



# 锦屏无中微子双贝塔衰变低温晶体量热器实验

曹嘉璇<sup>1</sup>, 曹喜光<sup>2</sup>, 陈昊<sup>1\*</sup>, 陈红兵<sup>3</sup>, 陈金辉<sup>1</sup>, 陈良<sup>4</sup>, 陈伟<sup>1</sup>, 程建平<sup>5</sup>, 段德勇<sup>6</sup>, 方德清<sup>1</sup>, 符士洪<sup>1</sup>, 付颖<sup>7</sup>, 韩柯<sup>8</sup>, 何万兵<sup>1</sup>, 黄焕中<sup>1\*</sup>, 李毅<sup>6</sup>, 李玉兰<sup>9</sup>, 李正伟<sup>7</sup>, 刘聪展<sup>7</sup>, 刘圆圆<sup>5</sup>, 刘舟慧<sup>7</sup>, 马继飞<sup>9</sup>, 马龙<sup>1\*</sup>, 马余刚<sup>1</sup>, 潘尚可<sup>3</sup>, 彭海平<sup>6</sup>, 唐晓星<sup>9</sup>, 王宇<sup>5</sup>, 谢芳<sup>1</sup>, 熊巍<sup>4</sup>, 许咨宗<sup>6</sup>, 薛明萱<sup>6\*</sup>, 杨俊峰<sup>6</sup>, 虞晓宙<sup>1</sup>, 袁晖<sup>4</sup>, 曾鸣<sup>10</sup>, 曾志<sup>10</sup>, 张建杰<sup>5</sup>, 张梦弦<sup>7</sup>, 张翼飞<sup>7</sup>, 赵康康<sup>6</sup>, 朱勇<sup>4</sup>

1. 复旦大学核物理与离子束应用教育部重点实验室, 上海 200433

2. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210

3. 宁波大学材料科学与化学工程学院, 宁波 315211

4. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050

5. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100091

6. 中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026

7. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

8. 上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240

9. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800

10. 清华大学工程物理系, 北京 100084

\*联系人, 陈昊, E-mail: [chenhao\\_fd@fudan.edu.cn](mailto:chenhao_fd@fudan.edu.cn); 黄焕中, E-mail: [huanzhonghuang@fudan.edu.cn](mailto:huanzhonghuang@fudan.edu.cn); 马龙, E-mail: [malong@fudan.edu.cn](mailto:malong@fudan.edu.cn); 薛明萱: E-mail: [xuexm@ustc.edu.cn](mailto:xuexm@ustc.edu.cn)

收稿日期: 2024-10-08; 接受日期: 2024-12-04; 网络出版日期: 2025-05-13

国家重点研发计划(编号: 2022YFA1604702, 2023YFA1607203)资助项目

**摘要** 中微子的马约拉纳粒子属性是超出粒子物理标准模型的新物理, 是粒子物理与核物理研究领域最重要的科学问题之一。无中微子双贝塔衰变( $0\nu\beta\beta$ )实验是当前确定中微子是否是其自身反粒子的最直接途径, 对揭示中微子绝对质量大小、可能存在的轻子数破缺过程、物质-反物质不对称等一系列自然奥秘至关重要。低温晶体量热器技术是新一代 $0\nu\beta\beta$ 实验极具竞争力的探测器技术方案之一。它具有高能量分辨率、高运行稳定性等技术优势, 且具有一定本底甄别能力。本文主要介绍国内外低温晶体量热器无中微子双贝塔衰变研究现状、趋势和挑战, 着重介绍中国钼基低温晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 实验(CUPID-CJPL)技术研发进展, 展望基于我国锦屏地下实验室开展低温晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 实验物理研究的前景。

**关键词** 低温晶体量热器, 无中微子双贝塔衰变, 中国锦屏地下实验室

**PACS:** 23.40.-s, 23.40.Bw, 07.57.-c, 07.57.Kp

**引用格式:** 曹嘉璇, 曹喜光, 陈昊, 等. 锦屏无中微子双贝塔衰变低温晶体量热器实验. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 111009

Cao J, Cao X, Chen H, et al. Jinping bolometric double beta decay experiment (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 111009, doi: [10.1360/SSPMA-2024-0448](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0448)

## 1 引言

中微子基本性质是当前国际粒子物理研究的前沿与热点. 20世纪末, 中微子振荡现象的发现确切地证实了中微子具有非零质量, 这一特性超出了标准模型. 中微子有质量这一特性使得中微子的手征变换成为了可能. 此外, 中微子是马约拉纳粒子还是狄拉克粒子, 即中微子是否是自身的反粒子这一问题对于揭示中微子基本对称性以及宇宙物质-反物质不对称起源至关重要. 无中微子双贝塔衰变( $0\nu\beta\beta$ )实验是当前研究中微子马约拉纳特性最直接的方法. 对于普通双贝塔衰变( $2\nu\beta\beta$ )过程, 质量数为 $A$ , 电荷数为 $Z$ 的原子核发生一次普通双贝塔衰变的形式为 $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + e^- + e^- + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_e$ . 而无中微子双贝塔衰变中仅有两个电子而没有中微子的末态反应, 实际反应过程为 $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + e^- + e^-$ . 如果在实验中发现了 $0\nu\beta\beta$ 稀有衰变, 就可以证明中微子是其自身的反粒子, 同时这样的过程也打破轻子数守恒, 这将是极大超出标准模型的崭新物理, 为基本粒子物理带来革命性的影响<sup>[1-3]</sup>.

