

# 中微子振荡实验\*

## ——超出标准模型的实验检验( I )

何景棠<sup>1)</sup>

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

**摘要** 文章总结了中微子振荡实验的历史和现状.介绍了几个太阳中微子丢失实验的结果和几个大气  $\mu$  中微子丢失实验结果.这些结果表明存在中微子振荡,即中微子具有质量.它是超出标准模型的信号.文章还介绍了 21 世纪初研究中微子振荡的若干重要实验,例如长基线中微子振荡实验以及建造  $\mu$  子贮存环来产生高能电子中微子束进行中微子振荡的实验以及测量中微子振荡时的 CP 破坏的设想.

**关键词** 中微子丢失,中微子振荡,标准模型

# NEUTRINO OSCILLATION EXPERIMENTS

## ——TESTS BEYOND THE STANDARD MODEL( I )

HE Jing Tang

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The history and status of neutrino oscillation experiments are summarized. Several experimental results on missing solar neutrinos and atmospheric muon neutrinos are described. These results imply that there are neutrino oscillations, which means that neutrinos have mass. This is signal of beyond the standard model. Several important experiments on neutrino oscillation at the beginning of the 21st century, such as long-base-line neutrino oscillation, the idea to build a muon storage ring for producing a high energy electron neutrino beam to perform neutrino oscillation experiments and to measure the CP violation in neutrino oscillation, are also reviewed.

**Key words** neutrino missing, neutrino oscillation, standard model

### 1 引言

1998 年 6 月,在日本 Takayama 召开的 1998 年世界中微子大会上,日本物理学家宣布他们的超神冈国际合作组发现了大气中微子振荡,并给出了振荡参数的容许值,成为物理学界的头号新闻.这一事件被中国科学院院士和中国工程院院士评为 1998 年世界十大科技新闻之一.

目前核物理实验和粒子物理实验的所有结果与粒子物理标准模型理论所预言的一致.人们多年来进行了一系列实验,企图寻找超出标准模型的信号,但都没有成功.如果存在中微子振荡,这将是超出粒子物理标准模型的第一个信号.

总结多年实验事实而发展起来的粒子物理标准模型认为,中微子的质量为零,在相互作用中轻子数守恒,中微子不会从一种类型变成另一种类型.现在

超神冈实验组发现了中微子振荡,表明中微子具有质量,可以从  $\mu$  中微子变成其他类型的中微子,表明轻子数不守恒,这就超出了粒子物理标准模型,将推动粒子物理进一步发展.

宇宙学的实验研究表明,90%的宇宙质量是暗物质.由于中微子充满整个宇宙,有质量的中微子是宇宙暗物质的候选者之一.

预计未来几十年,用实验研究中微子的各种性质将是粒子物理学中的活跃课题.

### 2 中微子质量和中微子振荡

从 40 年代末开始,人们利用核  $\beta$  衰变和粒子衰变中能动量守恒规律,测量衰变产物的能动量,来推

\* 2000 - 06 - 01 收到初稿,2000 - 09 - 20 修回

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

算看不见的中微子的质量.例如,利用氚的 $\beta$ 衰变: ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \nu_e$ ,测量电子的端点能来推算 $\nu_e$ 的质量;利用 $\pi^+$ 的静止两体衰变: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ,测量 $\mu^+$ 的动量来推算 $\nu_\mu$ 的质量;利用 $\tau$ 的 $3\pi\nu_\tau$ 和 $5\pi\nu_\tau$ 衰变,测量 $3\pi$ 和 $5\pi$ 的动量来推算 $\nu_\tau$ 的质量.

图1表示从1949年开始各种实验测量得到的 $\nu_e, \nu_\mu$ 和 $\nu_\tau$ 质量上限值随年代的变化.目前已发表的实验结果的最好值是<sup>[1]</sup>: $\nu_e < 3\text{eV}$ ;  $\nu_\mu < 170\text{keV}$ ;  $\nu_\tau < 18.2\text{MeV}$ .

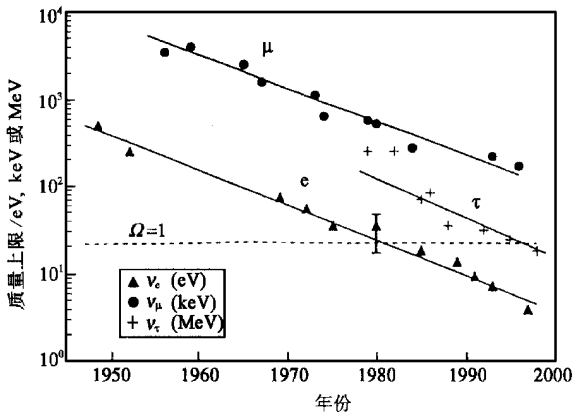


图1  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ 质量实验测量值随年代变化

虽然随着年代的变化,实验技术有了飞速发展,实验测量到的中微子质量上限值不断下降,但目前各种实验还未精确确定中微子的质量值.图1中的虚线代表宇宙学理论建议,如果 $\Omega=1$ ,有质量的中微子是宇宙中的暗物质的一部分的话,那么 $\nu_e, \nu_\mu$ 和 $\nu_\tau$ 三种中微子的质量之和不得大于 $25\text{eV}$ .

