

无中微子双贝塔衰变：寻找马约拉纳中微子之路*

韩柯[†]

(上海交通大学 物理与天文学院 上海 200240)

Neutrinoless double beta decay: searching for Majorana neutrinos

HAN Ke[†]

(School of Physics and Astronomy , Shanghai Jiao Tong University , Shanghai 200240 , China)

2020-10-23收到

[†] email: ke.han@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210601

摘要 无中微子双贝塔衰变是目前粒子物理与核物理学家积极寻找的一种极其稀有的原子核衰变模式。它的发现将验证中微子是否是其本身的反粒子，也就是通常指的马约拉纳费米子。同时这一物理过程破坏轻子数守恒，也可以为宇宙初期的正反物质不对称性提供重要的条件。鉴于其极重要的物理意义，国际上多个实验组利用不同的探测器技术，在多种不同的目标同位素中寻找这一突破粒子物理标准模型的稀有衰变。目前主流实验还未发现确定的无中微子双贝塔衰变信号，但对其半衰期的限制已经达到了 10^{26} 年量级。国内近期也开展了一系列预研实验，期望在未来几年内可以确定一到两个切实可行的实验方案，开展吨级实验。

关键词 中微子，无中微子双贝塔衰变，马约拉纳中微子，反粒子

Abstract The search for neutrino-less double beta decay (NLDBD), an extremely rare decay process of certain nuclei, is being actively pursued by particle and nuclear physicists. A discovery would confirm that neutrinos are their own anti-particle, i.e. Majorana fermions. This decay also violates the conservation of lepton number and provides a viable explanation for the matter-antimatter asymmetry of the early universe. Around the world, many collaborations utilize different detector techniques to search for this rare process beyond the Standard Model of particle physics in different isotopes. No positive signals have been identified so far and the half-life limit of NLDBD has been set to at least 10^{26} years. Recently a series of R&D projects have started in China, which hopefully will evolve to one or two future ton scale NLDBD experiments in the near future.

Keywords neutrino, neutrino-less double beta decay, Majorana neutrino, anti-particle

* 国家自然科学基金(批准号: 11775142)资助项目, 中国科学院数学与物理学部自主战略研究支持项目

1 简介

1.1 无中微子双贝塔衰变物理意义

双贝塔衰变(double beta decay, DBD)是原子核的一种罕见衰变模式。在这一过程中,一类原子核内的两个中子(质子)会同时衰变成两个质子(中子),且放出两个(正)电子^[1]。粒子物理标准模型允许的双贝塔衰变放出一对电子中微子:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+2} X + 2\beta^+ + 2\nu(\bar{\nu}) .$$

这一过程已经在¹³⁶Xe等同位素中被发现,典型的半衰期在10²¹年量级(¹³⁶Xe)。而在超越粒子物理标准模型的新物理过程无中微子双贝塔衰变(neutrinoless double beta decay, NLDBD)中,没有中微子被放出,进而破坏轻子数守恒:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+2} X + 2\beta^+ .$$

目前NLDBD过程虽还没有在实验上被发现,但其半衰期已经被限定在大于10²⁶年量级。NLDBD如果发生,将意味着中微子是其自身的反粒子,也就是马约拉纳中微子。中微子的马约拉纳特性可以揭示中微子质量来源的奥秘,也是轻子创世论的基本假设,进一步为宇宙诞生初期物质和反物质的不对称性提供重要的条件,其深远影响远超中微子物理本身^[1]。

1.2 历史概述

无中微子双贝塔衰变的理论和实验研究可以追溯到中微子理论发展的最初阶段。继1930年泡利(Pauli)提出中微子的想法,1933年费米(Fermi)发表贝塔衰变的理论后,格佩特-梅耶(Goepfert-Mayer)于1935年第一次提出双贝塔衰变的可能性^[2]。几乎在同一时期马约拉纳(Majorana)发现狄拉克方程除了公认的正反粒子解,还允许一种粒子与反粒子完全相同的解,并认为“中微子”可能就是这种粒子。他于1937年发表了这篇著名的马约拉纳费米子的文章^[3]。两年后,法雷(Furry)第一次提出了利用无中微子双贝塔衰变来判断中微子是否为马约拉纳费米子的概念^[4]。

NLDBD在某种意义上可以看作是下面两个虚过程的净结果:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} ,$$

$$\nu + n \rightarrow p + e^- .$$

如果中微子无正反之分, ν 与 $\bar{\nu}$ 相同,则上式中第一个过程产生的反中微子在第二个过程中被吸收,没有中微子被释放。基于当时的理论框架,NLDBD预期的半衰期(10¹⁵年量级)被低估了很多,间接促进了一波实验热潮。实验物理学家在20世纪40、50年代开始在¹²⁴Sn、⁴⁸Ca、¹³⁰Te等同位素中寻找NLDBD^[5]。随着中微子理论和标准模型的发展,物理学家意识到无中微子双贝塔衰变发生的前提条件是虚过程中的 $\bar{\nu}$ 发生手征反转。而手征反转意味着中微子必须有质量,这直接违背了标准模型的描述。因此NLDBD的预期半衰期大大提高,但也提升了其物理意义^[6,7]。1982年Schechter和Valle提出了著名的“黑盒子定理”(也称Schechter—Valle定理),表明NLDBD的发现可以证明中微子为马约拉纳费米子,进一步确立了无中微子双贝塔衰变的重要性^[8]。

