

大亚湾与反物质之谜

曹俊

2007年1月11日,两辆满载游客的大巴从香港驶入深圳,来到该市东北50千米外的大亚湾核电站。这不是什么新鲜事——大亚湾核电站是中国大陆第一座大型商用核电站,加之风景优美,20年来已接待50多万来自世界各地的参观者。然而这批游客却与众不同,他们对先进的核电设备不感兴趣,也无心观赏迷人的南国海滨风光,却



对附近连绵不断的山丘指指点点,兴奋之情溢于言表。这是一批来自世界各地的物理学家,刚参加了在香港召开的“中微子物理与中微子宇宙学”研讨会。他们知道,几个月以后,一个大型中微子实验基地——中国科学院大亚湾中微子实验站,将在这里破土动工。巨大的中微子探测器将在数百米深的山腹之中不断捕捉来自核反应堆的中微子,以破解一个个宇宙奥秘——为什么宇宙中不存在反物质?我们能不能用一个简单的公式,原则上描述所有的自然现象?……

大亚湾,不仅以先进的核电基地和美丽的自然风光吸引世人的目光,也作为一个重要的科学基地受到国际科学界的重视。2006年7月,著名的美国《科学》杂志在“新闻聚焦”栏目中,以《中微子探索者到核电站解决反物质缺失问题》为题,对筹建中的大亚湾中微子实验做了专题报道。是年11月,美国物理学会的《今日物理》杂志登载了题为《反应堆实验寻找未知的中微子混合角》的文章,另一家专业杂志《对称》则刊载了《在中国捕捉中微子》一文,二者都详尽报道了大亚湾中微子实验。而一些影响广泛的媒体,如《纽约时报》和《国际先驱论坛报》等,则将大亚湾中微子实验看作中国基础科学研究飞速发展的一个实例。

这个实验为什么如此引人关注呢?这得从近几年来中微子物理的一系列突破性进展说起。

粒子物理的研究结果表明,构成物质世界的最基本粒子有12种,包括6种夸克、3种带电轻子(电子、 μ 子、 τ 子)和3种中微子(电子中微子、 μ 中微

子、 τ 中微子)。中微子是德国物理学家泡利在上世纪30年代为解释 β 衰变中能量似乎不守恒的现象而提出来的。它不带电荷,几乎不与物质发生相互作用,以致极难捕捉,直到上世纪50年代才被实验探测到。因此在所有基本粒子中,人们对它的认识最晚、了解最少。尽管中微子只参与非常微弱的弱相互作用,却在最微观的粒子

物理规律和最宏观的宇宙起源及演化中起着十分重要的作用。例如李政道与杨振宁提出的宇称不守恒定律即源于只存在左旋中微子,超新星爆发时99%的能量都被中微子带走,等等。实际上,大多数粒子物理和核物理反应都伴随着中微子的产生。例如为太阳提供能量的核聚变,还有核反应堆和原子弹中的核裂变,以及天然放射性、超新星爆发、宇宙线散裂等等。

20世纪60年代,美国的Homestake实验就发现,探测到的太阳中微子比预期少得多,这一现象被称为“太阳中微子失踪之谜”。上世纪80年代,日本神冈实验和美国IMB实验发现,高能宇宙线在大气层散裂产生的中微子中, μ 中微子与电子中微子的比例也与预期不符,这被称为“大气中微子反常”。早在1962年,就有人提出中微子可能存在振荡现象,即在传播过程中由一种中微子转换为另一种中微子。中微子振荡可以解释太阳中微子失踪和大气中微子反常。但是由于中微子实验难度大,精度一直不高,加上理论不够完善,致使中微子振荡一直没有得到广泛承认,而只是试图破解上述两个谜题的众多假说之一。

1998年,日本的超级神冈实验以确凿证据证明了中微子振荡现象。实验以5万吨纯水和1万多个光电倍增管为探测器,在两年的时间内观测到4000多个大气中微子事例。实验发现,电子中微子数目与预期一致,而 μ 中微子则呈现大的上下不对称性,与无振荡假设下的预期结果相差6个标准偏差。这表明,由地下穿越地球而来的 μ 中微子由于传播距

