

# 无中微子双贝塔衰变实验发展沿革与未来展望\*

王军正 于 骁<sup>†</sup> 岳 骞<sup>††</sup>

(清华大学工程物理系 北京 100084)

2024-04-01 收到

<sup>†</sup> email: yuxiao23@mails.tsinghua.edu.cn

<sup>††</sup> email: yueq@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240502

## Development and prospects of neutrinoless double-beta decay experiments

WANG Jun-Zheng YU Xiao<sup>†</sup> YUE Qian<sup>††</sup>

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**摘 要** 无中微子双贝塔衰变是一种重要的超出标准模型的新物理。在数十年理论和实验的发展与探索的基础上,人们对其可能的物理机制以及实验的技术需求已有较为深刻的理解。国际上有多个实验组通过不同的探测器技术尝试寻找无中微子双贝塔衰变事件,并对半衰期下限给出了 $10^{26}$ 年量级的限制。目前各实验组正在积极进行下一代实验装置的预研和建设,致力于将半衰期灵敏度提高到 $10^{27}$ 年以上。中国正依托锦屏地下实验室国际领先的实验环境,开发多个不同路线的探测技术。文章将概述国际上主要的大型无中微子双贝塔衰变实验的现状,并展示在锦屏地下实验室中探索这一前沿物理领域的前景以及基于不同探测器技术的实验方案。

**关键词** 中微子, 无中微子双贝塔衰变, 半衰期, 中国锦屏地下实验室, 探测器

**Abstract** Neutrinoless double-beta decay is an important physics topic beyond the Standard Model. Based on decades of theoretical and experimental research, a somewhat full understanding of its possible physical mechanism and the experimental technical requirements have been established. Many groups worldwide are attempting to detect neutrinoless double-beta decay events using various detection techniques, and have given a lower half-life limit of  $10^{26}$  years. Now, the next generation of experimental facilities are being appraised or are under construction, with the aim to improve the half-life sensitivity to above  $10^{27}$  years. The China Jinping Underground Laboratory (CJPL), a world-leading ultralow background facility, provides many different kinds of detection techniques. This paper will review the current status of the major facilities worldwide conducting neutrinoless double-beta decay experiments, including the prospects of such experiments in CJPL, which will be based on various detection schemes.

**Keywords** neutrino, neutrinoless double-beta decay, half-life, CJPL, detector

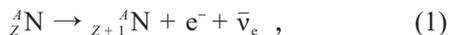
\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2023YFA1607100; 2017YFA0402200)、国家自然科学基金(批准号: 12175112; 11725522)资助项目

## 1 研究背景

### 1.1 从贝塔衰变到无中微子双贝塔衰变

1896年, 贝克勒尔(Becquerel)发现原子核的天然放射性, 开启了研究原子核放射性的时代。在天然放射线中的电子射线称为贝塔( $\beta$ )射线, 产生这种射线流的衰变模式称为 $\beta$ 衰变。

在对 $\beta$ 衰变放射电子进行能谱测量时, 发现 $\beta$ 能谱为连续谱, 不具有阿尔法( $\alpha$ )和伽马( $\gamma$ )衰变这种二体反应中观察到的分立能峰的特征。基于能量、动量守恒, 为解释能谱的“畸变”, 泡利(Pauli)猜想 $\beta$ 衰变在放射出电子的同时还发射了一个电中性、质量极低、反应截面很小的粒子, 这一粒子带走了一部分能量和动量从而形成了电子的连续谱。1933年, 费米(Fermi)将这种粒子改名为中微子(neutrino), 并且建立了 $\beta$ 衰变核子流和轻子流相互耦合的有效场论<sup>[1-3]</sup>,  $\beta$ 衰变的反应式如下:



其中 $e^-$ 是 $\beta$ 射线,  $\bar{\nu}_e$ 是反电子中微子, 为 $\beta$ 衰变中发射的中微子类型, 轻子数 $L = -1$ 。电子( $e^-$ )的轻子数是+1, 因此反应前后的轻子数守恒 $\Delta L = 0$ 。

1935年, 迈耶(Mayer)基于费米的理论提出, 部分偶核 ${}^A_Z\text{N}$ 由于核子配对效应质量低于 ${}^A_{Z+1}\text{N}$ , 不能发生 $\beta$ 衰变, 但可能出现双贝塔衰变过程( $2\nu\beta\beta$ )<sup>[4]</sup>:

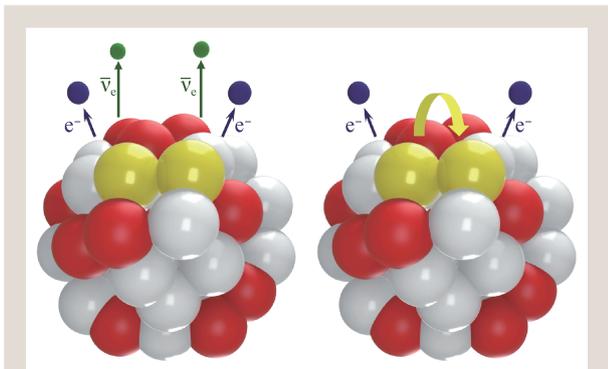
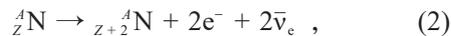


