

无中微子双贝塔衰变：新物理探索和宇宙学观测*

周 顺^{1,2,†}

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(2 中国科学院大学物理科学学院 北京 100049)

2024-05-10 收到

† email: zhoush@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20240504

Neutrinoless double-beta decays: cosmology and the quest for new physics

ZHOU Shun^{1,2,†}

(1 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China)

摘 要 近二十多年来, 太阳、大气、反应堆和加速器的中微子振荡实验提供了大量确凿的证据表明中微子有质量。然而, 粒子物理学标准模型却预言中微子质量为零。这意味着中微子质量的产生必然要求引入超出标准模型的新物理。文章将介绍无中微子双贝塔衰变对新物理探索和宇宙学观测的重要影响, 尤其是该稀有衰变过程的实验观测在突破粒子物理学和宇宙学标准模型的前沿研究中扮演的独一无二的角色。

关键词 无中微子双贝塔衰变, 中微子质量, 马约拉纳粒子, 宇宙物质—反物质不对称

Abstract For more than two decades, solar, atmospheric, reactor and accelerator neutrino oscillation experiments have provided substantial evidence that neutrinos have mass. However, the Standard Model (SM) of particle physics predicts that the neutrino mass is zero. This indicates that there must be new physics beyond the SM. This article will assess the important implications of neutrinoless double-beta decays for cosmology and the quest for new-physics, especially the unique role that experimental observation of such rare decays plays in the latest research on particle physics and cosmology.

Keywords neutrinoless double-beta decays, neutrino masses, majorana particles, cosmological matter-antimatter asymmetry

粒子物理学是一门在微观尺度上探究构成宏观物质世界的最小基本单元及其相互作用规律的基础学科。自 1897 年英国物理学家汤姆孙发现电子开始^[1], 到 2012 年欧洲核子中心的大型强子对撞机上的 ATLAS 和 CMS 实验发现希格斯粒子为

止^[2, 3], 粒子物理学的发展已持续了一百多年。而 20 世纪六、七十年代建立起来的粒子物理学标准模型^[4-6]成功地经受住了几乎所有实验的检验, 这也向人们揭示了一个令人惊叹的事实: 纷繁复杂的物质世界在微观尺度上竟然可以用屈指可数的几种基本粒子及其相互作用来描述。

* 国家自然科学基金(批准号: 11835013)资助项目

如图1所示，标准模型中的基本粒子可分为四类：夸克、轻子、传递相互作用的规范玻色子和赋予基本粒子质量的希格斯粒子。首先，夸克和轻子都是自旋为1/2的费米子，它们之间既有相似之处又存在显著的差异。按照图1中的排布方式，6种夸克和6种轻子分别构成一个二行三列的矩阵。矩阵的每一列表示一代夸克或轻子，总共有三列，也就是三代；每一行的夸克或轻子与另一行的基本性质迥异，而同一行的夸克或轻子具有相同的相互作用形式。其次，传递强、弱和电磁相互作用的规范玻色子分别是胶子、弱玻色子和光子，它们的自旋均为1；图1中的蓝线连接规范玻色子和其他基本粒子，它表示后者存在相应的规范相互作用。胶子和弱玻色子都连着蓝色的圈，这代表它们有自相互作用。最后，自旋为0的希格斯玻色子与带电轻子(e、μ和τ)、夸克和弱玻色子相互作用并赋予它们质量，而且它也存在自相互作用。

与三代带电轻子e、μ和τ相对应，标准模型中存在三代中微子——电子型中微子ν_e、缪子型中微子ν_μ和陶子型中微子ν_τ，而中微子是唯一一只

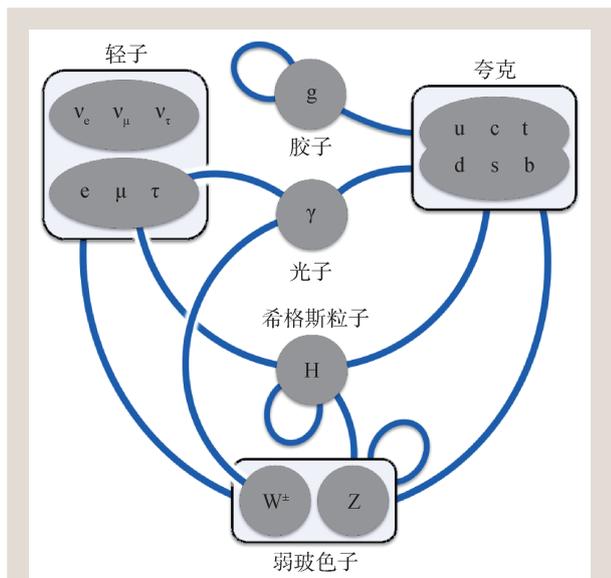


图1 粒子物理学标准模型中的基本粒子——自旋为1/2的费米子：夸克、轻子；自旋为1的规范玻色子：传递强、弱和电磁相互作用的胶子、弱玻色子和光子；自旋为0的希格斯粒子(图片引自网站 <https://www.universeofparticles.com/>)

