

中微子振荡实验*

——超出标准模型的实验检验(II)

何景棠¹⁾

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

4 大气 μ 中微子丢失和中微子振荡

大气中的高能中微子是由于原初宇宙线中的高能质子在大气上部与大气中的原子核相互作用而产生 K 介子和 π 介子, K 介子和 π 介子随后衰变:

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu;$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

μ 子接着衰变:

$$\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e, \quad \mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e,$$

因此, 大气中高能中微子的成分中 μ 中微子的数量应该是电子中微子数量的两倍.

80 年代初, 探测大气中的高能中微子的装置有: 日本的 Kamiokande 装置, 美国的 IMB 装置以及 Soudan 装置. 由于 μ 子的质量约为电子质量的 200 倍, 因此 μ 子穿过水切仑柯夫装置时, 会产生一个边界清楚的光环, 而电子由于质量小, 通过介质时, 会产生电磁簇射, 因此, 在水切仑柯夫装置上探测到的是一个边界模糊的光环. 80 年代初, Kamiokande 合作组, IMB 合作组和 Soudan 合作组都探测到了大气中 μ 中微子丢失现象, 结果如图 11 所示. 他们发表的实验结果是, 实际测量到的 ν_μ/ν_e 与蒙特卡罗模拟得到的 ν_μ/ν_e 的比值小于 1, 即

$$(\nu_\mu/\nu_e)_{\text{date}} / (\nu_\mu/\nu_e)_{\text{MC}} < 1.$$

平均约为 0.6, 说明大气中的 ν_μ 中微子丢失了. 如果存在中微子振荡, 就可以解释大气中 μ 中微子丢失的现象.

为了收集更多的大气中微子事例, 日本建造了

超神冈装置, 美国建造了 Soudan II 装置^[11]. 他们的实验结果证实了 Kamiokande, IMB 和 Soudan 的早期实验结果, 即

$$(\nu_\mu/\nu_e)_{\text{date}} / (\nu_\mu/\nu_e)_{\text{MC}} \approx 0.6.$$

1998 年 6 月, 在日本 Takayama 召开的 1998 年世界中微子大会上, 日本物理学家公布了利用超神冈装置获得的更详细的实验结果:

第一, 从地球上方向自上而下的中微子事例和从地球另一端穿过地球到达超神冈探测器的中微子事例. 图 12 上部表示电子中微子事例, 下部表示 μ 中微子事例. 横轴是电子和 μ 子的动量, 纵轴是穿过地球向上的事例数减去自上而下的事例数除以自上而下与自下而上事例数之和. 图中带误差棒的点为实验点, 而有阴影的方框代表蒙特卡罗模拟按无中微子振荡效应时的预言值. 可以看到电子中微子似乎无振荡效应, 而 μ 中微子都比理论预言的小了, 说明 μ 中微子有振荡效应. 而与实验点连在一起的虚线代表 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振荡, 且 $\sin^2 2\theta = 1.0$, $\Delta m^2 = 2.2 \times$



图 12 自下而上与自上而下大气中微子事例差别的实验结果

图 11 大气 μ 中微子丢失实验结果

* 2000-06-01 收到初稿, 2000-09-20 修回

1) E-mail: jingtang@mail.ihep.ac.cn

10^{-3}eV^2 的拟合结果.

第二,事例数随天顶角的变化.因为地球是圆的,所以地球大气层也是圆的.如果中微子是原初宇宙线在大气上部产生的话,那么从地球上垂直下来的中微子只穿过约 20km 的大气后到达地面,而与垂直方向成 θ 角入射的中微子,它穿过大气的路径近似于 $20\text{km}/\cos\theta$,因为 $\cos\theta < 1$,所以这些中微子穿过的大气路程要长一些,中微子振荡的几率是与 L 成正比的,因此斜入射的中微子产生振荡的几率要大一些.图 13 是超神冈合作组公布的中微子事例数与天顶角的关系.他们把事例分成低于 0.4GeV (GeV 以下)和大于 0.4GeV (GeV 以上).图上部是电子中微子事例,下部是 μ 中微子事例,带斜线的方框代表无中微子振荡的预言值,带误差棒的点为实验点,表明电子中微子似乎无振荡效应,而 μ



中微子存在振荡效应,与实验点连在一起的线是假设存在 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振荡的拟合值.且 $\sin^2 2\theta = 1.0$, $\Delta m^2 = 2.2 \times 10^{-3}\text{eV}^2$.

