

大亚湾反应堆中微子实验的历史考察

籍兆源, 王 聪, 王大洲[✉]

(中国科学院大学 人文学院, 北京 100049)

摘要: 大亚湾反应堆中微子实验是我国中微子研究领域的大科学项目, 是迄今我国地方政府和企业有实质性参与的首个重大基础研究项目, 也是我国基础研究领域迄今最大的国际合作项目, 旨在探究中微子振荡模式, 测量相关参数。本文基于历史学研究方法, 依据项目工程档案和访谈资料, 参考相关学术论文、书籍和新闻报道等, 对大亚湾中微子实验进行了工程史考察, 力图还原项目从立项、设计、建设到精确测量中微子混合角 θ_{13} 的历史过程, 并据此总结了若干成功经验。

关键词: 大科学工程; 中微子; 大亚湾中微子实验; 工程史

中图分类号: N09

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2021)03-0287-11

引言

大亚湾反应堆中微子实验(以下简称大亚湾实验)是我国中微子研究领域的第一个大科学工程, 由科技部、国家自然科学基金委员会、中国科学院、广东省政府、深圳市政府、中国广东核电集团等部门共同支持, 还有来自美国、俄罗斯、捷克等的经费支撑和众多科学家的参与。^[1]大亚湾实验旨在探究中微子振荡模式, 测量相关参数。大亚湾实验提出于2003年, 2006年立项, 2007年10月动工, 2011年12月下旬正式开展试验工作, 2012年3月发现新的中微子振荡模式, 并精确测量中微子混合角 θ_{13} 。

对于这项重要的大科学工程, 已有研究主要关注其在科学上的重要成就, 鲜少关注其作为“工程”的历史进程。已有涉及其历史进程的文献, 也主要表现为科普性论述, 缺少对这项大科学工

程发展历程的系统性梳理和分析。王贻芳在《大亚湾反应堆中微子实验》一文中介绍了大亚湾实验的科学意义、实验布局和工程建设, 认为大亚湾实验对中微子物理的未来发展具有重要的指导意义。^[2]他还发表了《大亚湾中微子实验——小中见大》一文, 简要回顾了大亚湾实验的建设过程, 认为大亚湾实验加强了我国高能物理领域的国际影响力, 培养了新的科研中坚力量。^[3]曹俊在《大亚湾与江门中微子实验》中简要介绍了大亚湾和江门中微子实验设计和研发的进展。^[4]作为大亚湾实验的主要设计者和组织者, 王贻芳和曹俊的文章从科学角度呈现了大亚湾实验的基本面貌和历史性成就。丘成桐等人编写的《从万里长城到巨型对撞机: 中国探索宇宙最深层奥秘的前景》用一小节篇幅, 通过大量引用国内外相关专家的评论, 介绍了大亚湾实验的结果与意义, 同时展望了江门中微子实验的未来。^[5]王

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-02-01

基金项目: 中科院自然科学史研究所共和国科技史纲(Y621081)

作者简介: 籍兆源(1989-), 女, 博士研究生, 研究方向为工程哲学与工程史。E-mail: jizhaoyuan15@mails.ucas.ac.cn

王聪(1985-), 女, 博士, 硕导, 研究方向为科学与社会。E-mail: wangcong@ucas.ac.cn

[✉]王大洲(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为工程哲学与工程史。E-mail: dzwang@ucas.ac.cn (通讯作者)

贻芳等人编写的科普著作《探索宇宙“隐形人”——大亚湾实验》主要面向社会公众介绍了中微子物理的历史和未来以及大亚湾实验的来源、实施背景、总体情况与成就。^[6]这两本书虽然是面向公众的科普读物,但具有一定的史料价值。除此之外,还有不少关于大亚湾实验历史性成就的新闻报道,具体包括对其项目管理和进展^[7]的报道,以及对其成果^[8]、重要技术突破^[9]和工程团队^[10]的报道。本文基于历史学研究方法,依据项目工程档案和访谈记录等一手资料,参考学术论文、书籍和新闻报道等,对大亚湾中微子的建设进行工程史考察,力图还原项目从立项、建设到运行的过程,并据此总结建设经验,引出若干启示。

1 大亚湾中微子实验的立项

1.1 立项背景

中微子是一种基本粒子,质量很小,极难被探测到,号称宇宙间的“隐身人”。作为宇宙大爆炸时期产生的“幽灵物种”,中微子仅次于光子,数量多于所有其他形式的物质。^[11]中微子在宇宙起源及演化中扮演着极为重要的角色,关系到粒子物理等领域的基本问题。

中微子最初由奥地利物理学家泡利(Wolfgang E Pauli)于1930年从理论上加以预见。1956年,柯温(C L Cowan)和莱因斯(Frederick Reines)首次验证了中微子的存在,后者还由此获得1995年度诺贝尔物理学奖。从中微子被发现开始,对它的实验研究一直没有停歇。1962年,美国哥伦比亚大学的莱德曼(Leon M Lederman)、施瓦茨(Melvin Schwartz)和施泰因贝格(Jack Steinberger)等人发现了 μ 子中微子,并共同获得1988年度诺贝尔物理学奖。1968年,美国戴维斯(Ramond Davis)发现太阳中微子失踪。1987年,小柴昌俊领导的日本神冈实验室(Kamiokande)和美国IMB(Irvine-Michigan-Brookhaven)实验发现了超新星中微子。戴维斯和小柴昌俊因为各自的成果分享了2002年诺贝尔物理学奖。1998

