

江门中微子实验

1 立项背景及意义

1.1 中微子研究的前沿热点

中微子是构成物质世界最基本的单元之一。与其他基本粒子（夸克和带电轻子）相比，中微子性质特殊，极难探测，仍然存在许多最基本的科学问题需解决。对中微子未知问题的研究，不仅将完善对物质世界最基本规律的认识，也可能发现超出现有粒子物理标准模型的新物理。

1998年发现的大气中微子振荡现象和2002年发现的太阳中微子振荡现象间接说明中微子具有微小的质量，是迄今为止唯一超出标准模型的实验现象，该项研究被授予2015年诺贝尔物理学奖。2012年大亚湾反应堆中微子实验发现中微子第3种振荡模式，测得了混合角 θ_{13} 。至此，描述中微子振荡的6个参数已测得4个半，包括3个混合角 θ_{12} 、 θ_{23} 和 θ_{13} ，2个质量平方差 Δm^2_{21} 和 $|\Delta m^2_{32}|$ （未知的包括又称中微子质量顺序的 Δm^2_{32} 符号以及电荷宇称（CP）相角）。

中微子质量顺序的测量是当前中微子研究的焦点问题，具有重大科学意义。它是中微子的内禀属性之一，决定了中微子的味结构，是所有粒子物理模型都必须面对的问题；它直接影响中微子与物质的相互作用，并因此在宇宙演化、太阳及超新星中微子的产生与传播、各种长基线中微子振荡等领域有重要影响；它影响CP相角测量的实验前景，也决定另一类重要实验（无中微子双贝塔衰变实验）的发展方向。

中微子研究近年来蓬勃发展，而且与天文学、宇宙学、地球物理等多个学科形成交叉。中微子是一种新的天文观测手段，在直接观察天体内部过程上具有独特的优势。相

关重大科学问题包括寻找超高能宇宙线的起源、研究超新星爆发机制、研究太阳模型、利用超新星背景中微子研究宇宙大尺度结构、利用地球中微子研究地球演化等。

1.2 启动立项

中科院高能物理所2008年提出了利用反应堆中微子测量质量顺序的实验构想，2013年得到中科院战略性先导科技专项支持，启动了江门中微子实验（JUNO，原名大亚湾二期实验）。

除江门中微子实验外，国际上还有7个实验处于不同的推进阶段（表1）。在这些实验中，NOvA已建成运行，但只能在CP相位角等于225—315度时区别质量顺序。其他实验各有其技术挑战性，需要一定的时间完成设计和预先研究，预期开始运行时间均在2020年前后（表1）。这是自 θ_{13} 测量之后又一轮激烈的国际竞争。江门中微子实验有望率先测得质量顺序。由于实验原理不同，其结果可与加速器中微子实验和大气中微子实验相互验证。中科院通过战略性先导科技专项对江门中微子实验给予支持，对赢得国际竞争、率先取得重大科学突破至关重要。

表1 测量中微子质量顺序的实验计划

实验名称	预计开始运行	预计取得成果时间	实验类型
美国NOvA	2014年	2020年(1/4几率)	加速器
江门中微子实验（JUNO）	2020年	2024年	反应堆
印度INO	2020年	2030年	大气
美国DUNE	2024年	2027年	加速器
法国ORCA	~2019年	~2023年	大气
美国南极PINGU	~2020年	~2024年	大气
韩国RENO-50	~2020年	~2024年	反应堆
日本Hyper-K	~2025年	~2028年	大气

注：预计时间带近似号的为尚未正式批准的实验，取得成果时间按达到3倍标准偏差计算

2 独创性

(1) **实验方案**。江门中微子实验的设想由中科院高能物理所于 2008 年提出, 是国际上首次提出的利用反应堆中微子振荡中的干涉效应测量质量顺序的实验项目。实验方案具有以下特点和优势: 质量顺序测量不依赖于未知的轻子 CP 相位角, 与其他类型实验互补; 有效的反应堆群功率世界第一; 国际领先的液体闪烁体探测器技术。

(2) **关键技术**。JUNO 探测器的有效质量是目前国际最大液闪探测器 KamLAND 的 20 倍, 设计能量精度比国际最佳的 BOREXINO 实验提高 1 倍, 技术上具有极大挑战性。基于大亚湾实验的积累, 专项团队掌握了高透明度、高发光率、经济且安全的液闪技术和高精度大型探测器技术, 达到国际领先水平。江门中微子实验将采用这些关键技术, 并进一步发扬光大。

