

# 揭秘中微子振荡与质量起源

何红建

清华大学近代物理研究所

E-mail: hjhe@tsinghua.edu.cn

2015 年 10 月 6 日瑞典斯德哥尔摩皇家科学院传来喜讯: 领导 Super-Kamiokande 合作组的日本科学家梶田隆章(Takaaki Kajita)和领导 Sudbury Neutrino Observatory (SNO) 合作组的加拿大科学家麦克唐纳(Arthur B. McDonald)因为“发现了中微子振荡、由此表明中微子具有质量”而共同分享了今年的诺贝尔物理学奖。

## 1 中微子振荡的革命

1998 年梶田隆章宣布, Super-Kamiokande 实验发现大气中微子在传播过程中改变身份(“味道”)的现象, 亦称为中微子振荡。这些大气中微子产生于宇宙线进入大气层时发生的反应, 被 Super-Kamiokande 位于 1 km 岩石覆盖的山体内的切伦科夫探测器所记录。该探测器包含 5 万吨纯净水, 用以测量  $\mu$  中微子通量随天顶角变化的关系, 发现显著偏离无中微子振荡的分布(中微子的天顶角是中微子传播方向与指向地球中心方向的夹角)。这是  $\mu$  中微子在传播中通过振荡转变为其他味道中微子的第一个实验证据<sup>[1]</sup>。第二个关键性证据来自位于加拿大安大略省 Sudbury 附近地下 2 km 的 SNO 探测器。该探测器包含 9500 只光电倍增管和 1000 吨纯净重水。SNO 探测来自在太阳内部核聚变产生的电子反中微子, 在 2002 年发现这些中微子到达地球时的确发生了丢失<sup>[2]</sup>。这可以解释为电子反中微子通过振荡转变为其他味道中微子。随后日本 KamLAND 反应堆中微子实验于 2003 年首次发表结果, 进一步证实了电子反中微子发生的振荡, 与 SNO 的发现一致。

这里值得简要回顾一下中微子领域发展的历史进程。中微子的存在是奥地利理论物理学家泡利(Wolfgang Pauli)为了解释原子核  $\beta$  衰变的连续谱, 于 1930 年提出的。在此基础上, 意大利物理学家费米(Enrico Fermi)于 1933 年建立了描述  $\beta$  衰变的四费米弱作用有效理论。1953 年, 洛斯阿拉莫斯国家实验室的科温(Clyde L. Cowan Jr.)和莱因斯(Frederick Reines)等人通过核反应堆  $\beta$  衰变产生的反中微子与氢原子核(质子)进行散射, 从分析散射末态中子和正电子的截面证实了电子反中微子的存在, 其成果在 1956 年发表于 *Science*, 他们因此荣获 1955 年诺贝尔物理学奖。随后莱德曼(Leon M. Lederman)、舒瓦茨(Melvin Schwartz)和斯坦伯格(Jack Steinberger)于 1962 年发现了第二种中微



**何红建** 清华大学教授, 博士。长期从事粒子物理及量子引力与宇宙学交叉领域的研究。曾获得王淦昌物理奖、中国青年科技奖和国家杰出青年科学基金等。曾在德国 DESY 国家实验室(汉堡)、美国德克萨斯大学奥斯汀分校、美国密歇根州立大学等机构从事研究工作。2005 年被引进为清华大学教授, 讲授量子物理、量子场论和规范场论等课程, 获得清华大学校级精品课程荣誉。

子,  $\mu$  中微子(1988 年诺贝尔物理学奖)。1968 年, 戴维斯(Raymond Davis Jr.)发现太阳中微子丢失现象(2002 年诺贝尔物理学奖)。1985 年, 日本神冈实验和美国 IMB 实验揭示大气中微子反常现象。之后这两个实验组于 1987 年观测到超新星中微子。日本小柴昌俊因此与戴维斯分享了 2002 年诺贝尔物理学奖。1989 年, 欧洲核子中心 CERN 运行的 LEP 实验证实了仅存在 3 种轻的味道中微子。1998 年, 日本超级神冈实验发现了中微子振荡现象(2015 年诺贝尔物理学奖和 2015 年基础物理学突破奖)。2000 年, 美国费米实验室发现第三种中微子( $\tau$  中微子)。2001~2002 年, 加拿大 SNO 实验验证太阳中微子丢失现象是因为转换成了其他类型中微子(2015 年诺贝尔物理学奖和 2015 年基础物理学突破奖)。2003 年, 日本 KamLAND 合作组通过反应堆实验证实了反电子中微子发生振荡模式(2015 年基础物理学突破奖)。2003 年, 日本 K2K 合作组通过加速器中微子实验证实大气中微子振荡模式(2015 年基础物理学突破奖)。2006 年, 美国 MINOS 实验进一步证实大气中微子振荡模式。2011 年 6 月, 日本 T2K 加速器实验观测到较大的第三种中微子振荡混合角的初步迹象, 信号超出背景 2.5 倍标准偏差(2015 年基础物理学突破奖)。2012 年大亚湾合作组首次宣布发现第三种中微子振荡混合角, 其信号超出背景 5.2 倍标准偏差(2015 年基础物理学突破奖)。至此, 中微子的 3 种振荡模式就被全部发现了。