实验物理学家也未停止追寻的脚步,试图探测多种同位素的NLDBD,不断推高衰变半衰期的探测灵敏度。著名物理学家吴健雄先生也开展过NLDBD实验,寻找⁴⁸Ca的衰变^[9]。与此同时,多种不同的探测器技术被引入到无中微子双贝塔衰变实验领域,包括低温晶体量热器(cryogenic crystal bolometer, CCB)^[10]和时间投影室(time projection chamber, TPC)^[11]等。在国内,中国科学院高能物理研究所也在北京附近的门头沟地下实验室利用CaF₂闪烁晶体寻找⁴⁸Ca的无中微子双贝塔衰变,并于1991年给出了此同位素半衰期的世界最好限制^[12]。

无中微子双贝塔衰变的又一次转折发生在20世纪末。日本超级神冈实验^[13]和加拿大SNO实验^[14]发现了中微子振荡现象,从而确认中微子具有微小但不为零的质量。这是超越粒子物理标准模型的第一个重要证据,也为无中微子双贝塔衰变要求的中微子手征反转提供了可能性。无中微子双贝塔衰变实验随即蓬勃发展起来,并成为粒子物理与核物理领域最热门的研究方向之一。

1.3 半衰期与中微子有效质量

无中微子双贝塔衰变的速率与马约拉纳中微子的有效质量的平方成正比^[6, 7]:

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

其中 $T_{1/2}^{0\nu}$ 为相应的 NLDBD 的半衰期, $G^{0\nu}$ 为相空间因子, $M^{0\nu}$ 为核矩阵元(nuclear matrix element), m_e 为电子质量, $m_{\beta\beta}$ 为电子中微子的马约拉纳有效质量, 其定义为

$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_{k=1}^3 U_{ek}^2 m_k \right| .$$

其中 U_{ek} 为中微子混合矩阵(通常称为 PMNS 矩阵, 取 Pontecorvo、Maki、Nakawaga、Sakata 4 位理论物理学家的姓氏首字母)中电子中微子相关的三个矩阵元。 m_k 为三个中微子的本征质量。无中微子双贝塔衰变的速率提供了一种独立测量中微子质量的方法。不同同位素的衰变速率也可以通过 $m_{\beta\beta}$ 相互比较和验证。结合上面公式与 PMNS 矩阵, 马约拉纳有效质量与中微子本征质量的关系如图 1 所示。图 1 左(右)边分别对应反(正)质量序的情况。现阶段 NLDBD 实验的灵敏度对应 100 meV 有效质量区间, 下一代的吨级实验希望可以此灵敏度再压低一个数量级, 达到 10 meV 区间, 完全覆盖中微子反质量序相空间。

从衰变速率到马约拉纳有效质量的转换依赖于 $G^{0\nu}$ 和 $M^{0\nu}$ 的精确理论计算。相空间因子 $G^{0\nu}$ 由衰变 Q 值的 5 次方和衰变母核的原子序数 Z 决定, 可以相对精确地通过理论来计算。核矩阵元 $M^{0\nu}$ 则由衰变前后的核子状态以及中间虚态决定。国际上流行的计算核矩阵元的核多体方法包括第一性原理计算、组态相互作用壳模型、准粒子无规相近似、基于密度泛函理论的生成坐标方法、相互作用玻色子模型、投影的 Hartree—Fock Bogoliubov 理论等。中国关于核矩阵元的计算也做出了一些有特色的工作, 如基于相对论密度泛函理论的生成坐标方法和采用准粒子无规相近似等。不同理论计算模型给出的核矩阵元(NME)数值相差

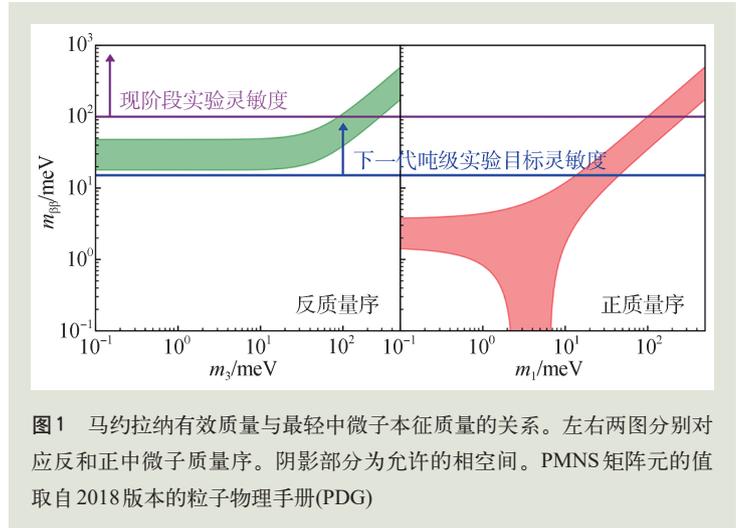


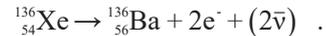
图1 马约拉纳有效质量与最轻中微子本征质量的关系。左右两图分别对应反和正中微子质量序。阴影部分为允许的相空间。PMNS 矩阵元的值取自 2018 版本的粒子物理手册(PDG)

大致为 2—3 倍, 使得一个 NLDBD 衰变速率对应一组有效质量。进一步缩小不同模型计算之间的差距, 是未来理论工作的攻关方向之一。

2 无中微子双贝塔衰变的实验探测

2.1 半衰期探测灵敏度

现在已经在 ^{76}Ge 、 ^{130}Te 、 ^{136}Xe 等 11 种同位素中观测到双中微子双贝塔衰变。在实验室中, 可以利用这些目标同位素来寻找可能的无中微子双贝塔衰变。以 ^{136}Xe 为例, 其衰变通道为