(3) **新型光电倍增管**。研制出国际最高光子探测效率的 20 吋光电倍增管, 既满足本专项和国际上其他中微子实验的迫切需求, 打破国际垄断, 为国家节约大量的科研经费, 也推动了国内企业在真空电子器件研究领域的发展, 提高了技术水平和研发能力。

3 专项研究进展

专项将设计、研制并运行一个国际领先的大规模中微子实验站, 以测定中微子质量顺序、精确测量中微子混合参数, 并进行其他多项重大前沿研究。

专项将建设一个有效质量为 2 万吨的液体闪烁体 (液闪) 探测器, 距广东阳江和台山反应堆群 53 km, 位于地下 700 m。与同类探测器的国际当前最好水平相比, 探测器规模扩大 20 倍, 能量精度提高近 1 倍 (达到前所未有的 3%)。为此需要解决高量子效率的新型光电倍增管 (PMT) 研制、高性能液闪研制、超大型高精度探测器设计等一系列技术上的国际难题。具体研究内容包括: (1) 总体实验方案研究, (2) 实验选点及物理灵敏度研究, (3) 中心探测器研制, (4) 反符合探测

器研制, (5) 光电倍增管研制与工业化生产, (6) 光电倍增管测试、安装与防护, (7) 液闪研制与工业化生产, (8) 电子学读出与信号触发系统研制, (9) 数据获取与探测器监控系统研制, (10) 刻度系统研制, (11) 软件模拟与计算环境建设, 以及 (12) 地下实验大厅、隧道及地面实验设施的工程建设。

专项实施以来, 按照预定目标完成了概念设计和物理目标黄皮书, 配套设施建设正在进行, 关键技术研发取得重大突破, 解决了达到物理目标的主要技术困难。主要进展包括 5 方面。

(1) **完善管理体系, 成立国际合作组**。成立了包括专项领导小组、专家咨询委员会、监理组、总体组、地方工作领导小组、专项工程办公室以及 11 个系统 (课题) 的组织管理机构。完善了各项管理制度, 建立了完整的研究队伍。成立了国际合作组, 建立了符合国际惯例的合作组管理体系。合作组从 2014 年 7 月建立时的 12 个国家和地区、31 个研究机构、180 名研究人员, 发展到 15 个国家和地区、66 个研究机构、450 名研究人员, 其中境外人员约 200 人。明确了各国的投入和承担的建设工作。

(2) **确定物理目标和总体实验方案**。发表了《物理黄皮书》, 确定了 11 个研究方向, 对各研究方向的主要科学课题设定了目标。对最重要的物理目标——中微子质量顺序, 采用 6 年数据量、相对测量方法可达到 3 倍标准偏差, 绝对测量为 4 倍标准偏差。实验将精确测量 $\sin^2 2\theta_{12}$ 和 2 个质量平方差到好于 1% 的精度, 结合大亚湾实验对 θ_{13} 的测量, 将精确测量中微子振荡 6 个参数中的 4 个至国际最高精度。精确测量混合参数将使检验混合矩阵的幺正性、发现新物理成为可能。发表了概念设计报告, 完成了探测器概念设计和主要的关键技术研发。

(3) **确定探测器实施方案**。目前已完成设计和关键部件试制, 进行了国际评审。建造了一个探测器小模型, 以研究液闪和新型光电倍增管性能。探测器包括中心探测器和反符合探测器, 经过比较多个方案,

中心探测器确定采用有机玻璃球+不锈钢网架的方案（图1）。有机玻璃球体直径35.4 m、厚12 cm，内装2万t液闪，由590个节点支撑于外层的不锈钢网架上。18 000个20吋和36 000个3吋光电倍增管安装在有机玻璃球外的网架上。有机玻璃球与网架浸泡在直径43.5 m、高44 m的水池中。水池中为3万t纯净水，在网架处分隔成光学隔离的内外两层，内层为中心探测器，探测中微子信号，外层为水切伦科夫探测器，装有约2 000个光电倍增管，探测宇宙线信号。在水池顶部采用塑料闪烁体作为宇宙线径迹探测器。