中微子作为自然界中最轻的费米子, 不带电, 只参与弱相互作用, 与其他物质的反应截面在  $10^{-40} \text{ cm}^2$  量级,

极难探测,因而常被称为“幽灵粒子”.中微子振荡的发现首次揭示了中微子具有非零质量,打开了超越标准模型的一个崭新窗口,给物理学带来了又一次革命性突破.

## 2 能量守恒与幽灵粒子的诞生

中微子存在的证据源于 20 世纪初的放射性研究.1914 年查德威克(James Chadwick)发现 $\beta$ 衰变给出逐渐衰减的连续谱<sup>[3]</sup>,而非理论预期的分离谱.这个预期是基于两个假设的前提:(i) $\beta$ 衰变是一个两体衰变(即产生一个较轻的原子核和一个电子);(ii)衰变前后能量守恒.因此 $\beta$ 衰变中要么发生了一部分未知的能量丢失,要么不是两体衰变.随后的实验更精确地测量了 $\beta$ 衰变能谱,继续支持查德威克的发现.于是著名理论家玻尔(Niels Bohr)大胆提出质疑:“在目前的原子理论中,可以说无论从经验还是理论上都没有理由坚持 $\beta$ 衰变中能量守恒.”他在 1929 年写了一篇短文寄给泡利征求意见.而泡利回复道,“我必须说它几乎没给我带来任何满足”,并建议玻尔,“让这篇短文先休息一长段时间,并让星星安静地照耀它”.但玻尔却没有放弃,他继续宣传核物理中能量动量不守恒的假说.与之相反,泡利于 1930 年猜测 $\beta$ 衰变中实际上发生了三体衰变<sup>[4]</sup>:末态衰变产物中除了一个较轻的原子核和一个电子之外,还释放出一个不带电的、自旋 1/2 的零质量粒子.正是这个新粒子带走了一部分能量,导致末态电子能谱呈现连续谱.新粒子、电子和反冲核的能量动量总和保持不变,所以能量动量守恒依然成立.而这个电中性的零质量粒子由于与物质相互作用极其微弱,以至于那时的实验方法和技术很难探测.这个方案既保持了能量动量守恒,又同时预言了一个幽灵般的新粒子.费米在 1932 年把它冠名为“中微子”(neutrino).1933 年费米进一步提出了四费米有效理论<sup>[5]</sup>,以定量描述 $\beta$ 衰变.

回顾这段历史,发人深省的是,为什么玻尔急于放弃能量守恒原理?那时他显然还没有领悟到能量动量守恒定律背后的深刻物理与数学基础.事实上,早在 1915 年德国女数学家诺特(Emmy Noether)就证明了著名的诺特定理,于 1918 年发表<sup>[6]</sup>.该定理表明,自然界任何一种连续的整体对称性都对应于一个守恒定律.而能量动量守恒也不例外,它们恰好是时间和空间的平移变换对称性所导致的守恒定律.时间和空间平移对称性是平直时空的基本特征,这一基本性质对于量子现象也毫不例外.这是 $\beta$ 衰变必须遵从能量动量守恒的深刻物理与数学基础.狭义相对论所揭示的时空对称性是洛伦兹群(Lorentz Group)  $SO(1,3)$ ,这与时空平移对称性共同构成了庞加莱群(Poincaré Group).事实上,庞加莱群是任何平直时空最基本的性质.遗憾的是,在数学家于 1915 年提出诺特定理之后许多年中,物理学家们(包括玻尔在内的很多人)并没有真正领悟和重视诺特定理的本质及其物理内涵.就连泡利这样一位理论物理

天才也仅仅是对玻尔的能量不守恒假说感到不满,但并未真正认识到能量动量守恒定律背后的深刻物理与数学基础.这也是他对中微子假说信心不足的一个重要原因.泡利在 1930 年 12 月写信给参加一个国际会议的同行,“我做了一件可怕的事情,我假设了一种无法探测的粒子”<sup>[4]</sup>.幸运的是,泡利的中微子假说正确地保持了能量动量守恒原理(即时空最基本的平移对称性),他也因此成为中微子领域的开创者.

