

赛先生 专栏

[编者按] 《赛先生》微信公众平台于2014年7月发起,它讲述科学家的故事,介绍科普知识,也传递科学的态度,不仅是科学家们建言国家和社会的平台,也是一份颇具可读性的科学读物。《科技导报》从2015年第13期开始,与《赛先生》合作,每期选取1篇《赛先生》发布的高质量原创文章,与读者分享,“与科学同行”。

大亚湾中微子振荡的启示

何红建

清华大学近代物理研究所,北京 100084

继2015年诺贝尔物理学奖公布仅一个月,中微子领域再传喜讯:大亚湾中微子团队斩获“2016年基础物理学突破奖”,共同分享这一大奖的还有其它4个国际中微子实验团队(KamLAND, K2K/T2K, SNO, SuperKamioKande)。

荣获“突破奖”的5个实验团队发现了中微子的3种振荡模式,定量测定了中微子的非零混合角($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$)及中微子质量的平方差。这些参数都是自然界的基本常数,对于进一步理解中微子质量起源和探索中微子与轻子部分的CP破坏具有重大科学意义(C和P分别代表电荷共轭变换和空间反演变换2种基本分离对称性)。这是一项以中国科学家为主体、联合美国等国的42个单位的292名科学家共同参与并在中国本土上完成的重大学术发现。科技部部长万钢在11月10日代表科技部给大亚湾中微子团队领导者、中国科学院高能物理研究所研究员王贻芳的贺信中指出:大亚湾团队“在大亚湾反应堆中微子实验设计、探测器研制建设等多个领域取得了重要成果,发现了新的中微子振荡模式,得到了国际高能物理界的高度评价,对推动国际中微子领域研究具有极为重要的意义。这也是我国组织实施国际大科学工程的成功探索和实践”。同天,中国科学院院长白春礼给王贻芳及其团队发来的贺信中指出:“此次获奖进一步彰显了我国高能物理相关领域研究的国际领先地位,对我国科技发展具有标志性意义。”

大亚湾合作组在2012年3月8日首次宣布了关于中微子关键混合角 θ_{13} 非零的突破性发现,超出背景5.2个标准偏差,以大于99.9999%的精度确立了中微子的第3种振荡模式,这是一个测量反电子中微子通过振荡而消失的反应堆中微子实验。大亚湾团队的这项重大发现是在王贻芳研究员和陆锦标教授(加州大学伯克利分校)的领导下完成的。2003年以来,有7个国家先后提出了8个实验方案利用反应堆实验测量 θ_{13} ,最终投入建造的有3个,包括中国大亚湾实验、法国Double Chooz实验和韩国RENO实验。

大亚湾实验位于广东深圳的大亚湾核电站和岭澳核电站,于2007年10月动工,到2011年中期先后完成探测器的建造与安装,并在8月开始近点取数,当年12月下旬开始远近点同时运行。实验基地建有总长3 km的隧道和3个地下实验大厅,分别为大亚湾近点、岭澳近点与远点大厅,大厅可容纳8台中微子探测器,每台高5 m、直径5 m、重110 t,安置于10 m深的水池中。利用两个近点实验厅内探测器测量反应堆中微子流强,并在远点实验厅探测振荡效应。分析实验数据发现远点探测到的

中微子数显著低于预期,表明中微子在传播中发生了振荡,从电子反中微子转变成了其他种类的中微子。这个实验的完成除了方案设计与论证、组建实验队伍、争取立项和筹备经费等等,还涉及相当复杂的工程技术问题,包括核电站附近的隧道施工和中微子探测器的研制及其部件的批量生产和安装,此外还有信号与背景模拟、数据采集、刻度和分析等等。我的档案里尚存一篇贻芳多年前发给我的综述文章《大亚湾反应堆中微子实验》(图1),发表在2007年《物理》杂志36卷第3期,文中系统阐述了大亚湾中微子实验测量 θ_{13} 混合角的物理目标与科学意义。

评述

大亚湾反应堆中微子实验*

王贻芳[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 中微子振荡是目前唯一超出粒子物理标准模型的新现象,它证明了中微子质量不为零,对粒子物理、天体物理与宇宙学均有非常重要的意义。在描述中微子振荡的6个参数中,目前仍有两个未知:交叉混合角 θ_{13} 与CP相角 δ 。作者建议在大亚湾反应堆附近建设一个中微子实验站,测量混合角 $\sin^2 2\theta_{13}$ 在90%的置信度下达到0.01的精度,较过去的实验提高近一个数量级。这将对中微子物理的未来发展提供方向性指导,特别是对理解宇宙中“反物质消失之谜”具有重要意义。