第三,中微子事例数随 L/E_ν 的变化,结果见图 14.横坐标是 L/E_ν ,纵坐标是事例数与假设不存在中微子振荡的蒙特卡罗模拟结果的比值.与实验点相连的虚线代表 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振荡,且 $\sin^2 2\theta = 1.0$, $\Delta m^2 = 2.2 \times 10^{-3}\text{eV}^2$ 的拟合值.从图 14 可看到,电子中微子似乎不振荡,但 μ 中微子存在振荡效应.



图 14 大气中微子事例与 L/E_ν 关系实验结果

超神冈实验组的结果是电子中微子似乎不振荡.核电站中由于核裂变而提供能量.核裂变产物 β 衰变时会产生电子中微子.因此,从核电站的反应堆出来的电子中微子可以作电子中微子振荡实验.从 70 年代末至今,在不同国家都有用核电站的电子中微子作电子中微子振荡实验,但没有看到电子中微子振荡的信号.目前灵敏度较高的一个核反应堆电子中微子振荡实验是法国的 CHOOZ 实验^[12].

CHOOZ 核电站有两台压水堆,总功率是 8.5GW.核电站的电子反中微子 $\bar{\nu}_e$ 的能谱以前已被许多实验广泛地研究过. $\bar{\nu}_e$ 流强的理论预言值可能的误差为 1.4%,因此认为 $\bar{\nu}_e$ 产生点的流强是已知的,不必用近点探测器测量产生点的 $\bar{\nu}_e$ 流强.

CHOOZ 探测装置由三个同芯筒组成:中心区是一个透明的塑料筒,装有 5t 含有 0.09% 的镅的液体闪烁体;中间一个圆筒是 70cm 厚,充以 170t 普通液体闪烁体,安装 192 个直径为 20cm 的光电倍增管读出信号,一方面防止光电倍增管自然杂质放射性产生的本底,另一方面用于探测中子被俘获后产

图 13 大气中微子事例对天顶角的依赖关系实验结果

生的 γ 射线,最外层与中层光绝缘,80cm 厚,充以普通液体闪烁体,用 24 个直径为 20cm 的光电倍增管读出信号,主要用于屏蔽宇宙线 μ 子。

实验测量过程如下: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. 正电子湮灭产生两个能量为 0.511MeV 的 γ 射线,中子随后被镉俘获,产生一个延迟的 γ 射线. 由于中心区充有镉,增加了中子俘获的几率,且产生一个能量约 8MeV 的高能 γ 射线. 它的能量大大超过任何本底 γ 射线的能量。

探测装置放在离核电站约 1km 的山洞里,探测器上部的岩石厚度为 300m 水当量,大大减低了宇宙线 μ 子产生的本底. 反应堆 $\bar{\nu}_e$ 的能量平均值约为 3MeV, 因此 $L/E \approx 300 = 1000\text{m}/3\text{MeV}$. 实验对 $\bar{\nu}_e$ 振荡探测的灵敏度可达到 $\Delta m^2 \sim 10^{-3} \text{eV}^2$.

