



# 大亚湾反应堆 中微子实验

# DBRN

## 科学背景

大亚湾反应堆中微子实验站位于中国广核集团广东大亚湾核电基地内，其主要科学目标是通过探测来自反应堆的中微子，精确测量中微子混合角 $\theta_{13}$ 。

粒子物理的研究表明，构成物质世界的最基本粒子有12种，包括6种夸克、3种带电轻子和3种中微子。中微子几乎不与物质发生相互作用，性质独特，极难被探测到，因此人们对它的了解最少，至今仍存在大量的未解之谜。1930年泡利提出中微子存在的可能。1956年莱因斯首次利用反应堆探测到中微子，获得1995年诺贝尔奖。1962年莱德曼、舒瓦茨、斯坦伯格利用加速器发现缪子中微子，获得1988年诺贝尔奖。探测到超新星中微子的小柴昌俊与探测到太阳中微子的戴维斯获得了2002年诺贝尔奖。1998年梶田隆章等人领导的日本超级神冈实验以确凿的证据证明，大气中微子在飞行途中会发生消失现象，即大气中微子振荡。2001年，阿瑟·麦克唐纳领导的加拿大萨德伯里实验宣布找到了失踪的太阳中微子，证实了太阳中微子振荡。中微子振荡表明，中微子存在微小的质量，从根本上改变了人们对中微子的看法。发现大气中微子振荡的梶田隆章和证实太阳中微子振荡的阿瑟·麦克唐纳获得了2015年的诺贝尔奖。步入21世纪，中微子研究蓬勃发展，不仅成为粒子物理最重要的分支之一，而且扩展到天文学、宇宙学、地球物理等多个学科，形成了“中微子科学”。

在中微子研究中，振荡参数中的电荷宇称破坏（CP破坏）相角大小与宇宙起源中的正反物

质不对称有关，具有极为重要的科学意义。而测量CP破坏，必须首先确定混合角 $\theta_{13}$ 的大小。如果它较大，则可以通过改进现有加速器技术测量CP破坏；如果它太小，则需要开发新的技术手段才有可能，同时也意味着中微子存在新的对称性质。因此，精确确定混合角 $\theta_{13}$ 的大小对中微子研究具有指路标的作用，是中微子研究的当务之急。由于科学意义重大，国际上曾先后提出了8个实验方案。由中国科学家提出的大亚湾反应堆中微子实验（简称“大亚湾实验”）方案具有独特的地理优势和独到的设计，作为中微子源的反应堆与探测器距离近，其通量比太阳和大气中微子高几个数量级，周围有山、本底干净，探测灵敏度最高，是唯一能起到指路标作用的实验，得

## 装置综述

大亚湾反应堆中微子实验自2003年开始酝酿，中国科学家提出了实验设想，与国际同行共同起草了利用反应堆测量 $\theta_{13}$ 的白皮书。2005年4月第250次香山科学会议达成共识：中国要尽快发展中微子物理，在基础研究的国际前沿占领一个制高点，并逐步制定中微子物理研究的长期发展计划；利用大亚湾反应堆得天独厚的条件来确定 $\theta_{13}$ ，是中国基础科学跨越式发展难得的机遇。2006年成立的国际合作组，由中国、中国香港、中国台湾、美国、俄罗斯、捷克的25个研究机构120名研究人员组成。2006年5月和2007年1月，大亚湾实验先后在中科院和科技部立项，并得到了国家基金委、广东省、深圳市、中国广核集团的联合经费支持，于2007年10月正式破土动工。2010年12月完成地下实验大厅的全部爆破任务，2011年年中完成近点实验厅的探测器建造与安装，8月开始近点取数，年末实现3个实验厅6个探测器取数。在实验站建设过程中，项目团队根据 $\theta_{13}$ 可能较大的迹象，修改实验计划，在8个探测器未全部到位情况下，2011年12月24日以6个探测器提前