图1 王贻芳2007年发表在《物理》杂志上介绍大亚湾中微子实验的综述文章

我与贻芳的第一次交往要回溯到15年前,那时他刚回国加入中国科学院高能物理研究所,在考虑一个探测磁单极的实验。我当时还在美国UT Austin工作,经同事引见,贻芳和我通过邮件对磁单极问题作了讨论。2006年秋,在桂林的全国粒子物理学年会上,我们第一次见面。2010年春,我特别邀请贻芳来清华大学报告大亚湾实验进展(图2),那时大亚湾的探测器尚在建造之中,人们对此已不觉新鲜,没有人会料到大亚湾会在2年之后做出如此戏剧性的发现,所以当时听众也不多。那时实验上还没有任何 θ_{13} 非零的迹象,其实验下限在2个标准偏差内与零完全一致。大亚湾实验对探测 θ_{13} 的设计精度可以小到2.9°(90%置信度)。因此,大亚湾当时的状况可概括为8个字:进度尚好,前途未卜。图2报告会听众的稀少恰好说明当时这个方向比较清冷。我常对学生讲,应该听听比较冷门的学术报告,因为那些听众爆满的热闹会场往往表明:这个研究领域或方向上的原创性发现已经完结。

θ_{13} 非零为何如此重要?因为它是存在可观的CP破坏效应的前提,而CP破坏是解释宇宙中产生已观测到的正反物质非



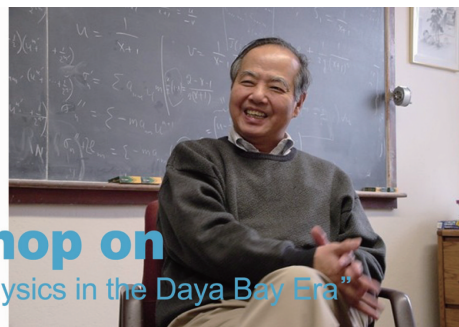
图2 王贻芳于2010年5月在清华大学
报告大亚湾中微子实验进展

对称性(或称反物质消失之谜)的先决条件之一,目前标准模型夸克部分的CP破坏不足以解释这个观测结果。反物质消失的事实非常重要,否则宇航员乘坐飞船到达月亮或者其他星球就有连人带船一起被反物质所湮灭、化为乌有的危险。要在理论上可靠地预言 θ_{13} 的绝对大小实际上非常困难,只要输入足够多的假定或者自由参数, θ_{13} 可以取任何值。所以当我们着手研究 θ_{13} 时,基本上可以跳过当时文献中的所有模型。我们没有孤立地研究 θ_{13} ,而是研究非零 θ_{13} 与非零 $\theta_{23}-45^\circ$ (即大气中微子混合角 θ_{23} 对于最大混合 45° 的偏离)这两个小量之间的关联。虽然理论无法可靠地预言它们各自的大小,但是我们却从中微子质量矩阵的一种最基本的对称性($\mu-\tau$ 对称性)的破缺出发预言了两种非零偏离的关联,再输入实验对 $\theta_{23}-45^\circ$ 偏离的测量数据,就可以预言非零的 θ_{13} 。不仅如此,我们还研究了这种偏离与CP破坏的极为自然的共同起源,并在最小的中微子Seesaw机制中给予定量实现,这使我们预言了 θ_{13} 的下限,因为要完满解释宇宙中的正反物质非对称性,就需要一个非零的 θ_{13} 以确保CP破坏的存在。我们得出的理论下限是 $\theta_{13}>1^\circ$,之后我们在不同的理论分析中也得到类似结果,说明它有相当的普适性。这给大亚湾探索 θ_{13} 提供了有益的支持,但还不足以确保其一定能测到,因为上面提到大亚湾实验的设计探测精度是 $\theta_{13}=2.9^\circ$ 。2010年,我邀请贻芳来清华作报告,也为了与他进一步讨论关于 θ_{13} 的探测精度,还有大亚湾无法测量的大气中微子混合角 θ_{23} 及其对最大混合的偏离。我们的文章“Common Origin of Soft $\mu-\tau$ and CP Breaking in Neutrino Seesaw and the Origin of Matter”(arXiv:1001.0940)虽然是基于最小Seesaw机制进行构造,但却进一步认识到中微子最基本的对称性:任何一个 3×3 的Majorana质量矩阵,其最大非平庸对称性是 $Z_2(\mu-\tau)\times Z_2(\text{solar})$,其中 $Z_2(\mu-\tau)$ 决定了 $(\theta_{23}, \theta_{13})=(45^\circ, 0^\circ)$;而 $Z_2(\text{solar})$ 决定太阳中微子角 θ_{12} 作为它的群参数,但并未固定 θ_{12} 取值。此文构造了 $Z_2(\mu-\tau)$ 与CP破缺的共同起源,但保持 $Z_2(\text{solar})$ 对称性。那时国际中微子理论界流行一种称为TBM(Tri-Bi-Maximal Mixing)混合的假设,以及能够导出这种假设的各种味道对称群(诸如 A_4, S_4 等);TBM对应于 $(\theta_{23}, \theta_{13})=(45^\circ, 0^\circ)$ 和 $\theta_{12}=35.3^\circ$ 。其中一个原因是那时实验上尚无非零 θ_{13} 的任何迹象。我很庆幸从未追随国际上这方面的流行文献,也为此节省了时间。

