



新型暗物质相互作用研究

刘家璇, 杨丽桃*, 岳骞*

清华大学工程物理系, 北京 100084

*联系人, 杨丽桃, E-mail: yanglt@mail.tsinghua.edu.cn; 岳骞, E-mail: yueq@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2024-10-10; 接受日期: 2024-12-02; 网络出版日期: 2025-02-11

国家自然科学基金(编号: 12322511, 12175112, 12005111, 11725522)和国家重点研发计划(编号: 2023YFA1607100, 2022YFA1605000)资助项目

摘要 弱相互作用大质量粒子(Weak Interacting Massive Particles, WIMPs)作为最著名的暗物质(Dark Matter, DM)候选粒子, 目前已有大量直接探测实验对其进行探测. 对WIMPs的参数空间的排除区域已经接近中微子地板(Neutrino Floor). 基于此, 学界开始关注轻质量暗物质粒子的研究. 许多新的轻质量暗物质候选粒子被提出. 本文将介绍CDEX实验组对其中几种轻质量暗物质候选粒子: 轴子类暗物质(Axion DM)、暗光子暗物质(Dark Photon DM)和费米子暗物质(Fermionic DM)的探测结果.

关键词 轴子, 暗光子, 费米子暗物质, CDEX

PACS: 95.35.+d, 95.55.Vj, 29.40.WK

1 引言

大量的天文学观测结果, 都为暗物质(Dark Matter, DM)存在提供了证据, 如星系旋转曲线、子弹星云和引力透镜效应等. PLANCK卫星在2013年的测量结果表明, 暗物质的总质量占宇宙总质量的26.8%^[1]. 理论学家提出了各种理论模型以解释暗物质, 其中最著名的暗物质候选粒子是弱相互作用大质量粒子(Weakly Interaction Massive Particles, WIMPs). 从20世纪80–90年代起, 国际上进行了大量的搜寻WIMPs暗物质的直接探测实验. 目前WIMPs暗物质自旋无关的弹性散射截面排除线已经接近中微子地板, 已经有大量的WIMPs可能的参数空间被直接探测实验排除. 同时这意味着下一阶段WIMPs暗物质探测将受到来自于中

微子本底的干扰, 如果不能分辨WIMPs暗物质事例和中微子事例, 将严重限制WIMPs暗物质的探测灵敏度. 这影响了WIMPs暗物质相关的理论模型发展和实验研究. 由于目前始终没有找到可能的WIMPs暗物质的弹性散射事例, 暗物质理论模型和直接探测实验开始关注轻质量(MeV/c^2 甚至 keV/c^2)暗物质粒子的研究, 如轴子类暗物质(Axion DM)、暗光子暗物质(Dark Photon DM)、惰性中微子(Sterile Neutrino)、费米子暗物质(Fermionic DM)等理论模型. 相比于WIMPs弹性散射理论, 这些轻质量暗物质候选粒子预期在探测器内沉积的能量更小, 这对直接探测实验的本底及探测器阈值提出了更高的要求.

CDEX实验位于中国锦屏地下实验室, 利用锦屏山体岩石作为屏蔽, 并在山体内部使用筛选后的材料

引用格式: 刘家璇, 杨丽桃, 岳骞. 新型暗物质相互作用研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 111002

Liu J X, Yang L T, Yue Q. Exotic dark matter research (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 111002, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0460

搭建屏蔽体以屏蔽来自于山体和建筑材料本身的放射性. 这有效降低了实验环境中的中子、光子、 μ 子、质子等本底^[2]. 目前CDEX已经完成了CDEX-1^[3]和CDEX-10^[4]两期实验, CDEX-1共有2个使用低温冷指技术的P-type Point Contact Germanium (PPCGe)探测器, 分别为CDEX-1A和CDEX-1B. 其中CDEX-1A的分析阈值为475 eVee (等效电子反冲能量), CDEX-1B的分析阈值为160 eVee, 在2 keVee处本底水平为3.0 counts per kg per keVee per day (cpkdd). CDEX-10实验在CDEX-1实验的基础上, 获得了更低的本底水平. CDEX-10实验由3串探测器组成: C10-A(B, C); 每串探测器有3个p型点电极锗探测器: Ge1, 2, 3. 其中C10-B1探测器的分析阈值为160 eVee, 在2 keVee处本底水平为2.5 cpkdd, 与CDEX-1B相比在相同的实验曝光量下, 排除线结果会优于CDEX-1B探测器的结果^[5].

