

综述

液氩探测器在稀有事例探测中的应用和发展*

郑昊哲¹⁾ 刘圆圆^{1)†} 王力^{2)‡} 程建平¹⁾

1) (北京师范大学核科学与技术学院, 生态环境部 北京师范大学 锦屏极低辐射本底测量联合实验室,

射线束技术教育部重点实验室, 北京 100875)

2) (北京师范大学物理学系, 北京 100875)

(2022 年 10 月 27 日收到; 2022 年 12 月 10 日收到修改稿)

稀有事例探测是近几年热门的粒子物理前沿课题, 如暗物质、无中微子双贝塔衰变、中微子-核子相干弹性散射等实验都在逐渐被规划和实施. 进行稀有事例探测要求探测器有极佳的性能, 同时对环境本底有很高的要求, 因此探测器和相关材料的选择是稀有事例探测的一个重要课题. 液氩因为成本低、闪烁性能好、体积限制较小等优势成为稀有事例探测器的一种重要介质. 经过几十年的发展, 单相液氩闪烁体探测器和两相氩时间投影室成为两种常见的液氩探测器类型, 并开始被国内外各实验组应用于稀有事例探测实验中. 本文首先对两种常见的液氩探测器的原理和特性进行介绍, 然后详细介绍国内外相关稀有事例探测实验组对液氩探测器的研究和应用现状以及未来规划, 最后讨论未来液氩探测器在稀有事例探测中的应用前景和优化方向.

关键词: 稀有事例探测, 闪烁体探测器, 时间投影室, 反符合测量**PACS:** 29.40.-n, 29.40.Mc, 95.35.+d, 23.40.-s**DOI:** 10.7498/aps.72.20222055

1 引言

在粒子物理实验中, 通常把对反应截面极小或半衰期非常长的核反应或核衰变过程的测量称为稀有事例探测. 目前国际上较为关注的稀有事例探测实验包括暗物质 (dark matter, DM) 探测^[1]、无中微子双贝塔衰变^[2] (neutrinoless double beta decay, $0\nu\beta\beta$) 测量、中微子-核子相干弹性散射^[3] (coherent elastic neutrino-nucleus scattering, CE ν NS) 测量等. 这些稀有事例探测实验有的与超出粒子物理标准模型的新物理密切相关, 有的是对标准模型的验证和扩充, 是当今前沿物理的热门课题.

稀有事例由于发生概率极低, 因此这类实验对实验环境以及探测器的要求极为苛刻. 对于实验环境, 稀有事例探测实验通常需要在很深的地下实验

室进行, 以便降低宇宙线对实验的影响, 同时需要采取建设屏蔽体、放射性筛选等多种方式尽可能地减少实验装置自身以及周围材料产生的放射性本底. 对于探测器, 首先其灵敏区质量要尽量大, 这样可以有效地提高实验的曝光量, 从而增加待测稀有事例的事例率; 其次, 探测器的能量分辨率要尽可能高, 因为稀有事例探测结果一般是基于对实验测量能谱的分析, 高的能量分辨率有利于感兴趣能区目标信号和本底信号的甄别与筛选. 最后, 探测器自身的本底水平也应当尽可能低, 最好同时还具备粒子甄别能力. 此外, 对于目标信号极其微弱的 DM 直接探测、CE ν NS 测量等还需要探测器具有低的能量阈值. 基于稀有事例探测对探测器的共性要求, 目前稀有事例探测实验中常用的探测器包括液态惰性气体探测器^[4,5]、高纯锗探测器^[6]、极低温量热器^[7]等. 不同探测器的优势和不足如表 1 所列.

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1604701) 和国家自然科学基金 (批准号: 1222200227) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yyliu@bnu.edu.cn‡ 通信作者. E-mail: wangl@bnu.edu.cn

表 1 稀有事例探测常用探测器类型对比
Table 1. Comparison of detector types in rare event detection.

	液态惰性气体探测器		高纯锗探测器	极低温量热器
	液氩探测器	液氙探测器		
优势	成本低, 有粒子甄别能力, 探测效率高	有粒子甄别能力, 探测效率高	低阈值, 极高能量分辨率	高能量分辨率, 有粒子甄别能力
缺点	能量分辨率相对较低	成本较高, 能量分辨率相对低	成本较高, 探测器生产工艺复杂, 单个晶体质量增加困难	需要极低温环境 (mK量级)

得益于较低的成本、成熟的提纯技术、良好的闪烁性能以及较强的粒子甄别能力, 液氩探测器在稀有事例探测中有着十分广泛的应用. 例如暗物质实验中 Darkside 实验组采用了气液两相氩时间投影室给出了 $1.8\text{--}3.0\text{ GeV}/c^2$ 区间弱相互作用大质量粒子 (weakly interacting massive particles, WIMPs) 测量目前最灵敏的结果^[8]; 无中微子双贝塔衰变实验中锗探测器阵列 (the germanium detector array, GERDA) 实验组采用液氩闪烁体探测器作为反符合系统, 给出了目前 ^{76}Ge 的 $0\nu\beta\beta$ 半衰期限制的世界最好结果^[9]; CE ν NS 实验中 COHERENT 实验组使用液氩闪烁体探测器给出了第一个使用氩核作为靶核的 CE ν NS 结果^[10].

液氩开始被作为电离辐射探测器的灵敏材料始于 20 世纪 40 年代, 当时主要的研究方向是液氩的电离特性以及将液氩用作电离室介质的可行性^[11]. 1954 年, Marshall^[12] 首次使用液氩电离室测量了高能 β 粒子. 在随后的研究和应用中, 为了解决液氩产生的电离信号的放大问题, 气液两相氩探测器逐渐得到发展, 读出液氩电离信号的同时也读出气相的电离信号^[13]. 此外, 为了获取粒子的更多信息, 液氩时间投影室 (time projection chamber, TPC) 技术也开始发展起来^[14]. 时间投影室除了可以读出电离信号以外, 还可以读取粒子的漂移时间, 从而可以确定粒子的径迹. 宇宙线和地下稀有信号成像 (imaging cosmic and rare underground signals, ICARUS) 实验组最早尝试使用液氩 TPC 来探测中微子. 1977 年, 该实验组的 Rubbia^[14] 提出了构建液氩 TPC 的设想. 之后 ICARUS 实验组就开始进行建设液氩 TPC 的尝试, 到 20 世纪 90 年代, 该实验组建成了 3 t 规模的液氩时间投影室^[15,16].

除了对电离信号的探测, 液氩的闪烁光信号也可用于粒子探测. 20 世纪 70 年代末到 80 年代初, 开始对液氩的闪烁光特性进行研究, 发现了液氩闪烁光的快慢成分, 也初步发现了液氩闪烁光信号的

粒子甄别能力^[17]. 1999 年, ICARUS 实验组第一次在液氩时间投影室中收集闪烁光信号, 发现读出闪烁光信号也可以获得粒子的漂移时间, 从而确定粒子径迹^[18].

21 世纪以来, 围绕稀有事例探测, 液氩探测器得到了快速的发展. 单相液氩闪烁体探测器开始在稀有事例探测中获得应用, 利用氩波形甄别的暗物质实验 (dark matter experiment using argon pulse-shape discrimination, DEAP) 等实验组已经使用单相液氩闪烁体探测器开展了多年的暗物质探测实验^[19]. 同时, 在气液两相氩探测器和 TPC 的技术的基础上发展出了气液两相氩 TPC 探测器, DarkSide 等实验组^[20] 使用气液两相 TPC 开展了暗物质探测研究. 除此以外, GERDA 实验组^[9] 在第二阶段实验中增加了基于液氩闪烁体探测器的反符合系统, 显著降低了实验本底.

经过几十年的发展, 液氩探测器技术取得了巨大的进步, 发展出了几种成熟的探测器类型, 并在稀有事例探测领域获得了重要的应用. 本文围绕液氩探测器在稀有事例中的应用和发展, 首先介绍液氩的基本性质以及当前主要应用的单相液氩闪烁体探测器和气液两相氩 TPC, 然后根据不同的应用类型介绍国内外相关实验组使用液氩探测器进行稀有事例探测工作的现状和进展. 最后给出未来液氩探测器的优化方向, 以及未来在稀有事例探测实验中的应用前景.

