

中微子振荡：PMNS 范式

Neutrino Oscillations: The Rise of the PMNS Paradigm

译者：殷麒麟

2025/6/23

摘要

在中微子振荡发现后的过去 20 年里，有关中微子振荡的实验取得了显著的成果。物理学家精确测量了中微子的质量平方差与混合角，其中包括我们在实验上测得的最后一个混合角— θ_{13} 。

目前，我们观察到的一系列中微子振荡的实验结果都可以使用包含三个有质量的活性中微子的模型来解释，其质量本征态与味道本征态之间可以使用一个 3×3 幺正混合矩阵—PMNS (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata) 矩阵相关联，并且 PMNS 矩阵可以被参数化为三个混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ 和一个 CP 破坏相位 δ_{CP} 。除此之外，中微子的质量平方差 $\Delta m_{ji}^2 = m_j^2 - m_i^2$ 也主导着中微子振荡，其中 m_i 是中微子的第 i 个质量本征态的本征值。本综述将主要介绍三种味道中微子混合的 PMNS 范式与当前实验对振荡参数的测量。

在未来的几年里，一系列的中微子振荡实验将会取得丰硕的成果，最终将解决中微子振荡剩下的三个谜题，即：

- θ_{23} 混合角的象限 (octant) 与精确值的测量
- 中微子质量顺序 ($m_1 < m_2 < m_3$ 或 $m_3 < m_1 < m_2$) 的确定
- CP 破坏相位 δ_{CP} 的测量

1 简介

在经过长期的理论和实验的研究后，Pontecorvo 于 1957 年 [1][2] 提出的中微子振荡的假说终于在 1998 年到 2002 年的几年间得到证实。物理学家在超级神冈实验 (Super-Kamiokande, Super-Kamioka Neutrino Detection Experiment) [3] 和萨德伯里实验 (SNO, Sudbury Neutrino Observatory) [4] 中分别发现了来自大气和太阳中微子的振荡，随后 KamLAND 实验 (Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector) [5] 证实了这一发现。为此，梶田隆章与麦克唐纳获得了 2015 年度诺贝尔物理学奖。

自从中微子振荡被超级神冈实验和 SNO 实验证实以后，有关中微子振荡的实验进展迅速。先前的实验测量了 θ_{12} 与 θ_{23} ，而 θ_{13} 是我们最后一个未知的混合角。长基线的加速器中微子实验—T2K 实验 (Tokai-to-Kamioka) [6] 首次发现了 θ_{13} 非零的迹象，随后的反应堆实验—大亚湾实验 (Daya Bay) [7]、RENO 实验 (Reactor Experiment for Neutrino Oscillations) [8] 与 Double Chooz 实验 [9] 发现了由 θ_{13} 驱动的振荡。2013 年，T2K 实验首次发现了 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 的出现 [10]，随后被 NOvA 实验 (NuMI Off-Axis ν_e Appearance) 证实 [11]，这是我们首次以直接的方式探测到中微子的出现而非消失，并为我们探测中微子三种味道的效应开辟了道路。发现中微子振荡的

实验多以天然的中微子源作为基础，但精确测量中微子振荡参数的实验多以人工中微子源作为来源，例如核反应堆或加速器中微子束流。

在理论方面，Pontecorvo 受到 $K-\bar{K}$ 介子振荡的启发，于 1957 年首次提出若轻子数发生破坏，将会发生 $\nu-\bar{\nu}$ 振荡的现象 [1][2]。这个现象我们在今天描述为活性-惰性中微子的振荡，这需要中微子具有质量，与当时人们普遍认为的中微子无质量相矛盾。不久之后，随着 ν_μ 的发现，Maki、Nakagawa 和 Sakata 首次提出了中微子味混合的概念 [12]。随后，1967 年，Pontecorvo 提出了中微子味振荡的概念 [13]，并由 Gribov 和 Pontecorvo 在 1969 年表述成了如今的形式 [14]。

目前，我们观察到的一系列中微子振荡的实验结果都可以使用包含三个有质量的活性中微子的模型来解释，其质量本征态与味道本征态之间可以使用一个 3×3 么正混合矩阵—PMNS 矩阵相联系，并且 PMNS 矩阵可以被参数化为三个混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ 和一个 CP 破坏相位 δ_{CP} （对于 Majorana 中微子的情形，将会引入额外两个相位，但它们不会对振荡产生影响）。除此之外，中微子的质量平方差 $\Delta m_{ji}^2 = m_j^2 - m_i^2$ 也主导着中微子振荡，其中 m_i 是中微子的第 i 个质量本征态的本征值。三种味道中微子发生味混合而引起振荡的模型（PMNS 范式）在过去的 20 年里经过了许多实验的验证，在未来的几年里，一系列的中微子振荡实验将会取得丰硕的成果，最终将解决中微子振荡剩下的三个谜题，即 θ_{23} 的象限与精确值、三代中微子的质量顺序与 CP 破坏相位 δ_{CP} 的测量。