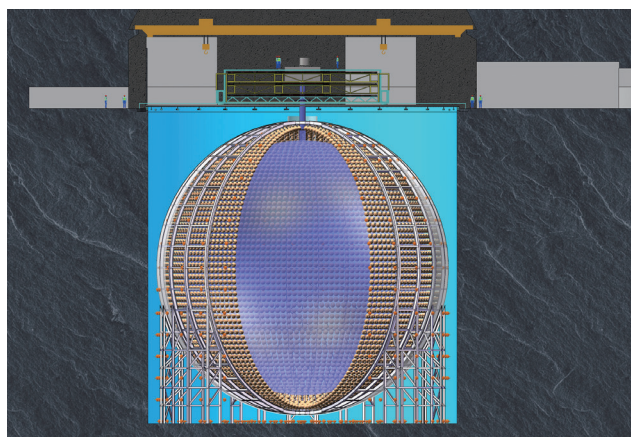


图1 江门中微子实验探测器系统

（4）成功研制新型光电倍增管。光电倍增管（PMT）是一种将极微弱光信号转换为电信号的真空器件，是实验的关键之一。为达到实验要求的能量分辨率，单光子探测效率需大于27%。之前的商业产品不能达到这一要求，依靠国外公司研发则成本居高不下。为了降低实验成本并带动国内企业的技术创新，中科院高能物理所2009年提出了一种新型光电倍增管的设计，采用国内有技术优势的微通道板替代传统的打拿极实现倍增，获得多国专利。牵头联合北方夜视技术股份有限公司、中科院西安光学精密机械所等7家单位组成微通道板型光电倍增管（MCP-PMT）产学研合作组，2015年成功研制出具有自主知识产权的20吋光电倍增管（图2），探测效率达到国际最高，在国际竞标中中标本专项15 000只。与传统的打拿级型PMT相比，MCP-

PMT具有探测效率高、增益高、噪声低、阳极均匀性好、响应时间快、单光子峰谷比高等特点。现已完成生产线建设，2017年开始批量生产。



图2 江门中微子实验自主研发的20吋微通道板型光电倍增管

（5）成功研制高透明度的液体闪烁体。由于探测器巨大，液闪的透明度是关键因素之一，同时需降低其天然放射性至极低的水平。项目组研究了减压蒸馏、三氧化二铝吸附、水萃、蒸汽剥离等纯化方法，液闪主要原材料——烷基苯的衰减长度达25 m以上，液闪衰减长度达20 m以上，为国际最高水平。已在大亚湾建立了一套中型液闪纯化系统（图3），将纯化测试20 t液闪。此外，发光物质国内研发取得成功，达到国际最高水平；首次测得了烷基苯的瑞利散射长度为27 m；完成了大规模生产规划设计等。



图3 在大亚湾搭建的中型液闪纯化系统

（6）促进人才发展，推进产业进步。江门中微子实验建立了国际合作组，大量国外科学家的参与，可以分担部分建设和运行经费、扩大国际影响力、吸纳和借鉴国外的先进技术和经验。不同文化背景和科研经历的科学家合作有利于创新，国际合作与竞争的环境也有利于国内研究生的培养向国际水平看齐。

专项高度重视人才培养和团队建设。大亚湾实验培养出来的中青年团队是本专项的主力军，其能力水平在大亚湾的国际环境中得到锻炼和检验。团队成员2016年获得国际纯粹与应用物理学联合会的青年科学家奖。依托本专项的“粒子物理前沿卓越创新中心”每年评选3名青年拔尖人才和24名青年优秀人才，予以较大幅

度的奖励，有助于留住和激励优秀青年人才。

国际领先的粒子物理实验往往对产业提出较高要求。本专项立足国内，尽早启动了关键技术研发，各课题组与数十家国内企业紧密合作，取得了重大成果。江门中微子实验先导专项的顺利实施标志着我国中微子研究进入新的发展阶段，将不仅提高我国的粒子物理探测器技术，推动重大科学发现，建立一支国际领先的科研队伍，使我国的粒子物理研究走在世界前列，而且能够提高国内相关企业的技术创新力和国际竞争力，为实现科技强国战略作出重要贡献。

（依托单位：中科院高能物理所）

专家点评

在过去20年中，中微子物理领域出现了极为重要的进展。1998年我们知道了中微子在长距离传播中会改变它们的味道（或称类型）。这些现象被称为“中微子振荡”。如果中微子有质量和有非零的混合角，中微子振荡就会发生。接着，在2001年和2002年我们理解了长期以来的“太阳中微子丢失问题”也是因为中微子振荡。然后在2011—2012年，第三种振荡模式被发现，其中一个关键实验是中国的大亚湾实验。