图1 双贝塔衰变过程( $2\nu\beta\beta$ , 左图)与无中微子双贝塔衰变过程( $0\nu\beta\beta$ , 右图)示意图



$2\nu\beta\beta$ 同样满足轻子数守恒。

1937年, 马约拉纳(Majorana)指出中微子可能具有反粒子是其本身的马约拉纳属性<sup>[5]</sup>:

$$\nu_e = \bar{\nu}_e, \quad (3)$$

1939年, 弗里(Furry)发现这种中微子的马约拉纳属性可以导致能够发生 $2\nu\beta\beta$ 的核素, 也可以发生无中微子双贝塔衰变( $0\nu\beta\beta$ )(图1)<sup>[6]</sup>:



对于这一反应的物理机制可以简单理解为由于中微子的马约拉纳属性,  $2\nu\beta\beta$ 释放的两个中微子发生了湮没, 轻子数不再守恒。1982年, 谢克特(Schechter)和瓦尔(Valle)提出的 Schechter—Valle 定理表明只要 $0\nu\beta\beta$ 发生, 则不管反应机制如何, 中微子一定具有马约拉纳属性<sup>[7]</sup>。这一理论结果进一步提升了 $0\nu\beta\beta$ 的研究意义。

### 1.2 研究历程和机遇

早在20世纪40年代 $0\nu\beta\beta$ 理论提出不久, 相关实验就已经开始进行, 随着理论的发展和标准模型(Standard Model, SM)的提出, 物理学家们意识到 $0\nu\beta\beta$ 的发生依赖于中微子的马约拉纳属性, 而马约拉纳属性又意味着中微子存在质量<sup>[7, 8]</sup>, 这一方面大大提高了对 $0\nu\beta\beta$ 半衰期的预期, 增加了实验难度, 另一方面又提升了 $0\nu\beta\beta$ 的研究意义, 使其成为超出标准模型(beyond Standard Model, BSM)新物理机制研究的一个重要渠道。

$0\nu\beta\beta$ 实验研究的另一次转折发生在20世纪末, 日本超级神冈实验<sup>[9]</sup>和加拿大的斯诺(SNO)实验<sup>[10]</sup>确立了中微子振荡现象, 这是人类第一次观测到BSM的物理现象, 同时验证了中微子存在质量本征态。中微子振荡表明中微子存在质量, 为其马约拉纳属性提供了存在基础, 促成了新世纪 $0\nu\beta\beta$ 实验研究的极大繁荣和发展。在2017年欧洲长期科学发展规划<sup>[11]</sup>和2023年美国能源部和自然科学基金委核科学长远规划书<sup>[12]</sup>中都将 $0\nu\beta\beta$ 实验列为优先发展的大科学实验项目。

### 1.3 $0\nu\beta\beta$ 物理机制简介

对  $0\nu\beta\beta$  的产生机制有多种不同的理论诠释, 本节将介绍目前最为主流简洁的活性马约拉纳中微子交换机制。

在活性马约拉纳中微子交换机制中, 中微子在 SM 中的三种味本征态  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  为三种质量本征态  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  的混合, 他们的转化关系由一个  $3\times 3$  的轻子味混合矩阵  $U$  表示:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$0\nu\beta\beta$  的半衰期可以用下面的公式表示<sup>[13, 14]</sup>:

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \frac{m_{\beta\beta}^2}{m_e^2}, \quad (6)$$

其中  $T_{1/2}^{0\nu}$  为对应核素的  $0\nu\beta\beta$  半衰期;  $G^{0\nu}$  为相空间因子, 对不同核素已经可以做到非常准确的计算, 可以近似认为是常数;  $M^{0\nu}$  为核矩阵元, 对其的计算困难在于如何计算多体问题的初末态原子核波函数, 目前不同的近似模型之间的计算结果差了 2—3 倍, 这种不确定性一定程度上增加了实验结果的不确定度, 对核矩阵元进一步精确计算是未来理论研究的方向;  $m_e$  为电子质量;  $m_{\beta\beta}$  是中微子的有效质量, 因反应涉及的马约拉纳中微子是电子中微子, 有效质量是各组分质量本征态的本征质量(分别为  $m_1, m_2, m_3$ )按概率叠加得到的期望值:

$$m_{\beta\beta} = m_1 U_{e1}^2 + m_2 U_{e2}^2 + m_3 U_{e3}^2. \quad (7)$$

在此公式的基础上, 可以在中微子振荡实验结果之上估计  $m_{\beta\beta}$  可能的范围, 为实验的发展提供参考。

中微子振荡实验测量了  $U$  中质量本征态之间的混合角以及质量本征态之间的质量差, 但是存在三个未知特征: (1) 不知道质量本征态之间的质量顺序是正序 ( $m_1 < m_2 < m_3$ ) 还是反序 ( $m_3 < m_1 < m_2$ ); (2) 不知道中微子的绝对质量大小; (3)  $m_{\beta\beta}$  理论式中的马约拉纳 CP 破坏相位未知且  $0\nu\beta\beta$  是其目前唯一可能的测量方式。基于以上分析, 可以计算得到  $m_{\beta\beta}$  在未知其他参数下的参数空间。

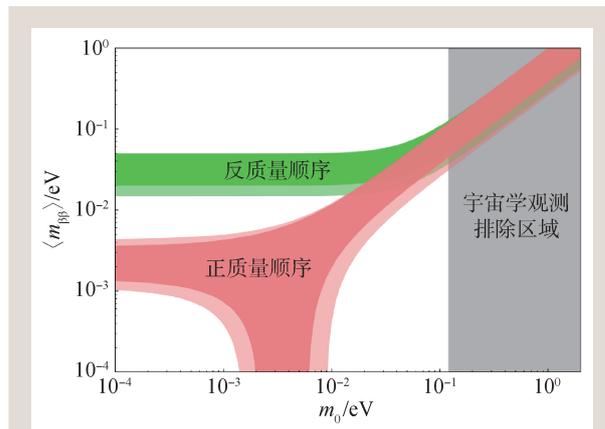


图2 有效中微子质量相对于最小中微子质量的参数空间。红色和绿色部分分别代表正质量顺序和反质量顺序, 右侧灰色区域显示了由宇宙学观测对于中微子质量本征态中最小质量的限制

