

大亚湾反应堆中微子实验*

王贻芳[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 中微子振荡是目前唯一超出粒子物理标准模型的新现象,它证明了中微子质量不为零,对粒子物理、天体物理与宇宙学均有非常重要的意义.在描述中微子振荡的6个参数中,目前仍有两个未知:交叉混合角 θ_{13} 与CP相角 δ .作者建议在大亚湾反应堆附近建设一个中微子实验站,测量混合角 $\sin^2 2\theta_{13}$ 在90%的置信度下达到0.01的精度,较过去的实验提高近一个数量级.这将对中微子物理的未来发展提供方向性指导,特别是对理解宇宙中“反物质消失之谜”具有重要意义.

关键词 中微子,探测器,振荡,混合,反物质

A neutrino experiment using the Daya Bay reactor

WANG Yi-Fang[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Neutrino oscillation is the only phenomenon currently known beyond the standard model of particle physics. It proves that the neutrino mass is not null, a conclusion extremely important to particle physics, astrophysics and cosmology. Among the six parameters for describing neutrino oscillations, two are still unknown: the mixing angle θ_{13} and the CP phase δ . We propose to build an experiment near the Daya Bay nuclear power station to measure the mixing angle $\sin^2 2\theta_{13}$ to a precision of 0.01 at 90% confidence level, an improvement of about one order of magnitude over past experiments. This will provide a guideline for the future development of neutrino physics, and in particular for the understanding of the absence of anti-matter in the universe.

Keywords neutrino, detector, oscillation, mixing, anti-matter

大亚湾反应堆中微子实验^[1]计划利用我国大亚湾核电站群独有的自然条件,特别是其堆功率高,周围有山,便于建设地下实验室等与国际上同类反应堆相比所独有的条件,测量中微子振荡的6个关键参数之一,也是目前未知的两个参数之一——中微子交叉混合角 θ_{13} .该项目可测量混合角 $\sin^2 2\theta_{13}$ 在90%的置信度下达到0.01的精度,较过去的实验提高近一个数量级,对中微子物理的未来发展将提供方向性指导,特别是对理解宇宙中“反物质消失之谜”具有重要意义.由于其重大的科学意义,目前已得到中国科学院、科技部、国家自然科学基金委员会、广东省、深圳市、中国广东核电集团和美国能源部的大力支持,是中美两国目前在基础科学研究

领域最大的合作项目之一,有望取得重大原始性创新成果.

1 实验的科学意义与目标

1.1 中微子物理及 θ_{13}

粒子物理研究的结果表明,构成物质世界最基本的12种粒子中有3种是中微子(电子中微子, μ

* 国家重点基础研究计划(批准号:2006CB808100)、国家自然科学基金(批准号:10225524,10535050,10475086)和中国科学院百人计划及专项基金资助项目

2006-11-15收到初稿,2007-01-04收到修改稿

[†] Email: yfwang@ihep.ac.cn

中微子和 τ 中微子)。中微子不带电,仅参与非常微弱的弱相互作用,极难探测。但宇宙中存在大量的中微子,约为 $100 \text{ 个}/\text{cm}^3$,与光子数相等。它在最微观的粒子物理规律和最宏观的宇宙的起源及演化中都起着十分重大的作用。虽然粒子物理的标准模型假设中微子质量为零,但由于中微子在宇宙中数量巨大,其质量是否绝对为零,对粒子物理、天体物理与宇宙学均具有根本的影响。过去几十年来,大量的直接测量实验均未获得中微子质量不为零的证据^[2]。

上世纪 60 年代, Pontecorvo B 提出如果中微子有质量,且其质量本征态不同于弱作用本征态,由量子力学的基本原理可推知不同的中微子在飞行中能够互相转换,即由一种中微子变为另一种中微子,称之为中微子混合,或中微子振荡。中微子振荡与中微子质量有关,是探测中微子质量最灵敏的方法。三种不同的中微子之间相互转换规律可用下列矩阵描述:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & e^{-i\delta} & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix},$$

其中 $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ ($i, j = 1, 2, 3$)。这里第一个矩阵(混合角 θ_{23})描述通常所说的大气中微子振荡,第三个矩阵(混合角 θ_{12})描述通常所说的太阳中微子振荡。它们已分别由 Homestate, Super-K, SNO 与 KamLAND 等实验先后证实其不为零,即中微子之间发生了振荡^[3]。由于其对粒子物理、天体物理与宇宙学的重要意义, Homestate 与 Super-K 实验的 Davis R 与小柴昌俊分享了 2002 年的诺贝尔物理学奖。

第二个矩阵中的混合角 θ_{13} 与 CP 项角 δ 目前还是未知数,美国物理学会在其 2004 年中微子研究报告中将用反应堆实验测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 列为未来实验的第一优先^[4],因为精确测量 θ_{13} 具有以下重大的科学意义:

(1)它是中微子物理中 6 个最基本的参数之一,必须测量它的大小以了解轻子味混合与夸克味混合之间的关系,是构建比标准模型更基本的大统一理论的基础。

(2) θ_{13} 数值的大小决定了中微子振荡中的 CP 项角 δ 是否能被实验观测到,而该 CP 相角通过 leptogenesis 机制可以解释宇宙中“反物质消失之谜”,即为什么我们今天看不到宇宙大爆炸后产生的与物质数量相同的反物质。如果 $\sin^2 2\theta_{13}$ 在人们所预计的 0.01—0.03 之间,则中微子混合的 CP 相角可以测量,宇宙中“反物质消失之谜”可能得以解释。如果

它太小,则中微子的 CP 相角无法测量,目前用中微子混合来解释宇宙中物质与反物质不对称的理论便无法证实。

(3) $\sin^2 2\theta_{13}$ 接近于零也预示着新物理或一种新的对称性的存在,因此不论是测得 $\sin^2 2\theta_{13}$ 或只给出其上限值,均有极为重要的意义。

(4)中微子振荡是第一个,也是目前唯一超出粒子物理标准模型的物理现象,精确测定它的数值将使我们能够寻找与鉴别超出粒子物理标准模型的新物理。

目前理论上对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的预言相差很大,不同的模型给出完全不同的数值,但基本上集中在 0.001—0.1 之间^[5],如图 1 所示。因此实验上希望测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度应达到 0.01 以下。目前大多数理论不认为 $\sin^2 2\theta_{13}$ 会严格为零(因为这需要新的对称性保证),即使为零,由于辐射修正,在低能情况下也会表现出不为零。

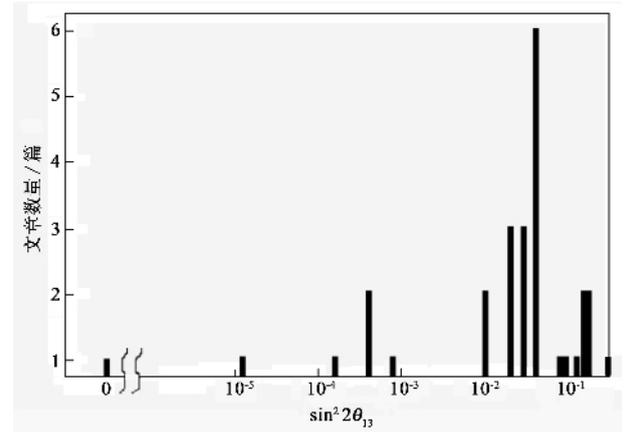


图 1 理论上对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 数值大小预言的分布情况。

实验上对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量目前均未给出肯定的答案。Chooz, Palo Verde 与 Super-K 等实验在直接搜寻中未发现 $\sin^2 2\theta_{13}$ 不为零的证据,如图 2 所示^[6]。其给出的 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的上限在 90% 的置信度下为 0.17,对应的实验误差为 3.9%。而利用目前全部中微子实验数据的拟合结果得出 $\sin^2 \theta_{13}$ 的最可几值约为 0.01^[7](相应于 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.04$)。可见将 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量灵敏度下推到 0.01 左右在理论与实验方面都具有极为重要的意义,而这要求实验误差达到小于 0.5% 的水平,对实验的设计与实现都提出了极大的挑战。

1.2 反应堆实验测量 θ_{13}

研究中微子的相互作用规律,首先就要有合适

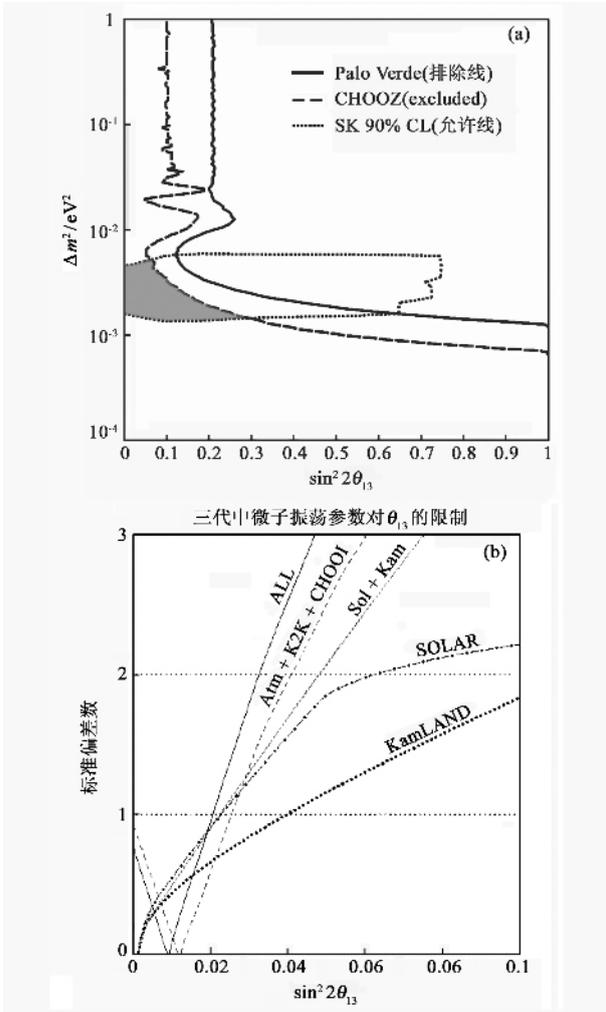


图2 目前国际上对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的实验测量 (a) 直接测量^[6] 其中阴影部分为目前 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的允许范围 (b) 用目前全部中微子实验数据拟合的结果 $\sin^2 \theta_{13}$ 的最可几值约为 0.01^[7]

