



在零下186°C液氩中探索暗物质奥秘

舒以科^{1,2}, 尹纪龙^{1,2}, 王毅^{1,2*}, 杨长根^{1,2}

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

2. 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, E-mail: wangyi90@ihep.ac.cn

收稿日期: 2024-09-27; 接受日期: 2024-11-18; 网络出版日期: 2025-01-23

中国科学院国际伙伴计划(编号: 113111KYSB20210030)和国家自然科学基金(编号: 12020101004)资助项目

摘要 暗物质的探索是当前研究的热门领域, 氩因其优越特性在极低本底的暗物质直接探测实验中发挥着重要作用. 许多实验利用氩进行暗物质探测并取得了显著成果, 其中以DarkSide-50和DEAP-3600实验最有代表性. DEAP-3600是目前在运行质量最大的单相液氩暗物质探测实验, 而DarkSide-50则采用双相氩时间投影室, 结合多项创新技术, 在高质量范围内实现了“零本底”探测的突破, 并对暗物质与普通粒子的相互作用截面在低质量范围内提供了最强约束. 正在建设和规划中的DarkSide-20k, DarkSide-LowMass和ARGO实验, 将在DarkSide-50和DEAP-3600实验的基础上, 应用新一代技术, 力求将暗物质与普通物质相互作用的截面上限降低至中微子雾范围. 其中, DarkSide-LowMass实验将由中国科学院高能物理研究所牵头, 在中国锦屏地下实验室筹建, 旨在探测从sub-GeV/c²到10 GeV/c²的暗物质, 并对太阳中微子与氩原子核的相干弹性散射进行直接测量. 本文将对利用液氩进行暗物质直接探测的相关实验进行综述.

关键词 暗物质, 液氩, 中微子, 直接探测实验

PACS: 14.60.Lm, 29.40.Mc, 61.25.Bi, 95.35.+d

1 引言

在天文观察中, 物理学家们通过观察宇宙大尺度结构及其运动发现宇宙中存在着一类特殊的物质^[1,2], 它尚未被人类现有手段直接观测到, 却占据了宇宙中的很大一部分, 对宇宙的演化以及如今世界的形成都有不可忽视的作用, 这类物质被称为暗物质^[3].

关于暗物质的具体组成, 目前众说纷纭, 其中备受瞩目的候选者是弱相互作用重粒子(Weakly Interacting

Massive Particle, WIMP), 如果WIMP能稳定存在, 其质量密度正好能满足天文学观测的限制, 因此WIMP成为了现在各类暗物质直接探测实验探索的热门对象^[4-6].

暗物质的探测方式可以分为对撞机探测、间接探测和直接探测三种. 对撞机探测通过高能粒子对撞寻找异常的能量损失进而推测是否对撞出暗物质^[7]; 间接探测试图通过探测暗物质湮灭或衰变等产生的标准模型粒子判断暗物质的存在^[8], 而直接探测通过探测

引用格式: 舒以科, 尹纪龙, 王毅, 等. 在零下186°C液氩中探索暗物质奥秘. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 111003

Shu Y K, Yin J L, Wang Y, et al. Exploring the mysteries of dark matter with liquid argon at -186°C (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 111003, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0412

暗物质粒子与普通物质的直接作用产生的信号寻找暗物质^[9]. 惰性元素(如氩和氙)由于其稳定的物理化学性质, 相对较低的沸点, 高的光产额, 对自身产生的闪烁光透明等特点, 成为了直接寻找WIMP暗物质以及其他低本底实验的常用靶物质^[10]. 利用液氩作为靶物质的实验组有XENON^[11], LUX-ZEPLIN^[12]和PandaX^[13]等, 而利用液氙作为靶物质的实验组有DarkSide^[14], DEAP^[15]和ArDM^[16]等. 2011年, 中国科学院高能物理研究所正式加入DarkSide国际暗物质实验, 在中国开启了利用液氩进行暗物质直接探测这一领域.

氩作为靶物质在暗物质直接探测领域有独特的优势. 首先, 氩的沸点低, 实验运行温度在85 K左右, 大多数杂质在此温度下都为固态, 容易去除. 其次, 氩的原子质量相较于氙更低, 对低能的核反冲事件更灵敏, 因此探测的阈值更低, 在入射粒子能量相同的情况下, 能探测到质量更小的WIMP沉积的能量. 同时, 氩的闪烁光快成分与慢成分时间差别很大, 对不同信号的波形鉴别能力强. 而且氩的价格相对便宜, 适合用于大型探测器作为靶物质材料.

早在1977年, 诺贝尔奖得主Rubia^[17]就提出使用液氩时间投影室(Liquid Argon Time Projection Chamber, LArTPC)寻找中微子, 并在ICARUS实验中使用. 之后, ICARUS实验组^[18]发现了可以利用脉冲波形分析(Pulse Shape Discrimination, PSD)来分辨一次碰撞事例是电子反冲还是核反冲, 这是寻找WIMP的一把关键钥匙. 反应类型是根据一个粒子在液氩中传递能量的对象划分的, 首先将能量传递给氩原子核的过程是核反冲, 而将能量传递给核外电子是电子反冲. 如果入射粒子是光子或电子, 则主要发生电子反冲; 如果入射粒子是中子或WIMP, 则主要发生核反冲, 因此可以根据反应类型排除光子和电子本底. 随后WARP实验作为第一代利用液氩时间投影室寻找暗物质的实验, 取得了相应的成果^[19].

目前利用液氩探测暗物质的主流技术是双相氩时间投影室(Dual-phase Argon Time Projection Chamber, DArTPC), 首先使用该技术的物理实验是WARP实验, 随后是DarkSide-50实验. 图1展示了DArTPC的工作原理, 大量的液氩储存在圆柱形的容器中, 液氩的上方是一层薄薄的气态氩, 在气液分界面下几毫米处, 有一张金属网将电场分为上下两部分, 上方是场强较高的萃取电场, 而下方是场强较低的漂移电场. 当一个粒子

