中国科学: 物理学 力学 天文学 2014 年 第 44 卷 第 10 期: 1025–1040
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica phys.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

数理相关领域大科学装置专辑·评述

大亚湾与江门中微子实验

曹俊*

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

*联系人, E-mail: caoj@ihep.ac.cn

收稿日期: 2013-05-23; 接受日期: 2014-07-08; 网络出版日期: 2014-08-27

国家自然科学基金(批准号: 11225525, 11390381)、中国科学院重要方向性项目(编号: KJCX2-EW-T07)和国家重点基础研究计划(编号: 2013CB834301)资助项目

摘要 中微子物理是粒子物理中最活跃的分支之一, 存在众多未解之谜, 可能成为超出标准模型的新物理的突破口. 本文总结了中微子物理的现状和主要的科学问题, 着重介绍了我国正在进行的大亚湾中微子实验和建造中的江门中微子实验. 通过研究反应堆中微子, 2012 年大亚湾实验发现新的中微子振荡, 测得了中微子混合角θ_{13}. 本文介绍了大亚湾实验的物理背景和项目背景, 简述了实验方法和设计思想, 并描述了探测器设计和建造. 许多新的想法和技术创新在探测器设计与建造中采用, 使探测器相关的相对误差仅为 0.2%. 在未来几十年内, 大亚湾将保持对这一基本参数的最高测量精度. 江门中微子实验 2008 年提出建议, 2013 年正式启动. 通过在 53 km 处探测反应堆中微子振荡, 它将能确定中微子质量顺序, 并精确测量 3 个中微子混合参数. 采用一个设计能量精度为 3%的 2×10^4 t 液体闪烁体探测器, 江门实验在研究超新星中微子、太阳中微子、地球中微子、大气中微子、以及奇异现象寻找方面也极具吸引力. 它将对多个物理目标进行国际领先水平的研究. 文中我们介绍了实验设计和研发的进展. 除了大亚湾和江门实验, 我们也参与了无中微子双贝塔衰变实验 EXO, 设计了一个新式的加速器中微子束流线, 进一步扩展了中微子研究.

关键词 中微子, 中微子振荡, 中微子混合, 反应堆, 大亚湾

PACS: 14.60.Pq, 29.40.Mc, 28.50.Hw, 13.15.+g

doi: 10.1360/SSPMA2014-00174

1 引言

中微子是构成物质世界的最基本的单元之一. 与其他基本粒子——夸克和带电轻子相比, 它们性质独特, 而且很难探测, 是人们了解最少的粒子, 存在众多未解之谜. 对中微子未知问题的研究, 不仅将完善我们对物质世界最基本规律的认识, 也很有可能导致对现有粒子物理理论体系——标准模型的突破, 踏入新物理的大门. 步入 21 世纪, 中微子研究蓬勃发展, 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”.

引用格式: 曹俊. 大亚湾与江门中微子实验. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 1025–1040
Cao J. Daya Bay and Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO) neutrino experiments (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 1025–1040, doi: 10.1360/SSPMA2014-00174

中微子的实验研究有 60 多年的历史, 取得了许多重大发现, 包括发现 3 种中微子、发现中微子振荡等, 先后 3 次被授予诺贝尔奖. 我国的中微子实验研究起步很晚, 但取得了举世瞩目的成绩. 2003 年提出进行大亚湾反应堆中微子实验的构想, 2011 年底实验建成, 短短 2 个多月后就发现了新的中微子振荡模式[1], 震惊了国际粒子物理界, 被美国 *Science* 杂志评为当年的十大科学突破[2]. 2008 年大亚湾实验刚开始建设, 我们就提出了下一步测量中微子质量顺序的设想[3,4]. 大亚湾实验发现中微子混合角θ_{13}远大于预期, 大大提高了该设想的可行性. 2013 年江门中微子实验(JUNO)得以立项, 预期 2020 年建成. 它以确定质量顺序和精确测量混合参数为主要物理目标, 同时可以开展超新星中微子、太阳中微子、地球中微子、大气中微子等多项国际领先水平的研究. 最近我们提出了一种崭新的加速器中微子产生方法, 正在开展前期研究; 通过国际合作参与无中微子双贝塔实验, 以研究中微子的粒子本性. 这些研究涵盖了中微子物理中的大部分重大问题.

可以预期, 在未来的一二十年, 中微子实验物理将取得丰硕的成果, 而我国将在这一领域做出重大贡献, 成为国际中微子研究的中心之一.

2 中微子物理

中微子共有 3 种, 分别是电子中微子(ν_e)、缪中微子(ν_μ)和陶中微子(ν_τ). 它们与对应的 3 种带电轻子 e, μ, τ以及 6 种夸克一起构成了物质世界的基本 单元.

1930 年, 为了解释贝塔(β)衰变中能量似乎不守恒, 奥地利物理学家泡利提出可能存在一种不带电、质量非常轻、几乎不与物质相互作用的粒子, 称之为中微子. 1956 年柯万和雷因斯首次直接探测到中微子, 雷因斯因此获得了 1995 年的诺贝尔奖. 他们探测到的是由核反应堆释放的电子反中微子. 1962 年, 莱德曼、施瓦茨和斯坦伯格在布鲁克海汶实验室用加速器发现了第二种中微子——缪中微子, 获得了 1988 年的诺贝尔奖. 1989 年, 欧洲核子研究中心通过 Z_0 衰变截面的测量, 证明存在且只存在 3 种中微子. 最后一种中微子——陶中微子直到 2000 年才被美国费米实验室的 DONUT 实验发现.

现在中微子的实验研究大致可以分成两类, 一类是中微子振荡研究, 另一类是非振荡物理, 包括绝对质量的测量、无中微子双贝塔衰变($0\nu\beta\beta$)、寻找惰性中微子、寻找非标准相互作用和反常磁矩, 以及中微子天文学等.

2.1 中微子振荡

在标准模型中, 中微子是没有质量的. 1956 年李政道和杨振宁预言宇称不守恒, 很快被吴健雄用实验证实. 实验发现在弱作用中宇称不仅不守恒, 而且是最大破坏的. 造成这一现象的原因实质是只存在左手螺旋度的中微子(即它的自旋总是与运动方向相反), 不存在右手中微子. 这只有中微子质量为零才能成立, 因为质量不为零的话, 那么中微子的速度必然小于光速, 可以选择一个比它还快的参考系, 让它的螺旋度发生翻转. 根据这一现象, 李政道和杨振宁提出了弱作用的 V-A 理论, 被标准模型所继承, 与各种实验数据符合非常好. 因此, 一直到发现中微子振荡, 我们都认为中微子是没有质量的.

庞蒂科夫在 1957 年提出, 假如中微子有微小的质量, 而且存在不同种类的中微子, 就有可能会出现中微子振荡现象, 即一种中微子在飞行中会变成另一种中微子.

1968 年, 布鲁克海汶实验室的戴维斯在美国 Homestake 的一个废旧金矿中观测到了来自太阳的中微子, 他发现测到的中微子个数只有预期的三分之一, 称为"太阳中微子失踪之谜". 中微子振荡是一个很自然的解释, 然而定量的研究发现, 这个解释存在很多矛盾的地方, 不同实验的结果也相互矛盾. 1978 年, 美国理论物理学家沃芬斯坦注意到电子中微子在物质中会受到电子的散射, 将改变中微子的振荡效应. 1986 年, 前苏联的理论物理学家米赫耶夫和斯米尔诺夫将这个想法用于解释太阳中微子问题. 后来人们才意识到, 这些实验看到的太阳中微子振荡并不是在从太阳飞到地球的过程中发生的(真空振荡), 而是在太阳内部的物质场内发生的, 这样原来矛盾的地方就可以得到解释.

1988 年日本神冈实验发现测得的大气缪中微子比预期少, 称为"大气中微子反常". 1998 年升级后的超级神冈实验精确测得了缪中微子数随天顶角(即飞行距离)的变化关系, 以确凿的证据发现了大气中微子振荡. 2001 年, 加拿大 SNO 实验同时探测太阳中微子在探测器内发生的 3 种过程, 发现电子中微子确实

丢失了, 但中微子的总数并没有变. 2002 年日本 KamLAND 实验用反应堆中微子证实了太阳中微子振荡模式. 2003 年日本 K2K 实验和 2006 年美国 MINOS 实验也用加速器证实了大气中微子振荡模式. 中微子振荡现象被大量实验证据所确立.

中微子振荡间接说明中微子有质量, 这是目前发现的唯一超出粒子物理标准模型的实验现象.

中微子振荡是一种量子相干现象. 中微子本身不能被探测, 它的产生和探测必须通过弱相互作用, 因此, 产生时和被探测时都是味本征态. 中微子有质量, 但是味本征态没有理由与质量本征态正好重合. 这样, 一个味本征态可以看作是 3 个不同质量本征态的线性叠加. 在中微子以非常接近光速飞行时, 不同质量本征态的物质波固有频率不同, 飞行一段距离后, 由于量子相干的结果, 将会出现其他味本征态的分量, 即有一部分变成了其他种类的中微子. 微观的量子干涉现象能够在宏观上表现出来, 主要得益于中微子的质量非常轻, 与光速的差别一般小于 10 的负十几次方, 不同质量的中微子飞行速度相差无几, 在长距离飞行后仍然能保持相干性.