人们可以通过测量两个末态电子能量之和来判断衰变的类型。若衰变过程中有 $\bar{\nu}$ 放出并带走一部分能量, 两个电子的能量之和在统计上为一个连续能谱。反之若没有 $\bar{\nu}$ 带走能量, 两个电子的能量总和为定值, 其能谱在衰变 Q 值附近为一个尖峰。对于 ^{136}Xe 的无中微子双贝塔衰变, 其感兴趣区间(region of interest, ROI)在 $Q = 2.458$ MeV 左右。NLDBD 实验精确记录的 ROI 内的事件数如果比预期的本底事件数有明显超出, 则可确认发现无中微子双贝塔衰变信号。考虑到 NLDBD 的极端稀有的特点, 实验的难点集中在增加可能信号数目和压低预期本底数目两个方面。为了提高信号数目, 现阶段实验的目标同位素质量 M 大都在百公斤到几百公斤量级。各个实验通常都使用富

集丰度 $\eta \approx 90\%$ 的目标元素, 以提高目标原子的数目。比方说, 一吨 90% 丰度 ^{136}Xe 的氙气中, ^{136}Xe 原子的总数约为 4×10^{27} 。同时各个实验的预期取数时间 T 都在 5 年左右, 期望尽可能地增大曝光量。多数实验都利用目标同位素材料本身来建造探测器, 从而可以最大限度地提高探测效率 ϵ 。另一方面, ROI 内本底事件数目 B 由本底水平 b 和 ROI 的宽度决定。其中 b 定义为单位探测器有效质量(kg)、单位能区(keV)、单位时间(year)内的本底数目, 通常的单位写为 c/keV/kg/year (c 表示个数 count)。ROI 的宽度主要由探测器的能量分辨率 σ 决定。假设本底数目 B 较大, 将其涨落 \sqrt{B} 和预期信号数目 S 相比较, 实验物理学家得出一个简单的公式来判定实验的预期半衰期灵敏度 $T_{0\nu}$:

$$T_{0\nu} \approx \eta \cdot \epsilon \sqrt{\frac{M \cdot T}{b \cdot \sigma}}$$

无中微子双贝塔衰变对于探测器的性能、体量、本底水平都有极高的要求。国际上主流的实验往往侧重于其中的一到两个方面。我们将在下一章节详细介绍各个实验的特点以及最新状态。

无中微子双贝塔衰变释放出的一对带有 MeV 量级能量的电子在气体探测器中的径迹具有明显的特征, 也可以用来进一步确认探测到的事件是否为信号, 并去除本底。除了通常使用的电子能量的测量, 我们还可以探测衰变子核(如 ^{136}Ba)来大大压低本底水平 b 。这两种方法都可进一步提高实验的探测灵敏度。

2.2 无中微子双贝塔衰变实验本底要求

现阶段主流目标同位素的无中微子双贝塔衰变的半衰期下限已经限制在 10^{26} 年左右。以前述的吨级氙探测器为例, 预期每年的衰变事例不超过几十个。如果中微子有效质量在 10—15 meV 量级, 每年的事例数在 1 个以下。这就决定了无中微子双贝塔衰变实验的极高挑战性。

无中微子双贝塔衰变实验等稀有事例实验都

必须在地下实验室开展, 以期减少宇宙射线缪子(muon)的影响。在地球表面, 缪子的平均通量大约为每分钟每平方厘米一个, 在单位距离下损失约 2 MeV 左右的能量, 其对于稀有事例实验的影响是多方面的。一方面, 缪子有很小(但不为零)的概率落入 ROI, 对探测器灵敏度有直接影响。另一方面, 缪子会引发探测器中的一系列 ROI 区间的 β/γ 本底, 需要引入缪子事件相关的死时间(毫秒量级)来去除此类缪子引发的本底。如果缪子事件率过大, 死时间的影响是致命性的。另外探测器材料会被宇宙射线缪子激发而产生放射性元素, 持续地给实验引入本底。此类宇生放射性也是稀有事例实验最大的挑战之一。因此, 无中微子双贝塔衰变实验必须放置在地下实验室中, 利用岩石屏蔽掉绝大多数的宇宙射线缪子。比如我国正在大力推进的四川锦屏地下实验室, 其平均岩石覆盖深度约为 2400 m, 可以将缪子通量降低约 8 个数量级, 基本去除了宇宙射线对实验的影响。

无中微子双贝塔衰变实验对探测器本身的天然放射性也有极高的要求。探测器材料中超痕量的铀(^{238}U)、钍(^{232}Th)系列衰变链释放出多组不同能量的 α 、 β 、 γ 粒子。其中 MeV 能段的 α 与 γ 粒子对无中微子双贝塔衰变实验的影响最大。靠近探测器灵敏体积的关键部件, 其铀和钍含量要低于 10^{-12} g/g 的量级。一般来说, 经过挑选的高纯无氧铜(OFHC)、聚酰亚胺(Kapton)、聚四氟乙烯(Teflon)等材料才可以满足要求。因此探测器的各个部件都需要经过筛查, 确保极低的铀和钍含量。这对实验本身和相关的低放射性材料筛查技术都提出了很大的挑战。

3 主要探测器技术及实验概况

鉴于无中微子双贝塔衰变的重要物理意义, 寻找此类衰变已经成为粒子物理与核物理实验的重要方向之一。国际上大型地下实验室都在开展一个甚至多个无中微子双贝塔衰变实验项目。现阶段多数实验的体量都在百公斤量级, 主要同位