因此, 实验探测 $0\nu\beta\beta$ 已经成为国际上多个地下实验室粒子物理与核物理领域的重要科学目标之一. 目前已经有11种核素会产生 $2\nu\beta\beta$ ,  $0\nu\beta\beta$ 探测实验上通过测量其中某一种核素发生双贝塔衰变过程末态电子的能量沉积寻找稀有 $0\nu\beta\beta$ 衰变过程. 普通双贝塔衰变事件由于末态伴随两个中微子的产生, 能量沉积将形成一个连续的能谱, 而 $0\nu\beta\beta$ 过程由于没有中微子带走能量, 其产生的能量将完全沉积, 在核反应的阈值( $Q_{\beta\beta}$ )附近形成一个尖峰.

国际上发展 $0\nu\beta\beta$ 实验采用的探测器技术包括高纯锗(代表实验包括GERDA、MAJORANA)、液氙时间投影室(EXO-200)、液闪探测器(KamLAND-Zen、SNO+)、低温晶体量热器(CUORE)、高压气体时间投影室(NEXT-100)等<sup>[4-8]</sup>. 基于过去几十年探测器技术的研发突破, 多种技术在实验灵敏度方面不断提升, 取得了一系列重要成果, 为发展新一代大型 $0\nu\beta\beta$ 探测实验建立基础.

对于 $0\nu\beta\beta$ 实验, 在有限本底情形下, 探测灵敏度(以 $0\nu\beta\beta$ 半衰期表征)满足关系:

$$S(T_{1/2}^{0\nu}) \propto a \cdot \varepsilon \sqrt{\frac{M \cdot t}{b \cdot \delta E}}, \quad (1)$$

其中,  $a$ 为同位素丰度,  $\varepsilon$ 为探测效率,  $M$ 为探测器的靶

质量,  $t$ 为测量时间,  $b$ 为本底水平,  $\delta E$ 为能量分辨率. 目前国际上基于不同技术方案的大型实验的半衰期测量灵敏度均达到 $10^{25}$ 年以上, 尚未发现无中微子双贝塔衰变迹象.

量热器通过测量辐射在装置中产生的热量来探索辐射的性质, 在粒子物理与天文学中有广泛应用. 室温工作的量热器最早在1878年由Langley<sup>[9]</sup>发明, 当时用于测量宇生红外线. Andrews等人则利用氮化铌微条量热器在低温超导状态下对低能量沉积十分灵敏这一优势, 实现了对单个 $\alpha$ 粒子的探测<sup>[10]</sup>. 在天文学研究中, 掺杂锗半导体<sup>[11]</sup>及其他低温量热器在灵敏度和体量上的发展使其成为测量宇宙微波背景的重要手段. 而低温量热器在双贝塔衰变中的应用始于1984年Fiorini和Niinikoski的工作<sup>[12]</sup>, 并成为探测无中微子双贝塔衰变最有希望的技术之一. 当前的研究前沿进一步把传统晶体量热器发展为新一代的低温闪烁晶体量热器, 通过荧光-声子(热)两相信号读出实现本底甄别, 极大压低测量本底, 实现高灵敏度探测.

$0\nu\beta\beta$ 是极其稀有的事件, 需要极低辐射环境以较好地甄别真实衰变信号, 把真实信号和实验本底彻底地区分. 低本底环境是开展无中微子双贝塔实验至关重要的保障. 由于地面宇宙线通量大, 造成大量的宇生本底, 实验装置通常会放置在极深的地下实验室中, 降低宇宙射线的干扰. 中国锦屏地下实验室(CJPL)是目前世界上最深、容积最大、宇宙线通量最低的地下实验室, 是开展低温晶体量热无中微子双贝塔衰变实验的国际领先的平台基础.

## 2 低温晶体量热技术

低温晶体量热器(图1)在探测无中微子双贝塔衰变中具有几方面的优势. 首先, 作为探测对象的核素可以是晶体的一部分, 如二氧化碲中的 $^{130}\text{Te}$ , 钼酸锂晶体中的 $^{100}\text{Mo}$ 等, 这样核素产生的衰变直接发生在用于探测的晶体内部, 保证了非常高的探测效率. 其次, 低温晶体量热技术天然在核素选择上具有灵活性, 可以在这个技术平台中含有不同核素的不同晶体进行探测实验从而达到对不同核素开展测量的目的. 同时, 通过优化超纯晶体制备和加工工艺减少杂质, 低温晶体量热器具有稳定的探测性能、较高的能量分辨和极低的本底.

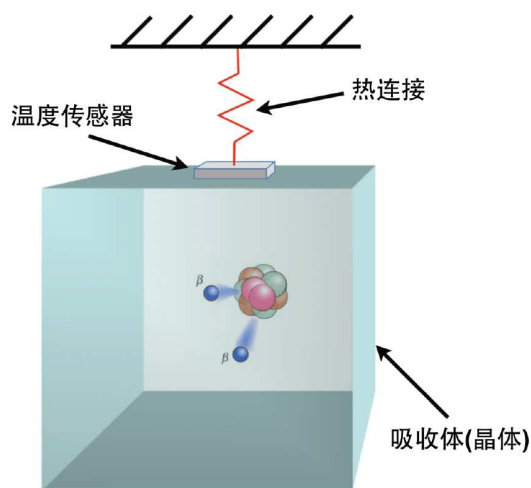


图 1 传统低温晶体量热器结构示意图

Figure 1 Conceptual design of a traditional crystal bolometer.