2 轴子

轴子的引入最初是为了解决强相互作用宇称破缺问题, 由Weinberg^[6]和Wilczek^[7]在Peccei-Quinn机制的基础上提出的. 随着对暗物质研究的深入, 非相对论速度的轴子因其特殊性质成为了暗物质的重要候选者. 地球上可观测的轴子主要来源于两个方面: 宇宙中的类轴子暗物质和太阳轴子. 对前者, 一些实验通过对引力波背景的探测来限制类轴子暗物质的参数区间^[8,9]. 对后者, 太阳作为轴子源产生轴子的机制分为三类: 第一类由太阳中激发态的 ^{57}Fe 原子退激到基态时产生, 该类型轴子的能量是单一的14.4 keV, 其通量依赖于轴子与核子发生相互作用的耦合参数^[10,11]; 第二类由热光子通过逆Primakoff效应产生, 其通量依赖于轴子与光子发生相互作用的耦合参数; 第三类轴子则来自于太阳中发生的类康普顿散射(Compton-Like Scattering)、韧致辐射(Bremsstrahlung)以及原子的结合(Axio-Recombination)与退激(Axio-Deexcitation)等过程, 统称为CBRD轴子, 其通量依赖于轴子与核外电子发生相互作用的耦合参数. 而宇宙中的类轴子暗物质, 则作为一种可能的轻质量暗物质候选者引起人们的兴趣. 另外还有矢量玻色子暗物质也受到广泛关注. 随着暗物质实验灵敏度的逐步提升, 在 GeV/c^2 质量范围内暗物质可能存在的区域被逐渐压缩并将抵达中微子“地板”, 对于亚 GeV/c^2 的轻质量暗物质的研究则显

得尤为重要.

太阳轴子和类轴子暗物质在高纯锗探测器中的响应有所不同, 式(1)给出了类轴子暗物质的预期计数:

$$R = 1.2 \times 10^{43} A^{-1} g_{Ae}^2 m_A \sigma_{pe}(m_A). \quad (1)$$

式(2)给出了矢量玻色子暗物质的预期计数:

$$R = 4 \times 10^{47} A^{-1} \frac{\alpha'}{\alpha} m_v^{-1} \sigma_{pe}(m_v), \quad (2)$$

其中, g_{Ae} 为无量纲轴子-电子耦合参数, A 为锗的质量数, m_A 为轴子质量, m_v 为矢量玻色子暗物质质量, σ_{pe} 为锗的光电截面, α 为精细结构常数, α' 为矢量玻色子等效系数.

能谱如图1和2所示, ^{57}Fe 太阳轴子以及类轴子暗物质在高纯锗探测器中的预期能谱为单能的高斯峰,

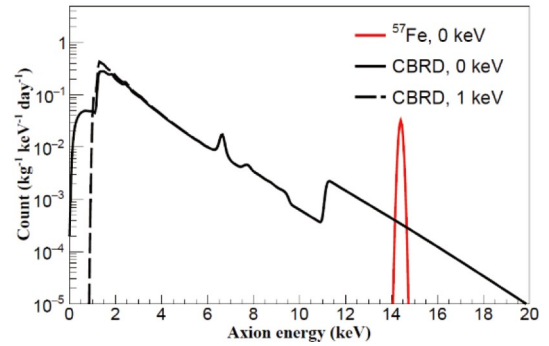


图 1 质量为0和1 keV的CBRD太阳轴子和质量为0 keV的 ^{57}Fe 14.4 keV太阳轴子预期能谱^[12]

Figure 1 The expected axion energy spectra of CBRD solar axion at the mass of 0 and 1 keV, and ^{57}Fe 14.4 keV solar axion at the mass of 0 keV [12].

