

# 中微子探秘

2025 年 9 月 25 日

## 摘要

中微子是一种电中性的基本粒子，主要通过弱相互作用与其它物质发生相互作用。作为自然界中最神秘的基本粒子之一，中微子的研究历程贯穿了整个现代粒子物理学的发展史。本文系统回顾了中微子的发现历程，从 1930 年泡利为解释  $\beta$  衰变能量守恒问题而提出的大胆假说，到 1956 年雷因斯和考万在核反应堆实验中实现首次直接探测，再到二十一世纪初中微子振荡现象的确证。中微子的研究不仅完善了弱相互作用的理论框架，推动了标准模型的建立，更重要的是揭示了标准模型之外的新物理现象，展现了科学探索中“从怀疑到假说到印证”的经典模式。近年来，大亚湾实验和江门中微子实验等中国主导的重大科学工程在这一领域取得了突破性进展，标志着中国已步入世界中微子研究的前沿行列。

## 1 引言：幽灵粒子的神秘面纱

中微子是构成物质世界的基本粒子之一，以其极弱的相互作用能力和近乎零质量的特性而被称为“幽灵粒子”。在粒子物理的标准模型中，中微子占有独特地位：它们只参与弱相互作用和引力相互作用，而不参与强相互作用和电磁相互作用。这种特性使得中微子能够几乎无阻碍地穿透整个地球，也为探测带来了极大挑战。

中微子研究的历史是理论预言与实验验证完美结合的典范。从泡利的理论预言到实验探测，再到发现中微子振荡现象，这一历程不仅推动了粒子物理学的发展，也深刻影响了天体物理学和宇宙学的研究。中微子在天体物理过程中扮演着关键角色，如超新星爆发、太阳核聚变等过程都会产生大量中微子，研究中微子有助于我们理解这些宇宙现象的物理机制。

## 2 中微子的基本属性与理论框架

### 2.1 中微子的基本特性

中微子是最轻的费米子，其质量上限远小于其他已知的基本粒子。根据现有实验数据，中微子质量至少比电子轻六个数量级。中微子具有手性，自然界中只观测到左手性的中微子和右手性的反中微子，这一现象至今仍是未解之谜。

中微子有三种不同的“味”：电子中微子 ( $\nu_e$ )、 $\mu$  子中微子 ( $\nu_\mu$ ) 和  $\tau$  子中微子 ( $\nu_\tau$ )，分别与相应的带电轻子对应。这种味对称性是弱相互作用理论的基础之一。

### 2.2 弱相互作用理论框架

在标准模型中，中微子通过弱相互作用与其他粒子发生作用，这一过程由  $W$  和  $Z$  玻色子介导。其拉格朗日量可表示为：

$$\mathcal{L}_{\text{weak}}^\nu = -\frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{\alpha=e,\mu,\tau} (\bar{\ell}_{\alpha L} \gamma^\mu \nu_{\alpha L} W_\mu^- + \text{h.c.}) - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_{\alpha=e,\mu,\tau} \bar{\nu}_{\alpha L} \gamma^\mu \nu_{\alpha L} Z_\mu.$$

其中， $g$  是弱耦合常数， $\theta_W$  是温伯格角， $\ell_{\alpha L}$  表示左手轻子场， $\nu_{\alpha L}$  表示左手中微子场。这一理论框架成功描述了中微子参与的所有已知相互作用过程。

### 2.3 中微子振荡理论

中微子最引人注目的特性是它们能够在不同味之间相互转换，这一现象称为中微子振荡。其物理根源在于味本征态与质量本征态之间存在非平庸的混合。具体来说，三种味本征态 ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) 是三种质量本征态 ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ) 的线性叠加，通过 PMNS 矩阵相联系：

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}.$$

中微子振荡概率由混合角  $\theta_{12}$ 、 $\theta_{23}$ 、 $\theta_{13}$  和质量平方差  $\Delta m_{21}^2$ 、 $\Delta m_{32}^2$  等参数决定。这一现象的发现证明了中微子具有非零质量，是超出标准模型的新物理现象。

## 3 历史溯源：中微子的理论预言

### 3.1 衰变难题与泡利的假说

20 世纪初，原子核的衰变现象给物理学家带来了巨大困惑。实验观测发现，衰变中发射的电子的能量是连续分布的，而不是预期的分立谱。这一现象似乎违反了能量守恒定律，引发了物理学界的深刻思考。

1930 年，沃尔夫冈·泡利在给一封著名的信中提出了一个革命性的假说：可能存在一种电中性、质量极小、自旋为  $1/2$  的新粒子，在  $\beta$  衰变过程中与电子一同被发射出来，带走了部分能量和动量，从而保证了能量和动量守恒。泡利最初将这种粒子称为“中子”，但这一名称后来被詹姆斯·查德威克 1932 年发现的真正的中子所使用。