一个典型的低温晶体量热器探测单元主要由三个部分组成: (1) 晶体, 既作为衰变源又作为能量吸收体; (2) 量热计, 用来测量晶体的温度变化, 通常采用NTD (Neutron Transmutation Doped) 锗热敏电阻计或TES (Transition-Edge Sensor) 超导转变边沿传感器; (3) 热连接, 可采用铜框架和聚四氟乙烯(PTFE)材料固定晶体形成弱热连接, 实现每次能量沉积事件后晶体的温度恢复到基准温度。

当有粒子(如双贝塔衰变产生的电子)在晶体中沉积能量 $\Delta E$ 时, 晶体的温度变化为 $\Delta T = \Delta E / C$ ,  $C$ 为晶体热容。低温量热器一般将晶体温度变化作为信号(图2), 热容越小, 同样的沉积能量给出的信号幅值就越大。当晶体的实际温度远低于晶体对应的德拜温度时, 德拜模型可用于描述晶体在低温下的热容, 近似为

$$C(T) = N_A \cdot k_B \cdot \frac{m}{M} \cdot \frac{12\pi^4}{5} \cdot \left( \frac{T}{T_D} \right)^3, \quad (2)$$

其中,  $C(T)$ 为晶体热容( $\text{J K}^{-1}$ ),  $N_A$ 是阿伏伽德罗常数,  $k_B$ 是玻尔兹曼常数( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ),  $m$ 是晶体质量,  $M$ 是晶体核素摩尔质量,  $T_D$ 是晶体的特征德拜温度。粒子物理与核物理的探测中沉积能量一般极小, 但根据公式(2), 将晶体冷却至低温时, 正比于温度三次方的晶体热容迅速减小, 在极低温时, 极小的沉积能量可以转化成较大的可测量的温度变化。这是低温量热器技术在低能测量中的重要优势。

在目前世界范围内运行的 $0\nu\beta\beta$ 实验当中, 意大利

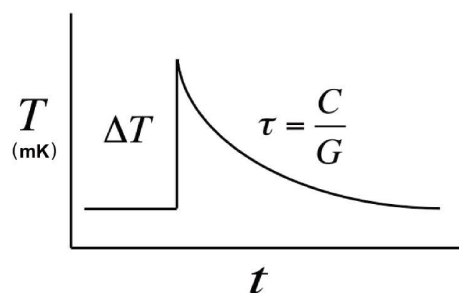
图 2 典型的晶体温升信号脉冲波形示意图<sup>[13]</sup>

Figure 2 Typical signal pulse shape of a typical bolometer module [13].

的CUORE项目是国际上规模最大、最为领先的低温晶体量热无中微子双贝塔衰变实验<sup>[10-12,14-17]</sup>。COURE合作组由39个欧洲单位、28个美国单位和5个中国合作单位参与。CUORE实验使用了741 kg的高纯度天然 $\text{TeO}_2$ 晶体, 其中双贝塔衰变的 $^{130}\text{Te}$ 的天然同位素丰度高达34.2%。CUORE经历了近30年的技术发展, 开展了包括MiDBD, CUORICINO, CUORE-0等一系列低温晶体样机实验, 从最初质量仅为6 g的小尺寸测试晶体发展为近1 t的当前世界上最大的晶体量热器装置, 实现了探测器体积与灵敏度数量级的飞跃。目前CUORE探测器由19个晶体阵列, 988个紧凑排列的741 kg极高纯度的 $\text{TeO}_2$ 晶体组成。CUORE实验使用的所有 $\text{TeO}_2$ 晶体均由中国科学院上海硅酸盐研究所提供, 其中 $^{130}\text{Te}$ 含量达206 kg。

CUORE设计并建造了世界上最大的低温恒温器装置, 将19个晶体阵列冷却至 $\sim 10 \text{ mK}$ , 保证近千块晶体量热器稳定运行。CUORE于2017年初正式开始采集数据, 目前已经积累近3吨年曝光量数据。虽然目前的数据还没有足够迹象表明 $0\nu\beta\beta$ 能够发生, 但是取得了 $^{130}\text{Te}$ 无中微子双贝塔衰变的半衰期的迄今最好限制 $T_{1/2} > 3.2 \times 10^{25} \text{ yr}$  (90% C.L.), 对应中微子有效质量 $m_{\beta\beta} < 75\text{--}350 \text{ meV}$ <sup>[14,15]</sup>。

新一代 $0\nu\beta\beta$ 实验的科学目标是在灵敏度上进一步提升, 实现对中微子马约拉纳有效质量反序区间的全覆盖。目前CUORE实验信号区间本底计数率约为 $0.01 \text{ cts}/(\text{keV kg yr})$ , 主要来源于探测器临近材料的 $\alpha$ 放射性杂质。

CUPID (CUORE Upgrade with Particle IDentification) 实验技术是在CUORE基础上发展出来的新型晶体量热实验技术(图3), 在声子信号读出基础上通过



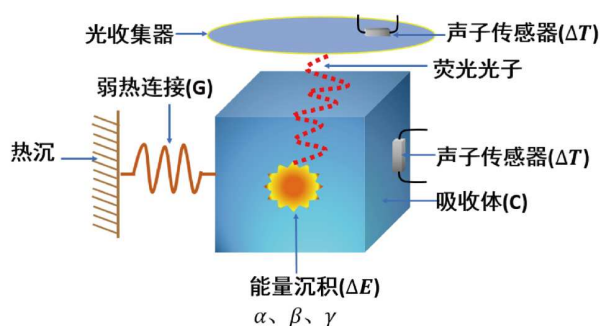


图3 新一代低温闪烁晶体量热器单元结构示意图

Figure 3 Conceptual plot of the new generation scintillating cryogenic bolometer.

增加光信号读出, 通过符合测量光信号和热声子信号对事件的粒子类型加以区分, 甄别 $\alpha$ 本底事件, 实现 $\alpha$ 本底水平数量级压低, 提高实验灵敏度<sup>[16–18]</sup>.

