

中微子振荡的发现及未来*

曹俊[†] 李玉峰^{††}

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2015-12-02收到

[†] email: caoj@ihep.ac.cn

^{††} email: liyufeng@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20151201

Discovery and future of neutrino oscillation

CAO Jun[†] LI Yu-Feng^{††}

(Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China)

摘要 2015年诺贝尔物理学奖授予日本物理学家梶田隆章和加拿大物理学家阿瑟·麦克唐纳,奖励他们发现中微子振荡现象,从而证明中微子具有非零的静止质量。这是粒子物理学唯一具有确凿实验证据的超出标准模型的新物理现象,改变了人类对物质世界基本规律的认识。文章将回顾中微子振荡现象的发现过程,介绍太阳中微子和大气中微子振荡实验的实验结果和理论解释,以及近期反应堆和加速器中微子振荡的研究成果,并展望中微子研究的前景。

关键词 中微子振荡, 诺贝尔奖, 太阳中微子, 大气中微子

Abstract The 2015 Nobel prize in physics was awarded to Japanese physicist Takaaki Kajita and Canadian physicist Arthur B. McDonald, for the discovery of neutrino oscillations, which shows neutrinos have mass. This is the only new-physics phenomenon beyond the Standard Model of elementary particles, which alter our understanding of the physical world. In this article, history of the neutrino oscillation discovery was reviewed. We shall introduce the experimental results and theoretical explanations of the solar and atmospheric neutrino oscillations, the recent progresses in reactor and accelerator neutrino experiments, and discuss the future prospect of neutrino oscillations.

Keywords neutrino oscillation, Nobel Prize, solar neutrinos, atmospheric neutrinos

1 中微子振荡的研究历程

日本物理学家梶田隆章和加拿大物理学家阿瑟·麦克唐纳“因发现中微子振荡现象,证明中微子有质量”,分享了2015年诺贝尔物理学奖(图1)。在粒子物理标准模型中,中微子是无质量的基本粒子。1998年6月在日本高山市召开的“国际中微子大会”上,梶田隆章代表超级神冈(Super-K)实验合作组报告了大气中微子振荡的确凿

证据。2001和2002年,加拿大萨德伯里中微子观测站(SNO)两次发表实验结果,证实太阳中微子振荡。这两个发现打开了微观世界新物理的大门,对宇宙和天体的起源与演化也有重大影响。

为了解释贝塔衰变的连续能谱,泡利1930年假定一种“永远找不到”的粒子带走了能量,后来被费米正式命名为中微子。1956年,雷因斯和柯万首次观测到了反应堆产生的电子反中微子^[1]。柯万于1974年去世,雷因斯被授予1995年诺贝尔奖。1962年莱德曼、舒瓦茨和斯坦伯格在布鲁克海文国家实验室利用首个加速器中微子束流,

* 国家自然科学基金(批准号: 11225525, 11390380)资助项目



图1 2015年诺贝尔物理学奖得主：日本物理学家梶田隆章和加拿大物理学家阿瑟·麦克唐纳

发现了第2种中微子——缪中微子^[2]，被授予1988年诺贝尔奖。上世纪七十年代以来建立的标准模型预言共有3种中微子(或称为3种“味道”量子数)。1989年通过 Z_0 衰变实验，证明存在、且只存在3种中微子。最后一种中微子——陶中微子，直到2000年才被费米实验室的DONUT实验发现。

由于实验上发现弱作用中宇称是最大破坏的，标准模型中只包含左手中微子，不存在右手中微子。这只有中微子质量为零才能成立，否则的话，中微子速度不是光速，可以选择参考系将左手中微子变成右手，宇称就不会最大破坏。不过，庞蒂科夫、牧、中川、坂田等人在五六十年代提出，假如中微子有微小的质量，且质量本征态与味道本征态之间存在混合，就会出现中微子振荡现象，即一种中微子在飞行中能自发变成其他种类的中微子。本质上这是一种量子干涉现象。通过弱作用产生的中微子味道本征态(比如电子中微子)，可看作是不同的质量本征态的叠加。由于中微子质量极其微小，在接近光速的长距离飞行中，不同质量本征态能够一直保持相干而不退耦，从而在宏观上表现出振荡现象。

