

# 揭开中微子和反中微子的马约拉纳神秘面纱 ——无中微子双贝塔衰变低温晶体量热器实验

马 龙 马余刚 黄焕中<sup>†</sup>

(核物理与离子束应用教育部重点实验室 现代物理研究所 复旦大学 上海 200433)

## Unraveling the Majorana mystery of neutrinos and anti-neutrinos

### ——Cryogenic crystal bolometer technology for neutrinoless double beta decay experiments

MA Long MA Yu-Gang HUANG Huan-Zhong<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion-beam Application (MOE) and Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 2000433, China)

2020-03-23 收到

<sup>†</sup> email: huanzhonghuang@fudan.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210308

**摘 要** 中微子可能的马约拉纳粒子属性超出了目前标准模型的范畴,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( $0\nu\beta\beta$ )实验是能够确定中微子马约拉纳属性的唯一途径。 $0\nu\beta\beta$ 的发现可以揭示中微子绝对质量、轻子数破缺、物质—反物质不对称等一系列自然奥秘,是当今粒子物理与核物理研究的前沿课题。在探索无中微子双贝塔衰变的可选择实验方案中,低温晶体量热器具有高能量分辨率、高运行稳定性和低辐射本底的技术优势,成为新一代 $0\nu\beta\beta$ 实验最具竞争力的探测器技术之一。文章首先介绍无中微子双贝塔衰变的研究历史,之后介绍低温晶体量热器及其最先进的代表——CUORE实验,最后展望关于我国锦屏地下实验室开展低温晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 实验研究的前景。

**关键词** 低温晶体量热器, 无中微子双贝塔衰变, 马约拉纳中微子, 中国锦屏地下实验室

**Abstract** The possible Majorana nature of neutrinos contains new physics far beyond the Standard Model and is a key scientific question at the frontiers of nuclear and particle physics. Experiments on the neutrinoless double beta decay ( $0\nu\beta\beta$ ) are the only viable approach to determine this Majorana property, which will have a great impact on resolving outstanding puzzles of the neutrino absolute mass scale, violation of the lepton quantum number, and matter anti-matter asymmetry of the universe. As such, it has become a key subject of nuclear and particle physics research. Among possible technological approaches to  $0\nu\beta\beta$  experiments, the cryogenic crystal bolometer has the advantages of superior energy resolution, operational stability and ultra-low radioactive background, and is one of the leading detector choices for next generation  $0\nu\beta\beta$  experiments. We will first briefly review the history of the search for  $0\nu\beta\beta$ , then describe the CUORE experiment as an example of advanced cryogenic bolometer technology. Finally, we will report on current experimental progress on the development of the cryogenic bolometer detector at China Jinping Laboratory, and its prospective application in  $0\nu\beta\beta$  research.

**Keywords** cryogenic crystal detector, neutrinoless double beta decay, Majorana neutrino, China Jinping Laboratory

## 1 最慢的稀有衰变

理解宇宙中物质的起源和演化是当代物理学最重要的问题之一。大爆炸理论认为宇宙最初时刻物质和反物质应当各占一半。但实验观测结果显示，宇宙基本上由物质构成，反物质无迹可寻。是什么原因造成了反物质世界的消失，仅仅遗留下我们所见的物质世界？

20世纪80年代以来，中微子研究逐渐成为粒子物理、核物理和宇宙学的交叉前沿课题。科学家普遍认为，广泛存在于物质世界中的中微子可能包含了反物质世界如何消失的重要信息。中微子的发现最早要追溯到1930年，为了解释贝塔衰变连续能谱问题，奥地利物理学家泡利(Wolfgang Pauli)推断在贝塔衰变中可能存在一个电中性、质量很小的新粒子，伴随着电子出现并且随机带走了一部分能量。3年后，意大利物理学家费米(Enrico Fermi)将这种假想的粒子改名为“中微子(neutrino)”，含义为微小的电中性粒子。自从中微子被预言以后，人们尝试过许多方法来寻找它，但由于它质量太小、不带电、穿透力极强，几乎不与物质相互作用，因此探测十分困难。直到1956年，科万(Clyde Cowan)和雷因斯(Frederick Reines)观测到核反应堆产物衰变产生的反中微子诱发的核反应才第一次得到中微子存在的实验证据<sup>[1]</sup>。

日本物理学家梶田隆章(Takaaki Kajita)和加拿大物理学家阿瑟·麦克唐纳(Arthur McDonald)因中微子振荡效应的发现分享了2015年诺贝尔物理学奖。中微子振荡实验结果表明中微子具有非零质量。然而，目前的中微子振荡实验结果只能确

定不同类中微子之间的质量平方差，无法测量中微子的绝对质量。不同类中微子满足怎样的质量排序？中微子的绝对质量是多少？这些科学问题仍然是未解之谜。

物理学将自然界中正反粒子不同的费米子定义为狄拉克费米子，由狄拉克方程描述。1937年，意大利天才物理学家埃托雷·马约拉纳(E. Majorana)改写了狄拉克方程，来描述自旋为1/2的电中性粒子，满足这一方程的正反粒子为同一粒子，具备这种性质的粒子后来被称为马约拉纳费米子。马约拉纳预言自然界应该存在这种正反粒子相同的费米子。

在已知的粒子物理基本粒子中，电中性的中微子是唯一可能为马约拉纳费米子的粒子。为了证实中微子是否为其自身的反粒子，哈佛大学的弗里(W. Furry)于1939年提出寻找末态仅仅产生两个电子而没有中微子的双贝塔衰变过程，即无中微子双贝塔衰变(neutrinoless double beta decay,  $0\nu\beta\beta$ )，来确定中微子的属性。只有中微子是其本身的反粒子，也就是马约拉纳费米子的情况下，才可能发生无中微子双贝塔衰变。

双贝塔衰变最早由德裔物理学家玛丽亚·格佩特-梅耶(Maria Goeppert-Mayer)于1935年提出。双贝塔衰变，顾名思义，即发出两个电子，衰变至原子序数次邻近的原子核的衰变过程。在通常的双贝塔衰变过程中，原子核中两个中子转变成两个质子，释放出两个电子，同时伴随产生两个反中微子。如图1(a)所示，这样的过程被称为双中微子双贝塔衰变( $2\nu\beta\beta$ )——尽管概率很小但是在标准模型框架内是被允许的。一个原子数  $A$  电荷数  $Z$  的原子核发生一次双中微子双贝塔衰变的形式为