年,日本超级神冈实验组(Super-Kamiokande)发现了中微子振荡现象,这个现象解释了太阳中微子失踪之谜,也解释了大气中微子的反常现象。2000年,美国费米实验室(Fermi National Accelerator Laboratory)的DONUT实验组发现了最后一种中微子—— τ 中微子。^{[6]15-23}至此,三种类型的中微子——电子中微子、 μ 中微子、 τ 中微子,都被成功观测。2001年,加拿大萨德伯里中微子观测站(Sudbury Neutrino Observatory,简称SNO实验)证实了失踪的太阳中微子变成了其他中微子。日本超级神冈实验组的主要领导者之一梶田隆章和加拿大SNO实验的领导者麦克唐纳分享了2015年度的诺贝尔物理学奖。

在中微子振荡现象被发现后,物理学家试图通过测量中微子振荡获得其相关质量的数据。既然自然界存在三种类型的中微子,那么根据两两组合推断,中微子振荡——三种中微子在接近光速飞行中的互相转换——就应该有三种模式。^[12]其中,被称作“太阳中微子之谜”(用混合角 θ_{12} 刻画)和“大气中微子之谜”(用混合角 θ_{23} 刻画)的两种振荡模式已经被发现和证实,但第三种振荡模式(用混合角 θ_{13} 刻画)则一直是未解之谜。^{[6]33}因此, θ_{13} 的测量就成了中微子物理学关注的焦点。

2000年以前,对 θ_{13} 进行测量的主要有美国的Palo Verde和法国的Chooz这两个中微子实验组,它们都是依靠能够产生大量中微子的核反应堆开展的。在观测时,两个实验的探测器均被放置在距离反应堆一两千米的位置。实际上,限于当时人们对中微子的认识,这个距离并不是最优的,因此实验结果不够精确。2000年,俄罗斯物理学家米卡埃兰(L A Mikaelyan)和西涅夫(V V Sinev)提出了中微子相对测量方法:选取两个相同的探测器,其中一个放置地点靠近反应堆,测量发生中微子振荡之前的数量;另外一个放置在中微子振荡效应最大的地点,测量发生中微子振荡以后的数目,通过比较两个探测器中的中微子

数量来计算 θ_{13} 的大小。这个方法可以极大提高实验测量的精度。^{[6] 55-56}

2003年,物理学界开始关注这种相对测量方法。此时中微子研究已经成为国际研究的热点。实际上,早在1996年,王贻芳就注意到中微子领域存在很多谜团,开始对中微子产生兴趣,遂加入斯坦福大学的一个中微子实验项目并成为其中的骨干人员。2000年,国际高能物理大会在斯坦福大学召开,中科院高能物理研究所所长陈和生等人参加了这次会议。会议期间,陈和生告知王贻芳,国内正计划与日本实验室合作,进行长基线加速器中微子实验。王贻芳为此进行了计算设计,并发表了文章。2001年12月,为了实施这个计划,王贻芳从美回国,作为百人计划学者受聘担任高能所研究员。由于种种原因,中日合作未能实施。当时正值北京正负电子对撞机改造工程(简称BEPCH)立项建设,王贻芳被安排到了大型粒子探测器部门工作。此时,国内中微子实验的计划也被暂时搁置下来,但王贻芳随后参与了日本Kam Land反应堆中微子实验。这段时间,加州大学伯克利分校的华人科学家陆锦标(Kam-biu Luk)经香港大学物理系主任引荐,认识了高能所粒子天体中心的马宇倩和杨长根,希望与国内合作共同进行中微子实验。后者将此事转达给王贻芳,但考虑到国内还没有能力达到想要的实验精度,也就缓议了。

2003年春,正在美国从事博士后研究的曹俊基于自己的学术规划,想要回国求职,并与高能所进行接触。2003年7月,王贻芳到芝加哥出差,请曹俊到机场面谈。2003年9月,王贻芳在日本反应堆中微子实验Kam Land值班时,与陆锦标进行了深入交流,陆锦标介绍了俄罗斯人的远距离相对测量方法,王贻芳也比较认可该想法,开始从技术层面考虑在国内开展反应堆中微子实验的可能性与路径。他立刻联系曹俊,希望曹俊回国共同组织中微子实验,并建议他先进行方案模拟验证。2003年9月,曹俊完成了方案模拟,王

贻芳随即请曹俊回国面试。2003年10月,曹俊正式回到高能所工作,筹备中微子实验。当时正值BEPCH建设时期,大量人员投入到这项工作中,致使大亚湾实验的早期规划设计几乎只有曹俊一人。而曹俊之前的研究方向是加速器中微子实验,并非是基于探测器的中微子实验。可以说,王贻芳是当时高能所唯一的探测器中微子专家。因此,工作方式主要是王贻芳提出想法,曹俊进行模拟实验计算并设计探测器。2003年下半年,王贻芳、杨长根、马宇倩等人前往大亚湾实地考察,确认大亚湾现场的地貌非常适合实验,就请中科院地质与地球物理所尚彦军等人帮助进行大亚湾地形的描绘和勘测,同时开始与核电厂沟通,试图取得核电厂的支持。此时,包括中、日、美等在内的多个国家都提出了各自的 θ_{13} 测量方案。但因为各种原因,最后顺利进行下去的只有法国的Double Chooz、韩国的RENO以及大亚湾中微子实验。为了确保实验工作顺利开展,大亚湾中微子实验最终选择了国际合作方式。中美合作的框架形成后,美方也派人参与项目初期的预研工作中。