参与弱相互作用的费米子。值得强调的是，因为中微子不与希格斯玻色子相互作用，所以在标准模型中它们的质量为零。这显然与中微子振荡实验的观测相矛盾^[7, 8]。

为了理解如何引入超出标准模型的新物理来产生中微子质量，我们先简单地回顾一下带电轻子和夸克的质量起源及其基本性质。带电轻子和夸克都携带非零的电荷，其反粒子的电荷大小相等、符号相反。一个费米子和它自身的反粒子如果可以通过不同的量子数(比如说电荷)加以区分，我们就称其为狄拉克粒子。也就是说，带电轻子和夸克都是狄拉克粒子。有质量的狄拉克粒子必然同时存在左手和右手分量，而且左右手分量遵循狄拉克方程相互转化。正是由于带电轻子和夸克的左右手分量与希格斯粒子耦合，它们才可以通过希格斯机制获得质量。在标准模型中，中微子只有左手分量，没有右手分量，因此其质量为零。

(1) 狄拉克中微子

为了产生中微子质量，我们类比标准模型中的带电轻子和夸克，引入三代右手中微子ν_R。后者是标准模型的规范群单态，所以不直接参与任何规范相互作用。此时，中微子的左右手分量与希格斯粒子之间存在汤川相互作用。在规范对称性自发破缺之后，中微子获得狄拉克质量：

$$\mathcal{L}_{\text{mass}}^D = -\bar{\nu}_L M_D \nu_R + \text{h.c.} ,$$

其中h.c.代表厄米共轭项，ν_L是左手中微子场的狄拉克共轭。中微子的质量矩阵是M_D = Y_νv，这里Y_ν表示汤川耦合系数矩阵，v ≈ 174 GeV是希格斯场的真空期望值。狄拉克中微子的物理图像存在两个严重的问题。第一，自然界已知最重的费米子是顶夸克t，它的质量是m_t ≈ 173 GeV，相应的汤川耦合系数为y_t = m_t/v ~ 1。然而，若中微子的绝对质量取m_i ~ 0.1 eV，则它们的汤川耦合系数是y_i = m_i/v ~ 10⁻¹² (这里y_i表示汤川耦合系数矩阵Y_ν的本征值)。为什么顶夸克和中微子以相同的方式产生质量，但其汤川耦合系数竟相差12个数量级？第二，因为中微子是电中性的，所以必须引入一个新的量子数来区分狄拉克中微子和反中微子。如表1所示，中微子和带电轻子都携带轻子数。如果总轻子数守恒，那它就是一个鉴别中

微子和反中微子的好量子数。然而，虽然轻子数和重子数反映经典层次上标准模型拉氏量的对称性，但量子反常效应实际上会导致重子数和轻子数破坏^[9]。因此，狄拉克中微子面临着汤川耦合系数的强等级性问题，以及强制性地要求轻子数守恒所引起的自洽性问题。

(2) 马约拉纳中微子

我们也可以在标准模型中引入三代右手中微子 ν_R 时不要求轻子数守恒。在这种情况下，中微子的质量项包含两部分：

$$\mathcal{L}_{\text{mass}}^M = -\overline{\nu}_L M_D \nu_R - \frac{1}{2} \overline{\nu}_R^c M_R \nu_R + \text{h.c.},$$

这里除了狄拉克质量项，还有右手中微子的马约拉纳质量项，其中 ν_R^c 表示右手中微子的电荷共轭。当右手中微子的马约拉纳质量远大于狄拉克质量时，也就是 $O(M_R) \gg O(M_D)$ 时，理论上会出现6个马约拉纳中微子，3个质量很轻，对应着标准模型中的左手中微子；另外3个质量很重，主要由右手中微子构成。轻马约拉纳中微子的质量矩阵近似可写为

$$M_\nu \approx -M_D M_R^{-1} M_D^T,$$

这是产生中微子马约拉纳质量的跷跷板机制^[10]。容易验证，给定 $O(M_D) \sim 10^2 \text{ GeV}$ ，若轻马约拉纳中微子的质量为 $O(M_\nu) \sim 0.1 \text{ eV}$ ，则重马约拉纳中微子的质量大致是 $O(M_R) \sim 10^{14} \text{ GeV}$ ，后者接近大统一理论的典型能标^[11, 12]。与狄拉克中微子相比，马约拉纳中微子的物理图像显得更加自然。一方面，我们可以将轻中微子的微小质量理解为自然界存在极重的马约拉纳中微子的直接后果。另一方面，重马约拉纳中微子在宇宙早期极高温的环境下大量产生，它们的CP破坏、偏离热平衡的衰变和散射过程为宇宙中物质—反物质不对称提供了一种合理的解释^[13]。