如果中微子有质量,根据基本粒子波传播的性质,它会产生中微子振荡.假设中微子质量本征态是 $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ,而实验上看到的弱相互作用本征态 $\nu_e, \nu_\mu$ 和 $\nu_\tau$ 是 $\nu_1, \nu_2$ 和 $\nu_3$ 的叠加:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

混合矩阵 $A$ 中有三个混合角和一个相位角,相位角是与CP破坏有关的一个物理量.如果作一简化,假设存在两种中微子 $\nu_\mu$ 和 $\nu_\tau$ ,上述公式可简化为

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

即  $\nu_\mu = \cos\theta\nu_1 + \sin\theta\nu_2$ ,

$\nu_\tau = -\sin\theta\nu_1 + \cos\theta\nu_2$ ,

式中 $\theta$ 是 $\nu_\mu$ 和 $\nu_\tau$ 的混合角.

利用加速器的高能质子打击靶产生 $K$ 介子和 $\pi$ 介子,让它们通过偏转磁铁,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,这些介子随后发生衰变: $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ;  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ .衰变通道的后部是一个吸收体,它的厚度足以把 $\mu$ 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,所以从吸收体出来的几乎是纯的 $\mu$ 中微子束.经过一段距离传播之后,由于 $\nu_1$ 和 $\nu_2$ 的相位变了,因此部分 $\nu_\mu$ 会变成 $\nu_\tau$ ,这就叫做中微子振荡.如果从理论上可以准确计算产生点的 $\nu_\mu$ 流强或者在产生点附近放一个探测装置测量该点的 $\nu_\mu$ 流强,在 $L$ 远处再放另一个探测器装置,测量经过 $L$ 距离后的流强.利用基本粒子性质,可通过计算得到如下结果:如果中微子有质量 $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$ ,中微子束流能量为 $E$ ,则经过 $L$ 距离后,从 $\nu_\mu$ 变成 $\nu_\tau$ 的几率是:

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

而 $\nu_\mu$ 仍然保留为 $\nu_\mu$ 的几率是:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 [1.27 \Delta m^2 L / E].$$

如果距离产生点 $L$ 的探测装置探测到 $\nu_\mu$ 的流强少了,这种实验叫做消失实验,说明有部分 $\nu_\mu$ 丢失了,它变成了其他类型的中微子,说明存在中微子振荡,表明中微子有质量差.如果中微子没有质量,质量差为零, $\sin 0 = 0$ ,就不存在中微子振荡.

有些实验更进一步,在距离 $\nu_\mu$ 中微子源产生点 $L$ 处放一种可鉴定 $\tau$ 轻子的探测装置,例如核乳胶叠,探测是否存在从 $\nu_\mu$ 变成的 $\mu\tau$ ,而 $\nu_\tau$ 与核乳胶叠相互作用产生 $\tau$ 轻子,因为核乳胶的空间分辨率可达 $0.5\mu\text{m}$ ,能够看到 $\tau$ 轻子从产生到衰变的径迹.在核乳胶叠后面,再放一个磁谱仪,可测量 $\tau$ 轻子衰变的产物,从 $\tau$ 中微子产生了带电流反应:

$$\nu_\tau + N \rightarrow \tau + X,$$

由 $\tau^-$ 的存在,从实验上证实存在 $\tau$ 中微子 $\nu_\tau$ .这种实验叫做出现实验.

如果作另一种简化,假设存在 $\nu_e$ 和 $\nu_\mu$ 两种中微子,则

$$\nu_e = \cos\theta\nu_1 + \sin\theta\nu_2,$$

$$\nu_\mu = -\sin\theta\nu_1 + \cos\theta\nu_2,$$

式中 $\theta$ 是 $\nu_e$ 和 $\nu_\mu$ 的混合角,则可得从 $\nu_e$ 变成 $\nu_\mu$ 的几率是:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 [1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) L (\text{m})] / E (\text{MeV}).$$

$\nu_e$ 仍然保留为 $\nu_e$ 的几率是:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 (1.27 \Delta m^2 L / E).$$

利用核电站的核反应堆产生纯的 $\nu_e$ 束,从核电站的输出功率可以准确计算 $\nu_e$ 的流强,在离核电站 $L$ 处

放一个对  $\nu_e$  反应产物灵敏的探测器,则可用  $\nu_e$  消失法研究  $\nu_e$  中微子振荡.

### 3 太阳中微子丢失与中微子振荡

人们知道,核聚变是太阳能的源泉.在总结多年对太阳观测的基础上,理论上发展了一个标准的太阳模型(Standard Solar Model,SSM).核聚变会放出中微子,标准的太阳模型可以预言每秒穿过地球上某一面积的中微子数量.图2表示标准太阳模型预言的中微子能谱.

