



大亚湾反应堆中微子实验

综述及基本情况

大亚湾反应堆中微子实验（以下简称“大亚湾实验”）的主要目标是利用核反应堆产生的电子反中微子，寻找一种新的中微子振荡并精确测量其振荡几率（由中微子混合角 θ_{13} 表示）。

大亚湾实验由中国科学院高能物理研究所牵头，是一个具有重要国际影响和重大科学意义的国际合作项目，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。大亚湾实验国际合作组以中美物理学家为主，包括7个国家和地区的41个单位189人。

大亚湾实验于2006年立项，2007年开始动工修建隧道和地下实验大厅。2011年12月24日，6个探测器开始运行取数。2012年夏天停机完成其余探测器安装，10月19日远、近点共8个探测器开始运行取数。

2012年3月8日，大亚湾实验测量到了最后一个未知的中微子混合角 θ_{13} ，在国际上首次测到中微子混合角 θ_{13} 不为零，其置信度达到5.2倍标准偏差。该成果被*Science*杂志评选为2012年度十大科学突破之一。

2013年，大亚湾中微子实验国际合作组公布了对中微子质量平方差的测量（ Δm_{ee}^2 ），该测量可与加速器实验上的质量平方差（ $\Delta m_{\mu\mu}^2$ ）相比较，将帮助我们更好地理解中微子振荡的特性。

2014年，利用6个中心探测器运行217天和全部8个中心探测器运行404天的数据，大亚湾实验将 θ_{13} 和 Δm_{ee}^2



的测量精度提高了近 1 倍，分别达到 6% 和 5%。此外，利用 6 个探测器的数据，大亚湾实验测量了反应堆中微子的绝对流强，并初步给出了中微子能谱的测量结果；对第四代中微子或惰性中微子给出了新的排除区间；通过氚俘获的事例样本，以 4.6 倍标准偏差的置信水平独立验证了中微子振荡和 θ_{13} 非零。

2015 年，大亚湾实验完成了中微子振荡参数测量的检查和改进。同时，大亚湾实验完成了反应堆中微子能谱的首次测量，并发现中微子个数在 6 MeV 附近超出理论预期，显著性达到 4 倍标准偏差。这个结果为反应堆中微子理论模型的完善以及国际上热门的对反应堆中微子反常现象的研究提供了新的依据。

2016 年，利用 1 230 天的数据，大亚湾实验将 θ_{13} 和 Δm_{ee}^2 的测量精度分别提高到了 3.9% 和 3.3%， Δm_{ee}^2 的精度首次达到世界第一。利用首个超过 100 万中微子的事例样本，改进了中微子流强和能谱的测量，中微子个数在 6 MeV 附近超出理论预期，显著性提高到 4.4 倍标准偏差。大亚湾实验和美国的加速器实验 MINOS 同时利用双方数据，在不同中微子反应道上进行联合分析，给出了新的惰性中微子的排除区间。

2017 年，大亚湾实验首次测得了中微子流强和能谱随反应堆核燃料的演化，发现反应堆中微子反常主要由 ^{235}U 引起，而不是“惰性”中微子预言的不同核素贡献相同，基本排除了“惰性”中微子对中微子反常的解释。

2018 年，利用 1 958 天的数据，大亚湾实验将 θ_{13} 和 Δm_{ee}^2 的测量精度分别提高到了 3.4% 和 2.8%。

精确测量是科学发现和突破的基础。在下一阶段的运行中，大亚湾中微子实验将继续运行至 2020 年底，获取更多的数据，提高统计量，降低统计误差，并研究降低系统误差的方法，将 θ_{13} 的测量精度提高到 3% 左右。同时，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。这些研究将在多个方面达到国际领先水平，保持在反应堆中微子实验中领先的国际地位，进一步扩大我国在中微子研究领域的国际影响，获得重大科学成果。



大亚湾反应堆中微子实验站

研究进展与成果

首次发现中微子振荡新模式

中微子物理是粒子物理最重要的研究前沿之一。中微子振荡是一种新的物理现象，即一种中微子在飞行中自发变为另一种中微子。中微子振荡表明中微子有微小的质量，是超出粒子物理标准模型的目前唯一的实验证据。对应于第三种振荡模式的混合角 θ_{13} 的大小对未来中微子研究具有指路标的作用，也与宇宙起源中的“反物质消失之谜”相关，具有重大科学意义。