离长,一部分振荡成了 τ 中微子,而来自天上的 μ 中微子则由于传播距离短,还没有发生振荡。此外,对太阳中物质效应(MSW 效应)的理解,也使太阳中微子失踪之谜能够通过中微子振荡定量解释。2001年和2002年,另外两个重要的中微子实验——加拿大的SNO实验和日本的KamLAND实验以更加可信的证据证实了中微子振荡。SNO实验以重水为介质,同时以3种方法探测太阳中微子,证明太阳中微子的总数并未减少,而是其中的电子中微子减少并转换成了其他中微子。KamLAND实验则通过探测反应堆产生的中微子,得到了与太阳中微子实验一致的参数。由于反应堆为人工中微子源,KamLAND的结果又与太阳模型无关,而且排除了其他解释中微子失踪的假说。此后,大气中微子振荡也得到了加速器中微子实验K2K和MINOS的证实。

中微子振荡的一个直接推论就是中微子有质量,而不是以前一直认为的质量为零。这是几十年来第一次发现超出粒子物理标准模型的现象。人们认识到这是发现新物理的突破口和关键,对天体物理与宇宙学也有深远影响,中微子研究导致一个新学科——中微子天文学的诞生。同时中微子本身也有很多未解之谜,比如质量尚未直接测量到、大小未知、它的反粒子是另外一种粒子还是就是它自己等等,以致中微子物理成为当前粒子物理、天体物理、以及宇宙学的交叉研究热点。

中微子振荡规律可以6个参数表示,即2个质量平方差、3个混合角和1个CP相位角。目前由太阳中微子和大气中微子实验已测得其中4个,包括2个质量平方差(其中1个符号未知)和2个混合角。尚未测得的参数包括混合角 θ_{13} 和CP相位角,以及一个质量平方差的符号。CP相位角表征电荷宇称对称性(CP)的破坏程度,而混合角 θ_{13} 则调控CP破坏的效果,这两个参数极有可能解释为什么宇宙中不存在反物质。

根据大爆炸理论,宇宙起源于大约150亿年前的一次大爆炸。宇宙大爆炸理论的一系列预言,如残留的微波背景辐射、天体的光谱红移,甚至微波背景辐射微小的不均匀性,都得到天文观测数据的精确验证。然而一个重要问题仍悬而未决,即反物质的缺失。在宇宙诞生之初,能量转化为物质,根据粒子物理定律,正反粒子应该成对产生、成对湮灭,即宇宙中的正反物质应该一样多。可是目前宇宙中的

天体均为正物质,没有发现反物质天体,也没有观测到正反物质相遇时发生的猛烈爆炸。假如电荷宇称对称性不守恒(CP破坏),正反物质衰变率的微小差别可能使正物质多于反物质,正反物质湮灭之后,剩下的正物质构成了现在的宇宙天体。因为在基本粒子的夸克部分确实观察到了CP破坏现象,所以科学界曾经以为夸克部分的CP破坏可以揭开反物质缺失之谜。为了精确测量CP破坏的大小,美国与日本分别修建了B介子工厂。上千名科学家经过10年研究,发现有两个实验得出了非常一致的结论,即CP破坏确实存在,但破坏程度远不足以解释为什么现在还有这么多正物质存在。测量结果与宇宙中物质的实际结果差了100亿倍。中微子振荡现象的发现为解开这个谜团带来了新的希望。由于中微子难以捕捉,目前还不清楚中微子部分的CP破坏大小。如果CP破坏较大,就可能解释这一现象并解决宇宙大爆炸理论与观测结果的矛盾。这样一来,通过宇宙大爆炸理论,最微观的中微子物理问题与最宏观的宇宙学就有了奇妙联系。

通过长基线加速器中微子实验有可能测量CP破坏的大小。利用加速器产生中微子束流,在几百或数千千米外放置探测器探测中微子,中微子的振荡几率取决于 θ_{13} 、CP相位角以及物质效应的大小。但是由于振荡几率同时跟3个参数有关,很难单独确定其中任何一个参数。因此,首先利用反应堆中微子实验精确测量 θ_{13} 是解决这个问题的关键一步。同时,精确测量这一参数对理解微观世界、发展粒子物理大统一理论也是至关重要的。

这个实验的科学意义显而易见,因此引起激烈的国际竞争,俄罗斯、法国、美国、日本、巴西、韩国都竞相提出方案,希望得到国际支持,在本国开展这一实验。各国科学家(包括中国)甚至联合发表了一份白皮书,敦促各国政府尽快支持该实验。美国物理学会也于2004年底将利用反应堆测量 θ_{13} 列为中微子振荡研究的第一优先项目。中国科学院高能物理研究所的研究人员及时把握这一国际前沿动向,在2003年提出利用大亚湾核电站进行这一实验的方案。同年11月在香港大学召开的一次国际研讨会使国际合作组初具雏形。经过几年的前期工作,由于地理条件优越和前期研究进展迅速,大亚湾实验方案击败其他竞争者,于2006年在中国正式立项并吸引美国、俄罗斯、捷克以及中国香港和台湾的合作

