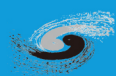
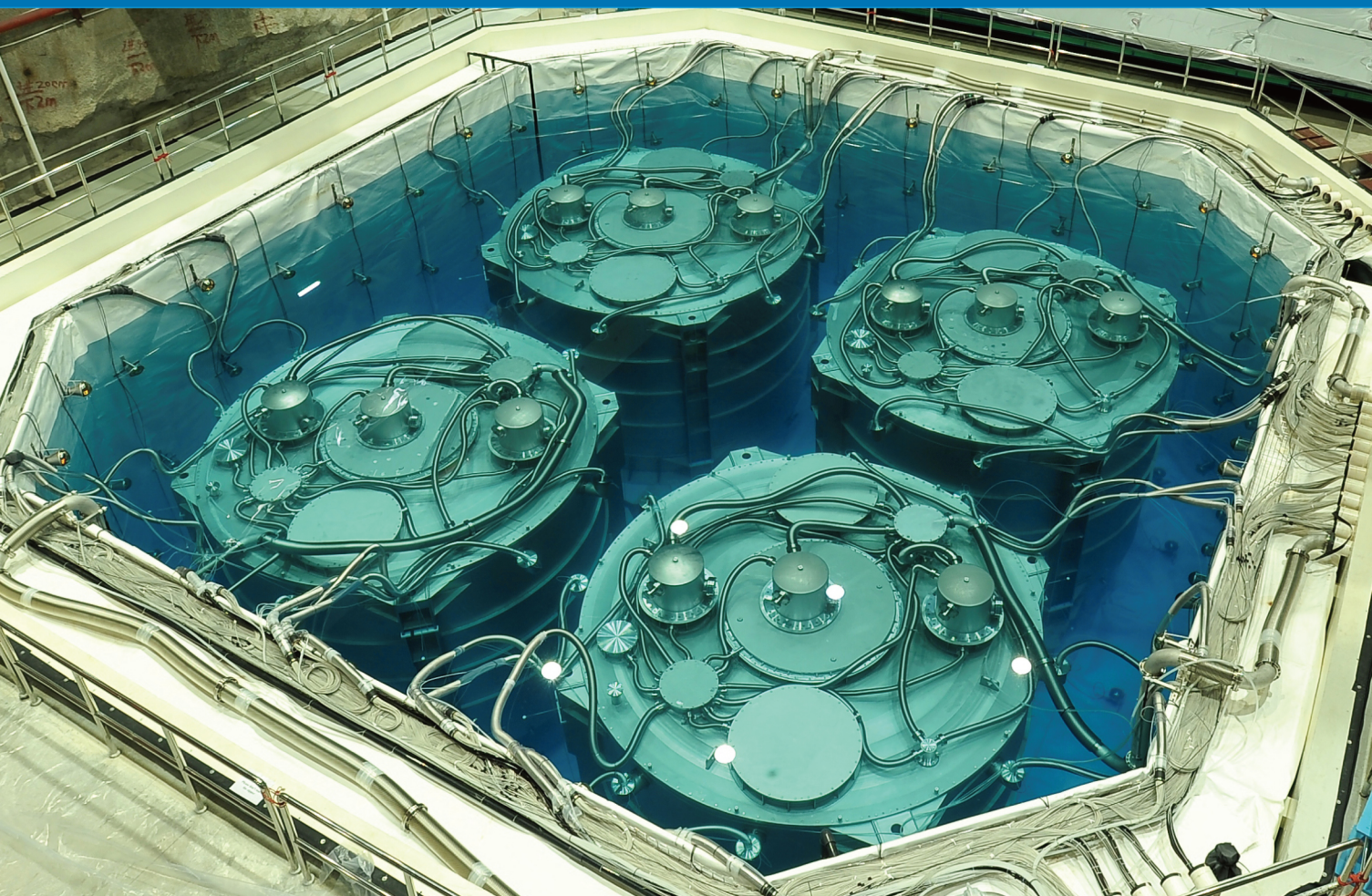




大亚湾反应堆中微子实验

Daya Bay Reactor Neutrino Experiment



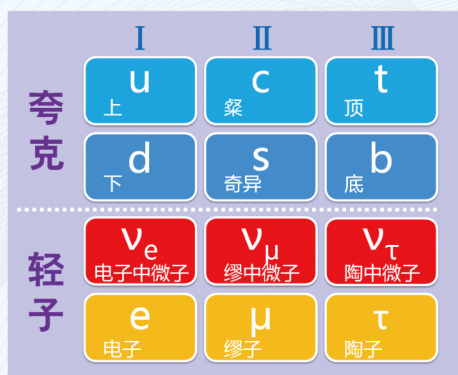
中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