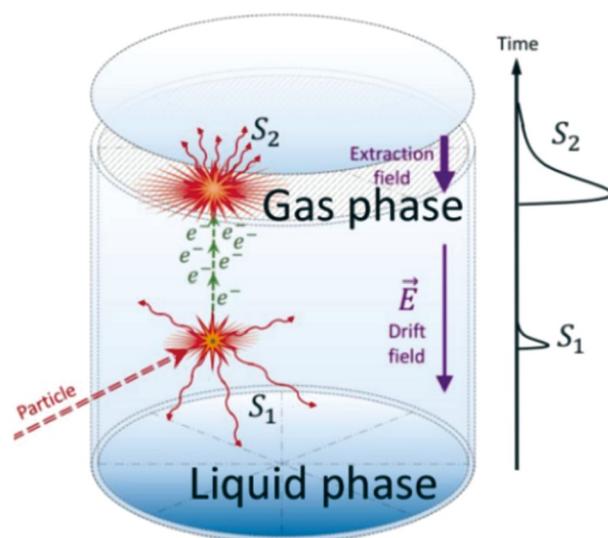


图1 DArTPC探测示意图及工作原理. 入射粒子在液氩中发生相互作用产生闪烁光S1并电离出一部分电子, 电子在漂移电场的作用下匀速向气氩运动, 在接近气液交界面时被加速并在气氩中发生场致发光产生S2闪烁光

Figure 1 A schematic diagram and working principle of the DArTPC detector. An incident particle interacts in liquid argon, producing scintillation light (S1) and ionizing some electrons. The electrons drift toward gaseous argon under the influence of a drift electric field. As they approach the liquid-gas interface, they are accelerated and induce electroluminescence in the gaseous argon, producing secondary scintillation light (S2).

进入探测器与液氩发生相互作用产生能量沉积时, 会使氩原子激发或者电离. 激发态的氩会形成氩的二聚物, 退激发时发射波长为128 nm的闪烁光. 由于闪烁光的波长不在光电倍增管的理想吸收波长范围内, 需要波长转换材料将闪烁光波长转换到可被光电倍增管吸收效率较高的范围(例如420 nm), 一般实验使用的波长转换材料都是镀在容器内壁的四苯基丁二烯(TPB)^[20], 闪烁光被TPB吸收再放出后会到达上下两端的光电倍增管. 这一液氩闪烁过程产生的信号称为S1信号. 除了闪烁光, 粒子与液氩反应也会电离出电子, 这些电子会在漂移电场作用下匀速向上移动, 到达萃取电场区域, 在这里电子会被加速到一定能量, 通过气液交界面到达气态氩中, 与气氩发生场致发光, 产生闪烁光, 经TPB转换后进入光电倍增管, 这一过程产生的信号称为S2信号. 利用这两种信号到达光电倍增管的时间差和沉积能量的重心, 能够重建出初始相互作用发生的三维位置. 同时, 由于电子反冲与核反冲所形成的氩的二聚物的单态与三重态比例不同, 可以

直接通过闪烁光波形进行区分. 例如在DarkSide-50实验中通常使用S1闪烁光信号前90 ns波形占比来区分电子反冲事例和核反冲事例, 误判率小于 $1/10^7$, 从而可以利用参数 f_{90} , 即S1信号前90 ns的信号强度与整段信号强度的比值, 来分辨反应的类型^[21]. 对于微小的能量沉积, DARTPC有能力进行低阈值探测, 此时由于S1信号过小不能被有效探测, 可仅使用S2信号, 即“电离通道”信号对低能事例进行研究, 从而进行低质量暗物质的直接探测^[22].

除了双相氩技术外, 单相液氩探测器也可用于暗物质的直接探测, 例如DEAP-3600实验. 这类探测器只探测粒子与液氩相互作用沉积能量发生的闪烁光, 也就是利用S1信号来探测暗物质. 由于粒子在液氩中发生电子反冲与核反冲产生的反射光的快成分与慢成分比例不一, 会在S1信号波形上反映出来, 可以利用此识别一次事件的反应类型.

中微子雾(Neutrino Fog)是来自太阳、大气和超新星的中微子与探测器发生弹性相干散射产生的背景^[23]. 如果暗物质与普通物质的反应截面在中微子雾以下, 那么探测暗物质将会变得十分困难, 因为技术上几乎不可能将中微子与暗物质信号区分开. 各个暗物质直接探测实验正努力将探测精度向中微子雾的水平逼近, 目前仍未探测到暗物质信号, 需要进一步提高曝光量或降低探测阈值, 这也是下一代实验需要努力的方向.

2 全球氩暗物质合作组

过去十余年, 利用液氩技术进行暗物质直接探测在实验上取得了突飞猛进的发展. 相关实验组例如DarkSide, DEAP, ArDM及CLEAN^[24]均在物理和技术上取得了重大突破. 随着对探测器灵敏度和曝光量要求的不断提高, 为了更好地利用液氩探测器技术进行暗物质的直接探测, 2017年, 全球氩暗物质合作组(Global Argon Dark Matter Collaboration)成立了^[25].

全球氩暗物质合作组, 顾名思义, 是集结了当时全球范围内所有使用液氩进行暗物质直接探测的研究人员组成的大型国际合作组织. 具体整合的相关实验包括DarkSide-50, DEAP-3600, ArDM和miniCLEAN, 人员包括了来自意大利、美国、中国、加拿大、英国、俄罗斯等14个国家, 近70所研究机构的超500名研究

人员.

全球氩暗物质合作组的成立, 将引导相关的科研人员对将暗物质与普通物质相互作用的灵敏度向中微子雾方向推进. 具体的实验规划包括: 下一代高质量暗物质直接探测实验DarkSide-20k^[26]、终极高质量暗物质直接探测实验ARGO^[25]和终极低质量暗物质直接探测实验DarkSide-LowMass^[27].

3 来自地下的低本底氩

对于暗物质直接探测这一类超低本底实验, 通常需要探测器建造所使用的材料和探测器的靶物质具有极低的放射性本底. 随着液氩暗物质实验规模的不断扩大, 空气中分离所得到的氩中所含的微量氩-39同位素逐渐成为了探测器本底和阈值的瓶颈.

大气中的氩-39主要是由宇宙射线与大气碰撞产生. 氩-39会通过 β 衰变释放电子, 衰变的能量最高可达565 keV. 在大气中, 氩-39的丰度是 8.2×10^{-16} , 放射性活度为1 Bq/kg, 如直接使用大气提取的氩将会给实验带来不可忽视的放射性本底^[28].

DarkSide-50实验提出使用来自地下的低本底氩设想, 即使用深埋地下未接受到大量宇宙射线辐照的氩作为探测器的靶物质. 这类氩气将全部由稳定态的氩-40组成, 氩-39的含量微乎其微. 2010年前后, DarkSide-50实验在美国科罗拉多州的一个二氧化碳气田探明了该气田中二氧化碳中含有氩气, 可供开采使用. 在随后的几年中, DarkSide-50实验利用一个小型的地下氩开采及提纯装置获得了约160 kg来自地下的低本底氩, 并运至意大利格兰萨索地下实验室供DarkSide-50实验使用. 2016年, DarkSide-50实验发布了使用地下氩的暗物质直接探测结果, 证明其中氩-39含量是空气分离得到的氩的约1/1400(如图2所示)^[21].