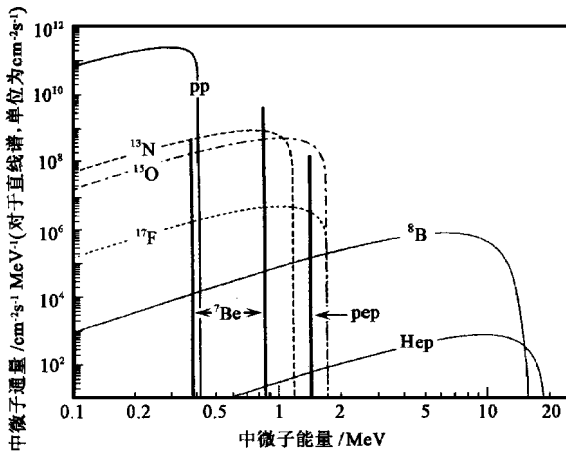
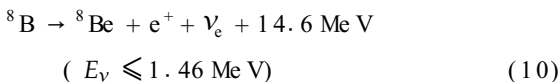
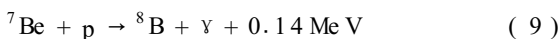
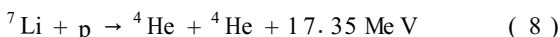
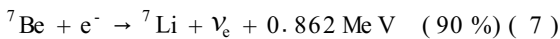
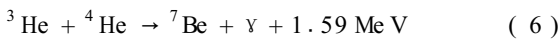
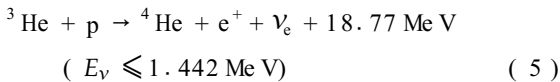
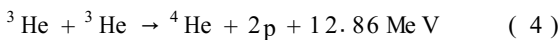
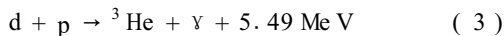
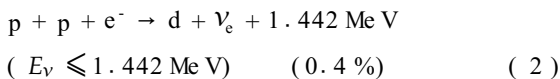
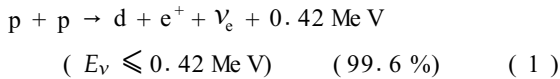
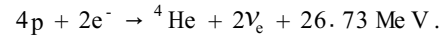


图2 太阳中微子能谱

太阳核聚变主要有两个循环:其一叫 pp 循环;其二叫 CNO 循环.pp 循环包括以下反应过程:



放出中微子的反应是(1),(2),(5),(7)和(10)式. PP 循环的实质是:



CNO 循环产生  $\nu_e$  中微子的反应为

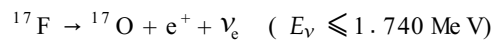
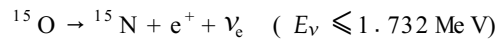
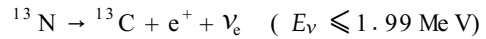
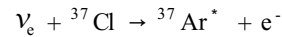


图2中的虚线为 ${}^{13}\text{N}$ , ${}^{15}\text{O}$ 和 ${}^{17}\text{F}$ 的 $\nu_e$ 中微子能谱.

60年代初,美国的 Davis 建造了一个大型探测器,把它放在南达科他州的地下矿井中<sup>[2]</sup>.图3是 Davis 等人的实验装置示意图. Davis 等人采用 390000L 的  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ,太阳中微子  $\nu_e$  与  ${}^{37}\text{Cl}$  作用产生  ${}^{37}\text{Ar}^*$ :



这个反应的阈能是  $E_t = 814 \text{ keV}$ .390000L 的  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  被太阳中微子照射一段时间之后,用化学提纯的办法把  ${}^{37}\text{Ar}^*$  提取出来,然后测量  ${}^{37}\text{Ar}^*$  的放射性,就可测得太阳中微子的通量.理论上定义一个太阳中微子单位是每秒钟太阳中微子与  $10^{36}$  个靶原子相互作用产生一个事例,即

$$1 \text{ SUN (Solar Neutrino Unit)}$$

$$= 1 \text{ 事例} / (\text{秒} \cdot 10^{36} \text{ 靶原子}).$$

理论预言, Davis 等人的探测装置可以探测到的能量大于 814keV 的太阳中微子的通量为

$$I_\nu \approx (7.9 \pm 2.6) \text{ SUN}.$$

Davis 等人从 60 年代起一直测量到现在,这些年的实验结果如图4所示.图4的右上角表示标准的太阳模型的预言值及可容许的误差范围.实际测量到的太阳中微子流强的结果 20 年来的平均值是:

$$I_\nu \approx (2.1 \pm 0.3) \text{ SUN}.$$

可以看到,实验测量到的太阳中微子通量约为理论预言值的三分之一,三分之二的太阳中微子丢失了.这就是太阳中微子丢失之谜.