的中微子源. 测量中微子, 实际上是测量它与探测器及周围物质相互作用的产物. 由于中微子是弱作用粒子, 有极强的穿透力, 作用率极低, 因此对它的测量十分困难, 必须找到尽可能强的源. 太阳在燃烧过程中会产生大量中微子(太阳中微子); 宇宙线粒子在进入大气层后与大气发生相互作用, 也会产生大量中微子(大气中微子); 但这些中微子由于流强不够或距离太远, 不适合测量振荡几率极小的 θ_{13} . 通过粒子加速器可以产生所需的中微子, 也可以测量 θ_{13} , 其振荡几率可近似由下式表示:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \theta_{13} \sin^2(1.27 \Delta m_{23}^2 L/E) + \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2(1.27 \Delta m_{12}^2 L/E) - A(\rho) \cos^2 \theta_{13} \sin \theta_{13} \sin \delta$$
, 其中 θ_{13} 、地球的电子密度 $A(r)$ 和 CP 相位角 δ_{CP} 都未知. 因此仅通过实验测量振荡几率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ 很难唯一确定其中任何一个参数. 另一个问题就是, 此

类实验要求有流强极高的质子加速器或 μ 子储存环作为中微子工厂, 耗资巨大.

与此相反, 核电站在利用核能发电时, 其核反应过程会有许多次级粒子产生, 包括大量的电子反中微子(以下简称为中微子), 是很好的中微子源. 中微子辐射各向同性, 产生率与核电站的热功率成正比, 流量与观测点距反应堆的距离平方成反比. 由于与探测器的距离较近, 反应堆中微子的通量比太阳和大气中微子高好几个数量级, 可以用来测量振荡几率极小的 θ_{13} . 其振荡几率如下式所示:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(1.27 \Delta m_{13}^2 L/E) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2(1.27 \Delta m_{12}^2 L/E)$$

由于测得的振荡几率只与 θ_{13} 这个未知数有关, 可以唯一确定 θ_{13} . 反应堆中微子如果发生振荡, 会造成一部分中微子转化为另一种不能被探测到的中微子, 因而观测到的中微子数会偏离平方反比关系. 由图3可见, 在距离反应堆 2km 左右的地方此效应为极大. 同时由于不同能量的中微子振荡频率不同, 观测到的能谱将发生有规律的畸变. 通过对中微子总数与能谱的观测, 可以确定 θ_{13} 的大小. 反应堆中微子实验耗资较少, 技术成熟, 建设周期短. 它的结果可以为耗资巨大的加速器长基线中微子振荡实验(用来测量 Δm_{32}^2 的符号和 δ_{CP})指明方向.

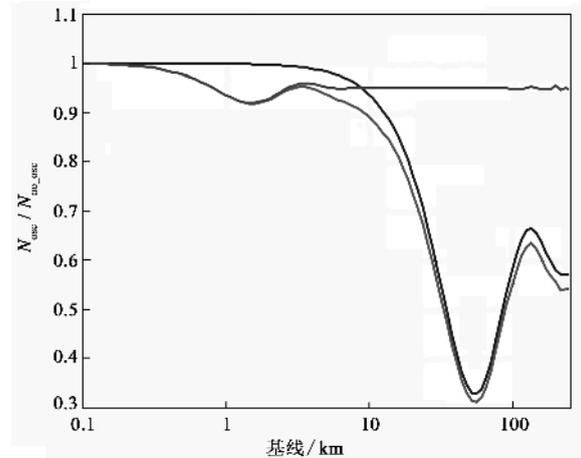


图3 反应堆中微子振荡的观测效应, 即观测到的中微子数与预期的无振荡时中微子数之比. 图中第一个谷由 θ_{13} 造成, 第二个谷由 θ_{12} 造成

1.3 大亚湾实验的优势

基于以上认识, 用反应堆中微子实验测量 θ_{13} 成为当前国际粒子物理实验的热点. 中国的高能物理学家自 2003 年起进行了大量的研究和计算, 并进行了实地考察, 提出了利用大亚湾反应堆测量中微子

表 1 世界上几个反应堆实验方案的参数比较

实验(建议)	反应堆热功率/GW	基线长(近/远)/m	探测器质量(近/远)/t	顶部岩石覆盖(近/远)MWE	对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度 (90% C. L.)
大亚湾(中国)	17.4	400/1800	40/80	300/1000	0.008
Double Chooz(法国)	8.4	150/1050	10/10	60/300	0.03
RENO(韩国)	17.3	150/1500	20/20	230/675	0.03
Angra dos Reis(巴西)	4.1	300/1300	50/500	200/1700	0.007
Braidwood(美国)	6.5	270/1800	130/130	450/450	0.01
KASKA(日本)	24.3	350/1600	12/12	300/300	0.02
Diablo Canyon(美国)	6.4	400/1800	25/50	600/600	0.01
Krasnoyarsk(俄国)	3.2	115/1000	46/46	100/700	0.01

混合角 θ_{13} 的设想. 与此同时,日本、美国、欧洲和韩国等也提出了他们的方案,前后共有 8 个之多.