实验曾经选择核电站从停堆到开堆,功率不断升高时获取数据,结果如图 15 所示. 实验测得的 $\bar{\nu}_e$ 流强与理论预言值之比为 $R = 0.98 \pm 0.04 \pm 0.04$, 表明没有探测到 $\bar{\nu}_e$ 振荡效应. 由 CHOOZ 实验结果给出 ν_e 振荡参数如图 16 所示. 对 $\nu_e \rightarrow \nu_x$, 排除了以下两种情况: 大的混合角时, $\Delta m^2 > 0.9 \times 10^{-3} \text{eV}^2$; 大的 Δm^2 时, $\sin^2 2\theta > 0.18$ 的区域. 由图 16 可以看出, CHOOZ 的电子中微子振荡的实验结果与超神冈宇宙线电子中微子似乎不振荡的结果相符。

与太阳中微子丢失相类似,对于大气 μ 中微子丢失,不同的国家,不同的实验,采用不同的技术,都测到了相似的结果,因此,大气 μ 中微子丢失也是被物理学界公认的事实. 最直观的解释是存在中微子



图 16 CHOOZ 电子中微子振荡参数的实验结果

振荡。

为了收集更多的大气中微子事例,俄罗斯在贝加尔湖水下正在建造光电倍增管阵列,该装置离岸边约 4km,放在水下约 1km 处,美国将在南极把光电倍增管阵列放在冰山之下,利用纯水作为探测介质,这个装置叫做 AMANDA;美国还计划在离夏威夷岛 30km 的深海中,放一个名叫 DUMAND 的光电倍增管阵列,这个装置包含 1km^3 的水,即约 10^9t 水,希腊计划在离岸约 300km 的深海处放置一个名叫 NESTOR 的类似于美国 DUMAND 的光电倍增管阵列。

粒子物理的历史是从宇宙线开始的; μ 子、 π 介子、K 介子和 Λ 超子都是在宇宙线中发现的,但它们的性质是用加速器实验仔细研究才确定下来的. 人们希望用高能加速器产生 ν_μ 或 $\bar{\nu}_\mu$ 束,进行长基线中微子振荡实验,以便检验超神冈实验的结论,是否真的存在 ν_μ 中微子振荡,且 ν_μ 是否真的变成了 ν_τ ?

5 长基线中微子振荡实验

长基线中微子振荡的实验安排是由强流高能质子加速器产生 ν_μ 或 $\bar{\nu}_\mu$ 束,在中微子束流出口处安装

图 15 CHOOZ 核反应堆电子反中微子数目与反应堆功率关系测量结果

一个小型探测装置,称为近点探测器,而在距离中微子束流出口的 L 处,安装另一个大型探测装置,称为远点探测器,为了减少系统误差,近点探测器与远点探测器结构和探测方法完全一样,以近点探测器测量到的中微子相互作用事例为标准,比较远点探测器和近点探测器的中微子相互作用事例的特征,就可判定是否存在中微子振荡及其振荡模式。由于中微子振荡的几率为

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 [1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) L (\text{km}) / E (\text{GeV})],$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 [1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) \cdot L (\text{km}) / E (\text{GeV})].$$

超神冈实验给出 $\Delta m^2 \approx 2 \times 10^{-3} \text{eV}^2$,高能质子加速器产生的 ν_μ 或 $\bar{\nu}_\mu$ 束的能量约为 $1-20 \text{GeV}$,因此,远点探测器与近点探测器的距离要上千公里才能对中微子振荡具有一定的探测灵敏度,这就是把这类实验称为长基线中微子振荡实验的原因。

目前正在进行和计划进行的长基线中微子振荡实验有:

日本:K2K, μ 中微子束流从日本东京附近的 KEK 高能物理研究所射向约 250km 的超神冈探测装置;

美国:MINOS 实验, μ 中微子束从美国费米实验室射向约 730km 的位于 Minnesota 州的地下实验室的 MINOS 探测装置;

欧洲:ICARUS 和 OPERA 装置, μ 中微子束从位于瑞士的日内瓦的欧洲核子研究中心 CERN 射向约 730km 的意大利的地下实验室 Gran Sasso 的探测装置 ICARUS 和 OPERA。

ICARUS 探测装置使用液氩时间投影室作为远点探测器,第一期工程已建造了一个 600t 的模型,为了接收从 CERN 射来的 μ 中微子束,进行长基线中微子振荡实验,计划建造 10^4t 液氩时间投影室。