Davis 等人的实验,由于阈能较高(814keV),所以它只是探测到太阳中微子流强中的非主流部分,它没有探测到太阳中微子流强中的主要部分即能量较低的 PP 中微子,而且它是放射化学反应,它测量的是某一段时间间隔内的中微子能量大于 814keV 的积分能谱,它不能测量每个中微子事例的时间,又不能测量中微子的入射方向,不能判断中微子是否真的从太阳射向地球.

从 70 年代末到 80 年代初,为研究质子衰变而建造的大型水切连科夫探测装置 Kamiokande<sup>[3]</sup>和 IMB<sup>[4]</sup>也用于探测太阳中微子. Kamiokande 水切连

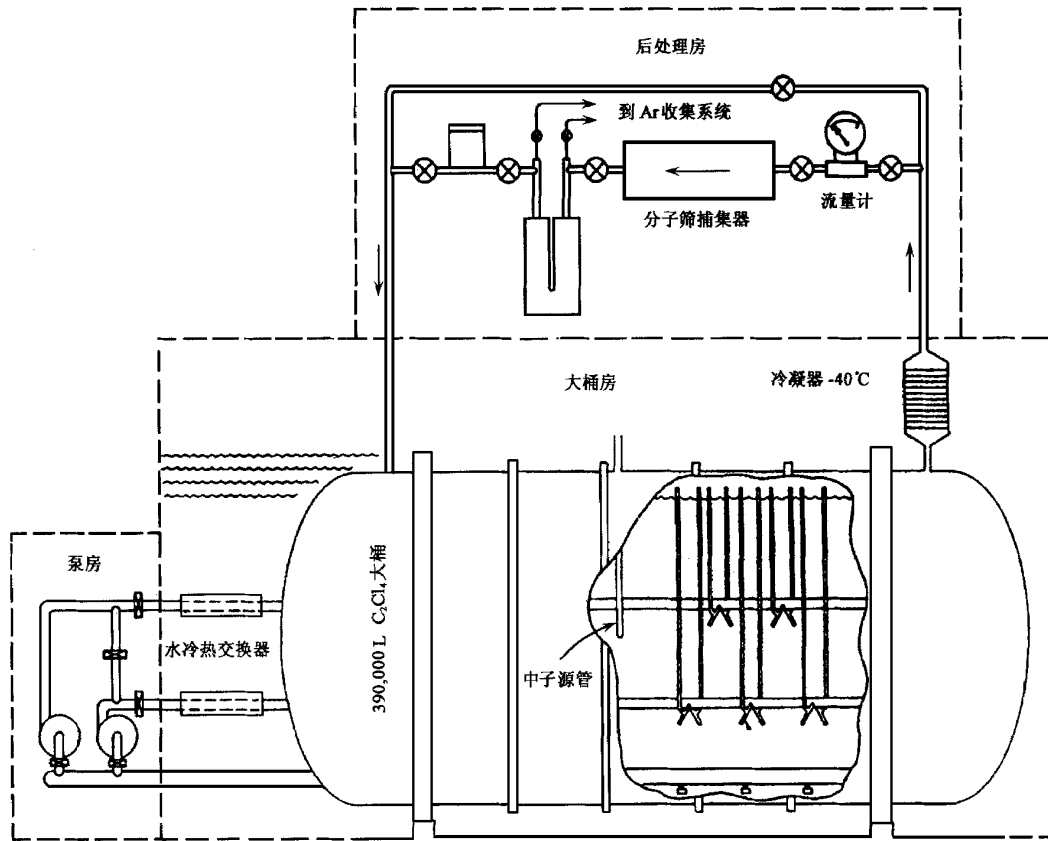


图3 Davis 等人的实验装置示意图

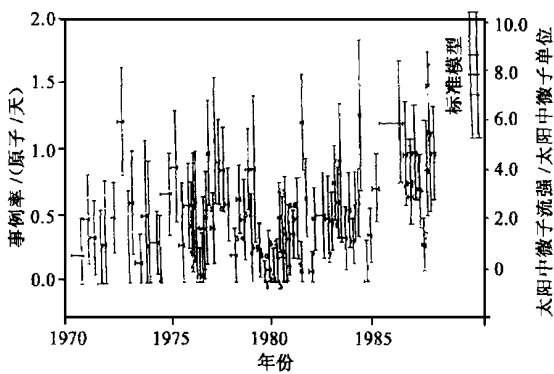


图4 Davis 等人测量到的太阳中微子流强的实验结果

科夫装置是一个大的圆柱形水桶,直径15.6 m,高16 m,内装3000吨水,用948个光电倍增管读出信号,放于离京都约300 km的神冈矿井中,深约825 m,相当于2400 m水当量。IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven) 水切连科夫装置是一个高18 m,宽17 m,长22.5 m的立方水槽,六面总共用2048个光电倍增管读出信号,放在俄亥俄州Cleveland的Thiokol的盐矿中,该盐矿深约600 m,相当于1600 m的水当量。

通过 $\nu_e$ 与电子 $e^-$ 的散射,即 $\nu_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$ ,