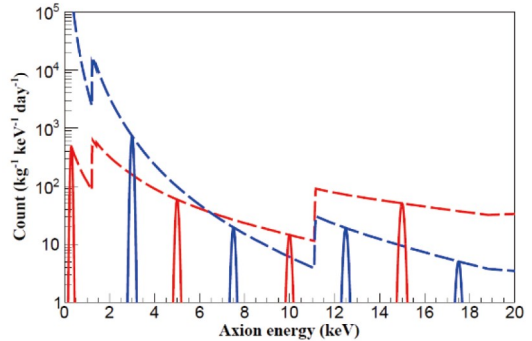


图 2 赝标量轴子暗物质(红)以及矢量玻色子暗物质(蓝)预期能谱, 耦合系数 $g_{Ae}=2 \times 10^{-11}$, $\alpha'/\alpha=5 \times 10^{-25}$ ^[12]

Figure 2 The expected energy spectra of axion-like particles (red solid line) and vector bosonic DM (blue solid line) at different masses. The couplings used here are $g_{Ae}=2 \times 10^{-11}$ and $\alpha'/\alpha=5 \times 10^{-25}$ [12].

而CBRD过程产生的太阳轴子则为连续能谱.

对于太阳轴子和轴子暗物质的探索实验, 除本底水平外, 阈值和能量分辨率也是重要因素. 在CDEX-1A的基础上设计的CDEX-1B实验, 探测器的能量分辨率和本底水平都有了极大的进步, 而且CDEX-1B实验的物理分析阈值低至160 eVee, 因此在探测低质量轴子上更具优势.

CDEX合作组使用低阈值低本底实验数据, 发展了包含上升时间分布概率密度函数的profile likelihood ratio统计学分析方法, 对太阳轴子和类轴子暗物质进行研究. 图3和4为对低质量的赝标量轴子暗物质和矢量玻色子暗物质对应物理通道的耦合参数限制, 在当时800 eV/c²以下得到了高纯锗探测器轴子暗物质参数限制的世界最好结果^[12].

3 暗光子

作为一种理论上的假想粒子, 暗光子是除了弱相互作用大质量粒子之外的另一种可能的暗物质候选粒

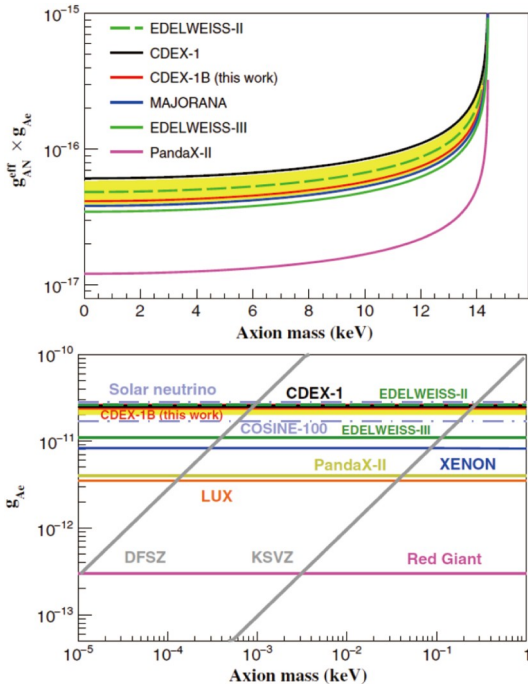


图3 (上) CDEX-1B对 ^{57}Fe 14.4 keV太阳轴子90%置信度排除线; (下) CDEX-1B对CBRD太阳轴子90%置信度排除线^[12]

Figure 3 (Top) The CDEX-1B 90% C.L. upper limit for ^{57}Fe 14.4 keV solar axion; (bottom) the CDEX-1B 90% C.L. upper limit for CBRD solar axion [12].

