

Doctor Curious 44: 浅析中微子

原创 杨金磊 中国科学院理论物理研究所 2022-12-27 15:12 发表于北京

作者简介 /Profile/

杨金磊，中科院理论物理研究所19级博士研究生。
导师：张肇西研究员
研究方向：粒子物理与场论

中微子和电子一样都是费米子（费米子是自旋为半整数的粒子），是存在自然界最基本的粒子之一，但和电子不同的是中微子是电中性的（不带电），而且中微子的质量不到电子质量的500万分之一。在地球上，时时刻刻都有无数个中微子穿透我们的身体，甚至大约每秒钟就有10亿个中微子穿过我们的眼睛，这些数量极大的中微子大部分来自于太阳（其他部分来源：宇宙射线、核反应堆等），是由太阳内部的聚变反应产生的。那为什么这些中微子穿透人体之后不仅没有造成任何伤害，而且被穿透的人也没有任何感觉？这是因为中微子是电中性的，不参与电磁作用，只参与非常弱的弱作用，所以会直接穿透人体而不发生任何反应。不仅如此，来自太阳的中微子到达地球后绝大部分也都会直接穿透地球继续传播（被地球挡住的概率只有100亿分之一）。那么这样一个“看不见摸不着”、质量极小、穿透力极强又无法通过常规电磁手段观测的粒子是怎么发现的呢？

中微子的发现绕不开一个非常重要的过程： β 衰变。在19世纪末，法国物理学家Henri Becquerel发现了铀的衰变之后，科学家们就开始关注原子核的 β 衰变过程。