高能电子 $e^-$ 穿过水时可产生切连科夫光,切连科夫光与电子入射方向的夹角 $\alpha$ 与电子速度的关系为

$$\cos\alpha = 1/\beta n, \beta = v/c,$$

式中 $c$ 为光速, $n$ 是水的折射率。切连科夫光在光电倍增管的墙上形成一个光环,测量光环的半径就可测量电子的速度,也就是电子的能量。电子的能谱是中微子能谱的反映。但水切连科夫探测器的缺点是阈能太高,约为8 MeV,也就是说,它们只对 $^8\text{B}$ 的太阳中微子灵敏。

图5是Kamiokande早期公布的实验结果,观察到的太阳中微子流强只有标准太阳模型预言值的一半左右。IMB的实验结果也证实了存在太阳中微子丢失。由于切连科夫光具有方向性,因此证实了中微子是来自太阳。

为了收集到更多的太阳中微子事例和大气中微子事例,Kamiokande合作组建造了更大的水切连科夫探测装置,名叫Super-Kamiokande或简称Super-K或超神冈探测器<sup>[5]</sup>。它是一个直径为39 m,高度为40 m的圆柱形大水桶,放于神冈町地下1 km深的矿井中,总共装有5万吨纯水,分成两部分,外围约2 m厚的水作屏蔽层,用1085个光电倍增管读出信号,

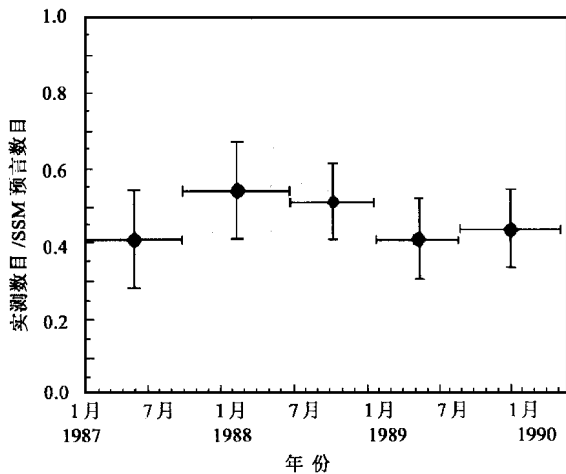


图5 Kamiokande 太阳中微子流强实验结果

以便屏蔽宇宙线打击矿坑岩石射出的中子本底;内部为有效体积,总共约 2.25 万吨纯水,用 11146 个光电倍增管读出信号,如图 6 所示.超神冈探测装置投入运转后,收集到更多的太阳中微子事例,进一步证实了存在太阳中微子丢失现象.

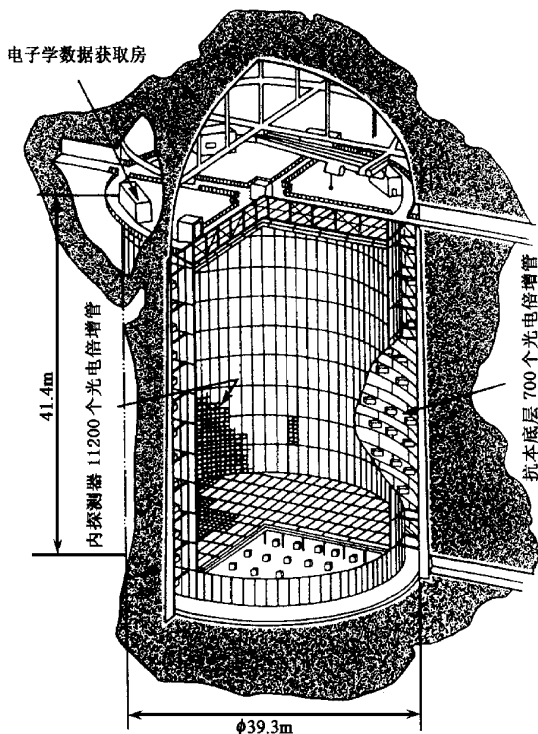
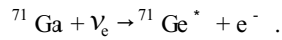


图6 超神冈探测器装置示意图

为了测量能量较低的 PP 太阳中微子,苏美合作建造了 SAGE (Soviet-American Gallium Experiment) 装置<sup>[6]</sup>.它用 57 吨金属镓,放在北高加索的 Baksan 的深度约为 4700 m 水当量的地下中微子观察站内.欧美建造了 GALLEX (GALLium EXperiment) 装置<sup>[7]</sup>,它使用 105 吨的 GaCl<sub>3</sub>,包含有 30 吨的金属镓,放在意大利的 Gran Sasso 地下实验室内,

实验室顶部的岩石厚约 1400 m,即约 3400 m 水当量.

