

从大亚湾实验到江门实验

曹俊

(中国科学院高能物理研究所 100049)

大亚湾反应堆中微子实验 2003 年提出设想, 2007 年开始建设, 是我国继 20 世纪 80 年代建成的北京正负电子对撞机后的第二个粒子物理大型实验装置。2012 年大亚湾实验发现第三种中微子振荡模式, 使我国中微子研究进入国际一流行列。中微子振荡是超出粒子物理标准模型的新现象, 中微子是发现新物理最重要的突破口之一, 大亚湾实验的成功建设和运行极大地拓展了我国的粒子物理研究方向。2013 年江门中微子实验立项, 是下一代国际三大中微子实验之一, 具有丰富的科学目标, 预期 2023 年建成。从大亚湾实验到江门实验, 我们在物理研究、核心技术、人才队伍、国际合作各个方面都得到了长足的发展。

一、科学背景

1998 年日本超级神冈实验发现了大气中微子振荡现象, 2001 加拿大萨得伯里中微子实验发现了太阳中微子振荡现象, 被授予 2015 年诺贝尔奖。中微子共有三种, 它们之间的振荡应该有三种模式, 对应三个混合角 θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13} 。上述两个实验分别测得了 θ_{23} 和 θ_{12} 。发现中微子振荡之后, 当务之急是测量对应 θ_{13} 的第三种振荡模式, 它不仅是一个自然界的基本参数, 也是决定未来中微子振荡研究的指路标。如果它很小, 那么采用现有技术就无法测量剩下的未知参数, 需要研发新技术。

2003 年左右, 国际上提出了 8 个利用核反应堆释放的中微子测量 θ_{13} 的实验方案。其中, 得益于大亚湾核电站功率大、附近有山的地理优势和原创的多模块探测方案, 大亚湾实验能达到的精度最高。

因此美国能源部放弃了两个美国方案, 支持部分美国科学家加入了大亚湾实验。这 8 个方案中最终有 3 个得以实施, 分别是中国大亚湾、法国 Double Chooz、韩国 RENO。2012 年大亚湾实验率先测得了第三种振荡模式。

早在在大亚湾刚开始建设时, 我们就开始思考大亚湾之后的中微子研究。2008 年 2 月 29 日, 我与王贻芳、李小男去香港开会。由于直飞香港的机票比飞深圳的贵一倍, 我们先到深圳, 然后打车去罗湖, 过境后坐地铁去香港中文大学。在出租车上, 我们重新梳理了一遍可能的选项, 发现都缺乏吸引力。最后想到了用反应堆测量中微子质量顺序, 讨论后发现, 这个好! 当时其实有很大的不确定性: 如果 θ_{13} 如我们最初预期的那样小, 物理上就不太可能测出质量顺序; 当时国际上最好的光电倍增管也不能实现所需要的 3% 的探测器能量精度; 实验规模比大亚湾大得多, 获得经费支持会很难。王贻芳以他惯有的乐观精神说服了我。首先我们不能先入为主地认为 θ_{13} 必然很小, 万一很大呢? 技术问题可以研发, 等大亚湾运行三年测出 θ_{13} , 再筹备下一代实验, 我们有十年时间来研发新的光电倍增管技术, 也许能取得突破。最后, 中国发展很快, 现在我们认为太大的经费规模, 也许十年后就不算大了。这样, 从香港回来后, 我们就开始认真分析实验要求, 发表了两篇论文, 提出了利用反应堆测量质量顺序的想法, 同时也马上启动了光电倍增管技术预研和实验选址。

大亚湾实验的远点探测器距反应堆约 1.6 公里, 位于 θ_{13} 振荡的极大值, 而测量质量顺序需要将

探测器放在 60 公里左右,位于 θ_{12} 振荡的极大值。当时希望继续利用大亚湾核电站,因此称为大亚湾二期实验。后来因为新的核电站规划,无法保证实验站离所有的反应堆距离都相等,这样,来自不同反应堆的振荡信号会相互抵消。在 2012 年开始正式推动实验项目时,发现可以找到距阳江核电站和台山核电站等距离的实验站点,最后选址广东江门开平市的打石山,距两个核电站 53 公里处,改名为江门中微子实验(图 1)。

二、技术发展

大亚湾和江门都是反应堆中微子实验,沿用同一技术路线,即液体闪烁体(简称“液闪”)探测器。经过大亚湾实验,我们已经积累了丰富的经验,一些技术达到国际领先。到江门实验,各项核心技术再上一个台阶,全部国际领先。

