



中微子质量的测量方法有直接和间接两种。通常的探测器是探测不到的中微子，但可由能动量守恒以及事例终态的重建得出事例的丢失质量，由此得出中微子质量，这种方法称为直接法。从 $\beta$ 衰变的电子能谱确定电子中微子质量用的就是此法。 $\mu$ 子族中微子和 $\tau$ 子族中微子质量也是用这种方法得出的。此外，还有采用中微子振荡和双 $\beta$ 衰变法，这些是间接法。

1)  $\beta$ 衰变的能谱测量： $\beta$ 衰变中发射的电子能谱具有形状(如果电子中微子具有质量 $m_\nu$ )

$$N(P) \propto F(Z, P) P^2 (E_0 - E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_\nu^2}$$

式中 $E, P$ 分别为 $\beta$ 衰变中发射的电子的能量和动量， $E_0$ 为 $\beta$ 衰变的端点能量， $F(Z, P)$ 为库仑修正因子，与 $\beta$ 衰变核的电荷 $Z$ 以及电子的动量有关，可以被严格算出。 $N(P)$ 为 $\beta$ 电子的衰变率。以 $\sqrt{N(P)/P^2 F}$ 对

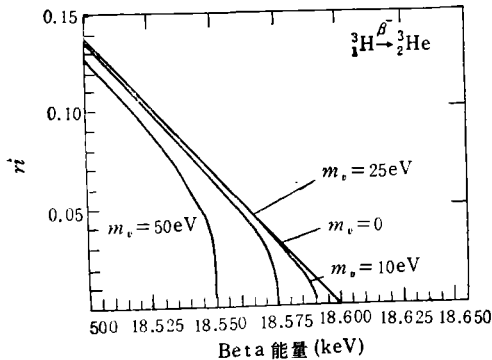


图4 不同的中微子质量对 ${}^3\text{H}\beta$ 谱居里描绘的影响

$\beta$ 电子能量作图(所谓居里描绘),当 $m_\nu = 0$ 时,居里描绘为一直线;当 $m_\nu$ 有不同值时,居里描绘的能量终端区将出现不同的弯曲曲线,如图3所示。实验上常用氚( ${}^3\text{H}$ )的 $\beta$ 衰变来测定电子中微子的质量,由于 ${}^3\text{H}$ 可以分别通过 $\beta$ 衰变到基态和激发态,用此法确定的

表1 一些由氚的 $\beta$ 衰变( $\theta = 18.6\text{keV}$ )的居里图得出的中微子质量估计(单位: eV)

Langer and Moffatt (1952)	<10 000
Bergkvist (1972)	<65
Tretyakov et al. (1976)	<35
Fritschi et al. (1986)	<18
LOS ALAMOS (1990)	<9.4

$m_\nu$ 的精度决定于(i)仪器的能量分辨率 $\Delta E$ ,要求 $\Delta E \leq m_\nu$ ,但这是很困难的;(ii)端点处的统计误差 $\sqrt{1/N}$ ,由于端点处 $\beta$ 计数很弱,这项误差也较大;(iii)其它本底。表1给出了这些年来电子中微子质量的测量值,最新的结果是 $m_\nu < 9.4\text{eV}$ ,不能排除 $m_\nu$ 为零的可能性。

2) 中微子振荡:如果在粒子反应中,轻子数不是绝对守恒,而且中微子的质量不为零,那么不同类型中微子( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ 或它们的反粒子)之间的混合将是可能的。这种可能性首先在60年代由Maki和Pontecorvo提出。为了简明起见,在这里的讨论中只考虑电子族和 $\mu$ 子族两种类型的中微子,并假定,在起始时刻,只存在 $\mu$ 子型中微子,可以证明,在以后某一时刻, $\mu$ 子型中微子减少了,却出现了电子型中微子。若用公式表示,则可写为

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m^2 L}{E} \right)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 1 - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$$

式中 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu), P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ 分别表示在离源 $L$ 米处测得 $\nu_\mu$ 或 $\nu_e$ 中微子的几率, $\theta$ 为混合角, $\Delta m^2$ 为两个中微子质量本征态 $\nu_1, \nu_2$ 的质量平方差 $m_{\nu_1}^2 - m_{\nu_2}^2$ ,1.27这个系数是当 $\Delta m^2$ 以 $(\text{eV}/c^2)^2$ 为单位, $L$ 以米为单位,中微子束能 $E$ 以 $\text{MeV}$ 为单位时得出的。例如当采用反应堆的反中微子源时, $\Delta m \sim 1\text{eV}/c^2$ ,那么振荡长度为几米。