SAGE 和 GALLEX 使用下列反应来探测太阳中微子:



阈能是 0.233 MeV,所以 SAGE 和 GALLEX 实验对所有的太阳中微子都灵敏.SSM 理论预言,GALLEX 可以探测到的太阳中微子流强为

$$I_\nu = 132 \pm 17 \text{ SUN.}$$

GALLEX 给出的实验结果是:

$$I_\nu = 79 \pm 10 \pm 6 \text{ SUN,}$$

而 SAGE 给出的实验结果是:

$$I_\nu = 74 \pm 13 \pm 7 \text{ SUN (90\% C. L.)}$$

从上述实验结果可以认为,由于不同的国家进行了不同的实验,采用了对不同能量中微子灵敏的不同技术,都测量到太阳中微子丢失了.因此,太阳中微子丢失是一个被物理学界公认的实验事实.

太阳中微子丢失的最直观的解释是因为中微子有质量,存在中微子振荡.太阳中微子在长距离的传播中,有一部分变成了其他类型的中微子.但研究太阳中微子的实验只对太阳中微子灵敏,对其他类型的中微子不灵敏,因此实际测量到的是中微子经振荡效应后剩下的那部分太阳中微子,因此,实际测量值就比不存在中微子振荡的理论预言值要小.

假设太阳中微子在太阳内部产生,它首先穿过太阳内部,然后再射向地球.电子中微子穿过物质时,通过相干的向前弹性散射会影响电子中微子的传播.太阳内部物质的核外电子会使太阳中微子(电子中微子)的振荡效应增强,这就是 MSW (Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein) 效应.把观测到的实验数据进行拟合,太阳中微子振荡的参数如图 7 所示.即如果考虑 MSW 效应,中微子质量平方差约

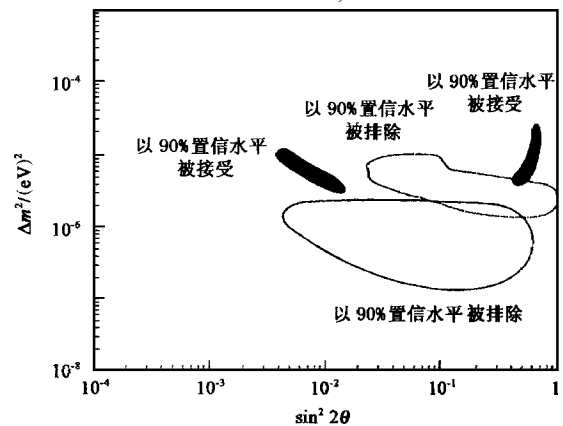


图7 太阳中微子振荡参数拟合结果

为  $10^{-5} eV^2$  量级.

理想的太阳中微子探测器最好能同时测量中微子到达的时间,能测量所有的太阳中微子能谱和中微子的入射方向,此外,太阳中微子如果因中微子振荡而变成了其他类型的中微子,例如  $\nu_e \rightarrow \nu_x$ ,最好能用实验判明存在  $\nu_x$  的证据.目前提出了不少实验建议,如建造新的实验装置.已建造的有加拿大的 SNO(Sudbury Neutrino Observatory) 装置<sup>[8]</sup>.已获批准正在建造的有意大利的 Borexino 装置<sup>[9]</sup>和日本的 KamLAND 装置<sup>[10]</sup>.

SNO 装置利用 1000 吨价值约 3 亿美元的重水作为探测介质,放在透明的塑料圆筒内,用 9600 个光电倍增管读出信号,塑料圆筒外部为 7300 吨普通纯水包围,以便排除本底信号.探测器放于加拿大的 Sudbury 附近的矿井中,离地面深约 2070 m,相当于 5900 m 水当量.SNO 实验的目的是同时探测带电流反应和中性流反应,以判明来自太阳的中微子中是否存在  $\nu_x$ :



$\nu_x$  的中性流反应会产生中子,中子随后被质子俘获,会放出能量为 2.2 MeV 的特征  $\gamma$  射线.比较带电流反应和中性流反应的事例率,就可判断来自太阳的中微子中,除了电子中微子之外,是否存在  $\nu_x$  中微子.就可证明确实存在中微子振荡,而这是不依赖于具体的太阳模型的.SNO 已于 1999 年开始取数据,估计 2—3 年后会有实验结果.

Borexino 装置如图 8 所示.它是一个直径 18 m、高 18 m 的不锈钢大圆筒.圆筒的最内层放一个直径为 8.5 m 的圆球,圆球由透明的塑料包装,里面充以