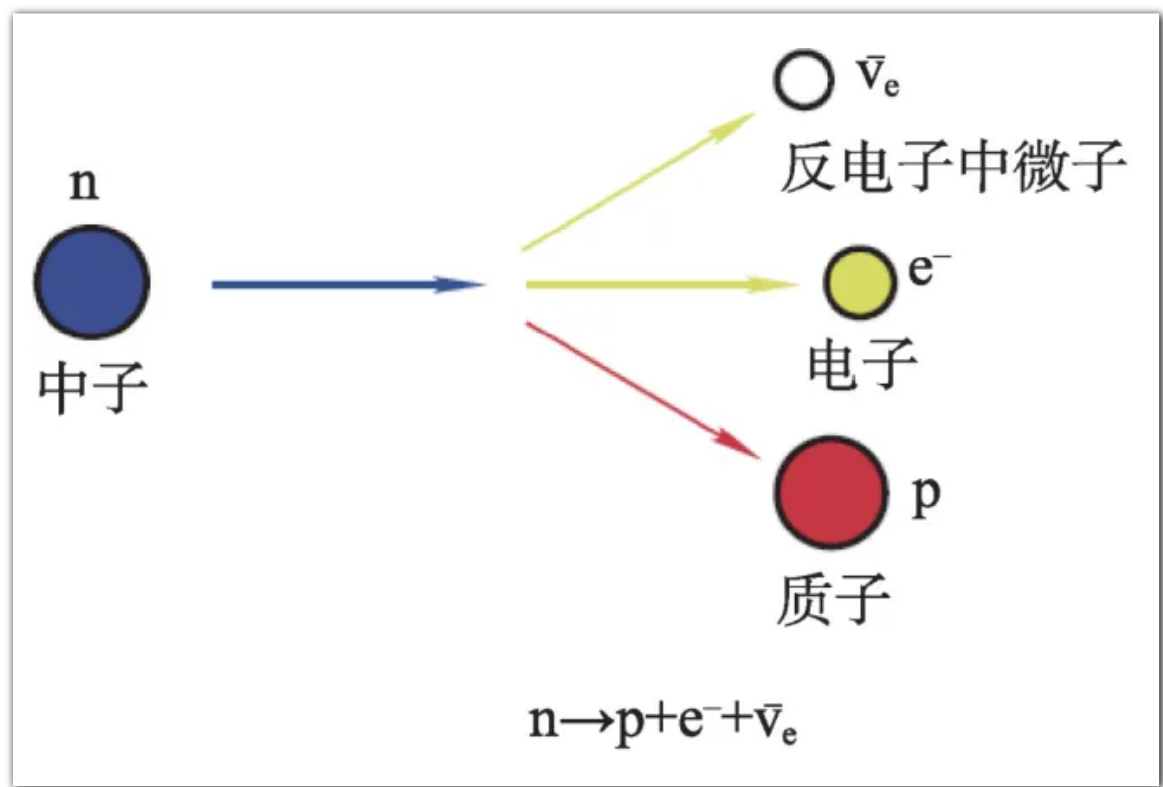


图1：中子衰变成质子、电子和反电子中微子的过程，即 β 衰变过程。

刚开始，原子核 β 的衰变过程被认为是一个原子核衰变成另一个电荷+1的原子核并放出一个电子，即： $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^-$ 。根据能动量守恒，这个放出来的电子的能谱一定是不连续的。但令人惊讶的是，1914年的测量结果表明衰变所放出电子的能谱是连续的（原子核衰变是不同核能态之间的跃迁，如果末态只有子原子核和电子的话，那么电子能谱应该是量子化的，即测量得到的电子能谱应该是离散的，而不是连续的）！这个结果在1920年的测量中得到了进一步的证实。当时著名的丹麦物理学家Bohr认为，这个实验结果表明能量不一定是守恒的，显然这个观点在后来被证实是错的（目前未观测到任何表明能量不守恒的现象）。1930年奥地利理论学家Pauli提出了另外一个观点，他假设存在一个非常轻、自旋为1/2的电中性粒子，在 β 衰变过程中带走了一部分能量，导致了电子能谱是连续的，即真正的衰变过程应该是 $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu}_1$,这个就是我们现在所说的电子反中微子，即第一代中微子的反粒子。

Pauli提出的这个假设开启了中微子领域的研究。1936年德国物理学家Hans Bethe提出通过逆 β 衰变过程

$$\bar{\nu}_1 + (A, Z) \rightarrow (A, Z - 1) + e^-$$

来证明电子反中微子的存在。1956年美国实验学家Frederick Reines和Clyde Cowan首次完成了反应堆反中微子实验，验证了Pauli的假设，他们的发现获得了1995年的诺贝尔物理学奖。1962年，美国实验学家Leon Lederman、Melvin Schwartz和Jack Steinberger通过新的加速器实验发现了第二代中微子 ν_2 ，并获得了1988年的诺贝尔奖。1967年美国理论学家Weinberg和Salam将Higgs机制引入了Glashow的弱电理论，建立了我们所熟知的粒子物理标准模型，预言了存在第三代中微子 ν_3 。在标准模型里面，中微子是无质量的，且不同代的轻子之间没有混合（所谓混合，就是指中微子在传播的过程中会改变代数，例如在源处产生的第一代中微子 ν_1 在传播过程中由于量子相干效应可能会在探测器处变成第二代中微子 ν_2 ，也可能会变成第三代中微子 ν_3 ）。1968年对太阳中微子的观测表明，太阳中微子的含量小于标准太阳模型的理论预言，这是第一个实验观测表明中微子有很小的质量，且不同代的中微子之间可以相互转化。2000年，美国费米实验室宣布发现了第三代中微子 ν_3 ，这是标准模型预言的最后一个被发现的轻子。至此，我们所知道的三代中微子全部被发现。

在中微子被发现的过程中我们提到了1968年对太阳中微子的测量，这是第一个表明中微子有质量且会振荡的实验现象。



图2：中微子振荡现象，即三代中微子之间可能会相互转化。

后来又进行了一系列实验进一步测量了中微子的振荡现象，如我国的大亚湾中微子实验（反应堆中微子实验）、日本的KamLAND、美国的MINOS等。现在中微子振荡现象的测量取得了巨大的进展，已经测得三代中微子之间的质量平方差为

$$\begin{aligned}
 \Delta m_{12}^2 &\equiv m_{\nu 2}^2 - m_{\nu 1}^2 \\
 &= (7.4 \pm 0.61) \times 10^{-5} eV^2 \\
 \Delta m_{13}^2 &\equiv m_{\nu 3}^2 - m_{\nu 1}^2 \\
 &= (2.526 \pm 0.1) \times 10^{-3} eV^2 \quad (NH) \\
 \Delta m_{32}^2 &\equiv m_{\nu 2}^2 - m_{\nu 3}^2 \\
 &= (2.508 \pm 0.1) \times 10^{-3} eV^2 \quad (IH)
 \end{aligned} \tag{1}$$