## 3 Majorana 粒子与中微子质量产生

英国理论物理学家狄拉克(Paul Dirac)于 1928 年建立了关于电子的相对论性方程——狄拉克方程<sup>[7]</sup>,

$$(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi(x) = 0. \quad (1)$$

这个方程描述自旋 1/2 的 Dirac 费米子,包含 4 个分量.它由两个 Weyl 费米子构成,分别处于洛伦兹群的(1/2, 0)和(0, 1/2)表示,代表手征性(chirality)为左手和右手的 Weyl 粒子,它们结合在一起才能给出 Dirac 方程中的电子质量项. Dirac 粒子是四维时空中最复杂的自旋 1/2 的费米子.而 Weyl 费米子是两分量的旋量粒子,其质量为零,以光速传播,是最简单的费米子.由同一个 Weyl 旋量及其复共轭可以构造一个四分量的 Majorana 费米子. Majorana 粒子的一个基本性质是等同于其反粒子,而且具有非零的 Majorana 质量项.从本质上讲, Majorana 费米子可以描述为一种实的旋量场,因而它与其反粒子等同.这也恰好是意大利理论家 Ettore Majorana 最初提出这种费米子的缘由.1937 年,他在深入研究 Dirac 方程时,发现了狄拉克 $\gamma^\mu$ 矩阵的一组纯虚数表示,代入上述 Dirac 方程 (1) 后就得到一个实方程,因而可以求出实的旋量场解,其所描述的费米子自然等同于其反粒子<sup>[8]</sup>.有趣的是,文献[8]是 Majorana 公开发表的第 9 篇论文,也是其毕生发表的最后一篇论文,而且是费米亲自帮他代笔撰写和投稿的. Majorana 的发现表明, Dirac 方程不仅包含了关于 Dirac 旋量的复数解,而且同时包含了关于 Majorana 旋量的实数解.出乎 Dirac 本人的预料,这个方程不仅揭示了电子的自旋,还预言了反物质的存在,并同时包含了一种不同于电子的全新粒子解(Majorana 费米子).我们由此看到,一个深刻而伟大的方程的数学与物理学内涵,竟然远远超出了其发明者和整个物理界的预期,这的确是物理学发展史上的一个奇迹.

判断一个费米子是否是 Majorana 粒子,可以鉴定描述它的旋量场是否满足 Majorana 条件:  $\psi = \psi^c$ . 或者检查它是否具有 Majorana 质量项,此质量项改变费米子数 2 个单位.有趣的是,标准模型中所有带电轻子和夸克都只能是 Dirac 粒子,因为它们都获得非零质量,而且电荷守恒迫使它们不能等同于其反粒子.唯一例外的是右手中微子,

它可以被直接引入标准模型,但它不参与任何标准模型的规范相互作用,呈电中性.因此,右手中微子可以拥有非零 Majorana 质量,成为 Majorana 粒子,与其反粒子等同.倒是理论上没有任何可靠理由可以禁戒它的非零 Majorana 质量项.由于这个质量项自动保持标准模型的所有规范对称性,其质量取值可以任意大,原则上可达到标准模型作为一个有效理论的紫外截断,比如大统一尺度附近的范围( $10^{14}\sim 10^{16}$  GeV).于是,左手和右手中微子的质量矩阵呈现如下形式,

$$\begin{pmatrix} 0 & m_D^T \\ m_D & M_R \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中  $m_D = O(100 \text{ GeV})$  是联系左右手中微子场的 Dirac 质量项,它由标准模型希格斯机制产生;  $M_R$  则是右手中微子的 Majorana 质量项.将上面的矩阵对角化给出 3 种轻中微子 Majorana 质量的 Seesaw 形式(亦称为跷跷板机制)<sup>[9-13]</sup>,

$$\mathbf{m}_\nu = m_D^T M_R^{-1} m_D, \quad (M_R \gg m_D). \quad (3)$$

由于  $M_R \gg m_D$ , 公式(3)预言轻中微子质量可以自然地处于  $O(0.1 \text{ eV})$  范围.因此,正是由于作为标准模型单态的右手中微子具有很大的 Majorana 质量,从而通过 Seesaw 机制自然地给左手中微子产生了 sub-eV 范围的 Majorana 质量,成功解释了为什么中微子振荡实验探测到的中微子质量尺度远远小于其他所有已知费米子(带电轻子和夸克)的质量.如果中微子是 Dirac 粒子,要理解其 sub-eV 的微小质量就是一个难题.2006 年我们提出了 Dirac Seesaw 新机制<sup>[14]</sup>,给中微子产生  $O(0.1 \text{ eV})$  的 Dirac 质量.这里需要引入 Seesaw 尺度的重希格斯二重态和 TeV 尺度的单态标量粒子.这个模型实现相当简单,但还是没有公式(2)和(3)中的 Majorana Seesaw 机制那样自然.文献中还提出其他各种变形 Seesaw 机制,但均没有公式(3)中的原始 Seesaw 机制(type-I)自然和简洁.

