

谈谈大亚湾中微子实验的探测器

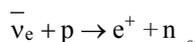
钟玮丽 杨长根

大亚湾反应堆中微子实验用近远点相对测量的办法探测中微子振荡。具体地讲，大亚湾实验有三个实验厅，两个近点实验厅和一个远点实验厅。近点探测器探测到的反电子中微子事例用来监测中微子的流强和能谱。远点实验厅位置优化在中微子振荡几率（ $\sin^2 2\theta_{13}$ 振荡项）局部最大的地方，使得远点探测器能明显地测量到中微子事例流强和能谱的变化。近远点相对测量可抵消与反应堆相关的误差和部分与探测器相关的误差；提高测量精度。在每个实验厅内，大亚湾的中微子探测器包括两部分：用于探测核反应堆放出的反电子中微子的中微子探测器和用于探测本底的 μ 子探测器。

一、中微子探测器

1. 中微子探测器的设计原理

如何有效地探测反应堆释放出的反电子中微子是中微子探测器设计的核心问题。我们选用了被广泛用于低能中微子实验中的富含质子且发光效率高的液体闪烁体。在大亚湾的中微子探测器里，反电子中微子与探测器中掺钷的液体闪烁体发生反 β 衰变反应，产生正电子和中子：



正电子在液体闪烁体中发生电离损失并很快与电子湮灭形成快信号，并几乎带走中微子的所有能量。中子在液体闪烁体内慢化，经过大概 $30 \mu\text{s}$ 的特征时间被钷俘获，放出约 8 MeV 的 γ 光子，称为慢信号。快信号和慢信号的这个时间符合和各自的能量特征可以帮助我们有效地选择反电子中微子事例，去除本底。

我们为什么要在普通液体闪烁体中掺钷呢？普通液体闪烁体中没有钷，中子经过大约 $200 \mu\text{s}$ 的慢化特征时间，会被质子俘获，放出 2.2 MeV 的 γ 光子。较之普通液体闪烁体，中子被钷俘获的几率比被质子俘获的几率大 10^5 倍，俘获特征时间短，特征能量高，且远高于天然放射性本底的能量。无论从时间还是能

量上看，都能够更有效地去除本底，更高效地挑选反电子中微子事例。

2. 中微子探测器的构造

为了减少统计误差，使实验在一定的运行时间内达到期待的总体精度，中微子探测器的靶材料应该足够大。但是探测器过大会带来一些问题，比如连接实验厅的隧道的大小对探测器尺度的限制，探测器运输的限制等。因此，我们采用多个独立的，全同的探测器模块的办法构造足够靶材料的中微子探测器。多模块的设计还可以对系统误差进行多重控制，同时模块之间可以相互检验，纠正可能的错误，保证探测器的性能。综合考虑各种因素之后，我们决定在近点实验厅放置两个中微子探测器模块，做相互校验；远点实验厅放置四个模块，以提高事例率。经过计算，每个模块的靶质量为 20 吨，这样，远点中微子探测器的靶质量总共是 80 吨，运行三年后，统计误差小于 0.2% 。