中微子振荡的证据是在 $L$ 处初始类型的中微子流强的减少,或是在 $L$ 处测到了另一类的中微子。

迄今为止,所有利用反应堆( $\bar{\nu}_e$ 源)和加速器( $\nu_\mu$ 源)的实验均未给出令人信服的中微子振荡的证据。

3) 双 $\beta$ 衰变:前面已经谈到,在弱电统一的标准模型中,中微子总是左旋的,反中微子总是右旋的。如果中微子有质量,情况就不一样了,中微子可以是左旋的,也可以是右旋的,反中微子也是如此。这时轻子弱流中包括左手弱流以及右手弱流,反应中轻子数就不能保持守恒。此外,从理论上可知,中微子质量有两种,一是狄拉克(Dirac)质量,一是马约拉纳(Majorana)质量。狄拉克中微子理论把具有一定质量的两种中微子 $\nu_1$ 和 $\nu_2$ 以正交迭加的形式混合成通常的中微子 $\nu_e$ 和 $\nu_\mu$ 。马约拉纳中微子理论认为中微子像中性 $\pi$ 介子一样,自身的反粒子还是自身。如果存在马约拉纳中微子,就会发生很有趣的现象,即无中微子发射的双 $\beta$ 衰变。一个稳定同位素的双 $\beta$ 衰变有如下两种过程:

1. 双 $\beta + 2\bar{\nu}$

$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + e_1^- + e_2^- + \bar{\nu}_1 + \bar{\nu}_2$$

式中, $A$ 为元素质量数, $Z$ 为质子数, $e_1^-, e_2^-$ 为电子, $\bar{\nu}_1, \bar{\nu}_2$ 为电子反中微子,显然,这个过程中轻子数守恒,这是一个二级弱作用过程。

## 2. 双 $\beta + 0\nu$

$$(Z, A) \rightarrow ((Z+2), A) + e_1^- + e_2^-$$

显而易见, 在这个过程中轻子数是不守恒的, 但若马约拉纳中微子存在, 那么这个过程就会发生, 因此过程可以分解为

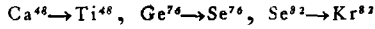
$$(Z, A) \rightarrow ((Z+1), A) + e_1^- + \bar{\nu}$$

$$\nu + ((Z+1), A) \rightarrow ((Z+2), A) + e_2^-$$

对于马约拉纳中微子,  $\nu = \bar{\nu}$ , 于是

$$(Z, A) \rightarrow ((Z+2), A) + e_1^- + e_2^-.$$

实际上常常测量下列元素的双  $\beta$  衰变



如果实验上测得了无中微子发射的双  $\beta$  衰变, 也就证实了马约拉纳中微子的存在, 这也表明中微子的质量不为 0. 并且由轻子不守恒系数得出中微子质量范围.

迄今为止都没有发现一个信服的无中微子发射的双  $\beta$  衰变.

## 五、LEP 实验的中微子结果

1989 年秋, 位于瑞、法边界日内瓦的欧洲核子中心的正、负电子对撞机 LEP 正式运转, 在第一阶段, LEP 对撞机运行于质心能量  $E_{CM} \sim M_{Z^0} (9.1 \text{ GeV})$  左右, 这一阶段的主要任务是通过  $Z^0$  粒子衰变产物的测量和分析 (包括  $Z^0$  宽度、前后不对称性等) 来验证标准模型以及寻找包括 Higgs 粒子在内的新粒子和新现象. 一年多来, LEP 实验的主要结果是在  $Z^0$  能区验证了标准模型的正确性. 那么, 标准模型在  $Z^0$  能区对中微子有什么重要的预言呢? 我们知道, 在标准模

型下  $Z^0$  可以衰变为一对对费米子  $f\bar{f}$ . 这些费米子对包括轻子族和夸克族. 在标准模型下,  $Z^0$  粒子的宽度是与开放的费米子对情况有关的, 表 2 给出了标准模型预言的各种费米子对产生的宽度. 对于最低级的情况, 不考虑各种修正, 如图 5 所示, 这时

$$\Gamma_{Z^0 \rightarrow f\bar{f}} = N \frac{G_F M_Z^2}{\sqrt{2} 6\pi} (g_V^2 + g_A^2)$$