此外,中微子振荡实验无法鉴定中微子是 Majorana 粒子还是 Dirac 粒子.甄别中微子是否是 Majorana 粒子的一个关键手段是进行中微子的双 $\beta$ 衰变实验<sup>[15]</sup>,因为 Majorana 中微子将导致中微子的双 $\beta$ 衰变信号.不过这个实验难度相当大.

#### 4 中微子混合、中微子振荡与 CP 破坏

如上所述,三种左手中微子的微小质量可以很自然地由 Seesaw 机制产生,形成  $3 \times 3$  Majorana 质量矩阵.其对象角化给出中微子的混合矩阵  $U$ ,它包含三个混合角( $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$ ),一个 Dirac CP 相角和两个 Majorana CP 相角.于是中微子的味道本征态  $|v_\alpha\rangle$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ ) 与其质量本征态  $|v_k\rangle$  ( $k=1,2,3$ ) 之间通过混合矩阵  $U$  相联系<sup>[16,17]</sup>,

$$|v_\alpha\rangle = \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k}^* |v_k\rangle. \quad (4)$$

为了纪念中微子混合与振荡的提出者,这个  $U$  矩阵通常称为 Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) 矩阵<sup>[16,17]</sup>.

根据量子力学,具有能量  $E$  的味道中微子  $|v_\alpha\rangle$  在真空中传播距离  $L$  之后转变为  $|v_\beta\rangle$  的振荡几率为<sup>[16,18]</sup>,

$$P_{l \rightarrow l'} = \sum_{j=1}^3 |U_{lj'} U_{lj}|^2 + 2 \sum_{j < k} |U_{lj'} U_{lj} U_{lk} U_{lk}| \cos(2\Delta_{jk} \mp \phi_{l';jk}), \quad (5)$$

其中  $\Delta_{jk} \equiv L \Delta m_{jk}^2 / (4E)$ , 这里  $\Delta m_{jk}^2$  代表两种振荡中微子的质量平方差.而其中的相角  $\phi_{l';jk}$  是刻画中微子振荡中 CP 破坏的关键参量:

$$\phi_{l';jk} \equiv \arg(U_{lj'} U_{lj}^* U_{lk} U_{lk}^*). \quad (6)$$

它包含 PMNS 矩阵的 4 个矩阵元,且仅当其中的 Dirac CP 相角  $\delta \neq 0, \pi$  和  $l \neq l', j \neq k$  时才不等于零.表征夸克部分和轻子部分 CP 破坏的参数化无关的普遍参量是 Jarlskog 不变量  $J$ <sup>[19]</sup>,它是关于 CP 破坏的物理可观测量.它有明确的几何意义,其大小是混合矩阵  $U$  构成的幺正三角形面积的两倍.此幺正三角形三条边长度是,

$$(a, b, c) \equiv (|U_{11} U_{11}|, |U_{12} U_{12}|, |U_{13} U_{13}|). \quad (7)$$

而其三个内角定义为,

$$\begin{aligned} \alpha &= \arg\left(-\frac{U_{e2} U_{e'2}^*}{U_{e3} U_{e'3}^*}\right), \\ \beta &= \arg\left(-\frac{U_{e3} U_{e'3}^*}{U_{e1} U_{e'1}^*}\right), \\ \gamma &= \arg\left(-\frac{U_{e1} U_{e'1}^*}{U_{e2} U_{e'2}^*}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

我们在 2013 年首次严格证明<sup>[20]</sup>,

$$\alpha = \pi - \phi_{l';23}, \quad \beta = \pi - \phi_{l';31}, \quad \gamma = \pi - \phi_{l';12}. \quad (9)$$

给出中微子振荡 CP 相移与幺正三角形三个外角的定量相等关系.于是我们得到了新的中微子振荡公式,完全由轻子幺正三角形的边长和角度决定,其中只有 3 个独立参数<sup>[20]</sup>,

$$\begin{aligned} P_{l \rightarrow l'} &= 4ab \sin(\Delta_{12} \pm \gamma) \sin \Delta_{12} \\ &+ 4bc \sin(\Delta_{23} \pm \alpha) \sin \Delta_{23} \\ &+ 4ac \sin(\Delta_{31} \pm \beta) \sin \Delta_{31}. \end{aligned} \quad (10)$$

这个简洁公式证明,中微子振荡几率最多只包含 3 个独立参数(而非 PMNS 混合矩阵所包含的 4 个独立参数),从而改写了上述 Particle Data Book 的传统公式<sup>[18]</sup>.2014 年我们使用这个几何表述系统地研究了南极 IceCube 实验的超高

能天文微子信号, 对于天文微子味道组分给出了模型无关的理论预言<sup>[21]</sup>.