1.2 立项过程

2003年11月,相关人员在香港举行了一次大亚湾中微子实验研讨会,形成了大亚湾合作组的框架雏形。2004年1月,高能所在北京举行了第二次大亚湾核反应堆中微子实验国际研讨会,集中讨论了国际合作的可能性和方式。与此同时,高能所启动了大亚湾核反应堆中微子实验的预研工作。这两次国际研讨会确定了大亚湾中微子实验的中美合作框架。

2004年9月17日,大亚湾核电站的运营商中国广核集团在给中国科学院的答复中,认可了大亚湾中微子实验的可行性。2005年4月5日,高能所在北京举办的香山科学会议中提出,面对国际上中微子实验的激烈竞争,中国要尽快发展中微子物理,而大亚湾得天独厚的条件是中国高

能基础物理难得的发展机遇。^{[13]50}2005年4月25日,中国广核集团回复高能所,同意在大亚湾现场进行工程地质勘察。

作为一项大科学工程,大亚湾实验计划能否落实的基本前提在于筹集到足够的经费。大亚湾中微子实验大约需1.5亿人民币,国内一般科研项目能够申请到的“973”项目经费最多为4000万元,国家自然科学基金委能够支持的“重大项目”最多也只是1000万元。为此,时任中国科学院副院长张杰院士提出了一个方案,即由科技部、科学院、基金委、广东省、深圳市、中广核等部门联合支持。2005年12月14日,科技部基础研究司在北京主持召开了“大亚湾反应堆中微子实验”协商会,肯定了大亚湾实验的重要性,希望尽快推动大亚湾项目建设,也提出了有关各方联合支持的建议。

2006年2月,大亚湾实验合作组大会在高能所举行,相关各方建立了合作组管理架构,并根据国际惯例通过了合作组章程,成立了合作组委员会、执行委员会和数个合作研究工作组,确定了进度安排及研究计划。2006年4月10日,大亚湾实验的地质勘探通过专家评审,项目正式启动。作为中美迄今最大的基础研究合作项目,该实验项目总共投资2.4亿元人民币,中国承担全部的土建费用,而探测器建造费用1.6亿元人民币,由美国能源部承担其中的一半。2006年7月14日,陈和生代表高能所与美国劳伦斯伯克利国家实验室签订了全面合作协议。

中方经费主要来自几个方面。2006年5月19日,中国科学院下发《关于大亚湾中微子实验站建设项目立项通知》(科发函字[2006]66号),同意大亚湾实验立项,并由院专项经费支持一部分。2006年8月15日,科技部基础司在北京和深圳主持召开了“大亚湾核反应堆中微子实验项目可行性论证会”,评审专家组认为总体方案先进可行、投资估算基本合理,建议有关部门及早

批准立项,落实各方面经费。2006年9月29日,高能物理所和中国广东核电集团有限公司在北京签署了“大亚湾核反应堆中微子实验项目合作协议”。2007年1月4日,科技部在《关于大亚湾实验项目立项的通知》(国科发基字[2007]1号)中批准中国科学院高能物理研究所大亚湾实验项目(科技部“973”计划)立项,提供专项经费资助。2007年2月,深圳市科技和信息局决定资助部分经费用于开展科研活动。2007年4月25日,广东省人民政府在《关于支持大亚湾反应堆中微子试验项目的复函》(粤府函[2007]92号)中明确表示支持大亚湾实验,并在2011年匹配1000万经费。^{[14]6}2008年1月28日,中国广东核电集团有限公司与中国科学院签订“关于合作建设大亚湾核反应堆中微子实验项目并提供经费支持”的协议,同意为大亚湾核反应堆中微子试验项目提供实验场地,并由岭澳核电有限公司承担部分项目研究经费,全面参与项目的合作。^{[1]1}2008年12月10日,国家自然科学基金批准了大亚湾实验中微子高性能探测器关键技术与方法研究项目,并提供资助经费1000万元。此外,在土地方面,由于高能物理研究所在深圳没有土地,也不是在深圳注册的法人,按照现行规定,无法向深圳市政府申请建设工程。2006年年底,深圳市政府专门召开了协调会,决定以大亚湾核电站的运营商中国广核集团的名义,申请建设大亚湾核反应堆中微子实验配套基建工程^{[6]62}。

可以说,大亚湾实验的立项和经费筹措过程是一个跨系统、跨部门、跨国别的广泛合作,大亚湾实验计划得以落实是各方力量精诚合作的结果。

2 大亚湾中微子实验装置的设计与建造

2.1 工程建设项目管理框架

大亚湾实验项目实行岗位责任制,建立了全

面的质量保证体系, 确保大亚湾中微子实验装置按计划建成, 达到总体设计指标。大亚湾实验国际合作管理架构如图 1 所示, 中美各成立一个项目办公室管理项目, 具体的管理职能分为经理、副经理、总工程师、总工艺师、总经济师、工程办公室主任、系统负责人等。[15]3-6