2 液氩探测器

2.1 液氩的基本性质

氩元素是 18 号元素, 常温下为气态, 沸点约为 87 K. 液氩通常由大气中分离的氩气液化产生, 密度为 1.40 g/cm^3 . 氩的主要天然同位素有 ^{40}Ar , ^{38}Ar , ^{36}Ar , 它们都是稳定核素. 在大气环境中, 存在氩的宇生同位素 ^{39}Ar , 它是 ^{40}Ar 与穿过大气层的宇宙射

线作用产生的核素。 ^{39}Ar 会发生 β 衰变, 半衰期为 269 年, Q 值为 565 keV. ^{39}Ar 的放射性是液氩探测器在低能区域一个重要的本底.

如图 1 所示, 当电离辐射进入液氩时, 会使液氩电离或者激发, 转化为分子激发态 (Ar_2^*). 二聚态氩原子不稳定, 会经过退激过程回到基态, 退激过程中会释放波长约为 128 nm 的闪烁光 [21]. 因此, 液氩探测器既可以通过闪烁光信号, 也可以通过建立漂移电场收集电子或氩离子来测量入射粒子.

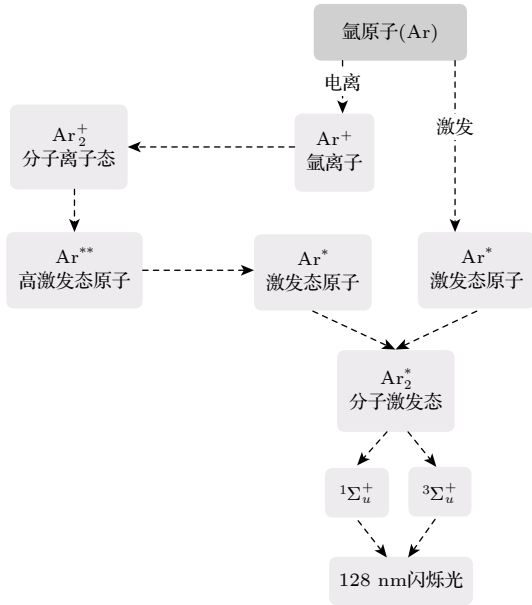


图 1 激发态氩原子形成原理
Fig. 1. Formation mechanism of excited argon.

表 2 列出了液氩与闪烁性能相关的主要参数. 液氩的光产额约为 40000 光子/MeV [22], 与经典的无机和有机闪烁体相比要大得多. 闪烁光产生过程包括上升过程和衰减过程, 通常认为上升过程是瞬时过程, 而衰减过程服从指数衰减规律. 对于液氩来说, 它的闪烁光包含快慢两种成分, 液氩的快慢成分衰减时间常数分别是 6 ns 和 1.59 μs [23]. 当入射粒子是不同类型的粒子时, 液氩产生的闪烁光时间响应曲线是不一样的, 这表明液氩闪烁光中快慢成分的比例和入射粒子种类有关 [23]. 利用这一点可以发展出波形甄别 (pulse shape discrimination, PSD) 技术, 用于甄别入射信号中的不同粒子.

需要注意的是液氩的闪烁性能受到杂质浓度等因素影响变化较大. 弱相互作用大质量粒子氩实验组 (wimp argon programme, WArP) 研究结果表明, 液氩中氮气、氧气杂质的存在会显著降低液

氩的光子产额 [25,26]. 光子产额对于辐射能谱的测量有直接的影响, 因此控制液氩中相关杂质的浓度对探测器性能提高至关重要. 研究结果还表明氮气、氧气杂质对液氩的慢成分衰减常数也有较大影响 [25,26]. 当杂质浓度过大时, 采用 PSD 技术来进行入射粒子种类的甄别就很难实现. 此外, 液氩中杂质的存在会影响闪烁光的传输过程, 导致闪烁光能传播的距离减小. 根据氩暗物质实验 (the argon dark matter experiment, ArDM) 实验组对液氩闪烁光衰减长度与杂质浓度关系的研究, 液氩闪烁光的衰减长度随杂质浓度增加而迅速下降 [27]. 因此从能谱测量和粒子甄别等要求考虑, 都需要对液氩中的杂质浓度进行控制.

表 2 液氩闪烁光特性 [24]
Table 2. Scintillation properties of liquid argon.

闪烁特性相关物理量	符号	数值
光产额/(光子 $\cdot\text{keV}^{-1}$)	Y	41 ± 2
发光峰值波长/nm	λ_{max}	128
单态时间常数/ns	τ_s	6
三重态时间常数/ μs	τ_t	1.59
β 事件快慢成分比	$I_s/I_t (\text{e}^-)$	0.3
α 事件快慢成分比	$I_s/I_t (\alpha)$	1.3
裂变碎片事件快慢成分比	$I_s/I_t (\text{ff})$	3

2.2 液氩探测器类型

目前稀有事例探测中使用较多的氩探测器主要有两类, 分别是单相液氩闪烁体探测器和两相氩 TPC.

2.2.1 单相液氩闪烁体探测器

单相液氩闪烁体探测器就是以液氩为灵敏介质, 只收集液氩产生的闪烁光信号进行读出的探测器类型. 液氩闪烁光的有效收集和读出是影响液氩闪烁体探测器性能的主要因素之一. 如图 2 所示, 入射粒子进入液氩后损失能量, 转化为闪烁光子被光读出器件收集. 通常使用的光读出器件是光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT) 和硅光电倍增管 (silicon photomultiplier, SiPM). 它们通常的工作波长在约 400 nm 的可见光波段, 为了保证高效的闪烁光收集和读出, 用液氩作为闪烁体材料时需要额外加入移波剂, 通常是加入四苯基丁二烯 (tetraphenyl butadiene, TPB), 它能够将液氩产生的紫外波段闪烁光转换为可见光波段.

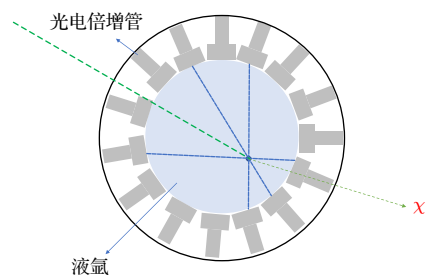


图 2 液氩闪烁光产生和收集过程示意图

Fig. 2. Schematic diagram of the generation and collection process of liquid argon scintillation.

2.2.2 两相氩 TPC

与单相的液氩闪烁体探测器不同, 两相氩 TPC 探测器同时利用氩原子电离或激发过程中产生的闪烁光信号和氩原子电离过程中产生的电离信号来进行辐射探测.

探测器装置如图 3 所示^[28], 一般采用圆柱形, 在探测器的下半部分充满液氩, 上半部分则充入氩气, 探测器顶部和底部布置大量的 PMT. 当有辐射进入探测器灵敏体积时, 可以得到初始的闪烁光信号. 将这个初始信号称为“S1”^[29]. 从 S1 信号中可得到辐射的能量信息.

探测器外部存在漂移电场、萃取电场和发光电场. 这样电离过程中产生的电子会在电场的作用下向气相漂移. 在萃取电场作用下, 电子冲出液相进入气相. 气相存在发光电场, 进入气相的电子在电场的作用下可以发生次级电离, 产生更多的电离电子, 并产生二次发光, 光信号可以被气相顶部的 PMT 阵列收集, 这样产生的闪烁光信号称为“S2”^[29]. S2 的信号强度与电离电子的能量有关, 所以 S2 与 S1 的强度比可以作为判断电子反冲或者核反冲

信号的依据. 此外, 根据 S2 信号被 PMT 收集的位置可以重建出初始粒子的二维坐标. 而粒子纵向的位置可以由 S1 与 S2 信号的时间差得到, 这也是这类探测器被称为时间投影室 (TPC) 的主要原因.

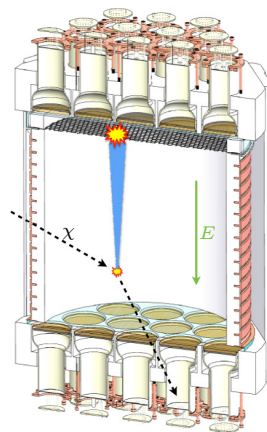
图 3 两相氩 TPC 装置示意图^[28]

Fig. 3. Schematic diagram of double-phase argon TPC^[28].

3 稀有事例探测中的液氩探测器

自 20 世纪 70 年代开始, 正是稀有事例探测实验的需求与发展推动了液氩探测器技术的发展. 目前液氩探测器已经成为稀有事例探测领域一种重要的探测器. 无论是单相液氩闪烁体探测器还是两相氩 TPC, 在近些年都受到了国内外多个稀有事例探测实验组的关注. 这些实验组已经针对液氩探测器开展了深入的研究和测试, 表 3 列出了目前主要的使用液氩探测器进行稀有事例探测的国内外实验组的相关情况.

