

捕获变身的“中微子”

(上接第一版)

极目远望,蓝天白云,平静的大海上波光粼粼。这里紧挨着核电站的反应堆。高能所的人对核电站旁边有这样一座花岗岩的小山倍感亲切。苍天是不是在眷顾中国高能物理学界?

“核电站在发电时,会产生大量中微子,反应堆功率越大,释放中微子越多,测量精度越高。”王贻芳介绍说,“我们考虑在大亚湾核电基地建实验室,因为大亚湾核电站功率高,是世界第二,同时大亚湾和岭澳两个机组附近均有山体,在山体下建实验室,可利用其岩石覆盖有效屏蔽宇宙线本底对实验结果的干扰。”

如此优越的实验地点,在世界其他地方是很难找到的。

其实,在登上排牙山之前,王贻芳已勾勒出实验蓝图,在参加高能物理学界的各种会议时,他将设想告诉了国际同行。

王贻芳将实验设计成多个中微子探测器模块。不建造一个大的整体探测器(一般认为只有体积大才能提高探测的精度),而是做成几个小的、模块化的探测器,这是中国人的首创。它不仅便于实验中探测器的远近点交换,而且也减小了探测器的体积,可使隧道截面不至于过大,便于安装。

事实证明了这个想法的有效。大亚湾的工程建设虽然在完工时间上晚于韩国,但探测器体积小,在洞外已安装完毕,运到地下大厅,稍加调试就可以取数工作。而韩国却要将各种零部件拆解后运到地下,并且在地下组装,这无形中耽误了不少时间。

大亚湾实验也是全球实验中唯一采用同一实验室多模块探测器的中微子实验。其结果是使实验误差降低了“根号n倍”——在远点设计安装了4个探测器,使探测误差降了2倍,在近点设计安装了2个探测器,使误差降低了1.4倍。

大亚湾中微子工程的立项十分艰苦。最开始,王贻芳四处游说这个项目。但有人告诉他:“仅凭你个人一说,国家就敢给你投钱?”

王贻芳意识到要有专家们的认可和推荐。2005年4月,香山科学会议专题讨论“中微子振荡与反应堆中微子实验”。院士、专家讨论的中心就是在中国建大亚湾中微子实验的问题。王贻芳详细介绍了有关大亚湾中微子实验的全部设想。相关课题组的研究人员也在会上做了报告。

中国物理学界的多位重量级人物,高能所的多位院士云集一堂,提问、回答,讨论,再提问,再回答,再讨论。两天后,与会者一致支持进行中微子实验。

听说大亚湾实验设计独特,加上环境得天独厚,美国能源部主动放弃了自己的两个实验方案,转而加入中国的大亚湾实验。这也是美国高能物理在海外的第二大投资。

很快,在王贻芳等人的联络下,大亚湾项目成了一个有7个经费来源、合作单位达38个、250位科学家参加的大科学工程。

大亚湾实验得到了科技部、中科院、国家自然科学基金委、广东省、深圳市和中国广东核电集团的支持,6家单位共同出资1.57亿元人民币,加上美国能源部出资3400万美元(折合项目建设经费8000万人民币),大亚湾中微子实验成为中国基础科学领域最大的国际合作项目。

其中中广核集团出资3500万元,开了中国企业赞助基础科研的先河。



工作人员在制备液闪。

“大亚湾实验开创了国家、地方政府、企业及国际合作共同支持基础研究的先例。”高能所所长陈和生院士说。

为捕获神秘的中微子踪迹,“猎手”们布下天罗地网

隧道尽头漆黑的三号大厅,就好像一家大型电影院。四周是岩壁,中间挖出一个深深的水池。池上遮盖着阻性板探测器。池中有3个“大罐子”——检测中微子用的液体闪烁体容器,也叫中心探测器,每个重110吨。

大亚湾实验的原理是这样的:第一,核反应堆每天产生10¹⁸个反中微子,它们从核燃料棒中飞出,穿过实验装置时,极少数(1000个左右)会跟质子发生反应,产生光子和中子;中子还会跟探测液体反应,放出光子。这些闪光会被记录下来。