在上式中 NH （normal hierarchy）表示三代中微子的质量是正常顺序，即 $m_{\nu 1} < m_{\nu 2} < m_{\nu 3}$ ， IH （inverse hierarchy）表示三代中微子质量是反常顺序，即 $m_{\nu 3} < m_{\nu 1} < m_{\nu 2}$ ，这表示现在已经取得的中微子振荡实验观测结果还无法确定三代中微子的质量顺序（确定中微子的质量顺序也是未来中微子实验的重要目的之一）。三代中微子之间的混合角为

$$\begin{aligned}
 \sin^2(\theta_{12}) &= 0.304 \pm 0.014 \\
 \sin^2(\theta_{13}) &= (2.19 \pm 0.12) \times 10^{-2} \\
 \begin{cases} \sin^2(\theta_{23}) = 0.51 \pm 0.05 & (NH) \\ \sin^2(\theta_{23}) = 0.50 \pm 0.05 & (IH) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2}$$

虽然我们已经测到了三代中微子之间的混合角，但是现有的实验结果仍然无法给出中微子混合的CP相角。

从上面的实验测量结果我们可以看出中微子不仅有非常小的质量，而且三代中微子之间有混合（振荡）的现象。但是前面提到了，在标准模型里中微子是没有质量的，因为在标准模型里面中微子没有右手分量，所以不能像其他的费米子一样通过Higgs机制获得质量，自然也就

不会振荡。那么中微子究竟是如何获得质量的呢？研究中微子的质量起源以及中微子性质是现在理论物理研究最重要的方向之一。我们现在仍然无法确定中微子的是Dirac粒子（正反粒子不同，标准模型中预言的中微子是Dirac粒子）还是Majorana粒子（正反粒子都是自身）。从这两种中微子的性质出发，中微子在理论上有不同获得质量的方式：

一、Dirac粒子：

如果中微子是Dirac粒子，那么中微子获得质量最简单的方式是直接在标准模型中引入右手单态中微子 $\nu_R \sim (0, 1, 1)$ ，其中 $(0, 1, 1)$ 分别表示弱荷为 0、 $SU(2)$ 单态和 $SU(3)$ 单态。然后中微子就可以像其他的费米子一样通过Higgs机制获得质量：

$$m_\nu = Y_\nu \times v \quad (3)$$

其中 Y_ν 是相应的汤川耦合系数、 $v \approx 246\text{GeV}$ 是Higgs场的真空期望值。通过引入右手单态使中微子像标准模型中的其他费米子一样获得Dirac质量，但是不一样的是这样引入的右手中微子单态弱荷为0，即除了汤川相互作用，右手中微子不参与任何弱相互作用。除此之外，通过这种方式得到的中微子质量，必须满足中微子振荡实验和PLANK对中微子质量的约束，这就要求 $Y_\nu < 10^{-12}$ ，如此小的耦合常数在理论物理学家们看来是不自然的。