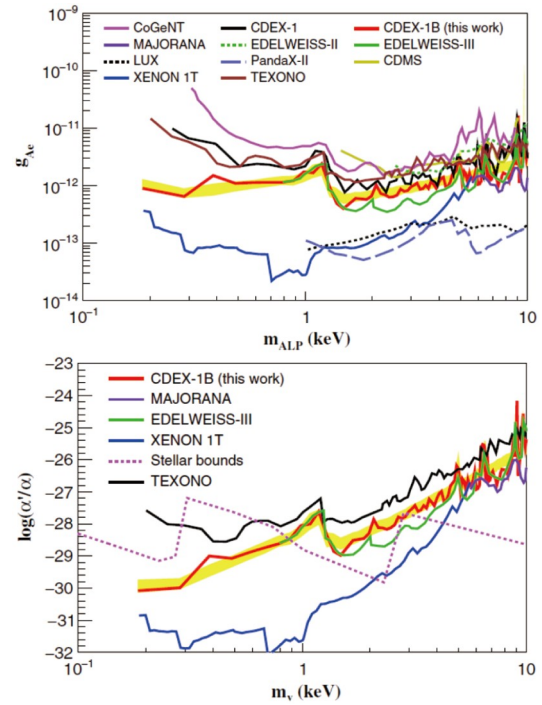


图4 (上) CDEX-1B对赝标量轴子暗物质90%置信水平排除线; (下) CDEX-1B对矢量玻色子暗物质90%置信水平排除线^[12]

Figure 4 (Top) The CDEX-1B 90% C.L. upper limit for the coupling of axionlike particles DM; (bottom) the CDEX-1B 90% C.L. upper limit for the coupling of vector bosonic DM [12].

子, 也可能是一种新的标准模型粒子与暗物质粒子相互作用的媒介子. 对暗光子的理论和实验研究, 有助于发现超越粒子物理标准模型的新物理, 扩展人类对宇宙起源和演化的认识^[13-16].

暗光子和通常物质的相互作用实质上是光子和通常物质的相互作用, 暗光子通过某种机制转变为光子, 类似中微子的振荡, 而且这个转变概率极小, 其质量变为光子的能量, 然后光子和通常物质发生电磁相互作用. 暗光子的质量一般认为很小, 在keV/c²量级. 在这个能量区间, 光电效应主导了光子和通常物质的相互作用. 因此, 暗光子和通常物质的反应机制可以简化为两步: 首先, 暗光子和光子之间相互转换(这一性质用动量混合参数 κ 表征), 高通量的暗光子转换出少量的光子; 然后, 光子和通常物质发生电磁相互作用(主要是光电效应).

研究暗光子的性质就是利用实验测量的结果来限定理论中暗光子和光子之间相互转换的系数的取值范围. 目前的暗光子探测实验主要包括三类. (1) 原子核

物理实验: 由于有质量的暗光子和无质量的光子之间存在质量混合机制, 处于该混合态的光子质量非零, 因此会影响库仑定律的距离平方反比定律. 原子核物理实验通过评估实验数据和距离平方反比规律之间的偏离, 定量地分析暗光子和光子之间动量混合参数 κ 的参数空间. (2) 加速器实验: 利用加速器打靶实验寻找不同机制产生的暗光子共振峰区, 探索相应暗光子模型中允许的暗光子质量和 κ 的参数空间^[17,18]. (3) 第三类是穿墙实验(Light Shining through a Wall, LSW): 这类测量实验利用光子源项进行实验, 通过设置足够厚的光子屏蔽体, 制造无光环境以探测暗光子, 因此是对暗光子的直接探测实验. 此时, 光子源产生的暗光子会直接穿过光子屏蔽体, 并转化为光子, 被探测器接收到, 因此在无光环境中接收到的来自光子源项方向的光子, 极有可能是由于光子和暗光子之间质量混合机制产生的二次发射光子. 其中光子源可以是人造高强度激光源, 也可以是来自宇宙中的恒星. 在地下实验室进行暗光子探测就是LSW实验. 其暗光子源项可以分为两类: (1) 太阳暗光子, 太阳是地球上能观测到的最强自然光子源项, 因此也是地球上能观测到的最强自然暗光子源项; (2) 来自暗物质的暗光子, 包括暗光子作为轻质量暗物质的候选粒子和暗物质与标准模型粒子之间相互作用的媒介子. CDEX实验就属于LSW实验, 以下将介绍对暗光子的排除结果.

由于暗光子的质量很小, 在探测器上的能量沉积也很小, 因此只有当探测器的能量阈值足够低的时候, 才可以观测到暗光子在探测器上留下的能量沉积信号. CDEX实验组使用的新型点电极高纯锗探测器具有高能分辨率和低物理阈值的优越特性, 在探测低质量的暗粒子(包括轴子和暗光子等)方面具有技术优势.

CDEX合作组主要针对太阳暗光子和暗光子暗物质进行了实验研究. 我们编写了用于计算在地球上接收到的太阳暗光子和暗光子暗物质通量的程序, 并计算得到了在高纯锗探测器中对应的预期能谱.