素的半衰期限制都在 10^{26} 年左右。未来5—10年内，NLDBD实验整体发展目标为吨级探测器，从而把半衰期灵敏度提高到 10^{27} — 10^{28} 年，马约拉纳有效质量上限确定在15 meV以下。下面我们就国际上各个实验组采用的不同探测技术进行简要描述。

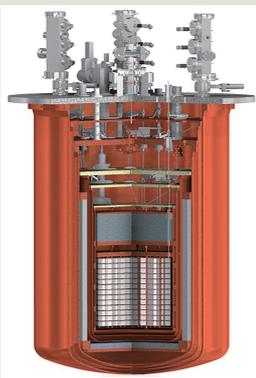


图2 CUORE 稀释制冷机以及探测器结构示意图

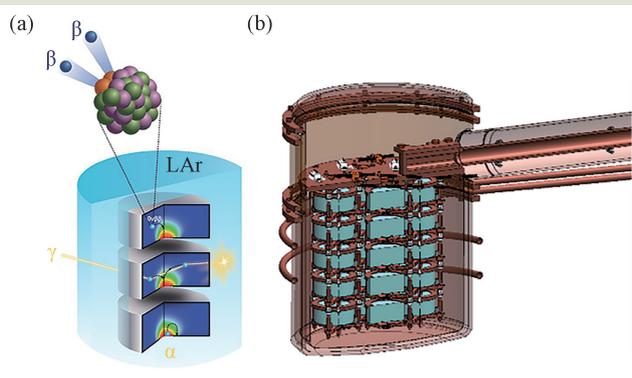


图3 (a) GERDA 高纯锗探测器模块以及其外部液氩屏蔽示意图；(b) Majorana Demonstrator 探测器以及铜屏蔽体

3.1 低温晶体量热器

低温晶体量热器技术(CCB)能够精确测量极低温度下MeV量级的事例引起的微小温度变化，从而精确测量事例的能量。国际上最大的基于CCB技术的NLDBD实验为意大利的CUORE实验(图2)。CUORE利用988块5 cm边长的未富集二氧化碲(TeO_2)晶体(包含约200 kg ^{130}Te)来寻找其无中微子双贝塔衰变。整个探测器放置世界上最大的稀释制冷机内，稳定运行在10 mK的低温下。在此温度下，每MeV的能量沉积可使单个晶体温度升高约0.1 mK。通过精确地测量此温度变化，CUORE可以在衰变 Q 值附近达到0.2%的半高全宽(full width at half maximum, FWHM)能量分辨率。CUORE在ROI附近的本底水平受晶体和框架结构表面的 α 粒子影响，在约0.01 c/keV/kg/year的水平。目前CUORE实验正在运行，最新给出的半衰期限制为 3.2×10^{25} 年(90% CL, 置信区间)^[15]。预期CUORE将积累5年的数据，其半衰期灵敏度可达 9.5×10^{25} 年，对应马约拉纳有效质量为0.04—0.1 eV。

处于预研状态的CUPID是CUORE的下一代实验，它将利用 Li_2MoO_4 (LMO)闪烁晶体来寻找 ^{100}Mo 的无中微子双贝塔衰变^[16]。CUPID利用 α 粒子和电子在LMO晶体引发的闪烁光强度的不同来区分两类事件，大大降低困扰CUORE的 α 本底。韩国的AMoRE实验同样利用光、热双读出技术来寻找 ^{100}Mo 的无中微子双贝塔衰变，目前正

在运行小型的原型探测器^[17]。

3.2 高纯锗探测器

位于意大利LNGS的GERDA实验和美国Sanford地下实验室的Majorana Demonstrator(MJD)实验利用高纯锗(HPGe) γ 谱仪来寻找 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变。两个实验各自发展了独特的屏蔽技术。GERDA将富集高纯锗晶体放入液氩杜瓦内，利用液氩作为主动屏蔽，去除大量外部引入的 γ 本底(图3(a))。MJD实验在地下利用电解技术生产出国际上最干净的高纯无氧铜，用作屏蔽体(图3(b))。GERDA目前运行35.6 kg的晶体，其最佳能量分辨率可达3.0 keV，本底水平低至 5.6×10^{-4} c/keV/kg/year^[18]。MJD目前的能量分辨率可达2.53 keV，本底达到约为 4.7×10^{-3} c/keV/kg/year的水平^[19]。GERDA、Majorana和CDEX合作组联合组建LEGEND合作组，计划开展吨量级 ^{76}Ge 无中微子双贝塔衰变实验。LEGEND合作组第一阶段LEGEND-200实验采用200 kg富集 ^{76}Ge 晶体，在意大利LNGS实验室开展研究。第二阶段LEGEND-1000的吨级实验预期半衰期灵敏度达 10^{28} 年以上，目前实验地点待^[20]。

3.3 大型液闪探测器

大型液闪探测器的代表是日本KamLAND-Zen实验^[21]和加拿大的SNO+实验^[22]。两个实验的

前身分别是辉煌的KamLAND和SNO中微子振荡实验。KamLAND实验主体为一个直径13 m、重一千吨、有近2000支光电倍增管的高纯液体闪烁体探测器。KamLAND-Zen利用KamLAND已有的光电倍增管、电子学、本底控制等各项设施,在其内部放入一个直径3.1 m的“气球”并充入掺 ^{136}Xe 的液体闪烁体(图4(a))。初期KamLAND-Zen掺入了400 kg ^{136}Xe ,取得了 1.07×10^{26} 年的世界领先无中微子双贝塔衰变半衰期限制^[23]。近期它已经开始了800 kg ^{136}Xe 的运行。SNO+则在其全部液体闪烁体中掺入 ^{130}Te ,目前实验正在调试中,将于近期开始取数^[22](图4(b))。

