



大亚湾反应堆 中微子实验站

科学背景

大亚湾反应堆中微子实验站位于广东大亚湾核电站内，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 θ_{13} 。

粒子物理的研究结果表明，构成物质世界的最基本的粒子有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，极难探测到，因此人们对它的了解最少，至今仍然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、斯坦伯格发现第二种中微子，获得1988年诺贝尔奖。1998年日本的超级神冈实验以确凿的证据证明，中微子在飞行途中会发生振荡，即从一种中微子变成另一种，同时也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。超级神冈实验的小柴昌俊与做太阳中微子实验的Ray Davis获得了2002年诺贝尔奖。步入21世纪，中微子研究蓬



● 大亚湾中微子实验外景



● 大亚湾中微子实验布局图

勃发展，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）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 θ_{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 θ_{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。由我国科学家提出的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

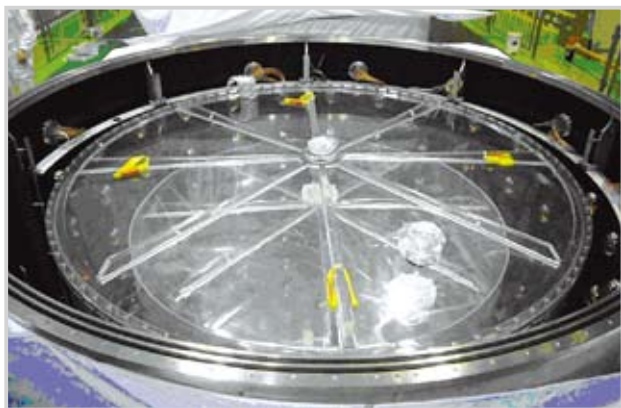
量比太阳和大气中微子高好几个数量级，周围有山本底干净，探测灵敏度最高，是唯一能起到指路标作用的实验，得到了国际上的广泛支持。例如美国能源部就放弃了支持本国的两个实验方案，转而支持美国科学家加入大亚湾实验的合作。

中微子研究方兴未艾，关于它的未解之谜包括 θ_{13} 的大小、是否有大的CP破坏、质量等级、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我们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，它将仍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。大亚湾中微子实验是我国开展中微子实验研究的切入点，于2011—2012年逐步投入运行，很快便取得了重大科学成果。

装置综述



● 隧道内景



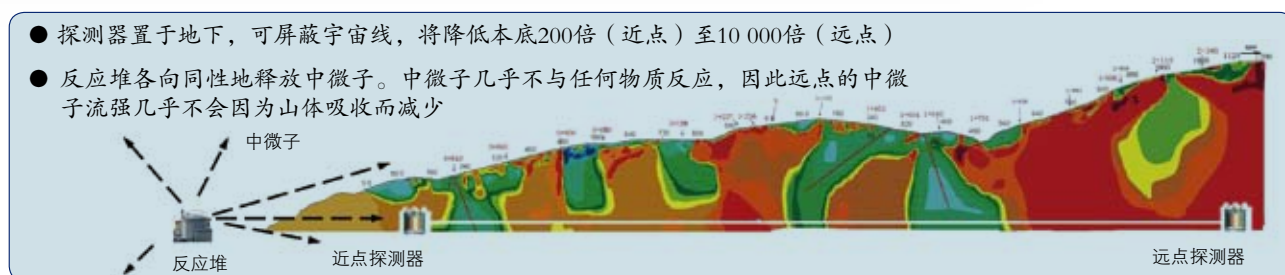
● 中微子探测器

大亚湾中微子实验自2003年开始酝酿，我国科学家与国际中微子物理同行共同起草了利用反应堆测量 θ_{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 θ_{13} ，是中国基础科学跨越式发展难得的机遇。2006年成立了国际合作组，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，大亚湾中微子实验先后在中科院和国家科技部立项，并得到了国家自然科学基金委、广东省、深圳市、中国广东核电集团的联合经费支持，于2007年10月正式破土动工。大亚湾反应堆中微子实验站的3个实验厅于2011年8月至12月陆续投入运行。

大亚湾实验是一个以我为主、多国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6个国家和地区的40个研究机构，250名研究人员组成。其中中国承担全部的土建工程和一半的探测器研制。美国投入3 400万美元，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。