对于可能的两种中微子质量顺序, 分别可以画出  $m_{\beta\beta}$  相对于最小中微子质量的参数空间, 如图 2 所示, 这里参数空间的分布呈现带状分布特征, 带状分布产生的原因是允许马约拉纳 CP 破坏相位在  $[0, 2\pi]$  变动, 中微子振荡参数在实验结果的三倍标准差范围内变动<sup>[15]</sup>。

### 1.4 $0\nu\beta\beta$ 实验研究的意义

如果成功观测到  $0\nu\beta\beta$  事例, 对粒子物理学的重要科学意义主要体现在以下三个方面:

- (1) 第一次观测到轻子不守恒过程;
- (2) 证明了中微子的马约拉纳属性, 一定程度上为解释宇宙中正反物质不对称的“轻子生成机制”提供了依据<sup>[15]</sup>;

(3) 测量中微子有效质量  $m_{\beta\beta}$ , 确定质量本征态的质量顺序以及马约拉纳 CP 破坏相位。

## 2 实验总览

### 2.1 $0\nu\beta\beta$ 实验目标与现状

$0\nu\beta\beta$  放射出的两个电子的总能量为其衰变能  $Q_{\beta\beta}$ , 在能谱上表现为  $Q_{\beta\beta}$  处的单能峰。已知中微子的绝对质量极小, 因此如果  $0\nu\beta\beta$  存在, 它是一种半衰期极长的低事例率反应, 目前还没有观测

表1 主要探测器的实验结果(表格中包括一系列已经产出实验结果的探测器)

探测器	技术/核素	$T_{1/2}^{0\nu}$ /(年, 90% C.L.)	$m_{\beta\beta}$ /meV
GERDA	半导体探测器/ $^{76}\text{Ge}$	$1.8 \times 10^{26}$ [16]	79—180
MAJORANA	半导体探测器/ $^{76}\text{Ge}$	$8.3 \times 10^{25}$ [17]	200—433
EXO-200	时间投影室/ $^{136}\text{Xe}$	$3.5 \times 10^{25}$ [18]	93—286
KamLAND-Zen	液闪探测器/ $^{136}\text{Xe}$	$2.3 \times 10^{25}$ [19]	61—165
CUORE	晶体量热器/ $^{130}\text{Te}$	$2.2 \times 10^{25}$ [20]	90—305

到相关信号, 实验结果通过对半衰期的下限进行限制来给出。近期完成的较大规模实验的最新结果(90%置信水平(C.L.))如表1所示<sup>[16-20]</sup>。总的来看, 目前的实验对半衰期的限制达到了 $10^{26}$ 年的量级, 未来的实验计划普遍分为两步走, 目标分别是将实验灵敏度提升至 $10^{27}$ 年和 $10^{28}$ 年量级。

选择有效的双贝塔衰变核素需要综合考虑多个标准, 包括但不限于: (1)更大的 $Q_{\beta\beta}$ , 以减少本底的影响; (2)更大的同位素天然丰度和更成熟的富集技术, 降低探测器的成本。例如 $^{130}\text{Te}$ 的天然同位素丰度超过30%, 可以不经富集直接用于探测器; (3)与成熟探测器技术的匹配。例如 $^{76}\text{Ge}$ 可以作为半导体探测器的材料, 实现极佳的能量分辨率。综合各个方面的考虑,  $^{76}\text{Ge}$ 、 $^{136}\text{Xe}$ 、 $^{130}\text{Te}$ 已经被证明是合适的实验核素, 并且基于它们的实验已经产生了阶段性的结果。研究人员会根据使用的不同核素来选择相匹配的探测器技术, 例如使用 $^{76}\text{Ge}$ 的半导体探测器,  $^{136}\text{Xe}$ 的时间投影室和液闪探测器, 以及 $^{130}\text{Te}$ 的晶体量热器等。

## 2.2 $0\nu\beta\beta$ 实验挑战与发展

为寻找 $0\nu\beta\beta$ 这样发生率极低的事例, 需要提升发生的总事例数, 对于一个未知的衰变反应通常的做法是提高核素的粒子数, 提升探测效率以及延长探测时间; 另一方面提升信噪比, 采用的方法是降低 $Q_{\beta\beta}$ 附近区间的本底数以及提高探测器的能量分辨率。实验灵敏度与主要探测器参数的关系可以用下面的公式衡量<sup>[15]</sup>:

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \begin{cases} aM\epsilon t & \text{零本底情况,} \\ a\epsilon \sqrt{\frac{Mt}{B\Delta E}} & \text{存在本底情况.} \end{cases} \quad (8)$$

其中 $a$ 为同位素丰度(%),  $M$ 为有效靶质量(kg),  $\epsilon$ 为探测效率(%),  $t$ 为探测器运行时间(年),  $B$ 为信号区域单位质量、单位时间、单位能量宽度的本底数(counts/(keV·kg·year), 简称cpkky)。从公式可以发现, 有无本底时半衰期灵敏度分别按照平方根和线性变化, 反映了低本底时质量规模和时间收益的提升。

降低本底是 $0\nu\beta\beta$ 探测器最重大的技术难题, 在 $Q_{\beta\beta}$ 附近的感兴趣区间存在宇生放射性、原生放射性、宇宙射线缪子、 $2\nu\beta\beta$ 等一系列本底, 需要在硬件层面提高结构材料的纯度, 在数据处理层面建立好的反符合和甄别算法。