者形成了实力强劲的国际合作组。美国能源部明确表示,不支持美国的两个建议方案和法国方案,只支持大亚湾实验。当初提出的其他7个建议方案中,只有法国方案仍在推进,不过其设计精度只有大亚湾实验的1/3。

在大亚湾进行测量 θ_{13} 的实验具有反应堆功率高、紧邻高山及得到核电厂大力支持这三个优势,因此大亚湾实验与其他建议方案相比,精度最高、进展最快。

核电站在发电时会产生大量中微子。核燃料中的铀和钚通过裂变释放能量,平均每次裂变会释放出200MeV能量,同时产生6个中微子。要想进行高精度测量,必须在探测器中捕捉到足够多的中微子,但中微子极难探测,即使用几百甚至几万吨的探测器,也只能捕捉到极少数中微子。反应堆功率越大,释放的中微子越多,仪器探测到的中微子自然也越多,实验精度就越高。大亚湾现有两个相距1千米的核电站——大亚湾核电站和岭澳核电站,共有4个核反应堆,每个热功率为2.9GW(电功率为百万千瓦),总功率为11.6GW,是世界第十大反应堆群。目前正在建造岭澳二期核电站,两台机组将分别于2010年和2011年投入运行,届时总功率将达17.4GW,成为世界第二大反应堆群。大亚湾4个核反应堆每秒释放 2.3×10^{21} 个中微子。这些中微子各向同性地飞离反应堆。距反应堆约2千米处有效质量为80吨的中微子探测器,每天能探测到约400个中微子。

探测中微子的一个必要条件是宇宙线屏蔽。地表有大量宇宙射线,平均每平方米每秒约有200个。如果在地表进行大亚湾中微子实验,探测到的宇宙射线将比中微子多200万倍,信号将完全淹没于本底辐射。事实上,中微子实验基本在地下进行,依靠岩石吸收宇宙线。如超级神冈实验和SNO实验就分别在地下1千米和2千米深的废旧矿井内进行。SNO实验的宇宙线流强仅为地表的 $1/10^7$,可是这种废旧矿井未必位于现有核电站附近。若利用山体屏蔽宇宙线,就要在地面打数百米深的竖井或找一个附近有山的核电站,利用隧道将探测器置入山腹。然而中微子探测器体积巨大,大型竖井造价非常高昂,探测器的安装维护也非常困难。可是大亚湾核电站紧靠排牙山,主峰高707米。距离反应堆400米处就有100米高的山体,距离反应堆2千米处的

山体则高约400米,可降低宇宙线1万倍,这种地理条件实在难得。虽然屏蔽效果不如SNO实验,但由于反应堆中微子流强大,加上适当设计屏蔽措施后,宇宙线导致的本底不到中微子事例的0.5%。

优越的地理条件使大亚湾反应堆中微子实验的设计精度最高、造价却相对便宜,成为众多实验建议中最具竞争力的方案。此外,核电站的业主中国广东核电集团也给予了相当的重视与支持,并成为实验的合作研究单位,这也是大亚湾实验进展迅速的关键因素之一。而国外一些实验方案则因核电厂不够积极而最终流产。

中国科学家利用大亚湾的地理优势因地制宜,设计了一系列独创性的实验方案,例如采用多模块探测器、水池屏蔽层、探测器中采用反射板等。实验设施由3个实验厅组成,分别为大亚湾近点、岭澳近点与远点大厅。实验厅均位于山腹内,由水平隧道相连。每个实验厅内有1套宇宙线探测器,共有8个中微子探测器模块,近点各2个、远点有4个。图为大亚湾核电站、岭澳核电站以及正在兴建的岭澳二期各有的两个核反应堆(用圆点标示)。



大亚湾反应堆中微子实验的布局示意图

中微子探测器被设计成直径5米、高5米的圆桶,内装液体闪烁体,重100吨。其核心部分是液体闪烁体和光电倍增管。准确地说,反应堆释放的中微子是电子反中微子,本身不能被探测,但是却能与液体闪烁体中的氢核发生反 β 衰变反应,生成一个正电子和一个中子。正电子和中子能够激发液体闪烁体,产生微弱的闪烁光。光电倍增管探测到闪烁光,将其转换成电信号,这样就能探测到中微子了。当然,为了做到极高的探测精度,探测器的实际结构