鉴于DarkSide-50实验成功使用了来自地下的低本底氩进行暗物质的直接探测并取得了出色的物理成果, 全球氩暗物质合作组决定在未来的实验中均使用来自地下的低本底氩. 考虑到未来实验对来自地下的低本底氩用量是数百吨级的, 因此需要建造大规模工业化的开采平台和提纯平台, 即正在建设的URANIA和ARIA项目.

URANIA是全球氩暗物质合作组在建的大型工业化地下氩开采平台, 位于美国科罗拉多州一个二氧化

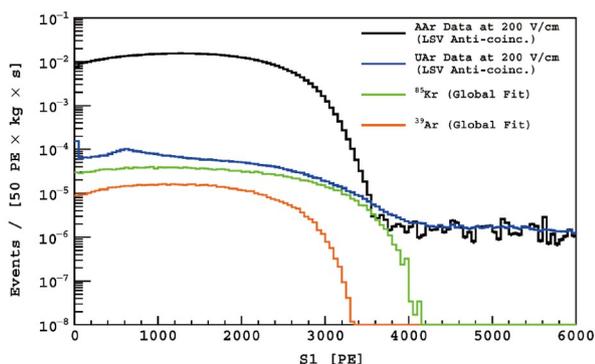


图 2 DarkSide-50实验在200 V/cm电场下, 测得的大气氩(AAr, Atmospheric Argon, 黑色)与地下氩(UAr, Underground Argon, 蓝色)单次散射的S1信号事例数, 以及蒙特卡罗模拟出的 ^{85}Kr (绿色)和 ^{39}Ar (橙色)的事例数^[21]

Figure 2 In the DarkSide-50 experiment, under an electric field of 200 V/cm, the numbers of single-scatter S1 signal events for atmospheric argon (AAr, Atmospheric Argon, black) and underground argon (UAr, Underground Argon, blue) were measured, along with the Monte Carlo simulated event distributions for ^{85}Kr (green) and ^{39}Ar (orange) [21].

碳气田。该装置预计2024年底建成并投入使用, 建成后预计氦气日开采量可达250–330 kg。ARIA则是全球氦暗物质合作组在建的大型低温精馏平台, 建设地点位于意大利撒丁岛Seruci的一个废弃的矿井。该装置高约350 m, 可对开采得到的来自地下的低本底氦进行高效的化学提纯, 日提纯速率可达1 t (出产纯度99.999%)。同时, ARIA低温精馏平台还可以对氦进行同位素分离, 进一步去除残留的氦-39杂质^[29]。

4 已经取得的物理成果: DarkSide-50和DEAP-3600实验

DarkSide-50实验位于意大利格兰萨索国家实验室(Laboratori Nazionali del Gran Sasso, LNGS)。LNGS是目前世界上在运行实验数量最多的地下实验室, 其中有众多关于中微子和暗物质的实验。LNGS位于格兰萨索山下, 上方有1400 m的岩石覆盖, 能阻挡绝大多数的宇宙线, 而且岩石中铀、钍含量较低, 来自放射性元素的中子本底是地表的1/1000。DarkSide-50实验在LNGS的Hall-C里开展。图3展示了DarkSide-50 DArTPC探测器的结构。圆柱体结构中间部分装有约46.4 kg的氦, 圆柱体的侧壁材料为反射率很高的聚四氟乙烯(PTFE), 其内侧镀有一层TPB, 可以将闪烁光的波长由128 nm转变到光电倍增管接受效率最高的波长

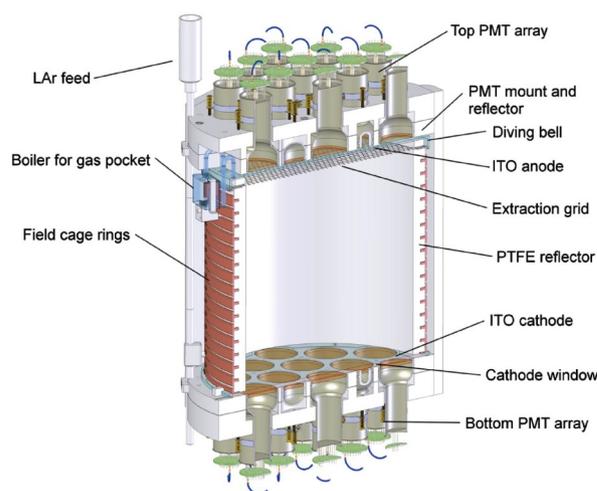


图 3 DarkSide-50实验DArTPC探测器结构图^[14]

Figure 3 Structural diagram of the DArTPC detector of the DarkSide-50 experiment [14].

范围内(约420 nm)。圆柱体的上下两端有两组光电倍增管阵列用于探测闪烁光信号。镀在上下两个石英窗口上的氧化铟锡(ITO)提供电场的两极, ITO对于420 nm的光有很高的透过率, 可以保证绝大多数光子能穿过并被PMT吸收。PTFE侧壁外有一排电场环用于维持电场的均匀性, 在接近上端的位置有一张不锈钢网将电场分为上下两个区域, 分别为2.8 kV/cm的萃取电场和200 V/cm的漂移电场。上端还有一个加热装置可以保持上层的氦处于气态, 且将气态与液态分界面稳定在网格的上方4.7 mm处。

DarkSide-50实验最早使用大气氦开展实验, 自2015年开始改用放射性含量更低的地下氦运行, 至2020年结束运行, 曝光量达到16.6t d。在对高质量WIMP的探测方面, 在90%置信度下, 对质量为1 TeV/c²的WIMP给出了截面上限为 $3.78 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ 的结果, 通过各项参数(如 f_{90})对S1的限制, 在高质量WIMP区间内可以去除所有的中子本底(如图4所示), DarkSide-50实验获得了“零本底”暗物质直接探测结果^[14]。这项成果也突显了氦在暗物质直接探测实验对本底控制的独有优势。

此外, DarkSide-50实验还利用DArTPC能量阈值低的特点在低质量WIMP直接探测方面取得了世界领先的成果。2018年, DarkSide-50发表了利用电离通道的低质量暗物质直接探测分析, 获得了当时世界上最好的结果^[22]。随后, 2023年, DarkSide-50实验又对这一