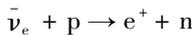
大亚湾核电站在反应堆中中微子实验上有得天独厚的优势. 不仅反应堆的总功率大(到 2010 年岭澳二期建成后将成为世界上第二大核反

应堆群),更重要的是附近有山,可以建立地下实验室,以提供足够的屏蔽,如图 4 所示. 对低能量、低事例率、高精度的中微子实验来说,减少宇宙射线和天然放射性本底是最重要的前提. 世界上其他可能用来做此类实验的核电厂附近都缺乏足够的岩石覆盖.

表 1 列出国际上曾经提出的各实验的主要参数. 可以看出,我们的大亚湾实验具有最好的自然条件与灵敏度. 经过激烈竞争与合并组合,如大亚湾实验组合了美国的 Diablo Canyon 与 Braidwood 实验,法国的 Double Chooz 实验组合了日本的 KASKA 实验,目前国际上仍在积极推进的只有大亚湾实验和法国的 Double Chooz 实验.

2 反应堆中微子探测及其实验

富含质子而发光效率高的液体闪烁体被广泛用于低能中微子实验中. 反应堆产生的反电子中微子与探测器中掺钷的液体闪烁体发生如下的反 β 衰变反应,产生正电子与中子信号



e^+ 发生电离损失并与电子湮灭形成快信号;中子慢化后(慢化时间约 $30\mu s$)为液闪中的钷俘获,放出共 8 MeV 的数个 γ 光子,形成延迟信号. 中微子的特征信号即为快信号与延迟信号在特征时间窗内的符合. 钷元素对中子的俘获截面非常高,通过在液闪中

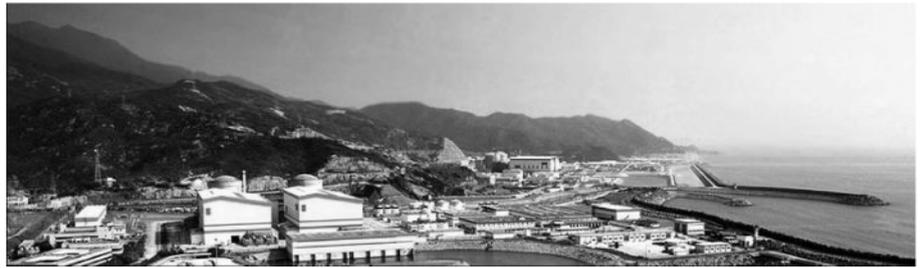


图 4 大亚湾与岭澳核电站鸟瞰图

掺钷,可以缩短正电子快信号与中子俘获信号之间的时间窗,降低本底. 同时中子在钷上俘获后放出的 γ 光子能量远高于天然放射性本底(一般小于 3 MeV),可以据此排除本底. 而中子在质子上俘获放出的伽马光子为 2.2 MeV,难以与天然放射性区分.

在反 β 衰变反应中,中微子的能量基本上都被正电子带走,因此快信号反应了中微子的能量. 图 5 显示了反应堆发出的中微子能谱,反 β 衰变反应的截面及其乘积即为中微子探测器观测到的中微子能谱.

自 20 世纪 80 年代起,国际上已成功地完成了近十个反应堆中微子实验,目前仍有一个在运行中,如图 6 所示^[8]. 探测器与反应堆的距离由 20 多米发展至 200 公里,重量由几十公斤发展至几千吨. 目前精度最高的实验为 Chooz,其系统误差为 2.7%,统计误差为 2.8%^[9].

3 大亚湾中微子实验

3.1 实验总体方案

如前所述,过去的反应堆中微子实验,精度一般在(3—6)%,其中约(2—3)%来源于对反应堆中微子通量及其能谱的了解(1—3)%来源于探测器,(1—3)%来源于本底. 大亚湾实验为了达到在 90% 以上置信水平下 0.01 的灵敏度,要求实验的总误差小于 0.5%. 因此我们采用了相对测量的办法,在最