为了减少系统误差，我们将中微子探测器的模块设计成三层同心圆柱结构，如图 1 所示。每个模块最

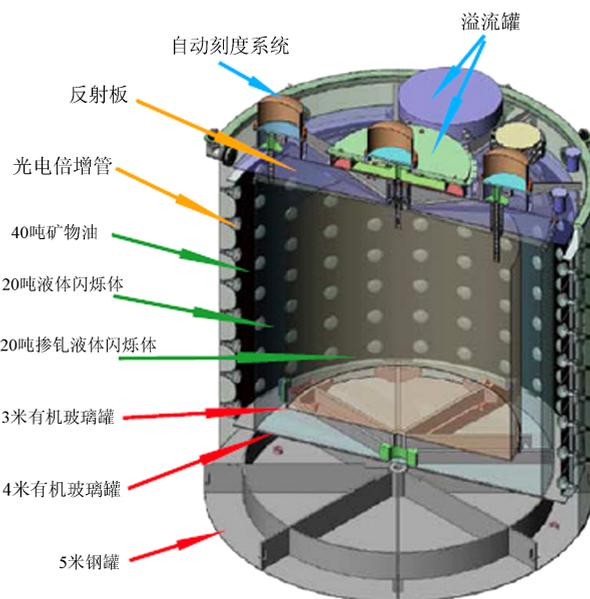


图 1 中微子探测器模块的截面图

外层是直径5米，高5米的钢罐，整个模块重约110吨。最内层是约20吨的掺钎液体闪烁体，作为探测反电子中微子的靶；中间层是集能层，由约20吨普通液体闪烁体构成，用来收集发生在靶边界的中微子事例的能量沉积，以提高判选中微子事例的效率，降低误差。最外层是约40吨的矿物油，用来屏蔽来自探测器内外的材料，如钢罐材料，光电倍增管玻璃等的天然放射性本底。在矿物油内，192只8英寸的光电倍增管被均匀地安装在钢罐内壁，用以探测液体闪烁体发出的光信号。集能层的上下底部安装有反射板，帮助收集光信号。靶、集能层和屏蔽层，每层之间用有机玻璃罐隔开。在钢罐顶部，放置有三个自动刻度装置。每个自动刻度装置可以将发光二极管(LED)、正电子源(^{68}Ge)、 γ 源(^{60}Co)和中子源(AmC)置于探测器靶和集能层内的相应位置进行能量刻度。

3. 中微子探测器的性能

整个探测器内物理过程事实上是一个能量转换的过程。液体闪烁体的靶将粒子——如快慢信号产生的 γ 光子——在其内沉积的能量转换成可见光光子；而光电倍增管将可见光光子转换成电信号，从而被电子学系统记录下来。为了保证探测器的性能，比如能量分辨率等，可见光光子的传播过程就非常重要，因此液体闪烁体，有机玻璃罐，反射板等探测器构成部分的光学性能就尤为重要。同时，光电倍增管对光学光子的有效收集是另一个保证高效能量转换的关键步

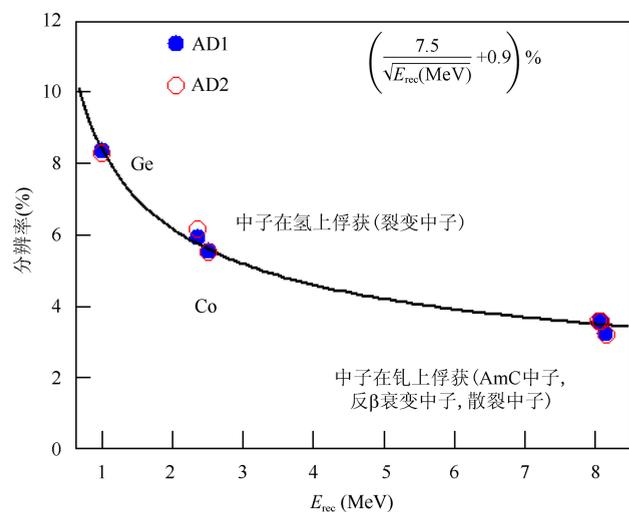


图2 大亚湾近点中微子探测器模块(AD1, AD2)的能量分辨率

骤。图2给出大亚湾近点的两个中微子探测器(AD1和AD2)模块的能量分辨率与入射粒子能量的关系；入射粒子包括正电子源、 γ 源和中子源等刻度源，还包括反电子中微子事例和宇宙线 μ 子在探测器内产生的中子在钷上俘获或在质子上俘获放出的8 MeV或2.2 MeV的 γ 光子。如图2所示，中微子探测器的实际能量分辨率是 $(7.5 / \sqrt{E} + 0.9) \%$ ，远好于探测器设计所要求的能量分辨率 $15\% / \sqrt{E}$ 。此外，为了达到实验的精度目标对本底的要求，中微子探测器内的所有物质，如液体闪烁体本身，光电倍增管和钢罐等，都必须是低天然放射性的材料。实验3年的运行时间还要求液体闪烁体有很好的光学和化学稳定性。大亚湾实验成功地研制出稳定且有高透明度的掺钎液体闪烁体。图3是掺钎液体闪烁体的吸光度在几乎一年时间里的变化。在这里，吸光度 A 与衰减长度 Λ 的关系是： $\Lambda = -0.4343 \times L/A$ ， L 是光程。所以，吸光度的大小和稳定性与掺钎液体闪烁体的衰减长度的大小和稳定性直接相关，显示出它的良好透明度和光学稳定性。大亚湾实验同时成功地制作出大直径、高透明度、高精度和高强度的有机玻璃罐，为中心探测器建造的成功奠定了基础。图4是大亚湾近点探测器