OPERA 探测装置在磁谱仪前面放一个 200t 重的核乳胶叠作为靶物质及 τ 子衰变的顶点探测器。由于核乳胶的空间分辨率可达 $0.5 \mu\text{m}$,不同能量的 τ 轻子从产生点到衰变点的距离约为 $100 \mu\text{m}$ 至几毫米,因此,核乳胶叠可以清楚地记录 τ 轻子从产生点到衰变点的距离,核乳胶叠再配合磁谱仪,可测量 τ 轻子衰变的其他产物的物理量,从而确定 τ 轻子的存在。因此,OPERA 实验希望看到 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 的振荡,随后 $\nu_\tau + \text{靶粒子} \rightarrow \tau^- + \text{强子}$ 的中微子振荡模式。

MINOS 装置由两个超级模块组成,每个超级模块重 2700t ,长 15m ,整个装置总重 5400t ,总长

31m ,造价 4450 万美元。每个超级模块由 243 块钢板和 242 块塑料闪烁体平面组成,钢板八角形, 8m 高, 8m 宽,分别用 2m 宽的钢板拼在一起焊接而成,在两边用两个耳朵挂在两边的支架上,钢板厚 2.54cm ,每块钢板后面放一块 1cm 厚的塑料闪烁体,最长 8m ,宽 4.1cm ,中间开一条小沟,用波长位移光纤连接光电倍增管读出信号,每个闪烁平面由 192 块闪烁体条组成,用两边信号幅度之比定出粒子径迹的 x 坐标, 4.1cm 的闪烁体的宽度就是 y 坐标的位置分辨率。每个超级模块只用一个磁铁线圈,用铜线绕 15 圈,通 1000A 电流,钢板内部的磁场 $B \approx 1.5 \text{T}$ 。探测器对 μ 子的动量分辨为 12% ,对强子的能量分辨为 $60\% / \sqrt{E} (\text{GeV})$,对电子簇射的能量分辨为 $23\% / \sqrt{E} (\text{GeV})$ 。

这些探测器装置对中微子振荡的探测灵敏度如图 17 所示。



图 17 MINOS, ICARUS 和核乳胶叠(ECC)长基线中微子振荡预计对 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 可探测的灵敏度

日本正在东京附近建造一台世界上流强最强的能量为 50GeV 的高能质子加速器,名叫 JHF (Japan Hadron Facility),它可以产生世界上流强最强的 ν_μ 和 $\bar{\nu}_\mu$ 中微子束流。有人建议,在北京建造一台类似于 MINOS 式样的中微子探测装置,中微子束从日本穿过地球射向北京的中微子探测装置,进行长基线中微子振荡研究。从东京至北京穿过地球的直线距离约为 2100km ,而 JHF 产生的中微子的平均能量约为 6GeV ,所以 $L/E = 2100 (\text{km}) / 6 (\text{GeV}) =$

350 而在美国,利用费米实验室能量为 125GeV 的注入器产生的中微子的平均能量约为 18GeV,中微子从费米实验室穿过地球射向 Minnesota 州的 MINOS 装置的直线距离约为 730km,所以 $L/E = 730(\text{km})/18(\text{GeV}) = 40.5$.

中微子振荡的几率为

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_x) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) \cdot L(\text{km})/E(\text{GeV})).$$

超神冈实验给出 $\Delta m^2 \approx 10^{-3} \text{eV}^2$,所以简单的估算给出:

$$\sin^2[1.27(10^{-3})2100(\text{km})/6(\text{GeV}) \text{ (东京至北京)}] = 0.185;$$

$$\sin^2[1.27(10^{-3})730(\text{km})/18(\text{GeV}) \text{ (MINOS)}] = 2.65 \times 10^{-3}.$$