3.4 氙时间投影室探测器

惰性气体氙具有独特的发光电离性质,是无中微子双贝塔衰变以及暗物质探测广泛使用的探测器介质。国际上基于 ^{136}Xe 同位素的时间投影室(TPC)实验包括美国的EXO-200液氙探测器^[24]和西

班牙的NEXT气氙探测器^[25]。

EXO-200实验位于美国新墨西哥州,使用约175 kg的含81%丰度 ^{136}Xe 的液氙作为探测目标(图5(a))。探测器使用了TPC技术,在液体中加上漂移电场,电离的电子将从产生位置漂移到阳极,通过电子的漂移时间和在阳极上的分布对事件的顶点进行三维位置重建。为了提高能量分辨率,EXO-200实验同时读出闪烁光信号和电离信号。EXO-200在2019年发表的无中微子双贝塔衰变的半衰期限制达到了 3.5×10^{25} 年量级。目前EXO-200实验组正在筹划未来升级为5吨级的nEXO实验。

NEXT实验利用高压气氙TPC来探测 ^{136}Xe 的双贝塔衰变(图5(b))。探测器在15 bar的气压下运行,且内部含有的 ^{136}Xe 富集度为90%。探测器两端分别为光电倍增管(PMT)及硅光电倍增管(SiPM)组成的读出平面,分别记录粒子能量及径迹。目前,NEXT实验正处于探测器的研发阶段。

3.5 其他实验技术

法国的SuperNEMO实验不同于前面提到的各个实验,使用了探测器与双贝塔衰变放射源分开的策略^[26]。含有目标同位素的箔片夹在两侧的径迹探测器和量能器之间。无中微子双贝塔衰变释放出的两个电子的三维径迹和能量可以被完整地记录下来。SuperNEMO的探测效率不如其他实验高,但它可以灵活地改变目标同位素的选择。SuperNEMO现在处于研发示范探测器阶段。

日本CANDLES实验利用 CaF_2 晶体闪烁体来寻找 ^{48}Ca 的无中微子双贝塔衰变^[27]。 ^{48}Ca 具有极高的 Q 值,因此其相空间因子很高,而且实验本征ROI区间的 γ 本底很低。但是 ^{48}Ca 自然丰度极低,约为0.2%,而且富集非常困难。因此CANDLES实验组花费了大量的资源来研究富集问题。

4 国内无中微子双贝塔衰变实验现状

4.1 锦屏地下实验室

国内无中微子双贝塔衰变实验的发展得益于中国锦屏地下实验室(China Jin-Ping Underground

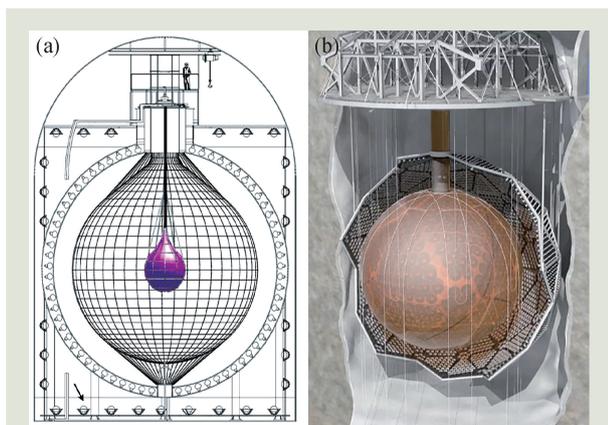


图4 (a)KamLAND-Zen探测器示意图;(b)SNO+探测器示意图

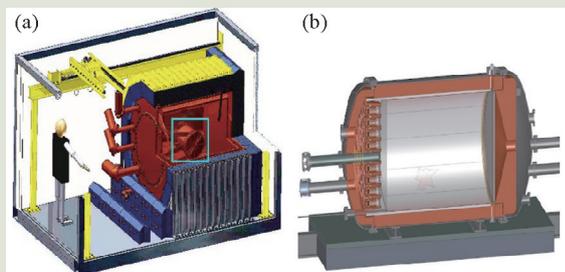


图5 (a)EXO-200探测器示意图;(b)NEXT探测器设计示意图

Laboratory, CJPL)的建设。CJPL位于四川省锦屏山下,垂直岩石覆盖深度约为2400 m,为世界上最深的地下实验室^[28]。实验室依托雅砻江水电公司修建的约18 km长的交通隧道而建,可以方便大型设备进出。实验室二期工程将建成8个大型实验厅,每个厅长65 m,宽14 m,高14 m,可以容纳大型实验(图6)。如前所述,锦屏地下实验室的缪子通量比地表低8个数量级,是开展无中微子双贝塔衰变实验的理想场所。

4.2 PandaX 氙时间投影室实验

由上海交通大学牵头,国内外多家单位参与的PandaX (Particle and Astrophysical Xenon TPC)合作组,自2009年起发展了一系列液体氙TPC来寻找暗物质粒子,近期开始使用高压气体TPC和液体TPC两种技术寻找¹³⁶Xe的双贝塔衰变^[29, 30]。

气氙方向,PandaX组正在积极研发PandaX-III探测器,利用微结构气体探测器Micromegas精确读出可能的无中微子双贝塔衰变信号的径迹,提高筛选信号和压低本底的能力^[29],PandaX-III首个探测器本底低至 10^{-4} c/keV/kg/year量级^[31, 32]。PandaX-III将于近期开始运行包含约150 kg富集¹³⁶Xe气体的首个探测器,探测器的电荷放大和读出平面由52块20 cm²的Micromegas微结构探测器组成,其预期半衰期灵敏度可达 9×10^{25} 年。目前合作组已经建造了原型探测器(图7)^[33],现在正在设计建造主探测器。未来吨级实验将进一步