3 种味本征态由 3 种质量本征态组合, 可以表示为

$$\begin{pmatrix}\nu_e\\ \nu_\mu\\ \nu_\tau\end{pmatrix}=U\begin{pmatrix}\nu_1\\ \nu_2\\ \nu_3\end{pmatrix},$$

其中(ν_e, ν_μ, ν_τ)是味本征态, (ν_1, ν_2, ν_3)是质量分别为 m_1, m_2, m_3 的质量本征态. $\boldsymbol{U}$ 是一个 3×3 的幺正混合矩阵, 称为 PMNS 矩阵. 为了使物理意义更清楚, 可以将混合矩阵参数化为 3 个欧拉转动矩阵的积:

$$U=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23}\\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos\theta_{13} & 0 & \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\delta}\sin\theta_{13}\\ 0 & 1 & 0\\ -\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}\sin\theta_{13} & 0 & \cos\theta_{13}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0\\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix},$$

其中第 1 项θ_{23}主要与大气中微子振荡相关, 第 3 项θ_{12}主要与太阳中微子振荡相关, 中间一项θ_{13}和δ_{CP}主要与反应堆中微子和加速器中微子振荡相关. 在上述表达式中, 忽略了两个与中微子振荡无关的相位角. 加上 3 种中微子之间的质量平方差(其中两个是独立的, 例如 $\Delta m^2_{21}=m^2_2-m^2_1$, $\Delta m^2_{32}=m^2_3-m^2_2$, 共需要 6 个参数来描述中微子振荡.

由于两个质量平方差相差 30 倍, 中微子振荡经常可以近似成两代中微子的混合. 例如对能量为 E(MeV)的中微子, 飞行距离 L(m)后, 仍然是同类中微子的几率是

$$P_{\mathrm{sur}}\approx 1-\sin^2 2\theta\cdot\sin^2\left(1.27\cdot\Delta m^2\cdot\frac{L}{E}\right).$$

上述几率也叫存活几率. 相反, $1-P_{\mathrm{sur}}$ 就是它转变为其他种类中微子的几率.

在 2002 年以前, 由太阳中微子振荡模式测得了 $\sin^2 2\theta_{12}$ 和 Δm^2_{21}, 由大气中微子振荡模式测得了 $\sin^2 2\theta_{23}$ 和 $\left|\Delta m^2_{32}\right|$. 大亚湾中微子实验 2012 年测得了最后一个混合角 $\sin^2 2\theta_{13}$, 未知的参数只剩下电荷宇称对称性(CP)破坏相角δ_{CP}. 此外, 大气中微子实验不能确定 m_2 和 m_3 到底谁更重, 称为质量顺序(或质量等级)问题; 也不能确定 θ_{23} 具体的值, 因为同一个 $\sin^2 2\theta_{23}$ 可以对应 8 个 θ_{23} 值, 称为 θ_{23} 的八重度问题. 根据多个中微子实验数据拟合得到的振荡参数为[5]

$$\begin{aligned}&\Delta m^2_{21}=7.54\left(1.00^{+0.034}_{-0.029}\right)\times10^{-5}\ \mathrm{eV}^2,\\ &\sin^2\theta_{12}=0.308\left(1\pm0.055\right),\\ &\left|\Delta m^2_{32}\right|=2.39\left(1\pm0.025\right)\times10^{-3}\ \mathrm{eV}^2,\\ &\sin^2\theta_{23}=0.437\left(1.00^{+0.076}_{-0.053}\right),\\ &\sin^2\theta_{13}=0.0234\left(1.00^{+0.085}_{-0.091}\right).\end{aligned}$$

这里假定了中微子质量顺序为正序(m_3>m_2>m_1). 如果为反序(m_2>m_1>m_3), $\sin^2\theta_{23}$ 和 $\left|\Delta m^2_{32}\right|$ 的值略有不同. 可以看出 Δm^2_{32} 约为 Δm^2_{21} 的 30 倍. 混合角 θ_{12}, θ_{23} 很大而 θ_{13} 较小, 这与夸克混合中的 3 个小混合角很不一样.

2.2　中微子的未知问题

中微子研究最近取得了不少重大突破, 但仍然存在众多未解之谜. 这些问题相互关联, 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.

中微子有质量是目前唯一有坚实证据证明超出粒子物理标准模型的现象. 如何将中微子质量纳入标准模型中, 首先会碰到它的粒子本性问题: 它是狄拉克粒子还是马约拉纳粒子? 中微子自旋为 1/2, 是费米子. 其他的费米子都是带电荷的, 而中微子不带. 这样, 中微子可以像其他费米子一样, 是狄拉克粒子, 有一个狄拉克质量项, 也可以是一种与众不同的马约拉纳粒子, 即它的反粒子就是它自身, 只是螺旋度相反. 由于它的质量太小, 目前唯一可行的研究办法就是寻找不释放中微子的双贝塔衰变. 第二个问题是绝对质量是多少? 通过中微子振荡只能测出中微子的质量平方差. 精确测量贝塔衰变的电子能量端点, 或者测量 0νββ衰变(假如存在这类衰变的话), 可以得到中微子质量的另一个关系, 从而解出 3 种中微子的质量. 另一种办法是宇宙学测量, Planck 卫星最近给出了 3 种中微子质量之和的最佳测量结果, 为 (0.320±0.081) eV[6]. 第三个问题是中微子质量顺序是正序还是反序? 不同的质量顺序不仅影响中微子振荡的大小, 也是得到其绝对质量的前提. 它还对 0νββ实验的前景有重大影响. 如果观察到了 0νββ衰变现象, 则中微子肯定是马约拉纳粒子. 如果没有观察到, 对反序情况, 未来一二十年达到的精度将能确定它是狄拉克粒子, 如果是正序则仍然不能得出结论. 由于中微子数目众多, 在整个宇宙空间内为330个/cm^3, 它的质量问题对宇宙的起源与演化有重要影响.

如 2.1 中介绍的, 除质量顺序外, 中微子振荡参数中还有 CP 破坏相角的大小和θ_{23} 的八重度两个问题. 其中 CP 破坏相角与宇宙中反物质消失之谜有关, 是宇宙起源必须解决的关键问题.

第六个问题为惰性中微子是否存在? 美国 LSND 实验 1995 年观测到极短距离的中微子振荡现象[7], 有人认为存在质量在 1 eV 附近的中微子. 由于加速器上 Z^0 粒子衰变实验已经证明只有 3 种参与弱作用的中微子, 只能假定存在一种标准模型之外的、不参与弱作用的粒子, 称为“惰性中微子”. 还有一些其他迹象支持惰性中微子的存在, 如反应堆中微子反常、GELLEX 反常、宇宙学测量等. 专门设计来验证 LSND 实验的 MiniBooNE 实验也未能得到有说服力的结果[8]. 惰性中微子激起了相当一部分人的兴趣. 新设计的实验包括距反应堆几米的地方测量中微子振荡、近距离的加速器中微子实验、利用放射源近距离测量中微子等等. 也许未来一二十年内能够证实或否定它的存在.

第七个问题是 PMNS 矩阵是否幺正? 如果存在超过 3 种中微子, 那么 3×3 的混合矩阵就是一个更大的幺正混合矩阵的子矩阵, 因而不是幺正的. 最轻的中微子与顶夸克的质量相差 15 个数量级. 同一个希格斯粒子, 即要产生顶夸克那么大的质量, 又要产生中微子那么小的质量, 如此悬殊的差距让人很难相信. 有一类很受物理学家喜欢的理论, 叫“跷跷板机制”, 它假定中微子是马约拉纳粒子, 同时存在尚未发现的、跟顶夸克差不多重的重中微子, 这样中微子的微小质量可以得到很自然的解释. 如果存在重的马约拉纳中微子或者轻的惰性中微子, 有可能通过检验 PMNS 矩阵的幺正性来发现. 新中微子将带来标准模型之外新物理的线索.

中微子还存在其他的未知问题, 例如, 如何测量混合参数中与中微子振荡无关的另外两个相位角; 如何测量宇宙大爆炸背景中微子; 探测超新星中微子、超新星遗迹中微子、超高能宇宙线中微子、地球中微子等等, 它们与宇宙、天体、地球的起源与演化有关.

3 大亚湾反应堆中微子实验

3.1 实验背景

2002 年, 中微子振荡现象被众多实验证据所确立, 通过大气中微子实验和太阳中微子实验测得了两组混合角和质量平方差, 最后一个混合角θ_{13} 成为前沿热点. 之前, 1998 年法国 CHOOZ 实验[9]和 1999 年美国 Palo Verde 实验[10]发现它比另外两个混合角小得多, 只给出了上限值 $\sin^2 2\theta_{13}<0.17$.

加速器中微子实验和反应堆中微子实验都可以测量θ_{13}. 加速器实验的振荡几率与未知参数δ_{CP} 和质量顺序有关, 能够确定θ_{13} 是否非零, 但无法精确测量θ_{13}. 反应堆中微子实验可以精确测量θ_{13}, 物理干净, 但对实验精度要求很高. 1999 年 Mikaelyan 和 Sinev 提出在不同距离放置探测器, 利用远近相对测量抵消系统误差, 实现精确测量[11].

由于该测量的重要意义, 自 2003 年起, 先后有 7 个国家提出了 8 个方案, 计划用反应堆精确测量θ_{13},

包括俄罗斯 Krasnoyarsk, 法国 Double Chooz, 日本 KASKA, 美国 Braidwood 和 Diablo Canyon, 巴西 Angra, 韩国 RENO 和中国大亚湾. 大亚湾具有反应堆群功率大、邻近高山等地理优势, 是进行该实验的最佳地点, 同时实验方案上有多模块测量、探测器可移动、水池屏蔽、采用反射板等一系列独创设计, 不仅实验精度最高, 单位造价也最低. 最终有三个方案得以实施, 分别是大亚湾实验、Double Chooz 和 RENO. 由于起初普遍认为θ_{13}可能很小, 需要测量$\sin^2 2\theta_{13}$到0.01的灵敏度, 才能对中微子的未来发展起指导作用. 只有大亚湾达到了这个要求, Double Chooz 和 RENO 实验的灵敏度只有 0.02–0.03 左右.