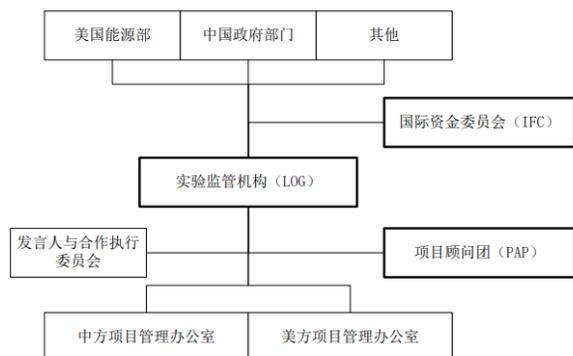


图 1 大亚湾国际合作管理架构^{[17]27}

在项目管理上, 大亚湾实验大量借鉴了 BEPCII 的经验, 制定了包括各级工程人员职责、任务与预算清单、CPM 计划、物资采购程序、招标工作程序、采购合同签订程序、质量手册等方面的管理制度。与此同时, 按国际惯例组成合作组, 中方和外方各有一名发言人 (spokesperson), 对内负责实验的日常运行, 对外代表实验合作组。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) 由九人组成, 分别是: 王贻芳 (高能所)、杨长根 (高能所)、曹俊 (高能所)、陆锦标 (伯克利国家实验室)、Robert Mckeown (加州理工学院)、Karsten Heeger (威斯康星大学)、熊怡 (台湾大学)、朱明中 (香港中文大学)、Alexander Olchevski (俄国杜布纳联合研究所)。九人共同负责重要的科学、技术与管理决定。机构代表委员会 (Institutional Board) 由各研究单位派一名代表组成, 负责人员安排和调整。合作组大会包括实验合作组内的所有成员, 具有最后决定权。合作制度条例规定了详细的决策机制。条例本身由合作组大会讨论

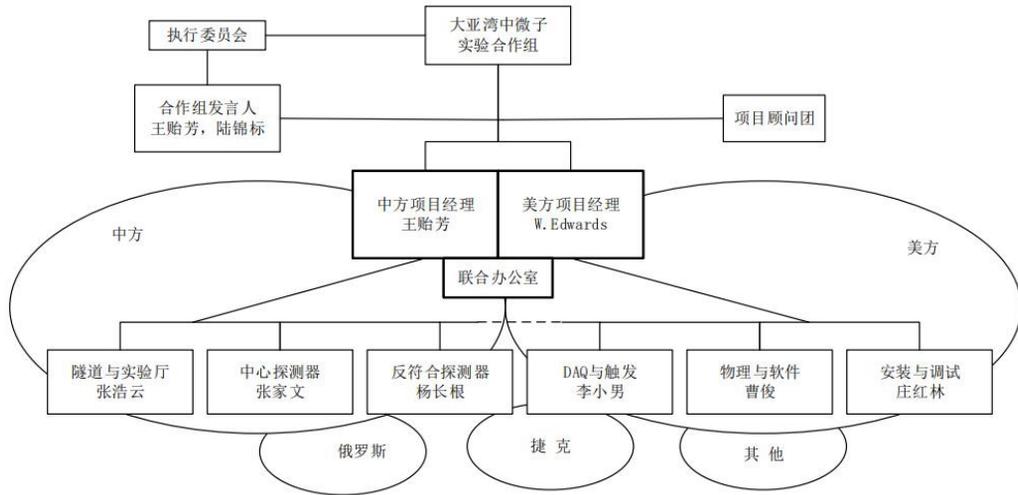
通过^{[16]228}。

大亚湾实验国际合作组由来自 6 个国家和地区的 38 个研究机构共 200 余名研究人员组成。合作组内部成立课题组, 包括工程建设与实验室基础设施、主探测器模板、反符合探测器、电子学与数据获取、软件与物理分析等五个课题组。另设系统集成组负责安装调试等。合作组成员可根据兴趣、特长与工作需要选择参加一个或多个课题组。其管理模式如图 2 所示。合作组每三个月左右召开一次全体大会, 各课题小组或研究人员汇报工作进展, 并对重大科学、技术与管理问题进行决策。合作组每周召开例行电话会议, 交流工作进展。各课题小组内一般通过每周例行视频会议或电话会议、电子邮件或人员互访进行交流。探测器安装调试期间, 各方相关人员需到大亚湾实验站点共同工作。运行期间, 所有成员轮流至大亚湾实验站点值班。在成果分配方面, 大亚湾实验根据基础科学研究的国际惯例, 所获取数据为各参与方共有, 其物理结果将形成论文公开发表。但在研制过程中, 由某一研究机构独自开发的新技术, 比如液体闪烁体, 则为研发机构所有^{[16]228-229}。

2.2 设计与建造过程

此前, 国际上反应堆中微子实验计划测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 精度低的一个主要原因是站址问题。实现 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的精确测量需要有高流量的中微子源、具有高信噪比的测量环境、高性能探测器和实现精确测量的实验方法。自 2003 年 10 月, 我国科学家和一些美国物理学家合作对广东省大亚湾核电站进行了多次实地考察, 一致认为它是世界上利用反应堆进行中微子实验测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的最佳实验场所。

一方面, 这些反应堆可产生数目庞大的反中微子供观测。大亚湾核电站位于深圳市区东部, 距岭澳核电站约 1km, 核电站各有两个反应堆, 每个核反应堆的热功率相同, 四个反应堆的总热