表 3 国内外液氩探测器相关实验组概况

Table 3. General situation of liquid argon detector related experimental groups at home and abroad.

实验组名称	稀有事例探测类型	探测器类型	液氩探测器质量	光读出	运行状态	主要特点
DEAP	暗物质	单相液氩闪烁体	3260 kg	PMT+光导	运行中	较早采用液氩为介质探测暗物质
WArP	暗物质	两相氩 TPC	140 kg	PMT	已结束	最早尝试用 TPC 探测暗物质
DarkSide	暗物质	两相氩 TPC	46.4 kg	PMT	运行中	地下氩、中子反符合
GERDA	$0\nu\beta\beta$	高纯锗探测器+单相液氩闪烁体(反符合)	1400 kg	SiPM+光纤/PMT	已结束	系统地研究液氩反符合系统并应用
LEGEND	$0\nu\beta\beta$	高纯锗探测器+单相液氩闪烁体(反符合)	—	SiPM+光纤	建设中	实验组合并, 新的读出方案研究
COHERENT	$\text{CE}\nu\text{NS}$	单相液氩闪烁体	79.5 kg	PMT	运行中	第一个尝试用液氩探测器探测 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 事例
Taishan	$\text{CE}\nu\text{NS}$	两相氩 TPC+单相液氩闪烁体(反符合)	200 kg	PMT	建设中	尝试用液氩探测器作为 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 事例的反符合系统

3.1 暗物质探测实验

大量的天文观测已经证实了暗物质的存在^[1]. 目前暗物质粒子模型比较热门的有弱相互作用大质量粒子 (WIMPs)、轴子、惰性中微子等. 对暗物质粒子的探测包括直接探测、间接探测、对撞机产生三种方法, 其中直接探测法通过测量暗物质粒子与普通物质相互作用产生的反冲信号来实现对暗物质粒子的测量. DEAP 和 DarkSide 等实验组采用液氩探测器开展了暗物质直接探测实验.

3.1.1 DEAP 实验

DEAP 实验组采用单相液氩闪烁体探测器在位于加拿大安大略省的 SNOLAB 实验室开展暗物质探测实验. 实验分阶段进行, 第一阶段 DEAP-1 实验研制了 7 kg 的液氩原型机, 测试并验证了液氩的 PSD 能力^[30]. 在原型机的基础上, 实验组开展了第二阶段 DEAP-3600 实验. DEAP 实验组使用 5 cm 厚, 内径为 85 cm 的球形丙烯酸容器装载 3600 kg 的液氩作为主探测器灵敏介质, 在容器周围均匀布置了 255 个 PMT 用来收集液氩产生的闪烁光^[5]. 稀有事例探测实验极易受本底信号的干扰, 因此, DEAP 实验组在主探测器外围布置了主动反符合系统. 整个主探测器被浸在超纯水屏蔽罐中, 罐外布置了 48 个 PMT, 用来收集 μ 子穿过水中时可能产生的切伦科夫光, 从而可以把 μ 子产生的干扰信号排除掉.

DEAP 实验所采用的单相液氩探测器只读出液氩闪烁光信号, 且探测器介质为单相液氩, 探测器结构相对简单, 所以探测器的质量可以做得很大, 从表 3 可以看出, DEAP-3600 具有较大的探测器质量. 此外, DEAP 实验组有较成熟的液氩纯化系统^[5], 探测器中液氩的纯度可以维持在较高水平. 目前 DEAP-3600 实验主要本底来源于 ^{39}Ar 的 β 衰变的连续谱. DEAP 实验组主要通过液氩脉冲信号的 PSD 能力来排除 ^{39}Ar 产生的本底信号. 根据该实验组从 2016 年 11 月到 2020 年 3 月的实验数据分析, 结果表明探测器将 ^{39}Ar 本底信号判断为目标信号的概率仅为 10^{-9} 数量级, 对本底的抑制效果在可接受范围^[31].

DEAP 实验组对截止到 2017 年 10 月底的近一年的数据进行分析, 得到了目前使用单相液氩探测器进行暗物质探测的最好结果^[19]. 2022 年初, DEAP 实验组发表了最新的暗物质探测成果, 第一

次使用液氩探测器得到了普朗克尺度 ($10^{19} \text{ GeV}/c^2$) WIMPs 粒子的截面约束^[32]. DEAP-3600 的数据分析工作还在持续进行, 未来 DEAP 实验组将与 DarkSide, ArDM 等实验组合作开展液氩探测器相关的暗物质探测工作.

3.1.2 WArP 实验

WArP 实验组是在格兰萨索国家实验室 (Laboratori Nazionali del Gran Sasso, LNGS) 进行暗物质探测的实验组, 该实验组使用的主探测器是两相氩 TPC. 2006 年开始, WArP 实验组利用 2.3 L 的原型机进行数据采集测试, 得到了初步的结果^[33]. 之后 WArP 实验组研制了 100 L 的氩 TPC 进行暗物质探测实验, 除了 100 L 的主探测器之外, 该实验组还部署了 5600 L 的液氩作为主动反符合系统和被动屏蔽装置. 探测器整体在 2009 年设计制造完毕后一直在进行测试工作, 后因一些技术问题导致实验终止^[29].

虽然 WArP 实验组的暗物质探测计划以失败告终, 但是 WArP 是第一个提出将两相氩 TPC 技术用于暗物质探测的实验组, 他们长达五年以上的探测器设计和测试工作为其他采用两相氩 TPC 技术进行稀有事例探测的实验组提供了宝贵经验. 此外, 他们将液氩闪烁光信号用作反符合系统的构想也对稀有事例探测相关实验组有重要的借鉴意义.

3.1.3 DarkSide 实验

DarkSide 实验组同样利用气液两相 TPC 在 LNGS 开展暗物质探测实验. 到目前为止, 该实验分为三个阶段, 分别为 DarkSide-10, DarkSide-50 和 DarkSide-20k. DarkSide-10 是该实验组在 2011 年制造的 10 kg 原型机. 基于原型机, 主要对 TPC 的闪烁光产额进行了测试^[34]. 第二阶段 DarkSide-50 是在 DarkSide-10 的基础上设计的, 包括 50 kg 的氩 TPC 以及外围的液闪和水箱. 内部的 TPC 部分是直径为 35.6 cm, 高为 36.5 cm 的圆柱体, 内壁涂有聚四氟乙烯作为反射层, 顶部和底部涂有 TPB 作为液氩闪烁光的移波剂. 中间是直径为 4 m 的不锈钢球体, 内部充满 30 吨液体闪烁体. 液闪含有 ^{10}B , 主要用于吸收本底信号中的中子成分. 外围是直径为 11 m, 高为 10 m 的圆柱形水箱, 水箱里充满高纯水, 并配有 PMT, 用于对 μ 子产生的切伦科夫光进行收集^[35].

之后 DarkSide 实验组进一步优化他们的探测

器系统, 开始采用地下氩 (underground argon, UAr) 来逐渐代替大气氩 (atmosphere argon, AAr), 从而大幅减少 ^{39}Ar 本底. 经过多年的研究, DarkSide 实验组已经有一套较为完整的地下氩生产流程, 经过纯化和同位素分离, 氩纯度和氩同位素本底的控制都达到了预期水平 [36].

DarkSide-50 给出了目前用氩作为靶核探测暗物质的最好结果 [20]. 此外, DarkSide-50 还在 2018 年针对低质量区间的 WIMPs 搜索给出了最新的结果 [8]. DarkSide 实验组第三阶段的目标是建造 20 t 的氩 TPC 进行暗物质探测, 即 DarkSide-20k. 目前该项目正在进行优化设计和性能测试工作. 与之前的项目相比, DarkSide-20k 有两个重要的优化. 一个方面是反符合系统方面采用掺钎的丙烯酸作为抑制中子本底的装置 [37], 另一方面是光电读出器件将由原本的 PMT 改为使用 SiPM 读出 [38,39]. 目前相关的测试和优化工作还在持续进行.

3.1.4 小 结

暗物质直接探测实验, 尤其是以 WIMPs 粒子为目标的实验, 目前主要有两个趋势: 一个是探索低质量区间暗物质; 另一个是探索大质量区间以及宇宙线加速的暗物质. 对于前者的探索, 通常使用高纯锗探测器为代表的半导体探测器, 高纯锗探测器具有极低的阈值和良好的能量分辨率, 是探索极低能量暗物质信号的较好选择. 而对于后者, 大曝光量和高探测效率是更重要的, 因此液态惰性气体探测器在大质量区间暗物质探测中优势明显. 液氩探测器在暗物质直接探测实验中发挥了重要的作用. 对于轻质量 WIMPs 探测, DarkSide-50 实验单独使用电离信号 S2 的分析阈值达到了可与半导体探测器比拟的 59 eV, 给出了国际领先的测量结果 [8]. 对于大质量区间的暗物质探测, 液氩探测器相对于液氙成本更低, 随着 DarkSide-20k 实验的开展, 液氩探测器也将展现出强大的竞争力.