因此,东京至北京对中微子振荡探测灵敏度与 MINOS 之比为 $0.185/2.65 \times 10^{-3} \approx 70$ 倍.所以,东京至北京实验如果能实现的话,将是世界上研究中微子振荡的一个较好的实验.目前 CP 破坏只在 $K^0 - \bar{K}^0$ 混合中被测量到.对强子衰变中 CP 破坏的解释是由于三代夸克的混合,混合矩阵中有三个混合角和一个与 CP 破坏有关的相角.如果三代中微子有混合,混合矩阵中有三个混合角和一个与 CP 破坏有关的相角.因此,研究中微子振荡时是否存在 CP 破坏以及确定 CP 破坏的参数是物理学上的一个重大课题.为此,有人建议,在 21 世纪初建造 μ 子贮存环, μ 子贮存环的形状比较特殊,让它的直线段很长,除了作 $\mu^+ \mu^-$ 对撞之外, μ 子在长的直线段内衰变:

$$\begin{aligned} \mu^+ &\rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e; \\ \mu^- &\rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e. \end{aligned}$$

μ 子贮存环的一个重要特点是可以产生高能电子中微子束,这与利用高能质子加速器只能产生 μ 中微子不同.利用高能电子中微子束进行中微子振荡实验至少有三大优点:

第一,电子中微子穿过地球时,与物质外层电子相互作用可能与电子反中微子穿过地球时与物质外层电子相互作用不同,这就明确表明存在物质导致的相互作用不对称性.

第二,如果贮存环中为 μ^+ ,则 μ^+ 衰变产生 $\bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e$. 有高能 $\bar{\nu}_e$ 中微子束,如果存在中微子振荡 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$,则 $\bar{\nu}_\mu$ 与探测器靶核相互作用产生 μ^- , $\bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu^- + X$. 因为原初束流不可能产生 μ^- ,所以如果探测器探测到 μ^- ,这就是存在中微子振荡的确实证据.同理,如果贮存环中为 μ^- ,则 μ^- 衰变产生: $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$. 有高能 $\bar{\nu}_e$ 中微子束,如果存在中微子振荡 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$,则 $\bar{\nu}_\mu$ 与探测器靶核相互作用产生 μ^+ , $\bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu^+ + X$. 因为原初束流不可能产生 μ^+ ,所以如果探测器探测到 μ^+ ,这就是存在中微子振荡的确实证据.

第三,可以测量中微子振荡时是否存在 CP 破坏,例如可以测量

$$CP = [P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) - P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu)] / [P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) + P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu)].$$

首先确定电子中微子振荡时是否存在 CP 破坏,其次可测量 CP 破坏的参数.

目前有理论物理学家建议,在 CERN 建造 μ 子贮存环,中微子束射向意大利的 Gran Sasso 的远点中微子探测器;在日本建造 μ 子贮存环,中微子束射向北京的远点中微子探测器;在美国建造 μ 子贮存环,中微子束射向 Minnesota 州的远点中微子探测器,进行长基线中微子振荡研究,特别是研究中微子振荡时的 CP 破坏.

μ 子贮存环目前只是理论物理学家的一种设想,要把设想变成现象,还有一段很长的路要走.

实验测量到中微子有质量是物理学发展史上一个里程碑的突破,它说明粒子物理的标准模型需要完善和发展,同时,有质量的中微子是宇宙暗物质的候选者之一.中微子因为是弱相互作用粒子,与物质相互作用截面很小.从 30 年代泡利提出存在中微子的假设到现在,70 年已经过去了,人们才用实验测量到中微子可能有质量.研究中微子的各种性质将是 21 世纪初粒子物理学和宇宙学的热门课题.这对中国物理学家是一个机遇,也是一个挑战.

参 考 文 献

- [11] Allison W W M *et al.* Phys. Lett., 1999, A49(1-2):137
- [12] Grass M *et al.* In: Edited by Chiba J *et al.* Proc. of Inter. Workshop on JHF Science 1998. Japan: Published by KEK, KEK(98-5 II) 93