感到欣慰的是,那次贻芳报告之后不到3个月,李政道先生和他在哥伦比亚大学的合作者R. Friedberg发表了一篇引人注目的文章“Deviations of the Lepton Mapping Matrix

from the Harrison-Perkins-Scott Form”(http://arxiv.org/abs/1008.0453),提出了另一个预言 θ_{13} 和 $\theta_{23}-45^\circ$ 两种非零偏离关联的机制(带电轻子的微扰方法),该文章把我们论文(arXiv:1001.0940)提到的方法称为中微子微扰的GHY方法,并把两种预言的差别作了定量比较,指出包括大亚湾等正在进行中的实验将对这两种预言给出甄别。也因为我与李先生和Friedberg通过这一研究方向的交流,李先生很赞赏我们的工作。于是李先生委托我和贻芳联合中国科学院高能物理研究所、清华和北大在中国高等科学技术中心CCAST于2010年11月组织了一个全国性的中微子研讨会,取名为“大亚湾时代的中微子物理(Neutrino Physics in Daya Bay Era)”。这个名字得到李政道先生的赞同,但它明显比较超前,因为那时大亚湾尚未锁定发现非零 θ_{13} 的桂冠。当时,李先生亲自参加了这个会议并作了精彩开幕报告。图3是当时的会议海报,从报告题目就容易看到,当时并非所有的报告人都关心 θ_{13} ,因为那时实验上既未显示非零 θ_{13} 的迹象,理论上也很难可靠地预言其绝对大小。

那之后我们继续发展了这个方向的研究,并在2011年4月发表了一篇长文“Common Origin of $\mu-\tau$ and CP Breaking in Neutrino Seesaw, Baryon Asymmetry, and Hidden Flavor Symmetry”(http://arxiv.org/abs/1104.2654),继续研究掌控这两种非零偏离(θ_{13} 和 $\theta_{23}-45^\circ$)的基本 $\mu-\tau$ 对称性与CP对称性破缺的共同起源。我们通过最小Seesaw机制进行了分析,同时进行了模型无关的分析,这与前一篇文章(arXiv:1001.0940)正好互补;其中一个关键结果是我们预言了关于 θ_{13} 和 $\theta_{23}-45^\circ$ 非零偏离的一种新的关联,这种关联更强,从而预言了较大的 θ_{13} 取值区域,与2个月后公布的日本T2K和美国MINOS中微子实验结果符合很好。例如,我发现只要大气中微子角发生 $|\theta_{23}-45^\circ|\approx 1^\circ$ 的偏离,这种关联就预言 θ_{13} 可达到 $6^\circ\sim 9^\circ$ 范围。



Workshop on “Neutrino Physics in the Daya Bay Era” “大亚湾时代的中微子物理”研讨会

2010年11月4-5日

清华大学高能物理研究中心, 北京大学高能物理研究中心
中国科学院高能物理研究所, 中国高等科学技术中心 联合举办

2010年11月4日上午9:00-12:00 — 首场学术报告会

演讲题目: 主持人: 叶铭汉
李政道(哥大): Deviation of Lepton Mapping Matrix from the Harrison-Perkins-Scott Form
王贻芳(高能所): Overview of the Present and Future Neutrino Experiments
何红建(清华): Prediction of θ_{13} from Common Origin of Mu-Tau and CP Symmetry Breaking
廖益(南开): Cascade Seesaw for Tiny Neutrino Mass
刘纯(理论所): Supersymmetry Theory of Fermion Masses and its θ_{13} Prediction
马伯强(北大): Unified Parametrization of Quark and Lepton Mixing Matrices