第二,距离燃料棒较近处和较远处的探测器,如果读数差别明显,就说明中微子在从近到远的1000多米“变身”了。且根据能量谱线的变形规律,可推断出 θ_{12} 的大小。

大亚湾实验项目副经理,中科院高能物理所研究员杨长根告诉我们,6个中心探测器分别布置在两个近点和一个远点。近点在地下100米,距反应堆400米;远点在地下350米,距反应堆1.6公里。探测器位于地下的好处是,宇宙射线造成的干扰性闪烁(本底)会被降低200倍(近点)到1万倍(远点)。

中心探测器的直径是5米、高5米。外壳钢制。内装有可以吸收中微子并放光的“液体闪烁体”(简称液闪,主要成分是线性烷基苯)。它放在2.5米深的水下,这样就可以屏蔽花岗岩的放射线。

探测器内含三层液体,最里面是钪钪的液闪,中间是20吨普通液闪,外面是40吨矿物油,外池里有2000吨超纯净水。

水池壁上,还有大罐子内壁分别镶嵌了双层光电倍增管——它们的模样好似大号的浴室电暖灯,用途是侦测每一次微弱的闪光。

中微子与普通物质反应的概率实在太低了,一个中微子要飞过一光年厚的石墨板,才有可能发生反应。因此,科学家寄希望于用非常多的粒子,拦在中微子流的路上,期望它们能撞上几个,这是中微子探测的基本办法。比如日本超级神冈探测器,坐落在地下的巨型水箱可以装进一栋大楼,11100个光电倍增管倒映在蓝水里,简直就是某种现代视觉艺术。

水和烷基苯,单位体积内含质子比较多,因此被选择作为靶子,迎接核反应堆射出的反中微子。

“比起法国CHOOZ实验,我们提高了液闪的数量和品质,”杨长根说,“这样统计量就更高,而我们的统计误差降低了一个数量级。”

在大亚湾中微子工程竣工之前,记者曾在地下实验大厅看到“液闪”的配置过程。负责这项工作的丁雅韵博士告诉记者,使用的液闪是中科院高能所研究小组自己研发配制的。工程总共配制了195吨液闪。

液闪要求长时间澄清,让无机物钪与有机物烷基苯稳定混合在一起,并保持长期透明,是科学界的一大难题。法国的CHOOZ实验,因为液闪只使用了100天就变得浑浊,被迫终止。因此可以说,配制液闪是工程建设中的关键技术问题。

配制液闪是一个漫长而艰苦的过程。工程未动,研究液闪就已经先行一步。

早在大亚湾工程开工之前两年,高能所的相关研究人员就着手研制液闪的配方和加工方案了。他们先配制小规模液闪,经过无数次试验后,开始放大到700升,之后又放大到4吨,并且在4吨的级别上做了几次试验。“经过几年摸索,我们把液闪配方的稳定流程搞清楚。”丁雅韵说。

实验人员在液闪中掺入0.1%的钪,这样可以缩短中子的俘获时间,将信号能量提高到远离天然放射性能量区域,从而降低本底噪声。

在实验装置上方,覆盖着“阻性板探测器”,它可以测量穿入水池的宇宙射线——每天有360个中微子相关的闪烁,但却有25万个宇宙射线造成的闪烁,阻性探测板的作用就是帮助把后者造成的数据筛出去。

3套精密的刻度系统,建立起物理值和数据读数的转化标准。水池内壁和探测器内壁还设置了反射层,以利于观测微弱的闪光。

中心探测器在洞外组装好之后,搭载一个万向运载车到试验大厅里。探测器相对较小,这样开掘隧道就不必太宽,可以节约成本。液闪则在洞里调配和灌装。

这一套系统的设计,凝结了实验人员尤其是中国科学家的智慧。事实证明,它成本低而效率高,是大亚湾赢下探测中微子这场国际竞赛的关键。

实验数据,最终采用的正式结果是中方的

在大亚湾中微子实验的装配大厅里,记者看到墙上悬挂着中、美和捷克的地图。一旁交流用的白板上,是各种语言和图表。这暗示着,不是一个国家,而是联合的力量取得了中微子探测的成果。