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + e^- + e^- + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_e.$$

$2\nu\beta\beta$ 衰变几率很低，其半衰期寿命很长，实验探测极其困难。自双贝塔衰变概念提出以来，直到50多年后的1987年，才在实验室中第一次观测到核素 $^{82}\text{Se}$ 的双中微子双贝塔衰变过程。理论上自然界中能够发生双贝塔衰变的核素有35种，迄今为止已经在12种核素中实验观测到 $2\nu\beta\beta$ ，测量到

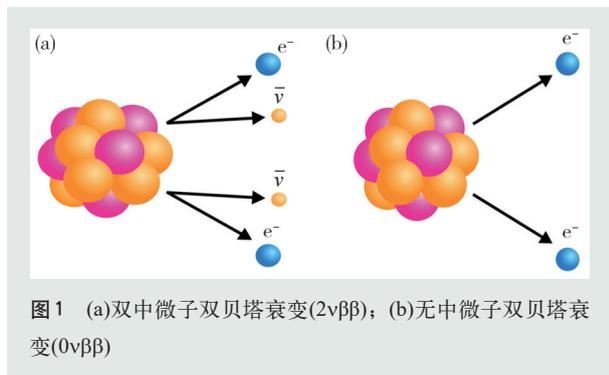
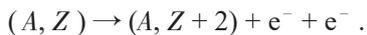


图1 (a)双中微子双贝塔衰变( $2\nu\beta\beta$ ); (b)无中微子双贝塔衰变( $0\nu\beta\beta$ )

的半衰期都在 $10^{18}$ 年以上。

若中微子为马约拉纳粒子，那么伴随双电子衰变产生的双中微子可以是正反粒子对而相互“湮灭”，衰变末态没有中微子。如图1(b)所示：



目前我们并不知道中微子是否为马约拉纳粒子及其导致无中微子双贝塔衰变的物理机制。即使可以发生， $0\nu\beta\beta$ 的衰变几率肯定远低于 $2\nu\beta\beta$ ，其半衰期至少要比宇宙的寿命长一百万亿倍，可以说是自然界中最慢的核衰变过程。实验上观测到 $0\nu\beta\beta$ 将提供中微子是马约拉纳粒子的直接证据。 $0\nu\beta\beta$ 的发生概率还和中微子质量有着密切的联系，测量到 $0\nu\beta\beta$ 将帮助间接确定中微子绝对质量。此外， $0\nu\beta\beta$ 是违背轻子数守恒的衰变过程(初态的轻子数为0，末态轻子数为2)，是超出标准模型的破坏轻子数守恒的新物理现象。理论上一个非常具有吸引力的可能性是轻子数不守恒和CP对称性破缺引发宇宙演化过程中重子数破缺，从而导致如今自然世界物质和反物质的不对称性。在无中微子双贝塔衰变实验中确认中微子马约拉纳粒子属性是探寻宇宙正反物质不对称性起源的重要部分。

由于科学意义重大，实验寻找 $0\nu\beta\beta$ 衰变成为粒子物理与核物理领域前沿研究的重点方向。在应用于寻找 $0\nu\beta\beta$ 衰变的高纯锗、低温晶体量热器、液态闪烁体、高压气体等不同的先进探测器技术方面，近年来取得了相当可观的进展。具有相当规模的 $0\nu\beta\beta$ 衰变实验正在国际上多个深地实验室运行(图2)，研制的新一代 $0\nu\beta\beta$ 实验的探测器技术也日趋成熟。

其中高纯锗技术为代表的实验包括：意大利的锗阵列探测器GERDA和美国的实验装置MAJORANA Demonstrator。GERDA是一项基于富集材料锗-76的高纯锗探测器实验，位于意大利格兰萨索地下实验室(LNGS)。GERDA使用富集

度为88%的高纯锗-76制造的晶体单元组成探测器阵列，寻找锗-76的 $0\nu\beta\beta$ 衰变。通过不断提升测量灵敏度，实验于2018年给出目前 $^{76}\text{Ge}$   $0\nu\beta\beta$ 寿命的最高下限值。MAJORANA Demonstrator实验装置位于美国南达科他州圣福德地下研究设施(Sanford Underground Research Facility)。其锗阵列探测器位于独立的低温保持器中，外部建设有多级屏蔽体，实现放射性本底的屏蔽。以液氙时间投影室为代表的实验主要为美国的EXO-200实验。EXO-200是一个位于美国新墨西哥州的新型液氙时间投影室实验装置。实验使用了175 kg丰度为81%  $^{136}\text{Xe}$ 的液氙，通过读出电子和光子信号测量能量和衰变产生区域，寻找 $^{136}\text{Xe}$ 原子核可能发生的 $0\nu\beta\beta$ 衰变。以液态闪烁体为代表的当前测量灵敏度最高的实验是日本的KamLAND-zen实验，这是一个基于 $^{136}\text{Xe}$ 的液氙探测装置，建立在日本成功发现反应堆中微子振荡的KamLAND实验之上。KamLAND-zen将380 kg  $^{136}\text{Xe}$ 溶入到一个直径为3 m、盛满13吨液体闪烁体溶剂的袋子，整个袋子置于1000吨液体闪烁体的探测器中。该实验仅仅测量氙衰变后的闪烁光信号来实现 $0\nu\beta\beta$ 事件甄别。作为低温晶体量热技术代表的CUORE



图2  $0\nu\beta\beta$ 代表性实验。(a—d)分别为GERDA实验、EXO-200实验、KamLAND-zen实验和CUORE实验

度为88%的高纯锗-76制造的晶体单元组成探测器阵列，寻找锗-76的 $0\nu\beta\beta$ 衰变。通过不断提升测量灵敏度，实验于2018年给出目前 $^{76}\text{Ge}$   $0\nu\beta\beta$ 寿命的最高下限值。MAJORANA Demonstrator实验装置位于美国南达科他州圣福德地下研究设施(Sanford Underground Research Facility)。其锗阵列探测器位于独立的低温保持器中，外部建设有多级屏蔽体，实现放射性本底的屏蔽。以液氙时间投影室为代表的实验主要为美国的EXO-200实验。EXO-200是一个位于美国新墨西哥州的新型液氙时间投影室实验装置。实验使用了175 kg丰度为81%  $^{136}\text{Xe}$ 的液氙，通过读出电子和光子信号测量能量和衰变产生区域，寻找 $^{136}\text{Xe}$ 原子核可能发生的 $0\nu\beta\beta$ 衰变。以液态闪烁体为代表的当前测量灵敏度最高的实验是日本的KamLAND-zen实验，这是一个基于 $^{136}\text{Xe}$ 的液氙探测装置，建立在日本成功发现反应堆中微子振荡的KamLAND实验之上。KamLAND-zen将380 kg  $^{136}\text{Xe}$ 溶入到一个直径为3 m、盛满13吨液体闪烁体溶剂的袋子，整个袋子置于1000吨液体闪烁体的探测器中。该实验仅仅测量氙衰变后的闪烁光信号来实现 $0\nu\beta\beta$ 事件甄别。作为低温晶体量热技术代表的CUORE