中微子振荡最早由戴维斯在探测太阳中微子时发现迹象。六十年代末他首次探测到了来自太阳的中微子，证实了太阳能量来自核聚变，被授予2002年诺贝尔奖。此后进一步的测量发现，探测到的太阳中微子比预期少，仅为1/3，被称为“太阳中微子丢失之谜”^[3]。1988年，梶田隆章与他的两位导师小柴昌俊和户冢洋二在神冈实验中

发现大气中微子也比预期少，被称为“大气中微子反常”^[4]。由于实验数据精度不高，以及对中微子振荡理解不深，这两个实验迹象未被普遍接受为中微子振荡的证据。

1987年，神冈实验与美国IMB实验探测到超新星中微子，小柴昌俊因此与戴维斯分享了2002年诺贝尔奖。更大的超级神冈实验得以建造，并于1998年以确凿的证据发现了大气中微子振荡^[5]。采用新的探测技术，SNO实验可以同时探测三种中微子，2001年发现太阳中微子中的电子中微子确实丢失了，与超级神冈实验探测到的太阳中微子结果相结合，基本证实太阳中微子转变成了其他种类的中微子。2002年，SNO测得了全部三种中微子的流强，发现总流强与预期一致，给出了中微子转换的确凿证据，同时证明了太阳标准模型的正确^[6]。

2002年，日本KamLAND实验用反应堆中微子证实了太阳中微子振荡模式，同时解决了振荡参数的简并问题，确定了太阳中微子问题的大角混合—物质效应解^[7]。同年底，日本的另一个实验K2K用加速器中微子验证了大气中微子振荡模式^[8]，这是世界上的第一个长基线加速器中微子振荡实验。至此，中微子振荡现象通过不同方法、不同实验得到确立。

中微子振荡的规律^[9]由6个参数描述，太阳中微子振荡确定了其中的一组参数 θ_{12} 和 $\Delta m_{21}^2 (=m_2^2 - m_1^2)$ ，大气中微子振荡确定了另一组参数 θ_{23} 和 Δm_{32}^2 。我国的大亚湾中微子实验在2012年首次观测到除大气和太阳中微子振荡外的第三种振荡模式，测得了混合角 θ_{13} ^[10]，其后得到另外两个反应堆中微子实验Double Chooz和RENO以及加速器中微子实验的证实，从而完善了中微子振荡的标准框架。在此之前的2011年，日本的加速器实验T2K观测到了缪中微子束流中电子中微子的出现，最早给出了 θ_{13} 不为零的迹象^[11]，但因大地震加速器受损，未能给出更可靠的证据。

紧接着诺贝尔奖，2016年度基础物理学突破奖于2015年11月8日颁给了在中微子振荡研究中做出关键贡献的5个实验及其7名领导人，他们

是：王贻芳(中国科学院高能物理研究所)和陆锦标(伯克利)领导的大亚湾中微子实验、西川公一郎(KEK)领导的K2K/T2K两个实验、铃木厚人(KEK)领导的KamLAND实验、阿瑟·麦克唐纳(加拿大女王大学)领导的SNO实验、梶田隆章(东京大学)和铃木洋一郎(东京大学)领导的超级神冈实验，基本上覆盖了中微子振荡研究历程中的重大发现。

目前6个中微子振荡参数已测得5个，只有CP破坏相角未知。不过太阳中微子振荡因为有物质效应，可以确定中微子质量本征态 m_2 比 m_1 重，而大气中微子实验不能给出 Δm_{21}^2 的符号，因此不清楚 m_3 与 m_2 哪个更重，称为中微子质量顺序问题；也不能确定 θ_{23} 是否偏离 45° ，是偏大还是偏小。CP破坏将导致正反中微子振荡几率不同，很可能与宇宙起源中的“反物质消失之谜”相关。质量顺序不仅影响振荡几率，从而影响CP破坏测量，还决定了无中微子双贝塔衰变实验的前景。这两个问题是中微子振荡下一步需要解决的重大问题。