迄今各种中微子振荡实验已经可靠地测量了中微子振荡的 3 个混合角, 发现它们不仅非零, 而且相当显著, 其中心值约为  $(\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}) = (34^\circ \sim 35^\circ, 42^\circ \sim 45^\circ, 8^\circ \sim 9^\circ)^{[18]}$ . 而且还同时测量了两个独立的质量平方差,  $|\Delta m_{31}^2| \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  和  $|\Delta m_{21}^2| \approx 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ <sup>[16]</sup>. 然而关于 Dirac CP 相角  $\delta$  的测量误差较大, 在 2 倍标准偏差内无任何限制. 不过, 目前 T2K 的实验数据<sup>[22]</sup>已显示了  $\delta$  非零的初步迹象, 中心值接近最大混合  $\delta \approx -90^\circ$ , 偏离无 CP 破坏情形大约 1.5 倍标准偏差. 今年 7 月我们提出了“约束最大 CP 破坏”的新概念 (CMCPV)<sup>[23]</sup>, 并给出了 CMCPV 的参数化无关的普遍解, 它在标准参数化下预言  $(|\delta|, \theta_{23}) = (90^\circ, 45^\circ)$ . 我们还证明了一个普遍定理<sup>[23]</sup>, 揭示了 CMCPV 的起源和定量实现的条件.

## 5 $\theta_{13}$ 混合角、CP 破坏与反物质消失之谜

1998~2002 年, 中微子振荡实验 Super-Kamiokande 和 SNO 已经很好地确立了两个很大的混合角 ( $\theta_{12}, \theta_{23}$ ). 但是直到 2011 年春, 关键混合角  $\theta_{13}$  的下限一直与零符合 (90% CL). 故无法确保存在可观测的 Dirac CP 破坏效应. 而宇宙中产生正反物质非对称性 (或称反物质消失之谜) 的一个先决条件是存在非零 CP 破坏<sup>[24]</sup>. 虽然标准模型夸克部分的 CP 破坏已被探测, 却不足以解释宇宙中已知的正反物质非对称性. 然而, 通过中微子 Seesaw, 利用轻子部分的 CP 破坏和 Leptogenesis 机制<sup>[25,26]</sup>, 就可以自然地产生正反物质非对称性, 与观测一致<sup>[26,27]</sup>. 在理论上可靠预言  $\theta_{13}$  绝对大小实际上是非常困难的, 只要输入足够多的假定或者自由参数,  $\theta_{13}$  可以取任何值, 这在文献中有大量讨论. 所以当我们着手研究  $\theta_{13}$  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  $\theta_{13}$ , 而是选择研究非零  $\theta_{13}$  与非零  $\theta_{23}-45^\circ$  (即  $\theta_{23}$  对于最大混合  $45^\circ$  的偏离) 这两个小量之间的定量关联. 我们提出了关于中微子质量矩阵的一种最基本的对称性 ( $\mu-\tau$  对称性) 与 CP 对称性破缺共同起源的新机制, 构造极为自然和简洁. 我们由此预言了两种非零偏离的关联. 输入关于  $\theta_{23}-45^\circ$  的实验数据, 我们预言了非零  $\theta_{13}$ . 我们从最小中微子 Seesaw 机制出发给予定量实现, 进一步产生已观测到的宇宙中正反物质非对称性要求一个非零  $\theta_{13}$ , 它导致我们预言了下限  $\theta_{13} > 1^\circ$ . 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. 这给大亚湾实验探索  $\theta_{13}$  提供了有益的支持, 但还不足以确保其一定能测到, 因为大亚湾的探测精度是  $\theta_{13} = 2.9^\circ$ . 我们在 2010 年 1 月的论文<sup>[18]</sup>中虽然基于 Seesaw 机制进行构造 (包括两代和三代右手中微子 Seesaw 两种情形), 但我们从中认识到中微子最基本的对称性: 任何一个  $3 \times 3$  的 Majorana 质量矩阵, 其最大非平庸对称性是  $Z_2 \times Z_2$ , 我们称之为  $Z_2(\mu-\tau) \times$

$Z_2(\text{solar})$ <sup>[28]</sup>, 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  $\theta_{12}$  作为它的群参数, 但并未固定  $\theta_{12}$  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. 在我们之前已有作者注意到中微子部分的  $Z_2 \times Z_2$  对称性<sup>[29]</sup>, 但当时并不知道第二个  $Z_2$  与混合角的对应关系, 以及如何由此普遍决定太阳中微子混合角  $\theta_{12}$ . 我们的研究<sup>[28]</sup>发现了第二个  $Z_2$  与  $\theta_{12}$  的定量关系, 并在 2010~2011 年证明  $\theta_{12}$  就是第二个  $Z_2$  的群参数<sup>[28,30]</sup>.

2010 年 8 月李政道先生与 R. Friedberg 发表了一篇文章<sup>[31]</sup>, 提出了另一个预言  $\theta_{13}$  和  $\theta_{23}-45^\circ$  两种非零偏离关联的机制 (称为带电轻子的微扰方法), 该文把我们研究的方法<sup>[28]</sup>称为中微子微扰的 GHY 方法, 并把两种预言作了定量比较, 指出包括大亚湾等正在进行中的中微子实验将对这两种预言给予甄别.