大亚湾实验通过近点探测器测量反应堆中微子的通量，并预言远点探测器的中微子事例数。经过仔细的数据分析，排除了大量的本底，证明远点的中微子数丢失了约6%。通过更精确的 χ^2 分析，得到中微子振荡的振幅为 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(\text{stat.}) \pm 0.005(\text{syst.})$ ，以5.2倍的标准偏差得到 $\sin^2 2\theta_{13}$ 不为零。该项在我国诞生的重大物理成果，在国际物理学界引起了热烈反响，入选 *Science* 杂志2012年度十大科学突破，获得了2016年度基础物理学突破奖和2016年度国家自然科学基金一等奖。2018年，大亚湾实验积累了当时世界最大样本的反应堆中微子数据，将振荡参数 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量精度从2012年的20%提高到了3.4%。

首次测定中微子振荡参数 Δm_{ee}^2

质量平方差是描述中微子振荡现象的主要参数之一。2013年，大亚湾实验完成了中微子的能谱分析研究，进而首次直接测量了与反应堆中微子振荡相关的质量平方差 Δm_{ee}^2 ($|\Delta m_{ee}^2| = (2.59 \pm 0.20) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$)，验证了3种中微子混合的理论。这个结果可与加速器实验上的质量平方差 ($\Delta m_{\mu\mu}^2$) 相比较，帮助我们更好地理解中微子振荡的特性。美国费米实验室主办的 *Symmetry* 杂志以“通过精确测量不同能量下的振荡行为，大亚湾的新结果加深了对中微子的理解”为题、*Science Daily* 网站以“高精度亚原子谱形变化及关于中微子质量差的新结果”为题报道了该成果。

2018年，大亚湾实验积累了当时世界最大样本的反应堆中微子数据，将振荡参数 Δm_{ee}^2 的测量精度从2013年的7.5%提高到了2.8%，该测量精度略好于加速器中微子的测量精度，为世界最精确的测量。

精确的反应堆中微子能谱测量

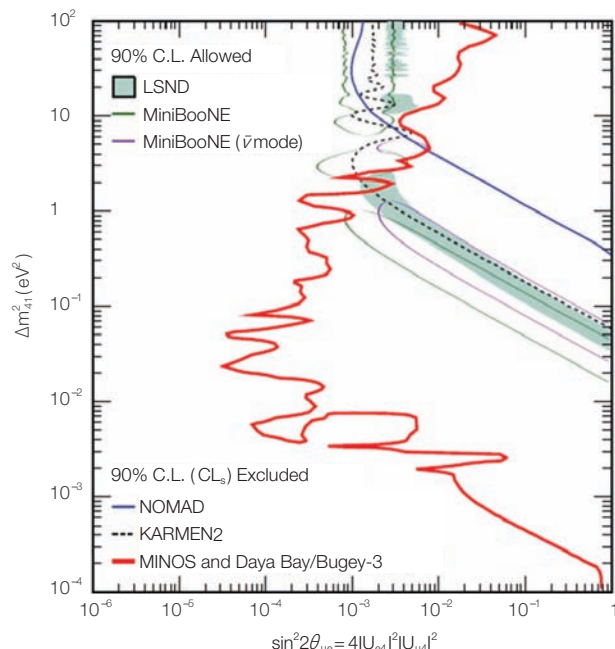
2016年，利用621天的数据量、超过100万个反应堆中微子的事例样本，精确测量了反应堆中微子能谱，发现与理论模型存在两种偏差：① 反应堆中微子流强比主流的Huber-Mueller模型预期值低5%，超过理论模型估计的2%—3%的误差。这个结果与过去10多个短基线反应堆中微子实验的测量结果一致，被称为“反应堆中微子反常”。② 反应堆中微子能谱与几种模型预期的能谱相比，有5 MeV能量附近有显著超出，远大于模型误差，偏离达到了4.4倍标准偏差。能谱对理论模型的整体偏离也达到了3倍标准偏差。该成果为未来的反应堆中微子实验提供了模型无关的中微子测量谱，入选《科技日报》2016年“国内十大科技新闻”，入选中国核学会的2015—2017年度“中国十大核科技进展”。

