测量的结果, 求出其不变质量, 说明在  $\tau$  轻子的  $3\pi$  或  $5\pi$  衰变模式中, 有能量和动量的丢失。人们认为是看不见的  $\tau$  中微子带走了这些丢失的能量和动量, 从而间接地说明在  $\tau$  轻子衰变中, 放出对应的  $\tau$  中微子。人们并不满足这种间接的证据。2000 年, 费米实验室的 DONUT 实验利用空间分辨率可达 0.5 微米的核乳胶作靶和探测器, 利用费米实验室的 Tevatron 高能加速器产生的 800GeV 的质子打击靶, 由于质子的能量足够高, 可以产生大量的  $D_s$  介子,  $D_s$  介子衰变可产生较多的  $\tau$  轻子和  $\tau$  中微子,  $\tau$  中微子与核乳胶相互作用可产生下列反应:



其后  $\tau^- \rightarrow 3\pi\nu_\tau$  或  $\tau^- \rightarrow 5\pi\nu_\tau$ 。在核乳胶后面放一个磁谱仪, 可记录  $3\pi$  或  $5\pi$  的径迹, 由  $3\pi$  或  $5\pi$  的径迹往前寻找, 可以找到相互作用顶点。由于  $\tau$  轻子的寿命非常短, 只有约  $10^{-13}$  秒, 虽然有相对论寿命延长, 但  $\tau$  轻子从产生到衰变走过的路程只有几十微米到几毫米。核乳胶的空间分辨率可达到 0.5 微米, 因此, 可以记录到它从产生点到衰变点的径迹。图 2 是 DONUT 实验探测  $\tau$  轻子径迹的示意图。

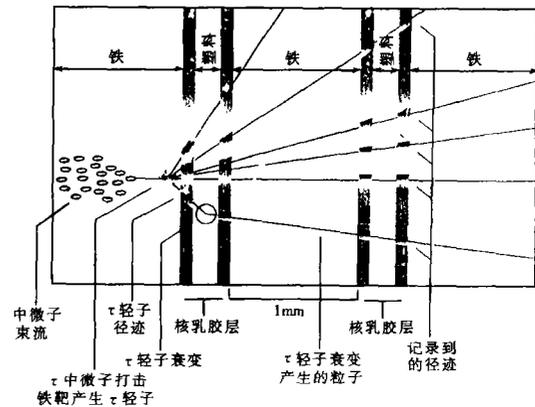


图 2 DONUT 实验利用核乳胶与铁板夹层作靶和探测器, 记录到  $\tau$  中微子束流产生  $\tau$  轻子,  $\tau$  轻子随后衰变产生径迹的示意图

2000 年底, DONUT 实验宣布, 他们探测到 4 个  $\nu_e$  产生  $\tau$  轻子,  $\tau$  轻子随后衰变的事例。这是存在  $\tau$

现代物理知识

中微子的直接实验证据。

#### 四、中微子的反粒子是什么

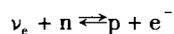
如果中微子的质量为零,那么只有左手的中微子,没有右手的中微子;只有右手的反中微子,没有左手的反中微子。这样分类的中微子叫狄拉克中微子,即中微子与反中微子是不同的粒了。近年来,太阳中微子丢失和大气  $\mu$  中微子丢失的实验结果表明,存在中微子振荡现象,即中微子质量不是零,中微子具有质量。如果中微子有质量,则同时有左手和右手的中微子,以及左手和右手的反中微子,那么中微子的反粒子可能就是自己。这样分类的中微子叫马约拉纳中微子。

如果中微子的反粒子是它自己的话,就存在无中微子发射的双  $\beta$  衰变。目前已经进行了大量实验,但是仍然没有探测到无中微子发射的双  $\beta$  衰变事例,所以,中微子的反粒子是什么? 仍然是一个不解之谜。

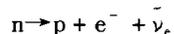
#### 五、宇宙演化理论预言,自然界的中微子种类只能是 $N_\nu \leq 4$

