

660keV γ 射线)。

谱仪的规模:设想为100t($\sim 100\text{m}^3$)的载Gd 10%浓度的液体闪烁体,或是13t($\sim 2\text{m}^3$)的GSO(Gd浓度达75%)晶体阵列,其放射性杂质浓度(U/Th,K等)小于 10^{-10}g/g ,此系统可满足太阳中微子的测量,特别是其高能量分辨、高时间分辨的特性,很适合超新星中微子质量的测量。

目前,我们在载Gd液体闪烁体的制作和GSO晶体生长方面均已取得了初步的成果:我们初步研制成功载Gd液体闪烁体,Gd的浓度达3%,测试所得性能为:对于60keV γ 射线,能量分辨(FWHM)约为53%;光的衰减长度 $\sim 150\text{cm}$ 。孙汉城等制成直径1cm、长3cm的GSO闪烁晶体:对660keV γ 射线,能量分辨(FWHM)约为22%;光的衰减时间约为80—100ns。与此同时,采用化学萃取法使原料中U/Th的含量小于 10^{-10}g/g 已被证明是可行的。

此新型的中微子能谱仪投入运行后,可以首先观测太阳中微子能谱,为解释太阳中微子问题提供重要的依据。在其运行期间,一旦出现II型超新星爆发,它将以高的能量分辨、高的时间分辨实时观测超新星中微子能谱。SNBO组^[9]对II型超新星爆发的中微子流强的计算表明:电子型的中微子强度主要

集中在爆发的40ms内,即 $\delta = 40\text{ms}$ 。这样利用新型太阳中微子能谱仪测量超新星中微子时,由 δ 引起的待测中微子质量最大的不确定性为: $\Delta m < 0.8\text{eV}$ 。因此,利用此新型的太阳中微子能谱仪,只要测到足够统计量的超新星中微子事例,在小于1eV范围内直接测出中微子静止质量是可能的。

致谢:感谢中国科学院高能物理研究所顾以藩研究员宝贵的意见和有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] Fukuda Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81(8):2016
- [2] Belesev *et al.* Phys. Lett. B, 1995, 350:263
- [3] Baulis *et al.* Phys. Lett. B, 1997, 407:219
- [4] Jonson B *et al.* Nucl. Phys. A, 1983, 396:479c
- [5] Avignone. Phys. Rev. D, 1990, 41:682
- [6] Raghavan R S. Phys. Rev. Lett., 1997, 78(19):3618
- [7] Dai Changjiang, "Development of new detectors for measurement of PP and ^7Be solar neutrino", Talk at workshop "Toward A New Underground Experiment" '98 Finland
- [8] 戴长江.中微子振荡实验的进展.全国第八届粒子物理大会报告,1999,重庆[DAI Chang-Jiang. Experimental progress on the neutrino oscillation. Proceedings of 8th National Meeting of Particle Physics, 1999, Chongqing(in Chinese)]
- [9] SNBO Group Internal Report, University of California at Los Angeles(1993—1995)

中微子振荡与中微子的静止质量*

王 较 过

(陕西师范大学物理系 西安 710062)

摘 要 简要回顾了中微子的发现过程,论述了中微子的基本性质及三种不同类型的中微子,讨论了中微子振荡的最新实验结果及其与中微子静止质量的关系,指出了中微子的静止质量在物理学与天文学中的重要性以及确定中微子的静止质量有待进一步解决的问题。

关键词 中微子,中微子振荡,中微子质量

NEUTRINO OSCILLATIONS AND THEIR REST MASSES

WANG Jiao Guo

(Department of Physics, Shanxi Normal University, Xi'an 710062)

Abstract The discovery of neutrinos is reviewed. The main properties and the three types of neutrinos are discussed in some detail. In addition, the relationships between the latest experimental results from the studies of neutrino oscillations and their rest masses are discussed. The importance of the rest mass of neutrinos for the

* 国家自然科学基金资助项目

2000-04-24收到初稿,2000-06-08修回

physical and astronomical sciences is emphasized and the unsolved problems in the determination of the rest masses are pointed out.

Key words neutrinos, neutrino oscillations, neutrino mass

中微子是基本粒子家族中重要且具有特色的成员之一,它在理论物理学及天体物理学中占着十分重要的地位,一直是物理学家和天文学家关注的重要问题.标准的粒子物理学模型认为,中微子的静止质量为零,长期以来,物理学家一直持这种观点.然而1998年6月,日本超级神冈的物理学家宣布,他们发现了中微子发生振荡的确切现象,从而为中微子具有非零静止质量提供了证据.尽管实验证据数量较少,不能完全令人信服,但是这一成果仍然使中微子问题再次成为热门话题,在物理学界乃至社会各方面引起了强烈震动.