表1 世界上不同类型的 $0\nu\beta\beta$ 实验结果比较(数据截至2018年)

实验	同位素 ( $Q$ 值/keV)	$T_{1/2}^{0\nu}$ 90% C.L. 下限/年	$M_{\beta\beta}$ 上限/meV
GERDA	$^{76}\text{Ge}$ (2040)	$8.0 \times 10^{25}$	120 — 260
MAJORANA Demonstrator	$^{76}\text{Ge}$ (2040)	$1.9 \times 10^{25}$	240 — 520
CUORE	$^{130}\text{Te}$ (2528)	$1.5 \times 10^{25}$	110 — 520
EXO-200	$^{135}\text{Xe}$ (2479)	$1.8 \times 10^{25}$	147 — 398
KamLAND- Zen	$^{135}\text{Xe}$ (2479)	$1.1 \times 10^{26}$	61 — 165

(Cryogenic Underground Observatory for Rare Event)实验位于意大利格兰萨索地下实验室(LNGS),采用自然丰度 $^{130}\text{Te}$ 的 $\text{TeO}_2$ 晶体制成探测器单元,通过读出 $^{130}\text{Te}$ 双贝塔衰变释放能量在晶体中引发的声子信号寻找 $^{130}\text{Te}$ 的 $0\nu\beta\beta$ 衰变。CUORE探测器的设计理念以较高的能量分辨率、较低本底水平和大型实验的高性价比为核心。

表1列出了截至2018年底不同实验测得的无中微子双贝塔衰变半衰期的下限结果,实验的灵敏度范围主要覆盖了50—150 meV的中微子有效马约拉纳质量区间<sup>[2-5]</sup>。目前运行的实验尚未发现无中微子双贝塔衰变迹象,仅仅给出了迄今为止 $0\nu\beta\beta$ 半衰期下限和有效马约拉纳质量最严格的限制,随着实验技术的不断提升,新一代的实验将进一步突破探索中微子属性的极限。

## 2 最冷立方体中的晶体探测器

实验探测无中微子双贝塔衰变( $0\nu\beta\beta$ )关键的观测量是衰变事件中末态双贝塔的能谱。普通双贝塔衰变由于末态伴随两个中微子的产生呈现一个连续的双贝塔能谱,而 $0\nu\beta\beta$ 过程由于没有中微子带走能量,在核反应的阈值( $Q_{\beta\beta}$ )附近会形成一个尖峰。 $0\nu\beta\beta$ 实验就是要在连续的本底下寻找这样一个罕见的峰。能够在实验上发现并且证明 $0\nu\beta\beta$ 峰具有极大的挑战,需要高能量分辨率和低辐射环境以获得较高的信噪比,减少信号搜索区域内的本底。

在较为成熟的 $0\nu\beta\beta$ 实验探测技术方案中,低温晶体量热器以其高能量分辨率和运行稳定性,

以及低辐射本底的技术优势成为建造新一代大型实验的主要竞争方案之一。量热器是通过测量温度变化来标定能量的装置,在科学研究上的应用可以追溯到1880年,S. P. Langley发明了辐射热测量仪测量来自太阳的红外线<sup>[6]</sup>。1949年,D. H. Andrews等人采用低温氮化铌超导微条实现对 $\alpha$ 粒子的探测,开辟了利用量热器开展单粒子事件探测的研究方向<sup>[7]</sup>。1950年掺杂锗半导体的温度传感器作为红外微量热器开创了低温量热器在天文观测中的应用<sup>[8]</sup>。1965年宇宙微波背景辐射(CMB)的发现,使量热器成为CMB、太赫兹辐射研究方向强有力的探测器。20世纪80年代后,低温量热器逐渐引起人们更多的关注与技术研发。新型的量热器采用现代温度传感技术,吸收体和传感器通常工作在低温下,能够精确地测量物理事件能量沉积导致的微小温度变化。1984年,E. Fiorini和T. O. Niinikosky提出利用低温量热器开展双贝塔衰变等稀有事件测量<sup>[9]</sup>。目前低温量热器已经被广泛用于无中微子双贝塔衰变和暗物质等实验,并取得了一系列重要进展<sup>[10]</sup>。

用于 $0\nu\beta\beta$ 探测的低温晶体量热器是近几十年发展起来的先进探测器技术。低温晶体量热器在设计上巧妙地实现了双贝塔衰变核素和探测器能量吸收体的集成:含双贝塔衰变核素的晶体本身既作为信号源,又作为量热器的能量吸收体,即物理事件产生源和探测器的合二为一。这样的设计可以增加探测器的探测效率,并且大大提高了探测器技术的拓展性能:晶体量热器可以选择不同核素制备的晶体来发现和验证 $0\nu\beta\beta$ 信号。

低温晶体量热器结构和基本工作原理如图3所示。一个低温晶体量热器单元主要由三个部分组成:晶体,作为双贝塔衰变源和能量吸收体;温度传感器,用来测量晶体的温升;一个和外界弱耦合的热连接装置,可以把事件过后的吸收体温度恢复到基线温度。将吸收体的热容用 $C$ 表示,热连接装置热传导用 $G$ 表示,热源基准线温度用 $T_0$ 表示,当发生双贝塔衰变时,瞬间产生的能量沉积 $\Delta E$ 引起吸收体的温升为 $\Delta T = \Delta E / C$ ,紧接着系统以时间常数 $\tau = C / G$ 回到初始温度 $T_0$ 。通

常双贝塔衰变的能量沉积在晶体中引起的温度变化极小。为了提高信号甄别能力，需要尽可能地增大有限能量沉积造成的温升。一种直接有效的手段是降低吸收体的比热容。对于晶体材料而言，比热容正比于温度的三