标准的宇宙演化理论认为,目前的宇宙是在约 150 亿年以前由大爆炸产生的。大爆炸产生时,强相互作用,电磁相互作用,弱相互作用,引力相互作用是统一的。随着宇宙的膨胀,温度逐渐冷却,统一对称的相互作用破缺,形成 4 种分立的相互作用,逐渐产生热核聚变,形成各种原子核,形成各种星系。

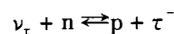
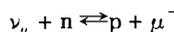
在温度约为  $10^{10}$  K,即粒子能量约为 1MeV 时,因为中微子或电子能量低于反应阈能,所以,反应:



成为不可逆反应,中子成为单向的衰变过程,即:



从这时开始,中子数少于质子数:  $N_n < N_p$ 。如果存在其他中微子,因为存在反应:



⋮

所以,  $n/p$  的比依赖于不同种类的中微子的数目,而这个比率又决定不同元素的宇宙丰度。目前,实验测得的氦-4 的宇宙丰度是 28%,由于推出不同中微子的种类  $N_\nu \leq 4$ 。这是标准的宇宙演化理论的重要预言。

#### 六、中性中间玻色子衰变宽度的测量证实自然界只有 3 种中微子

质量约为 90GeV 的中性中间玻色子  $Z^0$  可以通过强子衰变和轻子衰变,所以,  $Z^0$  衰变的总宽度应该是强子衰变和轻子衰变分宽度之和,即:

$$\Gamma_{Z^0} = \Gamma_{\text{强子}} + \Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + N\Gamma_{\nu\nu}$$

1990 年,工作在欧洲核子研究中心(CERN)的大型电子正电子对撞机 LEP 上的 4 个实验组 ALEPH, DEPHI, L3 和 OPAL 实验测量的平均值是:

$$\Gamma_{Z^0} = 2538 \pm 25 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_{\text{强子}} = 1792 \pm 24 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_{ll} = 83.6 \pm 1.0 \text{ MeV}$$

由轻子的普适性假设  $\Gamma_{ee} = \Gamma_{\mu\mu} = \Gamma_{\tau\tau} = \Gamma_{ll}$ ,而中微子是看不到的,所以:

$$N\Gamma_{\nu\nu} = \Gamma_{Z^0} - \Gamma_{\text{强子}} - \Gamma_{ee} - \Gamma_{\mu\mu} - \Gamma_{\tau\tau}$$

从上面数据获得:

$$N\Gamma_{\nu\nu} = 500 \pm 21 \text{ MeV}$$

图 3 是对  $e^+e^- \rightarrow Z^0$  的产生截面和宽度的测量结果的数据拟合,从数据拟合结果给出:

$$N_\nu = 3.04 \pm 0.12$$

即自然界只有 3 种不同种类的中微子。

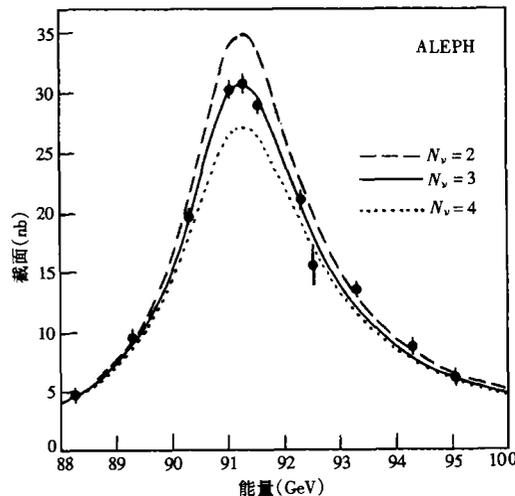


图 3 对  $e^+e^- \rightarrow Z^0$  产生截面和宽度的测量结果的数据拟合。

这是 LEP 实验对粒子物理给出的最重要的结果,也是对标准宇宙演化理论预言的证实。

目前,自然界中只存在 3 种不同种类的中微子是物理学界的普遍共识。