1 光电倍增管

光电倍增管(PMT)是大亚湾和江门实验最核心的探测器件,它不仅用于科学实验,在工业上也有非常广泛的应用。提出大亚湾实验时,国内只能生产 2 英寸 PMT,且技术陈旧。2005 年我们找了合作单位,尝试研制 8 英寸 PMT,并纳入了大亚湾预研的基金重点项目。后来发现国内相关基础薄弱,大亚湾又面临激烈的国际竞争,最终放弃了研发,由美国合作者采购了 2 千多只日本生产的 8 英寸

PMT。

2008 年提出大亚湾二期实验的设想后,所需的 2 万只高性能 20 英寸 PMT 成为关键。一方面,当时探测效率最高的 PMT 也不能满足实验要求;另一方面,即使国际上研发出了满足要求的新技术,在垄断的情况下,价格必然难以承受。因此,PMT 自主研发再度提上日程。2009 年王贻芳等提出了新型的微通道板 PMT 方案,申请了国际专利,组建了队伍,后来还专门引进了微通道板专家刘术林。经过大量的调研和一次不太成功的合作后,2011 年 11 月正式成立了研制合作组,研制工作走上了正轨。2013 年江门中微子实验立项,PMT 研制列入了先导专项课题。解决了大量技术困难后,北方夜视研制的 PMT 终于在 2015 年招标最后期限前达到了实验要求的 27% 探测效率。由于高效率 20 英寸 PMT 国际上从未量产过,产品可靠性没有把握,最终通过招标确定了两家供应商,其中北方夜视 1 万 5 千只,滨松 5 千只(图 2)。如果某一家量产中不能满足指标,可以更改合同。在生产过程中,王贻芳认为探测效率还有提高的余地,要求北方夜视减慢进度,继续改进工艺。经过改进,探测效率提高了 10%。完成全部生产后,江门合作组实测的 1 万 5 千只北方夜视 PMT 平均探测效率为 30.1%,日本滨松为 28.5%,均好于 27% 的实验要求。

高性能 PMT 的研制推动了高真空器件、高量子效率光阴极、原子层沉积处理等高技术的发展。为



图1 大亚湾和江门中微子实验站点



图2 江门中微子实验的20英寸光电倍增管

减少PMT带来的放射性本底,高能所研制了低本底玻璃,并在生产过程中持续监测其本底水平,铀、钍、钾本底水平比国际同类产品低2-10倍。

此后,北方夜视为高海拔宇宙线观测站(LHAASO)提供了3千支针对时间响应优化的20英寸PMT,研制出了时间响应达到30皮秒的多阳极PMT,光电倍增管技术得到了进一步发展。

2 液体闪烁体

液闪既是中微子的靶物质,也是探测介质。大亚湾实验刚开始研发时,国内几乎没有相关基础。特别是在液闪中掺杂稀土元素钆的技术更是国际难题。法国CHOOZ实验就因为钆从液闪中析出,一年内液闪衰减长度(表征透明度的指标)从6米下降到2米,导致实验不得不终止。2004年王贻芳向以前的美国同事要了2升Palo Verde实验的掺钆液闪,让我主持研发。Paolo Verde的掺钆液闪采用偏三甲苯为溶剂,溶入乙基己酸与钆的络合物。偏三甲苯对探测器采用的有机玻璃容器攻击性很强,需要兑60%的矿物油来中和,这个过程很难控制,一不小心就会析出。

掺钆液闪的研制也走了一些弯路,多次尝试也没找到化学专家跟我们合作。2005年1月,我和王贻芳约高能所核分析室魏龙、赵宇亮、张智勇讨论,希望能帮助大亚湾做低本底工作,即测量各种探测器材料中极低的天然放射性含量,并遴选合用的材

料。结果低本底合作没实现,却意外发现张智勇是钆络合物的专家,从此掺钆液闪的研发走上了正轨。同年,我在台湾开会时听到Mark Chen报告加拿大SNO+实验基于烷基苯的液闪,回来后马上开始试验,确定了把偏三甲苯换成烷基苯,不仅省去了兑矿物油的风险,发光效率和透明度也更好。筛选了三类十几种配体后,确定了采用异壬酸配体方案。2005年底,基于烷基苯的掺钆液闪在吨量级的小模型上测试成功。美国布鲁克海汶国家实验室在液闪掺杂方面国际著名,与高能所独立研发但紧密合作,两者选择的配方相似但工艺不同。两个方案由香港大学做了对比,高能所方案因稳定性更好且生产风险小,被确定为大亚湾正式方案。