太阳是地球上观测最强的伽马射线源, 由于暗光子和光子之间存在质量混合机制, 因此太阳也是地球上能观测到的最强自然暗光子源项. 太阳等离子体运动会通过轫致辐射和康普顿散射等相互作用过程产生光子, 因此太阳暗光子的产额和太阳等离子体的性质相关. 式(3)给出了太阳暗光子在地球上的高纯锗探测器内的预期能谱:

$$\frac{dR}{dE} = \frac{m_T}{\rho_T |\mathbf{q}|} \left(\frac{d\Phi_T}{dE} \Gamma_T + \frac{d\Phi_L}{dE} \Gamma_L \right) B_r, \quad (3)$$

式中, m_T 和 ρ_T 分别表示高纯锗晶体的灵敏质量和密度, $\mathbf{q}$ 表示相互作用过程的动能转移, $\Gamma_{T,L}$ 表示暗光子在轴向和纵向极化时的吸收率, $\frac{d\Phi_{T,L}}{dE}$ 是暗光子在不同极化方向上的微分通量, B_r 表示暗光子的光电效应吸收率和总吸收率的比值.

除了太阳暗光子源项, 暗光子还是轻质量暗物质候选粒子之一, 因此在地球上, 暗物质同样也是暗光子可能的来源. 在暗物质晕模型(Standard Halo Model)下, 银河系中的暗物质以球形晕结构的形式存在^[19]. 在该暗物质晕模型下, 尽管暗物质粒子的速度有多种理论解释, 但是其平均速度大小均在100 km/s量级, 服从有截断的麦克斯韦分布, 且截断速度为太阳系的逃逸速度544 km/s. 例如在暗物质风假说中, 认为暗物质相对于银河系静止, 在地球位置附近的暗光子暗物质的速度源自地球和银河系中心之间的相对运动, 其平均速度约为232 km/s. 在这一速度分布假设下, 暗光子暗物质的动能约为质量的 $1/10^6$, 相对于其质量可以忽略不计. 在本文关注的暗光子暗物质的质量区间(keV/ c^2 量级)内, 暗光子暗物质与高纯锗探测器之间的电磁相互作用主要是质量混合机制产生的光子和高纯锗晶体之间的光电效应. 因此高纯锗探测器将完全吸收暗光子暗物质所具有的能量, 其总沉积能量为 $m_\chi c^2 + m_\chi v^2/2 \approx m_\chi c^2$. 此时暗光子暗物质的质量远大于高纯锗晶体中的极化量 $\Pi_{T,L}$. 式(4)给出了在暗物质晕假设下, 暗光子暗物质在高纯锗探测器内的预期探测能谱^[20].

$$\frac{dR}{dE} = \frac{m_{Ge}}{\rho_{Ge}} \rho_\chi \kappa^2 \text{Im} n_{\text{refr}}, \quad (4)$$

式中, R 和 E 分别是暗光子暗物质在高纯锗探测器内产生的计数率和能量沉积值, m_{Ge} 和 ρ_{Ge} 分别代表了高纯锗晶体的质量和密度. ρ_χ 是地球附近的暗光子暗物质的质量密度, 在暗物质实验中广泛采用的数值是 0.3 GeV/cm^3 ^[21]. κ 为暗光子有效动力学参数, n_{refr} 为Ge材料的折射系数.

图5为太阳暗光子在高纯锗探测器中的预期能谱和不同质量的暗光子暗物质在高纯锗探测器中的预期能谱.