曾经人们以为 θ_{13} 值很小，而它调控着质量顺序和CP破坏的可观测效应，因此认为需要下一代技术才能测量，例如中微子工厂(特指一种大量产生中微子的加速器束流)或贝塔束流。大亚湾实验发现 θ_{13} 值远大于预期，用现有技术就可以测量，从而为未来的中微子研究铺平了道路。多个新的中微子实验被提出，包括中国的江门中微子实验(JUNO)，美国DUNE，日本Hyper-K，印度INO，韩国RENO-50，美国在南极的PINGU，法国在地中海的ORCA等，预期未来10—15年，很有可能解决中微子振荡余下的三个问题。

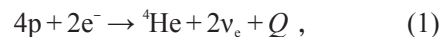
最近T2K结合大亚湾给出的精确 θ_{13} 值，意外地给出了最大CP破坏的迹象，CP相角为 270° 。美国刚投入运行的NOvA实验也给出了同样的迹象，同时倾向于正的质量顺序。如果这两个参数确实位于这种使CP破坏极大的组合，这两个

实验将能于几年内在3倍标准偏差的置信度下给出初步的结论。

本文接下来将重点介绍此次获得诺贝尔奖的太阳中微子实验和大气中微子实验，然后介绍未来的中微子振荡实验，最后总结中微子研究中的重大问题。

2 太阳中微子丢失之谜

太阳的能量来源曾长期困扰科学家。诺贝尔物理学奖获得者贝特(Hans Bethe)于1939年提出氢核聚变燃烧的物理机制^[12]，指出太阳内部的高温不仅使对应的压强可以与引力抗衡，从而保持稳定的结构，还使热核反应得以发生，把氢合成为更重的元素。整个聚变反应链可以等价地写成：



即4个氢核与两个电子发生反应，生成一个氦核和两个电子中微子，同时释放 $Q=26.7$ MeV的能量。不过上述合成是通过多步反应完成的。聚变能量经过数以万年才能从太阳核心的聚变区域传递到太阳表面，变成辐射到地球的太阳光。

上述反应释放的中微子称为太阳中微子。每一秒钟都有上万亿的太阳中微子穿过一个人的身

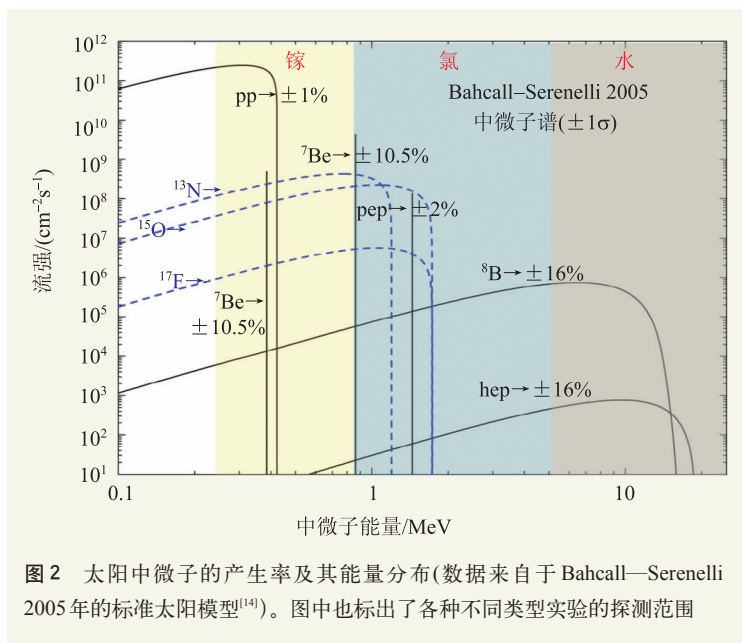


图2 太阳中微子的产生率及其能量分布(数据来自于Bahcall—Serenelli 2005年的标准太阳模型^[14])。图中也标出了各种不同类型实验的探测范围

体。因为中微子几乎不与物质反应，它以接近光速从产生处直接传播出来，其数量和特征能量分布由核反应过程决定。因此，测量太阳中微子是检验上述氢核聚变机制的独一无二的手段。