这里,  $N$  为  $f$  的颜色, 对轻子  $N=1$ , 对夸克

$$N = 3(1 + \alpha_s/\pi),$$

三种颜色, 但加上了 QCD 修正因子  $(1 + \alpha_s/\pi)$ , 在  $Z^0$  能区下,  $\alpha_s \approx 0.11$ ,  $G_F = 1.166 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$  是弱耦合常数,  $M_Z$  为  $Z^0$  的质量,  $91.164 \text{ GeV}$ ;  $g_V$  和  $g_A$  是中流对轻子的耦合常数, 它们与费米子  $f$  的弱同旋

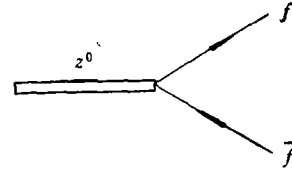


图 5 最简单的  $Z^0$  衰变

三分量、电荷以及  $\sin^2\theta_w$  ( $\theta_w$  为标准模型中的一个参数, 称 Weinberg 角) 有关, 见表所列. 表右给出考虑了辐射修正后的宽度, 辐射修正与顶夸克的质量  $m_t$  和 Higgs 质量  $m_H$  有关, 表中列出了  $m_t = 140 \text{ GeV}$ ,  $m_H = 100 \text{ GeV}$  和  $m_t = 140 \text{ GeV}$  和  $m_H = 1000 \text{ GeV}$  两种情况下的宽度, 宽度与这两个参数关系不大. 在实验中,  $Z^0$  的总宽度  $\Gamma_Z$ , 以及强子宽度  $\Gamma_h$  和带电轻子

表 2  $Z^0 \rightarrow f\bar{f}$  衰变宽度

费密子 $f\bar{f}$ (色因子)	$g_V$	$g_A$	$\Gamma_{f\bar{f}}$ (最低级) (MeV)	$\Gamma_{f\bar{f}}$ (考虑辐射修正) (MeV)	
				$m_t = 140$ $m_H = 100$	$m_t = 140$ $m_H = 1000 (\text{GeV})$
中性轻子 $\nu\bar{\nu}$ 1	1/2	1/2	165.7	166.7	166.4
带电轻子 $l\bar{l}$ 1	$-1/2 + 2s^2$	-1/2	83.4	83.6	83.4
$u\bar{u}, c\bar{c}$ $3(1 + \alpha_s/\pi)$	$1/2 - 4/3s^2$	1/2	297.0	297.4	296.2
$d\bar{d}, s\bar{s}, b\bar{b}$ $3(1 + \alpha_s/\pi)$	$-1/2 + 2/3s^2$	-1/2	382.6	383.8	382.4

$$s^2 = \sin^2\theta_w = 0.23$$

宽度  $\Gamma_{f\bar{f}}$  都是在实验上可以测出的, 于是中性轻子的宽度 (不能直接测出)  $\Gamma_{\text{中性轻子}}$  可以推出

$$\Gamma_{\text{中性轻子}} = \Gamma_Z - 3\Gamma_{\text{轻子}} - \Gamma_{\text{强子}}$$

表 3 中微子种类测量结果 (7 月, 1990)

$M_Z$	$91.164 \pm 0.013 \pm 0.030 \text{ GeV}$
$\Gamma_{\text{中性轻子}}$	$0.502 \pm 0.018 \text{ GeV}$
$N_\nu$	$3.01 \pm 0.11$

再用标准模型预言的一种中微子的宽度  $\Gamma_{\nu\nu}$ , 可得出中微子类型的数目,  $N_\nu = \Gamma_{\text{中性轻子}}/\Gamma_{\nu\nu}$ . 表 3 列出 L3 组得

出的一组实验结果. 表 3 的结果表明, 在标准模型框架下 (迄今是十分成功的), 除了已发现的三种类型 ( $e$ ,  $\mu$  和  $\tau$  族) 的轻中微子外, 不会再有新的轻中微子出现了, LEP 的其他组也得出类似的实验结果和结论, 这无疑 LEP 实验至今取得的最重要结果之一.

**结束语** 60 年来, 人们假设了中微子, 又从实验上证明了它的存在, 弄清了中微子共有电子族  $\mu$  子族和  $\tau$  子族三种类型, 且每类中微子均有它的反粒子. 通过长期的实验测量, 知道中微子的质量很小, 甚至可能为零. 目前 LEP 实验的最新结果还确认轻中微子的类



# 复旦大学物理系简介

## 编者按:

人们常说,大学物理系是物理学家的摇篮.未进大学的青年朋友们,也希望了解大学物理系的概貌.为此,本刊新辟《大学物理系》栏目.由复旦大学物理系主任贾起民教授撰写的短文,把我们带到令人神往的复旦校园,听他讲述复旦的过去、现在与未来…….

