

## 追寻惰性中微子

(北京大学 徐仁新 编译自 David W. Schmitz. *Physics*, August 8, 2016)

冰立方 (IceCube) 探测器没有发现惰性中微子存在的证据, 严格限制了新一类中微子可能的质量范围。

中微子只通过轻微的弱力和引力跟物质作用, 但它们却在不同尺度上起关键作用。它们影响早期宇宙的形成, 涉及大爆炸后不久重子的起源, 也跟恒星内部的核合成有关, 包括恒星死亡时的超新星爆发。其实中微子无处不在: 因钾同位素( $^{40}\text{K}$ )衰变, 一根香蕉每天就释放上百万个中微子。

一般认为中微子只有三类, 然而有些实验却暗示可能存在一种新的、只参与引力作用的中微子。如果这种“惰性”中微子的确存在, 那将影响宇宙演化进程。找寻惰性中微子已几十年, 但一波三折。利用南极世界最大中微子探测器, 冰立方实验近期发布分析

结果: 相当大程度上排除惰性中微子的存在!

粒子物理标准模型给出三味中微子, 每一味伴随其带电的伙伴粒子(即电子、 $\mu$ 子和 $\tau$ 子)。中微子振荡意味着某一味中微子可以转换成另一味, 中微子味本征态其实是质量本征态(具有确定的质量 $m_1$ ,  $m_2$ 和 $m_3$ )的线性叠加。这完美地体现了量子力学的态叠加原理。此外, 一类中微子转换成另一类的距离, 即中微子振荡波长, 决定于所参与质量本征态的质量平方差。对于已知中微子而言, 这些平方差( $m_2^2 - m_1^2$ 和 $m_3^2 - m_2^2$ )都被高精度地测量。

然而, 可能有实验发现跟已知中微子振荡波长不吻合的证据。最典型的例子有二: 洛斯阿拉莫斯国立实验室 LSND 实验在 $\bar{\nu}_\mu$ 束中观察到 $\bar{\nu}_e$ , 费米实验室 MiniBooNE 实验发现 $\nu_e$ 和 $\bar{\nu}_e$ 都超出。其他实验包括核反应堆或强放射源 $\nu_e$ 和 $\bar{\nu}_e$ 的反常缺失等。

若存在质量为 $m_4$ 的第四质量本征态, 或可解释如上实验。这个第四态必须是惰性的, 即只跟已知中微子微弱地混合。若存在, 那么应观察到小幅度中微子振荡, 振荡波长由 $\Delta m^2$ ( $m_4^2$ 与已知中微子质量平方之差)确定。以前实验给出 $\Delta m^2$ 范围为 $0.1\text{--}10\text{ eV}^2$ (宇宙学测量要求 $m_4$ 大于 $m_1$ ,  $m_2$ 或 $m_3$ )。

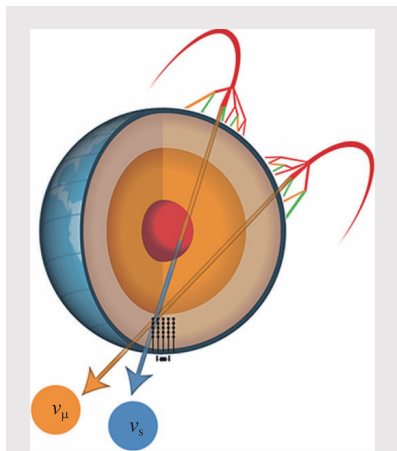
不同于搜索惰性中微子的传统

方法, 冰立方实验主要为探测宇宙中极端事件的高能中微子而设计。该探测器埋在南极冰层下, 分布 $1\text{ km}^3$ 体积, 包含数以千计的光学传感器。当一个高能中微子与冰作用时, 将产生带电粒子并辐射光。依据光信号的幅度和时刻, 研究者即可重建初级中微子的属性。

冰立方之所以对惰性中微子 $\nu_s$ 敏感, 关键是其可精确测量 TeV 大气中微子 $\nu_\mu$ 和 $\bar{\nu}_\mu$ 的能量和方向。真空中 $\nu_\mu$ 较少振荡为 $\nu_s$ 。但当中微子穿过致密物质时, 由于所谓的物质共振效应, 这种振荡大大增强, 导致特定能量的 $\nu_\mu$ 明显缺失。在他们的实验中, 冰立方研究人员考虑物质效应, 追寻那些从北极来的、穿过地球核心的大气中微子 $\nu_\mu$ 和 $\bar{\nu}_\mu$ (见图), 并核查能量 320 GeV 至 20 TeV 中微子 $\nu_\mu$ 和 $\bar{\nu}_\mu$ 的丢失。设 $\nu_s$ 质量比已知中微子大, 理论预测共振能段的 $\bar{\nu}_\mu$ 几乎会完全丢失, 而冰立方并未发现。

冰立方实验严格限制了惰性中微子的可能存在。事实上, 将冰立方和其他实验的数据结合起来分析表明,  $\Delta m^2$ 在 1 到 2  $\text{eV}^2$  范围内。一些在建的新实验拟深入探索这一参数范围的物理, 我们拭目以待。不过, 冰立方的结果已为未来的研究指明了方向。

更多内容详见: M. G. Aartsen et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117: 071801。



为寻找惰性中微子, 冰立方 (IceCube) 实验核查大气 $\mu$ 中微子( $\nu_\mu$ )穿过地核至探测器(黑点)后的丢失。若存在惰性中微子 $\nu_s$ , 则地核将使 $\nu_\mu$ 振荡为 $\nu_s$ 得到增强; 与纯粹三味中微子振荡相比, 会造成更多的 $\nu_\mu$ 缺失