次方，降低工作温度可以有效减小比热容，提高温度测量灵敏度。通常晶体量热器工作在 10 mK 附近温度。

运用低温晶体量热器探索  $0\nu\beta\beta$  物理最具代表性的是 CUORE 实验<sup>[11]</sup>。CUORE 实验位于意大利中部亚平宁山脉最高峰之下 1400 m 深处的意大利格兰萨索国家实验室(LNGS)，是目前世界上正在运行的规模最大的低温晶体量热器实验。该实验由意大利国家核物理研究院(INFN)和美国能源部相关国家实验室和大学，以及中国复旦大学、上海交通大学、中国科学院上海应用物理研究所等单位组成了 CUORE 国际合作组。值得指出的是，CUORE 的所有晶体是由中国科学院上海硅酸盐研究所生产制作。

CUORE 实验的物理目标是寻找同位素  $^{130}\text{Te}$  可能发生的无中微子双贝塔衰变过程。探测器技术的构想最早于 20 世纪 90 年代初提出，经历了 20 多年的发展，从最初质量仅为 6 g 的测试晶体最终发展为近 1 吨的当前世界上最大的晶体量热器装置，实现了探测器质量与灵敏度数量级的飞跃。图 4 显示了不同阶段实验晶体总质量与灵敏度的变化，形象地描述了无中微子双贝塔衰变晶体量热器的发展历程。其中 MiDBD 和 Cuoricino 实验是由意大利米兰比可卡大学(University of Milano-Bicocca)的 Ettore Fiorini 教授领导的研究组推动的早期晶体阵列量热器实验<sup>[12]</sup>，在探测器技术方面是最新的 CUORE 的先驱实验。

目前运行中的 CUORE 探测器由 19 个晶体塔阵列组成，如图 5 所示，晶体塔阵列位于低温恒温器内。每个晶体塔阵列包含 13 层，每层 4 块紧

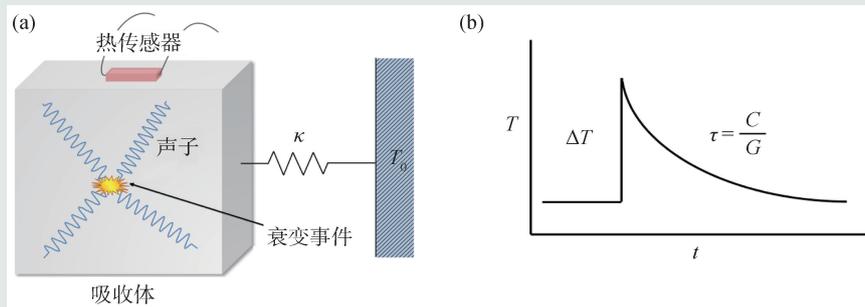


图3 低温晶体量热器结构(a)和工作原理示意图(b)

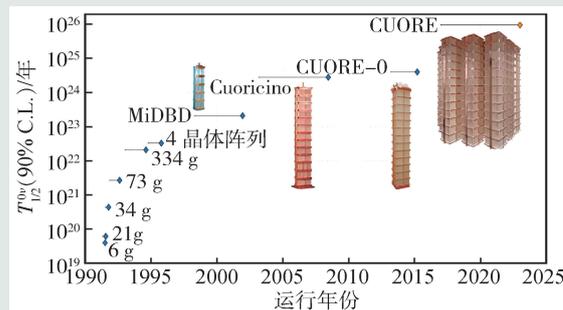


图4 无中微子双贝塔衰变晶体量热器实验的发展历史

凑排列的二氧化碲( $\text{TeO}_2$ )立方晶体，晶体总重约 741 kg，包含有效同位素 ( $^{130}\text{Te}$ ) 质量 206 kg。CUORE 的晶体全部由中国科学院上海硅酸盐研究所提供，含天然丰度同位素  $^{130}\text{Te}$ ，单个立方晶体边长 5 cm，质量约为 750 g。单个  $\text{TeO}_2$  晶体连接温度传感器和热传导装置组成一个量热器单元，采用聚四氟乙烯(PTFE)材料将晶体固定连接在低放射性铜支架作为热传导装置。铜支架保证了与系统恒温冷盘的热导性，在能量沉积事件发生后能够快速恢复晶体与环境的热平衡。温度传感器是一个 NTD (Neutron Transmutation Doped) 锗热敏电阻计。温度传感器用环氧树脂粘在晶体表面上，由直径 50  $\mu\text{m}$  的金线和铜支架上的读出系统相连。探测器整体置于超低本底铜制作的低温恒温器内，工作在 10—20 mK 的低温环境，记录  $^{130}\text{Te}$  双贝塔衰变在晶体中产生的极小温度变化。在 10 mK 温度时，质量为 750 g 的  $\text{TeO}_2$  晶体，每 1 MeV 能量沉积将导致大约 0.1 mK 温升。温度的变化由 NTD 锗热敏电阻计测得并转换为电信号读出后得到单次衰变释放出来的能量。最终通过重建末态能谱在  $^{130}\text{Te}$   $0\nu\beta\beta$  衰变阈值 ( $Q_{\beta\beta} \sim 2527$  keV) 附近寻找信号峰。

为了给988块二氧化碲晶体组成的近吨量级的探测器提供10 mK附近稳定低温环境，CUORE研制的低温恒温器装置是世界上已知的在绝对零度附近工作的最大体积的实验系统。如图5所示，CUORE低温恒温器包含6层嵌套的热屏蔽腔体，全部由高纯无氧铜制成。晶体量热器整体位于10 mK恒温室内。CUORE低温系统的建造历时超过3年。低温系统于2014年9月份试运行，成功把恒温器内约1 m<sup>3</sup>的空间冷却到5.9 mK的超低温，并维持10 mK以下温度15天之久，成为已知宇宙中最冷的立方体<sup>[13]</sup>。

CUORE实验于2017年初正式开始采集数据，2018年第一次发布初始物理结果，并于近期更新了结果<sup>[2, 14]</sup>。CUORE实验系统性地测量<sup>130</sup>Te双贝塔衰变末态能谱，通过符合去除多通道计数事件，有效地减小了测量本底。在感兴趣区间