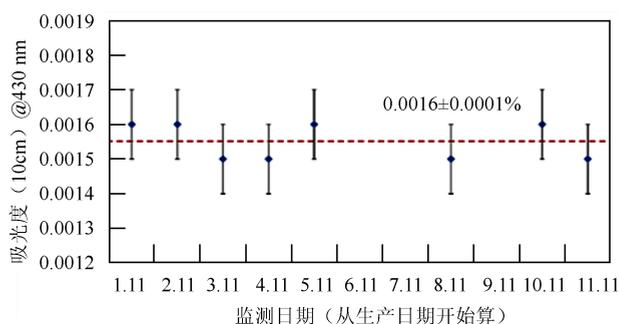


图3 掺钎液体闪烁体的吸光度随时间(月.日)变化关系

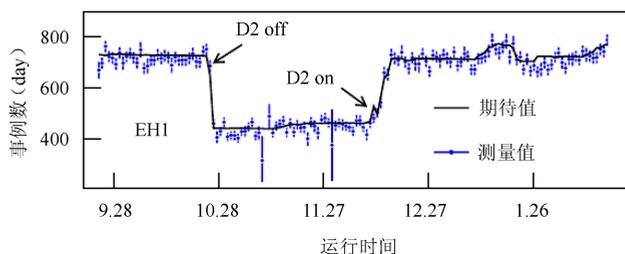


图4 大亚湾近点中微子探测器探测到的反电子中微子事例数随时间(月.日)变化。数据点是测量值，曲线是期待值。D2代表大亚湾核反应堆的第二个堆

探测到的反电子中微子事例随时间的变化。其中数据点是探测器测量到的实际反电子中微子事例；曲线是根据反应堆工作状态和探测器模拟得到的反电子中微子事例。可以看到，实际测量值和期待值在不同时间点上几乎完全相同；测量值甚至可以直接用来监测核反应堆开关的工作状态。

二、 μ 子探测器

反应堆实验里中微子的能量比较低，平均值在 4 MeV 左右；宇宙线、探测器和周围环境中的天然放射性都给中微子探测器带来大量的本底。为了减小宇宙线本底，中微子探测器一般都放置在较深的地下，同时有足够的屏蔽层来有效减小本底并用高效的反符合探测器来标记宇宙线事例，去除标记到的本底。

1. μ 子探测器的结构

大亚湾实验的每个实验厅在山体内部，较厚的岩石覆盖能够有力地减小宇宙线流强。在每个实验厅内，中微子探测器模块都被放置在储满超纯水的水池之中，如图 5 所示，每个模块都至少被 2.5 米厚的水层包围。这个水层能够有效地屏蔽宇宙射线 μ 子穿过实验厅岩石产生的大量中子和 γ 光子。模拟显示，2.5 米厚的水能够让中子本底减少约 10 ~ 30 倍，让 γ 光子减少 10^5 倍。同时，水池被 Tyvek（高密度聚乙烯纤维材料）反射膜分成光学不透明的内外两层，即内水池和外水池。内水池和外水池内分别装有合适数目的光电倍增管来探测穿过水池的宇宙射线 μ 子产生的