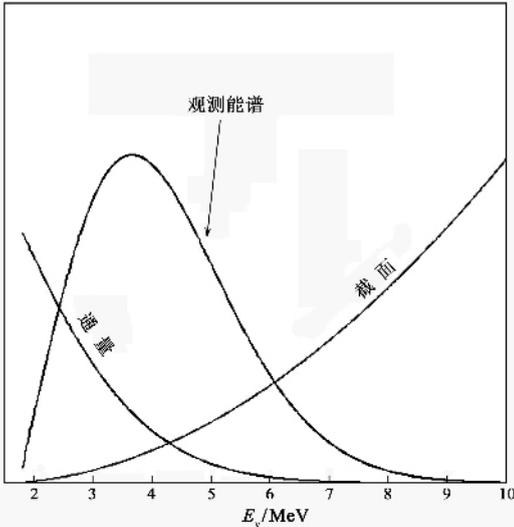


图5 反应堆发出的中微子能谱,反 β 衰变反应的截面及其乘积即为中微子探测器观测到的中微子能谱

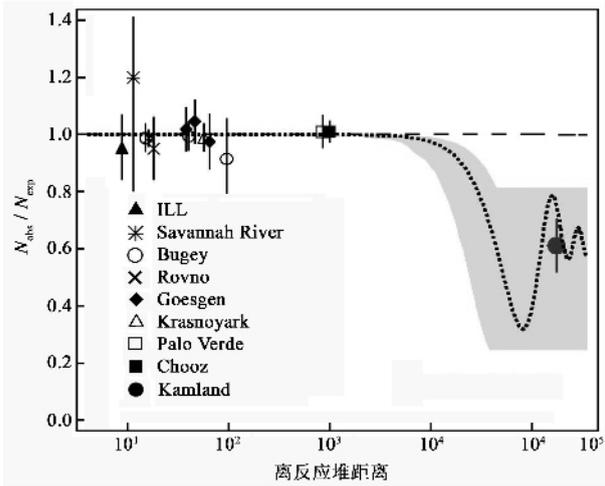


图6 目前国际上正在进行的和已完成的反应堆中微子实验^[81]

优化基线处(振荡最大值处)放置远端探测器和在离反应堆很近的地方放置完全相同的近探测器,用以测量近端和远端不同距离时中微子事例相对存活几率(振荡几率),以消除反应堆中微子通量及其能谱的误差,也部分抵消探测效率、有效体积、总质子数和能量测量等方面的误差。

考虑到大亚湾反应堆群的特殊布局,实验将采用三个探测器,如图7所示。两个近点探测器分别对大亚湾(距离364m)和岭澳(距离504m)的反应堆进行测量,远端探测器距岭澳核电站为1615m,距大亚湾核电站为1985m。各探测器位置的选取经过了详细的最优化计算,主要影响因素包括根据山的具体形状计算的宇宙线本底、反应堆误差的抵消、估计的探测器误差以及统计误差等。探测器设计成可移

动的,同一探测器分别在近端和远端进行测量,利用探测器之间的相对刻度,可以有效地消除由探测器的微小差异产生的误差,并有利于本底的精确减除。为了减少宇宙线本底,探测器必须有足够的岩石覆盖。计划开挖一条从地面进入山腹的隧道,连结三个放置探测器的地下实验厅,隧道总长约3000m。



图7 大亚湾中微子实验的总体方案图,包括2个近探测器实验厅和1个远探测器实验厅,用水平隧道相连

3.2 大亚湾中微子探测器

大亚湾中微子探测器包括两部分:一是中微子探测器探测中微子信号,一是宇宙线探测器探测本底。我们选用水作为宇宙线探测器兼作屏蔽介质,中微子探测器置于其中。如图8所示。

3.2.1 中微子探测器

为了减少统计误差,使其不影响总体精度,中微子探测器的靶材料应足够大。但是探测器过大会带来很多问题,比如说由于隧道大小的限制,运输困难,光在探测器中的传播较难精确模拟等等。为此我们采用多个独立探测器模块的办法,每个模块完全相同,通过远近探测器的相对测量,保证最大程度地抵消误差。采用多模块设计可以较好地对系统误差实行多重控制,模块之间也可以相互校验,纠正可能的错误。综合考虑利弊后,我们决定近端探测器放置两个模块,这样可以互相校验,并防止因一个模块出现故障而导致整个实验失败。远端探测器采用四个

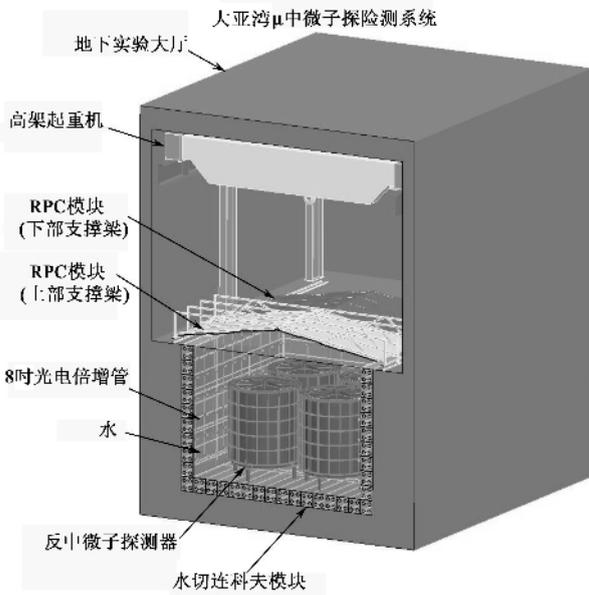


图8 大亚湾中微子实验探测器(远端)示意图 4个中微子探测器置于水池中,上下与四周均被2.5m以上的水包围以屏蔽本底.水池顶部采用阻性板探测器(RPC)作为反符合探测器

模块以提高事例率.经过计算,每个模块的靶质量为20吨,因此远点探测器的靶质量共为80吨,运行三年后统计误差小于0.2%.