图4显示了CUPID技术中的光-热两相读出符合测量示意图. 处在上方对角线斜带的事件是来自电子反冲型 $\beta/\gamma$ 事件; 晶体自身内部痕量放射性核素引起的 $\alpha$ 衰变事件处在另一结构, 由于 $\alpha$ 粒子荧光猝灭效应, 产生的荧光信号非常小. 可通过光热符合测量甄别和抑制本底中的 $\alpha$ 粒子事件. 探测器单元除了闪烁晶体外, 还设置有锗光探测器. 光-热双读出技术预期能够实现99.9%以上的本底 $\alpha$ 粒子甄别. 近年来, 国际上基于光-热双读出的低温晶体量热器实验技术取得了极大进展, 发展了CUPID-0, CUPID-Mo等一系列样机实验, 充分验证了其技术优势<sup>[19–23]</sup>.

此外, 韩国的AMoRE实验是另一个新型晶体量热实验, 同样使用光-热双读出技术. AMoRE目前已经完成了AMoRE-Pilot和AMoRE-I的先期样机实验, 并在计划下一阶段更大规模的运行<sup>[24]</sup>.

### 3 锦屏钼基低温晶体量热无中微子双贝塔衰变实验

无中微子双贝塔衰变是极其稀有的物理事件, 实验上寻找该过程极具挑战. 除了装置本身的灵敏度外, 对实验的环境也提出了极其苛刻的要求. 由于宇生本底是实验重要的本底之一. 经过千米岩石埋深的地下实验室是理想和必要条件. 深地实验室可以提供独有的低宇宙线通量、优良的低本底环境. 目前, 欧美各发达国家和地区都纷纷提出了地下实验室设施的升级和新建计划, 部署多个无中微子双贝塔衰变实验. 中国

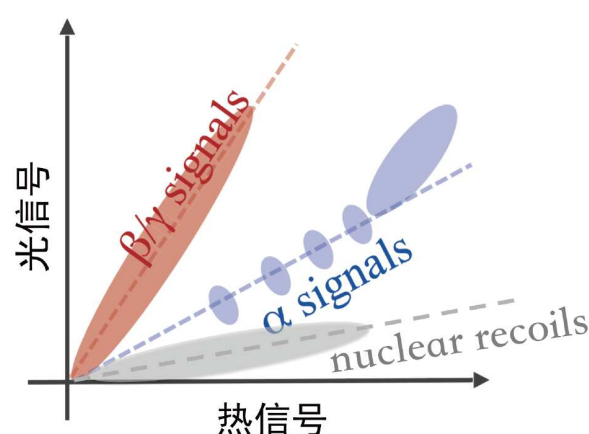


图4 光-热双读出符合测量示意图. 其中红色区域为 $\beta/\gamma$ 能量沉积事件, 蓝色区域为 $\alpha$ 粒子事件, 灰色区域核反冲事件

Figure 4 Light-heat dual readout. The red, blue and grey shaded areas represent  $\beta/\gamma$ ,  $\alpha$  and nuclear recoil events, respectively.

锦屏地下实验室是世界上最深的地下实验室, 拥有世界上最厚的天然岩石屏障, 垂直岩石厚度达到2400 m, 宇宙线缪子通量仅为62 cts/(m<sup>2</sup> yr), 为地表水平的一亿分之一, 是目前世界上宇宙线通量最低的地下实验室<sup>[25]</sup>. 超低宇宙线本底的实验环境为无中微子双贝塔衰变研究提供了极好的场所.

2017年由复旦大学牵头联合国内多家单位成立CUPID-China合作组, 依托中国锦屏地下实验室的有利条件研发新一代基于<sup>100</sup>Mo核素的无中微子双贝塔衰变低温晶体量热器技术, 为建立新型钼基低温晶体量热器实验CUPID-CJPL, 开展低本底、高灵敏度无中微子双贝塔衰变搜索实验建立基础<sup>[26,27]</sup>.

由于自然放射性本底通常集中在较低的能区. 理想同位素的 $Q_{\beta\beta}$ 值应高于材料中的一个重要的自然放射性本底——来自<sup>232</sup>Th衰变链的<sup>208</sup>Tl发出的能量为2615 keV的伽马射线, 远离自然本底集中区.

CUPID-CJPL基于 $0\nu\beta\beta$ 理论能量阈值较高的核素<sup>100</sup>Mo ( $Q_{\beta\beta}\sim 3034$  keV)研发闪烁晶体量热器系统. 表1列出和比较了新一代实验考虑的不同双贝塔衰变核素 $Q_{\beta\beta}$ 值和天然丰度, 可以发现<sup>100</sup>Mo兼具 $Q_{\beta\beta}$ 值和天然丰度较高的特点.

CUPID-CJPL探测器模块设计在保证热稳定性的同时减少支撑材料总体质量和覆盖总体表面积, 设计如图5所示. 晶体固定连接在低放射性铜支架作为热传导装置, 在能量沉积事件发生后能够快速恢复基准温度. 晶体表面耦合温度传感器为NTD-Ge锗热敏电

表 1 不同双贝塔衰变核素 $Q_{\beta\beta}$ 值和天然丰度比较

Table 1 List of double beta decay isotopes and their natural abundance

| 核素                | $Q_{\beta\beta}$ 值 | 天然丰度 (%) |
|-------------------|--------------------|----------|
| $^{76}\text{Ge}$  | 2039               | 7.6      |
| $^{136}\text{Xe}$ | 2458               | 8.9      |
| $^{130}\text{Te}$ | 2527               | 34.2     |
| $^{82}\text{Se}$  | 2996               | 8.7      |
| $^{100}\text{Mo}$ | 3034               | 9.6      |
| $^{150}\text{Nd}$ | 3371               | 5.6      |

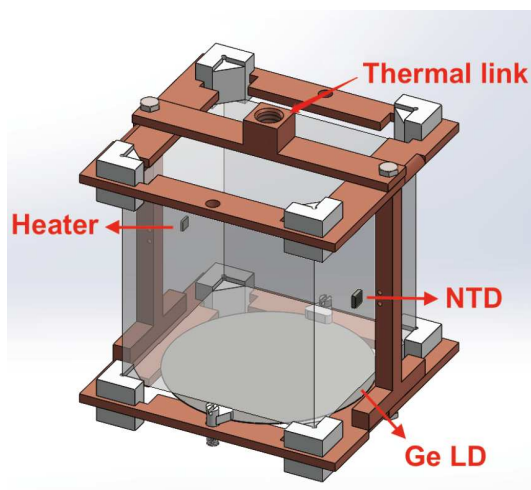


图 5 CUPID-CJPL量热器模块设计图

Figure 5 CUPID-CJPL module design.