2019年的最新结果证明5 MeV附近的超出达到6.3倍标准偏差，能谱整体偏离也超过了5倍标准偏差的确认标准。

寻找惰性中微子

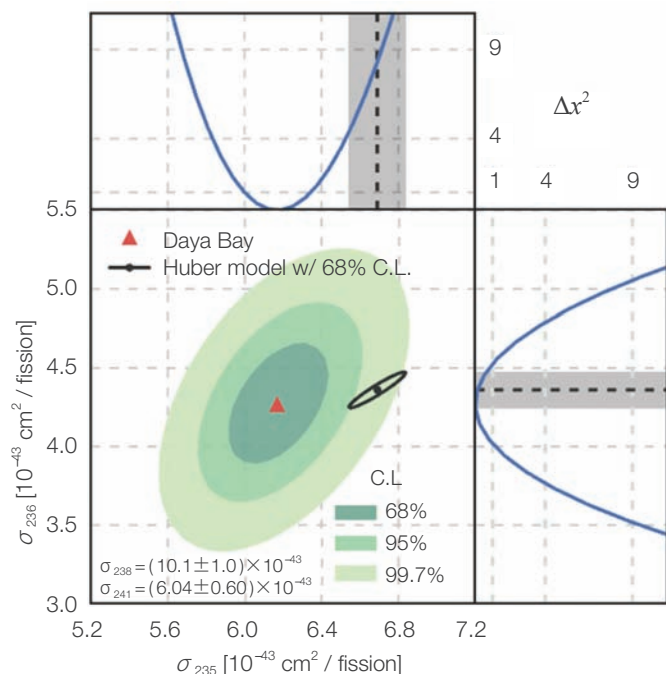
从 20 世纪 90 年代起，美国的 LSND 实验和 MiniBOONE 实验利用加速器产生的缪子中微子，发现其到电子中微子的振荡存在超出预期，一个可能的解释是存在质量在 eV 量级的惰性中微子。而在反应堆中微子领域，流强预期和过去十几个实验的测量相比，偏少 5% 左右，同样可能使用 eV 量级惰性中微子解释。惰性中微子是超出粒子物理标准模型的新物理，它和普通物质只发生引力相互作用，因此寻找惰性中微子是近 20 年来中微子物理中的热点方向之一。

2016 年，利用 621 天的数据，大亚湾实验通过比较远近实验厅的能谱，在 $0.001\text{--}0.1\text{ eV}^2$ 极大程度上排除了惰性中微子存在的可能，为国际最好水平。为了直接检验 LSND 实验和 MiniBOONE 实验的结果，大亚湾实验和反应堆中微子实验 Bugey-3、加速器中微子实验 MINOS 开展联合分析，基本排除了 LSND 实验和 MiniBOONE 实验给出的惰性中微子可能存在区间。该成果被 *Physical Review Letters* 选为编辑推荐文章，被 *Scientific American*、*Nature* 等报道。



MINOS 实验与大亚湾中微子实验、Bugey-3 实验联合分析结果基本排除了 LSND 实验和 MiniBOONE 实验给出的惰性中微子可能存在区间

反应堆中微子事例率和能谱随核燃料演化的演化



大亚湾实验从核燃料的演化历史中测量出的核素中微子产额

反应堆中微子实验观测到的中微子事例数比理论模型要少，一直以来，有一种解释就是存在惰性中微子。2017 年，大亚湾实验利用 1 230 天的实验数据样本，测量了中微子事例率和能谱随反应堆核燃料燃烧历史的演化，结合大亚湾和岭澳一共 6 个反应堆的燃料燃烧历史数据，测量了反应堆中 4 种燃料 (^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu) 中 2 种主要核素—— ^{235}U 和 ^{239}Pu 的裂变产物的中微子产额，与理论模型预期相比，发现反应堆中微子反常主要由 ^{235}U 引起，而不是“惰性”中微子预言的不同核素贡献相同，基本排除了“惰性”中微子对中微子反常的解释，对中微子反常现象的理解具有重要意义。该成果被 *Physical Review Letters* 配以观点文章推荐，被 *Science* 等多家科学杂志报道。

2019 年大亚湾实验利用核燃料演化数据，首次测得了分别对应于 ^{235}U 和 ^{239}Pu 释放的中微子能谱。