(ROI)，CUORE目前没有观测到0νββ信号，在信号区间测得计数率为0.014 counts/(keV·kg·yr)的本底。考虑统计和系统误差得到<sup>130</sup>Te的0νββ半衰期的下限 $T_{1/2} \sim 3.2 \times 10^{25}$ 年(90% C.L.)，这是迄今为止<sup>130</sup>Te无中微子双贝塔衰变半衰期最高灵敏度测量结果。表明<sup>130</sup>Te的0νββ衰变是极其稀有事件，如果存在，其半衰期比宇宙年龄长数百万亿倍。基于半衰期下限的测量，CUORE实验结果可以进一步限制中微子有效马约拉纳质量 $m_{\text{eff}}$ 的参数空间。考虑不同模型对于核矩阵元的计算结果范围，获得有效质量 $m_{\text{eff}} < 75\text{--}350$  meV (90% C.L.)。这是目前通过低温晶体量热器实验测量得到的中微子马约拉纳有效质量的最优结果。CUORE在未来几年还将继续运行，有望进一步提升探测器性能，预计将获得更低的中微子有效质量测量上限<sup>[15]</sup>。

通过CUORE实验，晶体量热器作为0νββ探测技术显示了很大的潜力。CUORE的成功运行充分验证了低温晶体量热器技术用于无中微子双贝塔衰变物理研究的可靠性，极大地推动了低温量热器技术和低本底技术的发展。新一代0νββ实验的科学目标是进一步提升灵敏度，实现对中微子马约拉纳有效质量在反序区间的全部覆盖。为了实现这一科学目标，晶体量热器探测技术需要在CUORE实验的基础上将灵敏度提升至少一个数量级。

影响0νββ实验灵敏度的主要因素包括探测器中双贝塔衰变同位素源的有效质量、能量分辨率和0νββ测量窗口的本底计数率。研制更大规模的晶体探测器或采用同位素富集都能够提高双

贝塔衰变同位素源质量。除了有效同位素质量，能量分辨率也是实现高灵敏度实验的关键因素。测量0νββ这种稀有事件需要把真实信号和本底足够地区分，在本底中识别微弱信号峰的能力非常重要。探测器的能量分辨率直接决定了0νββ测量窗口(敏感

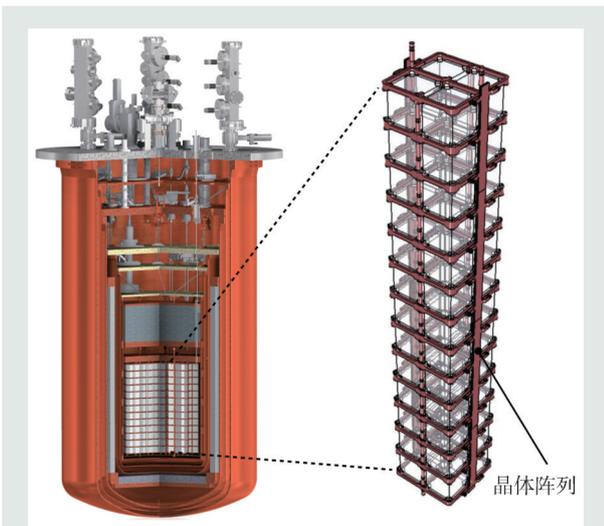


图5 CUORE实验恒温器装置和晶体塔阵列示意图

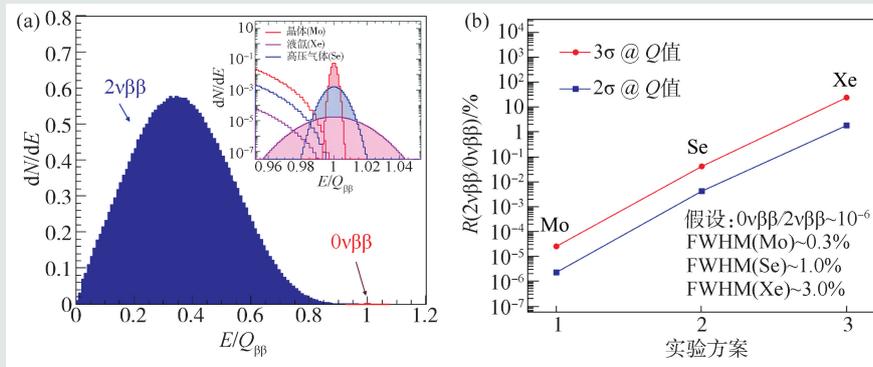


图6 不同能量分辨率实验方案的2νββ贡献比较 (a)蒙特卡罗模拟比较；(b)实验方案比较

区间)的大小。探测器的分辨率越好,窗口区间越小,排除的本底计数越多,信噪比就越高。以双中微子双贝塔衰变( $2\nu\beta\beta$ )为例, $2\nu\beta\beta$ 是 $0\nu\beta\beta$ 实验测量中不可压低的物理本底。图6比较了蒙特卡罗模拟得到的不同能量分辨率的实验方案中 $2\nu\beta\beta$ 在

$0\nu\beta\beta$ 测量区间的贡献比。假设 $0\nu\beta\beta$ 的产生率是 $2\nu\beta\beta$ 的一百万分之一,可以看出,晶体量热器实验方案(以 $^{100}\text{Mo}$ 晶体为例,FWHM $\sim 0.3\%$ ),相比基于 $^{136}\text{Xe}$ 的液氙实验方案(FWHM $\sim 2\text{--}3\%$ )和基于 $^{82}\text{Se}$ 的高压 $\text{SeF}_6$ 气体实验方案(FWHM $\sim 1\%$ ), $2\nu\beta\beta$ 在 $0\nu\beta\beta$ 测量窗口的贡献分之比低了两个数量级以上,充分体现了能量分辨率的重要性。