1 中微子的发现

中微子的发现起源于 β 衰变之谜.早在1914年,查德威克公布了关于 α 射线、 β 射线、 γ 射线的研究结果: α 射线和 γ 射线的能谱是分立的, β 射线的动能有一个连续变化的范围,并且电子能量的最大值与原子核的末态能量加在一起才能满足能量守恒定律.这一事实似乎同原子核处于分立的量子状态矛盾,从而在当时产生了在 β 衰变过程中的所谓能量危机,形成 β 衰变之谜.

解释 β 衰变的实验事实有两种可能的选择:其一是承认 β 衰变是二体衰变,假定在 β 衰变过程中能量和动量守恒定律遭到破坏;其二是承认能量和动量守恒定律正确,假设 β 衰变并非是二体衰变,在衰变末态中还出现了实验上未能探测到的第三个粒子^[1].玻尔曾持前一种观点,提出了解释 β 衰变的一种理论,由于它违背了自然界客观事物最普遍的规律——能量转化和守恒定律,所以人们不能接受他的观点.

泡利(Pauli W, 1900—1958)于1930年提出一种理论:他猜测 β 衰变是三体衰变,在一次衰变中能量和动量都守恒,衰变中除放出电子外,还有一种质量接近于零、自旋为 $1/2$ 的电中性粒子,即中微子.1931年他又进一步指出,中微子是衰变过程中产生的.继泡利之后,费米于1933年建立了 β 衰变理论,该理论指出:在 β 衰变过程中,通过弱相互作用,中子转化成质子、一个电子和一个反中微子^[2].其反应方程为

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e. \quad (1)$$

费米的 β 衰变理论奠定了中微子存在的理论基础,此后人们便开始进行了一系列探测中微子的实验,最初探测中微子存在的实验是对 β 衰变过程中的能量和动量进行研究,其检验的结果都说明了中微子假说的正确性.但是,由于 β 衰变的末态产物中有三个粒子,所以原子核的反冲能量就不是单值的,研究起来比较复杂.1942年,我国著名物理学家王淦昌先生在美国《物理评论》发表文章,提出用 K 电子俘获法探测中微子存在的简单方法^[3],对中微子的探测产生了一定影响.物理学家按照 K 电子俘获法做了一系列实验,实验的结果都展示了中微子存在的间接证据,从而更加使人们坚信中微子假说的正确性.

泡利提出中微子假说之后,人们进行了一系列捕获中微子的实验.1956年,美国物理学家科恩(Cohen)和赖因斯(Reines)在佐治亚州Savannah河工厂首次捕获到反中微子.1968年,美国中微子天文学家戴维斯(Davis)在南科他州的Homestake金矿捕获了太阳中微子.这些实验都用无可辩驳的事实证明了中微子是客观存在的基本粒子^[4],同时也促使人们从多方面对中微子进行深入研究.

2 中微子的静止质量与中微子振荡

中微子的特性是人们很早就关注的问题之一.早在1962年,美国科学家莱德曼等人就发现了中微子具有不同的属性,区分了电子中微子和 μ 中微子,并由此形成了轻子有“代”的概念,他们也由于这一伟大的发现而荣获了1988年度的诺贝尔物理学奖^[5].现行的粒子物理学理论指出,自然界存在三种不同类型的中微子及其反粒子.它们分别与电子、

μ 子和 τ 子相对应,即 $\begin{vmatrix} \nu_e \\ e \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{vmatrix}$.人们把这些中微子分别称为电子中微子、 μ 中微子和 τ 中微子,并将这三种类型称作中微子具有三种不同的“味”.

中微子不带电,且只参与弱相互作用.众所周知,在弱相互作用过程中宇称不守恒.要对这一现象从理论上给以满意的解释,就需要假设中微子是左旋的,自然界中不存在右旋的中微子;同时也要假设

反中微子是右旋的,自然界不存在左旋的反中微子,标准模型就持这种观点.因此,在标准模型中,中微子被看作是具有固定螺旋性的左旋粒子.但是,由于静止质量不为零的粒子不可能有固定的螺旋性,所以“中微子是左旋的”这一假设是以中微子的静止质量等于零作为前提^[6].既然中微子的静止质量为零,那么,在任何系统中它必然都以光速运动着,不可能存在比它运动更快的坐标系,这样才能保证中微子的螺旋性具有不变的意义.长期以来,大多数物理学家都相信这一理论.不过“中微子的静止质量等于零”的结论也遭到来自不同方面的挑战^[21],中微子振荡就是其中典型且威胁性较大的一例.