2010 年春季之后我们继续发展了这个方向, 研究掌控这两种非零偏离 ( $\theta_{13}, \theta_{23}-45^\circ$ ) 的基本  $\mu-\tau$  对称性与 CP 对称性破缺的共同起源. 2011 年 4 月我们发表了一篇长文<sup>[30]</sup>, 通过 Seesaw 机制作了系统分析, 同时进行了模型无关的分析, 这与论文<sup>[18]</sup>恰好互补. 作为其中一个关键结果, 我们预言了非零  $\theta_{13}$  与  $\theta_{23}-45^\circ$  偏离的一种新的关联. 其关联系数更大, 从而给出了较大的  $\theta_{13}$  取值区域. 我们的预言得到了 2011 年 6 月日本 T2K<sup>[32]</sup> 和美国 MINOS<sup>[33]</sup> 中微子实验结果的支持. 例如, 我们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  $\theta_{13}$  可达到  $6^\circ \sim 9^\circ$  范围.

2011 年 6 月 T2K 实验提示了较大的  $\theta_{13}$  中心值<sup>[22]</sup>, 这使我立刻猜测  $\theta_{13}$  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. 于是我把研究的出发点选定在探讨对于中微子双最大混合 BM (Bi-Maximal Mixing) ( $\theta_{12}, \theta_{23}) = (45^\circ, 45^\circ)$  和  $\theta_{13} = 0^\circ$  的偏离. 早在 1998 年就有人提出 BM 混合方案, 但之后该方案受到  $\theta_{12}$  实验数据 ( $\theta_{12} = 34^\circ \sim 35^\circ$ ) 强烈排斥, 逐渐被学界所遗忘, 人们都转向其他流行方案. 但我们没有盲从, 自 2011 年夏天另辟蹊径重新研究 BM, 特别是寻找能够预言 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  $Z_2(\mu-\tau) \times Z_2(\text{solar})$  的最小有限群是 Octahedral Group  $O_h$  (八面体群), 这既不是流行的  $A_4$ , 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  $Z_2(\mu-\tau) \times Z_2(\text{solar})$  的破缺量与  $\theta_{13}$  和  $45^\circ-\theta_{12}$  发生定量关联. 经过大量尝试, 我们成功给出了八面体群的构造和它的几何破缺机制, 极为简洁. 我们由此预言了定量关系,  $\theta_{12} + \theta_{13} = 45^\circ$ . 其中没有可调自由参数. 再考虑重整化群跑动对  $\theta_{12} + \theta_{13}$  的修正, 可预言低能测量值  $\theta_{12} + \theta_{13} \approx 43^\circ$ . 因为之前的中微子实验已相当精确地测量了  $\theta_{12}$  混合角, 所以我们能定量预言  $\theta_{13}$  的取值范围. 输入  $\theta_{12}$  实验中心值得出  $\theta_{13} = 8^\circ \sim 9^\circ$ . 2011 年 12 月, LHC 发布了关于希格斯粒子初步迹象的重大新闻, 我又忙于希格斯的

研究. 由于当时大亚湾实验运行对外保密, 我未能将这一研究分析及时定稿. 2012 年 3 月 8 日传来大亚湾发现  $\theta_{13}$  的突破性结果<sup>[34]</sup>, 这给我们带来一个惊喜, 几天之后我们于 3 月 13 日发表了一篇短文<sup>[35]</sup>, 此文还同时预言了最大 CP 破坏相角  $|\delta| \approx 90^\circ$ , 这与目前 T2K 的初步结果<sup>[22]</sup>一致.

## 6 中微子前景展望

从 1998 年 Super-Kamiokande 发现大气中微子振荡和 2002 年 SNO 发现太阳中微子振荡的突破, 到 2012 年大亚湾实验发现  $\theta_{13}$  混合角非零, 中微子的 3 种振荡模式至此全部确立. 第三个混合角  $\theta_{13}$  非零至关重要, 因为这是存在可观测的 CP 破坏效应的前提条件. 大亚湾发现的重大意义还在于其测定的  $\theta_{13}$  非零中心值比较大 ( $\theta_{13} = 8^\circ \sim 9^\circ$ ), 比夸克部分相应的混合角  $\theta_{13} \approx 0.23^\circ$  大 40 倍左右. 这样一个显著非零的  $\theta_{13}$  给下一步探测轻子部分的 CP 破坏效应带来了新希望, 成为发现 CP 破坏的基石. 通过中微子振荡进一步发现轻子部分 CP 破坏是高能界公认的下一个诺奖量级的工作, 虽然其难度更大. 探测中微子 CP 破坏的实验包括美国的 NOvA 和 LBNF/DUNE 加速器实验, 以及日本的 Hyper-Kamiokande 实验. 此外, 无中微子双贝塔衰变实验有可能首次确证中微子是 Majorana 粒子, 这显然也是一个诺奖量级的工作, 虽然其难度和挑战都相当大. 目前国际上正在计划的无中微子双贝塔衰变实验包括加拿大的 SNO+, 西班牙的 NEXT, 中国的 Pandax-III, 美国的 Majorana 和 nEXO, 德国的 Gerda, 法国的 SuperNEMO, 意大利的 CUORE/CUPID, 和日本的 KamLAND-Zen 实验. 其中 Pandax-III 是上海交通大学提出的使用 Xe136 高压气体进行无中微子双贝塔衰变实验的计划. 另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. 它在 2013 年探测到超高能天文(TeV-PeV)信号, 开启了中微子天文学的时代. 这是又一个有望问鼎诺奖的实验方向.