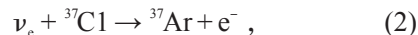
美国天文学家巴考(John Bahcall)建立了精确的太阳模型，可以很准确地预言中微子的流强与能谱。他与戴维斯共同提出了进行太阳中微子实验，以检验太阳模型^[13]。太阳表面的“日震”会在太阳内形成驻波，因为多普勒效应，原子的光谱线会产生微小的移动。驻波振动的速度与太阳核心的温度分布密切相关，中微子的产生率对温度分布也非常敏感，因此对日震的观测可以很好地限制太阳模型。利用这些限制以及核反应实验数据，巴考计算了所有太阳中微子的产生率及其能量分布，如图2所示。其中99%的中微子来自pp反应链，根据其反应过程，包括pp中微子、pep中微子、hep中微子、Be-7中微子、B-8中微子等。另外1%来自碳—氮—氧循环，分别是N-13



图3 安装过程中的SNO中微子探测器

中微子、O-15中微子、F-17中微子。对比较容易观测的高能B-8中微子，计算精度为16%。对主要的能量来源pp中微子，精度达到了1%，但由于能量低，pp中微子迟至2014年才由BOREXINO实验直接观测到。

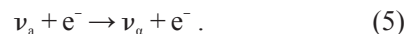
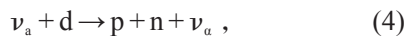
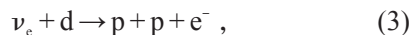
戴维斯在六十年代建造了Homestake实验，使用四氯乙烯作为捕获太阳中微子的探测材料，其中的氯原子可发生反贝塔衰变反应：



生成放射性氩原子，反应的中微子能量阈值为0.233 MeV。戴维斯在1968年探测到了太阳中微子，证实了太阳的能量来源。但是他发现探测到的中微子少于巴考的理论计算值，仅为其1/3，被称为“太阳中微子丢失之谜”。戴维斯的实验一直运行到1995年。

意大利和前苏联的两个镓探测实验SAGE和GALLEX/GNO、日本神冈实验也进行了太阳中微子的探测。不同实验由于材料不同，对太阳中微子敏感的能量范围也有所不同。所有实验观测到的数目都小于标准太阳模型理论计算的数目，但令人费解的是其丢失的比例不同，介于30%—50%之间，难以用通常的中微子振荡来解释。

1984年，美国华人物理学家陈华森提出了用重水探测太阳中微子的方案^[15]。中微子在重水中可以有如下三种不同的反应，依次为带电流(CC)过程、中性流(NC)过程、弹性散射(ES)过程：



其中d, p, n, e分别为氘核、质子、中子和电子， ν_a 指三种中微子中的任一种。重水不仅能测量电子中微子，还可以同时测量所有类型中微子数目的总和，从而对是否存在从电子中微子到其他味道中微子的转换给出确定的说法。

采用该探测方法的SNO实验从1990年开始动工建设，1999年5月实验建成开始运行。该实验位于加拿大萨德伯里地下2 km的一处废弃镍矿处，直径30 m的地下探测器大厅内安放有直径12 m的有机玻璃球型探测器，探测器内装有1千

吨的重水，并安装1万个光电倍增管作为光信号探测单元。图3显示的是安装过程中的SNO中微子探测器。

2002年，SNO实验观测到电子中微子和所有味道中微子的数目，如图4所示。CC代表单独对电子中微子的测量；NC代表对所有味道中微子的测量；ES代表电子弹性散射测量，其中电子中微子比另两种中微子的反应几率大6倍。太阳中微子产生时是纯的电子中微子。图中黑色虚线为太阳模型预测值，测得的中微子的总数与之一致，但电子中微子只相当于总量的35%，其他65%为缪中微子和陶中微子。这表明在中微子传播过程中，中微子并没有真正丢失，而是转变为另外两种类型的中微子。

理论上也有了重大的突破，对不同实验测得不同丢失比例的困惑给出了令人惊讶的答案。1978年美国物理学家沃芬斯坦注意到，电子中微子在物质中会受到电子的散射，将改变中微子的振荡效应^[16]。1985年前苏联的米赫耶夫和斯米尔诺夫将这个想法用于解释太阳中微子问题^[17]，人们才意识到，以前认为中微子在从太阳飞到地球的过程中发生振荡的看法是完全错误的。通过求解物质势中中微子的振荡行为，发现它的影响可以通过一个有效混合角来表示：

$$\tan 2\theta^M = \frac{\tan 2\theta}{1 - \frac{A}{\Delta m^2 \cos 2\theta}}, \quad (6)$$