研究中微子，特别是中微子振荡，对我们认识基本粒子物理有着重要的意义。仅在实验中观测到的中微子的非零质量是目前唯一的超出标准模型之外的新物理的迹象 [15]。此外，轻子 PMNS 混合矩阵中的三个混合角的数值较大，这与夸克区的 CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) 混合矩阵 [16][17] 明显不同，这本身也蕴含着深刻的物理问题。

有趣的是，PMNS 矩阵中较大的混合角意味着轻子区将有可能出现较大程度的 CP 破坏，这有助于我们理解宇宙中的重子-反重子不对称性的起源，其中最可信的机制是轻子生成 (leptogenesis) 机制 [18] (详见综述 [19])。轻子生成机制预言了除目前已经观测到的三种较轻的中微子以外，还存在较重的 Majorana 中微子，它可以解释宇宙中的重子-反重子不对称性。此外，较重的 Majorana 中微子也可以通过跷跷板 (seesaw) 机制赋予较轻的中微子质量 [20][21][22][23][24]。

本综述将主要介绍近期与中微子振荡参数测量有关的进展，以及未来测量未知振荡参数的实验。文章的结构如下：

- 第2部分：介绍有质量的中微子在真空与物质中振荡的理论
- 第 3-5 部分：概括由 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ 混合角驱动的 $\nu_1 - \nu_2, \nu_2 - \nu_3, \nu_1 - \nu_3$ 模式的振荡，即两种味道中微子引起的振荡
- 第 6 部分：介绍仅由三种味道中微子共同振荡才能够解释的实验现象，以及由 T2K 实验和 NOvA 实验发现的中微子 CP 破坏效应
- 第 7 部分：简要总结我们目前对 PMNS 混合参数的理解，以及全局拟合 (global fit) 的作用
- 第 8 部分：介绍由 PMNS 范式无法解释的反常现象
- 第 9 部分：概述未来的中微子实验

鉴于中微子振荡研究的丰富性与多样性，我们在本篇综述里不可能阐述与理论发展、实验方法和测量结果有关的所有细节与微妙之处。因此，我们推荐感兴趣的读者阅读书籍 [25][26][27][28]，

以及 [29][30][31][32]。PDG 的综述也介绍了与中微子的质量、混合、振荡有关的内容 [33]。也有一部分综述介绍了与中微子相关的专题，例如中微子在物质中的传播 [34][35]、太阳中微子 [36]、通过反应堆实验测量 θ_{13} 混合角 [37]、中微子的质量顺序与未来的相关实验 [38]、实验中观测到的在 PMNS 范式下的反常现象与惰性中微子 [39][40]。最后，[41] 从教学的角度全面介绍了中微子物理的发展历史，包括理论和实验的进展。

2 中微子振荡的理论与唯象学

2.1 轻子区的味混合

References

- [1] B. Pontecorvo. “Mesonium and anti-mesonium”. In: Zh. Eksp. Teor. Fiz. 33 (1957). [Sov. Phys. JETP 6 (1958) 429], pp. 549–551.
- [2] B. Pontecorvo. “Inverse beta processes and nonconservation of lepton charge”. In: Sov. Phys. JETP 7 (1958). [Zh. Eksp. Teor. Fiz. 34 (1957) 247], pp. 172–173.
- [3] Y. Fukuda and et al. “Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos”. In: Phys. Rev. Lett. 81 (1998), pp. 1562–1567.
- [4] Q. Ahmad and et al. “Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ Interactions Produced by ^8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory”. In: Phys. Rev. Lett. 89 (2002), p. 011301.
- [5] K. Eguchi and et al. “First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance”. In: Phys. Rev. Lett. 90 (2003), p. 093004. arXiv: [hep-ex/0212021 \[hep-ex\]](#).
- [6] K. Abe and et al. “Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-produced Off-axis Muon Neutrino Beam”. In: Phys. Rev. Lett. 107 (2011), p. 041801.
- [7] F. An and et al. “Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay”. In: Phys. Rev. Lett. 108 (2012), p. 171803.
- [8] J. Ahn and et al. “Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment”. In: Phys. Rev. Lett. 108 (2012), p. 191802.
- [9] Y. Abe and et al. “Indication for the disappearance of reactor electron antineutrinos in the Double Chooz experiment”. In: Phys. Rev. D 86 (2012), p. 052008.
- [10] K. Abe and et al. “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”. In: Phys. Rev. Lett. 112 (2014), p. 061802.
- [11] P. Adamson and et al. “Constraints on oscillation parameters from ν_e appearance and ν_μ disappearance in NOvA”. In: (2017). arXiv:1703.03328 [hep-ex]. arXiv: [1703.03328 \[hep-ex\]](#).
- [12] Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata. “Remarks on the Unified Model of Elementary Particles”. In: Progress of Theoretical Physics 28 (1962), pp. 870–880.
- [13] B. Pontecorvo. “Neutrino Experiments and the Problem of Conservation of Leptonic Charge”. In: Zh. Eksp. Teor. Fiz. 53 (1967). [Sov. Phys. JETP 26 (1968) 984], p. 1717.
- [14] V. N. Gribov and B. Pontecorvo. “Neutrino astronomy and lepton charge”. In: Phys. Lett. B 28 (1969), pp. 493–496.
- [15] R. N. Mohapatra and et al. “Theory of neutrinos: A white paper”. In: Reports on Progress in Physics 70 (2007), pp. 1757–1867.
- [16] N. Cabibbo. “Unitary Symmetry and Leptonic Decays”. In: Phys. Rev. Lett. 10 (1963), pp. 531–533.