到了国际上的广泛支持。美国能源部放弃了支持本国的两个实验方案，转而支持美国科学家加入大亚湾实验的合作。

中微子研究方兴未艾，关于它的未解之谜包括 $\theta_{13}$ 的大小、是否有大的CP破坏、质量顺序、是否破坏CPT对称性、混合矩阵的幺正性、质量大小、质量起源机制、是否为本身的反粒子、是否存在惰性中微子等等。每个谜底都有可能改变人类对微观世界和宇宙的看法。因此，在未来相当长的一段时间内，它仍将是粒子物理的前沿热点之一。中微子天文学和地球中微子研究也在飞快发展。大亚湾实验是我国开展中微子实验研究的切入点，于2011年底投入运行，已取得重大科学成果。

累积数据，2个多月后就取得重大科学成果。在2011和2012年度，大亚湾中微子实验站实行“边建设、边运行”的模式。2012年10月19日开始了8个探测器的全面联合取数，迄今一直稳定运行，每年除少数几天因检修或停电等暂停外，保持全天候运行。

大亚湾实验是一个以中国为主、多国和地区参与的重大国际合作项目。大亚湾国际合作组不断发展壮大，目前由来自7个国家和地区的42个研究机构和大学，200多名研究人员组成。由中国承担全部的土建



大亚湾反应堆中微子实验3号厅——4个中心探测器



2014年11月15日，科技部部长万钢访问大亚湾反应堆中微子实验

工程和一半的探测器研制。美国投入3400万美元，研究人员约100人，承担约一半的探测器研制。其他国家和地区各有几十万至100万美元的实物或经费贡献。这是中美在基础研究领域规模最大的合作之一。在国内也开创了国家、地方与企业共同支持基础科学研究的先河。

大亚湾中微子实验站由地面设施、3个地下实验大厅和2个功能厅组成。地面设施包括地面装配大厅、控制室和风机房。探测器位于地下实验大厅内。2个近点实验大厅位于地下100m深，距大亚湾核反应堆和岭澳核反应堆均约500m。远点实验大厅位于地下360m深，距各反应堆约2km。2个功能厅也位于地下，分别用于水净化和液闪生产存储。各实验厅由水平隧道相连。在每个实验大厅内各有3种探测器，分别是探测中微子的中心探测器、探测宇宙线的水切伦科夫探测器和阻性板探测器。每个中心探测器是三层嵌套结构的、直径5m，高5m的圆柱形，重110t。共有8个中心探测器，2个近点实验大厅各放置2个，远点放置4个。中心探测器的最内层是一个直径3m，高3m的薄壁有机玻璃罐，内装20t掺钎液体闪烁体，作为探测中微子的靶物质；中间是一个直径4m，高4m的薄壁有机玻璃罐，内装20t普通液体闪烁体；最外层是不锈钢罐，内装40t矿物油。192个8"光电倍增管安装在矿物油中，探测中

微子产生的光信号。中心探测器放置在水池中，由2000—3000t纯净水屏蔽。水池中安装200多个光电倍增管，兼作水切伦科夫探测器，与水池上方覆盖阻性板探测器一起，探测宇宙线粒子。

大亚湾实验项目按大型粒子物理实验的国际惯例组织和管理。由中科院高能物理所与代表美国能源部的2个国家实验室、其他国家和地区的代表研究机构等分别签署合作备忘录，确定各方的经费投入和工作责任范围。国际合作组内部按合作组章程组织和管理。中方与外方各设发言人一名，负责实验的日常运行，在外代表实验合作组。重大决策由执行委员会或合作组大会决定。执行委员会负责重要的科学、技术与管理决定。研究所代表委员会由各研究单位派一名代表组成，负责接纳新的合作机构与新成员，或移除合作机构与成员，选举发言人、执行委员等。另设有多个专门委员会。合作组大会包括实验合作组内的所有成员，对所有决定有最后决定权。合作组章程规定了详细的决策机制，章程本身由合作组大会讨论通过。