其中 θ 表示没有物质时的真空混合角， θ^M 表示物质中的有效混合角， Δm^2 表示真空中的质量平方差， A 表示物质效应带来的有效质量。

能量较高的太阳中微子物质效应大，在太阳核心 A 远大于真空质量项 $\Delta m^2 \cos 2\theta$ ，这样 θ^M 接近 90° ，意味着电子中微子与质量本征态 m_2 简并。随着中微子向外传播， θ^M 逐渐趋近真空混合角 θ ，而中微子在这过程中经历了一个绝热转换过程，保持为质量本征态 m_2 (但本征态解在随密度演化)。这样，我们探测到电子中微子的几率为 $\sin^2\theta$ 。另一方面，低能中微子物质效应非常小， θ^M 接近真空混合角 θ ，由于从中微子不同的产生地点到地球的飞行距离相差很大，我们探测到电子

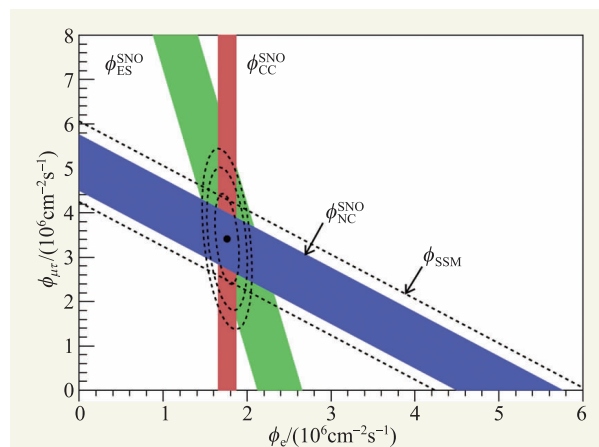


图4 SNO实验的三个反应过程的测量结果^[3]。横坐标为电子中微子流强，纵坐标为另两种中微子的流强之和

中微子的几率为真空振荡的平均效应 $1 - (\sin^2 2\theta)/2$ 。太阳中微子振荡的混合角为 34° 左右，所以高能B-8中微子的生存几率为30%，而低能的pp中微子、Be-7中微子的生存几率为55%。这就解释了不同实验测量结果的差异。

至此，困扰人们三十多年的“太阳中微子丢失之谜”最终被解决。

3 发现大气中微子振荡

尽管太阳中微子最先给出了中微子振荡的迹象，首次发现振荡现象却始于意外发现的大气中微子反常。

七十年代末，有两个实验开始寻找大统一理论预言的质子衰变，一个是小柴昌俊领导的日本神冈实验，另一个是雷因斯领导的美国IMB实验。神冈实验的探测器采用3000吨纯净水和1000个直径20英寸的光电倍增管，位于岐阜县一个地下1000 m的废弃砷矿中。实验于1982年开始建设，1983年建成。质子衰变即使存在，也是极其稀少的，必须非常干净地去掉各种假信号，称之为本底事例。地表有大量的宇宙线，会带来很多本底。到地下1000 m，宇宙射线被岩石吸收，降低了10万倍。神冈实验没有找到质子衰变，确定质子的寿命大于 10^{33} 年。

但是，在寻找质子衰变的过程中发现了奇怪的现象。前面提到的宇宙射线指的是自太空的原

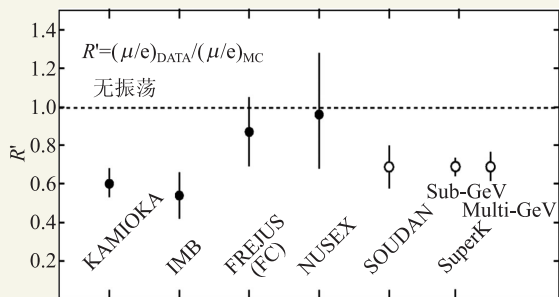


图5 1980年代日本神冈实验(Kamioka)、美国IMB实验、法国FREJUS实验、意大利NUSEX实验,以及1990年代美国SOUDAN实验、日本超级神冈实验(SuperK)对大气中微子反常的测量^[18]。测量值用缪中微子/电子中微子和实验数据/模拟数据的双比值来表示,尽量消掉不确定因素。 $R'=1$ 的虚线表示测量值与预期值一样,缪中微子相对于电子中微子没有减少

