

寻找无中微子双 beta 衰变

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Jonathan Engel, Petr Vogel. *Physics*, March 26, 2018)

中微子有 3 种可能的质量状态，其质量大约是电子的百万分之一。这种巨大的差别意味着中微子质量的起源与所有其他费米子不同，涉及超出标准模型的物理。多数由标准模型推广出来的理论都认为中微子是马约拉纳(Majorana)粒子。就是说，它们是本身的反粒子。

如果中微子是马约拉纳粒子，那么就违反了轻子数守恒，轻子数是赋予所有轻子的量子数，对于电子和中微子是 1，而它们的反粒子是 -1。在双中微子 beta 衰变(图左)中，两个中子转变成两个质子加两个电子和两个反中微子。由于电子和反中微子具有相反的轻子数，所以轻子数是守恒的。但是如果中微子是马约拉纳粒子，双 beta 衰变可以不发射反中微子，也就是轻子数改变 2。无中微子过程可以有各种机制。它们涉及产生或者消灭一个虚的马约拉纳中微子(图中部)或某种新的重粒子(图右)。如果是前

者，衰变率正比于 $m_{\beta\beta}$ 的平方， $m_{\beta\beta}$ 是 3 种质量态中微子质量的加权平均值。如果是后者，衰变速率与中微子质量的关系更复杂。但是无论哪种机制，无中微子双 beta 衰变 ($0\nu\beta\beta$) 的实验将表明中微子是马约拉纳粒子，存在着允许轻子数不守恒的新粒子。轻子数不守恒的发现，使物理学家们可用以解释所观察到的物质与反物质的不对称性。

有 4 个实验以大致相同的方法测量 $0\nu\beta\beta$ 衰变的半寿命。位于意大利格兰萨索(Gran Sasso)地下实验室的 GERDA 实验，和在美国斯坦福的地下研究装置 MAJORANA Demonstrator 实验都寻找浓缩锗-76 的材料中的衰变。位于美国废物隔离中试厂的 EXO-200 实验分析浓缩氙-136 的液态氙。位于格拉萨索的 CUORE 实验研究由天然碲组成的 TeO_2 晶体，其 34% 是双 beta 衰变同位素碲-130。

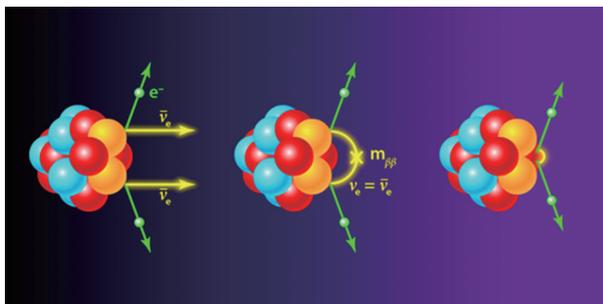
至今关于 $0\nu\beta\beta$ 半寿命的最精确下限值有来自 GERDA 的 8×10^{25} 年，日本神冈天文台 KamLAND-Zen 实验的 1.07×10^{26} 年，EXO-200 的 1.8×10^{25} 年，MAJORANA 的 1.9×10^{25} 年，和 CUORE 的 1.3×10^{25} 年。

对某一同位素，衰变速率预期

依赖于核波函数和末态密度。与锗-76 相比，较重的同位素(氙-136 和碲-130)的电子态密度要增强 6 倍。但是锗-76 的核波函数的贡献最大。总体来说，这 3 种同位素对 $m_{\beta\beta}$ 或重的新粒子的灵敏度几乎相同。氙-136 和碲-130 略微有利。

对于灵敏度而言，最重要的因素是辐照量，即同位素的量和测量时间的乘积。但是，在大量的本底中识别微弱的电子峰的能力非常重要。探测器的分辨越好，排除的假计数越多。CUORE 实验的辐照量比锗实验要大，但分辨率不高。结果是，在感兴趣区为“零本底”的 GERDA 的半寿命极限值比 CUORE 的结果稍高。氙的辐照量最大，但是分辨最差。结果与锗实验提供的极限相近。

如果 $m_{\beta\beta}$ 大于 50 meV，并且 $0\nu\beta\beta$ 衰变经由虚马约拉纳中微子发生，那么估计实验的灵敏度为 $5-8 \times 10^{26}$ 年时便可探测到 $0\nu\beta\beta$ 。但是如果 $m_{\beta\beta}$ 接近 10 meV，那么需要 $1-2 \times 10^{28}$ 年的灵敏度才行。为此必须将探测器的灵敏度提高 100 倍。这需要 1 吨或更多的放射性材料以及更好的去除本底的技术。更大探测器的合作组已组成。探测无中微子双 beta 衰变将改写教科书——轻子数是不守恒的，中微子是马约拉纳粒子。为了证实如此重要的结果和了解更多的 $0\nu\beta\beta$ 衰变的性质以及可能的新的重粒子的性质等，互补的实验是十分需要的。



双 beta 衰变的 3 种模式。在某些同位素中可发生两中微子双 beta 衰变(左)。如果中微子是马约拉纳粒子可发生无中微子双 beta 衰变，有些模型用产生或消灭一个马约拉纳中微子(中)或一未知的重粒子(右)来描述这种衰变