在实验建设阶段，由项目经理和技术委员会负责项目建设决策，其下设联合项目办公室和各系统，其上有由各实验室主要负责人组成的实验监管机构，对中国政府部门和美国能源部负责，还有国际资金委员会和项目顾问团负责协调工作。在建设现场，有现场经理和现场办公室负责日常管理。在实验投入运行后，成立了运行委员会和现场运行办公室，负责实验站的运行维护工作。

在装置研制过程中，大亚湾实验团队攻克了多项技术难关，完成了探测器样机研制、工程设计和探测器建造，多项成果达到国际领先水平，最终建造完成的8个全同的低能量、低本底、高精度探测器，相对误差达到了国际少见的0.2%，好于设计目标0.38%。

大亚湾实验80%的设备和材料立足于国内生产研发。在实验站的建设过程中，科研人员与企业协同



创新，使得一批中国企业通过参与高精尖设备的研发

与制造，提高了技术水平和管理水平。

## 研究综述

大亚湾实验的主要科学目标是测量中微子混合角  $\theta_{13}$  至  $\sin^2 2\theta_{13} < 0.01$  的精度，这比之前的实验精度提高十几倍，也远远好于国际上其他实验的类似测量。2 个近点实验大厅分别监测来自大亚湾核电站 2 个反应堆和来自岭澳核电站 4 个反应堆的中微子，远点位于反应堆中微子的振荡极大值处，如果中微子发生振荡，可以看到远点探测器处的中微子数目较预期减少，能谱发生有规律的变形。通过远近相对测量，抵消反应堆流强的不确定性和探测器误差，实现精确测量。

大亚湾实验将第一次对中微子质量平方差  $\Delta m_{31}^2$  进行直接测量，其精度约与加速器和大气中微子实验的测量精度相当，可以对现有理论框架做出检验。国际上关于惰性中微子的研究扑朔迷离，大部分实验不支持惰性中微子的存在，也有 4 个实验研究结果在一定程度上支持存在惰性中微子。大亚湾实验将能够在部分参数空间内澄清这个问题。

大亚湾实验的近点探测器将测量反应堆中微子流强到非常高的精度，能够提高反应堆中微子流强



2010年11月15日，中科院副院长白春礼视察大亚湾反应堆中微子实验

的计算精度。目前国际上有多组实验小组，在国际原子能机构的支持下，利用中微子探测技术进行反应堆增殖监测研究。提高反应堆中微子流强的计算精度，将提高该监测能力。对近距离超新星爆发的观测在天文学和宇宙学上极具价值，但非常罕见，该实验也可成为超新星预警系统的一员，对超新星爆发进行观测。虽然大亚湾反应堆中微子实验本身在事例的统计量方面很难与 Super-K 等实验竞争，但 3 个实验厅 8 个独立探测器的同时符合，将给出非常可靠的信号。

此外，也可利用大亚湾高精度的宇宙线探测器进行不同地层深度的宇宙线研究、地球中微子研究等。大亚湾远点实验厅在地下 360 米深处，可降低宇宙射线 1 万倍，可以用来进行一些其他的低本底实验研究。