3.2 无中微子双贝塔衰变实验

20 世纪 30 年代, 意大利物理学家马约拉纳提出了中微子可能是自身的反粒子, 即马约拉纳费米子 [40]. 如果中微子是马约拉纳费米子, 那么中微子的质量来源可以由马约拉纳机制来解释. 而目前验证中微子是否是马约拉纳费米子的主流方法之一

是探测无中微子双贝塔衰变现象 [2] 是否存在. 探测无中微子双贝塔现象需要较大的探测器体积, 要求探测器的能量分辨率较高, 同时对实验本底的要求极为严格. 为了降低本底, 进行无中微子双贝塔衰变实验的实验组大多引入了主动的反符合探测系统, 其中 GERDA 实验组和 LEGEND (large enriched germanium experiment for neutrinoless $\beta\beta$ decay, 大型富集锗的无中微子双贝塔衰变实验) 实验组使用了液氩反符合探测系统. 来自中国的中国暗物质实验 (China Dark Matter Experiment, CDEX) 实验组和粒子与天体物理氙时间投影室 (particle and astrophysical xenon TPC, PandaX) 实验组也针对无中微子双贝塔衰变开展了一系列工作, 其中 CDEX 实验组未来计划采用液氩反符合系统, PandaX 实验组则采用与两相氩投影室类似的两相氩投影室进行实验.

3.2.1 GERDA 实验

GERDA 实验组是在 LNGS 进行无中微子双贝塔衰变测量的实验项目. 21 世纪初, GERDA 实验组就开始探索利用低温下工作的高纯锗探测器来探测 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变事例. 当时主流的高纯锗探测器冷却介质采用的是液氮, 而 GERDA 实验组提出了使用液氩代替液氮作为冷却介质的想法 [41,42], 这样具有闪烁功能的液氩同时可以作为主动反符合装置的介质. 从 2007 年开始, GERDA 实验组就一直在研究液氩闪烁体探测器作为反符合装置的可行性. 从蒙特卡罗方法模拟到原型机实验测试, 对液氩的循环装置、液氩闪烁特性、放射源刻度等细节问题进行了详细的研究 [24,43,44]. 该实验组利用 1 m^3 的液氩反符合原型机进行测试. 到 2015 年, GERDA 实验组对液氩反符合系统的测试工作基本结束, 测试过程中使用 ^{228}Th , ^{226}Ra 和 ^{60}Co 源进行反符合性能测试, 图 4 为使用 ^{60}Co 源测试的结果 [45], 测试结果表明液氩反符合系统的应用可以达到 GERDA II 期本底至少降低 1 个数量级的实验需求.

GERDA I 期实验液氩仅作为冷却介质, II 期实验相较于 I 期最大的改进就是加入了液氩反符合系统, 实验装置如图 5 所示 [46]. 实验主探测器采用高纯锗探测器阵列, 高纯锗探测器放置在直径为 4 m, 体积为 64 m^3 的低温恒温器中, 低温恒温器中充满液氩. 液氩可以作为冷却介质和提供被动

屏蔽, 而装配的 PMT 和 SiPM 可以用于接收液氩产生的闪烁光信号, 用于和高纯锗探测器产生的信号进行反符合. 包围着低温恒温器的是直径为 10 m, 体积为 590 m³ 的水箱, 水箱外配备 PMT, 用来收集宇宙线 μ 子产生的切伦科夫光.

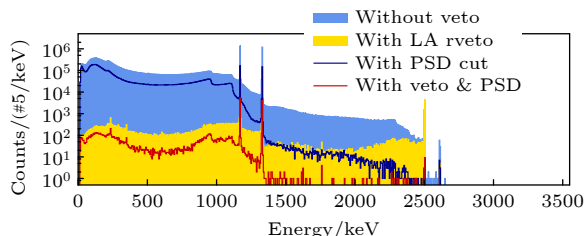


图 4 ^{60}Co 源测试能谱^[45]

Fig. 4. The energy spectrum of ^{60}Co source^[45].

II 期实验的数据采集于 2019 年 11 月结束, 加入了液氩反符合系统之后, 对本底信号的抑制效果十分明显, 本底水平较 I 期实验降低了 2 个数量级^[9], 并首次在 ROI 区域实现“零本底”^[47]. II 期数据结果如图 6 所示, 可以看到应用液氩反符合系统后, 低能区能谱出现明显的 ^{76}Ge 的双中微子双贝塔衰变事件轮廓^[9]. II 期结果将 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变半衰期的下限提高了 1 个数量级, 这也是目前世界上 ^{76}Ge 无中微子双贝塔衰变的最好结果^[9].

3.2.2 LEGEND 实验

LEGEND 实验组由 GERDA 实验组和 MAJORANA 实验组合并而成. 这两个实验组都是用高纯锗探测器探测 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变, 各自有他们较为优势的技术. GERDA 实验组的主要技术在于将液氩反符合系统和 PSD 技术应用于本底信号的抑制, 而 MAJORANA 实验组则采用具有超低本底的地下电铸铜来作为探测器以及被动屏蔽装置的原材料^[48]. LEGEND 实验组将两个实验组的装置和技术吸收, 提出了 LEGEND-200 和 LEGEND-1000 实验计划.

LEGEND-200 是 GERDA 实验组和 MAJORANA 实验组合并后开展的第一项实验计划, 预计将两个实验组的高纯锗探测器加上新制造的锗探测器共 200 kg 左右投入使用, 继续探测 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变事例. 实验将以 GERDA 实验组的探测器系统为主要框架, 继续在 LNGS 进行. LEGEND-200 将在 GERDA 的基础上进一步升级液氩反符合系统. 首先是在新系统中加入液氩监测仪, 用来监控液氩的纯度、杂质成分等信息. 然后是在光读出方面, 将全部采用 SiPM 加光纤读出的方式, 同时优化为双端读出, 以减少闪烁光在光纤中传输的损失^[49]. 在新的光学活性材料方面, LEGEND 实验组也在对聚羧二甲酸乙二醇酯

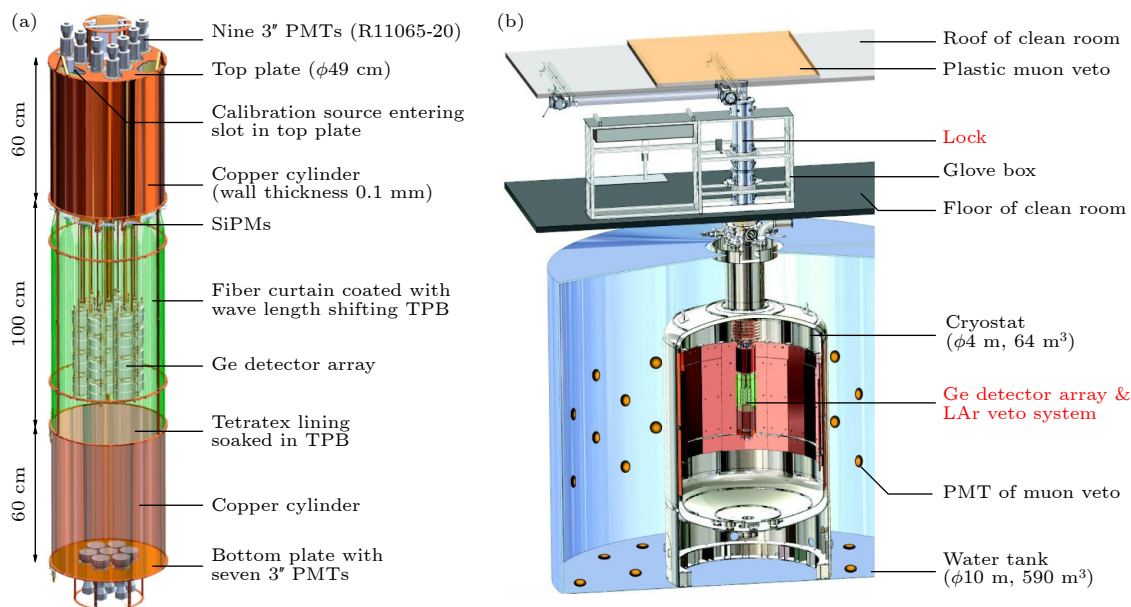
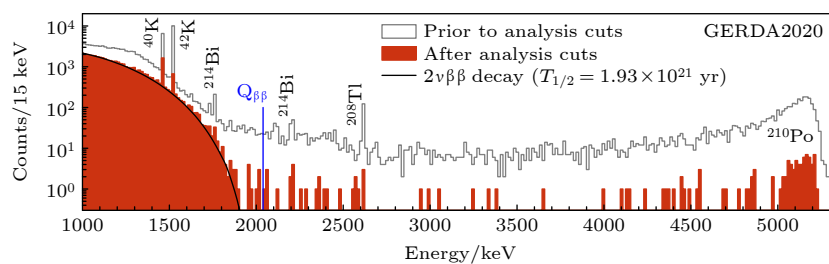


图 5 GERDA II 期实验装置图 (a) 锗探测器阵列和液氩反符合系统装置图^[46]; (b) 实验整体装置图^[46]

Fig. 5. GERDA phase II experimental setup: (a) Diagram of germanium detector array and liquid argon veto system^[46]; (b) the overall setup^[46].