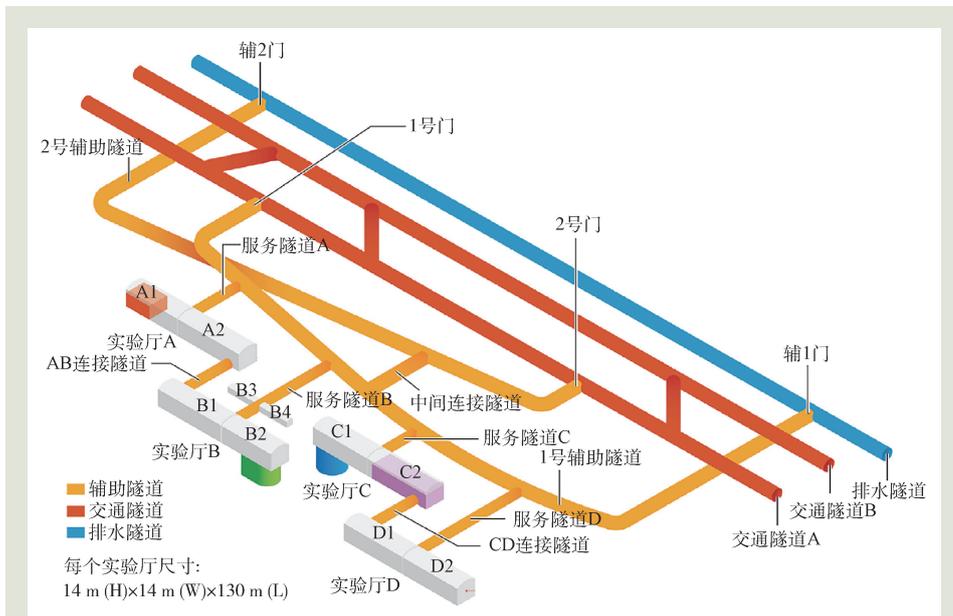


图6 中国锦屏地下实验室二期工程设计图

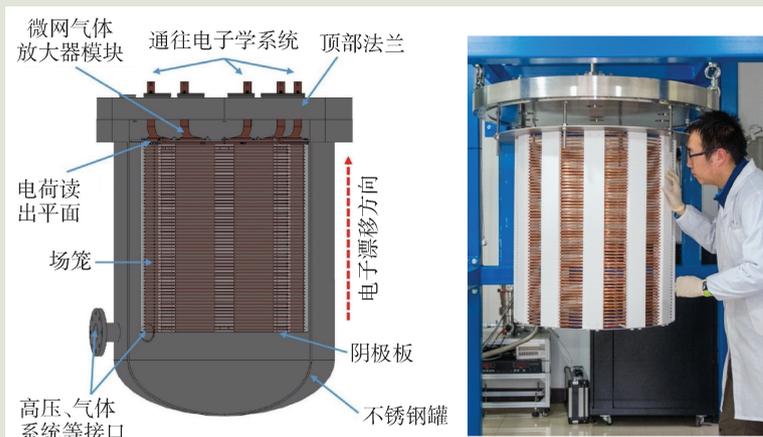


图7 PandaX-III原型探测器设计结构图(左)与实物图(右)

提高能量分辨率,压低本底,将半衰期灵敏度提高到 1×10^{27} 年,其对应的中微子有效质量约为20—50 meV。

同时PandaX合作组也在积极研发利用双相型液氙探测器来寻找无中微子双贝塔衰变。2019年合作组利用PandaX-II的500 kg级探测器(自然氙)发表了首个双相型氙探测器的无中微子双贝塔衰变结果^[30]。PandaX-II的物理取数从2016年初至2018年8月,是国际上最大的暗物质探测器之一。PandaX利用约400天的数据得出的半衰期限制为 2.1×10^{23} 年,对应的马约拉纳质量上限在1.4—3.7 eV的范围内(90% CL)。正在建设的Pan-

daX-4T 实验将比 PandaX-II 的有效质量大约 8 倍, 本底控制与自屏蔽效应也将更加有效^[34]。PandaX-4T 实验将利用 3 年的有效取数时间, 对 ^{136}Xe NLDBD 的半衰期做出限制, 其灵敏度可以达到 10^{25} 年。未来计划建设的 30 吨甚至更大的液氙探测器, 包含约多吨级的 ^{136}Xe , 其灵敏度可以覆盖中微子质量的近简并区域和反质量序区域所对应的马约拉纳中微子有效质量。

4.3 CDEX 高纯锗实验

由清华大学牵头的 CDEX(China Dark Matter Experiments) 合作组成立于 2009 年, 利用高纯锗探测器阵列来进行轻质量暗物质直接探测和 ^{76}Ge 无中微子双贝塔衰变实验^[35]。CDEX 实验组利用 1 kg 未富集的点电极高纯锗探测器积累的 300 余天的曝光量, 得出了 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变半衰期下限为 6.4×10^{22} 年, 相应的马约拉纳有效质量限制在 5 eV 以下(90% CL), 这是国内第一个 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变结果。