特别邀请诺贝尔奖获得者、哥伦比亚大学教授、
中国高等科学技术中心主任李政道先生作开幕报告。
欢迎参加。

图3 “大亚湾时代的中微子物理”会议海报

2011年6月,日本T2K中微子实验发表了关于 θ_{13} 的新结果,表明 θ_{13} 中心值在 $9^\circ\sim 11^\circ$,而且 $\theta_{13}>0^\circ$ 的信号超出背景2.5个标准偏差。随后美国MINOS实验也发表了支持非零 θ_{13} 的结果,但其置信度弱一些,为1.5个标准偏差。不幸的是,日本在2011年3月11日发生9.0级地震,T2K加速器中微子实验装置惨遭损坏,而2011年6月发布的结果主要是使用了Run-2在2010年末到2011年3月11日地震之前采集的数据。这给大亚湾和韩国RENO两个反应堆实验带来幸运,因为T2K诱人的初步结果首次显示了非零 θ_{13} 的蛛丝马迹,而且其中心值高达 $9^\circ\sim 11^\circ$ 。这也强烈暗示了大亚湾无须等待安装预期计划的所有8个探测器就可以提前运行和采集数据。后来这的确是贻芳团队采取的方案,他们在2011年底之前安装了6个探测器,从圣诞节开始,仅55天之后就获得了5.2个标准偏差的突破性发现,得出 θ_{13} 的中心值为 8.8° 。在大亚湾发布这个轰动性结果之后大约一个月,韩国RENO实验组在惊讶之余紧接着公布了一个新结果,测出非零 θ_{13} 达4.9个标准偏差,中心值在 9.8° 。这次突破奖的分享者中有T2K,而没有RENO,这也在预料之中。RENO的确有些遗憾,其原因就不在这里讨论了。这里我倒是可以谈一下我们组的理论研究在2011年6月T2K和MINOS公布结果之后做了什么。

T2K实验提示的较大 θ_{13} 中心值立刻使我猜测 θ_{13} 与另一个偏离 $45^\circ-\theta_{12}$ (即太阳中微子混合角对最大混合的偏离)之间的内在关系,于是我把我们的出发点选定在研究对于中微子双最大混合BM(Bi-Maximal Mixing)(θ_{12}, θ_{23})=($45^\circ, 45^\circ$)和 $\theta_{13}=0^\circ$ 的偏离。BM混合方案在1998年就有人提出,但之后该方案被 θ_{12} 实验数据($\theta_{12}=34^\circ\sim 35^\circ$)所排斥,逐渐被学界所遗忘,人们大都转向其他流行方案。我们没有盲从,自2011年夏天另辟蹊径重新研究BM,并寻找能够预言BM的最小有限群和它的破缺机制。国庆节后,我们首次证明了在BM模式下能够完整包含中微子最大对称性 $Z_2(\mu-\tau)\times Z_3(\text{solar})$ 的最小有限群是Octahedral Group O_h (八面体群),而既不是流行的 A_4 ,也不是 S_4 。我们关键思想的下一步是要恰当地破缺 O_h 群从而使其子群 $Z_2(\mu-\tau)\times Z_2(\text{solar})$ 的破缺量 θ_{13} 和 $45^\circ-\theta_{12}$ 发生关联。经过大量尝试,我们成功给出了八面体群的构造和它极为简洁漂亮的几何破缺机制,并预言了定量关系: $\theta_{12}+\theta_{13}=45^\circ$ 或 $\theta_{13}=45^\circ-\theta_{12}$,其中没有可调自由参数;再考虑重整化群流动对 $\theta_{12}+\theta_{13}$ 的修正,可预言低能测量值 $\theta_{12}+\theta_{13}\approx 43^\circ$ 。因为 θ_{12} 已被之前的中微子实验所精确测量,因此能够定量预言 θ_{13} 的取值范围。输入 θ_{12} 实验中心值得出 $\theta_{13}\approx 8^\circ\sim 9^\circ$ 。2011年12月,CERN传来了LHC找到希格斯粒子初步迹象的重大消息,我的精力被分割;而大亚湾实验的运行当时对外保密,所以我未能将这一研究的短文及时定稿。2012年3月8日传来大亚湾发现 θ_{13} 的突破性结果,这给了我们一个惊喜,几天之后我们于3月13日发表了一篇短文“Octahedral Symmetry with Geometrical Breaking: New Prediction for Neutrino Mixing Angle θ_{13} and CP Violation”(http://arxiv.org/abs/1203.2908),此文还同时预言了最大CP破坏相角 $|\delta| \approx 90^\circ$,与目前T2K的初步结果一致。