从实验上证明有质量的中微子的马约拉纳属性是解决中微子质量起源问题和寻找超出标准模型的新物理的关键突破口。目前，唯一切实可行的途径就是观测特定原子核的无中微子双贝塔衰变模式 $A(Z, N) \rightarrow A(Z+2, N-2) + 2e^-$ ，其中 Z 和 N 表示原子核内的质子数和中子数。无中微子双贝塔衰变的重要性体现在以下三个方面。首

表1 标准模型中三代带电轻子和中微子的轻子数，其反粒子的轻子数大小相等、符号相反*

轻子数	L_e	L_μ	L_τ	$L = L_e + L_\mu + L_\tau$
e^-, ν_e	+1	0	0	+1
μ^-, ν_μ	0	+1	0	+1
τ^-, ν_τ	0	0	+1	+1

*这里 $L = L_e + L_\mu + L_\tau$ 表示总轻子数，其中 L_e 、 L_μ 和 L_τ 是每代轻子各自的轻子数。

先，如果实验上发现该稀有衰变过程，那就证明自然界存在轻子数破坏的相互作用。其次，同时这也证明中微子是其自身的反粒子，即马约拉纳粒子^[14]，也指明了研究中微子质量产生机制的正确方向。在已发现的费米子当中，只有中微子可能是马约拉纳粒子。最后，原子核的无中微子双贝塔衰变的宽度正比于中微子有效质量的平方，而后者包含中微子绝对质量和中微子的马约拉纳属性相关的两个CP破坏相位角^[15]。这些基本物理学参数的确定是无法通过中微子振荡实验实现的^[16]。

如前所述，中微子质量的产生必然要求引入超出标准模型的新物理，因此能够验证中微子马约拉纳属性的无中微子双贝塔衰变过程就是新物理探索的最佳场所。接下来，我们以两个具体的例子来说明无中微子双贝塔衰变对新物理探索和宇宙学观测的重要影响。

无中微子双贝塔衰变的发现意味着轻子数不守恒，而轻子数破坏的动力学机制依赖于具体的新物理模型。在标准模型中引入三代右手中微子及其马约拉纳质量项是轻子数显式破缺的情形。由于右手中微子携带一个单位的轻子数，其马约拉纳质量项明显破坏两个单位的轻子数。轻子数也可能通过额外的标量场获得真空期望值时自发破缺^[17]。更具体来说，右手中微子场和它的电荷共轭场可以耦合到一个标准模型规范群的单态复标量场，这个汤川相互作用项保证轻子数守恒。因此，既然右手中微子的轻子数为+1，那么复标量场的轻子数就是-2。当后者获得真空期望值后，轻子数对应的 $U(1)$ 整体对称性自发破缺，并给出右手中微子的马约拉纳质量项。根据戈德斯通定理^[18, 19]，整体的连续对称性的自发破缺会

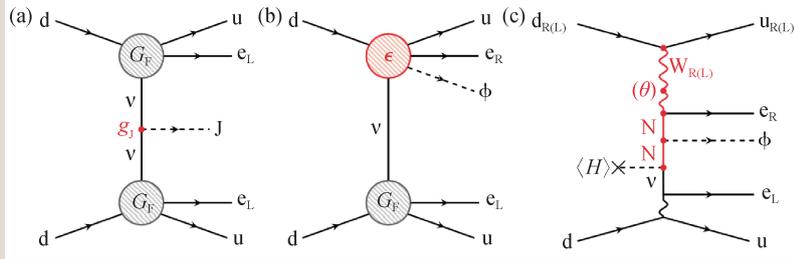


图2 末态含有一个额外标量粒子的无中微子双贝塔衰变模式 (a) Majoron 直接与轻马约拉纳中微子耦合; (b)量纲为7的有效算符(这里四个费米子场的量纲均为3/2, 而标量场的量纲为1)的贡献; (c)量纲为7的算符在左右对称模型中的实现, 其中 $W_{R(L)}$ 表示右手(左手)弱规范玻色子, θ 为左右手弱规范玻色子之间的混合角, N 是重马约拉纳中微子, ϕ 代表标量粒子, $\langle H \rangle$ 为希格斯场的真空期望值^[20]

