

大亚湾反应堆中微子实验站^{*}

中国科学院高能物理研究所 中国科学院基础科学研究所

(北京 100049)

(北京 100864)

关键词 中微子, 探测器

1 科学背景

大亚湾反应堆中微子实验站位于广东大亚湾核电站内,其主要科学目标是通过探测来自反应堆的中微子,精确测量中微子混合角 θ_{13} 。

粒子物理的研究结果表明,构成物质世界的最基本的粒子有 12 种,包括 6 种夸克、3 种带电轻子和 3 种中微子。中微子几乎不与物质发生作用,性质独特,质量非常小,极难探测到,但在宇宙中其数量与光子一样多,对研究宇宙的形成和演化有很大的作用。1930 年泡利提出中微子存在的可能;1956 年莱因斯首次探测到中微子,获 1995 年诺贝尔奖;1962 年莱德曼、舒瓦茨、斯坦伯格发现第二种中微子,获 1988 年诺贝尔奖;1998 年日本的超级神冈实验以确凿的证据证明,中微子在飞行途中会发生振荡,即从一种中微子变成另一种,同时也表明中微子存在微小的质量,从根本上改变了人们对中微子的看法。完成超级神冈实验的小柴昌俊与做太阳中微子实验的 Ray Davis 获 2002 年诺贝尔奖。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”。

在中微子研究中,振荡参数中的电荷宇

称破坏(CP 破坏)大小与宇宙起源中的正反物质不对称有关,具有极为重要的科学意义。而测量 CP 破坏,必须首先确定混合角 θ_{13} 的大小。如果它较大,则可以通过改进现有加速器技术测量 CP 破坏;如果它太小,则需要开发新的技术手段才有可能,同时也意味着中微子存在新的对称性质。因此,精确确定混合角 θ_{13} 的大小对中微子研究具有指路标的作用,是中微子研究的当务之急。由于科学意义重大,国际上曾先后提出了 8 个实验方案。由我国科学家提出的大亚湾实验方案具有独特的地理优势和独到的设计,作为中微子源的反应堆与探测器距离近,其通量比太阳和大气中微子高出几个数量级,加之周围有山故本底干净,因而探测灵敏度高,是唯一能起到指路标作用的实验,因而得到了国际上的广泛支持。例如美国能源部就放弃了支持本国的两个实验方案,转而支持美国科学家加入大亚湾实验的合作。

中微子研究方兴未艾,关于它的未解之谜包括: θ_{13} 的大小、是否有大的 CP 破坏、质量等级、是否破坏 CPT 对称性、混合矩阵的么正性、质量大小、质量起源机制、是否为本身的反粒子、是否存在惰性中微子等等。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,它仍将是粒子物理的前沿热点之一。中微子天文学和地球中微子研究也在飞快发展。大亚湾中微子实验是我国开展中微子实

^{*} 本文由中科院高能物理研究所大亚湾工程副经理曹俊研究员(caoj@ihep.ac.cn)执笔
收稿日期 2011 年 4 月 25 日



中国科学院

验研究的切入点,将于2011—2012年逐步投入运行,有望取得重大科学成果。

2 装置综述

2003年,我国科学家提出了利用大亚湾核电站测量 θ_{13} 的实验构想。2004年在高能物理所创新经费的支持下开始了前期研究工作。2005年4月第250次香山科学会议达成共识:中国要尽快发展中微子物理,在基础研究的国际前沿占领制高点,并逐步制定中微子物理研究的长期发展计划;利用大亚湾反应堆得天独厚的条件来确定 θ_{13} ,是中国基础科学跨越式发展难得的机遇。2006年国际合作组成立,由中国、中国香港、中国台湾、美国、俄罗斯、捷克的25个研究机构的120名研究人员组成。2006年5月和2007年1月,大亚湾中微子实验先后在中科院和国家科技部立项,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,于2007年10月正式破土动工,目前大亚湾反应堆中微子实验站的建设已接近尾声,3个实验厅中,大亚湾近点实验厅将于2011年夏天投入运行,岭澳近点和远点实验厅将于2012年夏天全部投入运行。

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。该国际合作组不断发展壮大,目前由来自6个国家和地区的38个研究机构,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3400万美元,研究人员约100人,承担约一半的探测器研制。其他国家和地区各有几十万至上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,同时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。