大亚湾中微子实验自2003年开始酝酿, 2006年5月和 2007 年 1 月, 中国科学院和国家科技部先后对大亚湾实验立项, 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. 实验 2007 年 10 月破土动工, 2011 年 8 月 15 日大亚湾近点投入运行, 同年 12 月 24 日全部 3 个实验站点投入运行. 为加快实验进度, 赢得国际竞争, 计划中的 8 个探测器只安装了 6 个. 2012 年 3 月 8 日, 大亚湾实验发现新的中微子振荡模式, 精确测量了混合角θ_{13}, 在国际上引起轰动. 2012 年 10 月 19 日, 余下 2 个探测器安装完毕, 实验全部建成.

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. 2006 年成立国际合作组并不断发展壮大, 由来自中国、中国香港、中国台湾、美国、俄罗斯、捷克的 40 个研究机构、约 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. 美国投入总经费3400万美元, 研究人员约100人, 承担约一半的探测器. 其他国家和地区各有几十万至一百万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.

3.2　实验原理

与大部分反应堆中微子实验一样, 大亚湾实验采用液体闪烁体(液闪)探测器, 通过反β衰变反应来探测反应堆中微子. 液闪将粒子的电离能量转化为可见光光子, 通过光电倍增管(PMT)探测, 从而探测到粒子并确定其能量. 液闪主要成分为碳氢化合物, 既是中微子反应的靶物质, 也是粒子的探测介质. 一个反应堆中微子($\bar{\nu}_e$)与液闪中的氢核(p)反应, 生成一个正电子(e^+)和一个中子(n):

$$\bar{\nu}_e + p = e^+ + n .$$

正电子在反应发生时立即产生一个信号, 称为快信号. 中子需要在液闪中慢化成热中子, 然后在核上俘获, 释放伽马, 形成第二个信号, 称为慢信号. 快慢信号的时间符合测量能够大大降低实验本底. 中子在普通液闪的氢核上俘获释放 2.2 MeV 的单能伽马, 俘获时间约为 200 μs. 大亚湾实验采用含钆质量比为 0.1%的掺钆液闪, 84%的中子将在钆上俘获, 俘获时间降为 28 μs, 释放出总能量为 8 MeV 的几个伽马, 远离天然放射性本底能区, 进一步降低本底. 中微子的能量 $E_{\bar{\nu}_e} = E_{\text{prompt}} + \overline{E}_n + 0.78$ MeV, 其中 E_{prompt} 是正电子形成的快信号能量, 包括正电子的动能和湮灭产生的两个 0.511 MeV 的伽马能量, $\overline{E}_n$ 为中子的平均反冲动能, 非常小, 约为 10 KeV. 0.78 MeV 来自质子与中子的质量差减去一个电子的质量.

反应堆是很好的中微子源. 商用的反应堆一般是压水堆或沸水堆, 核燃料为浓缩到 2%–4.5%的铀 235, 其他成分为铀 238. 在运行过程中, 铀 238 可以俘获中子, 产生钚 239 和钚 241. 反应堆产生的能量和中微子主要由这 4 种核素裂变提供. 这 4 种核素每次裂变释放的能量都在 200 MeV 左右. 裂变产物一般为不稳定的放射性同位素, 反应堆中微子就是它们的β衰变释放的. 裂变产物非常复杂, 质量数有一个分布, 轻的碎片平均质量数为 94, 重的为 140. 根据核素的β稳定线, 这些碎片都是中子偏多的, 平均需要 6 次β衰变才能变成稳定核素, 因此每裂变会释放出 6 个中微子. 大亚湾每个反应堆的热功率为 2.9 GW, 根据每裂变释放 200 MeV 能量和 6 个中微子, 可以估计出每秒钟释放 5×10^{20} 个中微子. 它们各向同性地飞离反应堆, 流强反比于距离的平方.

反β衰变反应的阈值是 1.8 MeV. 在反应堆释放的中微子中, 只有 20%的能量大于阈值而能被探测到. 大致说来, 在 1 km 处探测器探测到的中微子数为每吨靶质量每 GW 每天 1 个事例. 由于 4 种核素释放的中微子谱不一样, 而核素的成分随着反应堆燃烧而演化, 燃料循环初期这个事例率会比末期高约 10%. 采用不同的液体闪烁体作靶, 氢原子密度不同, 事例率也会略有变化.

由于裂变反应的产物非常复杂, 理论计算的中微子能谱只能准确到10%. 法国的ILL实验用热中子辐照纯的铀235、钚239和钚241, 测量其β谱, 然后逐段拟合, 得到每种核素裂变释放的中微子能谱. 铀238则采用理论计算得到中微子谱. 核素随时间的演化可以通过堆芯模拟得到, 热功率可测量到0.5%的精度, 再加上一些小的修正, 反应堆中微子流强现在可以计算到2%–3%的精度.

反应堆中微子的存活几率为

$$p_{\rm sur}=1-\cos^4\theta_{13}\sin^2 2\theta_{12}\sin^2\Delta_{21}-\sin^2 2\theta_{13}\left(\cos^2 2\theta_{12}\sin^2\Delta_{31}+\sin^2 2\theta_{12}\sin^2\Delta_{32}\right)$$

其中

$$\Delta_{ji}=1.267\Delta m^2_{ji}\left(\mathrm{eV}^2\right)\left[L\left(\mathrm{m}\right)/E\left(\mathrm{MeV}\right)\right],$$

Δm^2_{ji}为两种中微子的质量平方差, L为中微子的飞行距离, E为中微子能量. 由于$\Delta m^2_{21}\ll\left|\Delta m^2_{32}\right|\approx\left|\Delta m^2_{31}\right|$, 短距离(~km)时振荡效应主要来自$\Delta_{3i}$项, 上式第一项只贡献很小的修正. 如果中微子发生振荡, 那么在一定距离处看到的中微子数就会比预期减少, 而且如上面的存活几率所显示的, 不同能量的中微子振荡几率不一样, 测量到的中微子能谱会发生有规律的变形. 反应堆中微子的平均能量约为4 MeV, 测量θ_{13}最灵敏的地点就是振荡极大值所在的1.8 km处.

为了对未来的中微子实验指明方向, 大亚湾实验的灵敏度设计为0.01, 即只要$\sin^2 2\theta_{13}>0.01$, 大亚湾实验就可以在90%的置信水平上测量出来. 对应的误差约为0.6%. 这在粒子物理实验中是一个非常高的精度. 如果反应堆中微子流强的计算精度为2%–3%, 实验的误差就不可能小于这个值. 我们在距反应堆很近、振荡还没有发生的地方也放置探测器, 用来监测反应堆的流强, 通过远近点的相对测量, 将这个误差抵消掉. 由于大亚湾的反应堆分得比较开, 我们设计了两个近点, 一个监测大亚湾核电站的两个堆, 另一个监测岭澳和岭澳二期核电站的4个堆. 实验的布局如图1所示.

远近相对测量不仅能消除反应堆的误差, 也能抵消大部分探测器的误差. 比如说, 大亚湾实验中作为中微子靶物质的液体闪烁体主要是用烷基苯配制成的, 而烷基苯是一种混合物, 它含的碳和氢的成分比例不能精确知道. 通过化学方法可以测量到0.5%左右. 如果我们对远近点的探测器用同样的液体闪烁体, 虽然我们不知道具体的碳氢比例, 但远近点是一样的, 如果远点高估了, 近点也会高估同样的大小, 这个误差就抵消掉了. 原则上, 只要远近点的探测器一模一样, 即使我们不知道绝对的探测效率, 也不会给θ_{13}的测量带来误差.

实际上, 不可能做出完全一样的探测器, 它们之间的差别就是探测器的相对误差. 通过模拟计算, 我们估计可以做到使它们之间的相对误差小于0.38%. 为了能过实验数据证明误差估计, 我们设计每个点放多个探测器. 其中两个近点各放两个中微子探测器(AD), 远点由于距离远, 中微子流强随距离平方变得比较小, 我们放置了4个探测器. 通过比较同一个点的两个探测器探测到的中微子事例, 就可以确定出探测器的误差到底是多少. 在获取了3个月的数

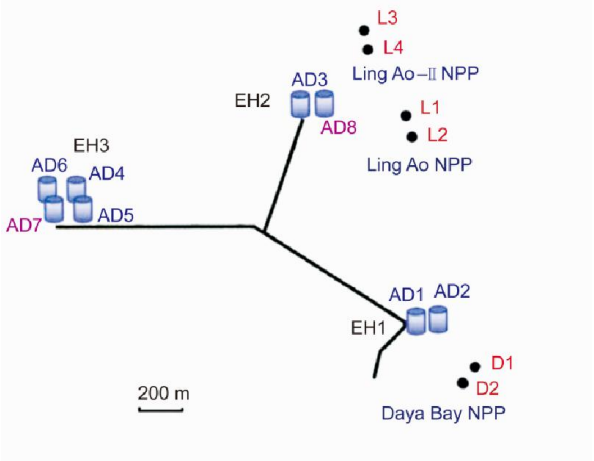

图1 (网络版彩图)大亚湾实验的布局图

6个圆点表示6个反应堆, 其中D1和D2是大亚湾核电站的两个堆, L1到L4是岭澳和岭澳二期核电站的4个堆. EH1表示1号实验厅, 距大亚湾反应堆360 m, 安装了两个中微子探测器AD1和AD2. EH2表示2号实验厅, 距岭澳和岭澳二期的反应堆平均约500 m, 安装了两个探测器AD3和AD8. EH3是远点实验厅, 距大亚湾1900 m, 距岭澳1550 m, 安装了4个探测器. 其中AD7和AD8是2012年夏天安装的

Figure 1 (Color online) Layout of the Daya Bay experiment. The 6 dots are reactor cores. D1 and D2 label the two cores of the Daya Bay Nuclear Power Plant. L1 to L4 label the four cores of the Ling Ao and Ling Ao II Nuclear Power Plants. EH1 is the Experimental Hall 1, 360 m from the Daya Bay cores, equipped with two antineutrino detectors AD1 and AD2. EH2 is the Experimental Hall 2, about 500 m from the Ling Ao and Ling Ao II cores, equipped with AD3 and AD8. EH3 is the experimental hall at the far site, about 1900 m from the Daya Bay cores and about 1550 m from the Ling Ao and Ling Ao II cores, equipped with four antineutrino detectors. AD7 and AD8 were installed in the summer of 2012.