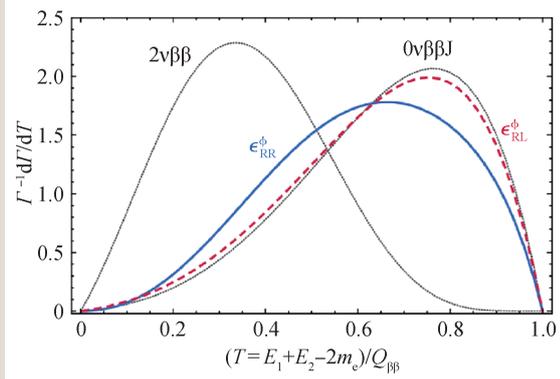


图3 与图2对应的无中微子双贝塔衰变模式的微分宽度, 其中 T 为末态两个电子的归一化的动能之和, $Q_{\beta\beta}$ 是无中微子双贝塔衰变中初态粒子质量与末态所有粒子质量之和的差值

导致理论中出现质量为零的赝标量粒子 J 。这个粒子通常被称作 Majoron, 它会与轻和重马约拉纳中微子都相互作用。考虑到 Majoron 与轻马约拉纳中微子的相互作用, 能够发生无中微子双贝塔衰变的原子核会出现新的衰变模式, 即 $A(Z, N) \rightarrow A(Z + 2, N - 2) + 2e^- + J$ 。末态包含 Majoron 的衰变如图 2(a) 所示, 其中标准的弱带电流相互作用顶点以费米子耦合常数 G_F 标记, 而 Majoron 与轻马约拉纳中微子的耦合系数为 g_1 ^[20]。

图 2 中也展示了其他可能的末态含有额外标量粒子的衰变模式, (b) 图显示的是以一个量纲为 7 的有效算符取代标准的弱带电流相互作用顶点的情况, 其中 ϵ 是相应的耦合系数; (c) 图表明在所谓的左右对称模型中实现这个量纲为 7 算符的可能性。

由图 3 可看出, 双中微子双贝塔衰变 ($2\nu\beta\beta$)、含 Majoron 的无中微子双贝塔衰变 ($0\nu\beta\beta J$) 和量纲为 7 算符导致的衰变 (其中 ϵ_{RR}^ϕ 和 ϵ_{RL}^ϕ 分别对应图 2(c) 中传递是右手和左手的弱规范玻色子) 的微分宽度差异明显^[20]。未来的无中微子双贝塔衰变实验可以通过末态电子总能量的测量来区分不同的衰变模式, 并揭示其背后的新物理机制。

无中微子双贝塔衰变的实验观测不仅可以直接检验新物理模型, 而且引起该稀有衰变过程发生的马约拉纳中微子也间接地提供一种解释宇宙物质—反物质不对称的新颖途径。目前, 宇宙原初轻核元素丰度和宇宙微波背景辐射的精确测量表明, 可观测的宇宙中不存在原初的反重子物质。宇宙学观测^[21]显示重子数密度与光子数密度之比为 $\eta \equiv n_B/n_\gamma \approx 6 \times 10^{-10}$ 。如何理解宇宙物质—反物质不对称的动力学产生是当前粒子物理学和宇宙学领域的重大基本问题之一^[22]。

早在 1967 年, 前苏联核物理学家安德烈·萨哈诺夫就指出^[23], 动力学产生宇宙的物质—反物质不对称有三个必要条件: (1) 重子数破坏; (2) C 和 CP 对称性破坏; (3) 偏离热平衡。如果轻中微子是马约拉纳粒子且其质量起源是跷跷板机制, 那么重马约拉纳中微子就会在极早期宇宙中通过与标准模型中的轻子和希格斯粒子的汤川相互作用大量产生。当宇宙的温度降到重马约拉纳中微子的质量以下, 它们开始衰变并产生轻子数不对称。轻子数不对称的产生取决于两个必要条件。第一, 重马约拉纳中微子的汤川耦合系数 Y_i 是一个三阶复矩阵, 包含非平庸的复相位, 后者会导致 CP 破坏效应。也就是说重中微子衰变到轻子和反轻子的速率不相等。第二, 随着宇宙的温度持续降低, 重中微子的衰变率低于描述宇宙膨胀速率的哈勃常数, 衰变及其逆过程的反应率不再保持相等, 此时才会有轻子数不对称保留下来。接

