

难以捉摸的惰性中微子

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Joachim Kopp. *Physics*, November 26, 2018)

中微子总是带来惊奇。Wolfgang Pauli 于 1930 年推测了中微子的存在。后来，物理学家们了解到中微子振荡，即已知的 3 种“味”（电子、 μ 子和 τ 子）的中微子在空间飞行时，周期性地相互转换。最近又发现，决定着中微子振荡的参数与理论预期截然不同。

近来，费米实验室的 MiniBooNE 实验数据表明， μ 中微子转换成电子中微子所飞过的距离，比通常发生中微子振荡的距离短得多。20 世纪 90 年代末，Los Alamos 的液体闪烁体中微子探测器 (LSND) 曾观察到过类似信号，MiniBooNE 的再次发现令人更加激动。因为这些信号可能是惰性中微子的信标，惰性中微子只通过引力产生相互作用，而且没有包含在标准模型中。惰性中微子的存在，使我们能回答物理学中某些更紧迫的疑难问题，如暗物质的性质、宇宙中物质的非对称性等。

MiniBooNE 探测质子束打到固体靶上产生的中微子。质子束与靶

核碰撞的产物主要是 π 介子，其寿命不到 $1 \mu\text{s}$ ，主要衰变成 μ 子和 μ 中微子。所产生的 μ 中微子束飞行大约 500 m 到达 MiniBooNE 探测器，与探测器中的原子核相互作用，所产生的粒子可用于探测中微子并确定中微子的味。MiniBooNE 发现类似电子中微子事件比从中微子振荡或已知本底所预期的多很多。

在 LSND 的观测后，理论家们便提出电子中微子过剩可能是由于第 4 种，即惰性中微子的存在。电子中微子、 μ 中微子和 τ 中微子态（统称味本征态）不具有确定的质量。每一个味本征态是质量本征态 ν_1 、 ν_2 和 ν_3 的叠加。在如 π 介子衰变那样的放射性过程中，产生的中微子是这些味本征态之一。当本征态在空间传播时，3 个质量本征态的量子力学相位以不同的速率变化。经过一些时间后，中微子便演化成不同的质量本征态叠加，也就是不同的味本征态。这就是中微子振荡。中微子振荡过程所经过的空间长度反比

于质量的平方差， $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ （其中 $i, j = 1, 2$ 或 3 ，表示 3 种质量本征态）。这些长度的精确测量值与 MiniBooNE 的结果不符。引入惰性中微子后，有第 4 个质量本征态 ν_4 ，以及正比于质量平方差

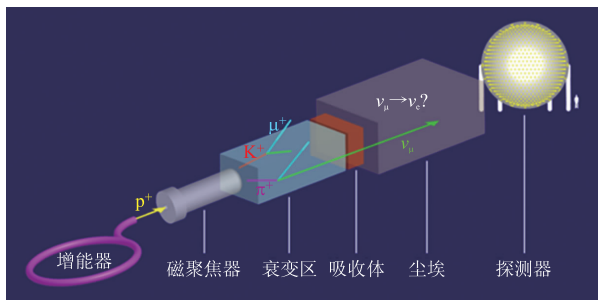
Δm_{4i}^2 的新的振荡长度。味转换可以更快，特别是 μ 中微子向电子中微子的振荡速率可与 MiniBooNE 的结果相符。有趣的是，同样的 Δm_{4i}^2 值可同时解释 MiniBooNE 和 LSND 的结果。

惰性中微子假设已得到其他实验的支持。在核反应堆上以及利用放射性元素进行的实验揭示出电子中微子的数目比预期的少。这种现象可以解释为电子中微子振荡成不能被探测的惰性中微子。

遗憾的是，其他一些实验挑战了惰性中微子理论。该理论预言不仅电子中微子有时会消失成为惰性态，而且 μ 中微子也会如此。但是并没有发现这种 μ 中微子的消失。已有不同于惰性中微子的理论，如求助于重得多的其他非标准模型粒子。其衰变产物在 MiniBooNE 和 LSND 的实验中可被错误地解释为电子中微子。但这种理论也存在问题。

电子中微子过剩，还可以简单地归结为中微子在核上散射时产生的中性 π^0 介子， π^0 衰变生成光子，被错认为是电子中微子在探测器中产生的高能电子。这需要进行确定信号中 π^0 污染的实验。此外基于中微子相互作用截面估值的不确定度做出的解释也存在争议。目前，在费米实验室和其他一些地方正在进行新一代实验，可能会提供确定的答案。

中微子振荡有可能是通向“新物理”的窗口。



费米实验室的 MiniBooNE 实验示意图。经加速的高能质子束聚焦到靶上，所产生的 π 介子主要衰变成 μ 子和 μ 中微子。由 MiniBooNE 探测器记录