据后, 我们确定出探测器的相对误差仅为 0.2%, 好于设计指标[12].

地面上有相当多的高能宇宙射线, 大约每平方米每秒 200 个. 这些宇宙线以及它们产生的次级粒子、长寿命同位素等会淹没稀少的中微子信号. 因此实验必须在地下进行, 依靠山来屏蔽宇宙射线. 上述 3 个实验厅都位于地下, 用水平隧道相连. EH1 和 EH2 上的岩石约有 100 m 厚, 而 EH3 则位于地下 350 m.

3.3　实验装置

大亚湾实验的每个地下实验厅内有 3 种探测器: 中微子探测器(又称中心探测器)、水切伦科夫探测器、阻性板探测器(RPC). 图 2 为 1 号实验厅(EH1)的实景图. 为了屏蔽岩石中的天然放射性, 两个圆柱形的中微子探测器浸泡在巨大的水池中, 四周至少有 2.5 m 厚的水屏蔽. 水池内安装光电倍增管, 兼做水切伦科夫探测器以探测宇宙线. 远处为用来探测宇宙线的 RPC 阵列. 完成全部安装后, 水池将用密封盖实现光密封与气密封, RPC 将通过滑轨移动至水池正上方.

中心探测器是 3 层同心圆柱结构, 如图 3 所示. 最内层是 20 吨掺钆液闪, 作为探测反应堆中微子的靶物质, 装在直径 3 m、高 3 m 的有机玻璃罐内. 中间层是 21 t 普通液闪, 装在直径 4 m、高 4 m 的有机玻璃罐内, 用来收集中微子信号泄露出内层的伽马能量, 以提高探测效率, 减小误差. 最外层是 37 t 矿物油, 装在直径 5 m、高 5 m 的不锈钢罐内, 以屏蔽来自探测器材料, 如钢罐材料、PMT 玻璃等的天然放射性本底. 在矿物油内, 192 只 8 in (1 in=2.51 cm)的光电倍增管被均匀地安装在钢罐的内桶壁, 用以探测液体闪烁体发出的光信号. 在 4 m 有机玻璃罐的上下底部安装有反射板, 提高光信号的收集效率. 整个探测器重约 110 t. 在钢罐顶部, 放置有 3 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)、伽马源(^{60}Co)和中子源(Am-C)置于探测器内, 沿 3 条垂直线进行能量刻度.

掺钆液体闪烁体是实验的核心技术. 大亚湾的普通液闪用烷基苯(一种洗涤剂原料)作为溶剂, 加上 3 g/L 的发光物质 PPO 和 15 mg/L 的波长移位剂 bis-MSB 为溶质. 烷基苯具有闪点高、基本无毒、透明性好、易于大规模获得的优点. 将无机物钆掺入有机液闪中是世界难题, 之前的 CHOOZ 实验就因为钆析出导致液闪变坏而不得不提前终止. 大亚湾实验采用异壬酸与氯化钆络合, 然后将络合物溶入普通液闪中, 得到性能优良、长期稳定的掺钆液闪[13]. 其光学衰减长度为 15 m(在 430 nm 的波长处), 是已知透明度最好的液闪. 发光效率相当于蒽晶体的 50%, 约 10000 光子/MeV. 大规模生产设备先在北京高能所完成研制与测试, 然后运至大亚湾. 液闪的生产在地下 5 号厅进行, 生产、存储设备过流部分全部采用氟塑料、有机玻璃、尼龙 3 种材料, 以防止污染.

3 m 和 4 m 有机玻璃罐也是探测器的难点之一, 侧壁厚分别为 10 和 18 mm. 为保证 8 个探测器尽量全同, 几何精度要求非常高, 例如 3 m 罐的外径设计要求为(3120±5) mm, 实际精度为±1.7 mm, 体积的误差仅为 0.17%. 为保证不损坏薄壁的有机玻璃罐, 3 种液体同步灌装, 灌装过程中液位差控制在 20 cm 以内. 灌装的液体量由科里奥利流量计测量, 关键的掺钆液闪还有专门的 20 吨灌装罐, 并安装地秤, 使靶质量的测量精度达到 0.019%[12].

采用反射板是大亚湾探测器的独创设计, 在同样的光收集效率下可减少一半 PMT 的用量, 大大降低造价, 同时也降低了探测器的机械难度. 反射膜采用反射率 98%以上的镜反射膜 ESR, 夹在两层直径 4.5 m, 厚 1 cm 的有机玻璃板中, 密封后抽真空, 光学面基本没有挡光的死材料. 表 1 列出了大亚湾与 RENO 和 Double Chooz 实验的光收集效率比较, 同等光阴极覆盖面积的情况下, 大亚湾的光电子产额为 RENO 的 1.77 倍, Double Chooz 的 2.18 倍.

由于反应堆中微子能量较低, 与天然放射性能区重合, 因此需要采用低放射性本底探测器. 大亚湾中心探测器的几十种材料和部件都需要经过放射性检测. 其中不锈钢外罐为特殊生产的低本底钢材, PMT 玻璃采用无钾玻璃, 液闪原材料氯化钆、异壬酸等

表 1　三个实验的光收集效率比较

Table 1　Comparisons of the light collection efficiencies of the Daya Bay, RENO, and Double Chooz experiments

实验	PMT	光阴极覆盖率	光电子产额 (pe/MeV)	光电子产额/覆盖率
大亚湾	192 个 8 英寸	~6%	163	1.77
RENO	354 个 10 英寸	~15%	230	1.00
Double Chooz	390 个 10 英寸	~16%	200	0.81

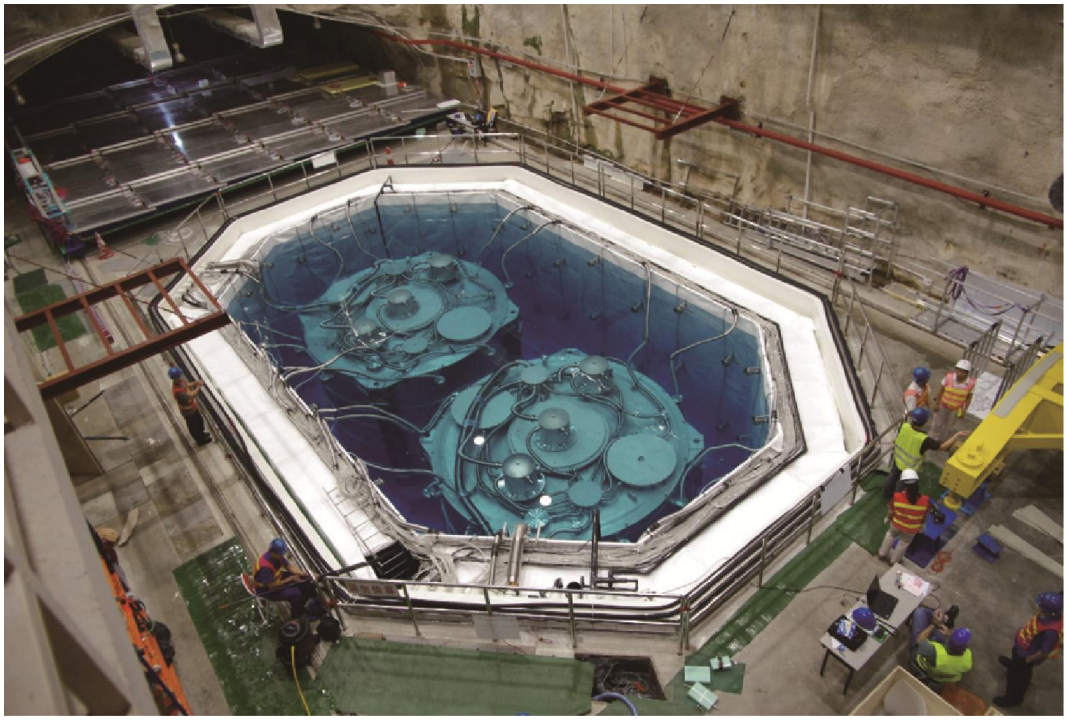

图 2 (网络版彩图)大亚湾 1 号实验厅(EH1)实景图

两个中心探测器浸泡在巨大的水池中, 水池中灌满纯净水, 远处为安装在支架上的阻性板探测器阵列

Figure 2 (Color online) A photo of the Experimental Hall 1 (EH1) of the Daya Bay experiment. Two antineutrino detectors are submerged in a water pool, which is filled with pure water. At the far end in the photo, there is the array of the Resistive Plate Chamber detectors on the supportstructure.