所谓中微子振荡是指不同类型的中微子之间的相互转化.最初,有人提出振荡可能发生在中微子与反中微子之间,如果这一过程发生,那么它就违背了角动量守恒定律,所以这一观点很快被否定.1962年,Maki,Nakagawa和Sakata提出不同类型中微子之间的振荡模型,即电子中微子、 μ 中微子和 τ 中微子之间的相互转化.

中微子振荡的有趣结论之一是中微子具有非零的静止质量,同时利用中微子振荡还能够探测非常小的质量,这种探测是用运动学手段探测质量所望尘莫及的.理论研究指出,若用 ν_1, ν_2, ν_3 分别代表中微子质量的三个本征态,用 ν_e, ν_μ, ν_τ 分别代表电子中微子、 μ 中微子和 τ 中微子所处的态,则 ν_e, ν_μ 和 ν_τ 可看作是三个本征态的相干混合态,这样就能够用振荡说明中微子具有非零的静止质量.以电子中微子和 μ 中微子为例,设 ν_1, ν_2 分别表示中微子质量的两个本征态, ν_e, ν_μ 分别表示电子中微子和 μ 中微子所处的态, θ 表示混合角,则

$$\begin{aligned} \nu_e &= \cos \theta \nu_1 + \sin \theta \nu_2, \\ \nu_\mu &= -\sin \theta \nu_1 + \cos \theta \nu_2. \end{aligned} \quad (2)$$

ν_1 和 ν_2 的相对位相是时间或空间的函数,而且质量的差异会引起相对位相变化,因此就有将电子中微子探测为 μ 中微子的可能性.用 $\nu_e(t)$ 表示电子中微子所处的态,则它发生振荡的几率是:

$$\begin{aligned} |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{\pi x}{l_\nu} \right], \\ l_\nu &= 4\pi P_\nu / (m_2^2 - m_1^2) = \frac{4\pi P_\nu}{\Delta m^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 P_ν 是中微子的动量, l_ν 是振荡长度.由于 Δm^2 的值很小,因此振荡长度 l_ν 的值很大.

对于中微子振荡,人们在较长时期内进行了许多实验探测,但是,在以加速器和反应堆为中微子源

的探测中都未得出存在振荡的确切证据,其原因可能是由于它们能量较低,非常小的混合角不能被探测到.由于中微子的振荡长度很大,因此观测来自地球大气层中的中微子就能够探测振荡现象.宇宙线研究表明,由宇宙线和大气相互作用引起的 π 介子和 μ 子的衰变是:

$$\begin{cases} \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\ \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \end{cases} \quad (4)$$

可见在地球上探测到来自大气层的 μ 中微子通量应是电子中微子通量的2倍.但是,实际探测结果表明,探测到的 μ 中微子通量仅有理论预期值的一半.物理学家对此现象的解释是,预期的部分 μ 中微子在运动过程中转变为探测器探测不到的 τ 中微子.由于目前还不能观测 τ 中微子,因此严格说来根据这一事实还不能完全肯定 μ 中微子向 τ 中微子的振荡.

如果确实发生中微子振荡,那么,中微子的旅途越长,它们发生振荡的机会就越多.众所周知,来自大气层各个方向的中微子是各向同性的,中微子几乎完全不与其他物质碰撞,它可以自由地穿过地球.因此,我们可以在同一地点探测直接来自天上的中微子和来自地球另一边穿越整个地球的中微子,显然来自不同方向的中微子旅程大约相差 1.3×10^7 m.因为二者相差甚大,所以,如果中微子振荡确实发生,则穿过地球到达探测器的 μ 中微子通量应该小于直接来自天上的 μ 中微子通量.1998年,日本超级神冈天文台的物理学家宣布,他们确实发现了这一现象,在395例 μ 中微子事件中,自天而降的事例几乎是从地底下到达的事例数的两倍.这一现象被解释为 μ 中微子向 τ 中微子的振荡,两种中微子的质量差为 $\Delta m^2 \approx 2 \times 10^{-3} \text{eV}^2$,且有较大的混合角.继大气中微子实验结果公布之后,紧接着超级神冈的物理学家又报道了太阳中微子的实验结果.他们的实验显示出电子中微子的振荡.这些实验结果目前被人们看作是中微子振荡及中微子具有非零静止质量的最重要的证据.