大亚湾实验装置和所获取的数据对所有合作组成员免费开放。新合作组成员的接纳由现有合作组的研究代表委员会负责审理。



2012年11月4日，美国能源部官员访问大亚湾反应堆中微子实验

# 科研成果

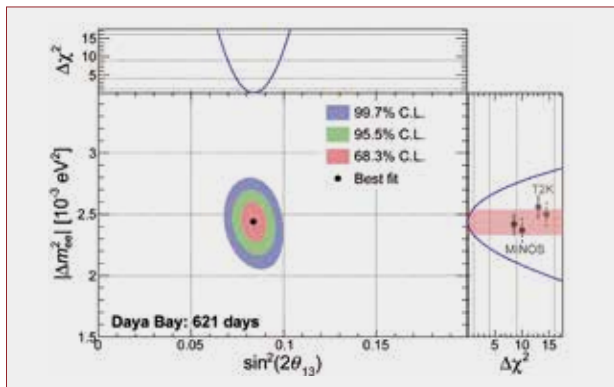
## 大亚湾实验发现新的中微子振荡模式

2012年3月8日,大亚湾实验在中科院高能物理所宣布,利用6个探测器55天的数据,实验以5.2倍标准偏差的置信度( $>99.9999\%$ )测得振荡几率 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016$  (stat)  $\pm 0.005$  (sys),首次发现了中微子的第三种振荡模式。该结果不仅精确测量了一个自然界的基本参数,而且由于测得的混合角 $\theta_{13}$ 远大于预期值,打开了近期测量中微子质量顺序和CP破坏的大门,具有重大科学意义和国际影响。

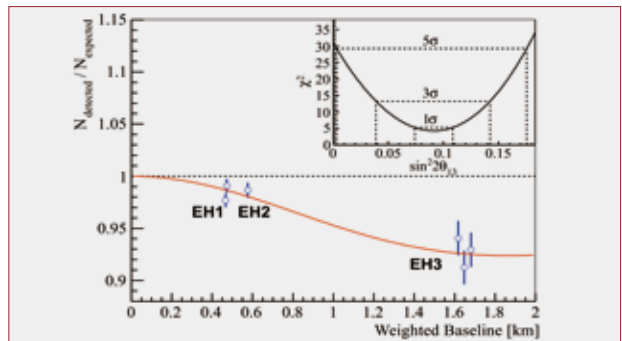
大亚湾实验发现中微子第三种振荡模式的成果入选美国 *Science* 杂志公布的2012年度十大科学突破。

## 中微子振荡参数 $\sin^2 2\theta_{13}$ 和 $|\Delta m_{ee}^2|$ 的精确测量

2014年度,大亚湾完成了基于全部8个中心探测器运行取数的首次物理分析。除因为数据量的增加大大降低了统计误差之外,还发展了新的分析方法降低了系统误差。最终,使用6个探测器期间和新的8个探测器期间一共621天的实验数据,进一步对振荡参数做了更加精确的测量。分析结果为 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.084 \pm 0.005$ ,  $|\Delta m_{ee}^2| = (2.44^{+0.10}_{-0.11}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ ,这是目前为止对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的最精确的测量,



中微子振荡参数 $\sin^2 2\theta_{13}$ 和 $|\Delta m_{ee}^2|$ 的联合置信区间。其中黑点是最佳拟合值,3个嵌套的实心区域分别表示通过比较远点4个探测器和近点4个探测器的中微子实例数和能谱得到的68.3%、95.5%及99.7%置信区间。上方和右侧的两张图表示 $\sin^2 2\theta_{13}$ 和 $|\Delta m_{ee}^2|$ 各自的灵敏度。右侧圆点和竖线基于MINOS和T2K实验对 $|\Delta m_{\mu\mu}^2|$ 的测量值及其误差用于对比



3个实验厅内的6个中微子探测器测量到的中微子数与预期中微子数的比值。横坐标是中微子的飞行距离。纵坐标为1的虚线表示没有振荡。红线为中微子的振荡曲线的最佳拟合值。在近点实验厅EH1和EH2,振荡很小(这里的振荡主要来自较远的反应堆,比如从岭澳反应堆到大亚湾近点EH1的两个探测器距离超过1公里,已经有了一些振荡效应),在远点实验厅的3个探测器可以看到明显的振荡效应

并且 $|\Delta m_{ee}^2|$ 的测量精度已经与加速器中微子的测量精度相当,分析结果在2014年度国际中微子大会(Neutrino 2014)上公布。