都经过特殊纯化, 最终探测器的本底事例率为 40 Hz (>1 MeV), 好于 100 Hz 的设计指标.

中心探测器运行时泡在巨大的水池中, 近点实验厅的水池为 16 m×10 m×10 m, 远点为 16 m×16 m×10 m, 放入中心探测器后水量分别为 1400 吨和 2170 吨. 中心探测器放置在水池内 2.5 m 高的平台上, 保证各个方向都有至少 2.5 m 厚的水屏蔽. 水屏蔽层将来自周围花岗石的天然放射性降低 1 百万倍以上, 基本消除了它的影响. 它也将宇宙线在岩石中产生的中子本底降低 30 倍. 水池用复合 Tyvek 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 PMT 来探测穿过水池的宇宙射线μ子产生的切伦科夫光, 构成双重的μ子探测器.

水池内的水由地下 4 号厅内的纯水装置生产, 分送到 3 个实验厅. 每个实验厅内有一个较简单的循环净化装置, 约 30 天循环一个体积, 水池壁为水泥墙喷涂多层 PermaFlex 涂料, 保证水的透明度. 在 Tyvek 膜基础上自行研制的复合膜在水中的反射效率大于 98%, 好于其他实验报道的结果. 水池上方有黑色密封罩, 通过拉链实现方便可靠的光密封和气密封. 密封罩内通有流动氮气, 以防止细菌污染水质. 水的各项物理化学性能都有长期监测, 所有固体溶解物小于 4×10^{-6}, 水池的水温变化控制在正负 1°C 之内. 外水池的独立探测效率为 97%, 未被探测到的主要是挂角的和衰变的 μ 子. 对中心探测器标记的宇宙线μ子, 内水池的探测效率超过了 99.8%, 远高于实验设计的 95%, 也好于所有其他实验的报道.

水池上方覆盖有另一层独立的宇宙线探测器——阻性板探测器(RPC). 阻性板探测器由两层阻性板和两块板之间的 2 cm 厚气隙层组成. 阻性板之间的高压在 RPC 的气隙层中产生很强的电场. 当带电粒子穿过 RPC 的气隙层时, 依据电场的强度, 气体中产生雪崩放大过程或者流光放大过程. RPC 的输出电信号通过放置在阻性板电极外部的读出条引出. 大亚湾的 RPC 采用了由中国科学院高能物理研究所

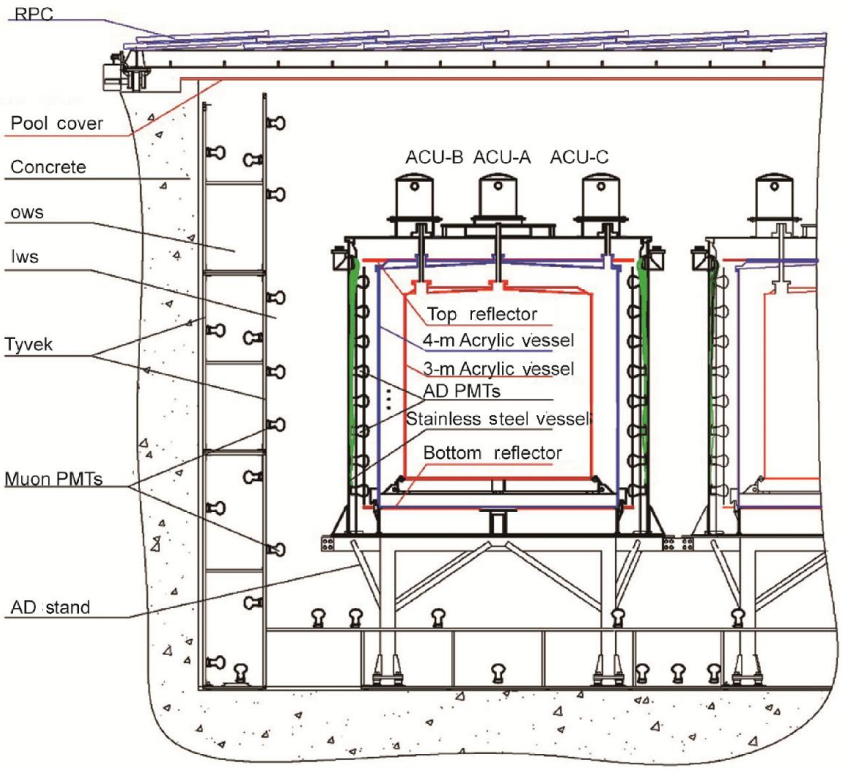

图 3　(网络版彩图)大亚湾探测器示意图

Figure 3　(Color online) Schematic diagram of the Daya Bay detectors.

(简称高能所)开发的新型酚醛树脂层压板, 工作在流光模式, 高压约为7400 V. 每个实验厅的水池顶部装有 4 层 RPC 构成的探测器模块, 每块面积 2.2 m×2.2 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. 南方地下洞室的潮湿环境对 RPC 的运行带来很大影响, 后来通过持续通干燥空气的办法解决了这一问题. RPC 模块的探测效率稳定在 90%–95%, 对探测宇宙线的径迹和研究快中子本底起到了重要作用.

大亚湾实验电子学系统包括电子学、触发、探测器监控和数据获取几个子系统. 电子学系统对各个探测器的信号实现读出并转化为数字信号, 共 8000 多道. 探测器监控系统对探测器状态、性能和实验环境进行监控, 并存入数据库. 触发系统对 3 个实验厅的 3 种共 17 个探测器进行独立的信号判选, 排除噪声信号, 通知数据获取系统对电子学信号进行读出. 触发的信号被数据获取系统组装成事例, 存入现场计算机系统, 然后通过 155 Mbps 的专用网络传输至高能所和美国伯克利国家实验室的数据中心. 高能所的大亚湾离线计算机集群包括 440 CPU 核和 750 TB 磁盘.

自 2011 年以来, 大亚湾实验装置一直平稳高效运行, 物理取数效率达到 94%以上.

3.4　科学成果及展望

测量θ_{13}意义重大, 除了 3 个反应堆实验外, 还有两个加速器实验: 日本 T2K 和美国 MINOS 正在进行. 2011 年 6 月, 日本的加速器实验 T2K 发表结果, 观测到了 6 个电子中微子事例, 预期本底为 1.5 个, θ_{13}不为零的置信度为 2.5 倍标准偏差[14]. 粒子物理中一般 3 倍标准偏差以下的结果称为“迹象”, 3 倍以上称为“证据”, 5 倍以上可确定为“发现”. 由于日本大地震震坏了他们的加速器, 短期内无法得到更确定的结果. 紧接着 Double Chooz 和 MINOS 也给出了 1.7 倍标准偏差的结果.

为了加快实验进度, 赢得国际竞争, 大亚湾实验的第一阶段并没有安装完成全部的 8 个中微子探测器, 而只装了 6 个, 岭澳近点和远点各少装了一个. 由于大亚湾实验设计精度很高, 如果θ_{13}较大的话, 不需要全部探测器也能测得很准. 大亚湾实验的近点实验厅 EH1 于 2011 年 8 月 15 日开始运行. 通过 AD1 和 AD2 的实验数据, 进行了大量的本底和误差的研究, 基本上确定了分析方法[12]. EH2 于 11 月 5 日开始运行, EH3 于 12 月 24 日开始运行, 开始 3 个点同时测量, 获取有意义的物理数据.

大亚湾近点 EH1 每个中微子探测器每天测得约 700 个中微子, EH2 约 600 个, EH3 每个探测器约 70 个. 3 个点每天获取的数据量约为 200 GB. 其中中微子事例只占极少的部分, 大部分是天然放射性和宇宙线带来的本底. 例如, 对近点的一个探测器, 宇宙线事例是 21 Hz, 天然放射性是 280 Hz, 而中微子事例只有 0.01 Hz. 为了将这些中微子事例挑出来, 首先要做宇宙线反符合, 就是由宇宙线探测器标记的每个宇宙线事例后面 200 μs 甚至 1 s 的时间内, 中微子探测器测到的事例都去除, 这样可以把宇宙线带来的本底基本上去除干净. 然后需要做一个快慢符合测量, 要求一个信号后面 600 μs 内必须有一个 6–12 MeV 的慢信号成对出现. 加上其他一些辅助的挑选条件, 就可以干净地挑出中微子事例, 本底只占百分之几. 中微子事例的挑选效率为 64%(近点)到 76%(远点), 丢失的事例主要是因为中子在氢上俘获、宇宙线反符合、以及中子能量判选. 挑选效率的相对误差(即不同探测器的差别)仅为 0.2%. 由于大亚湾实验多模块的特殊设计, 通过同一站点的 AD1 与 AD2 的比较, 不仅可以可靠地估计探测器系统误差, 而且可以通过两个 AD 探测到的中微子事例率进行直接检验, 很大程度上提高了实验的可靠性. 在本底中, 大部分是可以精确确定数量的偶然符合本底, 经过仔细研究, 不确定性较大的其他本底共有 4 种, 为宇宙线产生的长寿命同位素 ^{8}He/^{9}Li、宇宙线产生的快中子本底、自动刻度装置中的中子源产生的关联本底、α-n 反应产生的快中子本底, 总共只占信号的 0.5%左右.