CDEX 未来将建立一个百公斤级 ^{76}Ge 富集的高纯锗探测器阵列系统, 并参与 LEGEND 国际合作组, 争取落户中国, 开展吨级实验。目前 CDEX 正在更加深入研究高纯锗探测器在无中微子双贝塔衰变 ROI 附近的放射性本底种类、来源和相对强度, 并研发相应本底控制方法。同时合作组也在积极研发 ^{76}Ge 富集高纯锗晶体生长和探测器制作的工艺, 希望在地下实验室完成全部流程, 大大降低宇生放射性的影响。CDEX 百公斤级探测器阵列的预期本底可以达到 10^{-3} c/keV/kg/year 以下, 给出国际水平的半衰期下限结果。

4.4 CUPID-China 低温晶体量热器技术

近年来低温晶体量热器技术在国内开始蓬勃发展。由复旦大学主导的 CUPID 中国合作组希望将 CUPID 技术引入国内, 并结合国内在晶体材料提纯和晶体生长方面的专长, 发展国内的低温晶体量热器实验。CUPID-China 预期采用 LMO 闪烁晶体和光—热双读出技术在锦屏地下实验室寻

找 ^{100}Mo 无中微子双贝塔衰变。目前合作组已经开始研发生长 LMO 晶体, 并与国外单位合作, 首次完成了 LMO 晶体低温晶体量热器的组装与调试。同时 CUPID-China 已经展开了低温晶体量热器、电阻型温度传感器、读出电子学、晶体发光性质等多方面工作的研发^[36]。合作组还将购置多台稀释制冷机, 在地表和锦屏地下实验室建设低温实验平台以及相关的屏蔽系统, 为探测器研发提供支撑平台。CUPID-China 实验预期 Q 值区间可以达到 10^{-4} c/keV/kg/year 的国际领先本底水平。

4.5 NvDEX 离子时间投影室技术

NvDEX(No neutrino Double-beta-decay Experiment) 实验由中国科学院近代物理研究所主导, 将使用高压 SeF_6 气体 TPC 来寻找 ^{82}Se 的无中微子双贝塔衰变。和普通 TPC 不同, NvDEX 探测器着重测量 MeV 量级信号电离出的阳离子而不是电子。阳离子漂移时的扩散效应更小, 因此探测器有更好的内禀径迹分辨率, 可以更加精确地测量单个事件的径迹, 用于区分信号和本底。利用自主研发的极低噪声的 Topmetal 芯片^[37], NvDEX TPC 可以读出不经过雪崩放大的原初电离电荷, 以期得到更好的能量分辨率。NvDEX 实验计划在未来 3 年实现一个可以稳定运行的小型样机, 5 年后在锦屏地下实验室开始 200 kg 探测器取数并逐步扩展到吨量级。假设使用富集吨级 $^{82}\text{SeF}_6$ 气体, 以及在 Q 值附近的 1% FWHM 能量分辨率, NvDEX 可以达到 10^{28} 年量级的半衰期灵敏度。

4.6 未来 JUNO 无中微子双贝塔衰变研究

中国科学院高能物理研究所领导的江门中微子实验(JUNO)将在广东省江门市建成一个两万吨量级的大型液体闪烁体探测器, 相关基础设施与探测器建设正如火如荼地开展。JUNO 测量附近核电站释放的电子反中微子, 开展测定中微子质量顺序和精确测量中微子混合参数等多项中微子前沿研究。相比于 KamLAND 和 SNO, JUNO 体量更大, 探测器性能更加优异。JUNO 合作组已

经开展相关预研,考虑在其主要物理目标完成之后,开展无中微子双贝塔衰变研究。假设在JUNO内部的有效体积内掺杂5吨的 ^{136}Xe ,JUNO可以利用5年的时间,半衰期限制达到 5.6×10^{27} 年,成为最灵敏的无中微子双贝塔衰变之一^[38]。JUNO合作组近期着重研发在JUNO液体闪烁体掺杂 ^{130}Te 这一自然丰度更高的目标同位素^[39]。

5 结论与展望

无中微子双贝塔衰变通过核物理过程研究中微子的基本性质,成为粒子物理与核物理的最有趣的交叉方向之一。在粒子物理方面,无中微子双贝塔衰变过程研究超出标准模型的新物理。它的发现将直接验证中微子的马约拉纳特性,并对中微子质量测量提供一种独立的方法。这个衰变过程前后的轻子数不守恒,因此其意义超出中微子物理的范畴。马约拉纳粒子的存在,也可以为宇宙中正反物质不对称性提供重要的条件。在核物理方面,无中微子双贝塔衰变的速率依赖于核矩阵元的精确计算,需要精准的核物理模型,甚至第一性原理的精确计算。同时衰变初态、末态、各个中间态的核子状态以及相关参数,也需要利用核物理方法单独研究,并用于核矩阵元的计算。因此在两个领域,无中微子双贝塔衰变都大有可为,前景可期。

国际上无中微子双贝塔衰变的研究热潮还将

持续推进,世界上主要参与国家都在加紧部署下一代吨级实验。日本以KamLAND-Zen实验为核心,有明确的路线图^[40]。美国早在2015年就把无中微子双贝塔衰变实验确立为下一代核物理实验最重要的新方向^[41],现在正在进一步挑选合适的实验技术,进行重点支持。欧洲正在进行的未来粒子物理和核物理规划,无中微子双贝塔衰变也是重要的议程之一,预期会得到重点支持^[42]。未来一二十年内,领域的主要目标是发现无中微子双贝塔衰变或者将其半衰期对应的马约拉纳有效质量降低到15 meV量级。