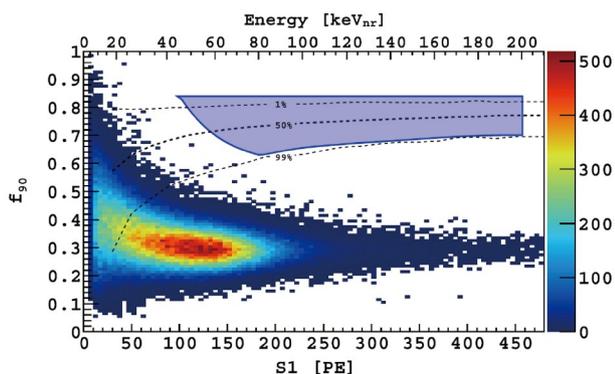


图 4 DarkSide-50实验得到的 f_{90} 与S1分布. 蓝色线所围成的区域是WIMP探测感兴趣的区域. 所有的本底事例都在感兴趣区域之外^[14]

Figure 4 The f_{90} vs. S1 distributions obtained from the DarkSide-50 experiment. The region enclosed by the blue line represents the region of interest for WIMP detection. All background events lie outside the region of interest [14].

结果进行了更新, 包括背景模型, 数据选择, 探测器响应校准等, 使得DarkSide-50实验在质量区间 $1.2\text{--}3.6\text{ GeV}/c^2$ 范围内继续保持领先, 如图5所示^[30]. DarkSide-50实验在低质量暗物质直接探测上给出的限制出乎了实验组内所有科研人员的预料, 充分体现了该技术在低质量暗物质直接探测上的优势. 鉴于此, 全球氦暗物质合作组专门规划了利用DARTPC技术的终极低质量暗物质直接探测实验DarkSide-LowMass, 力求在低质量WIMP段使探测灵敏度达到中微子雾范围^[27].

DEAP-3600实验位于加拿大的SNOLAB地下实验室, 处在地下2000 m深度. SNOLAB实验室由最初的SNO中微子实验一步步扩建至今. 20世纪70年代到90年代的HOMESTAKE实验^[31]通过氯的逆 β 衰变过程观测电子味道的太阳中微子, 发现太阳中微子缺失之谜. 为解决此问题, SNO实验^[32]利用重水作为媒介, 证明了第二种味道的太阳中微子的存在, 并成功地发现了中微子振荡效应. SNO实验的成功使负责人McDonald获得了诺贝尔奖, SNOLAB的扩建也随之而来. 图6是DEAP-3600的探测器示意图^[15]. 最中心的半径为85 cm、厚度为5 cm的球形有机玻璃容器内装有3600 kg的液氦. 球形有机玻璃容器内侧镀有一层TPB用于波长位移, 球形容器外密布着有机玻璃光导, 用来将转换过波长的光导入光电倍增管. 入射粒子与液氦发生相互作用产生闪烁光, 经过波长转换进入光电

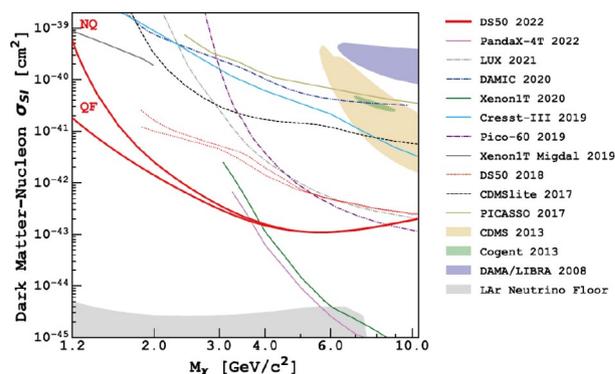


图 5 DarkSide-50对低质量WIMP的截面限制, 其中NQ (No Quenching)代表无淬灭效应, QF (Quenching Factor)代表有淬灭效应^[30]

Figure 5 The cross-section limits on low-mass WIMPs set by DarkSide-50, “NQ” (No Quenching) represents the scenario without quenching effects, while “QF” (Quenching Factor) accounts for the quenching effects [30].

倍增管, 转化为电信号.

DEAP-3600实验从2016年11月开始运行, 共运行了231 d, 曝光量达到758 t d, 是目前液氦曝光量最大的实验. 在对数据进行分析后, 得到了在所有使用氦探测暗物质的实验中, 在WIMP质量大于 $30\text{ GeV}/c^2$ 的质量区间内最好的限制结果(如图7所示). 此外, DEAP-3600还做出了探测接近普朗克能标的高质量暗物质的尝试, 在多次散射信号的利用上有很多创新之举^[15,33,34].

5 下一代高质量暗物质直接探测实验DarkSide-20k和规划中的终极高质量暗物质直接探测实验ARGO

DarkSide-20k实验是继DarkSide-50的下一代利用DARTPC技术的暗物质直接探测实验. 其探测器将在DarkSide-50的基础上进行全方位的升级. 探测器结构如图8所示.

DarkSide-20k实验探测器分为两部分: 中心探测器(图8中不锈钢罐内部分)和外部缓冲区. 其中外部缓冲区将使用约700 t的大气氦作为中心探测器的被动屏蔽, 用于屏蔽一部分环境本底. 中心探测器则全部使用来自地下的低本底氦, 预计总用量约100 t, 其中有效质量高达50 t, 是DarkSide-50实验的近1000倍, 如此大的靶物质质量将大幅提升暗物质探测效率, 有望突破现

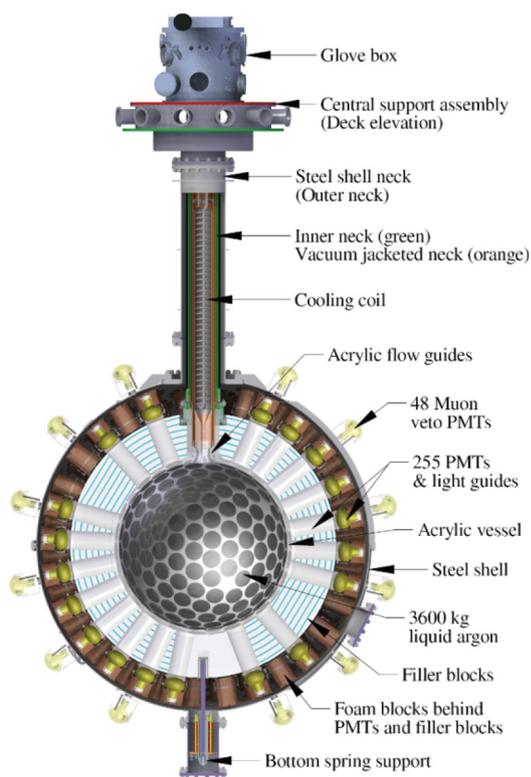


图 6 DEAP-3600探测器示意图. 球形有机玻璃容器中充满液氩, 有机玻璃容器外接光电倍增管. 探测器整体包裹在不锈钢外壳中^[15]

Figure 6 Schematic diagram of the DEAP-3600 detector. The spherical acrylic vessel is filled with liquid argon, and photomultiplier tubes are connected to the exterior of the acrylic vessel. The entire detector is enclosed within a stainless steel shell [15].