图6 GERDA II期实验结果^[9]Fig. 6. Results of GERDA phase II experiment^[9].

(polyethylene naphthalate, PEN) 材料进行深入的研究. 根据研究结果, PEN 可以作为液氙的移波剂, 也可以作为闪烁体材料用来抑制本底^[50]. 未来 LEGEND 实验组考虑使用 PEN 代替现有的非光学活性材料作为探测器外部的支撑和屏蔽材料, 对于 PEN 的进一步研究依然在进行当中. LEGEND-200 实验仪器已经组装完毕, 预计将于近期开始采集物理数据.

LEGEND-1000 是 LEGEND 实验组长期规划的实验项目, 计划用 4 组 250 kg 重的锗探测器进行 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变事例探索. LEGEND 实验组借鉴 DarkSide 实验组, 准备在 LEGEND-1000 项目中使用地下氩作为液氩反符合探测器的原材料, 届时探测器的本底又将获得大幅下降.

3.2.3 中国无中微子双贝塔衰变实验

近年来, 随着中国锦屏地下实验室的建成和投入使用, 中国的无中微子双贝塔衰变实验也陆续开展. 主要是清华大学主导的 CDEX 实验组和上海交通大学主导的 PandaX 实验组.

CDEX 实验组利用高纯锗探测器同时进行暗物质探测实验和 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变实验. 该实验组采用点电极高纯锗探测器方案, 研制了 CDEX-1 探测器, 这是一种 p 型点电极高纯锗探测器, 质量约 994 g, 直径和高度均为 62 mm^[51], 探测器外安装 NaI 闪烁体探测器作为反符合装置. CDEX 实验组利用 CDEX-1 探测器给出了中国第一个基于 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变的结果^[51], 除此以外, 也得到了一系列暗物质探测结果^[52–54]. 之后 CDEX 设计建造了 CDEX-10 探测器, CDEX-10 是在 CDEX-1 基础上, 将 CDEX-1 所用高纯锗晶体串成阵列, 一共包含 3 个阵列, 每个阵列包含三个锗晶体. CDEX-10 探测器用 20 cm 厚的高纯无氧铜包围, 然后整体浸在液氮中采集数据^[55]. 目前还在利用 CDEX-10 探测器采集的实验数据进行

分析工作, 已经给出了暗物质探测相关的数据分析结果^[55,56]. 接下来 CDEX 实验组计划开展 CDEX-50 和 CDEX-300 ν 项目分别继续开展暗物质探测和无中微子双贝塔衰变搜索. 其中 CDEX-300 ν 计划使用 225 kg 的宽能锗探测器进行无中微子双贝塔衰变搜索, 预计将 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变的半衰期下限提升到 10^{27} a 量级^[57]. CDEX-300 ν 相较之前的实验将做出大量升级, 除了采用宽能锗探测器、完善脉冲形状甄别技术等改进之外, 最重要的是将加入液氩反符合系统, 从而进一步降低实验的本底水平^[57].

PandaX 实验组使用两相氩投影室来探测暗物质以及寻找 ^{136}Xe 的无中微子双贝塔衰变. 该实验组首先建造了 PandaX-I 探测器, 这是基于两相氩的时间投影室, 探测器内包含 120 kg 的液氩^[58]. 该实验组基于 PandaX-I 获得了初步的暗物质探测结果^[58]. 之后 PandaX 实验组将探测器升级为 PandaX-II, 在 PandaX-I 的基础上将液氩的质量增加到 580 kg^[59]. 获得了中国第一个 ^{136}Xe 的无中微子双贝塔衰变的结果^[59], 同时获得了暗物质探测的一些结果^[60]. 最近, PandaX 实验组再一次将探测器升级为 PandaX-4T, 探测器相比之前的整体尺寸扩大, 而液氩的质量也增加到 3.7 t^[61]. 目前已经对 PandaX-4 T 探测器进行了试运行, 并获得了初步的暗物质探测结果^[61]. 未来他们将利用 PandaX-4 T 探测器给出更好的暗物质探测的结果. 除此以外, 他们还设计了 PandaX-III 探测器, 希望用高压氩气投影室进行 ^{136}Xe 的无中微子双贝塔衰变搜索^[62]. 第一阶段计划使用 200 kg 的氩气, 后续考虑升级为吨级实验. 目前已经完成了 20 kg 样机的建造, 并获得了初步的测试结果, 预计很快就会进入物理数据采集阶段^[62].

3.2.4 小 结

由于氙的同位素中没有能发生双贝塔衰变的

核素, 目前液氩探测器没有在无中微子双贝塔衰变实验中得到直接应用. 高纯锗探测器、两相氩探测器、极低温量热器在无中微子双贝塔衰变中应用较多. 相对于后两种探测器, 高纯锗探测器的目标能量较低、不具备粒子甄别能力, 因而本底抑制工作难度较大. 目前各实验组都采用被动屏蔽的方式降低本底, 如使用深地实验室、选用放射性极低的原材料, MAJORANA 实验组地下电铸铜技术已经使得本底大幅降低. 但是对于未来的吨量级实验, 仅仅依靠被动屏蔽是远远不够的. GERDA II 期实验使用液氩反符合系统使本底水平降低 2 个数量级, 充分显示了主动反符合系统在高纯锗探测器无中微子双贝塔衰变实验应用的效果. 未来的高纯锗探测器吨级实验旨在将 ^{76}Ge 的无中微子双贝塔衰变半衰期下限提高到 10^{28} a 量级, 也就是将中微子有效质量的上限限制到约 10 meV. 从 GERDA 实验组的结果来看, 想要达到这样的灵敏度必须继续沿用主动反符合装置进一步降低本底. 而液氩由于自身的物理性质, 本身可以作为高纯锗探测器的低温冷却装置和被动屏蔽装置. 同时由于液氩的闪烁性能, 尤其是粒子甄别能力, 液氩探测器也是作为高纯锗探测器无中微子双贝塔衰变实验的反符合装置的极佳选择.

3.3 中微子-核子相干弹性散射实验

1974 年, 理论物理学家 Daniel Freedman^[3] 提出了中微子-核子相干弹性散射的理论. 理论认为, 中微子和其他基本粒子, 如光子、电子一样具有波粒二象性. 当中微子的能量较低时, 它可以与原子核内的核子发生相干作用, 即发生所谓的 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 过程. 研究表明, 在中微子与物质的反应道中, $\text{CE}\nu\text{NS}$ 的反应截面要显著高于其他反应^[63], 因此对 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 现象的探测对于研究中微子物理有关课题有重要的意义. 为了研究不同靶核与中微子的相互作用, 各个实验组采用不同的探测器对 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 现象进行研究, 其中 COHERENT 实验组使用液氩探测器, 研究了氩核与中微子的作用. 另外中国科学院高能物理研究所也计划采用液氩探测器开展 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 相关研究工作.

3.3.1 COHERENT 实验

国际合作组 COHERENT 在美国橡树岭国家实验室利用散裂中子源探测 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 事例. 2017 年,

COHERENT 实验组首次用 CsI(Na) 探测器探测到了 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 的事例^[63]. 为了探究不同靶核的 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 过程, 2016 年末, 该实验组研制了 CENNS-10 探测器, 探究使用液氩探测器继续进行 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 事例的探测的可行性. 探测器整体设计为圆柱形, 丙烯酸容器内壁涂 TPB 作为移波剂, 充满水作为被动屏蔽装置. 装载液氩的低温恒温器浸在水中, 直径 248 mm, 高 425 mm, 顶部和底部各安装一个 PMT 用于读出液氩闪烁光^[10].