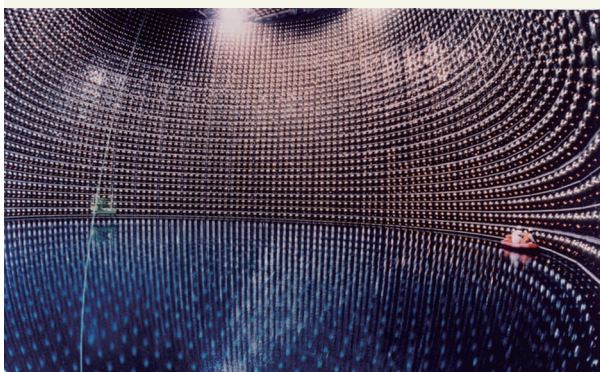


图6 超级神冈探测器。工作人员正在内部使用小船更换光电倍增管

初宇宙射线在地球大气层中产生的缪子。伴随着缪子也会同时产生大量的中微子,称为大气中微子,包括电子中微子、缪中微子以及它们的反粒子。大气中微子也会在探测器中产生信号,因此研究质子衰变时,需要准确地估算探测器中会发生多少大气中微子反应,然后把这些信号扣掉。1988年,小柴昌俊的学生,29岁的梶田隆章在分析数据时发现,测到的缪中微子比预期的少,被称为“大气中微子反常”^[4]。IMB实验也发现了类似现象(图5)。由于实验数据不够精确,也由于法国和意大利的两个实验FREJUS和NUSEX给出了不同结果,用中微子振荡解释大气中微子反常未被普遍接受。

如果不是大自然的慷慨,大气中微子反常之谜也许还要延续很久。就在小柴昌俊退休前不久

的1987年2月23日,出现了一次超新星爆发,神冈实验、IMB实验以及一个俄国实验共探测到了24个超新星中微子。超新星爆发在宇宙演化中非常重要。一般相信,它的爆发需要中微子来助力,叫做“中微子驱动的延迟爆发机制”。观测到这24个超新星中微子,不足以完全证明这个机制是正确的,但证实了超新星爆发确实会产生非常多的中微子。小柴昌俊因“观测到来自宇宙的中微子”与探测到太阳中微子的戴维斯分享了2002年诺贝尔奖。

因为这个成果,日本政府同意神冈实验升级为超级神冈实验。其探测器于1991年开始建造,1996年完成(图6)。实验原理完全相同,但是采用了5万吨纯净水,13000个光电倍增管。超级神冈的科学目标包括太阳中微子、大气中微子、质子衰变等,后来还用作加速器中微子实验K2K/T2K的远端探测器,是国际中微子研究当之无愧的旗舰装置。

大气中微子与水中的原子核发生反应,电子中微子会产生电子,缪中微子会产生缪子。电子和缪子在水中产生切连科夫光,在其前进方向上形成一个光环,被光电倍增管探测到,光子数正比于能量,而中微子的能量可由电子与缪子的能量推得。由于电子与缪子形成的光环形状不同,可以判别出是哪种中微子。

1998年,升级后的超级神冈实验精确测量了两种中微子个数与能量、方向的关系。由于地球大气层的球对称性,如果中微子在传播中没有发生变化,来自探测器上方和来自下方、穿过地球而来的中微子数应该相同。实际测得的缪中微子事例存在很明显的上下不对称,来自下方的中微子明显变少,这表明缪中微子在穿过地球时消失了,消失的比例和中微子的传播距离和能量有关,这正是中微子振荡的关键证据。图7显示了缪中微子上下不对称与能量的关系,浅绿色阴影表示无振荡的预期值,红色虚线表示中微子振荡的理论预测值,实验值与振荡理论很好地符合。此外,上下不对称与距离的关系也与振荡理论符合,而电子中微子则是上下基本对称的,没有发