除了控制探测器材料放射性本底外,选用双贝塔衰变能量阈值( $Q_{\beta\beta}$ )较高的核素作为探测器源材料可以有效减小 $0\nu\beta\beta$ 测量区间的本底水平。自然放射性本底通常集中在较低的能区。理想核素的 $Q_{\beta\beta}$ 值最好高于材料中一个重要的自然放射性本底——来自 $^{232}\text{Th}$ 衰变链 $^{208}\text{Tl}$ 发出的能量为2615 keV的伽马射线,从而远离本底集中区。近年来国际上多个实验广泛开展了同位素和晶体材料筛选工作,通过对原料提纯、晶体生长、晶体性能等指标的综合考虑,具有性能优势的候选核素包括 $^{82}\text{Se}$ 、 $^{100}\text{Mo}$ 和 $^{116}\text{Cd}$ ,对应双贝塔衰变 $Q_{\beta\beta}$ 值分别为2995 keV、3034 keV和2802 keV。在高于2615 keV的能区,主要的本底来源于材料表面的 $\alpha$ 放射源杂质。去除 $\alpha$ 本底的有效途径是采用新一代CUPID(CUORE Upgrade with Particle Identification)实验技术<sup>[16-18]</sup>。CUPID是在CUORE基础上发展出来的新型晶体量热器实验技术,采用热—光双通道读出技术实现本底甄别,区分 $\alpha$ 和 $\gamma$ /电子产生的信号,有效压低 $\alpha$ 背景本底,提高实验灵敏度。CUPID量热器单元采用具有较好发光特性的闪烁晶体,测量衰变事件引起的晶体温度变化的同时还测量衰变末

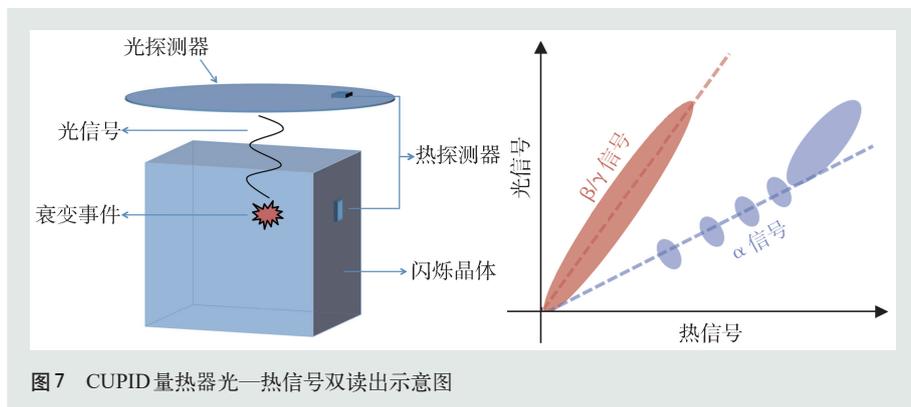


图7 CUPID量热器光—热信号双读出示意图

态带电粒子在晶体材料中产生的闪烁光或切伦科夫光。通过符合测量光信号和声子信号,实现背景干扰信号(主要是 $\alpha$ 粒子)的甄别。

图7显示了CUPID量热器光—热双读出技术示意图和粒子甄别原理。探测器单元除了闪烁晶体及其温度传感器外,还设置有锗片组成的光信号探测器。闪烁晶体外通常还包裹反光材料,通过反射能量沉积过程中产生的光子,提高光子采集效率。优化的光—热双读出技术能够甄别99.9%以上的本底 $\alpha$ 粒子。近年来,基于光—热双读出的CUPID实验技术取得了极大进展,意大利的格兰萨索国家实验室(LNGS)和法国莫丹地下实验室(LSM)分别开展了基于 $\text{ZnSe}$ 晶体的CUPID-0实验和基于 $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ (LMO)晶体的CUPID-Mo原型机实验。CUPID-0实验于2019年发表了测试物理结果,在 $^{82}\text{Se}$  $0\nu\beta\beta$ 灵敏区间取得了0.003 counts/(keV $\cdot$ kg $\cdot$ yr)本底水平,相比于CUORE本底降低了5倍,充分验证了CUPID技术方案的可行性<sup>[19]</sup>。相比于LMO晶体, $\text{ZnSe}$ 晶体生长具有熔点温度高、在熔点区间晶体具有相变结构等复杂因素影响晶体量热器性能。预期LMO晶体将是新一代无中微子晶体量热器发展的更优选择。

近20年来,低温晶体量热器得到了极大的发展,成为应用于寻找无中微子双贝塔衰变、暗物质、轴子等研究前沿物理的先进技术。在核与粒子物理实验需求的推动下,传感器、低温技术以及晶体制作工艺进入一个快速发展的时期。随着相关技术的不断发展,探测器系统的规模也从千克量级到吨级不断提升。涉及的低温低本底技术革新对于其他学科研究方向如量子计算、超导

材料、同位素检测等也产生了极大推动作用。

### 3 最深的无中微子稀有物理事件实验构想

无中微子双贝塔衰变是极其稀有的物理事件，真实信号很容易被淹没在大量的环境本底中而无法辨识。因此，实验测量必须尽可能实现超低本底以避免所有可能的干扰。宇宙线是需要重点考虑的本底之一。高能宇宙线除了会在探测器中直接沉积能量，造成本底计数外，通常还会诱发材料活化引起一系列反应产生放射性核素。这些通过宇宙射线与材料相互作用产生的本底通常称为宇生本底。减小宇生本底的一种有效途径是建立深地实验室开展实验。深地实验室得益于较厚的岩体覆盖，可以极大地降低宇宙线通量及其宇生本底，为稀有事件的探测创造有利条件。迄今为止世界上众多国家已经建立多个空间大小不

同的地下实验室，开展包括核天体物理、暗物质、无中微子双贝塔衰变等实验。

中国锦屏地下实验室(图8)位于中国四川凉山州锦屏山区，栖身于锦屏二级水电站内长17.5 km的锦屏山隧道中部，拥有世界上最厚的天然岩石屏障，垂直岩石厚度达到2400 m，是目前世界上最深的地下实验室。由于垂直岩石覆盖能够有效屏蔽宇宙线，锦屏实验室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>[20]</sup>。超低宇宙线本底实验环境为开展无中微子双贝塔衰变低温晶体量热器实验研究创造了极佳条件。目前，我国由复旦大学牵头，包括北京师范大学、宁波大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院上海硅酸盐研究所、上海交通大学、清华大学、中国科学技术大学等单位成立了CUPID—China合作组，立足在锦屏地下实验室发展新一代低温晶体量热器技术，建设我国首个地下低温晶

体量热器实验装置，开展无中微子双贝塔衰变等稀有物理事件的前沿研究。

低温低本底实验平台是开展晶体量热器实验不可或缺的重要保障。低温低本底实验平台主要的科学功能是为晶体实验提供mK量级稳定低温环境，屏蔽环境放射性本底背景，以及为设备装配提供保障。不同于一般低温物理实验平台，用于开展0νββ实验的低温低本底实验平台对实验室空间，低温条件与温度稳定性，及材料放射性本底大小有着更高的要求。低温低本底晶体量热器实验平台(图9)主要包括低温系统、低本底系统、地下实验辅助系统三个部分。其中低温系