2017 年 2 月到 5 月, 该实验组使用 29 kg 的 CENNS-10 探测器进行了首次正式数据采集, 对数据分析后, 观测到了候选 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 事件^[10]. 这一方面证实了之前用 CsI (Na) 探测器的测量结果的可靠性, 另一方面也说明了使用液氩闪烁体探测器观测 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 事例的可行性. 未来 COHERENT 实验组将继续对 CENNS-10 探测器深入研究, 并开展后续探测工作.

3.3.2 Taishan 实验

中国科学院高能物理研究所 2020 年开始规划在台山核电站附近部署探测器, 进行反应堆中微子 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 测量和其他中微子相关课题研究. 他们借鉴 DarkSide 实验组, 计划使用两相氩 TPC 探测 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 事例, 外部则使用液氩闪烁体探测器作为主动反符合装置^[64]. TPC 中氩的质量约为 200 kg, TPC 外除了有液氩反符合探测器和塑料闪烁体作为主动反符合装置外, 还使用了铅、铜、聚丙烯等被动屏蔽材料来减少本底信号的影响.

目前, 该项目主要在进行前期的设计和测试工作. 他们对实验过程中可能产生的本底信号进行了模拟, 来对比加入液氩反符合系统前后本底信号强度的变化. 实验中主要的本底信号包括两部分, 一部分来自 ^{238}U , ^{232}Th 和 ^{40}K 等天然放射链, 另一部分来自氩中固有的 ^{39}Ar 和 ^{85}Kr 本底. 根据相关研究表明, AAr 的 ^{39}Ar 本底要远远高于 UAr, 因此该项目预备采用 UAr 作为氩 TPC 的主要原料. 而 U, Th 和 K 等天然放射链产生的 γ 或中子本底就主要通过液氩反符合系统来排除. 项目组对反符合效果进行了模拟, 模拟结果表明除了 ^{39}Ar 和 ^{85}Kr 产生的本底外, 液氩反符合系统使其他本底计数降低到原来的 1/3 左右, 抑制效果十分明显^[64].

除了对液氩反符合系统的反符合效率模拟外, 项目组还对氩闪烁光信号的读出系统进行了测试^[65,66].

该项目计划使用 SiPM 来读出氩闪烁光信号, 因此对 SiPM 在液氩温度 (87 K) 下的击穿电压、暗计数率、相对量子效率等性能进行了测试. 测试结果表明选用的 SiPM 可以满足低温条件下进行低本底探测的需求.

该项目的测试工作依然在持续, 一旦该项目测试完毕开始采集数据, 这将是极少的在 CE ν NS 探测工作中使用液氩反符合系统的实验项目.

3.3.3 小 结

CE ν NS 是 MeV 量级中微子与物质的主要相互作用过程, 它为研究中微子基本性质、超标准模型相互作用等提供了重要途径. COHERENT 实验组第一次发现 CE ν NS 现象是在 CsI(Na) 探测器上, 在证实 CE ν NS 现象存在后, 为了研究反应截面与核内中子数的关系, 轻核与中微子的相干弹性散射的研究逐步展开. 液氩探测器由于成本较低、探测效率较高, 且氩核与中微子的相互作用正是轻核与中微子相互作用的良好研究对象, 因此 COHERENT 实验组在 2017 年成功发现 CE ν NS 后立刻研制液氩探测器研究氩核与中微子的相干弹性散射现象. 相较于散裂中子源中微子, 反应堆中微子的能量更低, 因此同暗物质直接探测类似, 反应堆 CE ν NS 测量对探测器阈值、本底、体量的要求更高. 从 DarkSide 实验可以看出液氩探测器在这方面的优势, 这也是 Taishan 实验采用液氩探测器原因.

4 讨 论

液氩探测器已经在多个稀有事例探测实验中得到应用并取得了良好的实验结果, 同时稀有事例探测也在不断地推动着液氩探测的发展优化. 表 4

列出了各个实验组针对液氩探测器优化完成的工作和未来的规划. 下面从曝光量、本底水平、反符合探测等角度讨论稀有事例探测实验中液氩探测器的独特优势和其未来主要的优化方向.

4.1 曝光量

稀有事例探测中, 曝光量是影响事例率的主要因素. 从探测器的改进方向考虑, 增大曝光量的有效方法就是提高探测器的有效质量. 目前高纯锗探测器、极低温量热器等固体探测器可以达到百公斤量级. 如 LEGEND 实验组正在运行的 LEGEND-200 项目中高纯锗总质量达到了 200 kg. 采用 TeO₂ 极低温量热器来搜索无中微子双贝塔衰变事例的稀有事例低温地下实验室 (cryogenic underground laboratory for rare events, CUORE) 经过多次升级, 目前探测器总质量达到了 700 kg^[67]. 相比之下, 液态惰性气体探测器的探测介质为液态, 更易于提高探测器的质量. 以液氩探测器为介质的实验组已实现吨级探测器的应用. 如 DEAP 实验组目前使用的探测器质量已超过 3000 kg, DarkSide 实验组正在规划建设质量达 20 t 的液氩探测器.

此外, 成本也是提高探测器质量必须考虑的因素. 相较于高纯锗等其他类型探测器, 液态惰性气体的获取难度和成本较低. 因此, 未来液氩探测器等液态惰性气体探测器仍将在提高实验曝光量方面发挥其优势.

4.2 本底水平

降低本底水平是稀有事例探测研究的重中之重. 稀有事例探测实验的本底包括探测器外部本底和探测器内部本底. 外部本底主要来自宇宙射线、宇生核素以及周围环境中的天然放射性核素

表 4 液氩探测器优化和升级
Table 4. Optimization and upgrade of liquid argon detector.

实验组名称	³⁹ Ar 本底抑制	其它本底抑制	氩纯度监测和稳定	光读出方案升级
DEAP	利用液氩的粒子甄别能力扣除	水切伦科夫探测器抑制 μ 子	氩捕集阱去除放射性杂质	—
DarkSide	地下氩生产技术应用	水切伦科夫探测器抑制 μ 子, 载硼或载钆液闪抑制中子	同时进行去除电负性杂质和氩同位素分离	SiPM 低温稳定读出和紫外波段直接读出技术研究
GERDA	—	水切伦科夫探测器抑制 μ 子, 液氩探测器抑制其他本底	—	SiPM+ 光纤读出
LEGEND	地下氩生成技术研究	水切伦科夫探测器抑制 μ 子, 液氩探测器抑制其他本底	液氩纯度监测仪	SiPM+ 光纤双端读出
Taishan	地下氩生产技术研究	塑料闪烁体抑制 μ 子, 液氩探测器抑制其他本底	—	SiPM 低温稳定读出技术研究

等, 它们会产生 μ 子、中子、 γ 射线等常见本底信号. 内部本底主要来自探测器灵敏介质及其支撑结构材料产生的放射性, 会产生中子和 γ 射线等本底信号. 对于外部本底, 可以通过被动屏蔽装置来降低, 如在探测器装置外部加入铅、聚乙烯等可以吸收外部中子或伽马的屏蔽材料, 也可以通过引入主动反符合系统来抑制本底信号. 而对于内部本底, 就只能通过优化探测器制造工艺, 提高灵敏介质纯度, 以及选择低本底结构材料来尽可能降低本底.

对于液氩探测器来说, 外部本底除了用各种屏蔽材料阻挡外, 液氩具有自屏蔽效应, 外围液氩本身可作为屏蔽体, 阻挡外部的本底. 内部本底主要来自 ^{39}Ar 的放射性. 由于 Q 值较低, ^{39}Ar 的 β 衰变的连续谱对于暗物质探测影响较大. ^{39}Ar 是宇生核素, 故在大气中提取的氩中 ^{39}Ar 含量较高, 大气氩中 ^{39}Ar 的比活度约 1 Bq/kg ^[31]. 而采用地下氩可以尽量避免 ^{40}Ar 与宇宙线发生反应, 从而大幅减少 ^{39}Ar 本底. 目前DarkSide实验组已经建立了从提取, 到纯化, 再到氩同位素分离的完整的地下氩生产流程. 使用的UAr不仅本身的氩纯度较高, 而且对 ^{39}Ar 等氩同位素本底的控制也达到了较高水平^[36], 该实验组提取的原始地下氩中 ^{39}Ar 的含量约是大气氩的 10^{-3} , 再经过低温精馏装置, 持续对氩中的 ^{39}Ar 进行分离, 最终进入探测器中的 ^{39}Ar 的比活度仅为 10^{-1} mBq/kg 量级. 目前DarkSide实验组对UAr的应用已经开展了系统的研究, 按计划, DarkSide-20 k项目中将完全使用UAr开展实验. 其他使用液氩探测器的实验组也在考虑在未来的实验规划中使用UAr, 比如LEGEND实验组就计划在LEGEND-1000项目中使用UAr. 未来对UAr的生产和应用将是液氩探测器相关实验组的一项重要课题.