有实验对WIMP型暗物质给出的限制.

DarkSide-20k的DArTPC呈八边形, 高348 cm, 直径为350 cm. 顶部和底部由高纯度的有机玻璃板构成, 侧壁由掺钎有机玻璃板构成. 探测器内表面镀有导电高聚材料Clevios^[35]作为阴极、阳极和电场环, 配合TPC内的不锈钢网为探测器提供匀强漂移电场和萃取电场. TPC侧壁密排绝缘反射膜ESR (Enhanced Specular Reflector)以提高TPC整体的光产额, 整个TPC内表面则镀有TPB作为波长位移材料.

为了延续DarkSide-50实验“零本底”探测的出色成果, DarkSide-20k实验提出了将中子反符合探测器与DArTPC集成的创新性设计. TPC中的有效靶物质将被一种全新的中子俘获材料, 掺钎有机玻璃所包围(包括TPC的掺钎有机玻璃板侧壁和嵌在TPC顶部和底部密排的掺钎有机玻璃砖). 相关中子反符合原理如图9所示. 外来中子首先被掺钎有机玻璃中的钎俘获, 释放

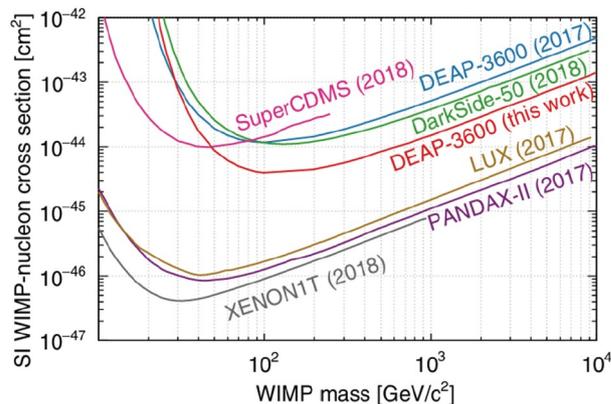


图 7 在90%置信度下, DEAP-3600对WIMP的截面限制, 在使用液氩探测高质量WIMP探测上达到了最好水平^[15]

Figure 7 At 90% confidence level, DEAP-3600's cross-section limits on WIMPs have achieved the best sensitivity for detecting high-mass WIMPs using liquid argon [15].

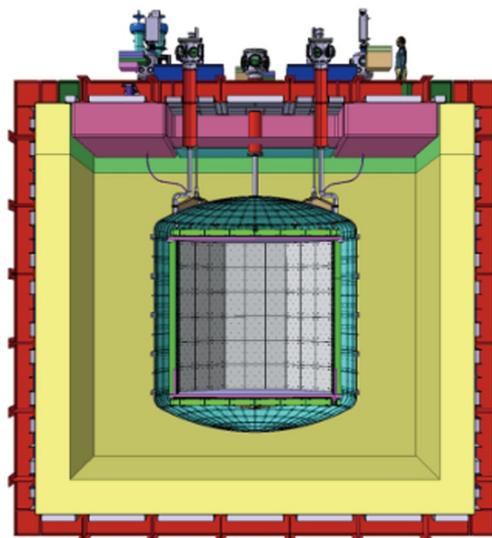


图 8 DarkSide-20k探测器示意图. 中心是DArTPC, 包裹在圆柱型的不锈钢容器中, 不锈钢容器浸没在外层氩中

Figure 8 Schematic diagram of the DarkSide-20k detector. At the center is the DArTPC, enclosed within a cylindrical stainless steel vessel, which is immersed in an outer layer of argon.

出约4条总能量为8 MeV的伽马射线, 这些伽马射线与掺钎有机玻璃附近的液氩发生相互作用产生闪烁光, 通过对这些闪烁光的探测和分析可以有效排除中子产生的信号. 依托钎元素高中子俘获截面的特性, 该设计一方面保证了中子俘获效率的最大化, 同时由于掺钎有机玻璃材料紧贴探测器有效区域放置, 可以最大程度排除任何外来中子本底对实验的影响. 根据此设计, 经过模拟计算验证, DarkSide-20k在200 t year曝光量

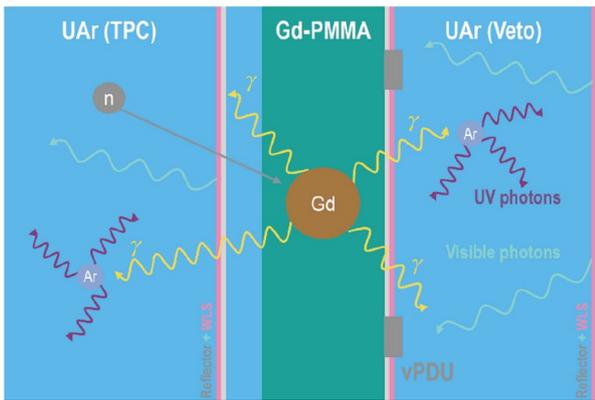


图 9 DarkSide-20k中掺钆有机玻璃作为中子反符合的反应机制示意图

Figure 9 Diagram of the reaction mechanism of gadolinium-doped acrylic used for neutron veto in DarkSide-20k.

下的总中子本底数将小于0.1个, 符合“零本底”探测需要. 中国科学院高能物理研究所团队联合扬州大学和泰兴汤臣有机玻璃公司, 完成了对掺钆有机玻璃核心技术的研发并成功实现了该技术工业的批量化生产.

DarkSide-20k实验将使用硅光放大器(Silicon Photo Multiplier, SiPM)代替光电倍增管作为光信号的读出器件. SiPM受磁场影响小, 有更小的工作电压, 更大的增益. SiPM相较于常规光电倍增管有很多优势, 例如电荷分辨率高, 光子探测效率可提高至45%, 单位面积放射性活度小等. DarkSide-20k将使用击穿电压为28 V, 信噪比大于8且后脉冲小于10%的低温SiPM. DarkSide-20k实验组在国际上研发了大面积读出SiPM阵列技术, 单通道面积高达 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$, 探测器将共有2000多个通道读出^[36].