阻计, 底部贴近晶体表面装有高纯锗光探测器耦合 NTD-Ge或TES传感器芯片, 可实现荧光信号读出. 加热器可以固定功率固定时间周期输入模拟信号, 定标基线位置. 温度传感器用环氧树脂固定于晶体表面. 样机实验将由多个晶体阵列组成, 探测器整体置于超低温、超低本底恒温器内(图6).

近年来CUPID-China合作组围绕新一代钼基低温晶体量热技术开展研发, 在以下方面取得进展.

### 3.1 低温技术

低温晶体量热器运行需要稳定的mK量级低温环境, 低温平台是晶体量热实验的重要部分.

晶体材料的比热随着温度的降低而降低, 晶体的工作温度越低, 相同能量沉积所产生的温升就越高, 探测器测量的灵敏度就越高, 但与此同时温度的稳定性控制也就越难.

合作组围绕晶体最低工作温度、低温稳定性、辐

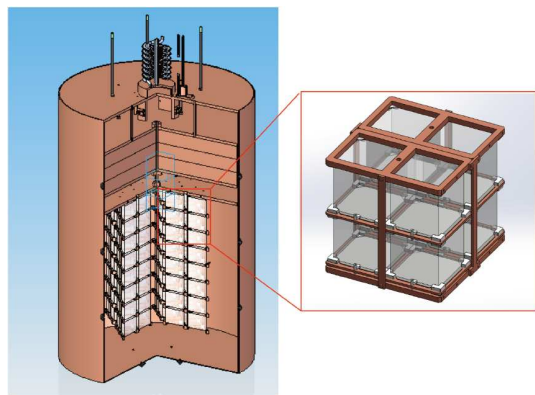


图 6 CUPID-CJPL样机实验示意图

Figure 6 Conceptual design of the CUPID-CJPL demonstration experiment.

射屏蔽开展系列研发工作. 低温晶体量热器实验使用稀释制冷技术实现降温. 整个低温系统由稀释制冷机、脉管制冷机、温度监控系统、运行控制系统、深冷读出系统、低温承重装置组成. 以稀释制冷机混合腔为核心, 分为10 mK、500 mK、4 K、50 K、300 K (室温)多级温区. 地面晶体测试低温平台基于商业化和定制化的低温系统, 采用超低本底无氧铜制备恒温器腔体, 内部可挂载本底屏蔽装置. 测试运行已实现最低7.9 mK低温和0.1 mK温度稳定性.

### 3.2 低本底技术

降低实验本底背景是提升测量灵敏度的一个重要目标, 对发展新一代实验测量有着重要的意义. CUORE等大型实验近30年研究表明晶体阵列邻近结构材料和晶体表面放射性都是本底的主要来源. 合作组针对理想的无中微子双贝塔衰变核素晶体探测器实验中不同的放射性本底来源开展材料放射性检测. 基于高精度 ICP-MS和高纯锗谱仪检测结果, 评估材料主要放射性杂质及含量. 筛选低本底材料作为探测器阵列结构材料, 减少探测器邻近区域材料表面放射性对于 $0\nu\beta\beta$ 信号区间的贡献, 确保晶体、读出线材、PTFE支架等不引入高于实验室本底环境的放射性杂质. 已开展多批次样品放射性本底检测, 晶体原料、晶体及无氧铜等屏蔽材料Th, U, K等痕量元素的测量, 完成多批次国产晶体Th/U含量评估.

来自探测器系统和实验室环境中的放射性本底也是探测 $0\nu\beta\beta$ 事件背景的主要来源, 有效地屏蔽放射性背景对于提升测量灵敏度至关重要. 屏蔽系统是无中

微子双贝塔衰变实验系统的重要组成部分, 对材料和结构有着非常苛刻的要求, 除了能够阻挡来自实验环境和实验装置本身的辐射本底, 其设计还需和极低温系统紧密结合. CUPID-China综合国际上现有实验设计特点, 依据锦屏地下实验室实测本底水平, 结合蒙特卡罗模拟优化设计伽马、中子屏蔽系统, 降低环境中的放射性本底背景对于探测信号区间的贡献<sup>[28]</sup>.

计划中的屏蔽系统由从外到内的多级屏蔽体组成. 低温平台最外层屏蔽体材料选用5%含硼聚乙烯, 用来阻挡地下实验室环境中来自岩石和混凝土的<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th及其衰变产物所产生的高能中子. 中间层采用高纯低本底无氧铜, 阻挡来自制冷机支架及环境中的放射性. 恒温器内部挂载无氧铜屏蔽, 设置在核心10 mK温区, 包括圆柱形铜屏蔽体和环形屏蔽体, 保证了屏蔽结构的完整性, 采用高纯低本底无氧铜, 厚度约为12 cm, 重约200 kg, 能够有效阻挡来自顶部制冷机系统的伽马放射性.