为了减少系统误差,我们仔细分析了以前几个反应堆中微子实验的问题与经验,将中微子探测器设计成三层同心圆柱结构,直径5m,高5m,总重100吨,如图9所示.最里层是20吨掺钷的液闪作为中微子的靶.中间是集能层,由20吨普通液闪构成,用来收集中微子事例在边界的能量沉积,以提高判选效率,降低误差.最外层为40吨矿物油用来屏蔽外部材料,特别是光电倍增管玻璃造成的天然放射性本底,矿物油内置224只8吋光电倍增管,以探测中微子在液体闪烁体中产生的信号.每层之间用有机玻璃隔开.

中微子探测器模块的制作有两个技术困难,一是稳定、高透明度的掺钷液体闪烁体的配制,一是大直径、高透明度、高精度与高强度的有机玻璃桶制作.经过研究,我们已基本解决这两个难点问题.

3.2.2 muon子探测器

为屏蔽周围环境与宇宙线造成的本底,需要足够的屏蔽材料和有效的反符合探测器来标记宇宙线事例.通过模拟,我们得出反符合探测器的效率须大于99.5%,误差小于0.25%.目前尚没有一种探测器可以保证达到此要求,并有一定冗余.为此我们将构造多重反符合探测器,一是在水屏蔽中放置两层

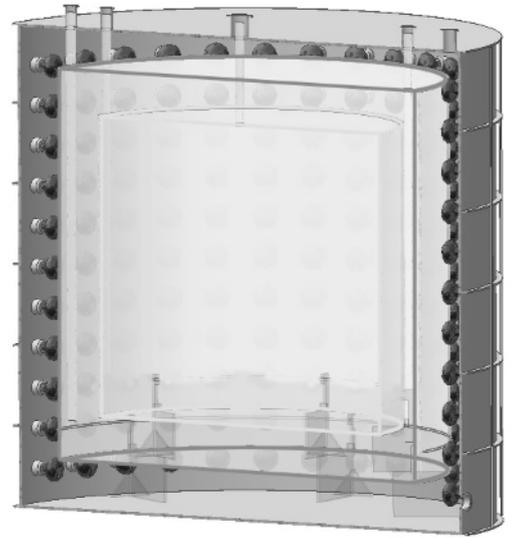


图9 中微子探测器示意图(最里层为掺钷的液体闪烁体,中间为普通液体闪烁体,最外层为矿物油,光电倍增管放置在矿物油中,各层之间用有机玻璃罐隔开)

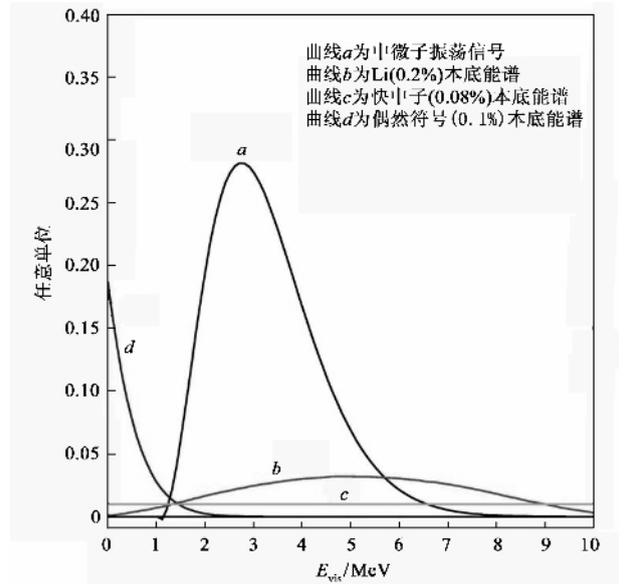


图10 大亚湾中微子实验的本底与中微子振荡信号的比较,这里假设 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.01$

光电倍增管,用来探测宇宙线在水中产生的切连科夫光.根据 SuperK 与 KamLAND 实验的经验及 Geant4 模拟计算,每层效率可达到95%,且可以互相校验.在水池顶部,放置三层阻性板探测器,其效率可达到95%以上.以上任意两个探测器组合,总效率可达到99.5%,误差小于0.25%.因此相互独立的反符合探测器可以相互检验,准确确定各自的探测效率.