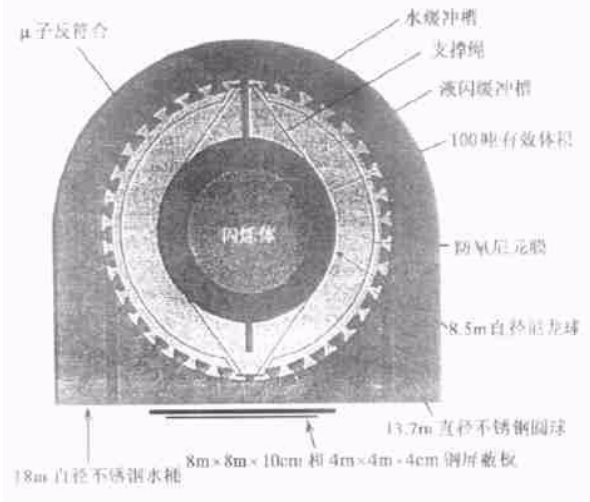


图 8 Borexino 实验装置示意图

300 m<sup>3</sup> 的超纯液体闪烁体,把最内层的 100 m<sup>3</sup> 的液体闪烁体作为有效探测体积;中层是一个直径为 13.7 m 的不锈钢圆球,外层与中层之间充以纯水,中层球面用 2200 个直径为 20 cm 的光阴极面,向内层的光电倍增管读出最内层液体闪烁体探测到的太阳中微子事例的信号,这个中层不锈钢壳还装有 200 个直径为 20 cm 的光阴极面,向外层的光电倍增管读出中层与外层之间的纯水产生的切连科夫光信号,这是宇宙线本底在岩石打出的  $\mu$  子或中子引起的本底.所有的光电倍增管和结构材料选用低放射性物质,纯水和液体闪烁体也用特殊的方法加以提纯,以便使含有的天然放射性杂质减到最低限度.

通过探测太阳中微子与靶物质的电子的弹性散射,探测反冲电子的能量来探测太阳中微子.Borexino 实验的主要目的在于探测低能的太阳中微子,<sup>7</sup>Be 的太阳中微子有两条单能的谱线,即  $E_\nu = 384 \text{ keV}$  和  $E_\nu = 862 \text{ keV}$ .除了测量总流强的变化研究太阳中微子振荡之外,<sup>7</sup>Be 太阳中微子流强的日/夜变化以及随季节的变化将是太阳中微子存在振荡的直接证据,与具体的太阳模型无关.白天,太阳中微子直接到达探测器,夜间,太阳中微子要穿过地球才能到达探测器,如果太阳中微子事例率日/夜有变化,将是对与穿过物质有关的 MSW 效应的检验;夏季地球离太阳最近,冬季地球离太阳远了,中微子振荡的几率与  $L/E$  有关,如果太阳中微子事例率随季节变化,表明它与地球离太阳的距离  $L$  有关,也就是太阳中微子存在振荡的直接证据.

Borexino 计划 2000 年底获取数据.如果不存在中微子振荡,则每天记录到不同能量的太阳中微子事例为 12 至 40 个事例之间;如果平均每天事例率少于 16 个事例,就是太阳中微子存在振荡的证据.

KamLAND(Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector)装置如图 9 所示.它的中心部分是一个直径为 13 m 的圆球,用透明塑料包装,内装 3000 吨液体闪烁体,透明塑料可以阻挡来自外部的氦的放射性,外面用 2.5 m 厚的超纯矿物油作隔离层,以排除宇宙线在岩石中打出的  $\mu$  子和中子本底.用 2000 个直径为 17 in (1 in = 0.0254 m) 的特别的光电倍增管读出信号,时间分辨可达 3.5 ns,由于时间分辨好,可保证中微子事例来自中央部分的有效体积.整个装置由一个直径为 18 m 的不锈钢圆球支持,外面是一个不锈钢圆柱,圆柱与圆球之间充以纯水,宇宙线  $\mu$  子通过纯水时产生切连科夫光,用以前 Kamikande 装置使用过的旧光电倍增管读出这部



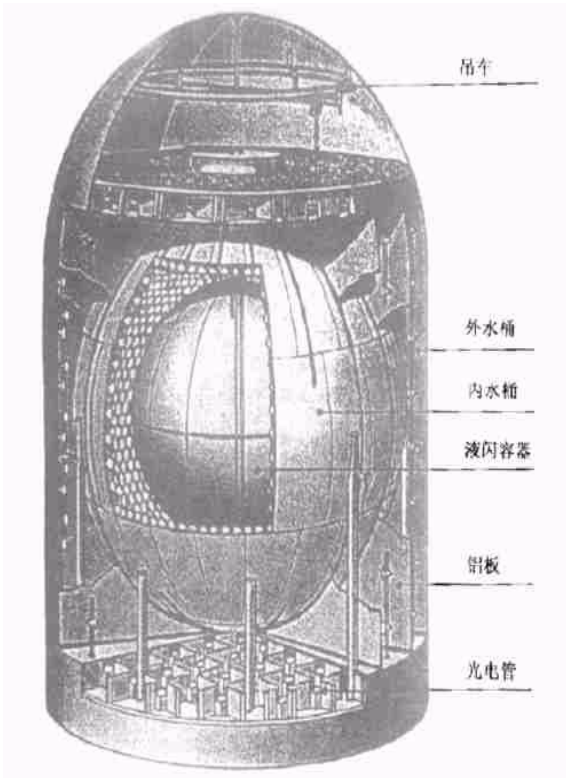


图9 KamLAND实验装置示意图

分纯水的信号,以排除宇宙线 $\mu$ 子本底.使用旧设备可以降低造价.KamLAND实验由匈牙利、日本和美国科学家合作建造,计划2001年获取数据.