» 什么是中微子

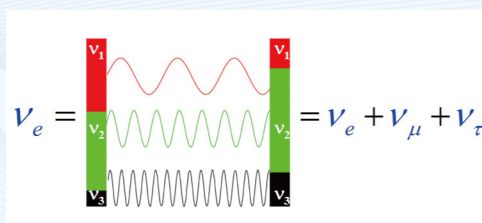
What is Neutrino

■ 粒子物理的研究结果表明,构成物质世界最基本的粒子有 12 种,包括 6 种夸克 (上、下、奇异、粲、底、顶),3 种带电轻子 (电子、缪子和陶子) 和 3 种中微子 (电子中微子、缪中微子和陶中微子)。

■ 中微子常用符号 ν 表示,它不带电,质量非常轻 (小于电子的百万分之一),以接近光速运动。中微子只参与非常微弱的弱相互作用,具有极强的穿透力。穿越地球直径那么厚的物质,在 100 亿个中微子中只有一个会与物质发生反应,因此中微子的检测非常困难。所以,在所有基本粒子中,人们对中微子了解最少。实际上,大多数粒子物理和核物理过程都伴随着中微子的产生,例如核反应堆发电 (核裂变)、太阳发光 (核聚变)、天然放射性 (贝塔衰变)、超新星爆发、宇宙射线等等。宇宙中充斥着大量的中微子,大部分为宇宙大爆炸的残留,大约为每立方厘米 300 个。



■ 构成物质世界的12种最基本粒子,其中3种为中微子



■ 中微子有一个特殊的性质,即它在以光速飞行的过程中会从一种类型转变成另一种类型,这种现象通常称为中微子振荡

■ 1998 年超级神冈实验证明了中微子存在振荡现象,即由一种中微子转变为另一种中微子,也称之为不同类型中微子的混合。中微子的混合参数描述了中微子之间相互转变的规律。中微子振荡间接证明中微子具有微小的质量,对粒子物理、天体物理与宇宙学具有重大影响。另外两个证实中微子振荡的实验 SNO 与 KamLAND 也分别被评为当年的世界十大科技新闻。

■ 中微子有大量谜团尚未解开。包括它的质量大小和起源、磁矩、混合参数 θ_{13} 和 CP 破坏的大小等等。同时,对它的研究远远超出了粒子物理的范畴,是粒子物理、天体物理、宇宙学、地球科学的交叉与热点学科。

» 利用反应堆中微子实验测量 θ_{13}

Measuring mixing angle θ_{13} using reactor neutrinos

■ 目前国际中微子物理实验的前沿是精确测量中微子混合参数 θ_{13} 。其重要性体现在 θ_{13} 是中微子物理中两个最基本的未知参数之一,其数值的大小决定了未来中微子物理研究的发展方向。如果 $\sin^2 2\theta_{13}$ 大于 0.01 左右,则中微子的 CP 相角可以测量,宇宙中物质与反物质的不对称可能得以解释。如果它太小,则中微子的 CP 相角极难测量,用中微子来解释宇宙中物质与反物质不对称的理论便难以证实。 θ_{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 θ_{13} 或只给出其上限值,均有极为重要的意义。与加速器实验相比,反应堆中微子实验可以毫不含糊地确定中微子混合参数 θ_{13} ,具有造价低,速度快的优点。



■ 大亚湾中微子实验的整体布局



■ 大亚湾中微子实验于2007年10月动工

大亚湾与岭澳核电站 Daya Bay and Ling Ao Nuclear Power Plants (NPP)

■ 大亚湾核电基地是我国目前在运行核电装机容量最大的核电基地。现有两个相距 1 公里的核电站：大亚湾核电站和岭澳核电站，共有六台百万千瓦级压水堆核电机组。

■ 核电站在发电的同时，会产生大量的中微子。反应堆的功率越大，释放的中微子数就越多，实验精度就越高。距两个核电站约 300 米处即有 100 米左右的山体，在 2 公里处有 400 米左右的山体。这是一个得天独厚的地理条件。由于足够的岩石覆盖，山体下实验大厅里的宇宙线将减到很小，这是进行高精度中微子实验的一个重要前提。因此，大亚湾是世界上目前发现的最适合进行 θ_{13} 实验的地方。