降低本底是 $0\nu\beta\beta$ 探测器最重大的技术难题, 在 $Q_{\beta\beta}$ 附近的感兴趣区间存在宇生放射性、原生放射性、宇宙射线缪子、 $2\nu\beta\beta$ 等一系列本底, 需要在硬件层面提高结构材料的纯度, 在数据处理层面建立好的反符合和甄别算法。

目前一般探测器的运行周期在5年左右, 随后就会进行新一代探测器的升级改造, 提升探测器的规模并且提升探测效率、能量分辨率等性能参数。目前的几种主流探测器技术各有优劣, 分别面临不同的挑战。

## 3 国际主流探测技术及现状

### 3.1 低温晶体量热器

晶体量热器在低温环境下的高灵敏度使其在稀有物理事例探测领域具有一定的竞争力。实验中所用的晶体通常由可以发生双贝塔衰变的核素组成, 衰变过程中放出的能量会沉积在晶体内引起晶体温度的升高, 并生成可被探测到的信号。低温晶体量热器具有比气体或液体探测器更好的能量分辨率以及相对于高纯锗探测器更低的价格; 除此之外, 还可以用不同的核制成量热器晶体来分别寻找它们的无中微子双贝塔衰变。这些优势推动着晶体量热器技术的发展并使其成为具有竞争优势的探测技术。

国际上最具代表性的低温晶体量热器实验是意大利格兰萨索国家实验室的CUORE实验。该实验采用的晶体为含天然丰度的 $\text{TeO}_2$ , 整个探测器阵列由988块边长为5 cm的立方体晶体组成, 每块晶体的质量约为750 g, 总共有效 $^{130}\text{Te}$ 质量

为206 kg (图3)。探测器阵列整体放置于低本底铜制成的低温恒温器内, 工作温度为10 mK。CUORE实验组于2022年发表了最新的实验结果, 给出了 $^{130}\text{Te}$ 的 $0\nu\beta\beta$ 半衰期下限为 $2.2 \times 10^{25}$ 年(90% C.L.)<sup>[20]</sup>。CUORE实验的本底水平为 $(1.49 \pm 0.04) \times 10^{-2}$  cpkky, 这些本底的主要来源是晶体表面和探测器阵列支撑结构中的放射性核素衰变产生的 $\alpha$ 粒子。目前正处于预研阶段的CUPID是CUORE实验的升级版方案, 该实验计划使用 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体寻找 $^{100}\text{Mo}$ 的 $0\nu\beta\beta$ 。由于 $\alpha$ 粒子与电子在 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体内产生的光-热信号比具有明显差异, 通过光电双读出技术能够有效抑制 $\alpha$ 本底。

### 3.2 液体闪烁体探测器

相较于其他探测技术而言, 液体闪烁体探测器最突出的优势便是极大的曝光量。目前典型的液体闪烁体探测器中有效靶核的质量分数为百分之几, 一个千吨级的闪烁体探测器可以很容易地取得吨·年量级的曝光量, 然而大质量的液闪也会增加太阳中微子以及宇生放射性核素(例如有机液体闪烁体中容易产生的 $^{10}\text{C}$ )带来的本底, 同时液体闪烁体本身较差的能量分辨率也对其探测能力有相当的限制。

具有代表性的液体闪烁体实验是日本的KamLAND-Zen实验, 它的前身是著名的KamLAND中微子振荡实验。为了探测 $0\nu\beta\beta$ , 实验组在直径13 m的球形液体闪烁体探测器中央放置了一个直径为3.08 m的尼龙气球, 并在其中充满了溶有 $^{136}\text{Xe}$ 的液体闪烁体(图4)。2016年, KamLAND-Zen一期实验利用340 kg的 $^{136}\text{Xe}$ 给出了 $1.07 \times 10^{26}$ 年的半衰期上限(90% C.L.)<sup>[23]</sup>, 是当时世界范围内最强的限制。二期实验中, 实验组在一个更大更纯净的尼龙气球中放置了大约680 kg的 $^{136}\text{Xe}$ , 本底水平达到 $5.5 \times 10^{-3}$  counts/(mol·year), 并于2023年给出了 $2.3 \times 10^{26}$ 年的半衰期上限(90% C.L.)<sup>[19]</sup>。目前KamLAND-Zen实验组正着手策划进一步的实验升级方案KamLAND2-Zen(KL2Z)<sup>[24]</sup>。KL2Z计划使用大约

一吨的 $^{136}\text{Xe}$ , 并通过使用更高收集效率的光电倍增管和更纯净的液体闪烁体来实现更优的能量分辨率以及更低的本底水平。

### 3.3 时间投影室探测器

时间投影室(TPC)是一种能够同时测量带电粒子的三维空间坐标和能量的探测器, 以氙为工作介质的TPC被广泛地用于 $0\nu\beta\beta$ 实验。氙具有良好的电离和闪烁发光的机制, 可以实现优异的能量分辨率。同样使用 $^{136}\text{Xe}$ 作为靶核, KamLAND-Zen在 $Q_{\beta\beta}$ 处的能量分辨率仅为4%, 而基于氙的TPC可以达到1%甚至更低。国际主流的氙TPC实验包括美国的EXO-200液氙探测器和西班牙的NEXT气氙探测器。

EXO-200实验组使用富集液氙(约161 kg  $^{136}\text{Xe}$ )构建液氙TPC。TPC的中心有一个公共阴极膜, 将探测器分为两个漂移区, 电离粒子通过阳极区域交叉的阳极丝读出, 而闪烁光则通过大面积雪崩光电二极管读出。EXO-200的本底水平为