DarkSide-20k探测器的建设于2022年正式开始, 预计在2026年底完成并开始试运行, 实验预期运行时长为10年, 预计积累200 t year曝光量的数据. 如图10所示, 在90%置信度下, $1\text{ TeV}/c^2$ WIMP排除截面低至 $6.3\times 10^{-48}\text{ cm}^2$, 在 5σ 下发现 $1\text{ TeV}/c^2$ WIMP的截面低至 $2.1\times 10^{-47}\text{ cm}^2$.

继DarkSide-20k之后, 全球氩暗物质合作组将开始建设ARGO实验以完成对高质量WIMP暗物质直接探测的最终冲刺. ARGO预计使用400 t来自地下的低本底氩, 预计曝光量3000 t year, 将在高质量WIMP区间达到中微子雾探测极限. ARGO的预计建设地点将是加拿大的SNOLAB地下实验室.

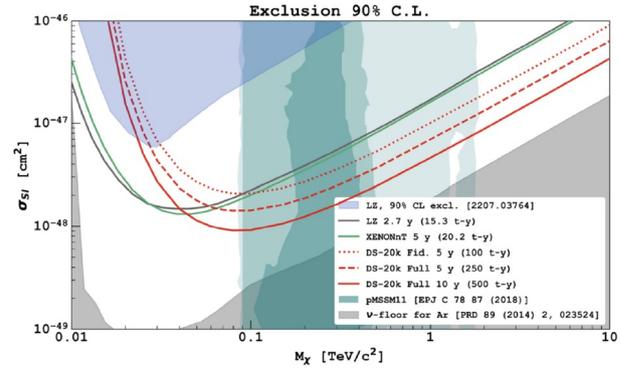


图 10 DarkSide-20k在不同曝光量下对高质量WIMP截面的限制预期^[37]

Figure 10 Expected DarkSide-20k exclusion limits for WIMP at different exposure levels [37].

6 终极低质量暗物质直接探测实验DarkSide-LowMass

DarkSide-LowMass是全球氩暗物质合作组规划的终极低质量暗物质直接探测实验. DarkSide-LowMass将利用超低阈值双相氩探测器技术, 结合电离电子信号通道进行低质量暗物质的寻找. 在DAR-TPC中, 粒子碰撞产生的电离电子在漂移和萃取电场的作用下会在气态氩中发生电致发光产生S2信号. 根据电子产额可以利用S2信号重建出对应的电离电子数. 若将探测阈值设为单个电离电子, 对应的粒子沉积能量阈值则为 $0.14\text{ keV}_{\text{nr}}$ 或 $0.02\text{ keV}_{\text{ee}}$ ^[22,38], 因此通过S2通道的测量将会获得阈值很低的信号, 有助于进行质量较低的暗物质信号的捕捉. 高质量暗物质的探测对曝光量的要求高, 需要通过大量的数据实现对暗物质直接探测灵敏度的提升, 而低质量暗物质直接探测对探测器的阈值有极高的要求, 曝光量方面则相对要求不高, 一个小型探测器即可达到预期的结果.

DarkSide-LowMass与DarkSide-20k由于设计和探测目标的差异, 各自的主要本底也不相同. DarkSide-20k针对高质量WIMP的直接探测, 可以使用S1来排除电子反冲事例. 由于WIMP信号属于核反冲信号, 于是中子本底将是该实验最主要的本底. 对于DarkSide-LowMass, 由于所关心的能区较低, 中子本底贡献小, 且此能区S1信号过小, 无法区分电子反冲事例与核反冲事例, 低能的电子反冲信号将是该实验重点关注的本底. 为了压制这类本底, DarkSide-Lowmass计划使

用进一步精馏的地下氩, 在使用低温精馏的方法去除氩-85的同时使用同位素分离的方法进一步降低氩-39的含量. 预期提纯后氩中的氩-85将能被完全去除, 氩-39的放射性活度较DarkSide-50实验能至少再降一个数量级, 即达到73 $\mu\text{Bq/kg}$.

DarkSide-LowMass实验装置的核心仍是一个DARTPC探测器, 如图11所示. 计划在DARTPC内部使用1.5 t的地下氩, 有效质量约为1 t. 探测器整体由高纯度的有机玻璃构成, 内壁上镀有导体材料Clevios用于TPC的阴极. 阳极和电场环. TPC内部也分为漂移电场和萃取电场, 场强分别为200 V/cm和6.5 kV/cm. 上下两端和DarkSide-20k一样计划配备SiPM收集光信号.

在DarkSide-LowMass实验中, 低能电子反冲本底是研究材料放射性时所需要考虑的主要本底. 实验为此专门设计了两种伽马射线反符合方法: 一是处在SiPM和有机玻璃板之间的缓冲反符合区, SiPM中放射性元素发出的伽马射线会在有机玻璃板和SiPM之间的宽约10 cm的缓冲区域产生闪烁光信号, 通过探测这些信号进而可以排除来自SiPM中的材料放射性本底; 另一个是将DARTPC整体浸没在地下提取氩中, 外层的氩作为外部主动屏蔽可以排除来自不锈钢低温恒

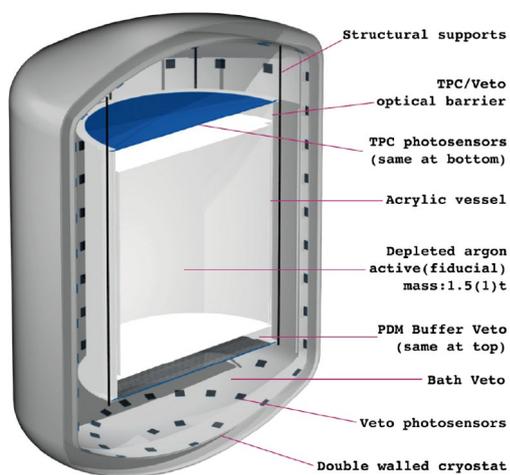


图 11 DarkSide-LowMass中心探测器结构示意图. 有机玻璃组成的圆柱体内有1.5 t地下氩, 有效质量约1 t. 上下两端有SiPM阵列, 在SiPM阵列与装液的不锈钢容器之间隔开的空间是缓冲反符合区, 整体浸没在地下氩中^[27]

Figure 11 Schematic diagram of the central detector structure in DarkSide-LowMass. The cylindrical vessel made of acrylic contains 1.5 t of underground argon, with an active mass of approximately 1 t. SiPM arrays are aligned at both ends, and the space between the SiPM arrays and the hydraulically sealed stainless steel container is a buffer veto region, which is immersed in underground argon^[27].