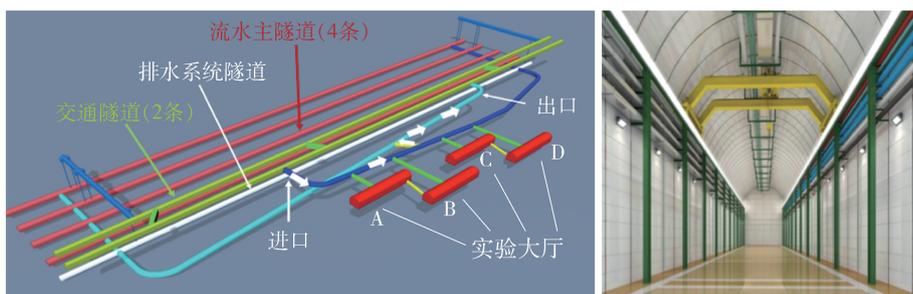


图8 中国锦屏地下实验室二期结构图

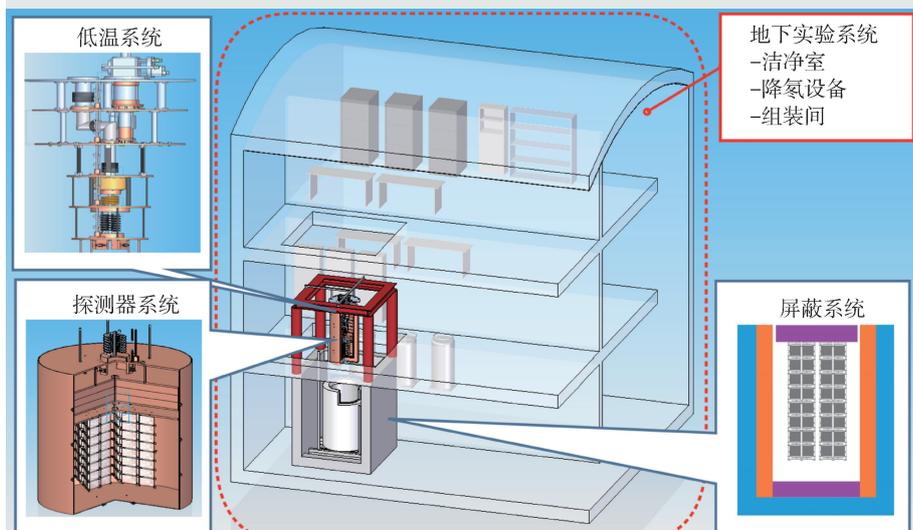


图9 中国锦屏地下实验室低温低本底实验平台示意图

统由多个模块组成，主要装置包括稀释制冷机(Dilution Refrigerator)和低温恒温器。稀释制冷机具有较强的冷却能力，能够长时间连续运行，是获得超低温的重要手段和设备。借助稀释制冷机，低温晶体量热器能够稳定工作在10 mK附近温度，并具有极高的温度灵敏度。低温恒温器是与稀释制冷机配套建造的实验装置，包含多层热屏蔽腔体，通常由高纯无氧铜制作，腔体分别连接各级冷盘，从外层到内层组成不同级冷屏。实验用晶体探测器位于最内层低温恒温器腔体内。低本底系统由从外到内的多级屏蔽体组成，能够有效地屏蔽实验室环境中的放射性本底。其中最外层屏蔽体通常为含硼聚乙烯材料，主要用来阻挡地下实验室环境岩石和混凝土中的 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 及其衰变产物所产生的高能中子。次外层采用原子序数较高的铅屏蔽，铅具有很高的辐射阻止能力，能够有效屏蔽来自环境的大部分伽马本底。内层采用高纯度超低本底无氧铜，阻挡来自制冷机系统及铅屏蔽体中的放射性同位素产生的特征伽马射线及环境剩余伽马射线。地下实验辅助系统主要为开展 $0\nu\beta\beta$ 实验提供配套支持。包括千级洁净室用于晶体探测器组装，高纯锗伽马谱仪用于环境监测、低本底材料遴选、超低本底放射性核素测量平台、提供本底测试等服务。此外，为减小制冷机工作产生的机械振动对于晶体探测器系统的影响，减震系统也是低温低本底实验平台的重要组成部分。减震系统的设计需要能够覆盖低频到高频的减震，与低温和屏蔽系统协同工作。

目前，中国锦屏地下实验室正处于二期工程建设阶段，正施工建设国家重大科技基础设施——极低辐射本底前沿物理实验设施。设施建成后将使锦屏实验室成为稀有物理前沿科学研究的中心。

锦屏无中微子双贝塔衰变低温晶体量热器实验(CUPID-CJPL)将采用高富集度 $^{100}\text{Mo}$ 的钼酸锂晶体(LMO)建造低温量热器实验装置，基于新一代CUPID技术开展超低本底实验探测。采用 $^{100}\text{Mo}$ 作为双贝塔衰变源具有以下优点：(1) $Q_{\beta\beta}$ 值高( $\sim 3034$  keV)。远离低能区较高的天然放射性

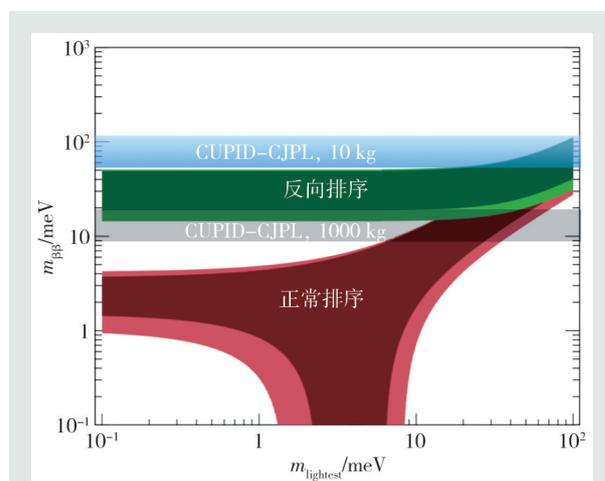


图10 中微子有效马约拉纳质量( $m_{\beta\beta}$ )与最轻中微子质量( $m_{\text{highest}}$ )关系。图中蓝色和灰色区域分别对应CUPID-CJPL 10 kg和1000 kg实验预期灵敏度