但在这一规模庞大的国际合作项目中,中国的科学家们无疑作出了最重要的贡献,他们的创新实力和实验成果,为中国的高能物理界争得了荣誉。

王贻芳始终强调要把大亚湾实验“当成我们自己的事情”“不要等外国人”。正是在这种理念主导下,中方的参与人员格外认真对待工作。



建设中的实验大厅。

方的分析是最快的。成果发布时有中美双方结果的相互校验,而发表的文章中采用的正式结果是中方的。其物理分析的高速度、高水平让国际同行印象深刻。

曹俊说,国际合作组成立不久,中方的物理分析组就开发出了相应的数据分析软件,并进行了多次模拟演练,为实战分析积累了经验。在最后的冲刺阶段,数据分析小组夜以继日,比美方先得到了分析结果。“我们未雨绸缪,把物理分析的准备工作都做在了前面。有过演习,真上战场效率就高了。”

夺回时间,大亚湾实验组抢先撞线

去年8月15日,大亚湾的两个中微子探测器开始运转了,它探测到了来自核电站反应堆群的中微子并获取数据。一场高能物理领域的国际竞争进入最后的冲刺阶段。

大亚湾中微子实验有它的优势,这就是精度。早在2003年时,国际物理学界普遍认为 θ_{13} 可能很小,因此大亚湾实验提出将测量精度提高到0.01。在各国竞争中,只有大亚湾实验的设计达到了这一精度。法国的CHOOZ实验和韩国的RENO实验,虽然在外部和条件和设计精度上不如大亚湾,但也没有放弃竞争。3个实验的目的完全一致,这在高能物理学界是少见的。

但事实证明, θ_{13} 不需要这么高的精度也有可能测出结果,这样探测中微子的竞争局势就更加激烈了。

2011年6月,日本的中微子实验装置T2K的阶段性观测数据显示: θ_{13} 不为零的概率为2.5倍标准偏差。按照惯例,置信度在3倍标准偏差以下的测量结果叫“迹象”,处于3到5倍标准偏差之间的结果叫“证据”,只有超过5倍标准偏差的实验结果才能叫“发现”。

日本仓促发布结果,是因为3月的地震破坏了给T2K提供中微子源的加速器,一时又修不好。随后,美国的MINOS实验也跟着放出了非正式的报告, θ_{13} 不为零的概率为1.7倍标准偏差。法国也报告了1.7倍标准偏差的结果。

或许是意识到大亚湾中微子实验的设计精度和实验规模远胜于自己,国外同行普遍希望能在大亚湾中微子实验开动之前先做出一些成果。

在中国,除了科技界外,方方面面也投入了这场科学竞争。

为了建设大亚湾中微子工程,2006年年底,深圳市政府专门召开了有20多个委办局领导参加的协调会,中心内容就是如何保证大亚湾中微子工程顺利开工。中科院高能所虽然是大亚湾中微子工程的项目建设单位,但它在深圳没有一寸土地,也不是深圳地方的一个法人。无地、无法人资格的单位是不能向深圳市政府申请开工的。协调会决定,以深圳大亚湾核电站的所有者中国广东核电集团的名义申请建设大亚湾中微子工程,政府各部门予以支持。

这让中国科学家备受感动。中微子工程不会为深圳市带来一分钱的利税,也不会给中广核集团带来任何利润;反过来工程建设只会给深圳市和中广核带来无限多的麻烦。为了中国科学家能够探索未知世界,深圳市和中广核鼎力相助。

而大亚湾中微子实验的施工进度却比预期要慢,这主要是因为距离核电站太近,施工中的爆破受到限制。

“大亚湾核电站的一位经理说,你们施工如果出一次事故,我就宣布你永远停工。”王贻芳说,“能够理解他的严厉。因为如果出了事故,没有人说是大亚湾中微子工程出了问题,都会说是大亚湾核电站出了问题,影响太大。”