### 3.3 晶体研发

晶体量热器实验的核心部件是高纯 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体.  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体为氧化物晶体, 熔点低(仅为705°C), 不易造成成分偏析. 合作组开展高纯晶体研发, 同时探索比较提拉法和坩埚下降法晶体生长技术, 提拉法采用 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 和 $\text{Mo}_2\text{O}_3$ 粉体的固相反应获得高纯原料, 下降法利用方形铂金坩埚, 通过多坩埚下降生长技术, 降低制备成本. 合作组充分发挥在高质量晶体制备方面的技术优势, 重点开展 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体生长工艺研究. 在高纯多晶料合成、大尺寸 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体生长及加工工艺、 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体在量热器上的应用及其生长改进方面取得进展. 成功制备4.5 cm×4.5 cm×4.5 cm大尺寸晶体, 光学性能和本底水平达到国际领先水平. 同时, 利用自然丰度原料定标化学计量组成多晶料的制备方法, 探索实现多晶料深度提纯的重结晶工艺, 研究适应于相应材料物性特点的晶体生长工艺, 配合探测器的研制开展晶体元件加工方法研究.

<sup>100</sup>Mo的自然丰度仅为9.6%, 需要同位素富集才能最大程度发挥晶体低温量热器的优势. 因此, 在天然丰度 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 高纯晶体研发基础上, 合作组重点开展富集<sup>100</sup>Mo高纯晶体的生长, 通过富集同位素原料生长高纯度、超低本底、大尺寸钼酸锂晶体(图7). 目前已购置千克量级富集原料开展晶体制备, 同时在过程中探

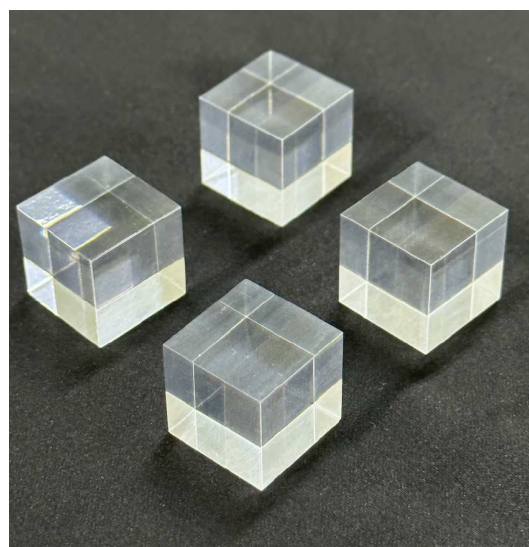


图7 高纯低本底钼酸锂晶体

Figure 7 High purity low background lithium molybdate crystal.

索富集<sup>100</sup>Mo原料高效回收利用技术.

控制本底水平是 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 高纯晶体研制的重要任务之一. 降低晶体中的U、Th、K等放射性杂质含量对于保障实验灵敏度至关重要. 在晶体制备的同时, 合作组基于高精度ICP-MS对 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体及所使用原料中的杂质元素开展检测评估, 为优化晶体制备不断提供参考.

### 3.4 晶体测试

合作组在地面实验室系统性地开展了国产钼酸锂闪烁晶体的模块化测试. 基于边长为2 cm和1 cm的立方晶体设计并组装光-热双读出量热器, 在mK深冷低温环境下调运行, 获得热(声子)信号读出, 同时获得光探测器对宇宙线的信号响应. 通过<sup>22</sup>Na放射源等进行能量刻度评估量热器性能. 图8为地面测试 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ 晶体设计制作的量热器装置及低温测试系统.

环境中的振动能够耦合探测器系统引起热涨落, 除了导致探测器能量分辨率变差, 还会影响基线噪声, 对热声子信号识别造成干扰. 因此, 我们同时研究了振动噪声对探测器热声子信号采集性能的影响, 设计搭建和测试了弹簧阻尼减振系统, 实现对百赫兹以下中低频振动的有效减振.

地下晶体测试计划采用富集<sup>100</sup>Mo的钼酸锂晶体(LMO)开展模块化测试. 10 kg量级的样机试验将充分





图 8 地面测试用晶体量热器模块(左图)和测试系统(右图)  
Figure 8 Bolometer module for ground test (left) and cryogenic system (right).

验证CUPID光-热双读出技术在锦屏低温晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 实验上的应用, 预期本底水平达到 $BI < 0.001$  cts/(keV kg yr). 中微子有效马约拉纳质量( $m_{\beta\beta}$ )与最轻中微子质量( $m_{\text{lightest}}$ )的关系如图9所示, 中微子马约拉纳有效质量测量结果通常用来表征实验灵敏度. 图中蓝色和灰色区域分别对应CUPID-CJPL 10 kg和1000 kg实验5年曝光量预期灵敏度. 综合考虑核矩阵元和相空间因子计算不确定性, 10 kg样机实验运行预期灵敏度将达到或优于目前CUORE的实验水平. 下一代吨量级实验有望进一步降低本底水平, 达到0.0001 cts/(keV kg yr), 灵敏度覆盖中微子有效质量反序区间.

## 4 总结和展望

新一代无中微子双贝塔衰变实验的主要科学目标是将当前无中微子双贝塔衰变搜索灵敏度提升一个数量级, 覆盖整个中微子质量反序假设所对应的马约拉纳有效质量区域. 也就是说, 如果中微子是马约拉纳粒子且质量满足反向排序或处于正向排序的简并区间, 新一代实验将有望发现无中微子双贝塔衰变, 确定中微子的马约拉纳属性, 取得超出粒子物理标准模型的重大科学突破.