根据这些结果，我们几乎理解了中微子质量（或者更准确地表述为“质量差别”）的基本结构。然而，对中微子质量的理解还有一个重要的缺失：我们不知道3种中微子质量态中，哪一种是最重的（称为质量等级问题）。这是实验上要解决的一个非常重要的问题。基于该问题的真实答案，我们关于生成中微子质量的物理看法也许会非常不同。因此，中微子科学界对能回答该问题的可能实验有很多讨论。最有前途的实验之一是江门中微子实验。它将观测来自阳江和台山核电站的电子反中微子。取决于质量等级的模式，江门中微子实验观测到的信号将不同，因此江门中微子实验将确定质量等级。如上所述，确定质量等级将是对中微子物理和粒子物理的一个极为重要的贡献。

通过中微子振荡研究，我们已经知道中微子的混合角与夸克非常不同。这个不同非常有趣。因此我们认为包括混合角在内的中微子振荡参数应该尽可能地精确测量。江门中微子实验是一个独一无二的实验，能够最精确地测量这些参数中的一部分。

我们知道这些实验非常有挑战性。特别是用这种方法确定中微子质量等级具有挑战性，因为对能量精度有非常严的要求。然而，江门中微子实验合作组做得非常好，并寻求国际中微子科学界的各种知识和专业经验来达到这些要求。

最后，在中微子领域和其他相关科学领域，我们认为每个实验都应基于国际合作，以通过具有不同背景和文

化的人们的讨论，尽可能产生最好的科学结果。江门中微子实验位于中国，但合作组是真正国际化的。江门中微子实验显然符合全球性的标准。

总的来说，我认为江门中微子实验对全球中微子科学界的未来是一个非常重要的实验。

点评专家

梶田隆章（Takaaki Kajita）日本东京大学教授，东京大学宇宙线研究所（ICRR）所长。“超级神冈（Super-Kamiokande）”中微子项目、“神乐（KAGRA）”引力波项目负责人。因“发现中微子振荡，证明中微子有质量”与加拿大科学家Arthur Bruce McDonald分享2015年诺贝尔物理学奖。

专家点评

江门中微子实验（JUNO）将确定一个关于中微子的非常基础的重要未知量——3种中微子质量的质量顺序，即所谓的质量等级。JUNO将利用地处两座高功率核电站附近、经仔细设计的探测器来实现这一目标。这个巨大的探测器也将推动一些其他中微子物理研究领域的进展，比如测量来自太阳和地球以及反应堆的中微子。JUNO还将对中微子的其他参数给出更高的精度，对修改粒子物理标准模型，以容纳有质量的中微子来说非常重要。

如果继续保持现有进度，JUNO项目有希望在国际上成为测量中微子质量顺序的领导者。项目领导者建立了一个由经验丰富的科学家组成的大的国际合作组，项目设计进展非常好。大亚湾中微子实验确定了关于第1种和第3种质量的中微子之间混合的非常重要的性质，中国通过这一卓越的测量，在中微子领域起到了领导地位。基于这一重大成果，大亚湾中微子实验团队和王贻芳研究员被授予极具名望的2016年基础物理学突破奖。大亚湾实验发展出的技术和经验是江门中微子实验的核心部分，并因这个更大的实验中更多的合作者和进一步的技术与经验得到加强。

最近，我的几位加拿大同事参加了JUNO实验（中心探测器）的国际评审，他们具有萨德伯里中微子天文台的技术和经验。他们对这个实验所展现出的专业技术和物理潜力印象非常深刻。

中国可以利用两座大功率核电站和附近的地下实验站带来的世界级科学机遇，通过JUNO项目完成一个重要的粒子物理测量。王贻芳研究员组建了一个由中国领导的优秀国际团队建设JUNO实验并开展这些测量。我殷切期望JUNO项目能得到贵国支持，并利用此次绝佳机遇，使中国在中微子基本属性的测量中再次领先世界。

点评专家

阿瑟·布鲁斯·麦克唐纳（Arthur Bruce McDonald）加拿大萨德伯里中微子天文台主任、教授。因“发现中微子振荡，证明中微子有质量”与日本科学家梶田隆章（Takaaki Kajita）分享2015年诺贝尔物理学奖。