生振荡(因为其振荡几率很小)。

因此, 超级神冈以确凿的证据发现了大气中微子的振荡, 标志着中微子研究黄金时代的到来。

4 中微子振荡的全景图

除了大气和太阳中微子实验, 中微子振荡也得到了反应堆和加速器中微子实验的证实, 这是人工中微子源, 流强可以较好地控制, 通过相对比较提高实验可靠性。

2002年, 铃木厚人领导的KamLAND实验, 通过对日本和韩国几十个反应堆发出的中微子的探测, 首次发现反应堆中微子的消失现象^[7], 并且其消失的幅度与SNO实验对太阳中微子的测量结果相一致。与此同时, 西川公一郎领导的K2K实验, 使用超级神冈探测器作为远端探测器, 首次观测到距离250 km的日本高能所(KEK)加速器产生的高能中微子的振荡现象^[8], 并且其振荡行为与超级神冈发现的大气中微子振荡相一致。这样太阳和大气中微子振荡的行为分别得到人工反应堆和加速器中微子实验验证。

中微子振荡的6个参数中, 太阳中微子振荡确定了其中的一组参数 $\sin^2 2\theta_{12} \sim 0.86$ 和 $\Delta m_{21}^2 \sim 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, 大气中微子振荡确定了另一组参数 $\sin^2 2\theta_{23} \sim 1$ 和 $\Delta m_{32}^2 \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 。三种中微子之间的振荡公式比较复杂, 但因为两个质量平方差相差30倍, 中微子振荡经常可以近似为两种中微子之间振荡。一个能量为 E 的中微子, 飞行距离 L 后仍然是它自身的几率(存活几率)可以表达为

$$P_{\text{sur}} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta m^2 L / 4E), \quad (7)$$

其中混合角决定振荡振幅, 质量平方差决定振荡频率。

2003年左右, 中微子振荡现象已得到实验确立, 寻找与混合角 θ_{13} 相关的第三种振荡模式成为研究的焦点。以前的近距离反应堆实验, 法国CHOOZ和美国Palo Verde, 未能发现该振荡, 因此这个混合角远小于另外两个, 其具体数值的大小将决定中微子物理的发展方向。国际上先后提出八个反应堆中微子的项目, 以及多个加速器中

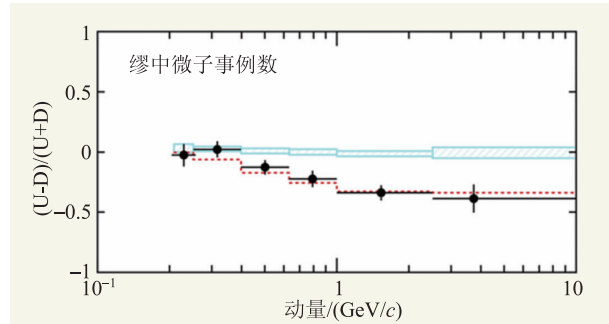


图7 超级神冈实验1998年公布的物理结果^[2]

微子项目。最后共有三个反应堆中微子实验和两个加速器中微子实验进入实验建设阶段, 包括中国的大亚湾、韩国的RENO以及法国的Double Chooz三个反应堆中微子实验, 以及日本的T2K和美国的NOvA两个加速器中微子实验。

大亚湾反应堆中微子实验坐落在我国广东省深圳的大亚湾核电站附近, 于2007年开始建设, 2011年底投入运行。2012年3月, 大亚湾实验以超过5倍标准偏差的置信水平率先给出了第三种振荡模式存在的证据^[9], 并精确测量了中微子参数 θ_{13} 的大小:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(\text{stat.}) \pm 0.005(\text{syst.}), \quad (8)$$

其中两个误差分别代表统计误差和系统误差。

大亚湾实验发现 θ_{13} 值远大于预期, 为未来中微子实验测量质量顺序和CP破坏相角铺平了道路。多个新的中微子实验被提出, 包括中国的江门中微子实验(JUNO), 美国DUNE, 日本Hyper-K, 印度INO, 韩国RENO-50, 美国在南极的PINGU, 法国在地中海的ORCA等。其中JUNO、INO、DUNE已批准, PINGU、ORCA、Hyper-K有较大可能被批准。

江门中微子实验位于江门开平市, 距阳江和台山核电站各53 km, 以2万吨液体闪烁体作为中微子探测介质, 实验厅位于地下700 m。2013年正式批准立项, 2015年开始开工建设, 预计2020年建成开始运行。通过精确测量反应堆中微子能谱的变形, 将在6年内确定质量顺序到3-4倍标准偏差的水平, 也将以好于1%的精度测量多个中微子振荡参数, 探测超新星中微子、地球中微子、太阳中微子、大气中微子等^[19]。