CUPID-CJPL是依托锦屏地下实验室发展的新一代基于 $^{100}\text{Mo}$ 高 $Q_{\beta\beta}$ 值核素的低温晶体量热无中微子双贝塔衰变探测实验. 低温晶体量热器技术相比其他探测技术性价比优越, 且具备拓展应用于不同双贝塔衰

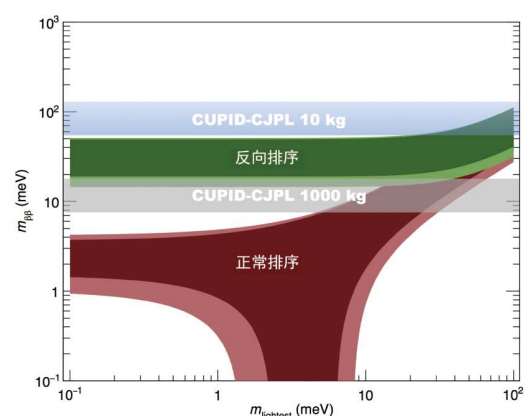


图 9 CUPID-CJPL实验灵敏度预测(5年曝光量)  
Figure 9 Prediction for the CUPID-CJPL sensitivity (5 year exposure).

变核素的能力, 可充分利用国内合作组在材料提纯、晶体制备, 特别是在高纯、低本底晶体研制方向的国际领先技术优势, 是符合锦屏地下实验室战略发展规划, 同时具备核心竞争力的实验技术方案.

CUPID-China合作组近年来在高纯晶体制备, 放射性本底检测, 量热器模块化测试方面取得一系列进展, 在晶体探测材料研发上居于国际领先水平. 拟进一步开展基于中子嬗变掺杂锗热敏电阻NTD-Ge和超导转变边沿传感器TES读出的光探测器技术研发, 目标为提高光吸收效率、光采集效率, 提升光-热双读出本底粒子甄别能力. 同时, 计划在高荧光产额掺杂晶体制备、探测器阵列设计、低噪声读出电子学方面进一步开展研发.

当前国际最深、容积最大的中国锦屏极深地下实验室已完成二期建设, 建立完善极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施. CUPID-CJPL计划在中国锦屏地下实验室建立和运行样机实验, 充分检验技术. 在样机实验基础上, 结合国内合作组在晶体生长技术和锦屏实验室低宇生本底环境优势, 吸引国际合作, 发展新一代吨量级大质量超低本底无中微子双贝塔衰变晶体探测实验, 实现国际领先水平的探测灵敏度, 推动我国粒子物理与核物理前沿科学研究.

致谢 感谢中国原子能科学研究院张焕乔老师多年来在推动中国发展无中微子双贝塔衰变研究的不懈努力. 也感谢CUORE和CUPID合作组的国际同行多年的精诚合作!

## 参考文献

- 1 Mohapatra R N, Antusch S, Babu K S, et al. Theory of neutrinos: A white paper. *Rep Prog Phys*, 2007, 70: 1757–1867
- 2 Päs H, Rodejohann W. CUORE Collaboration Neutrinoless double beta decay. *New J Phys*, 2015, 17: 115010
- 3 Alduino C, Alessandria F, Alfonso K, et al. First results from CUORE: A search for lepton number violation via  $0\nu\beta\beta$  decay of  $^{130}\text{Te}$ . *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 132501
- 4 Gando A, Gando I Y, Hachiya T H, et al. Search for majorana neutrinos near the inverted mass hierarchy region with KamLAND-Zen. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 082503
- 5 Agostini M, Bakalyarov A M, Balata M, et al. Improved limit on neutrinoless double- $\beta$  decay of  $^{76}\text{Ge}$  from GERDA phase II. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 132503
- 6 Albert J B, Auty D J, Barbeau P S, et al. Search for Majorana neutrinos with the first two years of EXO-200 data. *Nature*, 2014, 510: 229–234
- 7 The GERDA Collaboration. Background-free search for neutrinoless double- $\beta$  decay of  $^{76}\text{Ge}$  with GERDA. *Nature*, 2017, 544: 47
- 8 Alessandria F, Andreotti E, Ardito R, et al. CUORE crystal validation runs: Results on radioactive contamination and extrapolation to CUORE background. *Astropart Phys*, 2012, 35: 839–849
- 9 Langley S P. The bolometer and radiant energy. *Proc Am Acad Arts Sci*, 1880, 16: 342
- 10 Andrews D H, Fowler R D, Williams M C. The effect of alpha-particles on a superconductor. *Phys Rev*, 1949, 76: 154
- 11 Estermann I, Foner A. Magnetoresistance of germanium samples between 20° and 300°K. *Phys Rev*, 1950, 79: 365–372
- 12 Fiorini E, Niinikoski T O. Low-temperature calorimetry for rare decays. *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 1984, 224: 83–88
- 13 Ma L, Ma Y-G, Huang H-Z. Unraveling the Majorana mystery of neutrinos and anti-neutrinos—Cryogenic crystal bolometer technology for neutrinoless double beta decay experiments. *Physics*, 2021, 50: 183–192
- 14 Adams D Q, Alduino C, Alfonso K, et al. Measurement of the  $2\nu\beta\beta$  decay half-life of  $^{130}\text{Te}$  with CUORE. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 171801
- 15 Adams D Q, Alduino C, Alfonso K, et al. Search for Majorana neutrinos exploiting millikelvin cryogenics with CUORE. *Nature*, 2022, 604: 53–58
- 16 The CUPID Interest Group. CUPID pre-CDR. arXiv: [1907.09376](https://arxiv.org/abs/1907.09376)
- 17 The CUPID Interest Group. CUPID: CUORE (Cryogenic Underground Observatory for Rare Events) upgrade with particle identification. arXiv: [1504.03599](https://arxiv.org/abs/1504.03599)
- 18 The CUPID Interest Group. R&D towards CUPID (CUORE Upgrade with Particle IDentification). arXiv: [1504.03612](https://arxiv.org/abs/1504.03612)
- 19 Alfonso K, Armato A, Augier C, et al. Optimization of the first CUPID detector module. *Eur Phys J C*, 2022, 82: 810
- 20 Armato A, Armengaud E, Armstrong W, et al. Characterization of cubic  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  crystals for the CUPID experiment. *Eur Phys J C*, 2021, 81: 104
- 21 Armengaud E, Augier C, Barabash A S, et al. Precise measurement of  $2\nu\beta\beta$  decay of  $^{100}\text{Mo}$  with the CUPID-Mo detection technology. *Eur Phys J C*, 2020, 80: 674
- 22 Augier C, Barabash A S, Bellini F, et al. Measurement of the  $2\nu\beta\beta$  decay rate and spectral shape of  $^{100}\text{Mo}$  from the CUPID-Mo experiment. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 162501
- 23 Augier C, Barabash A S, Bellini F, et al. Final results on the  $0\nu\beta\beta$  decay half-life limit of  $^{100}\text{Mo}$  from the CUPID-Mo experiment. *Eur Phys J C*, 2022, 82: 1033
- 24 Kim H B, Ha D H, Jeon E J, et al. Status and performance of the AMoRE-I experiment on neutrinoless double beta decay. *J Low Temp Phys*, 2022, 209: 962–970
- 25 Wu Y C, Hao X Q, Yue Q, et al. Measurement of cosmic ray flux in the China Jinping underground laboratory. *Chin Phys C*, 2013, 37: 086001
- 26 Chen W, Ma L, Chen J H, et al. Gamma-, neutron-, and muon-induced environmental background simulations for  $^{100}\text{Mo}$ -based bolometric double-beta decay experiment at Jinping Underground Laboratory. *Nucl Sci Tech*, 2023, 34: 135
- 27 Chen W, Ma L, Chen J H, et al. Cosmogenic background study for a  $^{100}\text{Mo}$ -based bolometric demonstration experiment at China Jinping underground Laboratory. *Eur Phys J C*, 2022, 82: 549
- 28 Zhang Z, Yang L, Yue Q, et al. Probing dark matter particles from evaporating primordial black holes via electron scattering in the CDEX-10 experiment. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2024, 67: 101011