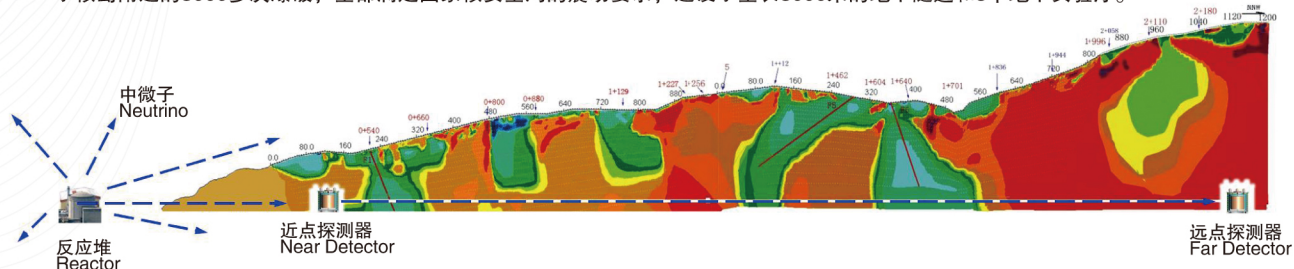
实验方案 The layout of the Experiment

■ 由于测量 θ_{13} 具有重大科学意义，2003 年前后国际上有 7 个国家提出了 8 个实验方案，最终进入建设阶段的共有 3 个：中国的大亚湾实验、法国的 Double Chooz 实验和韩国的 RENO 实验。

■ 大亚湾实验的布局方案如图所示，共有 3 个实验大厅，分别为大亚湾近点、岭澳近点与远点大厅。实验厅均位于山腹内，由水平隧道相连。两个近点均位于地下 100 米深处，远点则位于地下 350 米处。每个实验厅内各有一套宇宙线探测系统。中微子探测系统共有八个模块，两个近点各放置 2 个，远点放置 4 个。此外还有两个功能厅，用于液体闪烁体的混制、贮存和灌装，及水的净化处理。

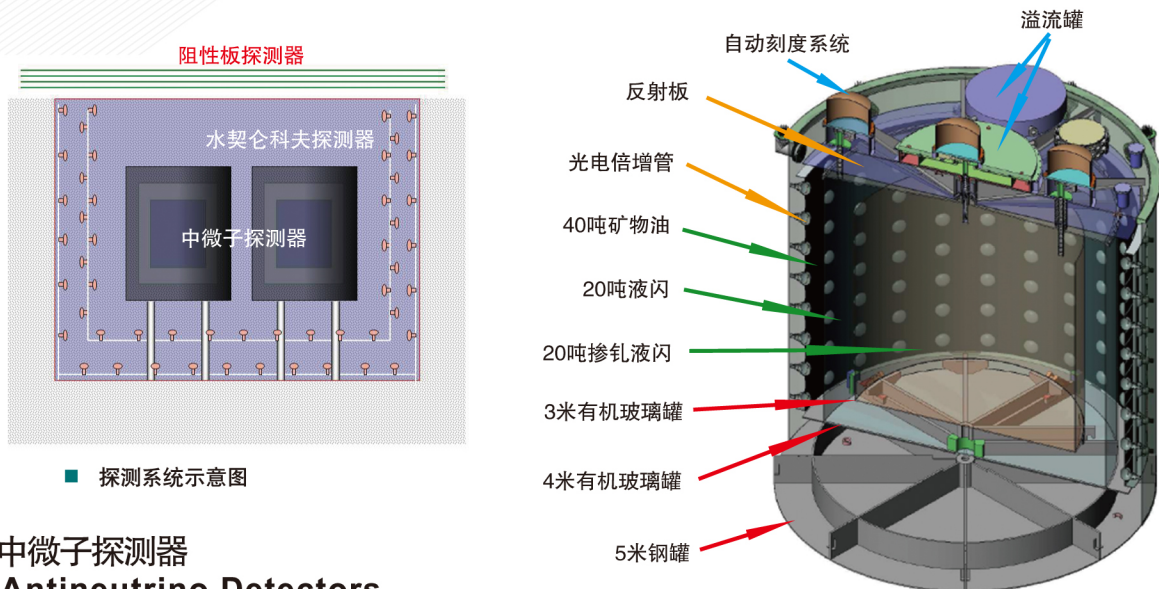
隧道与实验大厅建设 Civil Construction of the Tunnel and Experiment Halls