日本的超超级神冈实验(Hyper-K)计划使用100万吨纯净水为探测器,计划2025年建成。可以通过大气中微子测量中微子质量顺序,可以将质子衰变的寿命下限再提高一个量级,在测量CP破坏、探测超新星中微子、超新星背景中微子上,它也具有显著的优势。

美国的DUNE实验经过多年的讨论和重新优化设计,已于今年正式成立合作组,计划2025年建成。DUNE实验设计使用1—4万吨的液氩作为中微子探测的靶材料,测量1300 km外费米实验室的加速器中微子,从而可以对中微子质量顺序和CP破坏现象作出高精度的测量。

预期未来10—15年,很有可能完成中微子振荡全部参数的测量。

5 结论

中微子研究先后4次获得诺贝尔奖,中微子振荡取得多个重大突破,但无论是理论还是实验,都有更多的重大问题需要解决。

在标准的中微子振荡理论中,还有质量顺序和CP破坏相角需要测量,也需要确定混合角 θ_{23} 是否偏离 45° 。它们不仅仅影响中微子振荡的大小、引导中微子味结构的更深层理论解释,质量

顺序还决定了无中微子双贝塔衰变实验的前景,CP破坏相角的大小也是宇宙起源与演化必须解决的关键问题。对中微子混合参数的精确测量将使检验混合矩阵的么正性、窥探新物理成为可能。

中微子振荡证明中微子有微小的质量,但具体数值仍然未知,正在通过贝塔衰变、无中微子双贝塔衰变、或者宇宙学测量等方法研究。根据已有的数据限制,估计最重的在0.1 eV量级,与顶夸克差了12个数量级,最轻的仍不能排除为零。这带来了新的问题:它的质量也跟顶夸克一样,是由希格斯机制产生的吗?还是有新的产生机制?假如中微子是马约拉纳粒子,即它是自身的反粒子,那么现在流行的关于中微子质量产生的“跷跷板机制”能够比较自然地解释它为什么这么轻,但粒子物理的标准模型需要大的修改。目前国际上有多组无中微子双贝塔衰变实验正在进行。

中微子穿透能力强,是独一无二的研究天体内部的探针。中微子天文学刚刚兴起,将在太阳物理、地球物理、超新星爆发、宇宙起源、宇宙线起源等方面开创新局面。特别是最近南极冰立方实验首次探测到超高能中微子,未来进一步升级后,有可能解决宇宙线起源的百年之谜。

中微子研究的未来将会更加精彩。

参考文献

- [1] Cowan C *et al.* Science, 1956, 125: 103
- [2] Danby G *et al.* Phys. Rev. Lett., 1962, 9: 36
- [3] Davis R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1968, 20: 1205
- [4] Hirata K S *et al.* (Kamiokande). Phys. Lett. B, 1988, 205: 416
- [5] Fukuda Y *et al.* (Super-Kamiokande). Phys. Rev. Lett, 1998, 81: 1562
- [6] Ahmad Q R *et al.* (SNO). Phys. Rev. Lett., 2002, 89: 011301
- [7] Eguchi K *et al.* (KamLAND). Phys. Rev. Lett., 2003, 90: 021802
- [8] Ahn M H *et al.* (K2K). Phys. Rev. Lett., 2003, 90: 041801
- [9] Olive K A *et al.* (PDG). Chin. Phys. C, 2014, 38: 090001
- [10] An F P *et al.* (Daya Bay). Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 171803
- [11] Abe K *et al.* (T2K). Phys. Rev. Lett., 2011, 107: 041801
- [12] Bethe H A. Phys. Rev., 1939, 55: 434
- [13] Bahcall J N. Phys. Rev. Lett., 1964, 12: 300
- [14] Bahcall J N, Serenelli A M. Astrophys. J., 2005, 626: 530
- [15] Chen H H. Phys. Rev. Lett., 1985, 55: 1534
- [16] Wolfenstein L. Phys. Rev. D, 1978, 17: 2369
- [17] Mikheev S P, Smirnov A Y. Sov. J. Nucl. Phys., 1985, 42: 913
- [18] Kajita T. New J. Phys., 2004, 6: 194
- [19] An F P *et al.* (JUNO), arXiv:1507.05613