和探测过程要比这复杂得多。

探测器位于山腹内,宇宙线因山体屏蔽而被减弱 1 万倍,但仍比中微子多 200 倍,对中微子探测精度的影响还是非常大,必须采取进一步措施。每个实验厅内都有一个巨大的水池,内贮约 2000 吨纯净水,中微子探测器就沉在水池正中,水池兼作宇宙线探测器、屏蔽层。水池四周放有大量光电倍增管,宇宙线穿过水池时,由于速度超过光在水中的速度,会激发出切伦科夫光。通过光电倍增管探测切伦科夫光,就可探测到宇宙线,去除其对中微子探测的影响。高能宇宙线会使附近岩石中产生大量次级粒子,岩石本身的天然放射性也会产生大量伽马光子,水可将这些粒子挡在中微子探测器外,以免对中微子探测造成影响。通过这些措施,宇宙线带来的本底可以减少到中微子事例的 0.5% 以下。

远点探测器放在反应堆的中微子振荡极大值处,距反应堆 2 千米左右。通过近点探测器,可以准确计算出反应堆释放的中微子数,进而计算在没有振荡时远点探测器应该看到的中微子数。如果实际探测到的中微子比预期少,就说明中微子发生了振荡,减少的程度正比于我们要测量的参数 $\sin^2 2\theta_{13}$ 。

大亚湾实验的国际合作组由中国(包括香港和台湾)、美国、俄罗斯和捷克四国的 30 多个研究单位组成,研究人员共 100 多名。中方承担基础建设以及一半的探测器建造工作,美国负责另一半探测器。预计 2007 年夏天开始隧道工程建设,2009 年初大亚湾近点探测器开始试运行,到 2010 年,所有探测器将安装调试完毕,开始正式测量。预计 3 年的数据量即可达到我们的物理目标——测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 到 0.01 的精度。

应该说,中微子物理是一个方兴未艾的前沿研究方向,国际上许多新的中微子实验也在进一步规划中,肯定会给我们带来许多激动人心的发现。大亚湾反应堆中微子实验是一个独特的机遇,将成为我国发展中微子物理的切入点,为我国发展基础科学研究做出重要贡献。

(北京中国科学院高能物理研究所 100049)

作者简介

曹俊,1972 年生,中国科学院高能物理研究所研究员。1993 年毕业于武汉大学物理系,1998 年在高能物理研究所获理论物理学博士学位,1998~2000 年赴法国作博士后,从事 H1 实验的数据分析



工作。2001~2004 年任美国密歇根大学研究助理,参加费米实验室 Mini Boo NE 中微子实验。2004 年入选中国科学院“引进国外杰出人才”,参加大亚湾反应堆中微子实验,负责中心探测器研制以及软件与物理分析工作。

科苑快讯

古埃及是否已有混凝土

20 世纪 80 年代中期有学者提出,建造埃及吉萨大金字塔的巨石可能并非天然岩石,而是某种古代混凝土。最近,美国费城卓克索大学(Drexel University)的米歇尔·巴索姆(Michel Barsoum)、阿德里什·甘古利(Adrish Ganguly)和法国科学研究中心微观结构研究实验室的吉勒斯·哈格(Gilles Hug)的工作竟支持了这一备受古埃及学专家批驳的观点。

巴索姆和同事用扫描隧道电子显微镜观察了 15 个岩石样本和来自金字塔不同部分的 6 块石灰石,发现这些石灰石样本中的镁、钙含量与天然石灰石不同,更像人工合成的混凝土。按照巴索姆的解释,古埃及人把混凝土灌入工地内的木制模具形成巨大的混凝土块用于建造金字塔。这要比古罗马人发明的“罗马砂浆”* 早 2500 多年。

然而,埃及古文物学会秘书长、负责吉萨地区金字塔挖掘工作的札希·哈瓦斯(Zahi Hawass)博士则坚信,金字塔不可能是混凝土建造的。他指出,金字塔在最近几十年来曾历经多次整修,整修时自然会用到混凝土,巴索姆取得的样本也许就出自这些部分,所以不能排除这些样本是近代整修时采用的混凝土。

(高凌云编译)

* 古希腊建筑采用的胶凝材料是煅烧石灰石后制得的石灰。公元前 146 年罗马帝国吞并希腊,同时继承了希腊人生产和使用石灰的传统。古罗马人改进了石灰使用工艺,不仅掺入砂子,还有磨细的火山灰;而没有火山灰的地区则掺入与火山灰具有同样效果的磨细的碎砖。这种被称为“罗马砂浆”的“石灰-火山灰-砂子”三组分砂浆,在强度和耐水性方面较“石灰-砂子”二组分砂浆都有很大改善,用其砌筑的普通建筑和水中的建筑都较耐久,其中一些非常坚固的古罗马建筑甚至保留至今。