

# 中微子质量的起源

周 顺

(中国科学院高能物理研究所 100049)

日本东京大学的梶田隆章 (T. Kajita) 教授与加拿大女王大学的麦克唐纳 (A. McDonald) 教授分享了 2015 年的诺贝尔物理学奖, 因为他们分别领导超级神冈实验和萨德伯里中微子观测站实验并发现了大气和太阳中微子振荡现象, 该现象证明中微子具有静止质量。这一重大发现同时也表明粒子物理学标准模型并不完整, 我们需要超出标准模型的新物理来解释中微子质量起源和轻子味混合。本文的主要目的是总结我们目前对中微子质量的认识, 指出中微子物理学中仍未解决的重大基本问题, 强调中微子质量对粒子物理学和宇宙学研究的重要性。

## 一、绪论

我们已经知道自然界存在三种不同类型的中微子, 即电子中微子  $\nu_e$ , 缪中微子  $\nu_\mu$ , 陶中微子  $\nu_\tau$ , 分别对应与它们一起参与带电流弱相互作用的带电轻子, 即电子  $e$ , 缪轻子  $\mu$ , 陶轻子  $\tau$ 。中微子振荡实验发现一种类型的中微子传播一段距离后会转变成另外一种类型。对这种现象最简单和最令人信服的解释就是三种中微子具有不同的静止质量且存在轻子味混合。更准确地讲, 有质量的中微子具有三种质量本征

态  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  和  $\nu_3$ , 它们的质量分别为  $m_1$ ,  $m_2$  和  $m_3$ 。如果存在轻子味混合, 那么中微子的质量本征态与弱相互作用本征态  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  和  $\nu_\tau$  就不相同, 后者是前者以不同的方式进行线性叠加后产生的量子态。当某种类型的中微子在弱相互作用中产生, 这种相互作用本征态是三种质量本征态的相干叠加。中微子产生之后, 将以质量本征态的形式传播, 经过一段距离, 质量本征态之间产生一定量子相位差。当中微子到达探测器时, 质量本征态的叠加方式与产生时的不一样, 所以初始的中微子相互作用本征态存在一定的概率转变成另一种相互作用本征态。中微子振荡实验就是通过测量这种转变概率来确定中微子的质量差别和轻子味混合的大小。因此, 中微子振荡就是有非简并质量的中微子呈现出的一种宏观量子相干现象。

过去的二十多年里, 我们不仅发现了太阳和大气中微子振荡现象, 而且还利用反应堆和加速器产生的中微子束流进一步验证了该现象的存在。在这些实验中, 虽然中微子源、中微子能量、传播距离和中微子探测方法都不相同, 但实验观测结果却都可以用中微子振荡来解释。所以, 我们有确凿无疑的证据显示中

位置的单能电子。信号幅度主要依赖于与标准中微子的混合角  $\theta$ , 以及地球附近的暗物质密度。通过计算发现使用 10 kg 的氙原子核可以获得每年大于 1 的俘获事例数。从这个角度来说此方法还有很长的路要走。

## 三、结论与展望

中微子振荡效应的确立表明中微子具有非零的质量, 这构成了唯一有确凿实验证据的超出标准模型的新物理。为解释中微子质量产生机制而引入的跷跷板机制大部分都包含标准模型单态的惰性中微

子自由度。根据惰性中微子的质量及其相互作用强度来区分, 可分为大统一能标的惰性中微子、TeV 惰性中微子、keV 惰性中微子以及 eV 惰性中微子等。本文以后两种轻惰性中微子为例, 介绍了他们在调制中微子振荡、构成宇宙的温暗物质候选方面的作用。为检验这两种自由度是否存在, 未来的短基线中微子实验能够对 eV 质量的惰性中微子给出回答, 而 X 射线天文观测、贝塔衰变实验可以探测 keV 惰性中微子的存在性。希望在不久的将来中微子物理在这些方面能有所突破。

微子存在非简并的静止质量。那么中微子有质量又意味着什么呢？为了回答这个问题，我们需要回顾一下粒子物理学标准模型。

## 二、标准模型

粒子物理学标准模型是迄今为止最成功的理论模型，其预言的新的基本粒子都已经在高能物理实验中观测到，包括2012年在欧洲核子中心的大型强子对撞机中发现的希格斯粒子。粒子物理学研究的终极目标是探寻物质的最小组成单位和它们之间相互作用的规律，而其标准模型的核心思想可以简要地概括为以下三点：

(1) 构成物质的基本单位是自旋为1/2的费米子，它们是6种夸克（即上夸克u，下夸克d，奇异夸克s，粲夸克c，底夸克b和顶夸克t）和6种轻子（即3种带电轻子和对应的3种不带电的中微子）。每种费米子都存在与其自身质量相等和电荷符号相反的反粒子。