4.3 光读出方案

对于液氩探测器自身性能而言, 闪烁光产额的提升和闪烁光的有效收集是重要的研究方向. 光产额提升主要在于提高液氩纯度, 如DEAP, DarkSide等实验组都开发了完善的液氩纯化和循环系统, 来维持液氩的高纯度. DEAP实验组DEAP-3600探测器的液氩纯化系统主要部分包括热金属吸收剂和木炭捕集器. 前者主要是为了吸收 CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 等电负性杂质, 后者是为了去除氦和其他放射性杂质^[5]. DarkSide实验组的液氩纯化系统主要由

三个部分组成, 其中前两个部分都是为了去除 CO_2 , 因为氩的原始提取是在 CO_2 氛围中进行的. 第三个部分去除 CH_4 , N_2 , Kr等其他杂质. 经过纯化后氩中的电负性杂质浓度可以控制到 10^{-9} 量级^[36]. 而LEGEND实验组计划加入的液氩监测仪也是为了实时了解液氩纯度, 以便在纯度降低时做出调整.

对于闪烁光的有效收集, 主要是对闪烁光信号读出方案的优化. 可以看到多数实验组读取液氩闪烁光信号采用的还是波长移位剂加光电倍增管的方式, 随着近年SiPM的迅速发展, 部分实验组开始用SiPM代替传统的PMT, 如GERDA II期实验的部分闪烁光信号已经采用SiPM读出的方案. DarkSide实验组也对SiPM读出方案进行了设计和测试, 研究了SiPM在低温环境下的读出性能, 以及用SiPM直接读出近紫外光信号的可行性. 测试结果表明光探测效率可达到40%, 暗计数率小于 0.1 Hz/mm^2 ^[39]. 未来使用SiPM在低温下直接读出液氩闪烁光的方案可能成为各个液氩探测器实验组的研究方向.

4.4 反符合探测

主动反符合是稀有事例探测实验中抑制本底的重要手段. 主动反符合系统本身引入的本底不能太高, 否则会影响整个系统的本底扣除效果. 例如GERDA, DEAP等实验组在探测器系统上都配备了水切伦科夫探测器, 用于进行 μ 子反符合, 而探测器采用的介质是超纯水, 目的就是为了尽可能不引入更多的其它本底. 反符合系统性能可通过模拟、实验的方法来预估. GERDA实验组从21世纪初就开始探索液氩闪烁体探测器作为高纯锗探测器的反符合探测器的可行性, 他们进行了大量的模拟以及实验工作, 对探测器周围可能存在的本底以及加入液氩反符合系统后对本底的抑制效果进行了研究.

此外, 尚在规划和建设中的中国科学院高能物理研究所Taishan反应堆中微子研究也计划在CEvNS事例探索项目中加入液氩反符合系统, 模拟结果显示加入液氩反符合系统后, 除 ^{39}Ar 和 ^{85}Kr 产生的本底外, 其他的本底都可以被很好地抑制^[64]. 而 ^{39}Ar 本底可以通过使用地下氩来降低, ^{85}Kr 本底可以通过低温蒸馏方法降低. 主动反符合系统是未来的稀有事例探测实验中重要的一环.

5 结 论

稀有事例探测是当今粒子物理与原子核物理的前沿课题, 由于稀有事例探测对探测器性能、环境本底等有极高的要求, 所以对探测器和其他材料的选择尤为重要. 由于液氩探测器相对于传统技术的成本、本底水平较低、对体积限制较小等独特优势, 无论是单相液氩闪烁体探测器还是两相氩 TPC, 都在近些年越来越多的受到国内外稀有事例探测相关实验组的关注. DEAP, DarkSide 等实验组已对液氩相关探测器进行了多年的研究和测试, 并应用在暗物质探测实验中, GERDA 实验组将液氩探测器作为主动反符合系统的设计在高纯锗探测器的无中微子双贝塔衰变实验中取得良好效果, 而 COHERENT 实验组也利用液氩探测器测量到了氩核的 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 过程.

为了适应未来更大质量探测器设计和更灵敏的探测需求, 液氩探测器也在不断的优化中. 未来将有更多的实验组采取地下氩技术来减少氩同位素本底的影响, 同时对于液氩中其他杂质的浓度控制也将向 ppb (parts per billion, 10^{-9}) 数量级迈进. 而 SiPM 的大量测试和应用也为液氩光读出方案的改进提供了明确方向, 在液氩闪烁光波段直接用 SiPM 读出技术的研发预期是下一代液氩探测器优化的一个重要方向. 而对于反符合探测方面, GERDA 实验组的 II 期实验和后续的研究为下一代稀有事例探测实验提供重要技术支撑, 目前我国 CDEX 的 $0\nu\beta\beta$ 探测计划和中国科学院高能物理研究所在台山的 $\text{CE}\nu\text{NS}$ 项目正基于上述国际领先实验组的技术进行液氩反符合系统的可行性研究. 液氩探测器在实现进一步优化和升级后将继续在未来吨量级的稀有事例探测实验中发挥重要作用.

参考文献

- [1] Rubin V C, Ford Jr W K 1970 *Astrophys. J.* **159** 379
- [2] Furry W H 1939 *Phys. Rev.* **56** 1184
- [3] Freedman D Z 1974 *Phys. Rev. D* **9** 1389
- [4] Akerib D S, Akerlof C W, Akimov D Y, et al. 2020 *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **953** 163047
- [5] Amaudruz P A, Baldwin M, Batygov M, et al. 2019 *Astropart. Phys.* **108** 1
- [6] Aalseth C E, Barbeau P S, Bowden N S, et al. 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 131301
- [7] Agnese R, Anderson A J, Aralis T, et al. 2018 *Phys. Rev. D* **97** 022002
- [8] Agnes P, Albuquerque I F M, Alexander T, et al. 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 081307
- [9] Agostini M, Araujo G R, Bakalyarov A M, et al. 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 252502
- [10] Akimov D, Albert J B, An P, et al. 2019 *Phys. Rev. D* **100** 115020
- [11] Davidson N, Larsh J A E 1948 *Phys. Rev.* **74** 220
- [12] Marshall J H 1954 *Rev. Sci. Instrum.* **25** 232
- [13] Dolgoshein B A, Lebedenko V N, Rodionov B U 1970 *JETP Lett.* **11** 351
- [14] Rubbia C 1977 [https://cds.cern.ch/record/117852/files/CERN-EP-INT-77-8/\[2022-10-27\]](https://cds.cern.ch/record/117852/files/CERN-EP-INT-77-8/[2022-10-27])
- [15] Bvnetti P, Bettini A, Calligarich E, et al. 1993 *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **332** 395
- [16] Cennini P, Cittolin S, Revol J P, et al. 1994 *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **345** 230
- [17] Kubota S, Hishida M, Nohara A 1978 *Nucl. Instrum. Methods* **150** 561
- [18] Cennini P, Revol J P, Rubbia C, et al. 1999 *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **432** 240
- [19] Ajaj R, Amaudruz P A, Araujo G R, et al. 2019 *Phys. Rev. D* **100** 022004
- [20] Agnes P, Albuquerque I F M, Alexander T, et al. 2018 *Phys. Rev. D* **98** 102006
- [21] Suzuki M, Gen J R, Kubota S 1982 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **192** 565
- [22] Doke T, Hitachi A, Kikuchi J, Masuda K, Okada H, Shibamura E 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 1538
- [23] Hitachi A, Takahashi T, Funayama N, Masuda K, Kikuchi J, Doke T 1983 *Phys. Rev. B* **27** 5279
- [24] Peiffer J P 2007 *Ph. D. Dissertation* (Heidelberg: Ruperto-Carola University)
- [25] Acciarri R, Antonello M, Baibussinov B, et al. 2010 *J. Instrum.* **5** P06003
- [26] Acciarri R, Antonello M, Baibussinov B, et al. 2010 *J. Instrum.* **5** P05003
- [27] Calvo J, Cantini C, Crivelli P, et al. 2018 *Astropart. Phys.* **97** 186
- [28] Canci N 2020 *J. Instrum.* **15** C03026
- [29] Zani A 2014 *Adv. High. Energy Phys.* **2014** 1
- [30] Amaudruz P A, Batygov M, Beltran B, et al. 2016 *Astropart. Phys.* **85** 1
- [31] Adhikari P, Ajaj R, Alpizar-Venegas M, et al. 2021 *Eur. Phys. J. C* **81** 1
- [32] Adhikari P, Ajaj R, Alpizar-Venegas M, et al. 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 011801
- [33] Benetti P, Acciarri R, Belluco M, et al. 2011 *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **221** 53
- [34] Alexander T, Alton D, Arisaka K, et al. 2013 *Astropart. Phys.* **49** 44
- [35] Agnes P, Alexander T, Alton A, et al. 2015 *Phys. Lett. B* **743** 456
- [36] Aalseth C E, Acerbi F, Agnes P, et al. 2018 *Eur. Phys. J. Plus* **133** 1
- [37] Rossi M 2021 *Nuovo Cimento* **44** 1
- [38] Carnesecchi F 2020 *J. Instrum.* **15** C03038
- [39] Consiglio L 2020 *J. Instrum.* **15** C05063
- [40] Majorana E 1937 *Nuovo Cimento* **14** 171
- [41] Abt I, Altmann M, Bakalyarov A, et al. 2004 arXiv: 0404.039 v1 [hep-ex]
- [42] Singen H 2005 *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **143** 567
- [43] Orrell J L, Aalseth C E, Amsbaugh J F, Doe P J, Hossbach T