温器和外界的伽马本底. 整个探测器将放置在一个直径约为8 m的水缸中, 用于屏蔽环境本底.

DarkSide-LowMass的设计探测阈值为2个电离电子, 分析阈值为4个电离电子. 在如此低阈值的情况下, 杂电子(Spurious Electron)会为事例筛选带来不小的影响, 因此需要对杂电子的来源进行研究. 基于DarkSide-50的实验结果, 一部分杂电子可能来自于杂质的吸收和再放出, 因此提高氩的纯度是未来一大重点. 另外, 波长转换材料TPB在液氩中是可溶的(浓度约为O(ppb)级别), 且TPB具有长达1 ms的激发时间常数, 这是潜在的杂电子本底来源, 未来可能会用别的波长转换材料替代来减少杂电子影响^[39].

由于DarkSide-LowMass探测器共只需要使用约5 t的液氩作为探测介质, 相较于其他下一代液氩直接探测暗物质实验规模较小, 于是低阈值将是探测器技术方面的一大挑战. DarkSide-LowMass实验的设计基准曝光量为1 t year. 在这个曝光量下, DarkSide-LowMass给出的在WIMP质量为1–10 GeV/c^2 时的截面限制能极大程度趋近中微子雾范围, 如图12所示^[27].

DarkSide-LowMass实验将是一个由中国科学院高能物理研究所牵头的国际合作实验, 预计在中国锦屏地下实验室建设. 锦屏地下实验室位于四川省锦屏山下, 地处成都西南方向约500 km. 实验室位于山体间交通隧道内, 锦屏山交通隧道长约17.5 km, 垂直岩石厚度可达2.5 km, 且实验室周围岩石主要由大理石构成, 放射

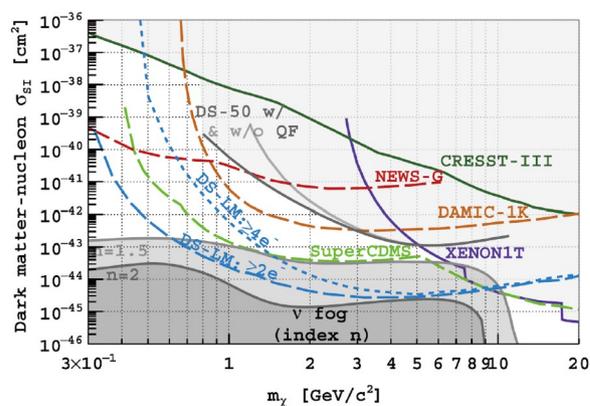


图 12 DarkSide-LowMass在1 t year曝光量下, 最低阈值取2个电子和4个电子分别对应的预期限制^[27]. n 的定义见文献^[23]

Figure 12 The exclusion limits for DarkSide-LowMass at a 1 t year exposure are obtained for two-electron and four-electron thresholds, respectively^[27]. The definition of n is given in ref. ^[12].

性杂质含量低, 是进行地下低本底实验的理想场所.

鉴于DarkSide-LowMass实验丰富的物理目标, 包括对低质量暗物质的直接探测和中微子地板的探索等, 加之其体量不大, 性价比高, 或将是首个能够大面积达到中微子雾的暗物质直接探测实验, 且有望对太阳中微子与氩原子核的相干散射进行直接测量. 我们期待这一实验在中国落成, 开花结果.

7 结论

液氩已经被证实是出色的暗物质直接探测实验靶

物质. 一些实验如DarkSide-50和DEAP-3600利用氩作为探测靶物质, 已经取得了优秀的成果. 全球氩暗物质合作组的成立将这些实验组联合起来, 推动下一代实验的规划和建设. 未来的DarkSide-20k和终极暗物质直接探测实验ARGO将着重于高质量暗物质的寻找, 而由中国科学院高能物理研究所牵头的DarkSide-LowMass实验将专注于探测低质量暗物质. 与此同时, 这些实验也将有能力直接探测到中微子与核子的弹性相干散射. 可以预见, 在未来的几年中, 以氩为基础的暗物质直接探测实验将继续放光发热, 走在物理研究领域的前沿.

致谢 本文作者衷心感谢中国科学院高能物理研究所对利用液氩进行暗物质直接探测研究的大力支持, 同时向国内相关领域的专家学者对这一研究方向的关注与支持表示诚挚谢意. 特别感谢全球液氩暗物质合作组的全体同仁, 感谢他们在利用液氩进行暗物质直接探测领域的卓越贡献.

参考文献

- 1 Faber S M, Gallagher J S. Masses and mass-to-light ratios of galaxies. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1979, 17: 135–187
- 2 Ade P A R, Aghanim N, Armitage-Caplan C, et al. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2014, 571: A16
- 3 Zwicky F. On the masses of nebulae and of clusters of nebulae. *Astrophys J*, 1937, 86: 217
- 4 Bertone G, Hooper D, Silk J. Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints. *Phys Rep*, 2005, 405: 279–390
- 5 Steigman G, Turner M S. Cosmological constraints on the properties of weakly interacting massive particles. *Nucl Phys B*, 1985, 253: 375–386
- 6 Jungman G, Kamionkowski M, Griest K. Supersymmetric dark matter. *Phys Rep*, 1996, 267: 195–373
- 7 Boveia A, Doglioni C. Dark matter searches at colliders. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2018, 68: 429–459
- 8 Pérez de los Heros C. Status, challenges and directions in indirect dark matter searches. *Symmetry*, 2020, 12: 1648
- 9 Misiaszek M, Rossi N. Direct detection of dark matter: A critical review. *Symmetry*, 2024, 16: 201
- 10 Baudis L. WIMP dark matter direct-detection searches in noble gases. *Phys Dark Univ*, 2014, 4: 50–59
- 11 Aprile E, Aalbers J, Abe K, et al. The XENONnT dark matter experiment. *Eur Phys J C*, 2024, 84: 784
- 12 Aalbers J, Akerib D S, Akerlof C W, et al. First dark matter search results from the LUX-ZEPLIN (LZ) experiment. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 041002
- 13 Zhang H G, Abdurkerim A, Chen W, et al. Dark matter direct search sensitivity of the PandaX-4T experiment. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 31011
- 14 Agnes P, Albuquerque I F M, Alexander T, et al. DarkSide-50 532-day dark matter search with low-radioactivity argon. *Phys Rev D*, 2018, 98: 102006
- 15 Ajaj R, Amaudruz P A, Araujo G R, et al. Search for dark matter with a 231-day exposure of liquid argon using DEAP-3600 at SNOLAB. *Phys Rev D*, 2019, 100: 022004
- 16 Badertscher A, Bay F, Bourgeois N, et al. ArDM: First results from underground commissioning. *J Inst*, 2013, 8: C09005
- 17 Rubia C. The Liquid-Argon Time Projection Chamber: A New Concept for Neutrino Detectors. Technical Report. European Organization for Nuclear Research. 1977. CERN-EP/77-08
- 18 Barnabà O, Chen Y B, Musitelli G, et al. A full-integrated pulse-shape discriminator for liquid scintillator counters. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 1998, 410: 220–228