(2) 除了引力之外，自然界存在的其他三种基本相互作用都是由传递自旋为1的规范玻色子来实现的。夸克之间的强相互作用是交换胶子；夸克和轻子都参与分别由带电的 $W^\pm$ 玻色子和中性的 $Z^0$ 玻色子传递的带电流和中性流弱相互作用；夸克和带电轻子通过交换光子参与电磁相互作用。

(3) 强相互作用由满足严格的SU(3)规范对称性的量子场论来描述。弱和电磁相互作用统一由SU(2) $\times$ U(1) $_Y$ 规范场理论来描述，但该对称性自发破缺到U(1)对称性，后者对应电荷守恒定律。弱电规范对称性的破缺是通过标量场获得不为零的真空期望值来达到的，而在对称性破缺之后，夸克和带电轻子产生质量。与该标量场对应的自旋为零的希格斯粒子已经在大型强子对撞机实验中找到。

作为基本粒子的中微子是电中性的，它们只参与弱相互作用，而弱相互作用在标准模型中扮演着非常特殊的角色。首先，传递弱相互作用的 $W^\pm$ 和 $Z^0$ 规范玻色子的质量很重，分别与强和电磁相互作用对应的胶子和光子却都是质量为零的粒子。其次，弱相互作用破坏宇称守恒定律，也就是它对于空间反演变换是不对称的。为了反映弱相互作用的特征，我们通常将费米子场分解为具有左手和右手征性的分量，它们以不同的方式参与弱相互作用。以中微子为例，实验结果显示参与弱相

互作用的中微子是左手的，而反中微子是右手的。正是由于这个原因，标准模型中并没有引入右手中微子和左手反中微子，它们不参与任何相互作用。

不存在右手中微子的一个严重的后果就是中微子无法产生质量。在标准模型中，夸克和带电轻子都同时具有左手和右手分量，所以它们可以与希格斯场相互作用，并在对称性自发破缺之后获得狄拉克质量。因此，为了解释中微子质量，我们必须超越标准模型，引入新的粒子或对称性。这也说明中微子质量对于粒子物理学具有非同寻常的重要性。

## 三、中微子物理的基本问题

虽然中微子振荡实验告诉我们中微子有质量而且轻子存在味混合，但是中微子物理学中还有很多重要的基本问题仍有待解答。这里我们列举一些有望在不久的将来得到解决的重大问题。

问题一：中微子质量是正序还是倒序？中微子振荡实验已经非常精确地测量了两个独立的中微子质量平方差的值 $\Delta m_{21}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2 \simeq 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 和 $|\Delta m_{31}^2| \equiv |m_3^2 - m_1^2| \simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ ，但已有的实验还无法确定中微子质量的排序（即正质量顺序 $m_3 > m_2 > m_1$ 或倒质量顺序 $m_2 > m_1 > m_3$ ）。正在我国广东省江门市建造的JUNO实验将利用两万吨的液闪探测器在距核反应堆53千米处精确测量反应堆中微子的能谱，从而推断出中微子的质量顺序。另外，正在进行和将来的长基线加速器中微子和大气中微子振荡实验可以通过地球物质效应来区分中微子质量顺序。如果实验进展顺利，我们就有希望在接下来的5至10年内彻底解决这个问题。理论上讲，确定中微子质量顺序有利于最终建立夸克和轻子质量谱的统一图像。夸克和带电轻子的质量都是按正序排列的，即 $m_t > m_c > m_u$ ， $m_b > m_s > m_d$ 和 $m_\tau > m_\mu > m_e$ ，所以中微子的质量排序对于统一解释费米子质量谱及质量起源有重要的指导意义。

问题二：中微子的绝对质量有多大？中微子振荡实验不能提供关于中微子绝对质量大小的任何信息。然而，除了中微子振荡实验，我们还没有在其他实验中探测到中微子质量导致的可观测量效应。目前，最有可能确定或限制中微子的绝对质量的方法有两种。一是精确测量氡的贝塔衰变能谱，因为氡的贝塔衰变

${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$  过程中末态电子获得的最大动能受中微子绝对质量的影响。通过精确测量电子的能谱，我们可以观测中微子质量带来的运动学效应。当前实验给出的中微子有效质量上限为 2.2 eV (90% 置信度)，即将取数的 KATRIN 实验的精度可达到 0.2 eV。二是宇宙微波背景辐射和大尺度结构的观测，因为有质量的中微子会影响宇宙的演化。PLANCK 实验组的最新观测结果显示三个中微子质量之和的上限为 0.23 eV (95% 置信度)，由此可以看出中微子的绝对质量不超过 0.1 eV。然而，现在的实验数据仍不能排除最轻的中微子质量为零。如果最轻的中微子质量严格或近似为零，那么一定存在某种对称性或动力学机制来禁戒或压低相应的中微子质量项。