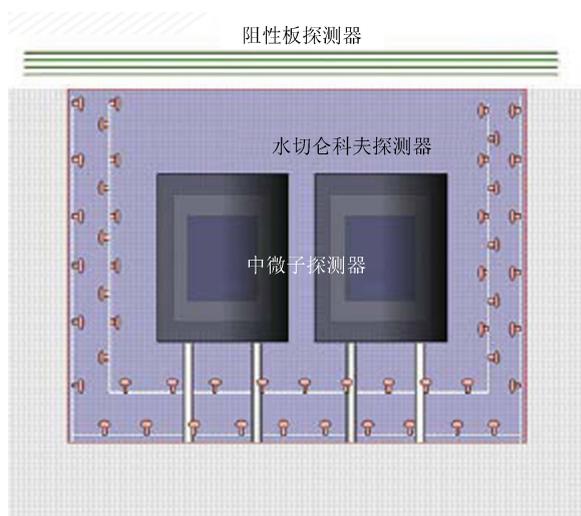


图 5 μ 子探测器构造示意图

切仑科夫光，即内、外水池构成双重水切仑科夫探测器来探测 μ 子。此外，水池顶部还铺设有四层阻性板探测器帮助标记 μ 子。这样三重探测器联合探测 μ 子，任意两种组合，探测效率都能到 99.5% 以上，误差小于 0.25%；不仅如此，独立的反符合探测器还可以相互检验，从而确定每一种探测器的探测效率。高质量的水作为屏蔽层还有一个好处是让身处其中的中微子探测器在恒温条件下工作，消除近远点中微子探测器的一个可能的系统误差来源。

2. 水切仑科夫探测器的性能

大亚湾近点水池的几何尺寸是 16 m × 10 m × 10 m，两个中微子探测器模块放置其中，被 1 m 厚的水隔开。远点水池的尺寸是 16 m × 16 m × 10 m，四个中微子探测器按 2 × 2 矩阵的模式放置在水池中心，每个模块被 1 m 厚的水隔开。每个水池被 Tyvek 膜隔开成内外水池。外水池水层厚 1 m，覆盖水池的四个侧面和底部。近远点水池分别存储 1400 吨和 2170 吨的超纯水。为了保证水池对 μ 子的探测效率，为了保证对中微子探测器周围本底的有效屏蔽，为了给近远点的中微子探测器提供相同的工作环境，水的各项物理化学性能，如电阻率，透明度，放射性，温度，长期稳定性等都需要有详细的测量或者长期监测和维护。因此我们专门建造了一个水系统实验厅，厅内的

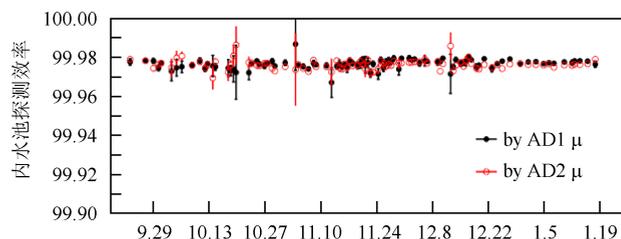


图 6 大亚湾近点内水池对 μ 子的探测效率的稳定性（以 AD1 μ 子，AD2 μ 子分别作分析样本， μ 子能量大于 20 MeV）

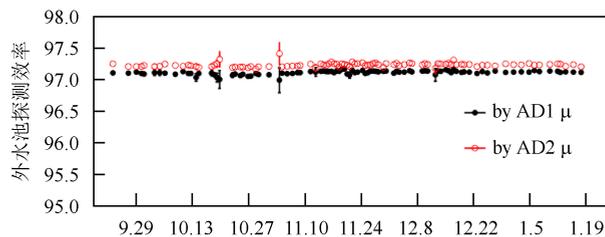


图 7 大亚湾近点外水池对 μ 子的探测效率的稳定性（以 AD1 μ 子，AD2 μ 子分别作分析样本， μ 子能量大于 20 MeV）

水系统装置给每个探测器实验厅提供干净、透明、无杂质的循环超纯水。水里剩余悬浮颗粒直径小于 1 个 μm ，所有固体溶解物小于 4ppm，每个实验厅里水池的水温变化在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 之内。图 6 和图 7 分别是大亚湾近点实验厅里内、外水池的探测效率。黑色和红色（浅色）数据点分别是用第一个和第二个中微子探测器模块探测到的宇宙线 μ 子样本进行数据分析的结果。这两张图显示，在中微子探测器探测到的宇宙线 μ 子样本范围里，内水池的水切仑科夫探测器对 μ 子的独立探测效率达到 99.8%，误差 0.02%，外水池对 μ 子的独立探测效率为 97.1%，误差 0.2%；两个水切仑科夫探测器都表现出很好的稳定性。