- [17] M. Kobayashi and T. Maskawa. “CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction”. In: Progress of Theoretical Physics 49 (1973), pp. 652–657.
- [18] M. Fukugita and T. Yanagida. “Baryogenesis Without Grand Unification”. In: Phys. Lett. B 174 (1986), pp. 45–47.
- [19] S. Davidson, E. Nardi, and Y. Nir. “Leptogenesis”. In: Physics Reports 466 (2008), pp. 105–177.
- [20] P. Minkowski. “ $\mu \rightarrow e\gamma$ at a Rate of One Out of 10^9 Muon Decays?” In: Phys. Lett. B 67 (1977), pp. 421–428.
- [21] M. Gell-Mann, P. Ramond, and R. Slansky. “Complex Spinors and Unified Theories”. In: Supergravity. Ed. by P. van Nieuwenhuizen and D. Z. Freedman. Vol. C 790927. North-Holland Physics Publishing. Published in the Proceedings of the Workshop on Supergravity, Stony Brook, New York, 27–29 Sept 1979. Amsterdam, 1979, pp. 315–321.
- [22] T. Yanagida. “Horizontal Symmetry and Masses of Neutrinos”. In: Proceedings of the Workshop on the Unified Theory and the Baryon Number in the Universe. Conf. Proc. C 7902131. Workshop held at KEK, Tsukuba, February 1979. Tsukuba, Japan, 1979, pp. 95–99.
- [23] S. L. Glashow. “The Future of Elementary Particle Physics”. In: Proceedings of the 1979 Cargèse Summer Institute on Quarks and Leptons. Vol. 61. NATO Science Series B: Physics. Cargèse, France, 1979. Plenum Press, 1980, pp. 687–713.
- [24] R. N. Mohapatra and G. Senjanović. “Neutrino Mass and Spontaneous Parity Nonconservation”. In: Phys. Rev. Lett. 44 (1980), pp. 912–915.
- [25] M. Fukugita and T. Yanagida. Physics of Neutrinos and Applications to Astrophysics. Berlin: Springer, 2003. ISBN: 978-3540439645.
- [26] R. N. Mohapatra and P. B. Pal. Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics. 3rd. Singapore: World Scientific, 2004. ISBN: 978-9812380712.
- [27] C. Giunti and C. W. Kim. Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics. Oxford: Oxford University Press, 2007. ISBN: 978-0198508717.
- [28] S. M. Bilenky. Introduction to the Physics of Massive and Mixed Neutrinos. Berlin: Springer, 2010. ISBN: 978-3642061911.
- [29] K. Zuber. Neutrino Physics. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011. ISBN: 978-1439830757.
- [30] V. Barger, D. Marfatia, and K. Whisnant. The Physics of Neutrinos. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2012. ISBN: 978-0691157496.
- [31] J. W. F. Valle and J. C. Romão. Neutrinos in High Energy and Astroparticle Physics. Weinheim: Wiley-VCH, 2015. ISBN: 978-3527411013.
- [32] F. Suekane. Neutrino Oscillations. Tokyo: Springer, 2015. ISBN: 978-4431556962.
- [33] C. Patrignani et al. “Review of Particle Physics”. In: Chin. Phys. C 40 (2016), p. 100001.

- [34] M. Blennow and A. Yu. Smirnov. “Neutrino Propagation in Matter”. In: Adv. High Energy Phys. 2013 (2013), p. 972485.
- [35] T.-K. Kuo and J.T. Pantaleone. “Neutrino Oscillations in Matter”. In: Rev. Mod. Phys. 61 (1989), pp. 937–979.
- [36] A. Ianni. “Solar Neutrinos and the Borexino Experiment”. In: Prog. Part. Nucl. Phys. 94 (2017), pp. 257–281.
- [37] T. Lachenmaier. “The Borexino Experiment”. In: Prog. Part. Nucl. Phys. 83 (2015), pp. 31–58.
- [38] X. Qian and P. Vogel. “Neutrino Mass Hierarchy”. In: Prog. Part. Nucl. Phys. 83 (2015), pp. 1–30.
- [39] K.N. Abazajian et al. “Light Sterile Neutrinos: A White Paper”. In: arXiv preprint (2012). arXiv: [1204.5379 \[hep-ph\]](#).
- [40] S. Gariazzo et al. “Light sterile neutrinos”. In: J. Phys. G 43.3 (2016), p. 033001.
- [41] S.M. Bilenky. “Introduction to the physics of massive and mixed neutrinos”. In: Eur. Phys. J. H 38 (2013), pp. 345–404.