图2 合作组内部管理模式^{[17]27}

功率为 11.6GW，世界排名第十，加上岭澳二期的两个反应堆，六个反应堆的总热功率为 17.4GW，在当时是世界第二大的核反应堆群，其中微子的产率在每秒 10^{21} 个以上^[18]。另一方面，这一地区的地质条件很好。中微子实验本身是个低本底的实验，需要去除掉本底影响，消除误差，才能够进行精确测量。实验中一个比较重要的本底，就是宇宙线，如果探测器之上的岩石足够厚，就能够把上面的宇宙线本体挡住并过滤掉。大亚湾核电站刚好背靠高山，能够找到适于建造近端探测器（300m 左右）和远端探测器（2000m 左右）的地点，顶上岩石的厚度分别能达到 80m 和 400m 左右，岩石质量好，适于挖山洞。而世界上其他可供选择的实验地点，都不同时具备上述两大优点。当时大亚湾实验的主要竞争对手为法国拟议中的 Double Chooz 实验，其反应堆附近没有山，近端探测器只能放在覆盖混凝土板的浅坑内，加上其他条件限制，对振荡振幅的测量灵敏度只能达到 $0.03^{[16]19}$ 。

大亚湾实验的布局如图 3 所示，图中六个蓝点为核反应堆，黄线为隧道，黄点为中微子探测器。大亚湾近点的 2 个探测器位于大亚湾核电站旁，主要监测其内部的两个反应堆，岭澳近点的 2 个探测器可以监测岭澳一期和二期的四个反应

堆。探测器远点则位于振荡极大值附近，通过 4 个探测器来测量中微子振荡大小。

图3 大亚湾实验的布局示意图^[19]

堆。大亚湾实验与大部分反应堆中微子实验相仿，主要利用电子反中微子在大型液体闪烁体探测器中的反 β 衰变来测量反应堆中微子^[20]。反应堆发射的中微子数量称为通量，不同能量的中微子比例称为能量分布或能谱。比较远近点探测器测得的中微子通量和能谱，就可以知道中微子是否发生了振荡，进而确定振荡参数。如果存在振荡，在远点探测器中看到的中微子通量将比预期要少；同时，能谱会随着中微子振荡发生有规律

的变形(图4)。^[21]

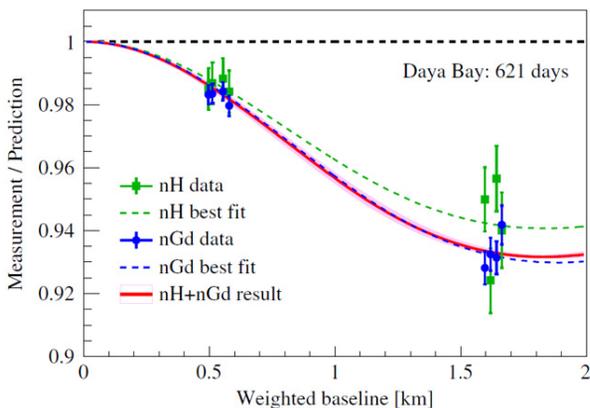


图4 中微子随距离的震荡曲线与实验测量值^[22]

大亚湾实验离不开高效的探测器。由于中微子本身数值极其微小, 很难精确测量, 因此高能所在实验设计中提出了探测器两两并放的想法, 以便探测器测量结果相互之间可以验证, 进而证明测量结果(图5)。此外, 实验设计者还提出了建造八个全同的探测器并分别安装于不同实验厅的想法, 目的是通过不同距离间的相对观测来减少测量的误差。经过反复计算论证, 大亚湾实验预期可以达到0.01的测量灵敏度, 在降低系统误差方面, 大亚湾实验比以前的实验强10倍, 也优于同期的法国的Double Chooz和韩国的RENO这两个实验^[16]。

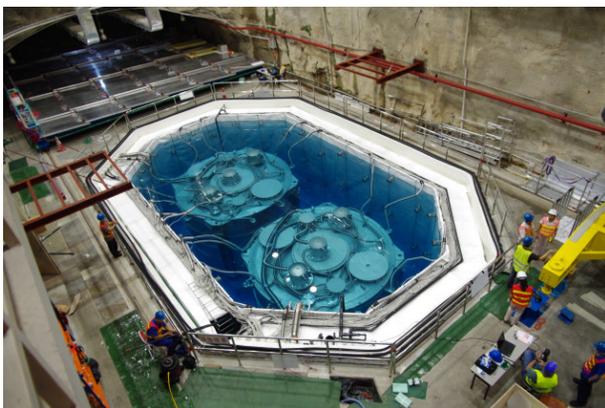


图5 水池中的中微子探测器^[23]

从2007年底到2008年初, 大亚湾核反应堆中微子实验项目设计陆续通过了相关审批。2007

年12月29日, 国家核安全局发文批准了大亚湾核反应堆中微子实验站土建配套工程施工爆破方案。2008年1月8日, 大亚湾核反应堆中微子实验项目通过了科技部基础司组织的中期评估。专家组认为该项目的工程设计已基本完成, 基本建设部分完成了可行性研究和初步设计, 总体进展顺利。2008年1月8—10日, 大亚湾核反应堆中微子实验项目通过美国能源部CD-2/CD-3a评审。按照美国能源部的项目评审流程, 通过CD-2评审后, 项目即可开工建设^[11]。

2007年, 大亚湾核反应堆中微子的地下隧道开始动工建设; 2008年, 探测器各个部件开始在全球各地生产; 2009年底, 中微子探测器开始在现场组装、测试; 2010年, 隧道及地下洞室建设完成; 2011年, 中微子探测器成功安装到位。