2012 年 3 月 8 日, 大亚湾实验发表结果, 以 5.2 倍标准偏差发现了θ_{13}不为零, 而且出人意料地大. 分析了 55 天的数据后, 远点的 3 个探测器共观测到约 1 万个中微子. 通过远近点比较, 我们发现远点的中微子数丢失了 6%, 统计误差为 1.1%, 系统误差仅为 0.4%. 这个比值换算成混合角, 通过更精确的χ^2分析, 得到$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.017$ [1].

图 4 显示了 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. 曲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 km, 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. 小图中的χ^2分析表明θ_{13}不为零的置信度为 5.2 倍标准偏差.

大亚湾发现出人意料大的中微子振荡, 对国际中微子研究产生了巨大的影响. 大的θ_{13}意味着中微子质量顺序、CP 破坏相角的效应比较容易观测到, 现有实验技术就可以进行测量. 我们可以重新思考中微子研究的路线图, 在未来的几年或十几年中, 中微子振荡研究将会取得丰硕的成果.

2012 年底大亚湾实验用 2.5 倍的统计量更新了θ_{13}测量结果, 使θ_{13}不为零的置信度达到 7.7 倍标准

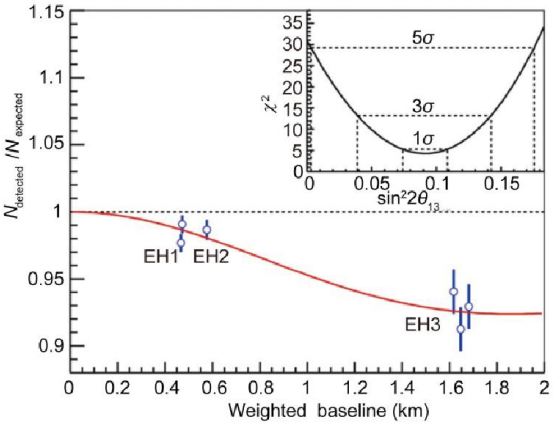

图 4 (网络版彩图)大亚湾 6 个探测器测得的事例率与无振荡预期事例率的比值. 纵坐标为 1 的虚线表示没有振荡, 实线表示 $\sin^2 2\theta_{13}$=0.092 时的振荡曲线

Figure 4 (Color online) Ratio of measured versus expected signal in each of the six detectors of Daya Bay, assuming no oscillation. The black dashed line shows the expected ratio without oscillation and the solid line shows the oscillation survival probability at the best-fit value $\sin^2 2\theta_{13}$=0.092.

偏差[15]. 2013 年采用能谱分析和更大的统计量, 置信度超过 10 倍标准偏差, 而且首次测量了相关的质量平方差[16]

$$\begin{aligned}\Delta m^2_{ee} &= \cos^2 2\theta_{12}\sin^2\Delta_{31}+\sin^2 2\theta_{12}\sin^2\Delta_{32}\\ &= 2.59^{+0.19}_{-0.20}\times 10^{-3}\,\mathrm{eV}^2.\end{aligned}$$

Δm^2_{ee} 与加速器实验 MINOS 测量的 $\Delta m^2_{\mu\mu}$ 是 Δm^2_{32} 和 Δm^2_{31} 的不同线性组合, 应该相差大约+1%或−1%, 取决于中微子质量顺序. 假如两者都可以精确测量到好于 1%的精度, 就可以确定中微子质量顺序. 不过现有实验的精度无法达到这个要求.

大亚湾实验将至少运行到 2017 年, 对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量精度将达到 3%–4%. 在未来的几十年内, 这将是对这一基本参数最精确的测量. 对 Δm^2_{ee} 的测量精度也将达到 3%–4%, 超过目前加速器实验对 $\Delta m^2_{\mu\mu}$ 的测量.

大亚湾实验将对反应堆中微子能谱进行测量. 最近, 改进后的理论模型预言的事例率与测量数据出现了一定偏差, 称为"反应堆中微子反常"[17], 被当成支持惰性中微子存在的一个依据. 现有反应堆中微子能谱是根据测量的β谱数据, 假定 30 条虚拟的β衰变谱反解得到, 因此存在较大的模型依赖. 模型预言的事例率的误差被估计为 2%–3%, 但模型的反解过程只采用了虚拟的允许跃迁谱形, 未考虑禁戒跃迁, 有人认为该误差被严重低估. 最近已发现测得的能谱相对于理论模型在 4–5 MeV 处有一个"鼓包", 超过预期值 10%以上, 远大于 2%–3%误差. 很可能这预示着禁戒跃迁有较大贡献, 原来能谱模型误差很大. 大亚湾实验两个近点将积累世界上最大的中微子样本, 可以实现对中微子谱的精确测量, 预期可以将它的误差确定到 1%左右, 好于现有理论模型, 对未来的反应堆中微子实验(如江门中微子实验)和反应堆增殖监测等具有重要意义.

4　江门中微子实验

4.1　物理目标

测量质量顺序在大亚湾测得 θ_{13} 后成为中微子研究的下一个热点. 利用反应堆中微子振荡中的干涉效应可以测量质量顺序, 其最佳基线(即反应堆到探测器的距离)约为 60 km, 需要很大的探测器和极佳的能量分辨率, 从精确的能谱测量中确定这种干涉效应. 2008 年高能所就提出了进行该实验的设想, 称为大亚湾二期实验. 发现 θ_{13} 很大后, 实验难度大大降低, 这项工作得以迅速提上日程. 该实验要求探测器到各个反应堆的距离相等, 否则干涉效应将相互抵消. 由于大亚湾附近规划的反应堆布局不利于测量, 2012 年确定在广东省江门的开平市建立实验站, 位于距阳江核电站和台山核电站 53 km 处. 实验将建设一个有效质量为 2 万吨的液体闪烁体探测器, 位于地下 700 m, 能量精度为 3%. 预期 6 年数据可以通过干涉效应将质量顺序确定到 3 倍标准偏差的置信水平. 如果考虑到加速器中微子实验对 $\Delta m^2{}_{\mu\mu}$ 的测量精度届时可以达到 1%左右, 通过绝对测量可以提高置信度至 4 倍标准偏差[18].

江门中微子实验可以通过研究反应堆中微子振荡, 同时精确测量 $\sin^2 2\theta_{12}$ 和 2 个质量平方差参数到好于 1%的精度. 如前所述, 精确测量混合参数将使检验混合矩阵的幺正性成为可能. 假如存在重的马约拉纳中微子, 幺正性的破缺有可能在 1%的尺度上显现出来.

超新星对宇宙学和天体演化具有极为重要的意义. 超新星爆发时, 99%的能量被中微子带走, 而且只有中微子才能从超新星内部逃逸出来. 到目前为止, 人们总共探测到 20 多个超新星中微子事例, 来自 1987A 的爆发. 对一个类似的超新星, 江门中微子探测器将可以探测到 5000 个中微子. 计划中的日本 Hyper-K 可以探测到更多的中微子, 但江门实验采用液体闪烁体, 可以通过碳核的非弹性过程确定中微子的味, 这对判别目前几种主流的超新星理论模型至关重要. 也可以利用超新星中微子进行绝对质量测量、混合参数测量等研究.

地球中含有铀 238 和钍 232, 它们产生的地热可能是驱动地球演化的主要因素. 它们衰变产生的中微子称为地球中微子. 不同的地球演化模型预言了不同的铀钍含量, 通过探测地球中微子, 可以获得其他手段无法达到的地球深处的信息. 日本 KamLAND 实验首次探测到了地球中微子[19], 最新结果确定其事例率为(30.3±7.1) TNU (TNU 为地球中微子单位, 相当于 1 千吨探测器每年测到 1 个地球中微子), 意大利 BOREXINO 也进行了测量, 为(38.8±12.2) TNU, 但

它们事例数太少, 精度不高. 江门中微子探测器比它们大 20–40 倍, 能够更准确地探测地球中微子, 有可能达到判别地球演化模型所需的 3 TNU 的精度.

高统计量、低能量的太阳中微子将能用来研究标准太阳模型中的金属性疑难、测量太阳中微子随能量从物质效应振荡到真空振荡的变迁、研究对新物理敏感的 pep 太阳中微子等. 通过采用强放射源置于探测器内部, 如果存在惰性中微子, 江门中微子探测器可以观测到完整的振荡图象, 从而干净地确认或排除轻的惰性中微子. 对大气中微子的探测对质量顺序和θ_{23} 的八重度有一定的测量能力. 此外, 还将进行暗物质、质子衰变等一系列新物理寻找.

总之, 江门中微子实验高性能、大质量的探测器将具有非常丰富的物理目标, 对当前中微子的多个未知问题进行国际领先水平的研究.

4.2 国际态势

测量质量顺序是江门实验的主要物理目标. 这是当前中微子振荡研究的前沿热点, 国际竞争非常激烈. 我们曾经认为θ_{13} 很小, 质量顺序、CP 破坏相角等未知参数用现有技术可能难以测量. 因此, 十几年前人们就开始研制中微子工厂、贝塔束流等新技术以应付θ_{13} 很小的情况. 大亚湾实验发现θ_{13} 远大于预期, 因此用现有的技术就进行质量顺序和 CP 破坏的研究. 国际上共提出了 8 个实验方案以测量质量顺序, 包括中国的 JUNO、美国的 LBNE、美国在南极洲的 PINGU、日本的超超级神冈(Hyper-K)、欧洲的 LBNO、韩国的 RENO-50、印度的 INO、以及即将建成的美国 NOvA. 其中 JUNO, LBNE, PINGU, Hyper-K 的竞争力较强.