■ 隧道与实验大厅由黄河勘测规划设计有限公司设计，中铁十五局集团施工。项目组克服了大量困难，至 2010 年 12 月安全完成了核岛附近的 3000 多次爆破，全部满足国家核安全局的震动要求，建设了全长 3000 米的地下隧道和 5 个地下实验厅。



实验的探测器系统 Detectors System

■ 每个实验厅内都有一个巨大的长 16 米，高宽各 10 米的水池，存有约 2000 吨纯净水。中微子探测器模块被浸泡在水池正中，如左下图所示。水池有两个作用，一是用作宇宙线探测器，宇宙线穿过水池时，会激发出切伦科夫光，通过水池四周放置的光电倍增管探测切伦科夫光，可以探测到宇宙射线，从而将它对中微子探测的影响去除；二是用作屏蔽层，高能宇宙线在附近的岩石中会产生大量的次级粒子，岩石本身的天然放射性也会产生大量的伽马光子，水可以将这些粒子挡在中微子探测器外，以免对中微子探测造成影响。水池上方覆盖着 4 层大面积阻性板探测器（RPC），这也是一种宇宙线探测器。两种探测器结合，对宇宙线的探测效率可以达到 99.5% 以上。

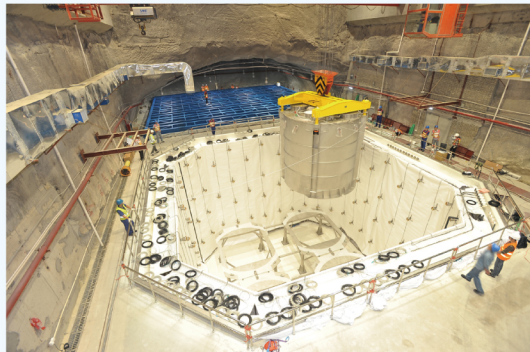


■ 探测系统示意图

中微子探测器 Antineutrino Detectors

■ 探测中微子的中心探测器是直径 5 米、高 5 米的圆桶，里面装有液体闪烁体，总重 100 吨。其核心部分是液体闪烁体和光电倍增管。中微子在探测器内发生反应后能够激发液体闪烁体，产生微弱的闪烁光。光电倍增管探测到闪烁光，将它转换成电信号，这样我们就探测到了中微子。右上图中显示了中心探测器的机械结构。它由三层构成，中心为 20 吨的掺钆液体闪烁体，中间层为 20 吨普通液体闪烁体，最外层为 40 吨矿物油。三层之间用有机玻璃罐隔开。每个中心探测器在矿物油中装有 192 个 8 英寸光电倍增管安装。中心探测器顶上装有三个自动刻度装置，定时对探测器进行能量与时间的自动校准。

- 3号实验厅中，110吨重的中微子探测器正在吊装入10米深的水池中，并安放在2.5米高的台架上。

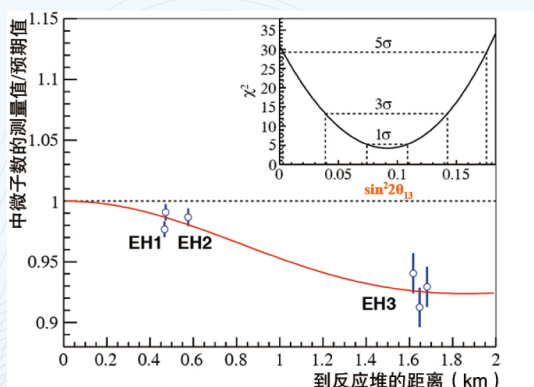


DAYA BAY

REACTOR NEUTRINO EXPERIMENT

» 发现新的中微子振荡 Discovery of a New Kind of Neutrino Transformation

2012年3月8日, 大亚湾中微子实验国际合作组宣布, 发现了一种新的中微子振荡模式, 并测量到其振荡几率为9.2%, 误差为1.7%。由于采用了远近相对测量, 实验达到了前所未有的精度, 无振荡的概率仅为千万分之一。论文于4月27日发表于美国物理评论快报 (Physical Review Letters, Vol.108, No.17)。