3. 阻性板探测器的性能

阻性板探测器是地毯式大面积探测器，结构简单，成本经济。大亚湾实验采用高能所自主研发、生产和测试的大规模阻性板探测器。每个实验厅的水池顶部装有四层阻性板探测器构成的探测器模块，面积 $2.2\text{m} \times 2.2\text{m}$ 。两个近点实验厅各装有 6×9 个模块，远点实验厅装有 9×9 个模块。每个模块采用三重符合的触发模式来标记宇宙线 μ 子，降低偶然符合的噪声。图 8 是大亚湾近点实验厅内 54 个阻性板探测器模块的平均探测效率与工作电压关系的曲线。当工作电压至约 7400 kV 时，效率曲线上升到坪区；7400 kV 之后，效率稳定在 95% 以上。图 9 显示的是大亚湾近点 54 块阻性板探测器总探测效率随时间的变化的稳定性。

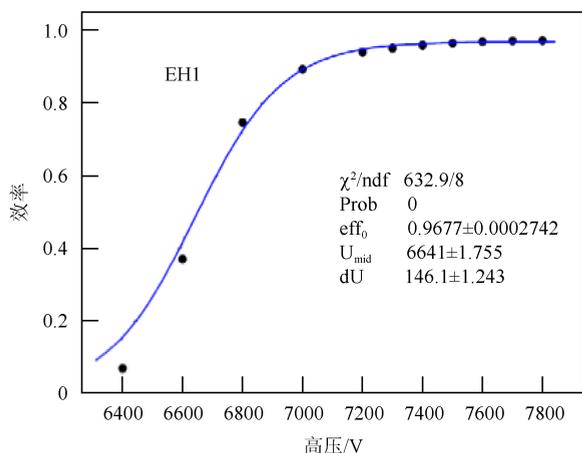


图 8 大亚湾近点 54 个阻性板探测器模块的平均（高压—效率）坪曲线。3/4 触发判选条件，信号阈值 40 mV

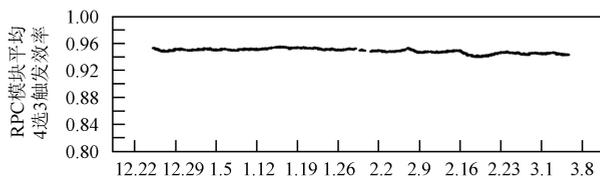


图 9 大亚湾近点 54 个阻性板探测器的总探测效率随时间（月·日）的变化关系。

单个模块为 3/4 触发判选条件，信号阈值 40 mV

大亚湾中微子实验于 2011 年 12 月 24 号开始近远点三个实验厅同步取数，其中大亚湾近点，岭澳近点和远点实验厅分别有 2 个，1 个和 3 个中微子探测器模块工作，经过 55 天的取数，大亚湾实验通过近远点反电子中微子事例计数率的差别，在 5.2 倍标准偏差下发现 $\sin^2 2\theta_{13}$ 不等于零，即 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.92 \pm 0.016$ (stat) ± 0.005 (syst)，确认了最后一个轻子矩阵的混合角大于零。55 天的数据显示近点中微子探测器模块的信噪比分别为 2%，远点中微子探测器的信噪比为 5%，小于设计的物理要求 9%。中微子探测器带来的系统误差为 0.2%，好于设计目标 0.38%。

目前大亚湾实验的第 7 个和第 8 个中微子探测器模块已经安装完成，初步调试结果显示安装成功。最后的这两个中微子探测器模块将在今年夏天就位，我们期待近远点 8 个探测器同步取数开始的一刻。较之现在的数据结果，三年的稳定取数定会显著提高统计误差；同时对探测器更全面仔细的刻度，对能量非线性更深入的理解和描述，以及对本底和能谱的仔细研究将会进一步减小与探测器相关的系统误差，最终实现精确测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 到 0.01 水平的物理目标。

（中国科学院高能物理研究所 100049）