问题三：中微子是其自身的反粒子吗？有质量的费米子可以是狄拉克粒子，也可以是马约拉纳粒子。比如说，夸克和带电轻子都是狄拉克粒子，因为它们的反粒子带有相反符号的电荷，与其自身是不同的粒子。然而，中微子是电中性的，所以中微子可能是其自身的反粒子。从实验上通过观测无中微子双贝塔衰变  $N(A, Z) \rightarrow N(A, Z+2) + e^- + e^-$  来验证中微子的马约拉纳性质是当前中微子实验物理学中的热点问题。国际上已有众多的实验正在寻找锗 ( ${}^{76}\text{Ge}$ ) 和氙 ( ${}^{136}\text{Xe}$ ) 等核同位素的无中微子双贝塔衰变过程，但至今还没有发现这一类衰变的确凿证据。一旦观测到无中微子双贝塔衰变，我们就可以确认中微子是其自身的反粒子，并且知道自然界中存在轻子数破坏的相互作用。但是，没有观测到这种衰变过程并不能判定中微子一定是狄拉克粒子，因为衰变率大小还依赖于中微子的质量顺序、味混合角和 CP 破坏相位角。即使中微子是马约拉纳粒子，当中微子质量为正序且其他参数取特殊的数值时，发生无中微子双贝塔衰变的概率也可以非常小。值得强调的是，确定中微子是狄拉克粒子还是马约拉纳粒子对研究中微子质量起源问题至关重要，它可以指引我们往正确的方向扩充标准模型。

问题四：轻子部分存在 CP 破坏现象吗？我们已经观测到自然界中微小的 CP 破坏现象，例如中性  $K^0 - \bar{K}^0$  和  $B^0 - \bar{B}^0$  介子系统的混合和衰变过程，它显示粒子和反粒子的相互作用形式并不完全相同。在标准

模型中，CP 破坏是由夸克味混合矩阵中的复相位引起的。与夸克部分类似，轻子味混合矩阵中的 CP 破坏相位角会导致中微子振荡几率与反中微子振荡几率存在差别。将来的长基线加速器中微子振荡实验可以探测到这种差别，从而提取轻子部分的 CP 破坏相位角。如果中微子是马约拉纳粒子，轻子混合矩阵中还存在额外的两个 CP 破坏相位角，它们不会影响中微子振荡概率，所以无法利用通常的振荡实验来测量。无中微子双贝塔衰变和中微子 - 反中微子振荡等轻子数破坏过程可以限制马约拉纳 CP 破坏相位角。

我们可以看到，与中微子质量相关的很多基本问题还没有解决，中微子质量的起源也是未解之谜。将来的实验会提供更多有用和必要的信息，并帮助我们最终确定中微子质量的产生机制。

#### 四、中微子质量模型

为了产生微小的中微子质量，我们必须超越粒子物理学标准模型，引入新的基本粒子或者对称性。鉴于标准模型已经成功地通过了除中微子振荡之外的所有其他实验的检验，标准模型的扩充必须保持那些得到实验证实的基本原则不变，这包括洛伦兹不变性和规范对称性。因为中微子既可能是狄拉克粒子，也可能是马约拉纳粒子，所以中微子的质量产生机制可以分为相应的两大类。

如果中微子是狄拉克粒子，我们可以类比夸克和带电轻子的质量产生的方式引入三代右手中微子，而且左手和右手中微子通过汤川相互作用与希格斯场耦合。当标准模型规范对称性自发破缺之后，中微子就获得狄拉克质量。为了产生 1 eV 以下的中微子质量，中微子与希格斯场之间的汤川耦合系数必须小于  $10^{-12}$ 。另一方面，同样是狄拉克粒子的顶夸克的质量却重达 172 GeV，对应的汤川耦合系数大约为 1，它比中微子的耦合系数大 12 个数量级。怎么理解如此小的中微子汤川耦合系数是狄拉克中微子质量模型必须解决的问题。

此外，夸克和带电轻子可以通过电荷来区分其粒子与反粒子，但中微子是电中性的粒子，我们需要引入新的量子数来刻画中微子与反中微子的差别，比如说轻子数。尽管我们并没有发现任何轻子数破坏的实验迹象，标准模型具有的复杂的真空结构会导致破坏