3 结论及有待解决的问题

中微子的静止质量是有待解决的重大问题,它对物理学和宇宙学都具有十分重要的意义^[7].按照

粒子物理的标准模型,中微子的静止质量为零.超级神冈的物理学家们显示强有力的实验证据,以极大的可靠性指出中微子具有非零的静止质量,这无疑是当今中微子研究取得的最大成果之一.中微子具有非零的静止质量这一结论是由中微子振荡间接得出的,尽管其可靠性非常大,但是要完全肯定这一结论仍然存在一些问题有待进一步研究.

首先,对大气中微子实验的解释有待于实验证实.人们解释大气中微子实验时指出,部分 μ 中微子转变为 τ 中微子.但是,从目前的资料看,还没有探测到 τ 中微子的实验报道.因此,从严格意义上讲,还不能说已观测到 μ - τ 中微子振荡.要证实中微子振荡确实发生,现在的的关键问题是探测 τ 中微子.由于对 τ 中微子束和 τ 衰变的特征缺乏了解,所以解决这个问题仍然是难度非常大的研究课题.不过可喜的是,目前费米国立实验室(Fermilab)和欧洲原子核研究委员会(CERN)正在实施探测 τ 中微子的研究计划,并且欧洲原子核研究委员会也正在进行 μ - τ 中微子振荡的有关实验.有理由相信,研究工作的不断深入一定会促使人们的认识不断深化,最终对大气中微子实验作出科学的确切解释.

其次,即使中微子振荡已被证实,中微子的静止质量还需进一步研究.我们知道,利用中微子振荡实验只能间接测量不同“味”的中微子质量之差,由此还无法知道中微子的绝对质量.那么,它们的绝对质

量到底是多少呢,还有待实验给出结果.然而到目前为止,人们还没有构想出能够准确地直接测量中微子静止质量的实验方法,这方面还需要进一步研究.

综上所述,大气中微子实验和太阳中微子实验以强有力的证据向人们展示了中微子发生振荡的现象,以此为依据指出了中微子具有非零的静止质量.但是,要肯定上述结论还必须找到 τ 中微子,知道不同“味”中微子的绝对质量.这些有待于实验作出答复.但是无论如何,大气中微子实验和太阳中微子实验是物理学发展史上的重大事件,其实验结果对物理学的发展具有重大意义.

参 考 文 献

- [1] 季淑莉.物理,1999,28:434[JI Shu-Li. Wuli(Physics),1999,28:434(in Chinese)]
- [2] Wolfenstein L. Rev. Mod. Phys.,1999,72(2):140
- [3] 李炳安,杨振宁.物理,1986,15:758[LI Bing-An, YANG Zhen-Ning, Wuli(Physics),1986,15:758(in Chinese)]
- [4] 王较过,季淑莉.物理,1997,26:568[WANG Jiao-Guo, JI Shu-Li, Wuli(Physics),1997,26:568(in Chinese)]
- [5] 吴为民.现代物理知识,1989,(2):35[WU Wei-Min. Modern Physics,1989,(2):35(in Chinese)]
- [6] 章乃森.粒子物理学(上册),北京:科学出版社,1986:145 [ZHANG Nai-Sen. Particle Physics(Part I),Beijing:Science Press,1986:145(in Chinese)]
- [7] 周国荣.物理,1999,28:290 [ZHOU Guo-Rong. Wuli(Physics),1999,28:290(in Chinese)]

2000 年第 12 期《物理》内容预告

研究快讯

2—5 GeV 能区的 R 值测量(赵政国等).

评 述

准晶理论的新进展(郭可信);

光数据存储的新进展(戎霭伦).

知识和进展

飞秒激光在三维微细体系中的应用(李呈德等);

超短脉冲激光同位素分离(陈正林等);

自发参量下转换双光子场应用研究进展(孙利群等).

物理学和高新技术

CCD 及摄像机技术在工业中的应用(林家明等).

实验技术

光学极化度测量仪的研制及弱光 Stokes 参数测量(李光鳌等).

讲 座

量子信息讲座续讲 第四讲 量子对策论(张永生等).

物理学史和物理学家

吴大猷先生评点《经典力学》(沈惠川);

肖克莱与半导体科学技术的发展(鲁运庚).

物理教育

从原子物理看量子力学(关洪).