## Jinping bolometric double beta decay experiment

CAO Jiakuan<sup>1</sup>, CAO Xiguang<sup>2</sup>, CHEN Hao<sup>1\*</sup>, CHEN Hongbing<sup>3</sup>, CHEN Jinhui<sup>1</sup>,  
CHEN Liang<sup>4</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, CHENG Jianping<sup>5</sup>, DUAN Deyong<sup>6</sup>, FANG Deqing<sup>1</sup>,  
FU Shihong<sup>1</sup>, FU Ying<sup>7</sup>, HAN Ke<sup>8</sup>, HE Wanbing<sup>1</sup>, HUANG Huanzhong<sup>1\*</sup>, LI Yi<sup>6</sup>,  
LI Yulan<sup>9</sup>, LI Zhengwei<sup>7</sup>, LIU Congzhan<sup>7</sup>, LIU Yuanyuan<sup>5</sup>, LIU Zhouhui<sup>7</sup>, MA Jifei<sup>9</sup>,  
MA Long<sup>1\*</sup>, MA Yugang<sup>1</sup>, PAN Shangke<sup>3</sup>, PENG Haiping<sup>6</sup>, TANG Xiaoxing<sup>9</sup>,  
WANG Yu<sup>5</sup>, XIE Fang<sup>1</sup>, XIONG Wei<sup>4</sup>, XU Zizong<sup>6</sup>, XUE Mingxuan<sup>6\*</sup>, YANG Junfeng<sup>6</sup>,  
YU Xiaozhou<sup>1</sup>, YUAN Hui<sup>4</sup>, ZENG Ming<sup>10</sup>, ZENG Zhi<sup>10</sup>, ZHANG Jianjie<sup>5</sup>,  
ZHANG Mengxian<sup>7</sup>, ZHANG Yifei<sup>7</sup>, ZHAO Kangkang<sup>6</sup> & ZHU Yong<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion-beam Application (MOE), Fudan University, Shanghai 200433, China

<sup>2</sup>Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China

<sup>3</sup>School of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China

<sup>4</sup>Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

<sup>5</sup>College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100091, China

<sup>6</sup>Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

<sup>7</sup>Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>8</sup>School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

<sup>9</sup>Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>10</sup>Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

\*Corresponding authors (CHEN Hao, E-mail: [chenhao\\_fd@fudan.edu.cn](mailto:chenhao_fd@fudan.edu.cn); HUANG Huanzhong,

E-mail: [huanzhonghuang@fudan.edu.cn](mailto:huanzhonghuang@fudan.edu.cn); MA Long, E-mail: [malong@fudan.edu.cn](mailto:malong@fudan.edu.cn); XUE Mingxuan: E-mail: [xuemx@ustc.edu.cn](mailto:xuemx@ustc.edu.cn))

Possible Majorana nature of neutrinos is new physics far beyond the Standard Model and is a key scientific question at the modern frontiers of nuclear and particle physics. Neutrinoless double beta decay ( $0\nu\beta\beta$ ) experiment is the only viable approach to determine the Majorana property. The discovery of  $0\nu\beta\beta$  will have a great impact on outstanding puzzles of neutrino absolute mass scale, violation of lepton quantum number and matter anti-matter asymmetry of the universe. Among possible technological approaches to  $0\nu\beta\beta$  study, cryogenic crystal bolometer with the advantages of superior energy resolution, operational stability and background discrimination, is one of the leading detector choices for next generation of  $0\nu\beta\beta$  experiments. We will briefly review the current international efforts on bolometric experiment technology development for  $0\nu\beta\beta$  search, and introduce China Jinping cryogenic bolometer experiment and recent R&D progress. Perspectives on neutrinoless double beta decay search based on scintillating crystal bolometer technology at China Jinping Underground Laboratory are also discussed.

**bolometer, neutrinoless double beta decay, CJPL**

**PACS:** 23.40.-s, 23.40.Bw, 07.57.-c, 07.57.Kp

**doi:** [10.1360/SSPMA-2024-0448](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0448)