## 3.2 费米的弱相互作用理论

1934 年，恩里科·费米在泡利假说的基础上，建立了完整的  $\beta$  衰变理论。费米将  $\beta$  衰变过程类比于量子电动力学中的电磁相互作用，提出了四个费米子直接相互作用的模型，将  $\beta$  衰变描述为：

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e,$$

其中  $\bar{\nu}_e$  是电子反中微子。费米还为这种新粒子命名为“中微子”(neutrino)，在意大利语中意为“小的中性粒子”。

费米理论成功解释了  $\beta$  衰变的许多特性，并预言了衰变速率与原子核能量的关系，与实验数据高度吻合。这一工作不仅确立了中微子在理论中的地位，也为弱相互作用理论的后续发展奠定了基础。

# 4 实验突破：中微子的探测历程

## 4.1 王淦昌的开创性建议

中微子的探测面临巨大挑战，因为它们与物质的相互作用截面极小，估计需要数光年厚的铅板才能有效阻挡大部分中微子。在第二次世界大战期间的艰苦条件下，中国物理学家王淦昌于 1942 年在贵州湄潭提出了一个革命性的中微子探测方案。

王淦昌在《关于探测中微子的一个建议》论文中指出，利用  ${}^7\text{Be}$  原子核的电子俘获过程  $e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$ ，可以通过测量反冲锂核的能量来间接探测中微子。这一方案避免了直接探测中微子的困难，转而观测与中微子发射相伴的核反冲效应，体现了极高的物理洞察力。

虽然受战时条件限制，王淦昌未能亲自完成这一实验，但他的方案为中微子探测指明了方向，被认为是中微子实验研究的开创性工作。

## 4.2 雷因斯-考恩实验：首次直接探测

1956 年，弗雷德里克·雷因斯和克莱德·考恩在美国萨瓦纳河核反应堆旁完成了历史上首次中微子的直接探测实验。他们利用核反应堆产生的强大反中微子流，通过观测反  $\beta$  衰变过程：

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

来探测中微子。实验中，正电子与电子湮灭产生两个 511keV 的 光子，而中子被质子捕获后发射约 2.2MeV 的 光子，这两个信号之间存在时间关联，可以作为中微子事件的标志。

经过艰苦的实验工作，雷因斯和考恩成功观测到了预期的信号，以超过 20 倍标准偏差的置信度确认了中微子的存在。这一里程碑式的发现为雷因斯赢得了 1995 年诺贝尔物理学奖（考恩已于 1974 年去世）。

### 4.3 第二代中微子的发现

1962 年，利昂·莱德曼、梅尔文·施瓦茨和杰克·斯坦伯格在布鲁克海文国家实验室发现了第二种中微子—— $\mu$  子中微子。他们利用质子打靶产生  $\pi$  介子， $\pi$  介子衰变为  $\mu$  子和  $\mu$  子中微子：

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu.$$

通过观测  $\mu$  子中微子与原子核相互作用产生  $\mu$  子而非电子的过程，他们确认了  $\mu$  子中微子的存在。这一发现证明了中微子具有代结构，与带电轻子相对应，三人因此获得了 1988 年诺贝尔物理学奖。

2000 年，美国费米实验室的 DONUT 实验组宣布发现了第三种中微子—— $\tau$  子中微子，完成了轻子三代结构的实验验证。

## 5 重大突破：中微子振荡的发现

### 5.1 太阳中微子失踪之谜

从 20 世纪 60 年代末开始，雷蒙德·戴维斯领导的 Homestake 实验开始探测太阳产生的中微子。根据约翰·巴考等人建立的太阳标准模型，太阳核心的核聚变反应会产生大量电子中微子，其通量和能谱可以被精确计算。然而，戴维斯的实验仅探测到理论预言值的三分之一左右的中微子，这一差异被称为“太阳中微子问题”。

随后的 SAGE、GALLEX 等实验也确认了这一现象，引发了物理学界的广泛讨论。可能的解释包括：太阳模型存在问题、中微子特性与标准模型不符、或者中微子在从太阳到地球的传播过程中发生了物理变化。

### 5.2 大气中微子异常与超级神冈实验

1988 年，日本神冈实验组在探测大气中微子时发现了另一个异常现象：从大气层上方产生的  $\mu$  子中微子与从下方产生的中微子比例存在差异。这一现象暗示中微子在穿过地球过程中可能发生了味转变。

为了进一步研究这一现象，日本建设了更大的超级神冈探测器，这是一个 5 万吨级的水切伦科夫探测器。1998 年，超级神冈实验组以确凿的证据宣布发现

了大气中微子振荡现象，特别是  $\nu_\mu$  到  $\nu_\tau$  的转变。这是中微子具有质量的第一个直接证据，领导该实验的小柴昌俊因此获得了 2002 年诺贝尔物理学奖。