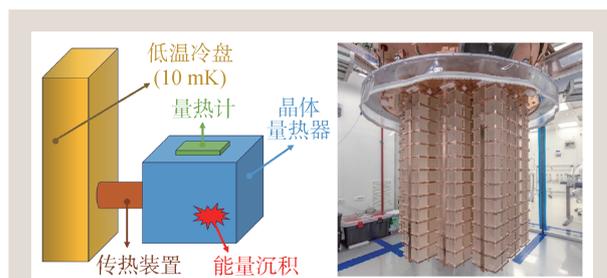


图3 晶体量热器原理图(左)以及CUORE晶体阵列实物图(右)<sup>[21]</sup>

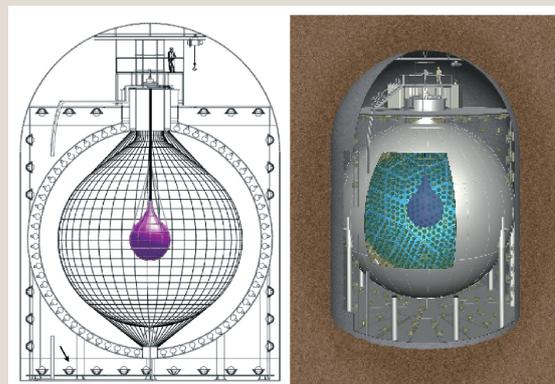


图4 KamLAND-Zen探测器结构示意图<sup>[22]</sup>

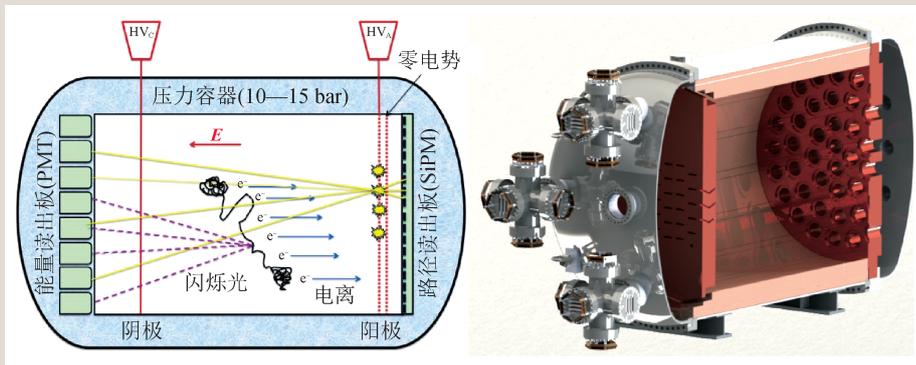


图5 NEXT-100 气氙 TPC 探测器原理图(左)与结构图(右)<sup>[28]</sup>



图6 GERDA 实验装置中的液氩反符合探测器结构示意图(左), 探测器周围的光纤(中)以及探测器阵列实物图(右)<sup>[29]</sup>

$1.8 \times 10^{-3}$  cpkky, 主要来自于液氙周围材料中的  $^{238}\text{U}$  衰变链核素。该实验最终给出的半衰期下限(90% C.L.)为  $3.5 \times 10^{25}$  年<sup>[18]</sup>。目前 EXO-200 正计划升级为 nEXO, 在 10 年的运行时间内利用 5 吨的富集液氙达到  $1.35 \times 10^{28}$  年的预期半衰期灵敏度<sup>[25]</sup>。NEXT 实验组首先进行了原型机探测器的测试<sup>[26]</sup>, 他们将 5 kg 液氙充入工作在 10 bar 气压的气氙 TPC。TPC 的阳极安装硅光电倍增管(SiPM)用于路径读出, 同时阴极安装光电倍增管(PMT)用于能量读出以获得最佳的能量分辨率。目前, NEXT 实验组正在筹划实验的第二阶段 NEXT-100 (图 5)<sup>[27, 28]</sup>, 计划使用 87 kg 的  $^{136}\text{Xe}$  在 15 bar 的气压下开展  $0\nu\beta\beta$  探测。

### 3.4 高纯锗探测器

高纯锗探测器是目前能量分辨率最优秀的

探测器, 同时  $^{76}\text{Ge}$  又是  $0\nu\beta\beta$  实验的候选核素, 经过富集后同位素富集水平可以达到 87% 以上。由富集锗制成的高纯锗探测器能够实现“靶源一体”, 大大提高对  $0\nu\beta\beta$  事例的探测效率。目前处于领先地位的基