LBNE 将在南达科它州的 Homestake 建立 1 万吨的液氩探测器, 探测 1300 km 外费米实验室产生的加速器中微子束流, 通过中微子穿过地球时的物质效应来确定质量顺序, 预期 2022 年建成, 但进度与方案有较大不确定性. 长基线加速器中微子实验对质量顺序的灵敏度严重依赖于 CP 破坏的大小. 对 CP 破坏较大的一半参数空间, LBNE 在 10 年内可将质量顺序确定到 5 倍标准偏差. 对另一半参数空间则为 2–5 倍标准偏差. 同样利用费米实验室的加速器产生中微子的还有即将建成的 NOvA 实验, 它在 730 km 外的明尼苏达州建立 5 万吨的塑料闪烁体探测器, 有 1/4 的几率(参数空间)将质量顺序测量到 3 倍标准偏差.

大气中微子也可以用来确定质量顺序. 南极州的“冰立方”实验可以探测到大气中微子, 体积为 1 km^3, 即 10 亿吨, 但能量阈值太高, 不能探测对质量顺序最灵敏的 7 GeV 左右的缪中微子. 因此, 美国计划在“冰立方”的中心重新建一个光电倍增管更密集, 能探测到更多光子, 因而能量阈值更低的实验, 叫 PINGU, 其有效质量(100–1000)万吨. 3 年的数据量可以测量质量顺序到 3 倍标准偏差以上. 实验的主要难点在于能否精确地将光电倍增管部署到冰下的预期位置, 以及能否精确理解光子在冰层中的传播过程. PINGU 实验尚未批准. 如果这些问题能解决, 有可能成为测量质量顺序最快的实验.

继超级神冈之后, 日本计划在原址旁新建超超级神冈(Hyper-K), 质量从 5 万吨提升到 100 万吨. Hyper-K 将探测来自 295 km 外日本散射中微子源(J-Parc)的中微子束流, 主要目标是测量 CP 破坏. 由于 295 km 的距离较短, 地球物质效应不够显著, 运行 6–10 年后也只对不到 1/4 的参数空间能将质量顺序测量到 3 倍标准偏差以上. Hyper-K 也能探测大气中微子和超新星中微子. 利用大气中微子对质量顺序的灵敏度更好, 6–10 年的数据, 对大部分参数空间都能测量到 3 倍标准偏差以上.

在这些实验中, JUNO, LBNE, NOvA, INO 已获批准, PINGU, Hyper-K 有较大的可能被批准. 这些实验涵盖了反应堆中微子、加速器中微子和大气中微子三种源, 采用了不同的探测器技术. 加速器实验用缪中微子束流, 探测电子中微子的出现几率, 灵敏度依赖于 CP 破坏相角. 大气中微子探测缪中微子的消失几率, 灵敏度依赖于θ_{23} 的八重度. 反应堆中微子实验则与 CP 破坏相角和θ_{23} 的八重度无关, 但对能量精度要求很高. 预期到 2025 年左右, 我们能够通过不同的手段基本上确定中微子的质量顺序.

江门中微子实验自 2008 提出设想, 2013 年得以正式立项, 预期 2020 年建成运行, 6 年后可将质量顺序确定到 3–4 倍标准偏差. 除了质量顺序外, 江门实验在精确测量混合参数、研究地球中微子上具有独一无二的优势, 在超新星中微子、太阳中微子和惰性中微子上也具有自己的特点和优势.

4.3 实验设计及进展

江门中微子实验站位于广东省江门市开平市, 距

广东阳江和台山反应堆群约 53 km. 阳江核电站共规划 6 个反应堆, 1 个已投入商业运行, 5 个在建, 总热功率为 17.4 GW. 台山核电站共规划 4 个反应堆, 2 个在建, 总热功率 18.4 GW. 由于中微子与物质的相互作用截面非常小, 难于探测. 探测到的中微子数正比于反应堆的总热功率和探测器的有效质量. 阳江与台山核电站有效的反应堆群功率世界第一, 江门中微子实验的 2 万吨探测器每天也只能探测到约 60 个反应堆中微子.

由于中微子事例稀少, 相对而言, 宇宙线本底的影响将非常严重. 因此必须将探测器置于比较深的地下, 通过顶上的岩石覆盖阻挡宇宙线. 江门中微子实验的探测器设计为位于地下 700 m. 通过初步的模拟计算, 宇宙线流强为 0.003 Hz/m^2, 比地表降低了 5 万倍. 初步的分析表明可以将本底控制在合理的范围内, 对实验灵敏度影响较小. 实验站选址处的山高约 300 m, 进入隧道初步设计方案为竖井加斜井方案.

江门中微子实验站与上述各核电站的地理位置如图 5 示. 中微子事例数反比于探测器与反应堆距离的平方, 大亚湾核电站及可能的陆丰或惠州核电站距江门中微子实验站距离为 200 多公里, 因此探测器中来自这两个反应堆群的中微子只占百分之几, 对实验的干扰很小.

江门中微子实验站的探测器有效质量为 2 万吨液体闪烁体. 其设计原理与核心技术与大亚湾中微子实验类似, 但技术要求和难度要大得多. 探测器的初步设计方案如图 6 所示. 球形的中微子探测器中心为 2 万吨液体闪烁体, 由直径为 35.4 m 的有机玻璃容器隔开. 由于探测器巨大, 液体闪烁体的透明度是关键的因素, 因此计划采用不掺杂的普通液体闪烁体, 配方同大亚湾实验. 外层为白油屏蔽层, 厚 1.5 m, 盛于直径为 39 m 的不锈钢罐内. 15000 个 50 cm 直径的光电倍增管安装在白油屏蔽层内. 由于机械难度大, 现在有几种不同的探测器设计方案在考虑中. 中微子探测器置于水池中心, 上下与四周均被 2 m 以上的水包围以屏蔽本底. 在水池顶部采用径迹探测器作为反符合探测器; 水池的内壁上安放光电倍增管以探测宇宙线.

江门中微子实验已完成地质详勘和地下实验室方案设计, 各项研发正在进行中.

5　其他中微子实验研究

5.1　无中微子双贝塔衰变

无中微子双贝塔实验是一类极为重要的中微子实验. 如果发现了这种现象, 则说明中微子与其他费

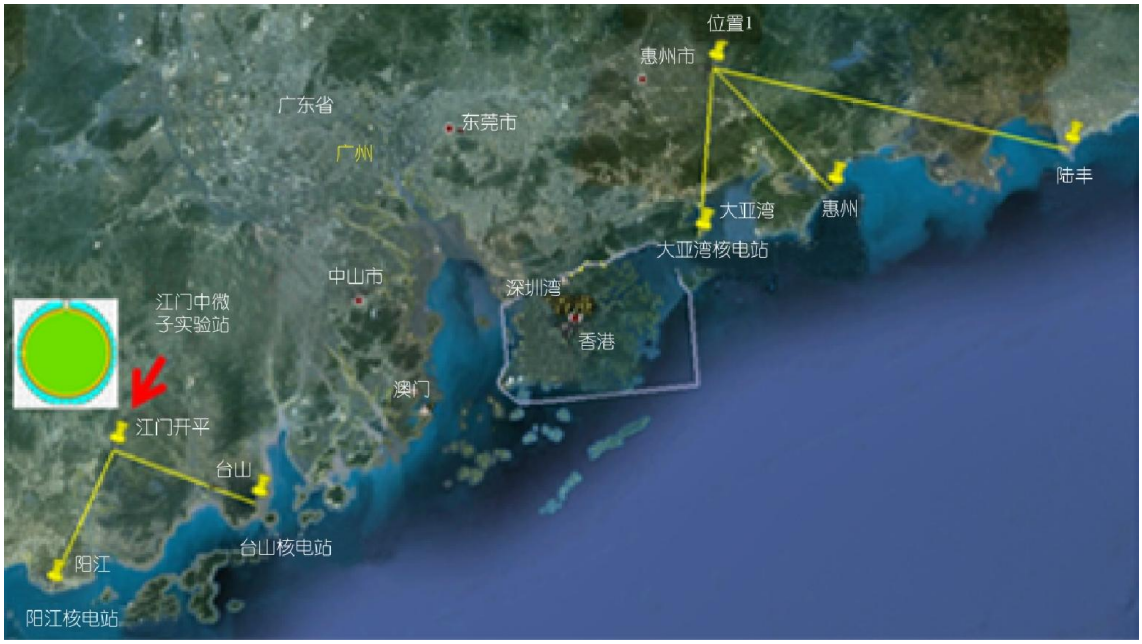

图 5　(网络版彩图)江门中微子实验站地理位置示意图

Figure 5　(Color online) Schematic location of the Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO).