由于江门实验站点距反应堆远,中微子流强比大亚湾实验站点低了1000倍,因此低本底的要求也高1000倍。同时,为研究太阳中微子,这个要求还要进一步提高。液闪中掺钆的主要作用是将中子俘获信号的能量提高到8 MeV,远离天然放射性能区,从而降低对其他探测器材料的低本底要求。钆与铀、钍化学性质相似,无法纯化到江门所需的本底水平,因此江门实验没有采用掺钆液闪,而是通过提高对探测器材料的低本底要求达到设计要求。

江门液闪的主要挑战来自液体的极低本底和极高透明度要求。中微子事例产生的闪烁光需要穿过液闪,才能到达光电倍增管,因此应尽可能提高液闪的透明度。大亚湾液闪采用的烷基苯,由南京烷基苯厂通过专门调节工艺生产,采用特制尼龙袋运输和存储,没有经过进一步的纯化。大亚湾液闪的透明度已经是国际上最高,但用于江门实验的话,70%的光仍会损失在液闪中。为进一步提高烷基苯的透明度并降低放射性本底水平,江门实验将在现场建立自己专门设计的大型纯化设施,2万吨烷基苯将“滤”一遍,“蒸”一遍,“洗”一遍,再“吹”一遍。首先通过氧化铝过滤,将杂质吸附,显著地提高透明度,再通过蒸馏去除放射性,然后用水萃取进一步去除放射性,最后用气体剥离去除液闪中残存的氦气和氮气。经过纯化后,烷基苯的透明度基

本上提高到了极限,与采用大亚湾液闪相比,对光的吸收将减少一倍以上,铀、钍、镭、铅、氡等放射性杂质有望减少10万倍以上。

3 纯净水

江门和大亚湾的中微子探测器都泡在水中,用水来屏蔽探测器外部的放射性。大亚湾采用电阻率达到18兆欧的纯净水,在10米深的水池中呈现清澈的蓝色,非常漂亮,曾经以为这就是最纯净的水了(图3)。

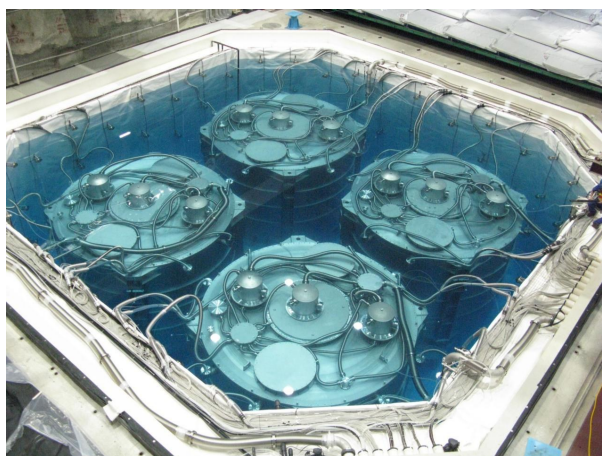


图3 大亚湾中微子实验远点实验厅

在每个大亚湾探测器刚开始运行时,我们都发现一种奇怪的信号,事例率随时间衰减,二十多天后消失,看上去像某种不知来源的放射性本底。但从衰减时间、能量来分析,没有哪种放射性元素能符合得上。开展了好几轮研究,也没搞清楚是什么。后来经过江门实验的研发后才意识到,应该不是探测器内部的本底,而是水中的放射性杂质镭。事例率的衰减不是因为镭自然衰变,而是水循环净化系统逐步将镭去除了。对更纯净的水,电阻率已不能有效地表征其纯净度,微量的放射性含量是更灵敏的指标。大亚湾纯净水中初始的镭含量可能高达每立方米10贝克,江门实验目前仍在研发新的去除手段,期望将它降低100万倍,达到微贝克水平。铀钍含量从大亚湾的 10^{-14} 克/克降低了100倍,达到 10^{-16} 克/克。针对水中的氡气,除了常规的脱气外,江门实验创新地采用微气泡技术,有望将它比