大亚湾中微子实验装置由地面设施、3个地下实验大厅和2个功能厅组成。地面设施包括地面装配大厅、控制室和风机房。探

测器位于地下实验大厅内。两个近点实验大厅位于地下100米深,分别距大亚湾核电站和岭澳核电站约500米。远点实验大厅位于地下360米深,距各反应堆约2公里。两个功能厅也位于地下,分别用于水净化和液闪生产存储。各实验厅由水平隧道相连。

在每个实验大厅内各有3种探测器,分别是探测中微子的中心探测器和探测宇宙线的水切伦科夫探测器和阻性板探测器。每个中心探测器为具有三层嵌套结构的圆柱形,直径5米,高5米,重110吨。共有8个中心探测器,两个近点实验大厅各放置2个,远点放置4个。中心探测器的最内层是一个直径3米、高3米的薄壁有机玻璃罐,内装20吨掺钆液体闪烁体,作为探测中微子的靶物质;中间是一个直径4米、高4米的薄壁有机玻璃罐,内装20吨普通液体闪烁体;最外层是不锈钢罐,内装40吨矿物油。192个8英寸光电倍增管安装在矿物油中,探测中微子产生的光信号。中心探测器放置在水池中,由2000—3000吨纯净水屏蔽。水池中安装200多个光电倍增管,兼作水切伦科夫探测器,与水池上方覆盖的阻性板探测器一起,探测宇宙线粒子。

大亚湾中微子实验项目按大型粒子物理实验的国际惯例组织和管理。由高能物理所与代表美国能源部的两个国家实验室、其他国家和地区的代表研究机构等分别签署合作备忘录,确定各方的经费投入和工作责任范围。国际合作组内部按合作组章程组织和管理。中方与外方各设发言人一名,负责实验的日常运行,在外代表实验合作组。重大决策由执行委员会或合作组大会决定。执行委员会负责重要的科学、技术与管理决定。研究所代表委员会由各研究单位派一名代表组成,负责接纳新的合作机构与新成员,或移除合作机构与成员,选举发言人、执行委员等。另设多个专门委员会。合作组大

会包括实验合作组内的所有成员,对所有决定有最后决定权。

在实验建设阶段,由项目经理和技术委员会负责项目建设决策,其下设联合项目办公室和各系统,其上有由各实验室主要负责人组成的实验监管机构,对中国政府部门和美国能源部负责,还有国际资金委员会和项目顾问团负责协调工作。在建设现场,有现场经理和现场办公室负责日常管理。在实验投入运行后,将成立运行委员会和现场运行办公室,负责实验站的运行维护工作。

3 研究综述

大亚湾反应堆中微子实验的主要科学目标是测量中微子混合角 θ_{13} 至 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.01$ 的精度,这比现有实验精度提高了十几倍,也远远好于国际上其他实验的类似测量。两个近点实验大厅分别监测来自大亚湾核电站两个反应堆和来自岭澳核电站 4 个反应堆的中微子,远点位于反应堆中微子的振荡极大值处,如果中微子发生振荡,我们将看到远点探测器处的中微子数目较预期减少,能谱发生有规律的变形。通过远近相对测量,抵消反应堆流强的不确定性和探测器误差,实现精确测量。

大亚湾反应堆中微子实验将第一次对中微子质量平方差 Δm_{31}^2 进行直接测量,其精度约与大气中微子实验的测量精度相当,可对现有理论框架做出检验。国际上关于惰性中微子的研究扑朔迷离,大部分实验不支持惰性中微子的存在,也有 4 个实验结果在一定程度上证明惰性中微子的存在。大亚湾实验将可在部分参数空间内澄清该问题。

大亚湾实验的近点探测器将能高精度地测量反应堆中微子流强,可提高反应堆中微子流强的计算精度。在国际原子能机构的支持下,目前国际上有多组实验小组,利用中微子探测技术进行反应堆增殖监测研究。

提高反应堆中微子流强的计算精度,将提高该监测能力。

对近距离超新星爆发的观测在天文学和宇宙学上极具价值,但观测机会极为罕见。大亚湾实验也可成为超新星预警系统的一员,对超新星爆发进行观测。虽然大亚湾实验本身在事例的统计量方面很难与 Super-K 等实验竞争,但超新星中微子在全球各地均被观测到具有极为重要的意义。通过全球网络的观测,可决定地球物质效应对中微子振荡的影响。