大亚湾实验利用3.6倍于上一次分析的统计量和分析方法的改进,将 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量精度提高了近1倍,达到6%,为世界最高精度,远远甩开了国际上其他竞争对手。提高 $\theta_{13}$ 的测量精度对于下一代中微子实验测量中微子质量等级和CP相位角都具有至关重要的意义。将 $\Delta m_{ee}^2$ 的测量精度也提高了近1倍,达到5%,与加速器实验得到的 $\Delta m_{\mu\mu}^2$ 精度相当,验证了中微子振荡的理论。

## 利用氢俘获样本独立测量 $\theta_{13}$

反应堆中微子通过反贝塔衰变产生的中子在氢原子核上俘获,提供了除钆俘获之外另一种独立的事例样本。大亚湾实验针对氢俘获样本的特征单独开发了事例挑选方法,并重新估计了本底和系统误差。最终挑选出的氢俘获样本占钆俘获样本的65%。对远近点探测到的氢俘获样本事例率的分析得到了与钆俘获样本一致的 $\sin^2 2\theta_{13}$ 测量结果,并以4.6倍标准偏差的置信水平独立验证了中微子振荡和 $\theta_{13}$ 非零。

大亚湾实验探测器布置



### 中微子能谱发现超出预期

利用 6 个中心探测器运行 217 天的数据，大亚湾实验积累了超过 30 万个反应堆中微子样本，并在 2014 年度国际高能物理大会（ICHEP2014）首次报道了对反应堆中微子流强和能谱的测量结果。大亚湾测得的中微子流强与过去的短基线实验一致，而测得的中微子能谱与反应堆理论模型在大于 2 倍标准偏差的置信度下不一致，其中在（5—7）MeV 能量区间观测到的中微子数明显超出理论模型，显著性达到 4 倍标准偏差。大亚湾的测量结果对理解“反应堆中微子反常”现象提供了依据，并为其他反应堆中微子实验提供了模型无关的中微子测量谱。

## 未来展望

大亚湾实验是中国进行中微子实验研究的切入点，也是我国第一个大型的地下低本底实验。

精确测量是科学发现和突破的基础，该实验将再持续运行 3—4 年，提高  $\theta_{13}$  和质量平方差的测量精度，将  $\sin^2 2\theta_{13}$  的测量精度提高到 3%—4%，为中微子物理、天体物理、宇宙学等前沿科学研究提供精确的初值输入，此外，还将进一步提高中微子质量平方差的测量精度；精确测量反应堆中微子能谱，并研究反应堆中微子反常；研究超新星中微子；研究宇宙线产生中子和同位素；寻找新物理等。这些研究对基本粒子物理的大统一理论、寻找与鉴别新物理等具有重要意义，也将继续保持我国在反应堆中微子研究领域

### 对惰性中微子给出了新的限制

大亚湾实验首次报道了对轻的惰性中微子的寻找，在搜寻的中微子质量范围内没有找到存在第四代中微子的迹象。这个结果在这一质量区间提供了世界上对惰性中微子最好的限制，并支持三代中微子理论。国际上其他的实验和科学家将继续在其他质量区间寻找惰性中微子，而大亚湾为它们缩小了搜寻的范围。

的国际领先地位。

在大亚湾实验的基础上，已经开始了更大规模的大亚湾二期实验（现名为“江门中微子实验”），以中微子质量顺序测量为首要物理目标，还将精确测量中微子 6 个振荡参数中的 3 个，并达到好于 1% 的国际最好水平，并进行超新星中微子、地球中微子、太阳中微子、大气中微子和惰性中微子等多项国际领先的交叉前沿研究。该实验以大亚湾实验团队为核心，进一步扩充了国内研究队伍，并加强了国际合作力度，建成了一支国际领先的科研团队，将使我国的粒子物理研究走在世界前列，并带动国内相关企业的技术创新，为实现科技强国战略做出重要贡献。