复旦大学物理系有教职工 200 多名;教师近 150 人.其中教授 21 人,副教授 60 余人.有 13 名博士生导师,其中有著名物理学家谢希德教授.校长华中一教授、上海市物理学会理事长周世勋教授、上海市激光学会前任理事长章志鸣教授.全系所设凝聚态物理、光学和理论物理三个博士点专业,被评为全国重点学科,都是经批准的博士后流动站.凝聚态物理专业的“表面物理实验室”和光学专业的“三束改性表面层优化联合实验室”都是国家重点实验室.此外还有原子分子物理和计量学两个专业招收硕士生.全系在表面与界面物理、半导体物理、超晶格与量子阱物理、超导和低温物理、原子、分子及其团簇的结构与光谱、表面光学及薄膜与超薄膜光学、超短脉冲及超快现象、激光生物医学、近代光学技术、统计物理与凝聚态理论、粒子物理和场论、引力理论与相对论天体物理、等离子体物理及中、高能核物理理论、量子统计与理论物理方法、量子计量学、温度计量学及近代物理学史等方面积极开展基础研究、应用研究和开发研究工作,承担了多项国家高科技课题研究,获得国家级、部级以及上海市的不同等级的成果奖.例如,85 年到 89 年五年中有 22 个研究成果获奖,在国内外著名杂志上发表的论文逐年增多,如最近五年发表的论文累计超过一千篇.其中三分之一以上是在国外最有名的杂志上发表的.

在培养本科生上下功夫,是复旦大学物理系的传统.在教学中采取各种措施,既对学生有非常严格的要  
型有(已知的  $e, \mu, \tau$  型)三种,且只有三种.这些知识是许多科学家多年耕耘得到的.当然,认识并没有完结,例如,中微子究竟有没有质量? 中微子振荡是否存在? 太阳中微子的短缺究竟是何原因? …,除此之外,还存在一些更深的问题需要弄清楚,例如,为什么自然界中电子比正电子多得多? 为什么  $\mu$  子质量为电子的 207 倍? 又如三类中微子  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  质量相同(可能),电荷和自旋也相同,它们之间本质差别是什么? …,所以,60 年的中微子研究并没有划上句号,但是我们对这个问题的认识逐步逼近,不断深化.人类完全可以自豪地说,自然界中不存在任何不可认识的事物,包括象中微子这样难以捉摸的东西,但需要毅力、勇气和信心.

(续完)

求,又给学生以充分发挥自己的主动性,做到严而不死,活而不浮,积极贯彻因材施教原则,在全面提高教学质量的基础上,努力培养拔尖学生,给不同特长的学生提供适合他们成长的条件.为此,我们采用“大口径招生,小口径分配”的做法.本科招生只设一个物理专业,经过三年学习后,第四年分设半导体物理、激光和理论物理三个选修方向,学生可以连续其中一个方向,毕业时可按选修方向分配,每个选修方向的学生数则可根据当时的近期需要适当调整.

近十多年来,广大教师积极开展对国内外教学经验和教材的研究,编写出版了许多教材和教学参考书,其中比较大型的有普通物理教程丛书、理论物理教程丛书、物理实验丛书和现代光学丛书(与上海光机所共主编).

实行改革开放以来,物理系加强了国际间的学术交流,先后与国外数十所大学的物理系建立了广泛的联系.全系教师中每年有十分之一以上去国外进修,还多次主办国际学术讨论会;国际上许多著名物理学家如诺贝尔奖获得者李政道教授、杨振宁教授哈佛大学的 N. Bloembergen 教授以及美国麻省理工学院的黄克孙教授、加州大学伯克利分校的沈元让教授,旧金山州立大学的吴家玮教授等都是物理系的名誉教授,他们定期来系进行学术活动.历届毕业生中,已有数百人在美国、欧洲及日本攻读博士学位,自己培养的博士,大多数有机会到国外进行博士后研究工作,他们在学习和研究工作中都取得了优异的成绩,大大提高了复旦在国外的声誉,为祖国取得了荣誉.所有这些交流活动都有力加强了全系学术水平的提高,使各项研究工作与世界最前沿的工作保持密切的联系.

物理学专业的学生可申请多项奖学金,如光华奖学金,纪念茅思诚奖学金,宝钢奖学金多种.李政道物理学奖学金是专为物理类专业本科生和研究生设立的.一年一度的由李政道教授亲临颁奖的颁奖活动深深激励了物理系学生向物理学的应用各个方面进行探索的决心.

代邮 凡需本刊历年各期文章者,请按每页 0.40 元汇款至本刊编辑部(地址:北京 918 信箱),并注明年号、期数与复印页码.