3 大亚湾中微子实验过程与科技成就

3.1 实验过程

大亚湾实验装置建设之初, 国内年轻科研人员没有中微子物理分析的相关经验。为了在与美方的竞争中占据优势, 2009年夏天, 在完成探测器方案设计后, 曹俊开始带领研究生提前进行模拟数据的分析训练。

2011年8月15日, 大亚湾实验完成了近点实验大厅内2个中心探测器和相应的反符合探测器及电子学系统的安装、调试, 并开始取数。此前的6月份, 日本T₂K中微子实验率先发表了关于 θ_{13} 的新结果, 表明 θ_{13} 中心值在 $9^\circ\sim 11^\circ$ 之间, 而 θ_{13} 大于零的信号超出背景2.5个标准偏差。这个远高于理论预测的数值“强烈暗示了大亚湾根本无需等待安装预期计划的所有8个探测器就可以提前运行和采取数据”。^[24]根据王贻芳提出的“用部分探测器模块提前进入实验运行期”的设想, 大亚湾合作组修改了实验计划, 采取“边建设、边运行”的模式, 不等8个探测器全部到位, 2011年12月24日就以6个探测器的体量提前运行, 累积数据。两个星期后, 合作组就观测到了中微

子增长的迹象。随后,高能所团队完成了数据分析,并在与美国团队的竞争中取得优势,最终使高能所的分析成为大亚湾实验的正式结果^{[14]6,7}。

高能物理的论文因为参与人员众多,一般需要内部讨论一年之后才能修改好。为了与韩国实验组竞争,合作组会议于2012年1月确定了论文程序,进行了严格的时间限制。虽然同样进行了反复的讨论修改,但论文从初稿到投出只用了一个星期,这是前所未有的速度。2012年3月8日,大亚湾合作组宣布,利用6个探测器运行55天观测到的数据,发现了中微子的第三种振荡模式,并测得混合角 θ_{13} 。实验站持续运行3~5年的数据成果,可把中微子混合角 θ_{13} 的测量精度(即1倍标准偏差下的测量误差)提高到4%左右^[24]。

2012年8月29日~10月18日,实验站继续安装了2号厅和3号厅的2个中心探测器,并于10月19日开始3个实验厅内全部8个探测器的联合取数,这标志着实验站的全面建成。2013年8月22日,大亚湾公布新结果,首次测得质量平方差 $|\Delta m_{2ee}|$ 。其中,大亚湾测得的数据中, $\sin^2 2\theta_{13}=0.090\pm 0.009$, $|\Delta m_{2ee}|=(2.59\pm 0.20)\times 10^{-3}\text{eV}^2$ 。2020年12月12号,在完成9年运行,确认无法继续提高测量精度后,大亚湾中微子关机结束运行。

3.2 科学成就

大亚湾实验发现了一种新的中微子振荡现象,以超过5倍标准偏差的置信水平率先给出了第三种振荡模式存在的证据,并精确测量了其振荡大小,为相关领域的前沿研究提供了较为精确的初值输入。这项研究对基本粒子物理的大统一理论,寻找与鉴别新物理具有重要意义。

国内外科学界对第三种振荡模式的发现和对混合角 θ_{13} 的精确测量给予了高度评价。诺贝尔奖获得者李政道认为,“这是物理学上具有重要基础意义的一项重大成就”;美国托马斯杰斐逊国家加

速器装置的罗伯特·麦基翁(Robert McKeown)认为此次实验结果“是有史以来来自中国的最重要的物理(实验)结果”;^{[6]117}欧洲物理学会官方网站新闻发文称“亚洲实验解开中微子振荡谜团”,认为大亚湾实验对中微子混合角 θ_{13} 进行了最好的测量^[26];威斯康星大学的讲席教授Vernon Barger等人认为“大亚湾实验的发现对现有实验和未来设施的规划有显著影响。”^[27]费米实验室的主任Nigel Lockyer认为“大亚湾反应堆取得了令人印象深刻的结果,中国开始进入世界的舞台,如果中国确实向前迈进,它将改变科学的面貌。”^[28]

大亚湾中微子实验也获得了多个著名奖项。2012年底,大亚湾核反应堆中微子实验成果入选美国《科学》杂志2012年度十大科学突破。^[29]2013年,王贻芳因“领导大亚湾中微子实验首次确定地测量出中微子混合矩阵的 θ_{13} ”,被授予美国物理学会高能物理实验的最高奖——潘诺夫斯基实验粒子物理学奖。2015年11月,“科学突破奖”在美国揭晓,“基础物理学突破奖”被授予了研究中微子振荡的7名领导者及他们领导的5个研究团队,其中王贻芳研究员领导的大亚湾实验项目也获此殊荣,这是以中国科学家为主的实验团队首获该奖。^[30]2016年,“大亚湾实验发现的中微子振荡新模式”获得国家自然科学奖一等奖。

3.3 技术成就

在大亚湾中微子实验中,高能所团队坚持以我为主,自主创新,使得自主研制的工艺设备超过99%,其中非标工艺设备超过75%^{[14]14}。

其一,实验的设计方案具有独创性。首次提出了多模块测量思想,并行放置2~4个全同的中微子探测器,显著地提高了实验的精度与可靠性。首次设计了同心圆柱形中微子探测器,减小了建造难度,使不同探测器的性能更容易全同,减小了系统误差。首次在探测器内采用反射板,减少光电倍增管用量一倍,大幅降低了造价。此外,