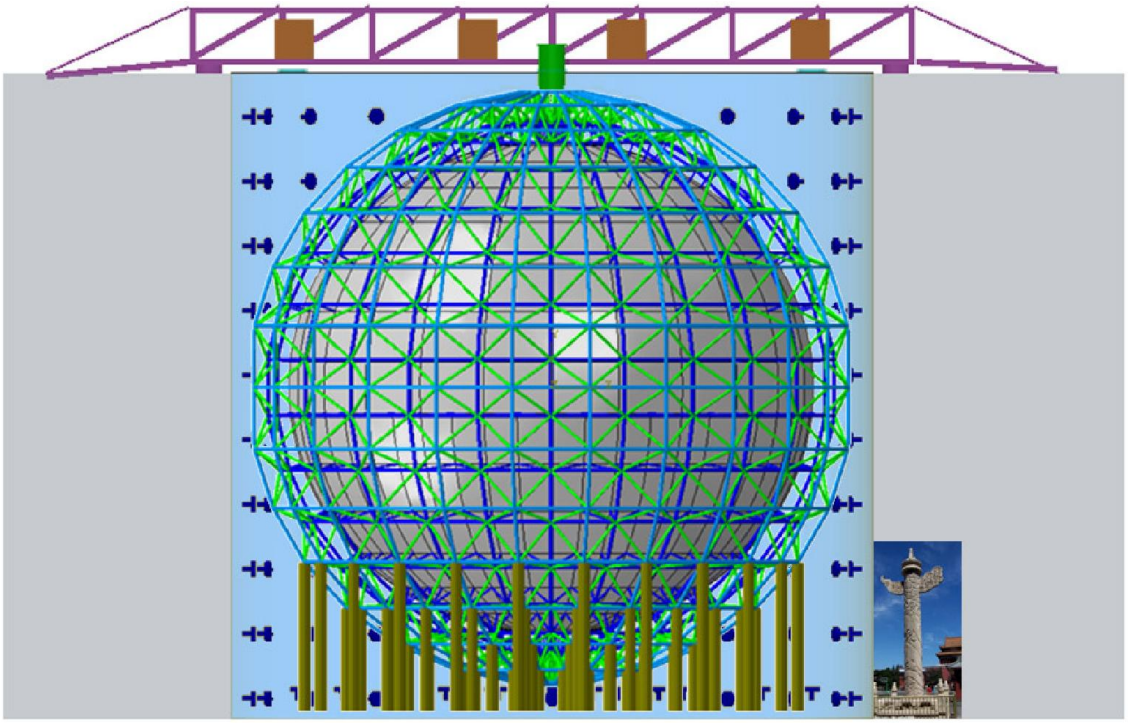

图 6 (网络版彩图)江门中微子实验探测器示意图

Figure 6 (Color online) Schematic diagram of the JUNO detectors.

米子都不同, 是马约拉纳粒子. 现在有十多个实验, 利用不同的探测技术和不同的同位素进行研究, 例如 Gerda, CUORE, NEMO 等等. 这类实验对技术的要求非常高, 需要长期积累, 国内没有相关研究, 因此我们通过国际合作参加了美国 EXO 实验. EXO 是其中竞争力最强的实验之一. 它利用液氙(^{136}Xe)同时作为双贝塔衰变核素和探测介质, 在极低本底、实验规模化上有较大优势. 目前 EXO 实验采用 200 kg 液氙, 计划升级为 nEXO, 靶质量为 5 吨, 并继续提高探测器性能. 特别是有可能实现独有的 Ba 离子标记技术, 原则上可排除所有其他核素产生本底.

5.2 加速器中微子前期研究

中微子的CP破坏与宇宙中正反物质不对称直接相关. 测量 CP 破坏最直接的方法是比较正、反中微子振荡的差别. 只有加速器中微子实验比较容易做到这一点. 通过改变质子打靶后的聚焦磁场方向, 可以选择性地聚焦正粒子还是反粒子, 从而产生正中微子或反中微子束流. 从探测器测得它们振荡几率的差别, 就可以测得 CP 破坏相角. LBNE 和 Hyper-K 实验可以测量 CP 破坏. 如果 CP 破坏相角为 0 度或 180 度, 则 CP 破坏效应为零, 90 度和 270 度处最大. 到 2032 年, 通过 10 年的测量, 例如 3 年正中微子, 7 年反中微子, LBNE 对 1/4 的参数空间可测量 CP 破坏到 3 倍标准偏差以上, 而 Hyper-K 则有 3/4 的参数空间.

如果 LBNE 与 Hyper-K 未能测到 CP 破坏, 将来需要更强大的“中微子工厂”来进行研究, 而中微子工厂所需要的缪子冷却、再加速技术非常困难. 最近我们提出了一种崭新的加速器中微子产生方法, 初步设计了一个中微子束流线 MOMENT[20]. 该方法介于传统束流与中微子工厂之间, 采用质子打靶产生π介子, 通过超导磁铁收集几乎全部的π介子, 将衰变产生的缪子输运至衰变管道中, 缪子在超导螺旋管中衰变同时产生两种中微子. 该方案回避了中微子工厂中难以实现的缪子冷却技术, 又克服了常规束流中 K 介子衰变带来的束流本底, 采用较低能量的中微子也可避免探测器中的π^0 本底, 因此有可能有独到的优势. 目前正在进行优化研究, 有可能替代中微子工厂.

参考文献

1 An F P, Bai J Z, Balantekin A B, et al. [Daya Bay collaboration] Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay. Phys Rev Lett, 2012, 108: 171803

2 Cho A. Crash project opens a door in neutrino physics. Science, 2012, 338: 1527

3 Zhan L, Wang Y F, Cao J, et al. Determination of the neutrino mass hierarchy at an intermediate baseline. Phys Rev D, 2008, 78: 111103

4 Zhan L, Wang Y F, Cao J, et al. Experimental requirements to determine the neutrino mass hierarchy using reactor neutrinos. Phys Rev D, 2009, 79: 073007

5 Capozzi F, Fogli G L, Lisi E, et al. Status of three-neutrino oscillation parameters. arXiv: 1312.2878

6 Battye R, Moss A. Evidence for massive neutrinos from CMB and lensing observations. Phys Rev Lett, 2014, 112: 051303

7 Athanassopoulos C, Auerbach L B, Bauer D, et al. Candidate events in a search for anti-muon-neutrino ---> anti-electron-neutrino oscillations. Phys Rev Lett, 1995, 75: 2650–2653

8 Aguilar-Arevalo A A, Bazarko A O, Brice S J, et al. [MiniBooNE Collaboration] Search for electron neutrino appearance at the Delta m**2~1 eV**2 scale. Phys Rev Lett, 2007, 98: 231801

9 Apollonio I, Baldini A, Bemporad C, et al. Limits on neutrino oscillations from the CHOOZ experiment. Phys Lett B, 1999, 466: 415–430

10 Boehm F, Busenitz J, Cook B, et al. Search for neutrino oscillations at the Palo Verde nuclear reactors. Phys Rev Lett, 2000, 84: 3764–3767

11 Mikaelyan L, Sinev V. Neutrino oscillations at reactors: What next? Phys Atom Nucl, 2000, 63: 1002–1006

12 An F P, An Q, Bai J Z, et al. A side-by-side comparison of Daya Bay antineutrino detectors. Nucl Instr Meth A, 2012, 685: 78–97

13 Ding Y Y, Zhang Z Y, Liu J C, et al. A new gadolinium-loaded liquid scintillator for reactor neutrino detection. Nucl Instrum Meth A, 2008, 584: 238–24

14 Abe K, Abgrall N, Ajima Y, et al. Indication of electron neutrino appearance from an accelerator-produced off-axis muon neutrino beam. Phys Rev Lett, 2011, 107: 041801

15 An F P, An Q, Bai J Z, et al. [Daya Bay collaboration] Improved measurement of electron antineutrino disappearance at Daya Bay. Chin Phys C, 2013, 37: 011001

16 An F P, Balantekin A B, Band H R, et al. [Daya Bay collaboration] Spectral measurement of electron antineutrino oscillation amplitude and frequency at Daya Bay. Phys Rev Lett, 2014, 112: 061801

17 Mention G, Fechner M, Lasserre T, et al. The reactor antineutrino anomaly. Phys Rev D, 2011, 83: 073006

18 Li Y F, Cao J, Wang Y F, et al. Unambiguous determination of the neutrino mass hierarchy using reactor neutrinos. Phys Rev D, 2013, 88: 013008

19 Araki T, Enomoto S, Furuno K, et al. Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND. Nature, 2005, 436: 499–503

20 Cao J, He M, Hou Z L, et al. Moment: A muon-decay medium-baseline neutrino beam facility. arXiv: 1401.8125

Daya Bay and Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO) neutrino experiments

CAO Jun*

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Neutrino Physics is one of the most active branches in particle physics. Many puzzles remain in neutrinos, which may lead to new physics beyond the Standard Model of particle physics. We summarize the status and major scientific problems in neutrino physics, and introduce the neutrino program in China, with details on the on-going Daya Bay Neutrino Experiment and the being-built Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO). Daya Bay discovered a new type of neutrino oscillation in 2012 and measured the corresponding neutrino mixing angle θ_{13}, by detecting reactor neutrinos. In this paper, we introduce the physics background and the project background of Daya Bay, summarize the experimental method and design principles, and describe the detector design and construction. Many new ideas and technical innovations have been implemented in the detector design and construction, thus a 0.2% relative uncertainty from detector is achieved. In the next decades, the Daya Bay results will be the most precise measurement on this fundamental parameter. JUNO was proposed in 2008 and formally approved in 2013. It will determine the neutrino mass hierarchy and precisely measure three neutrino mixing parameters by detecting reactor neutrinos at a distance of 53 km. With a 20 kton liquid scintillator detector of 3% energy resolution, JUNO will also be promising in studying supernovae neutrino, solar neutrino, geo-neutrino, atmospheric neutrino, as well as other exotic searches. It will be a multiple-purpose experimental platform for many world-leading researches. We introduce the progress on the experiment design and detector R&D. Besides Daya Bay and JUNO, we extend the neutrino studies by joining the neutrinoless double beta decay experiment EXO, and by starting R&D of MOMENT, a new idea to produce accelerator neutrino beam.

neutrino, neutrino oscillation, neutrino mixing, reactor, Daya Bay

PACS: 14.60.Pq, 29.40.Mc, 28.50.Hw, 13.15.+g

doi: 10.1360/SSPMA2014-00174