无中微子双贝塔衰变在国内属于起步阶段,但是锦屏地下实验室二期建设作为国家重大科学研究基础设施,给了无中微子双贝塔衰变实验巨大的机会。现在已经有多个不同的实验设想,并开展了不同实验技术的研发,大大提高了无中微子双贝塔衰变在国内的辨识度。我们期望未来有一到两个实验可以尽快达到吨级,在锦屏这一自然条件最优越的地下实验室做出世界一流的无中微子双贝塔衰变研究。

致谢 感谢张焕乔、季向东、刘江来老师对本文初稿提出的宝贵意见;孟杰与邢志忠老师在理论部分给予的具体指导;黄焕中、许怒、岳骞、温良剑、曾志等各位老师提供的国内实验现状相关的宝贵素材与修改建议。同时感谢杜海燕、谢忱同学的认真校对。

参考文献

- [1] Avignone F T III, Elliott S R, Engel J. *Rev. Mod. Phys.*, 2008, 80: 481
- [2] Goeppert-Mayer M. *Phys. Rev.*, 1935, 48: 512
- [3] Majorana E. *Nuovo Cim.*, 1937, 14: 171
- [4] Furry W H. *Phys. Rev.*, 1939, 56: 1184
- [5] Haxton W C, Stephenson G J. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 1984, 12: 409
- [6] Doi M, Kotani T, Nishiura H *et al.* *Prog. Theor. Phys.*, 1981, 66: 1739 [勘误: *Prog. Theor. Phys.*, 1982, 68: 347]
- [7] Doi M, Kotani T, Nishiura H *et al.* *Prog. Theor. Phys.*, 1981, 66: 1765 [勘误: *Prog. Theor. Phys.*, 1982, 68: 348]
- [8] Schechter J, Valle J W F. *Phys. Rev. D*, 1982, 25: 2951
- [9] Bardin R K, Gollon D J, Ullman J D *et al.* *Phys. Lett. B*, 1967, 26: 112
- [10] Fiorini E, Niinikoski T O. *Nucl. Instrum. Meth.*, 1984, 224: 83
- [11] Elliott S R, Hahn A A, Moe M K. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59: 2020
- [12] You K *et al.* *Phys. Lett. B*, 1991, 265: 53
- [13] Fukuda Y *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81: 1562
- [14] Ahmad Q R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89: 011301
- [15] Adams D Q *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2020, 124: 122501
- [16] Armstrong W R *et al.* CUPID pre-CDR. 2019, arXiv: 1907.09376
- [17] Alenkov V *et al.* *Eur. Phys. J. C*, 2019, 79(9): 791
- [18] Agostini M *et al.* *Science*, 2019, 365: 1445

[19] Alvis S I *et al.* Phys. Rev. C, 2019, 100(2):025501

[20] D'Andrea V. Neutrinoless Double Beta Decay Search with ⁷⁶Ge: Status and Prospect with LEGEND. In 54th Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, La Thuile, Italy, March 16-23, 2019

[21] Gando Y. PoS, 2018, NOW2018:068

[22] Leming E. PoS, 2019, NOW2018:027

[23] Gando A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 117(8): 082503[Addendum: Phys. Rev. Lett., 2016, 117: 109903]

[24] Anton G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123(16): 161802

[25] Simón A. J. Phys. Conf. Ser., 2020, 1342(1):012046

[26] Noblet T L. J. Phys. Conf. Ser., 2020, 1342(1):012029

[27] Umehara S *et al.* PoS, 2017, INPC2016:246

[28] Cheng J P *et al.* Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 2017, 67:231

[29] Chen X *et al.* Sci. China Phys. Mech. Astron., 2017, 60(6): 061011

[30] Ni K X *et al.* Chin. Phys. C, 2019, 43(11):113001

[31] Qiao H, Lu C Y, Chen X *et al.* Sci. China Phys. Mech. Astron., 2018, 61(10):101007

[32] Galan J *et al.* Topological background discrimination in the PandaX-III neutrinoless double beta decay experiment. 2019, arXiv: 1903.03979

[33] Lin H *et al.* JINST, 2018, 13(06):P06012

[34] Zhang H G *et al.* Sci. China Phys. Mech. Astron., 2019, 62(3): 31011

[35] Wang L *et al.* Sci. China Phys. Mech. Astron., 2017, 60(7): 071011

[36] Xue M X, Zhang Y L, Peng H P *et al.* Temperature dependence of CdMoO₄ scintillation properties for the search of ¹⁰⁰Mo and ¹¹⁶Cd neutrinoless double beta decay. 2016 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference: Strasbourg, France, 2016. p8069797

[37] An M M *et al.* Nucl. Instrum. Meth. A, 2016, 810:144

[38] Zhao J, Wen L J, Wang Y F *et al.* Chin. Phys. C, 2017, 41(5): 053001

[39] Cao J *et al.* Chin. Phys. C, 2020, 44(3):031001

[40] Ozaki H, Takeuchi A. Nucl. Instrum. Meth. A, 2020, 958: 162353

[41] Aprahamian A *et al.* Reaching for the horizon: The 2015 long range plan for nuclear science. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1296778>

[42] Giuliani A, Gomez Cadenas J J, Pascoli S *et al.* Double Beta Decay APPEC Committee Report. 2019, arXiv:1910.04688



一站式真空低温设备 及应用方案




VAT角阀



VAT插板阀



标准件



腔体




普发分子泵



普发质谱仪



离子泵 吸气泵



安捷伦离子泵




住友低温泵



住友制冷机




VACGEN 位移台



VACGEN 微漏阀



TORR SCIENTIFIC LTD



TSL视窗

www.zlvacuum.com

更多产品和联系方式可查看



联系人
刘鑫