碰巧的是,大亚湾宣布新发现一个月之后,贻芳再次应邀来清华大学作报告。这时报告厅已经人满为患,与两年之前(图2)形成对比。值得一提的是,作为大亚湾共同发言人的陆锦标教授也是我多年的同事和朋友,他是清华大学工程物理系的长江讲座教授,多次从加州伯克利大学来清华访问和工作,在清华高

能物理中心就中微子进行过多次系列讲演,还参加博士毕业答辩,为清华的人才培养做出了重要贡献。

发现非零 θ_{13} 非常重要,因为这是存在可观测的CP破坏效应的前提条件,而CP破坏是宇宙中产生正反物质非对称性的必要条件。大亚湾发现的重大物理意义还在于其测定的非零 θ_{13} 值比较大,中心值在 $\theta_{13}=8^\circ\sim 9^\circ$,远远大于夸克部分的相应混合角 θ_{13} (只有大约 0.23°)。这样一个显著非零 θ_{13} 的重要物理意义在于给下一步探测轻子部分可能的CP破坏效应带来了新的希望,提供了一块发现CP破坏的奠基石。进一步发现中微子CP破坏将是高能界公认的下一个诺奖级工作,虽然其难度更大。因此,大亚湾的发现被国际同行普遍认为是中国物理学史上最重大的科学发现,这一发现在其公布的2012年就立即被美国*Science*杂志与当年的LHC希格斯粒子发现一同列入“世界十大科学突破”。希格斯发现于2013年荣获诺贝尔物理学奖,而王贻芳和陆锦标则于2013年入选美国物理学会潘诺夫斯基实验物理学奖。高能物理界行内对于2015年诺贝尔物理学奖只发给首次揭示中微子振荡的两个团队并不感到意外,但是作为同行,我们知道下一个诺奖级的工作很可能是关于中微子CP破坏的发现以及在无中微子双贝塔衰变实验中可能首次确证中微子是Majorana中微子的发现。当然这两种实验难度都很大。此外,一个令人瞩目的方向是南极的冰立方(IceCube)实验,亦称为中微子望远镜实验,自2013年探测到超高能天文中的中微子(TeV-PeV)信号,开启了中微子天文学的时代。这是另一个有望问鼎诺奖的实验方向。

令高能物理界感到欣慰的是,300万美元的“突破奖”颁给了在发现中微子3种振荡与混合模式的测量中作出突出贡献的5个实验团队。虽然“突破奖”的宣布比诺奖刚好晚了一个月,但贻芳早在8月10日就得到评委会的电话通知,可见“突破奖”在决策上超前诺奖的判断力。这项大奖也是对整个高能物理界那些为探测这种神奇的“幽灵粒子”而共同艰苦奋斗的探索者们的最高赞扬与奖赏。

最近人们询问贻芳关于中微子的下一个梦想是什么?答案是江门中微子实验(JUNO)。此实验将测量3种中微子的质量排序,其规模比大亚湾实验大100倍,计划在2020年竣工,并进入探测阶段。不过,据我所知,贻芳还有一个关于中国高能物理与科学发展更为宏大而雄伟的梦想,这在2015年10月波士顿国际出版社发行的一本英文新书《From the Great Wall to the Great Collider》中作了系统介绍,此书的取名来自诺奖得主David Gross的一个建议。

展望未来,我对中微子物理的前景表示乐观,也预期中微子领域的下一个重大突破性发现。纵观科学发展史,物理学的成功,特别是粒子物理学的成功,在于物理学中不同分支的交融。中微子领域的辉煌成就恰恰得益于它与宇宙学、天文学、核物理领域的密切交融。大自然是一个无法机械割裂的有机整体,认识其深刻性、丰富性和关联性的确需要以全局的方法进行多视角的探索,需要超越传统意识中狭隘的学科划分观念,这是实现创新的一个重要前提。中微子振荡的突破性发现标志着人类认识大自然的又一新起点,这还远未穷尽大自然的宝藏,让我们感谢美丽大自然的神奇与慷慨!

致谢:感谢王贻芳研究员对本文提出的有益建议。

(编辑 王丽娜)