轻子数的过程发生。因此，轻子数并不是区别正反中微子的合适的量子数。这是狄拉克中微子质量模型必须面对的另一个难题。

如果中微子是马约拉纳粒子，那就存在多种不同的方式来产生小的中微子质量。最简单的情况仍然是引入中微子的右手场，后者是标准模型规范群的单态，所以它们不参与任何规范相互作用。因为马约拉纳粒子不区分正反粒子，所以我们不需要引入轻子数守恒律。右手中微子的马约拉纳质量项满足规范对称性，而且其质量的大小不受规范对称性破缺的限制。当右手中微子的质量为  $10^{10}$  GeV 时，这个数值接近大统一规范理论的能标  $10^{16}$  GeV，并且中微子的狄拉克质量与带电轻子质量大小相当，那么轻的中微子质量会被重的右手中微子质量压低，可以处在 1 eV 以下。这就是著名的中微子质量的第一类跷跷板机制。

除了右手中微子之外，我们也可以在标准模型中引入  $SU(2)_L$  规范群下的三重态标量场，它同时与轻子二重态和希格斯场耦合。当对称性自发破缺之后，中微子获得马约拉纳质量，它的绝对大小由标量三重态的真空期望值和汤川耦合系数决定。此时，轻的中微子质量正比于三重态标量场的真空期望值，而后者被重的三重态标量粒子的质量严重压低。这是第二类跷跷板机制。中微子的跷跷板模型也存在问题，比如说右手中微子或三重态标量粒子的质量很重，使得这一类模型是无法通过实验来直接验证或排除的。不过，从理论的自洽性和自然性的角度来讲，跷跷板模型仍然是最令人信服的中微子质量模型。当然，微小的中微子质量也可能来自于高阶量子修正效应，这是另外一类辐射产生中微子质量模型的主要思想。归根结底，当前的实验观测还不足以判断哪一种才是正确的中微子的质量产生机制，我们希望将来的实验可以做到。

## 五、宇宙物质 – 反物质不对称

虽然第一类跷跷板模型中右手中微子的质量非常重，这导致该模型无法利用现有的或将来的对撞机实验来直接验证，但是重的右手中微子却可以影响宇宙的早期演化并解释宇宙重子数不对称的产生。

宇宙学和天文学观测都证明今天可观测的宇宙是由物质而非反物质组成的。但在宇宙早期，构成物质

的基本粒子和其反粒子一定是等量产生的，为什么只有粒子存留到今天？这个问题被称作宇宙物质 – 反物质不对称之谜，它是宇宙学标准模型中悬而未决的基本问题。动力学产生重子不对称必须满足萨哈诺夫三条件：（1）存在破坏重子数的相互作用；（2）存在 C 和 CP 破坏现象；（3）偏离热平衡条件。那么在标准模型中加入重的右手马约拉纳中微子为什么满足萨哈诺夫三条件并产生重子数不对称呢？

首先，在标准模型中，重子数和轻子数是破坏的，但两者之差守恒。重子数破坏的过程是通过简并的真空态之间的跃迁实现的，跃迁几率是由连接相邻两个真空态的 Sphaleron 场构型的能量决定。在早期宇宙中，当温度处于  $10^{12}$  GeV 和 200 GeV 之间时，Sphaleron 过程处于热平衡，也就是重子数和轻子数破坏的反应足够快。其次，重的右手中微子可以衰变到轻子和希格斯二重态，该衰变过程是由中微子的汤川相互作用导致的，其中存在 C 和 CP 破坏现象。当右手中微子的衰变率小于宇宙膨胀率时，轻子数不对称就会产生并通过 Sphaleron 过程有效地转化为重子数不对称。

当右手中微子的质量大于  $10^8$  GeV 时，它可以通过跷跷板机制解释小的中微子质量，另一方面也可以在宇宙早期产生足够的重子数不对称。值得指出的是，右手中微子衰变中的 CP 破坏现象与轻子味混合矩阵中的 CP 破坏相位角都来自于中微子的汤川耦合系数，所以在具体的理论模型中它们之间是相互联系的。

## 六、展望

近年来，大量的中微子振荡实验证明中微子具有非简并的静止质量，而粒子物理学标准模型预言中微子的质量为零，所以中微子存在质量是具有坚实实验基础的超出标准模型的新物理。

如何扩充标准模型来产生中微子质量仍然是当前粒子物理学亟待解决的重要问题。这个问题的解决方案还依赖于我们对于中微子的一些基本性质的进一步了解，包括中微子的质量顺序、中微子质量的绝对大小、中微子的马约拉纳性质、轻子部分的 CP 破坏等。希望在不久的将来，实验观测可以完全确定中微子的基本性质，我们相信那时对中微子质量起源问题一定会有更全面和更深刻的理解，甚至摸索出解决该问题的正确方向。