“为了执行核安全标准,我们的隧道建设延长了约2年。”大亚湾实验总工程师庄红林说,这次工程实施了近3000次爆破,开掘了3000米地下隧道和5个地下实验厅。

“为了核电站的安全生产,我们必须要让爆破量达到最小,比最安全标准还要安全。”中铁十五局集团城轨公司的项目经理车红星说,最小的一次爆破仅使用了200克炸药。

为了把时间赶回来,实验厅刚挖好,设备安装就开始了。新挖好的岩洞内又热又潮湿,进去20分钟就浑身湿透。大家将5个超大罐子搬进液闪大厅,每天到驻地后,甚至累得“只能躺着洗个凉水澡”。

有一次,装配探测器的现场,吊车用的一个螺栓坏了,由于是特制的,必须从河南取来,但快递又来不及。为了不影响整个工程各方的施工进度,马上有人坐飞机去取,在机场完成交接后即刻返回。

为了抢出成果,实验人员修改计划,不等8个探测器全部到位,以6个探测器提前累积数据。而高能物理所的数据分析提前演练,使它们以最快速度得出了结果。

论证4年,施工3年,安装实验设施1年,取数55天,分析只用半个月,这就是大亚湾实验迄今的历程。在中科院高能所宣布实验结果后3周,韩国同行发布了类似的结果。

正是实验装置建设阶段的不分昼夜、无假期和16个小时工作制,以及实验阶段的巧妙构思,夺回了时间,让大亚湾实验组抢先撞线。

精确测量,振奋了国际高能物理界

θ_{13} 被精确测量,而且数值较大,这振奋了国际高能物理界。大亚湾的实验成功后,多个国际机构立刻发来贺电。

美国Arogonne国家实验室物理部主任哈里·维尔茨教授表示:“现在,我们终于可以更精确的部署未来的中微子研究计划了。”

日本T2K大型粒子探测实验的发言人表示,中微子振荡实验带来的光明前景令人激动不已,“或许在我们有生之年就可以揭开物质层次的奥秘”。

而李政道先生则在当天给高能所发来邮件:“这是物理学一个有基础重要性的成就。”

美国《科学》杂志在线评价说:“此次成果完成了一幅中微子的概念

图,这为‘中微子与反中微子行为间不对称’的实验铺平了道路,这样的实验将帮助解释为何现在的宇宙中有如此多的物质,却只有那么一丁点儿的反物质这一问题。”

发现反物质之后,人们认识到宇宙的奇怪安排:物质和反物质不对称。按理说,物质和反物质总是成对出现,就好像虚空中打开了一本书,有封面就有封底。而物质和反物质相遇会湮灭并放出能量,就好像书又合上归于虚空。

但科学家既没有观察到宇宙中大量存在反物质,也没有观察到正、反物质湮灭放出的射线。也就是说我们这个宇宙的物质远远多于反物质。这就违背了“成对出现,成对消灭”的均衡。

而李政道和杨振宁1956年提出的宇称不守恒及其后发展出的电荷与宇称反演不守恒,为解决这个疑难提供了一种思路:或许正、反物质在衰变中是不对称的,一个衰变得快,另一个衰变得慢。

中微子就是观察这种不对称性的一个好窗口,因为只存在左旋的中微子,而它的镜像对称——右旋中微子却不存在。这在粒子中独一无二。

如果反中微子与中微子变化的方式有差异,或者如科学家所说,只要找到中微子的“电荷—宇称对称性破坏(CP破坏)”,或许就能理解为什么宇宙中的物质比反物质多了。

包括大亚湾中微子实验在内,物理学家试图定量分析的中微子振荡模式,由6个参数决定:除了3个混合角 θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13} 外,还有两个质量平方差 Δm_{21}^2 和 Δm_{32}^2 以及一个电荷宇称相位角 θ_{CP} 。 θ_{CP} 也用来对在物质和反物质之间的不对称性进行描述。

此前, θ_{13} 与 Δm_{32}^2 已通过大气中微子振荡测得, θ_{12} 与 Δm_{21}^2 亦通过太阳中微子振荡测得。 θ_{13} 值因此相当重要,因为在此基础上可以进而测得 θ_{CP} 。而大亚湾的成果,给了全球高能物理学界以信心。