大亚湾中微子实验装置由地面设施、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。两个近点实验大厅位于地下100米深，分别距大亚湾核电站和岭澳核电站约500米。远点实验大厅位于地下360米深，距各反应堆约2公里。两个功能厅也位于地下，分别用于水净化和液闪生



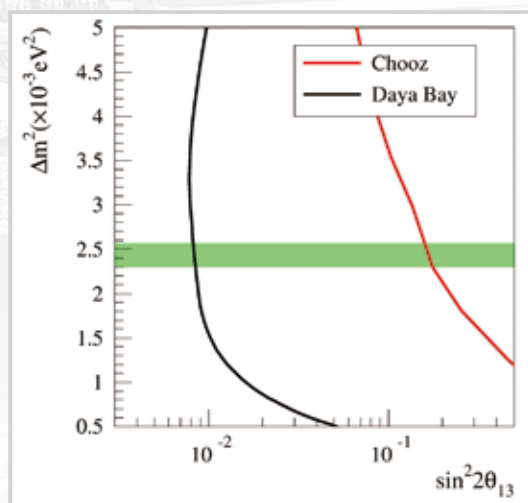
产存储。各实验厅由水平隧道相连。

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和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3层嵌套结构的、直径5米高5米的圆柱形，重110吨。共有8个中心探测器，两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3米高3米的薄壁有机玻璃罐，内装20吨掺钎液体闪烁体，作为探测中微子的靶物质；中间是一个直径4米高4米的薄壁有机玻璃罐，内装20吨普通液体闪烁体；最外层是不锈钢罐，内装40吨矿物油。192个8英寸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2-3千吨纯净水屏蔽。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。

大亚湾中微子实验项目按大型粒子物理实验的国际惯例组织和管理。由高能物理所与代表美国能源部的两个国家实验室、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（spokesperson）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（Executive Board）负责重要的科学、技术与管理决定。研究所代表委员会（Institutional Board）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，其下设立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，由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。



● Distance Reactor (m)

研究综述

大亚湾反应堆中微子实验的主要科学目标是测量中微子混合角 θ_{13} 至 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.01$ 的精度，这比原有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。两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，我们将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。

2012年3月8日，大亚湾国际合作组宣布，以5.2倍标准偏差的置信度发现混合角 θ_{13} 不为零，其大小为 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.017$ 。3个月后又以2.5倍的统计量进一步确认了结果。该结果具有重大的科学意义，不仅是测得了一个自然界的基本参数，而且发现 θ_{13} 远大于预期值，确定了未来中微子研究的路线，因此引起巨大的国际反响。

大亚湾反应堆中微子实验将第一次对中微子质量平方差 Δm_{31}^2 进行直接测量，其精度约与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。大亚湾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。虽然大亚湾实验本身在事例的统计量方面很难与超级神冈等实验竞争，但超新星中微子在全球各地均被观测到具有极为重要的意义。通过全球网络的观测，可决定地球物质效应对中微子振荡的影响。

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它的低本底实验研究。

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所代表委员会负责审理。

发展展望

大亚湾中微子实验站将继续获取数据，在3到5年内将 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量精度提高到4%—5%，达到实验设计精度。在可预期的将来，这将是国际上最精确的测量。由于 θ_{13} 是自然界的一个基本参数，它的精确测量对很多物理过程具有重要价值。同时，大亚湾实验也将开展上述的其它物理研究。

大亚湾中微子实验是我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。在装置研制过程中，我们积累了大量相关技术，例如低本底探测器技术、掺杂的液体闪烁体技术、高精度探测器、精确的反应堆中微子流强计算等。在大亚湾实验的基础上，正在设计中的二期中微子实验将利用反应堆中微子确定中微子质量等级，同时具有非常丰富的科学目标，在这些研究中达到世界领先水平，包括测量6个混合参数中的3个到好于1%的精度，进而判别是否存在新物理；研究超新星中微子；在比较完整的参数空间内判定惰性中微子是否存在；与地质与地球物理工作者合作研究地球中微子等。



● 大亚湾反应堆中微子实验布局



PUBLIC INFRA

公益基础设施

- 中国遥感卫星地面站
- 遥感飞机与航空遥感系统
- 子午工程
- 长短波授时系统
- “实验 1” (SWATH)海洋考察船
- 中国西南野生生物种质资源库

ASTROSTRUCTURE