反射板机械设计利用真空压力, 几乎没有支撑死区, 具有理想的光学性能; 将总重 110t 的大型探测器设计成可移动的, 可以检验系统误差。

其二, 大亚湾实验推动了一系列技术上的创新。具体包括: 低本底、薄壳、高精度钢罐制造; 5m 直径真空密封 O 圈防老化与检漏方法; 采用尼龙/聚乙烯复合膜的 200t 液袋; 液闪大规模生产设备与方法; 采用拉链密封实现光密与气密的 200 m² 池盖等。其中, 新型掺钷液体闪烁体的研制尤其重要。法国的 Chooz 实验和美国的 Palo Verde 实验都因为液闪性能问题没有得到理想的结果。而高能所张智勇研究团队自主研发的掺钷液体闪烁体具有衰减长度长、发光效率高、长期稳定的特点, 消除了大亚湾实验最大的风险, 其性能完全满足实验要求, 达到国际先进水平。

其三, 大亚湾实验做出了一系列分析技术上的突破。具体包括: 高能所团队提前进行数据的模拟和分析, 最终使高能所的分析成为大亚湾实验的正式结果; 彻底解决了困扰不少中微子实验的光电倍增管自发光本底鉴别问题; 建立了能量重建方法, 相对能量标度误差仅为 0.5%, 好于 1% 的设计指标, 大大降低了最大的系统误差; 发明了新的 He-8/Li-9 本底分析方法, 降低了最大的本底误差等^{[14]62}。

4 结语

大亚湾反应堆中微子实验是我国中微子研究领域的大科学项目, 是迄今我国地方政府和企业有实质性参与的首个重大基础研究项目, 也是我国基础研究领域迄今最大的国际合作项目。大亚湾中微子实验的成功得益于几个关键因素。在领军科学家方面, 王贻芳是大亚湾中微子实验方案的主要提出者, 在项目建设过程中, 他担任中方发言人, 在与美方沟通协调、领导工程全局并推动工程顺利实施方面都发挥了重要作用。在实验设计方面, 大亚湾实验的方案设计是全世界八个

实验方案中精度最高、测量最灵敏的方案, 这是美国能源部支持美国科学家加入大亚湾实验的关键因素。在工程建设方面, 高能所有丰富的大科学工程建设经验, 为大亚湾实验提供了一流科技人才和全方位支持。在组织管理方面, 大亚湾是一个多部门联合建设工程, 项目实施过程中涉及多方面的统筹协调工作, 各政府部门和大亚湾核电站运营商中国广核集团的保驾护航至关重要。在国际合作方面, 为了保证工程的顺利建设, 大亚湾实验采用国际合作模式, 依靠项目发言人、执行委员会、项目负责人各司其职的组织制度, 确保在前沿研究领域借力起飞。

大亚湾中微子实验的成功有着重要的意义和影响。首先, 国际合作带来了不同的文化背景和不同的思维方式的碰撞和融合, 不仅促进了科技创新, 而且通过借鉴美国的管理方法, 形成了可资借鉴的国际化、规范化的大科学管理体系。其次, 大亚湾中微子实验培养了一批优秀人才。国际合作有助于培养青年科学家的国际视野, 并在国际竞争中实现成长。大亚湾实验中, 参与实验数据分析的主要成员都是高能所培养的年轻科研人员, 他们在与美国竞争的过程中做出了创新性贡献, 有望成为我国基础科学研究的骨干和领军人才。再次, 大亚湾中微子实验促使我国首次参与研制低能量、低本底、高精度的大型探测器, 通过高能所科研人员和国内工业界的共同努力, 研制的设备性能达到并超过了设计指标, 由此提高了我国高精尖设备的生产能力。最后, 大亚湾中微子实验的成果对未来中微子实验的发展方向有着决定性的作用。确定中微子的质量等级和顺序, 观测弥散超新星中微子, 是王贻芳目前领导的江门地下中微子实验室 (JUNO) 的目标。江门地下中微子实验装置建在地下 700m 处, 规模远超大亚湾中微子实验, 于 2014 年年底动工, 预计 2022 年建成, 计划运行至少 20 年, 可望引领未来国际中微子研究的学术潮流。

致谢

本研究在实地调研和查阅档案过程中, 得到了中国科学院高能物理研究所的宝贵支持。所长王贻芳院士、副所长曹俊研究员以及杨长根研究员和张智勇研究员接受访谈并提供相关资料, 在此一并致谢。