3.3 本底及其误差

反应堆中微子的能量较低,宇宙线和探测器及其周围物质中的天然放射性都能给其带来大量本底.为了减小宇宙线本底,中微子探测器必须放在较深的地下,同时必须有足够的主动和被动屏蔽来去除本底.本底可以自然地分成两类:关联本底和非关联本底.非关联本底是由两个独立信号在延迟时间窗内偶然符合形成,其中快信号主要来源于探测器外部和内部的天然放射性,延迟信号主要来源于宇宙线 μ 子产生的低能中子.关联本底主要来源于三类:(1)被反符合探测器遗漏的宇宙线在探测器中产生的快中子与质子碰撞,反冲质子形成快信号,慢化后的中子被俘获后形成延迟信号;(2) μ 子在岩石中产生的中子漂移到中微子探测器后与质子碰撞,反冲质子形成快信号,慢化后的中子被俘获后形成延迟信号;(3) μ 子在探测器内与原子核发生散裂反应,产生 ^8He 与 ^9Li 同位素.这些同位素有15%到50%(具体数值不详)的衰变几率同时放出 β 粒子与中子,形成与中微子信号无法分辨的本底.其他的关联本底,如直接来自宇宙线的多个质子和中子,停止在探测器内的 μ 子发生衰变或俘获等,均可忽略.

根据数字化的大亚湾地区地形图和地表宇宙线的流强、能量与角度分布进行抽样,通过模拟计算,得到各地下实验厅处的宇宙线流强、能量与角度.然后对 μ 子产生的中子和同位素利用GEANT3模拟

$$\chi^2 = \min_{\alpha, \beta, \epsilon, \eta} \sum_{A=1}^3 \sum_{i=1}^{N_{\text{bins}}} \frac{[M_i^A - T_i^A(1 + \alpha_c + \sum_r \omega_r^A \alpha_r + \beta_i + \epsilon D + \epsilon_d^A) - \eta_f^A F_i^A - \eta_n^A N_i^A - \eta_s^A S_i^A]^2}{T_i^A} + \frac{\alpha_c^2}{\sigma_c^2} + \sum_r \frac{\alpha_r^2}{\sigma_r^2} + \sum_{i=1}^{N_{\text{bins}}} \frac{\beta_i^2 \sigma_i}{\sigma_{\text{shp}}^2} + \frac{\epsilon_D^2}{\sigma_D^2} + \sum_{A=1}^3 \left[\left(\frac{\epsilon_d^A}{\sigma_d^A} \right)^2 + \left(\frac{\eta_f^A}{\sigma_f^A} \right)^2 + \left(\frac{\eta_n^A}{\sigma_n^A} \right)^2 + \left(\frac{\eta_s^A}{\sigma_s^A} \right)^2 \right]$$

反应堆
中微子能谱
探测器
本底

上式中 A 表示对三个探测器求和, i 对能谱的各个bin求和, M_i^A 表示测量到的第 A 个探测器第 i 个能量区内的中微子事例数, T 表示相应的根据反应堆功率数据计算的预期值, F, N, S 表示预期的快中子、偶然符合本底和同位素本底的事例数. $\alpha, \beta, \epsilon, \eta$ 表示最小化参数, σ 则表示各种系统误差,其含义在上式中标出.通过对中微子事例总数与能谱的联合分析,我们得到大亚湾实验对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 在90%置信水平下的灵敏度如图11所示.在目前实验所确定的 Δm^2 的允许区间内(阴影部分),大亚湾实验对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度均小于0.01,满足实验要求.这表明实验方案合理,探测器设计与本底控制均达到要

求. 软件,根据上述探测器的实际情况进行模拟,得到各类本底如表2所示.图10总结了所有本底能谱及其与中微子振荡信号的比较.由于本底模拟的不确定度较大,为保守起见,在物理分析中我们假定上述本底估计的误差为100%,即由本底减除带来的误差等于本底/信号比.

表2 大亚湾实验的本底/信号比

	大亚湾	岭澳	远端探测器
基线长度(m)	364	504	1985/1618
岩石覆盖(m)	98	112	355
中微子事例(个/天/模块)	930	760	90
宇宙线通量(Hz/m ²)	1.16	0.73	0.041
宇宙线平均能量(GeV)	55	60	138
非关联本底/信号	<0.2%	<0.2%	<0.1%
快中子本底/信号	0.1%	0.1%	0.1%
⁸ He + ⁹ Li 本底/信号	0.3%	0.2%	0.2%

3.4 实验误差与灵敏度

根据以上讨论,大亚湾实验的最终误差可以总结如下:统计误差0.2%,残余反应堆误差0.1%,残余系统误差0.2%,近端本底/信号比0.4%,远端本底/信号比0.2%.

为了正确考虑系统误差的影响,分析大亚湾实验的物理敏感度,我们将以上参数带入如下带pull项的 χ^2 函数进行最小化,

求.

4 实验的组织,经费与计划

大亚湾实验目前共有中国包括香港与台湾地区15个研究单位,美国13个,俄国两个及捷克一个研究单位参加,共约130位学者.按照国际惯例,我们组成了国际合作组,制订了管理规章,建立了合作组委员会,选举了执行委员会与发言人.在项目的管理方面,设立了经理部,建立了各子系统及设备的负责管理机制.目前各项工作都走上了正轨.