此外,也可利用大亚湾高精度的宇宙线探测器进行不同地层深度的宇宙线研究、地球中微子研究等。大亚湾远点实验厅在地下 360 米深处,可降低宇宙射线 1 万倍,可用于进行一些其他的低本底实验研究。

4 发展展望

大亚湾中微子实验站将于 2011—2012 年逐步投入运行。投入运行后,将很快达到世界最高精度,并在 3—5 年内达到实验设计目标: $\sin^2 2\theta_{13} < 0.01$ 的精度。该结果将不仅精确测量一个自然界基本参数,也将对未来中微子实验研究指明方向。

大亚湾中微子实验是我国进行中微子实验研究的切入点,也是我国第一个大型的地下低本底实验。在装置研制过程中,积累了大量相关研究和技术成果,例如低本底探测器技术、掺钆的液体闪烁体技术、高精度探测器、精确的反应堆中微子流强计算等。在大亚湾实验的基础上,正在考虑未来进行的更大规模的大亚湾二期实验,将具有非常丰富的科学目标,包括测量全部 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;中微子的质量等级;超新星中微子;在比较完整的参数空间内判定惰性中微子是否存在;与地质与地球物理工作者合作研究地球中微子等。

(相关图片请见封二、封三)



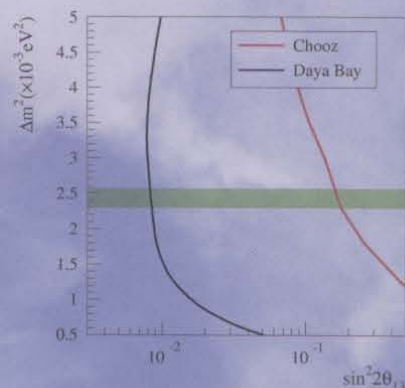
中国科学院

大亚湾反应堆中微子实验

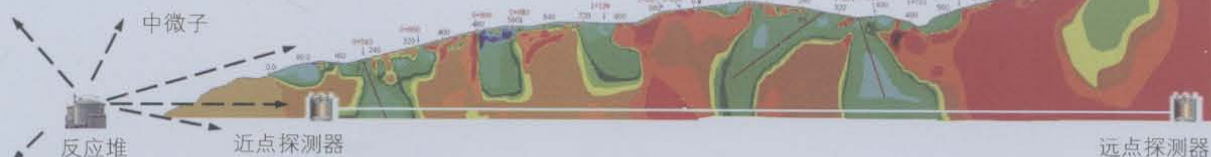
Daya Bay Reactor Neutrino Experiment

大亚湾反应堆中微子实验

是一个建设中的大型粒子物理国际合作实验。通过探测核反应堆产生的中微子，该实验将精确测量自然界中最基本的未知参数之一——中微子混合角 θ_{13} ，其数值大小决定了未来中微子物理研究的发展方向，并与宇宙中“反物质消失之谜”有关，具有重大科学意义。该实验站由三个位于山腹内并通过水平隧道相连的实验大厅等组成，其中大亚湾近点与岭澳近点位于地下 100 米，距反应堆约 400 米，远点位于地下 350 米，距反应堆约 2 000 米。通过远、近站点的相对测量，其 $\sin^2 2\theta_{13}$ 测量精度将达到国际最好的 0.01



- 探测器置于地下，可屏蔽宇宙线，将降低本底 200 倍（近点）至 10 000 倍（远点）
- 反应堆各向同性地释放中微子。中微子几乎不与任何物质反应，因此远点的中微子流强几乎不会因为山体吸收而减少



$$V_e = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} = V_e + V_\mu + V_\tau$$

反应堆产生的中微子在飞行途中振荡为其他中微子

大亚湾反应堆中微子实验

Daya Bay Reactor Neutrino Experiment

该实验包括 8 台中微子探测器，分别安装于 3 个实验大厅中。其中大亚湾实验大厅将在 2011 年夏天完成设备安装，岭澳和远点实验大厅则在 2012 年夏天完成设备安装

Far Hall
远点实验大厅

Ling Ao Hall
岭澳实验大厅

LS Hall
液闪厅

Ling Ao II NPP
岭澳二期核电站

Ling Ao NPP
岭澳核电站

Daya Bay Hall
大亚湾实验大厅

Entrance
隧道入口

Daya Bay NPP
大亚湾核电站