本底区间，能较好地避开 $^{208}\text{Tl}$ -2615 keV特征伽马线；(2)能量分辨率高。钼酸锂晶体在低温工作环境能够达到5 keV(FWHM)能量分辨；(3)LMO晶体( $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ )具备闪烁光特性。可以采用光—热双读出技术方案实现本底甄别。此外，钼酸盐晶体制备技术近年来在国内(宁波大学和上海硅酸盐研究所)也取得了较快的发展，晶体纯度和特性得到大幅提升。

原型机实验将建设10 kg量级的锦屏低温晶体量热器装置。主要目标是利用光—热双读出方案，充分验证CUPID技术在锦屏 $0\nu\beta\beta$ 实验上的应用。同时，发展富集材料本底检测和本底控制技术，优化富集晶体生长(纯度和原料利用率)，降低探测器各组件的本底水平，在CUORE基础上实现一个数量级以上的本底压低，达到本底目标 $\text{BI} < 0.001$  counts/(keV·kg·yr)。

中微子有效马约拉纳质量 $m_{\beta\beta}$ 随最轻中微子质量 $m_{\text{highest}}$ 的关系如图10所示，目前中微子振荡实验结果容许中微子质量有两种可能的排序，其中绿色部分对应中微子质量满足反向排序(inverted hierarchy)的区间，红色部分对应中微子质量满足正常排序(normal hierarchy)的区间。通常可以用实验所能测得的 $m_{\beta\beta}$ 上限来描述实验的灵敏度。 $m_{\beta\beta}$ 上限越低，实验灵敏度越高。考虑核矩阵元和相空间计算不确定性，CUPID-CJPL 10 kg原型机实

验运行5年预期灵敏度如图10蓝色阴影部分所示,达到或稍优于目前的CUORE实验。在原型机实验基础上开展下一代吨量级实验将有望进一步降低本底水平,争取达到 $0.0001 \text{ counts}/(\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{yr})$ ,实现中微子有效质量  $m_{\text{pp}} \sim 10 \text{ meV}$  灵敏度目标。

## 4 总结与展望

寻找无中微子双贝塔衰变的实验技术在近年来取得了巨大突破。欧盟、北美、日本和韩国等众多国家在无中微子双贝塔衰变科学研究方向投入了大量的科技资源,推动了多个探测器技术的发展和中小型实验的运行和科研探索。低温晶体量热器可以利用国内在材料提纯和晶体生长方面的技术优势,适合在锦屏地下实验室继续发展,是非常具有竞争力的技术选择。新一代大型低温晶体量热器实验的主要科学目标是将寻找无中微子双贝塔衰变的实验灵敏度提升一个数量级,把中微子有效马约拉纳质量测量的上限延至 $10 \text{ meV}$ ,涵盖整个中微子有效质量反向排序的区域。如果中微子质量是反向排序而且中微子是马约拉纳粒子,新一代大型低温晶体量热器实验将有望发现无中微子双贝塔衰变,实验验证中微子马约拉纳的特性。同时,低温晶体量热器实验还可以应用于低质量暗物质、轴子等稀有物理事件的研究。

随着中国锦屏地下实验室二期(CJPL-II)的建设,尽快在中国锦屏地下实验室建立实验平台发

展低温晶体量热器技术,开展新一代无中微子双贝塔衰变实验研究,对于发挥锦屏地下实验室地理环境优势,推动我国粒子物理与核物理前沿科学研究有着重要的意义。建立锦屏低温晶体量热器实验是我国发展先进探测器技术,探索粒子物理超标准模型崭新前沿物理的有效战略途径。

历史上中微子特性的探索对于现代物理的发展产生了划时代的意义:中微子的提出解决了贝塔衰变中连续谱的问题;中微子的直接测量揭示了弱相互作用中与电子、缪子、 $\tau$ 子的味关联和基本费米子的三大家族;中微子的手征特性解释了弱相互作用中宇称对称性破缺;中微子振荡效应的发现证实中微子具有质量。今天,在基本粒子大家族里中微子仍然是一位神秘的成员。在无中微子双贝塔衰变实验中,如果没有测到中微子,反而可以揭示中微子与反中微子的马约拉纳神秘面纱。通过没有或不存在来显示其特性,中微子不愧为大自然神秘世界的幽灵!

**致谢** 感谢中国原子能科学研究院张焕乔院士、中国科学院上海应用物理研究所沈文庆院士、北京师范大学程建平教授、中国科学院高能物理研究所邢志忠研究员、北京大学孟杰教授、上海交通大学季向东教授、中国科学院近代物理研究所许怒研究员、清华大学岳骞研究员、中国科学技术大学许咨宗教授等同仁关于中国发展无中微子双贝塔衰变物理实验规划的讨论。

## 参考文献

- [1] Cowan C *et al.* Science, 1956, 125: 103
- [2] Alduino C *et al.* (CUORE Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 132501
- [3] Agostini M *et al.* (GERDA Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 132503
- [4] Gando A *et al.* (KamLAND-Zen Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2016, 117: 082503
- [5] Auger M *et al.* (EXO Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2012, 109: 032505
- [6] Lengley S P. Proc. AM. Acad. Arts Sci., 1881, 16: 342
- [7] Andrews *et al.* Phys. Rev., 1949, 76(1): 154
- [8] Estermann I *et al.* Phys. Rev., 1950, 79: 365
- [9] Fiorini E, Niinikoski T. Nucl. Instrum. Meth. A, 1984, 224: 83
- [10] Fiorini E. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2010, 64: 241
- [11] Arnoboldi C *et al.* Nucl. Instrum. Meth. A, 2004, 518: 3
- [12] Arnoboldi C *et al.* Physical Review, 2008, C78: 035502
- [13] Ouellet J. 2014, arXiv: 1410.1560
- [14] Adams D Q *et al.* (CUORE Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2020, 124: 122501; 2019, arXiv: 1912. 10966
- [15] Artusa D R *et al.* (CUORE Collaboration). Advances in High Energy Physics, 2015, 1-13
- [16] The CUPID Interest Group. 2015, arXiv: 1504.03599
- [17] The CUPID Interest Group. 2015, arXiv: 1504.03612
- [18] The CUPID Interest Group. 2019, arXiv: 1907.09376
- [19] Azzolini O *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 232502
- [20] Wu Y C *et al.* Chinese Physics C, 2013, 37(8): 086001