### 5.3 SNO 实验与太阳中微子问题的解决

2001-2002 年，加拿大萨德伯里中微子天文台 (SNO) 的实验结果最终解决了太阳中微子问题。SNO 实验使用重水作为探测介质，能够同时测量电子中微子流强和总中微子流强。

实验结果表明，总中微子流强与太阳模型预言一致，但电子中微子只占约三分之一，另外三分之二转变为了  $\mu$  子中微子和  $\tau$  子中微子。这直接证明了太阳中微子在从太阳到地球的传播过程中发生了味转变，确证了中微子振荡现象。SNO 实验领导者阿瑟·麦克唐纳因此分享了 2015 年诺贝尔物理学奖。

## 6 中国贡献：大亚湾与江门实验

### 6.1 大亚湾实验与 $\theta_{13}$ 的精确测量

在 21 世纪初，中微子振荡的六个参数中已有五个被大致测定，唯独第三个混合角  $\theta_{13}$  的大小仍不确定。理论预测其可能很小，甚至为零，这关系到未来中微子物理的发展方向。

中国领导的大亚湾反应堆中微子实验于 2007 年启动建设，2011 年开始取数。实验利用大亚湾核电站群的强大反中微子流，通过比较近点和远点探测器的信号来精确测量中微子振荡概率。2012 年 3 月，大亚湾合作组宣布以 5.2 倍标准偏差的置信度发现  $\theta_{13}$  不为零，并测得  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016$ 。

这一发现出乎意料，因为  $\theta_{13}$  的值远大于预期，意味着中微子之间存在较强的混合，为未来研究中微子 CP 破坏和质量顺序开辟了道路。大亚湾实验是中国基础科学研究的重大突破，标志着中国在中微子物理领域达到了世界领先水平。

### 6.2 江门中微子实验 (JUNO) 与未来展望

江门中微子实验是中国主导的下一代中微子实验，其主要科学目标是确定中微子的质量顺序——即三种中微子质量本征态的质量排序问题。质量顺序是中微子物理最基本的未解问题之一，对理解中微子本质和宇宙物质-反物质不对称性具有重要意义。

JUNO 实验位于地下 700 米，中心探测器是一个容纳 2 万吨液体闪烁体的丙烯酸球罐，周围由光电倍增管包围。实验将精确测量反应堆中微子的能谱，通过分析能谱畸变来确定质量顺序。2025 年 8 月，JUNO 成功完成液体闪烁体灌注并开始正式取数，预计将在未来几年内给出关于中微子质量顺序的确定答案。

除了质量顺序外，JUNO 还将以前所未有的精度测量多个中微子振荡参数，并具备探测超新星中微子、地球中微子等能力，为多信使天文学和地球物理研究

提供新窗口。

## 7 未来展望：中微子物理的发展方向

中微子物理在未来几十年仍将是粒子物理学的重点研究方向。主要科学目标包括：

### 7.1 中微子质量顺序与 CP 破坏

确定中微子质量顺序是当前最紧迫的任务之一。除了 JUNO 实验外，美国的 DUNE 实验和日本的 Hyper-K 实验也将利用不同的方法研究这一问题。CP 破坏的测量则关系到解释宇宙中物质-反物质不对称性的起源，是未来长基线中微子实验的核心目标。

### 7.2 中微子绝对质量测量

虽然中微子振荡实验测得了质量平方差，但中微子的绝对质量仍然未知。宇宙学观测、无中微子双 $\beta$ 衰变实验和直接测量实验正在从不同角度逼近这一基本问题。特别是无中微子双 $\beta$ 衰变的发现将证明中微子是马约拉纳粒子，即自身的反粒子，对理解粒子物理基本对称性有深远意义。

### 7.3 中微子天文学与多信使天文学

中微子作为宇宙信使，可以携带其他信使（电磁波、引力波、宇宙线）无法携带的信息。冰立方 (IceCube) 实验已探测到来自活动星系核等高能天体源的中微子，未来更大规模的探测器将开辟中微子天文学的新时代。

### 7.4 超出标准模型的新物理

中微子的微小质量和振荡现象本身就是超出标准模型的新物理。未来实验可能发现惰性中微子、非标准相互作用等更加奇特的现象，引领我们走向更加深刻的物理理论。

## 8 结论

中微子的研究历程是科学探索的典范，从泡利为解决理论困境而提出的大胆假说，到历经数十年终于实现的实验探测，再到发现超出标准模型的新现象，这一过程体现了理论创新与实验技术相互促进的科学发展规律。

中国科学家在这一领域做出了重要贡献，从王淦昌早期的理论建议，到大亚湾实验的重大发现，再到 JUNO 实验的前沿探索，标志着中国已成长为世界中

微子研究的重要力量。中微子物理仍有许多未解之谜，未来的研究必将进一步深化我们对微观世界和宇宙演化的理解，可能带来基础物理学的新的革命性突破。