- 19 Benetti P, Acciarri R, Adamo F, et al. First results from a dark matter search with liquid argon at 87 K in the gran sasso underground laboratory. *Astropart Phys*, 2008, 28: 495–507
- 20 Moss Z, Bugel L, Collin G, et al. Improved TPB-coated light guides for liquid argon TPC light detection systems. *J Inst*, 2015, 10: P08017
- 21 Agnes P, Agostino L, Albuquerque I F M, et al. Results from the first use of low radioactivity argon in a dark matter search. *Phys Rev D*, 2016, 93: 081101
- 22 Agnes P, Albuquerque I F M, Alexander T, et al. Low-mass dark matter search with the DarkSide-50 experiment. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 081307
- 23 O'Hare C A J. New definition of the neutrino floor for direct dark matter searches. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 251802
- 24 Rielage K, Akashi-Ronquest M, Bodmer M, et al. Update on the MiniCLEAN dark matter experiment. *Phys Procedia*, 2015, 61: 144–152
- 25 McDonald A B. Dark matter detection with liquid argon. *Nucl Phys B*, 2024, 1003: 116436
- 26 Aalseth C E, Acerbi F, Agnes P, et al. DarkSide-20k: A 20 tonne two-phase LAr TPC for direct dark matter detection at LNGS. *Eur Phys J Plus*, 2018, 133: 131
- 27 Agnes P, Ahmad I, Albergo S, et al. Sensitivity projections for a dual-phase argon TPC optimized for light dark matter searches through the ionization channel. *Phys Rev D*, 2023, 107: 112006
- 28 Saldanha R, Back H O, Tsang R H M, et al. Cosmogenic production of ^{39}Ar and ^{37}Ar in argon. *Phys Rev C*, 2019, 100: 024608
- 29 Agnes P, Albergo S, Albuquerque I F M, et al. Separating ^{39}Ar from ^{40}Ar by cryogenic distillation with Aria for dark-matter searches. *Eur Phys J C*, 2021, 81: 359
- 30 Agnes P, Albuquerque I F M, Alexander T, et al. Search for low-mass dark matter WIMPs with 12 ton-day exposure of DarkSide-50. *Phys Rev D*, 2023, 107: 063001
- 31 Davis R, Harmer D S, Hoffman K C. Search for neutrinos from the sun. *Phys Rev Lett*, 1968, 20: 1205–1209
- 32 Boger J, Hahn R L, Rowley J K, et al. The sudbury neutrino observatory. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2000, 449: 172–207
- 33 Adhikari P, Ajaj R, Alpizar-Venegas M, et al. First direct detection constraints on planck-scale mass dark matter with multiple-scatter signatures using the DEAP-3600 detector. *Phys Rev Lett*, 2022, 128: 011801
- 34 Adhikari P, Ajaj R, Araujo G R, et al. The liquid-argon scintillation pulseshape in DEAP-3600. *Eur Phys J C*, 2020, 80: 303
- 35 Swidinsky N, Ellingwood E, Hucker J, et al. Temperature-dependent photoluminescence of PEDOT:PSS for use as transparent electrodes in the DarkSide-20k time projection chamber. arXiv: [2407.08075](https://arxiv.org/abs/2407.08075)
- 36 Aalseth C E, Abdelhakim S, Agnes P, et al. SiPM-matrix readout of two-phase argon detectors using electroluminescence in the visible and near infrared range. *Eur Phys J C*, 2021, 81: 153
- 37 Agnes P. Direct detection of dark matter with DarkSide-20k. EPJ Web Conf, 2023, 280: 06003
- 38 Agnes P, Albuquerque I F M, Alexander T, et al. Calibration of the liquid argon ionization response to low energy electronic and nuclear recoils with DarkSide-50. *Phys Rev D*, 2021, 104: 082005
- 39 Vincent M L, Peters D G. Electrochemically induced isomerization of 1,1,4,4-tetra-phenyl-1,2-butadiene to 1,1,4,4-tetraphenyl-1,3-butadiene: An indirect self-protonation mechanism. *J Electroanal Chem*, 1992, 328: 63–73

Exploring the mysteries of dark matter with liquid argon at -186°C

SHU YiKe^{1,2}, YIN JiLong^{1,2}, WANG Yi^{1,2*} & YANG ChangGen^{1,2}

¹ *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

*Corresponding author (email: wangyi90@ihep.ac.cn)

The exploration of dark matter is a hot research field, with argon playing a crucial role in direct detection experiments due to its superior properties at ultra-low backgrounds. Many experiments have utilized argon for dark matter detection, achieving significant results, particularly the DarkSide-50 and DEAP-3600 experiments. DEAP-3600 is currently the largest running single-phase liquid argon dark matter detection experiment, while DarkSide-50 employs a dual-phase argon time projection chamber, combining multiple innovative technologies to achieve a breakthrough in “background-free” detection within a high-mass range, providing the strongest constraints on the interaction cross-section between dark matter and ordinary particles at low-mass regions. The ongoing construction and planning of the DarkSide-20k, DarkSide-LowMass, and ARGO experiments aim to apply next-generation technologies based on the DarkSide-50 and DEAP-3600 experiments, striving to reduce the upper limit of the interaction cross-section between dark matter and ordinary matter to the range of neutrino fog. Among these, the DarkSide-LowMass experiment, led by the Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences and set up in the Jinping Underground Laboratory in China, aims to detect dark matter from sub-GeV/c² to 10 GeV/c² and directly measure the coherent elastic scattering of solar neutrinos with nucleus. This article will review experiments utilizing liquid argon for direct dark matter detection.

dark matter, liquid argon, neutrino, direct detection

PACS: 14.60.Lm, 29.40.Mc, 61.25.Bi, 95.35.+d

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0412](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0412)