二、Majorana粒子

另外一种使中微子获得质量的方式是引入Majorana质量项，通过see-saw机制（“跷跷板机制”）使中微子获得轻Majorana质量。

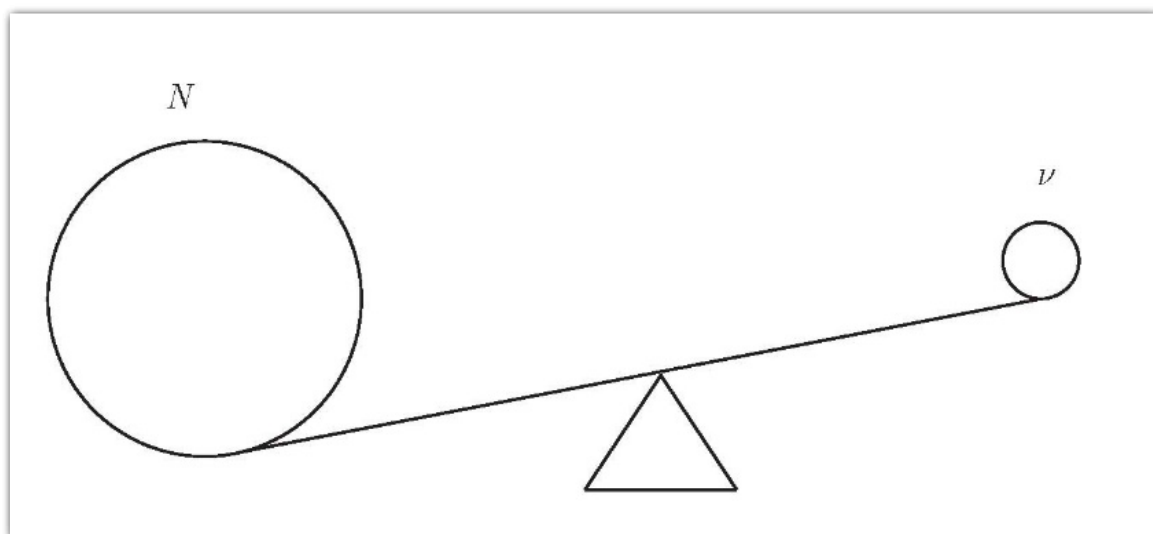


图3:“跷跷板”机制

这个方式最开始是由著名的理论物理学家Weinberg提出，也是目前中微子在大部分新物理模型中获得质量的主要方式。典型的Type-I seesaw就是通过引入右手的中微子单态和新的标量场，新的标量场破缺之后使新引入的中微子右手单态获得大Majorana质量项 M_R 。结合Dirac质量项 M_D ，相互作用本征态下中微子的质量矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & M_{D, 3 \times n} \\ M_{D, n \times 3}^T & M_{R, n \times n} \end{pmatrix} \quad (4)$$

在上式中 n 表示新引入的中微子右手单态数量。近似对角化之后可以得到三代轻中微子的质量矩阵约为

$$\hat{m}_{\nu,3\times 3} \approx -M_D \cdot M_R^{-1} \cdot M_D^T \quad (5)$$

从上面的表达式可以看出，之所以这种机制被称为跷跷板机制，就是因为通过大的 M_R 在分母上，将Dirac质量项 M_D “跷”起来自然的得到很轻的中微子质量。

虽然现在的实验还不能确定中微子的性质和质量起源，但是理论物理学家们关于中微子的研究一直在推进，提出了更多的中微子质量起源方式（如Type II see-saw、Type III see-saw、inverse see-saw等），也广泛地研究了中微子获得质量后所引起的可观测效应（如原子核的无中微子双贝塔衰变、介子轻子味改变衰变、重子轻子味改变衰变、同号轻子对撞机上的轻子味改变过程和轻子数改变过程等），实验观测也在如火如荼地进行。期待不久的将来，实验测量结果能告诉我们更多关于中微子的秘密！

参考文献（滑动查看）

- [1] H. Bethe and R. Peierls. The 'neutrino'. Nature 133, 532 (1934).
- [2] Weinberg S. A Model of Leptons. Phys. Rev. Lett., 1967, 19: 1264-1266.
- [3] Salam A. Weak and Electromagnetic Interactions. Conf. Proc. C, 1968, 680519: 367-377.
- [4] Higgs P W. Broken symmetries, massless particles and gauge fields. Phys. Lett., 1964, 12: 132-133.



微信号 | ITP-CAS

开放 交融 求真 创新

• 中科院理论物理研究所 •

Doctor Curious 50

Doctor Curious · 目录

上一篇

Doctor Curious 43: 浅谈平方关系

下一篇

Doctor Curious 45: 部分子分布中的“母函数”
——Wigner 分布