于高纯锗探测器技术的实验包括美国主导的 MAJORANA 实验以及欧洲主导的 GERDA 实验。

MAJORANA 实验在美国桑德福地下实验室 (SURF) 开展, 他们实现的一项重要的技术突破是地下电解铜的生产, 能够得到目前为止纯度最高的商用铜材料。以这种高纯铜为材料制作探测器周围的结构部件能够极大地降低实验的本底水平。除此以外, 他们还研发了低质量前端电子学, 不仅具有极低的放射性, 同时也能实现极低的噪声。MAJORANA 实验在  $Q_{\beta\beta}$  处的能量分辨率能够达到 0.12%, 是目前所有大规模  $0\nu\beta\beta$  实验中的最优水平。MAJORANA 实验在  $Q_{\beta\beta}$  能区的本底水平为  $6.58 \times 10^{-3}$  cpkky, 最终给出  $8.3 \times 10^{25}$  年的半衰期下限(90% C.L.)<sup>[17]</sup>。GERDA 实验在意大利格兰萨索国家实验室开展, 他们率先使用了液氙主动反符合技术来降低实验本底水平。浸泡着高纯锗探测器阵列的低温液氙可以同时发挥屏蔽外部辐射、提供低温环境以及充当反符合闪烁体探测器的功能(图 6)。GERDA 实验在  $Q_{\beta\beta}$  能区的本底水平达到了  $5.2 \times 10^{-4}$  cpkky, 是首个实现“零本底”(在预期的实验曝光量下,  $Q_{\beta\beta}$  能区的本底计数小于 1 个)状态的实验。GERDA 实验在 2020 年给出了当前对  $^{76}\text{Ge}$  无中微子双贝塔衰变半衰期最严格的限制:  $1.8 \times 10^{26}$  年(90% C.L.)<sup>[16]</sup>。目前上述两个实验组已经合并为 LEGEND 实验组并规划后续的实验分两期进行: 第一阶段为 LEGEND-200, 计划使用约 200 kg 的高纯锗探测器, 结合上述两个实验组的优势技术, 使  $Q_{\beta\beta}$  能区的本底计数降低到  $2 \times 10^{-4}$  cpkky, 预计在五年的运行时间内

达到  $10^{27}$  年的预期半衰期灵敏度；第二阶段为 LEGEND-1000，将探测器总量增加至一吨左右，进一步降低本底到  $1 \times 10^{-5}$  cpkky，并在十年运行时间内达到  $10^{28}$  年的预期半衰期灵敏度。目前 LEGEND-200 已经顺利开展部分探测器的运行并在 2023 年上半年完成了第一批物理数据的采集。

## 4 国内无中微子双贝塔衰变实验

### 4.1 中国锦屏地下实验室

无中微子双贝塔衰变作为极其稀有的物理事例，非常依赖于低本底的实验环境。位于四川省凉山彝族自治州的中国锦屏地下实验室(China Jinping Underground Laboratory, CJPL)为国内各种  $0\nu\beta\beta$  实验的开展提供了一个极好的平台。CJPL 位于四川省锦屏山下，垂直岩石覆盖可达 2400 米。2023 年底，CJPL 二期工程完工，将地下可用实验空间由原来的 4000 立方米增加到 33 万立方米，同时入驻了首批 10 个实验项目组，这标志着世界最深最大的极深地下实验室正式投入科学运行。CJPL 建成后，将成为世界上岩石覆盖最厚、宇宙线缪子通量最低、实验空间最大的地下实验室(图 7)，能够有力的推动国内  $0\nu\beta\beta$  实验的开展。

### 4.2 基于高纯锗探测器的 CDEX 实验

CDEX (China Dark Matter Experiment) 合作组由清华大学牵头建立，成立于 2009 年，致力于利用高纯锗探测器进行轻质量暗物质探测以及  $^{76}\text{Ge}$  无中微子双贝塔衰变的探测。截至目前，CDEX 合作组已经自主设计研制并完成了单体质量达到 1 kg(未富集)的点电极高纯锗探测器 CDEX-1A、CDEX-1B 以及总质量约为 10 kg(未富集)的点电极高纯锗阵列系统 CDEX-10。2017 年，合作组基于 CDEX-1A 304 公斤·天的实验数据给出了  $0\nu\beta\beta$  的半衰期下限为  $6.4 \times 10^{22}$  年(90% C.L.)<sup>[31]</sup>，这是国内首个  $^{76}\text{Ge}$  无中微子双贝塔衰变实验结果。目前，CDEX 合作组正在建设约 300 kg 的富集点电极高纯锗探测器阵列，并设计建设用于降低实验装置

自身放射性本底的液氦反符合探测器系统(图 8)，使实验的本底水平降低到  $10^{-4}$  cpkky 水平，在三年的运行时间内实现  $10^{27}$  年量级的预期半衰期灵敏度。为了实现上述目标，CDEX 合作组已经在高纯锗探测器的制作以及探测器阵列的搭建、液氦反符合探测器系统的研制、高精度波形采样电子学和数据获取系统研发等关键技术方面积累了丰富的经验。

### 4.3 基于氦时间投影室的 PandaX 实验

PandaX (Particle and Astrophysical Xenon TPC) 实验组成立于 2009 年，致力于利用大型氦时间投影室搜寻暗物质并探究中微子的基本性质。截至目前，PandaX 合作组已经建成并运行了三代实

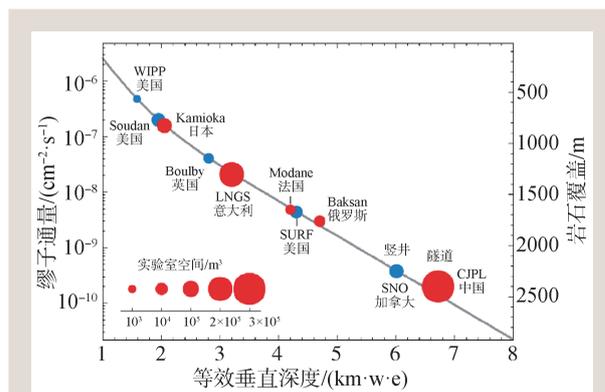


图 7 国际主要地下实验室的岩石覆盖厚度(红蓝点)、宇宙线缪子通量(灰色曲线)以及实验空间大小。红色和蓝色分别表示该实验室通过隧道或竖井进入<sup>[30]</sup>