下来，前面提到的标准模型中的轻子数和重子数的量子反常效应起到关键作用。在宇宙温度处于 10^{12} GeV 到 10^2 GeV 之间时，破坏轻子数和重子数的量子反常效应十分显著，它不断地将轻子数不对称转化为重子数不对称。最终，当宇宙温度低于 10^2 GeV 之后，重子数不对称不再被任何其他相互作用改变，并在随后的原初核合成过程中转变成轻核元素。

从中微子振荡到宇宙物质—反物质不对称，我们已经看到极小尺度的粒子物理学与极大尺度的宇宙学紧密地联系在一起。在未来的十年到二十年中，无中微子双贝塔衰变的实验观测和理论研究的重大突破对物理学的发展至关重要。它不仅为解决中微子质量起源和宇宙物质—反物质不对称问题提供必要的线索，还可能掀开新物理探索的新篇章。

参考文献

- [1] Thomson J J. *Phil. Mag. Ser.*, 1897, 544:293
- [2] Aad G *et al* [ATLAS]. *Phys. Lett. B*, 2012, 716:1
- [3] Chatrchyan S *et al* [CMS]. *Phys. Lett. B*, 2012, 716:30
- [4] Glashow S L. *Nucl. Phys.*, 1961, 22:579
- [5] Weinberg S. *Phys. Rev. Lett.*, 1967, 19:1264
- [6] Salam A. *Conf. Proc. C*, 1968, 680519:367
- [7] Kajita T. *Rev. Mod. Phys.*, 2016, 88:030501
- [8] McDonald A B. *Rev. Mod. Phys.*, 2016, 88:030502
- [9] 't Hooft G. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, 37:8
- [10] Minkowski P. *Phys. Lett. B*, 1977, 67:421
- [11] Georgi H, Glashow S L. *Phys. Rev. Lett.*, 1974, 32:438
- [12] Fritzsch H, Minkowski P. *Annals Phys.*, 1975, 93:193
- [13] Fukugita M, Yanagida T. *Phys. Lett. B*, 1986, 174:45
- [14] Majorana E. *Nuovo Cim.*, 1937, 14:171
- [15] Agostini M, Benato G, Detwiler J A *et al*. *Rev. Mod. Phys.*, 2023, 95:025002
- [16] Huang G Y, Zhou S. *JHEP*, 2021, 03:084
- [17] Gelmini G B, Roncadelli M. *Phys. Lett. B*, 1981, 99:411
- [18] Goldstone J. *Nuovo Cim.*, 1961, 19:154
- [19] Goldstone J, Salam A, Weinberg S. *Phys. Rev.*, 1962, 127:965
- [20] Cepedello R, Deppisch F F, González L *et al*. *Phys. Rev. Lett.*, 2019, 122:181801
- [21] Workman R L *et al* [Particle Data Group]. *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2022, 2022:083C01
- [22] Bodeker D, Buchmuller W. *Rev. Mod. Phys.*, 2021, 93:3
- [23] Sakharov A D. *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1967, 5:324



光学全产业链 展示及交流平台



精密光学展 & 摄像头技术及应用展

PRECISION OPTICS EXPO & CAMERA EXPO

2024年9月11-13日

深圳国际会展中心(宝安新馆)

第25届中国国际光电博览会

240,000M² 展出面积 | 120,000+ 专业观众 | 3,700+ 参展企业

同期展会



信息通信展
INFORMATION & COMMUNICATION EXPO



激光技术
及智能制造展
LASER TECHNOLOGY
& INTELLIGENT MANUFACTURING EXPO



红外技术及应用展
INFRARED APPLICATIONS EXPO



智能传感展
INTELLIGENT SENSING EXPO



光电子创新展
PHOTONICS INNOVATION EXPO



新型显示技术展
DISPLAY TECHNOLOGY EXPO



展会小程序



设备检漏好帮手

—安捷伦干式检漏仪

- 干式无油方便运输
- 全触屏中文操作，并预置多种应用设置，简单易上手
- 一分钟快速关机，两万帕粗真空检漏
- 超强氮气本底抑制，环境氮气浓度高达 1000ppm 时仍能达到最高精度
- 多种抽速型号可选，丰俭由己



安捷伦科技（中国）有限公司真空事业部
800 820 6778（固定电话拨打）
400 820 6778（手机拨打）

下载样本或了解更多，请扫描上方二维码，
或登陆安捷伦官方网站：www.agilent.com
(点击“产品”选择“真空产品”)。