合作组利用CDEX-10实验380.8 d曝光量数据, 使用minimum χ^2 方法给出了太阳暗光子动量混合参数在

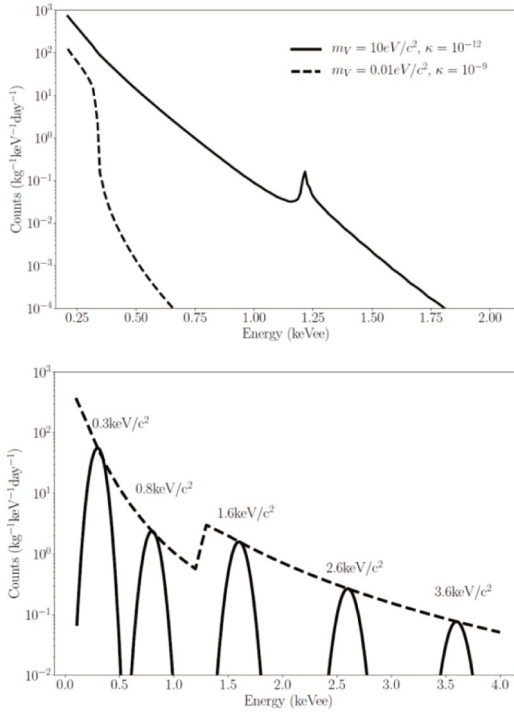


图 5 (上) 太阳暗光子在高纯锗探测器中的预期能谱; (下) 当动量混合参数为 10^{-14} 时, 不同质量的暗光子暗物质在 C10-B1 高纯锗探测器中的预期能谱, 能峰轮廓线如虚线所示^[22]

Figure 5 (Top) The expected energy spectra of the solar γ^* ; (bottom) the expected energy spectra of γ^* DM at the C10-B1 detector with different m_γ at $\kappa=10^{-14}$. The profile of energy peaks is depicted by a dashed line [22].

90%置信度下的上限值, 获得了当时 10–300 eV 区间上国际最好的直接探测实验结果; 还利用 CDEX10-B1 和 CDEX10-C1 双探测器单元实验数据进行联合分析, 对暗光子暗物质的动量混合参数给出了在 90% 置信度下的上限值, 对太阳暗光子的排除结果和对暗光子暗物质的排除结果如图 6 所示. 该研究拓展了 CDEX 实验暗物质候选粒子的研究范围^[22].

4 暗物质吸收

不同于暗物质散射探测的沉积能量来源于暗物质动能, 暗物质吸收探测的主要能量来源为暗物质的静能(暗物质质量).

$$E = mc^2. \quad (5)$$

暗物质吸收的主要过程为暗物质粒子与靶粒子发生相互作用, 暗物质粒子被靶粒子吸收并释放静能给末态粒子. 考虑非相对论暗物质, 暗物质吸收所释放

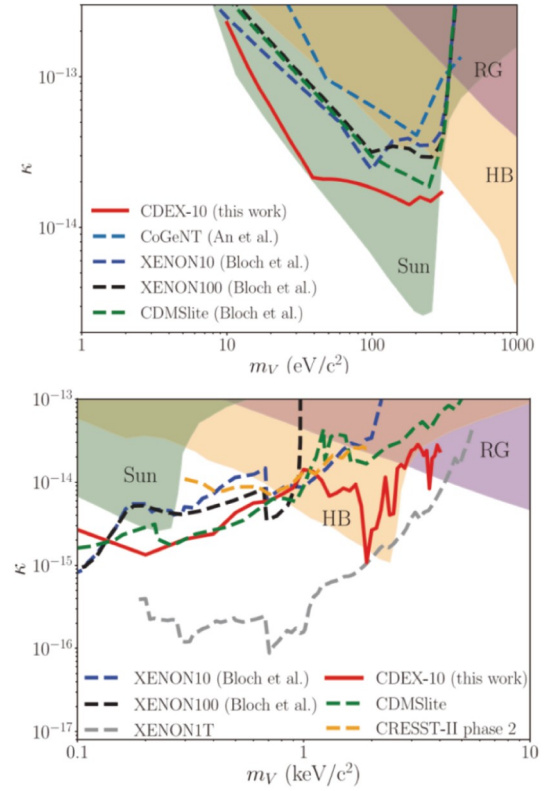


图 6 (上) 太阳暗光子动量混合参数的 90% 置信水平排除曲线; (下) 暗光子暗物质动量混合参数的 90% 置信水平排除曲线(红色实线), 其他直接探测实验结果如虚线所示^[22]

Figure 6 (Top) Upper limits (90% C.L.) of κ for solar γ^* ; (bottom) upper limits (90% C.L.) on κ of γ^* DM (solid red line) superimposed with the results from other direct DM searches (dash lines) [22].

的能量将比暗物质动能大 3 个数量级. 这将使得暗物质吸收通道可以在现有的探测器阈值水平下, 探索更低的暗物质质量区间.