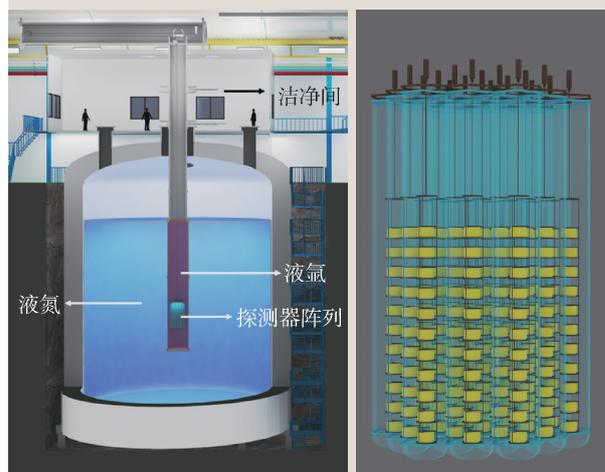


图 8 CDEX 富集锗阵列探测器装置示意图(左)以及探测器阵列局部放大图(右)<sup>[32]</sup>

验：PandaX-I、PandaX-II和PandaX-4T，有效探测质量分别为120 kg、580 kg和3.7吨(天然氙)，这三代实验都使用了气液双相型氙时间投影室技术。2019年，PandaX-II实验基于2016年初至2018年8月约400天的曝光量给出了无中微子双贝塔衰变的半衰期下限为 $2.1 \times 10^{23}$ 年，对应的马约拉纳中微子质量为1.4—3.7 eV (90% C.L.)<sup>[33]</sup>。PandaX-4T是PandaX-II的升级，目前正处于运行阶段。相较于前代，其有效质量增加约8倍，本底也能够控制在更低的水平，预期半衰期灵敏度可以达到 $10^{25}$ 年量级。除此之外，PandaX合作组也正着手高压气氙实验PandaX-III的建设，这是一个百千克级90%丰度的高压气体 $^{136}\text{Xe}$ 时间投影室，并应用了气体微结构探测器(Micromegas)技术以寻找无中微子双贝塔衰变过程。未来，PandaX合作组还将致力于建设多吨级 $^{136}\text{Xe}$ 规模的实验装置，给出国际领先水平的实验结果。

#### 4.4 基于低温晶体量热器的CUPID-China实验

前面介绍的CUORE晶体量热器实验基于 $\text{TeO}_2$ 晶体，其本底水平已经无法满足新一代无中微子双贝塔实验的灵敏度要求，以CUORE合作组为主体的多个国际研究团队正积极推动下一代实验CUPID的技术研发。其中CUPID-China合作组拟在CJPL利用 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 闪烁晶体寻找 $^{100}\text{Mo}$ 无中微子双贝塔衰变。 $^{100}\text{Mo}$ 本身的衰变能 $Q_{\beta\beta}$ 更高(3.035 MeV)，能够降低环境本底对该能区的干扰；同时 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体可以使用光—热双读出技术，能够有效地进行粒子鉴别并去除 $\alpha$ 粒子，进一步压低 $Q_{\beta\beta}$ 能区的本底。目前合作组正着手在CJPL开展原型机实验，内容包括建立测试高纯晶体的低温冷却系统、研制高纯 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体、开发光热双通道读出技术等等，期望近期运行10 kg量级 $^{100}\text{Mo}$ 有效质量的原型机实验，为未来发展吨量级实验建立基础。

#### 4.5 基于时间投影室的NvDEX实验

中国科学院近代物理所主导的NvDEX实验将利用高压 $\text{SeF}_6$ 气体TPC进行 $0\nu\beta\beta$ 实验。由于 $\text{SeF}_6$

是一种强电负性气体，高能带电粒子在其中电离产生的电子会被很快吸附，无法雪崩放大，为此合作组开发了能够收集离子电荷的Topmetal电荷探测芯片<sup>[34]</sup>以用于TPC中离子信号的读出。这种芯片可以实现较高的电荷收集效率以及优秀的能量分辨率。 $^{82}\text{Se}$ 的 $Q_{\beta\beta}$ 值高达2.99 MeV，该能区内基本不存在天然辐射本底，同时利用TPC技术还能够重建粒子的径迹信息以进一步压低本底。目前NvDEX合作组正着手建设100 kg量级的气体 $\text{SeF}_6$ 的NvDEX-100实验，预计2025年之前在CJPL建设完毕，预期半衰期灵敏度可达 $4 \times 10^{25}$ 年。未来实验的量级将增加到1吨 $^{82}\text{Se}$ 同位素，用5年的实验时间达到 $10^{28}$ 年量级的半衰期灵敏度。

#### 4.6 JUNO无中微子双贝塔衰变实验计划

江门中微子观测站(JUNO)是由中国科学院高能物理所领导的具有多个实验目标的大型中微子实验站。合作组将在广东江门的山体建设一个位于地下700米，有效质量可达两万吨的液体闪烁体探测器，1 MeV处预计能量分辨率可以达到3%。JUNO的主要实验目的是确定中微子质量顺序、精确测量中微子混合参数，除此之外还将研究大气中微子、太阳中微子、超新星中微子、地球中微子等多项物理目标。江门中微子实验2015年开始建设，预计2024年底开始运行测试。JUNO合作组也计划在其主要物理目标完成之后开展无中微子双贝塔衰变实验，基本方案是将溶解有富集氙气的液体闪烁体填入一个气球中并放置在JUNO巨大球形液体闪烁体探测器的中心。经预测，如果使用有效质量为5吨的 $^{136}\text{Xe}$ ，JUNO可以在5年的实验时间内实现 $5.6 \times 10^{27}$ 年的半衰期灵敏度，达到世界领先水平<sup>[35]</sup>。除此之外，其他可能的同位素，如自然丰度更高的 $^{130}\text{Te}$ 也在JUNO合作组的备选方案之内<sup>[36]</sup>。