大亚湾实验的经费主要由中美两国按二比一的

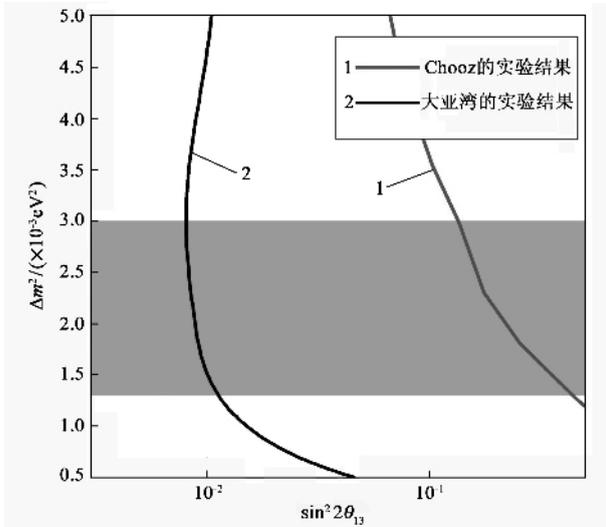


图 11 大亚湾反应堆中微子实验预期的灵敏度,运行时间为三年.1 为 Chooz 确定的实验上限 2 为大亚湾实验在 90% 置信水平下的灵敏度.阴影部分为目前实验所确定的 Δm^2 的允许区间

比例投入,其他国家和地区各有一些实物投入.中国方面,科技部,科学院,自然科学基金委,广东省,深圳市及大亚湾核电站的业主中国广东核电集团共对此实验投入 1.7 亿人民币.国家有关部门,如核安全局,国家原子能机构等对此实验也给予了大力支持.目前大亚湾实验的各项前期工作正在全力进行,预计明年可以开始隧道建设,2009 年部分探测器可以投入运行,2010 年底全部投入运行.

· 物理新闻和动态 ·

直接测量量为皮牛顿的力

在 2005 年对质量的测定可达到 10^{-21} 克(仄克)的水平,力的大小在 2006 年可测到 10^{-18} 牛顿(aN)的水平.但在生物细胞实验的领域内,对力的测定并不需要这样高的灵敏度,一般只要达到 10^{-12} 牛顿(pN)的水平即可.例如处于运动状态的肌肉,它的蛋白质分子在输送能量时所需的力约为 6pN,在室温下将 DNA 分子拉开的力约为 9—20pN,而把 DNA 分子推至相反的两端则需要 65pN 的力.按照这种需求,美国 Sandia 国家实验室的 S. Koch 博士和他的同事们就沿着这种思路去研制有效测试这一范围的肌肉力作用的传感器.他们称其为 Sandia 传感器.传感器的核心部分是一根 1 毫米长,粗为微米大小的弹簧,是利用标准多晶硅显微机械加工过程制作的,弹簧的力学性能是完全遵守经典的胡克定律,即压缩或拉伸弹簧的力等于弹簧的形变长度与弹性系数之积. Sandia 传感器中的弹簧,它的弹性系数 $K \sim 1\text{pN/nm}$.

固定在基底上的弹簧可以被生物样品直接拉伸或压缩,也可以被磁场的感应力所作用,所以这种传感器也是一种可受场作用的传感器.弹簧的形变位移通常是用摄像机来记录的,其精确度在 2 nm 左右,要进一步提高位移的精确度在技术上并不困难. Koch 博士认为,他们制作的传感器可以使用在许多方面,一是在单生物细胞实验中对磁性微球体的力进行测定,二是对于微球体在拉伸、扭曲或推拉 DNA 分子时的各种作用力进行校准,三是可以与其他 MEMS(微电子力学系统)装置配合在生物物理实验中,完成光镊子(利用激光束进行操作让微球体接触分子)所不能完成的对作用力的测定. Sandia 传感器还可以应用在研究蛋白质束缚时,单个 DNA 分子所受的张力.

(云中客 摘自 Applied Physics Letters, 23 October 2006)

总之,大亚湾实验是一个在中国本土进行的,有重要国际影响的重大基础科学研究项目,也是中美两国目前在基础科学研究领域最大的合作项目之一,她的结果将对未来中微子物理的发展具有重要的指导意义,有望取得重大原始性创新成果.

参 考 文 献

[1] Wang Y - F, hep - ex/0610024, talk given at 33rd International Conf. on High Energy Physics(ICHEP06), Moscow, Russia, July 26—Aug2, 2006. Daya Bay Coll., hep - ex/0701029, 更多的具体情况参见 <http://dayawane.ihep.ac.cn/>

[2] Yao W - M *et al.* J. Phys. 2006, G33 :1

[3] Wang Y F. Int. J. Mod. Phys. A, 2005, 20 :5244 ; Plenary talk given at 32nd International Conference on High-Energy Physics (ICHEP 04). Beijing, China, 16—22 Aug 2004

[4] <http://www.aps.org/neutrino/>

[5] Anderson K *et al.* hep-ex/0402041

[6] Boehm F *et al.* Phys. Rev. D, 2000, 62 :072002

[7] Fogli G L *et al.* hep - ph/0506307

[8] Eguchi K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 90 :021802; 2005, 94 :08180

[9] Apollonio M *et al.* Eur. Phys. J. C, 2003, 27 :331