- W 2007 *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **579** 91
- [44] Heider M B 2009 *Ph. D. Dissertation* (Heidelberg: Ruperto-Carola University)
- [45] Agostini M, Barnabé-Heider M, Budjáš D, et al. 2015 *Eur. Phys. J. C* **75** 1
- [46] Agostini M, Bakalyarov A M, Balata M, et al. 2018 *Eur. Phys. J. C* **78** 1
- [47] Agostini M, Allardt M, Bakalyarov A M, et al. 2017 *Nature* **544** 47
- [48] Hoppe E W, Aalseth C E, Farmer O T, Hossbach T W, Liezers M, Miley H S, Overman N R, Reeves J H 2014 *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **764** 116
- [49] Schwarz M, Krause P, Leonhardt A, et al. 2021 *EPJ Web Conf.* **253** 11014
- [50] Efremenko Y, Fajt L, Febbraro M, et al. 2019 *J. Instrum.* **14** P07006
- [51] Wang L, Yue Q, Kang K J, et al. 2017 *Sci. Chin. Phys. Mech.* **60** 1
- [52] Wang Z, Yue Q, Kang K J, et al. 2013 *Phys. Rev. D* **88** 052004
- [53] Yue Q, Wang Z, Kang K J, et al. 2014 *Phys. Rev. D* **90** 091701
- [54] Yang L T, Li H B, Yue Q, et al. 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 221301
- [55] Jiang H, Jia L P, Yue Q, et al. 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 241301
- [56] She Z, Jia L P, Yue Q, et al. 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 111301
- [57] Dai W H, Ma H, Yue Q, et al. 2022 *Phys. Rev. D* **106** 032012
- [58] Xiao M J, Xiao X, Zhao L, et al. 2014 *Sci. Chin. Phys. Mech.* **57** 2024
- [59] Ni K X, Lai Y H, Abdukerim A, et al. 2019 *Chin. Phys. C* **43** 113001
- [60] Cui X, Abdukerim A, Chen W, et al. 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 181302
- [61] Meng Y, Wang Z, Tao Y, et al. 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 261802
- [62] Wang S B 2020 *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **958** 162439
- [63] Akimov D, Albert J B, An P, et al. 2017 *Science* **357** 1123
- [64] Wei Y T, Guan M Y, Liu J C, Yu Z Y, Yang C G, Guo C, Xiong W X, Gan Y Y, Zhao Q, Li J J 2021 *Radiat. Detect. Technol.* **5** 297
- [65] Guo C, Guan M Y, Sun X L, Xiong W X, Zhang P, Yang C G, Wei Y T, Gan Y Y, Zhao Q 2020 *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **980** 164488
- [66] Wang L, Guan M Y, Qin H J, et al. 2021 *J. Instrum.* **16** P07021
- [67] Adams D Q, Alduino C, Alfonso K, et al. 2022 *Nature* **604** 53

REVIEW

Application and development of liquid argon detector in rare event detection*

Zheng Hao-Zhe¹⁾ Liu Yuan-Yuan^{1)†} Wang Li^{2)‡} Cheng Jian-Ping¹⁾

1) (*Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, Joint Laboratory of Jinping Ultra-low Radiation Background Measurement of Ministry of Ecology and Environment and Beijing Normal University, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

2) (*Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

(Received 27 October 2022; revised manuscript received 10 December 2022)

Abstract

Rare event detection is a frontier subject in particle physics and nuclear physics. In particular, dark matter detection, neutrino-free double beta decay and neutrino-nucleon coherent elastic scattering are being planned and implemented gradually. Rare event detection requires not only the detectors to possess excellent performances but also extremely low environmental background, so the selection of detectors and related materials is an important issue in rare event detection. Liquid argon has become an important scintillator material for scintillator detectors because of its low cost, good scintillation performance and large volume. Liquid argon was first studied in the 1940s as a sensitive material for ionizing radiation detectors. The first measurements of high-energy beta particles were obtained by using a liquid argon ionization chamber in 1953. The ICARUS group put forward the idea of constructing liquid argon temporal projection chamber, and made attempt to construct liquid argon temporal projection chamber in 1977. The scintillation light signals were collected for the first time in a liquid argon temporal projection chamber in 1999. Thus, the drift time of the particle can be obtained to determine the particle track. After development, single-phase liquid argon scintillator detector and two-phase argon time projection chamber have become two common types of liquid argon detectors, and have been extensively used in rare event detection experiments in recent years. For dark matter detection, the DEAP group and DarkSide group have achieved good results with single-phase liquid argon scintillation detector and two-phase argon time projection chamber, respectively. For neutrino-free double beta decay experiments, the GERDA group has done a lot of researches of liquid argon anti-coincidence system and applied the said system to experiments. The LEGEND group, which is the combination of GERDA and MAJORANA experimental group, upgraded the liquid argon anti-coincidence system which was applied to the following LEGEND-200 project. For neutrino-nucleon elastic scattering experiments, COHERENT obtained the latest results by using the liquid argon detectors. The Taishan neutrino-nucleon coherent elastic scattering project of the High Energy Institute of Chinese Academy of Sciences has also begun to study the feasibility of liquid argon anti-coincidence system. Finally, this paper discusses the direction of optimizing the liquid argon detector, such as exposure, background level and optical readout scheme, and gives a good prospect of liquid argon detector applied to rare event detection in the future.

Keywords: rare event detection, scintillation detector, time projection chamber, veto measure

PACS: 29.40.-n, 29.40.Mc, 95.35.+d, 23.40.-s

DOI: 10.7498/aps.72.20222055

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFA1604701) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 1222200227).

† Corresponding author. E-mail: yyliu@bnu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: wangl@bnu.edu.cn



液氩探测器在稀有事例探测中的应用和发展

郑昊哲 刘圆圆 王力 程建平

Application and development of liquid argon detector in rare event detection

Zheng Hao-Zhe Liu Yuan-Yuan Wang Li Cheng Jian-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 052901 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222055

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222055>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于中国散裂中子源多功能反射谱仪的高气压多丝正比室探测器的研制

Development of high-pressure multi-wire proportional chamber neutron detector for the China Spallation Neutron Source multipurpose reflectometer

物理学报. 2018, 67(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172618>

高时间稳定性的雪崩光电二极管单光子探测器

Avalanche photodiode single-photon detector with high time stability

物理学报. 2020, 69(7): 074204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191875>

利用气泡探测器测量激光快中子

Laser fast neutron measured by bubble detector

物理学报. 2018, 67(22): 222101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181035>

具有变革性特征的红外光电探测器

Recent progress on advanced infrared photodetectors

物理学报. 2019, 68(12): 120701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190281>

高速太赫兹探测器

Ultrafast terahertz detectors

物理学报. 2018, 67(9): 090702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180226>

具有光电倍增的宽光谱三相体异质结有机彩色探测器

Organic color photodetectors based on tri-phase bulk heterojunction with wide spectrum and photoelectronic multiplication

物理学报. 2018, 67(19): 198503 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180502>