参考文献

- [1] 高能物理研究所大亚湾反应堆中微子实验工程办公室. 大亚湾反应堆中微子实验项目工程简介[EB/OL]. (2018-07-15)[2018-07-15]. <http://dayawane.ihep.ac.cn/chinese/gc/gk/gcjj/>.
- [2] 王贻芳. 大亚湾反应堆中微子实验[J]. 科学, 2007, 9(1): 20-25.
- [3] 王贻芳. 大亚湾中微子实验——小中见大[J]. 现代物理知识, 2012, 24 (3): 24.
- [4] 曹俊. 大亚湾与江门中微子实验[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44(10): 1025-1040.
- [5] 丘成桐, 纳迪斯. 从万里长城到巨型对撞机: 中国探索宇宙最深层奥秘的前景[M]. 鲜于中之, 何红建, 译. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [6] 王贻芳. 探索宇宙“隐形人”: 大亚湾反应堆中微子实验[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2015.
- [7] 刘丽冰, 刘蕾, 李全林, 等. 协同创新厚积薄发——大亚湾中微子实验项目进展及管理概述[J]. 科技成果管理与研究, 2012, (8): 76-79.
- [8] 王琳琳. 大亚湾实验发现中微子新振荡 可能是中国实验物理学最大成就[J]. 科技中国, 2012(4): 64-65.
- [9] 庄琰. 核探测技术的重要突破——大亚湾中微子实验掺钷液体闪烁体的研制[J]. 科技纵览, 2016(6): 78-79.
- [10] 高雅丽, 陈欢欢. “振荡”世界的中国力量——记大亚湾反应堆中微子实验团队[J]. 发明与创新·大科技, 2017(7): 24-25.
- [11] Weintraub D A. How old is the universe?[M]. Princeton University Press, 2011: 526-531.
- [12] 余建斌. 大亚湾中微子被认为是对物质世界规律的新认识[EB/OL]. (2012-12-29)[2021-05-15]. <http://news.cntv.cn/2012/12/29/ARTI1356733125957953.shtml>.
- [13] 中国科学院高能物理研究所档案室. 大亚湾反应堆中微子实验工程: 综合管理——立项阶段, 正式立项及立项过程文件等[G]. 档案号: DYB-ZH01-1.
- [14] 中国科学院高能物理研究所档案室. 大亚湾反应堆中微子实验工程: 综合管理——项目竣工阶段, 竣工验收文件[G]. 档案号: DYB-ZH04-5.
- [15] 中国科学院高能物理研究所档案室. 大亚湾反应堆中微子实验工程: 综合管理——项目研制阶段(管理性), 项目管理规章制度[G]. 档案号: DYB-ZH02-35.
- [16] 中国科学院高能物理研究所档案室. 大亚湾反应堆中微子实验工程: 综合管理——立项阶段, 初步设计与评审、批复[G]. 档案号: DYB-ZH01-4-2.
- [17] 中国科学院高能物理研究所档案室. 大亚湾反应堆中微子实验工程: 综合管理——立项阶段, 初步设计与评审、批复[G]. 档案号: DYB-ZH01-4.
- [18] Phys. Rev. Lett. Daya Bay collaboration observes a new kind of neutrino oscillation[EB/OL]. (2012-04-27) [2021-05-15]. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/49336>.
- [19] 高博, 李大庆, 刘传书. 捕获变身的中微子: 科学家发现中微子第三种振荡模式的日日夜夜[EB/OL]. (2012-05-11)[2021-05-15]. http://www.ipp.cas.cn/duoweishijiao/jubiaandongtai/201205/t20120511_91309.html.
- [20] 曹俊. 大亚湾实验发现新的中微子振荡[J]. 现代物理知识, 2012, 24(3): 5-11.
- [21] 孙亚轩. 大亚湾反应堆中微子实验的前期研究[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2006.
- [22] An F P, Balantekin A B, Band H R, et al. New measurement of θ_{13} Via neutron capture on hydrogen at Daya Bay. Physical Review D, 2016, 93(7): 072011.
- [23] 中国科学院高能物理研究所. 著名中微子实验盘点[EB/OL]. (2013-08-02)[2021-05-15]. http://www.ihep.cas.cn/dkxzz/juno/kpyd/201308/t20130802_3908048.html.
- [24] 何红建. 大亚湾中微子振荡实验的启示科学, 2016, 68(1): 37-41.
- [25] 人民日报. 大亚湾中微子实验成果世界瞩目[EB/OL]. (2012-12-29)[2021-05-15]. http://www.ihep.cas.cn/xwdt/cmsm/cmsm_2012/201212/t20121229_3730092.html.
- [26] Alessandro B. Asian experiments unlock neutrino oscillation mystery[EB/OL]. (2012-05-22) [2021-05-15]. <http://www.epsnews.eu/2012/05/neutrino-oscillation/#respond>.
- [27] Barger V, Gandhi R, Ghoshal P, et al. Neutrino mass hierarchy and octant determination with atmospheric neutrinos [J]. Physical Review Letters, 2012, 109(9): 091801.
- [28] Lockyer N. Particle physics: Together to the next frontier[J]. Nature, 2013, 504(7480): 367.
- [29] 高能物理研究所. 大亚湾中微子实验成果入选《科学》年度十大突破[EB/OL]. (2012-12-24) [2021-05-15]. http://www.cas.cn/xw/zyxw/yw/201212/t20121224_3727383.shtml.
- [30] 闫蓓, 安瑞, 张冬梅. 努力工作, 用实力说话:《科学通报》对话王贻芳研究员[J]. 科学通报, 2016, 61(6): 553-555.

A Historical Study on the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment

Ji Zhaoyuan, Wang Cong, Wang Dazhou

(School of Humanities, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Daya Bay reactor neutrino experiment is a large scientific project in the neutrino research field conducted in China. It is the first major basic research project with substantial participation of local governments and enterprises, and it is the largest international cooperation project in a fundamental research field in China. It aims to explore the neutrino oscillation mode and measure the relevant parameters. Based on historical research methods, according to materials such as archives and interviews, referring to relevant academic papers, books, and news reports, this study investigates the engineering history of the Daya Bay neutrino experiment. It aims to restore the project from approval, design, and construction to accurately measure the neutrino mixing angle θ_{13} . Based on this, some successful findings are summarized.

Key Words: large science project; neutrino; Daya Bay reactor neutrino experiment; history of engineering