

探测马约拉纳中微子

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Laura Baudis. *Physics*, January 30, 2023)

标准模型预言中微子没有质量，但从中微子振荡实验知道，它们一定是有质量的。特别是，为使中微子在它们的三种“味”之间振荡，它们的平方质量差必须不为零。振荡数据表明，至少有一种中微子态的质量必须约大于 50 meV，但是观测结果没有告诉我们这 3 种态中哪一种最重(数据容许有两种可能的质量顺序，称为“正常的”和“反转的”)。

一种约束中微子质量的方法是研究双 β 衰变($2\nu\beta\beta$)的核，其中两个中子转变成两个质子，发射两个电子和两个反中微子。但是，如果中微子是马约拉纳粒子(它的反粒子就是它本身)，那么 $2\nu\beta\beta$ 衰变核有时会不发射中微子而衰变—— $0\nu\beta\beta$ 衰变。大多数观测这种衰变的工作都需要测量两个电子的总能量并寻找反应 Q 值的峰。这样的峰意味着没

有能量被中微子带走的事件。 $0\nu\beta\beta$ 衰变极其罕见。实验必须满足一些要求：大量的双 β 衰变核、极低的本底、极好的能量分辨、高效率地探测两个末态电子。为优化这些特性，物理学家使用了多种同位素和探测器，包括冷却到低温的晶体、高压气体探测器和大型液体闪烁体。

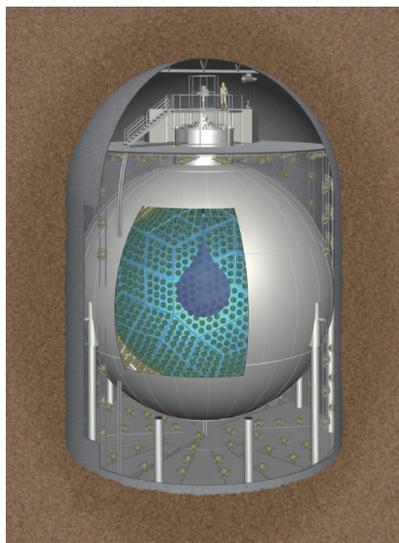
在日本神岗的 KamLAND-Zen 实验使用载有 ^{136}Xe 同位素的大液体闪烁体寻找 $0\nu\beta\beta$ 衰变， ^{136}Xe 是发生双 β 衰变的同位素。探测器具有洋葱状的结构，如图所示。一个球形的内部液袋内装有 13 吨液体闪烁体，其中溶解有 745 kg 的 Xe (大约含有 91% 的 ^{136}Xe)。围绕这个内部的核心有 3 层同心壳，第 1 层包含液体闪烁体，第 2 层装有 1879 个大的光电倍增管(PMTs)，第 3 层是水切连科夫探测器。液体闪烁体中的粒子(包括 ^{136}Xe 稀有衰变产生的粒子)相互作用发出的光由 PMTs 探测。根据这些信号，重构每一事件的能量和位置，在 Q 值(2.48 MeV)附近的相对能量分辨为 4.2%，空间不确定性为 8.7 cm。

KamLAND-Zen 团队分析了自 2019 年 2 月到 2021 年 5 月期间收集的数据，为确定是 $0\nu\beta\beta$ 衰变需要 6.2 个事件(90% 的置信水平)，而探测器的计数经转换后没有达到这一要求。结合该团队以前使用一半质量的靶(381 kg 浓缩的 Xe)的结果，新的结果意味着半衰期的下限为 2.3×10^{26} 年。如果假定主要通过交换轻的马约拉纳中微子发生衰变，那么半衰期的下限可转换为有效的马约拉纳中微子质量在 36—156 meV

范围内。最短的半衰期正好落在与反转的中微子质量顺序相关的 10^{26} — 10^{28} 年的范围内，KamLAND-Zen 首次探测到这一情况，并部分否定了预言这一区域马约拉纳中微子质量的理论模型。

该实验几乎 1 吨年的曝光量在寻找 $0\nu\beta\beta$ 衰变的领域中尚属首次。它能量分辨的精度比晶体探测器差 10 倍，但所获得的灵敏度证明了大量衰变同位素与低但非零本底结合的威力。神岗观测站在地下深处，一部分本底来源于宇宙射线 μ 子在 Xe 中引起的反应所产生的长寿命的散裂产物。这种本底可以用新的事件分类法加以排除。

其他本底来自 ^{136}Xe 发生 $2\nu\beta\beta$ 衰变谱的尾部，其效应只能通过改进能量分辨来减少。将分辨提高两倍是未来 KamLAND2-Zen 探测器的主要目标，探测器将使用具有更高光产额的液体闪烁体和高量子效率的光电倍增管。具有 1 吨 ^{136}Xe 的 KamLAND2-Zen 经过 5 年的数据获取应达到 20 meV 的灵敏度。升级后可以覆盖整个反转顺序区，此区域最小的有效质量容许值是 (18.4 ± 1.3) meV。这个目标与其他一些已计划的项目一致，这些未来的实验，半衰期的灵敏度将达到约 10^{28} 年，有极大的机会发现 $0\nu\beta\beta$ 衰变，并因此可以解开围绕中微子的某些谜团。更重要的是，这样的发现将证实自然界的一种基本对称性——轻子数守恒——是破缺的。这种破缺是试图解释我们宇宙中物质—反物质对称性模型中的重要元素。



KamLAND-Zen 实验的洋葱形同心结构装置