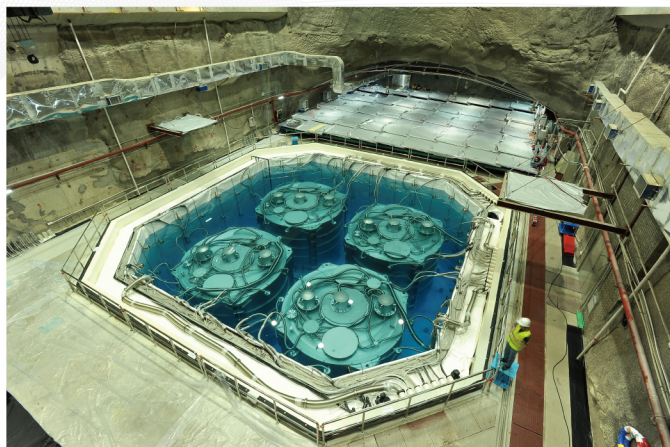


■ 通过两个近点实验厅 (EH1, EH2) 内的探测器测量反应堆中微子流强, 在远点实验厅 (EH3) 观测振荡效应。对实验数据进行分析, 发现远点观测到的中微子数显著低于预期, 表明中微子在飞行过程中发生了振荡, 由电子反中微子转变成了其它种类的中微子。

■ 图中纵坐标为 1 处的虚线表示无振荡的预期值, 红实线表示当振荡参数 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ 时的预期值。

■ 这是我国诞生的一项重大物理成果, 在国际高能物理界引起热烈反响, 被评价为“开启了未来中微子物理发展的大门”, 并入选美《科学》杂志 2012 年度十大科学突破。

■ 精确测量是科学发现和突破的基础。大亚湾实验测量到 θ_{13} , 将为今后中微子物理、天体物理、宇宙学等前沿科学研究提供精确的初值输入, 对基本粒子物理的大统一理论、寻找与鉴别新物理, 甚至揭开“宇宙反物质消失之谜”具有重要意义。



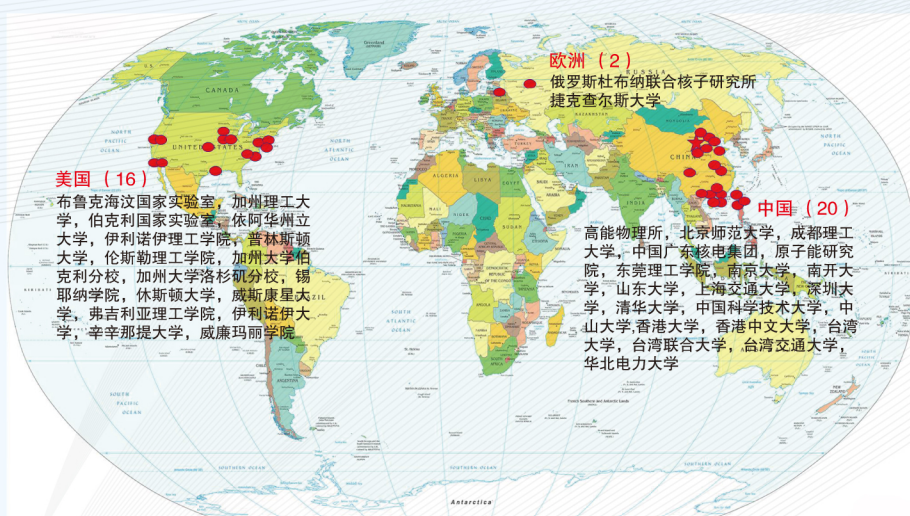
■ 2012年10月19日, 大亚湾反应堆中微子实验站的全部8个中微子探测器正式运行取数, 标志着实验站的全面建成。

■ 实验站将持续运行3至5年, 把中微子混合角 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量精度提高4倍, 并开展反应堆中微子能谱测量等相关研究。

» 合作研究 Cooperation

■ 大亚湾中微子实验项目得到了科技部、中国科学院、自然科学基金委、广东省、深圳市和中国广东核电集团的共同支持，同时也得到了美国能源部及其它境外机构的支持，是我国基础科学领域最大的国际合作项目，是协同创新的典范。

■ 来自中国（包括香港、台湾地区）、美国、俄罗斯、捷克的38个科研机构的约250位科学家参加实验。其中100多位来自中科院高能所、清华大学、上海交通大学、山东大学、中国原子能研究院等中国大陆的科研机构，100多位来自美国、俄罗斯、捷克及中国香港、台湾地区的科研机构。



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

地址: 北京市石景山区玉泉路19号乙

邮编: 100049

电话: 010-88235008

传真: 010-88233105

网址: www.ihep.cas.cn