中国在大亚湾实验之后的下一个目标是江门中微子实验(JUNO), 将测量三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, 开始实验探测. 国际上探测中微子质量排序的其他实验包括美国在南极设计的 PINGU 项目, 法国在地中海计划的 ORCA 项目, 以及韩国的 RENO50 和印度的 INO 等实验. 测定中微子的质量排序也具有重要意义, 因为这个发现将对探测无中微子双贝塔衰变实验产生决定性影响.

今年的中微子诺贝尔物理学奖也是对整个高能物理界那些为探测这种神奇“幽灵粒子”而共同艰苦奋斗的求索者们的最高奖赏. 自从 1930 年泡利首次提出中微子假说至今, 中微子领域已经走过了 85 年的辉煌历程, 取得了一系列基础性重大发现, 大大改观了人类认识自然界的图景. 展望未来, 我对中微子物理的前景保持乐观. 我们可以预期中微子领域的下一个突破性发现. 纵观科学发展史, 物理学的成功, 在于其不同分支的交融, 以及由此衍生出新的分支. 20 世纪最初 20 年中物理学界终于突破了经典物理的堡垒, 相对论和量子力学横空出世, 开创了整个物理学的新纪元, 并在 20 世纪中叶导致了量子场论与标准模型的诞生. 中微子的非零质量极其微小, 仅仅为电子质量的千万分之一, 而且只参与弱相互作用. 因此对这样一种幽灵粒子的定量描述从一开始就需要结合相对论与量子力学, 乃至量子场论. 中微子领域迄今的辉煌成就恰恰得益于粒子物理同宇宙学、天文学、核物理、以及地球物理的密切交融. 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从全局出发进行多视角的探索, 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为人类探索质量起源、认识大自然打开了一个崭新窗口. 物理学家们由此深入到中微子的隐秘世界之中, 继续探索中微子的神奇特性, 搜寻下一个可能突破的蛛丝马迹. 航行于大自然丰饶而波涛汹涌的大海之中, 我们惊叹于她的浩淼无疆, 感叹于探索真理的风险、以及求索者的执着与艰辛. 人在极其有限的生命中却拥有无限的好奇之心. 这是多么的奇妙! 让我们赞叹大自然的美丽与富饶! 让我们崇敬大自然的博大与精深! 让我们感谢大自然的神奇与慷慨!

## 参考文献

- 1 Super-Kamiokande Collaboration. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 1562
- 2 SNO Collaboration. Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 011301
- 3 Chadwick J. The intensity distribution in the magnetic spectrum of beta particles from radium (B+C). *Verhandl Dtsch Phys Ges*, 1914, 16: 383
- 4 Pauli W. Letter to the “Radioactives” in Tübingen, December 1930, reproduced in *Cambridge Monogr. Part Phys Nucl Phys Cosmol*, 2000, 14: 1
- 5 Fermi E. Attempt at a theory of the emission of beta ray. *Ricerca Sci*, 1933, 2: 12
- 6 Noether E, Nachr D König, Gesellsch D, et al. Invariant variation problems. *Math Phys Klasse*, 1918, 235–257
- 7 Dirac P A M. The quantum theory of the electron. *P Royal Soc A*, 1928, 117: 610
- 8 Majorana E. Theory of the symmetry of electrons and positrons. *Nuovo Cimento*, 1937, 14: 171