大亚湾降低1万倍,达到每立方米1毫贝克水平。

4 有机玻璃容器

江门和大亚湾实验的液闪都装在有机玻璃容器中,将液闪与外面的屏蔽液体隔开,而PMT安装在屏蔽液体中,以阻挡PMT玻璃中的放射性进入液闪。大亚湾探测器有两层嵌套的圆柱形有机玻璃罐,内罐直径3米高3米,外罐直径4米高4米。江门探测器的有机玻璃容器是一个直径35.4米的球形。

在大亚湾预研时,我们将国内从北到南的有机玻璃厂家都梳理了一遍,发现没有一家能够承接几何精度要求非常高的大型有机玻璃罐,没有一家有数控机床。最终,由美国合作者研制了4米罐,台湾合作者研制了3米罐。八年后江门开始预研时,我们将国内厂家重新调研了一遍,发现加工水平普遍上了一个台阶,加工大亚湾所需的有机玻璃罐应该不成问题。不过,江门有机玻璃球比目前国际上最大的SNO实验有机玻璃球体积要大20倍,仍然有巨大的挑战,没有人能够制造。我们挑选了三个厂家,并跟清华、浙大、同济等国内机械设计最强的大学,开始了长达3年的合作研究,最终解决了全部技术问题。在高能所的指导下,汤臣科技对生产线进行了改造,生产出了本底国际上最低的有机玻璃,铀钍含量小于0.5 ppt(万亿分之一);开创了有机玻璃在建筑、钢结构等领域大体量应用的先河,主持制定了两项国家标准、一项团体标准、一项技术规程;突破技术瓶颈,首次解决了几十条拼接缝一次性聚合的难题。

5 低本底技术

大亚湾实验的低本底要求跟国际先进水平相比不算高,但江门实验需要达到最先进的水平。国际上千吨级的液闪探测器有意大利Borexino、日本KamLAND、加拿大SNO+三个实验,他们首次灌装都没有达到设计的低本底要求,后来都重新纯化了液闪。考虑到江门液闪的体量比他们大了20倍,重新纯化非常困难,需要一次成功,因此挑战比其他

实验要大得多。

低本底要求贯穿在几乎所有部件的研发中。前文已介绍了光电倍增管、液体闪烁体、纯净水、有机玻璃的低本底。另一项大量使用的材料是不锈钢,包括探测器本身和液闪纯化、输运管道、溢流容器等使用的不锈钢。除了不锈钢本身的铀钍放射性,表面处理也非常重要。即使抛光后,不锈钢表面也有微小的沟槽,灰尘颗粒沉积在沟槽内,难以清洗干净。通过电子显微镜观察钢表面,我们确定抛光后表面粗糙度达到RA 0.4可以将这些灰尘含量降低到可接受的水平。在探测器的安装过程中,灰尘也会沉积在不锈钢网架和有机玻璃表面,无法完全去除,因此,整个直径50米高80米的地下实验大厅被做成洁净间,每天监测灰尘含量和氦气含量。有一支队伍专门研究清洗方法,另一支队伍研究如何提高实验厅的洁净程度。按设计,2万吨液闪中的灰尘总量不超过0.008克。

三、国际合作

大亚湾和江门实验在规划阶段就确定,按国际惯例开展国际合作,吸引国际贡献参与探测器建设和运行。大亚湾国际合作组由来自中国(包括香港和台湾)、美国、俄罗斯和捷克4个国家34个研究单位的200多名研究人员组成,后期增加了智利。江门国际合作组由17个国家74个研究单位的700名研究人员组成,在规模上得到了很大的发展,主要合作伙伴也由大亚湾时的美国变为欧洲。

在大亚湾提出设想时,为推动国际合作,2003

年11月在香港、2004年2月在高能所召开两次专题国际研讨会,寻找合作者。第一次研讨会的参与者都是华人科学家,但了解到大亚湾的地理优势后,第二次研讨会会有不少美国科学家参加,奠定了国际合作组的雏形。由于对国内水平不放心,有一些潜在的合作伙伴选择了加入法国实验,例如一个我们曾试图争取的日本团队,认为法国实验会先于我们成功。不过美国能源部在比较了实验的科学潜力后,支持部分美国科学家加入大亚湾,投入3400万美元用于大亚湾建设,是其在海外投资仅次于欧洲核子中心大型强子对撞机(LHC)的粒子物理项目,也是当时我国最大的基础科学国际合作项目。