KamLAND实验的主要任务是探测来自200km以内的核电站的核反应堆来的电子反中微子以及探测太阳中微子.

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n,$$

$e^+$ 湮没产生两个能量为0.511 MeV的瞬发 $\gamma$ 射线,随后中子被俘获,产生一个延迟的高能 $\gamma$ 射线,因此,来自核反应堆的 $\bar{\nu}_e$ 在探测装置中产生两个信号;而太阳中微子与靶物质的电子散射,只产生一个电子,因此在探测器中只产生一个信号.KamLAND与Borexino类似,主要探测 $^7\text{Be}$ 和 $^8\text{B}$ 的太阳中微子的流强.KamLAND装置位于Houshu岛的中央,周

围有几个核电站,可以测量来自这些核电站的电子反中微子的流强.

预计取三年数据,对电子中微子的振荡参数 $\Delta m^2$ 的上限值可以压低2—3个数量级,如图10所示.

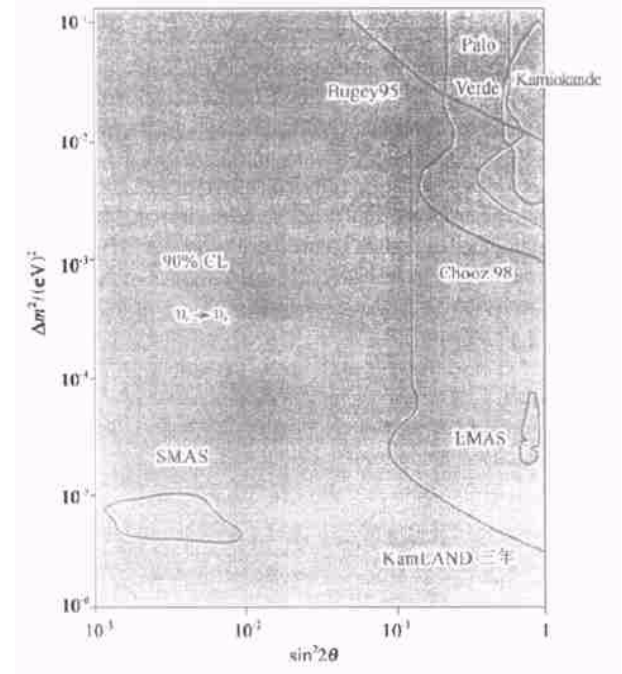


图10 KamLAND实验预计测量 $\nu_e \rightarrow \nu_x$ 振荡的灵敏度

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Particle Data Group. Eur. Phys. J., 1998, C3(1) :1
- [ 2 ] Jr Davis R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1968, 20(21) :1205
- [ 3 ] Hirata K S *et al.* Phys. Lett., 1989, 220B(1—2) :308
- [ 4 ] Seidel S *et al.* Phys. Rev. Lett., 1988, 61(22) :2522
- [ 5 ] Sinclair D *et al.* Nucl. Phys., 1991, 19B(proc. suppl) :100
- [ 6 ] Abazov A I *et al.* Phys. Rev. Lett., 1991, 67(21) :3332
- [ 7 ] Kirsten T *et al.* Phys. Rev. Lett., 1983, 50(7) :474
- [ 8 ] McDonald Art. CERN COURIER, 1998, 38(1) :1
- [ 9 ] Bellini G. CERN COURIER, 1998, 38(7) :12
- [ 10 ] Gratta G. CERN COURIER, 1999, 39(3) :22

(未完待续)

(上接第67页)

- [ 6 ] E760 Collaboration. Proposal to Continue the Study of Charmonium Spectroscopy in Proton-Antiproton Annihilations( Revised proposal P-835), 1992
- [ 7 ] Bai J Z *et al.* (BES Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1998, 81 :3091
- [ 8 ] Bai J Z *et al.* (BES Collaboration). Phys. Rev., 1999, D60 :072001
- [ 9 ] Quigg C. Perspectives on heavy quark 98. Workshop on Heavy Quarks at Fixed Target, Oct. 1998; Fermilab-conf/98/390-T (1998)

- [ 10 ] Bai J Z *et al.* (BES Collaboration). Phys. Rev., 1998, D58 :092006
- [ 11 ] Huang H W *et al.* Phys. Rev., 1996, D54 :6850; Erratum-ibid. 1997, D56 :1821
- [ 12 ] Schuler G A. Nucl. Phys. Proc. Suppl., 1998, 64 :450; Bolz J *et al.* Eur. Phys. J., 1998, C2 :705; Wong S M H. hep-ph/9903221 (1999)
- [ 13 ] Ebert D. hep-ph/9911283 (1999)
- [ 14 ] CLEO Collaboration. hep-ex/0004032 (2000)
- [ 15 ] Groom D E *et al.* (PDG) Review of Particle Physics, Eur. Phys. J., 2000, C15 :1