- 9 Minkowski P.  $\mu \rightarrow e\gamma$  at a rate of one out of  $10^9$  muon decays? Phys Lett B, 1977, 67: 421
- 10 Yanagida T. Horizontal Symmetry and Masses of Neutrinos. In: Proceedings of Workshop on Unified Theories and Baryon Number in the Universe. Tsukuba, Japan, KEK, 1979: 95
- 11 Glashow S L. The Future of Elementary Particle Physics. In: Proceedings of the 1979 Cargese Summer Institute on Quarks and Leptons. New York: Plenum Press, 1979: 687
- 12 Gell-Mann M, Ramond P, Slansky R. Complex Spinors and Unified Theories, in Supergravity. Amsterdam: North-Holland Publishing Co, 1979: 315
- 13 Mohapatra R N, Senjanovic G. Neutrino mass and spontaneous parity violation. Phys Rev Lett, 1980, 44: 912
- 14 Gu P H, He H J. Neutrino mass and baryon asymmetry from Dirac seesaw. JCAP, 2006, 0612: 010, doi: 10.1088/1475-7516/2006/12/010
- 15 Rodejohann W. Neutrinoless double beta decay and neutrino physics. J Phys G, 2012, 39: 124008; and references therein
- 16 Pontecorvo B. Mesonium and anti-mesonium. Sov Phys JETP, 1957, 6: 429; Sov Phys JETP 1958, 7: 172
- 17 Maki Z, Nakagawa M, Sakata S. Remarks on the unified model of elementary particles. Prog Theor Phys, 1962, 28: 870
- 18 Particle Data Group. Chin Phys C 38 (2015) 090001, Sec 14. by Nakamura K, Petcov S T, Neutrino Mass, Mixing, and Oscillations, cf. Eqs. (14.13)-(14.14); and references therein
- 19 Jarlskog C. Commutator of the quark mass matrices in the standard electroweak model and a measure of maximal CP violation. Phys Rev Lett, 1985, 55: 1039
- 20 He H J, Xu X J. Connecting leptonic unitarity triangle to neutrino oscillation. Phys Rev D, 2014, 89: 073002, doi: 10.1103/PhysRevD.89.073002
- 21 Xu X J, He H J, Rodejohann W. Constraining astrophysical neutrino flavor composition from leptonic unitarity. JCAP, 2014, 1412: 39, doi: 10.1088/1475-7516/2014/12/039
- 22 T2K Collaboration. Observation of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam. Phys Rev Lett, 2014, 112: 061802, doi: 10.1103/PhysRevLett.112.061802
- 23 He H J, Rodejohann W, Xu X J. Origin of constrained maximal CP violation in flavor symmetry. Phys Lett B, 2015, 751: 586–594, doi: 10.1016/j.physletb.2015.10.066
- 24 Sakharov A D. Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. JETP Lett, 1967, 5: 24, doi: 10.1070/PU1991v034n05ABEH002497
- 25 Fukugita M, Yanagida T. Baryogenesis without grand unification. Phys Lett B, 1986, 174: 45, doi: 10.1016/0370-2693(86)91126-3
- 26 Buchmuller B, Peccei R D, Yanagida T. Leptogenesis as the origin of matter. Annu Rev Nucl Part Sci, 2005, 55: 311, doi: 10.1146/annurev.nucl.55.090704.151558; and references therein
- 27 Barger V, Dicus D A, He H J, et al. Structure of cosmological CP violation via neutrino seesaw. Phys Lett B, 2004, 583: 173, doi: 10.1016/j.physletb.2003.12.037
- 28 Ge S F, He H J, Yin F R. Common origin of soft  $\mu$ - $\tau$  and CP breaking in neutrino seesaw and the origin of matter. JCAP, 2010, 1005: 017, doi: 10.1088/1475-7516/2010/05/017
- 29 Lam C S. The unique horizontal symmetry of leptons. Phys Rev D, 2008, 78: 073015; and references therein
- 30 He H J, Yin F R. Common origin of  $\mu$ - $\tau$  and CP breaking in neutrino seesaw, baryon asymmetry, and hidden flavor symmetry. Phys Rev D, 2011, 84: 033009, doi: 10.1103/PhysRevD.84.033009
- 31 Lee T D, Friedberg R. Deviations of the lepton mapping matrix from the Harrison-Perkins-Scott form. Chin Phys C, 2010, 34: 1547–1555, doi: 10.1088/1674-1137/34/12/022
- 32 T2K Collaboration. Indication of electron neutrino appearance from an accelerator-produced off-axis muon neutrino beam. Phys Rev Lett, 2011, 107: 041801, doi: 10.1103/PhysRevLett.107.041801
- 33 MINOS Collaboration. Improved search for muon-neutrino to electron-neutrino oscillations in MINOS. Phys Rev Lett, 2011, 107: 181802, doi: 10.1103/PhysRevLett.107.181802
- 34 Daya Bay Collaboration. Observation of electron-antineutrino disappearance at daya bay. Phys Rev Lett, 2012, 108: 171803
- 35 He H J, Xu X J. Octahedral symmetry with geometrical breaking: New prediction for neutrino mixing angle  $\theta_{13}$  and CP violation. Phys Rev D, 2012, 86: 111301(R), doi: 10.1103/PhysRevD.86.111301
- 36 T2K Collaboration. Observation of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam. Phys Rev Lett, 2014, 112: 061802, doi: 10.1103/PhysRevLett.112.061802