如果说大亚湾国际合作的成功一定程度上依赖于地理优势,江门的国际合作则受益于大亚湾建立的国际名声。我们2012年底在深圳召开了一次国际研讨会,邀请可能的合作者参观大亚湾实验,探讨合作进行江门实验的可能性。此后两年中召开了4次筹备会议,于2014年7月成立了国际合作组。此后,参与合作的国家、单位和人数增长了约1倍。国外合作者最主要的是意大利、法国、德国、俄罗斯,国际贡献超过3000万欧元。

令人遗憾的是江门实验仅有两家美国大学参与。早期,大亚湾实验的美国合作者对江门实验是非常积极的,参与了概念设计报告和物理黄皮书的撰写,但最终未获美国能源部的支持。原因是多方面的,最主要的是美国将本土的长基线加速器中微子实验DUNE列为其粒子物理未来的旗舰项目,要求中国能对等参与,而在国内很难找到途径申请大



图4 江门国际合作组

规模经费来参与国外项目。意大利是对江门中微子实验投资最大的国外合作方,也一直要求我们加大参与意大利项目的力度。因此,未来如果想进一步扩大国际合作的话,也需要足够的对外投入。

四、人才培养

大亚湾实验是国内第一个大规模中微子实验,早期仅有几个人参与,后来逐步通过自主培养和吸收北京谱仪实验的研究人员等方式发展到上百人的队伍,其中高能所职工约50人。完成北京谱仪III重大改造工程后,部分探测器队伍成为大亚湾建设的主力。物理分析的青年人才主要从研究生开始自主培养,也有北京谱仪培养的优秀研究生加入。

值得强调的是,大亚湾高水平的国际合作环境对自主培养优秀青年人才起到了重要作用。每个重要的物理成果一般都要求两个独立的分析相互验证,结果一致才能发表。同时,正式结果一般采用在分析过程中贡献较大的组的结果。在同样的国际标准下,在国际竞争的环境中,青年人才更容易成长。

高能所参与江门项目的正式科研人员接近一百人。大亚湾实验培养的一批具有国际视野和管理才能的高水平科技人才,以及中微子物理方面的青年人才,成为顺利开展江门中微子实验的中坚力量,也从国外吸引了不少优秀人才加入。

五、未来展望

江门中微子实验计划2023年建成。除了测量中微子质量顺序外,还有非常丰富的物理研究潜力,在多个方面都能达到国际领先。

利用反应堆,可以在6年内将质量顺序确定到3倍标准偏差。如果与江门探测到的大气中微子结合,可以显著地提高实验灵敏度。目前国际上有美

国南极冰立方实验、长基线加速器实验DUNE、法国ORCA实验、日本顶级神冈实验计划测量质量顺序。江门中微子实验将最先建成,有望率先确定中微子质量顺序。

利用反应堆,还可以精确测量6个中微子振荡参数中的3个到国际最高精度,比目前精度提高10倍以上,具有不可替代性。

超新星在宇宙演化中起着重要作用,其爆发机制尚未得到验证。中微子带走了超新星爆发时99%的能量,携带其他观测手段无法探知的内部信息。迄今为止,只观测到一次超新星中微子,共20多个。一次典型的超新星爆发,江门实验可以探测到约8000个中微子,是唯一可以探测到全部味道中微子的实验。

地球中微子由地球内部的铀、钍等放射性元素衰变时释放,是地热的重要来源。目前共探测到约100个地球中微子,而江门实验建成后每年可探测到400个,有望首次对不同地球物理模型给出判定,为地幔对流模式、地磁场形成等提供依据。

江门实验将是未来太阳中微子研究中最领先的实验,也将在质子衰变、超新星背景中微子、暗物质寻找等多项研究中做出独具特色的一流成果。

在完成质量顺序测量后,依靠巨大的体量和优异的性能,可以在2030年左右将江门中微子探测器升级为无中微子双贝塔衰变实验,在中微子是否为自身的反粒子问题上,得到国际上最领先的结果。

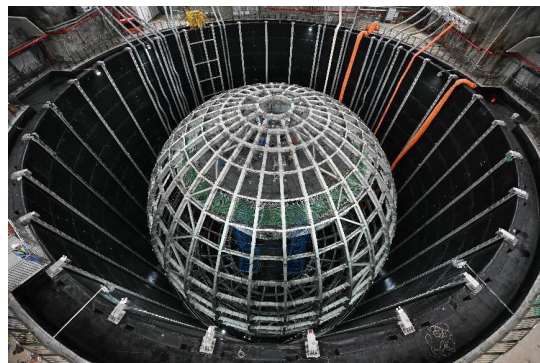


图5 建设中的江门中微子实验探测器