## 5 总结与展望

无中微子双贝塔衰变是超出粒子物理标准模型的十分稀有的物理事例，目前备受关注的与中微子基本性质相关的问题，诸如中微子的质量起

源、中微子质量层级的正反排序、轻子数是否守恒等都可以通过无中微子双贝塔衰变实验得到解答。 $0\nu\beta\beta$ 事例的成功观测将会产生十分重大的科学意义，轻子数不守恒、中微子的马约拉纳属性等前沿问题都将得到验证。目前的实验对 $0\nu\beta\beta$ 半衰期的限制可以达到 $10^{26}$ 年的量级，对应的马约拉纳中微子质量可以达到几十个meV。未来的无中微子双贝塔衰变实验要将探测器的灵敏度提高到 $10^{28}$ 年量级，将马约拉纳中微子质量压低到十几个meV以下，完全覆盖中微子反质量顺序下可能的参数空间。这对理论和实验方向的研究都是极大的挑战：理论方面，目前基于不同近似模型计算出的核矩阵元 $M^{0\nu}$ 之间有2—3倍的差异，还需要更精确的计算结果来进一步降低不确定度；实验方面，为了达到上述灵敏度需要搭建更大的吨级规模的探测器，同时也需要通过技术手段进一步降低本底。目前日本、美国以及欧洲已经有多个无中微子双贝塔衰变实验大型合作组，并分别制定了未来的实验计划，把现有的中微子有效

质量( $m_{\beta\beta}$ )的灵敏度提升一个数量级，在发现无中微子双贝塔衰变新物理的征途上迈出一大步。

目前国内的无中微子双贝塔衰变实验与国际领先水平还有一定差距，而基于锦屏地下实验室二期的“极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施”的建成能够极大地推动国内 $0\nu\beta\beta$ 实验的发展。作为国家重大前沿科学研究的地下实验平台，CJPL二期能够提供一个实验空间大、辐射本底低、配套设施完善的优秀实验环境。目前已有CDEX、PandaX在内的多个合作组基于不同的技术手段提出了自己的实验计划，将在锦屏地下实验室二期建设开展。相信在不久的将来，我国也能成功建成吨级的 $0\nu\beta\beta$ 实验，达到国际领先的实验水平。

**致谢** 感谢杨丽桃老师对本文的审阅以及提出的修改建议。感谢CJPL工作人员对CDEX、PandaX等实验项目的支持。CJPL由清华大学和雅砻江流域水电开发有限公司联合建设和运行。

## 参考文献

- [1] Fermi E. Ric. Scientifica, 1933, 4:491
- [2] Fermi E. Nuovo Cim., 1934, 11: 1
- [3] Fermi E. Z. Phys., 1934, 88: 161
- [4] Goepfert M. Phys. Rev., 1935, 48:512
- [5] Majorana E. Nuovo Cim., 1937, 14: 171
- [6] Furry W H. Phys. Rev., 1939, 56:1184
- [7] Schechter J, Valle J W F. Phys. Rev. D, 1982, 25: 774
- [8] Racah G. Nuovo Cim., 1937, 14:322
- [9] Fukuda Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81:1158
- [10] Ahmad Q R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 89:011302
- [11] Bracco A. Nuclear Physics News, 2017, 27(3):3
- [12] Dodge G E. Nuclear Physics News, 2024, 34(1):3
- [13] Masaru D *et al.* Prog. Theor. Phys., 1981, 66(5): 1739
- [14] Masaru D *et al.* Prog. Theor. Phys., 1981, 66(5): 1765
- [15] 中国科学院. 中国科学发展战略·无中微子双贝塔衰变实验. 北京:科学出版社, 2020
- [16] Agostini M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 125:252502
- [17] Arnquist L J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 130:062501
- [18] Anton G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123: 161802
- [19] Abe S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 130:051801
- [20] The CUORE Collaboration. Nature, 2022, 604:53
- [21] Roger G H. Searching for  $0\nu\beta\beta$  Decay with CUORE and CUPID. University of California, 2021
- [22] Asakura K *et al.* AIP Conf. Proc., 2015, 1666:170003
- [23] Gando A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 117:082503
- [24] KamLAND-Zen Collaboration. Phys.: Conf. Ser., 2017, 888: 012031
- [25] Adhikari G *et al.* J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2022, 49:015140
- [26] Renner J, Díaz López G *et al.* J. High Energ. Phys., 2019, 2019: 230
- [27] Martín-Albo J, Muñoz Vidal J *et al.* J. High Energ. Phys., 2016, 2016: 159
- [28] Álvarez V *et al.* JINST, 2013, 8:T05002
- [29] Miloradovic M. Calibration, Background Study, and Search for New Physics with the GERDA Experiment. Universität Zürich, 2020
- [30] Cheng J P *et al.* Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 2017, 67:231
- [31] Wang L, Yue Q, Kang K *et al.* Sci. China Phys. Mech. Astron., 2017, 60:071011
- [32] Ma H, Dai W H, Yang L T. Proceeding of Science, 2023, TAUP2023:200
- [33] Ni K X *et al.* Chin. Phys. C, 2019, 43:113001
- [34] An M M *et al.* Nucl. Instrum. Meth. A, 2016, 810:144
- [35] Zhao J, Wen L J, Wang Y F *et al.* Chin. Phys. C, 2017, 41(5): 053001
- [36] Cao J *et al.* Chin. Phys. C, 2020, 44(3):031001