大亚湾中微子实验将继续运行3至5年,将测量精度再提高4倍左右。同时,高能所的科学家们已经开始着眼于探索中微子的第二个未解之谜——质量顺序问题,这便是正在酝酿中的大亚湾中微子实验二期工程。

二期工程需要更大的探测器,更高的灵敏度、更长的探测距离以及更多的核反应堆。经初步勘察分析,距离大亚湾核电站60公里处的惠州某地可同时探测来自大亚湾反应堆群和海丰反应堆群的中微子,是当前最佳的实验地点。

除了确定中微子的质量顺序,大亚湾实验二期还具有其他丰富的科学目标,如测量全部6个混合参数中的4个到1%的精度,进而判别是否存在新物理;在比较完整的参数空间内判定惰性中微子是否存在等。

目前,大亚湾实验二期已形成概念设计方案,正在进行关键技术预研,以确保在激烈角逐的国际中微子实验竞争中把握先机。

目前,全世界有10多个探测项目,有的在南半球冰层下,有的在地中海的波涛中,有的在荒野的矿井里,正试图分析中微子的蛛丝马迹,解答宇宙存在之谜。它们的运气会像大亚湾一样好吗?

未来畅想,多少年后,中微子或许会改变我们的生活

科学家已经可以生产和探测中微子,但中微子还没有在日常生活中服务人类。将来会怎样?问及科学家,谁也没有给出肯定回答,不过人们可以尽情地畅想,科学家也正在摸索种种应用的可能性。

今年早些时候,美国费米实验室利用一个实验装置,成功地用中微子进行通讯。科学家把“中微子”这个词变成二进位数据,传送到1公里以外。大概10秒钟传递一位“0”或“1”信息,错误率在百分之一。由于中微子可以基本不受阻碍地直线穿过物质,这种通讯不会受海水和底层的阻挡,也无法干扰、拦截和破解,也许有一天会成为可靠的通讯方式。还有人设想,它是最适合人类和外星人联络的技术。

而由于中微子不带电,不会被物质阻挡,不会被磁场偏转,不会与宇宙背景辐射相互作用,所以用它作探针,可以直达宇宙深处或地心深处,在天文和地质方面有广泛用途。

在天文观测上,中微子携带了许多天体信息,会极大推动天文学发展。目前世界上正在建设的中微子望远镜包括贝加尔湖、地中海和南极冰层中的共6个探测器,科学家希望通过它们来测量那些来自宇宙深处、数量相当稀少的超高能中微子,并确定它们所对应的天体源方位。比如在南极的“冰立方”工程,用热水钻出86个深达2000米左右的冰孔,将探测用的光电倍增管放入孔中。它是历史上最庞大的科学装置之一。

地质方面,科学家正设想通过观测中微子,对地壳、地幔甚至地心中含有的大量铀和钍元素进行研究和分析,以探索地球深处的奥秘。此外,当科学家成功掌握了中微子的振荡几率后,便可进一步通过分布全球的几十个中微子源和探测器,展开组合探测,分别获得地球不同深度处的物质密度,如同给地球进行CT扫描一样,获得地球内部信息。

中微子的另一个可能的应用,即核反应堆的安全检测。由于反应堆在运行过程中会释放出大量中微子,通过建造一个中微子探测器,可以实时监测反应堆的运行。该方法目前已经在试验阶段,如果成功,可以很快投入实用。也许这会有有关中微子的第一个专利。

在科学家的眼里,基础研究的重要性远远大于它的实用性。中科院高能所的科学家举例说,400年前,丹麦科学家第谷仰望星空30年,积累了大量的天文数据,由他的弟子开普勒总结成三大定律,成了牛顿提出力学体系的依据。谁能想到,天天盯着行星看而窥得的行星运动的奥秘,几百年后却成为我们修造高楼大厦、桥梁、飞机、汽车、发射飞船卫星的根本?同样的,当年科学家们发现了核,谁能想到它能发电为核爆炸,谁又能想到科学家们发现核还可控制,进而建造核电站。

或许,几十年或一百年后,中微子的知识也会改变我们的生活。