从暗物质粒子的类型来分, 有玻色子暗物质与费米子暗物质. 与暗物质反应的靶粒子的类型主要有电子和原子核. 本节将主要介绍费米子暗物质被原子核吸收.

$$\chi + A \rightarrow \nu + A. \quad (6)$$

费米子暗物质通过玻色子媒介子在汤川相互作用机制下与原子核(A)发生相互作用被吸收后放出中微子(ν)^[23,24]. 对于 CDEX 实验, 靶核 A 为锗(Ge)原子核.

考虑非相对论费米子暗物质, 如前所述, 暗物质质量为主要能量. 核反冲能(E_R)满足 $E_R \simeq m_\chi^2 / 2M$, M 为靶核质量. 动量转移为 $q \simeq m_\chi$.

微分事例率(dR_{NC}/dE_R)为

$$\frac{dR_{\text{NC}}}{dE_R} = \frac{\rho_\chi}{m_\chi} \cdot \sigma_{\text{NC}} \frac{1}{M_T} \cdot \sum_j N_j M_j A_j^2 F_j^2(m_\chi) \frac{\sqrt{2E_R M_j}}{2p_\chi m_\chi^2} \times \frac{1}{v_\chi} \Big|_{v_\chi > v_{\min}} \quad (7)$$

总事例率(R_{NC})为

$$R_{\text{NC}} = \frac{\rho_\chi}{m_\chi} \cdot \sigma_{\text{NC}} \cdot \frac{1}{M_T} \sum_j N_j M_j A_j^2 F_j^2(m_\chi), \quad (8)$$

其中, m_χ 为暗物质质量, 暗物质密度 $\rho_\chi = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$ [25], σ_{NC} 为暗物质与靶核的反应截面. $M_T = \sum_j N_j M_j$ 为总靶核质量, N_j 为 Ge 同位素 j 的数量, M_j 为 Ge 同位素 j 的质量. $F_j(m_\chi)$ 为归一化 Helm 形状因子, p_χ 为末态中微子动量. $v_{\min}$ 为在给定反冲能 E_R 下的最小暗物质速度.

由式(7)可知, 所有 Ge 的同位素都会贡献暗物质信号. 对于 CDEX 的 C10-B1 探测器, 其使用天然 Ge, 各 Ge 同位素的丰度为: ^{76}Ge (7.6%), ^{74}Ge (36.3%), ^{73}Ge (7.7%), ^{72}Ge (27.5%) 和 ^{70}Ge (20.9%). 不同 Ge 同位素贡献的反冲能谱见图 7. 该吸收过程放出的是准单能的信号.

考虑探测器能量分辨率后, 预期能谱如图 8 所示. 图中给出了 $m_\chi = 10, 20, 30, 40 \text{ MeV}/c^2$ 情况下的能谱, 暗物质核子耦合截面 $\sigma_{\text{NC}} = 10^{-45} \text{ cm}^2$.

在该物理通道的分析中, 采用的本底模型为平本底加多个高斯峰模型:

$$B = p_0 + \sum_L I_L \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \exp\left(-\frac{(E-E_L)^2}{2\sigma_L^2}\right) + \sum_M I_M \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_M} \exp\left(-\frac{(E-E_M)^2}{2\sigma_M^2}\right), \quad (9)$$

其中, 高斯峰考虑 L 层和 M 层的 X 射线峰的贡献,

$$^{68}\text{Ge} (E_L = 1.298 \text{ keV}, E_M = 0.16 \text{ keV}),$$

$$^{68}\text{Ga} (E_L = 1.194 \text{ keV}, E_M = 0.14 \text{ keV}),$$

$$^{65}\text{Zn} (E_L = 1.096 \text{ keV}),$$

$$^{55}\text{Fe} (E_L = 0.764 \text{ keV}),$$

$$^{54}\text{Mn} (E_L = 0.695 \text{ keV}),$$

$$^{49}\text{V} (E_L = 0.564 \text{ keV}).$$

基于 CDEX-10 实验 205.4 kg d 的数据, 使用 minimum χ^2 方法给出了暗物质核子耦合截面在 90% 置信度的上限值 (图 9).

得益于探测器低阈值的特点, 本研究对费米子

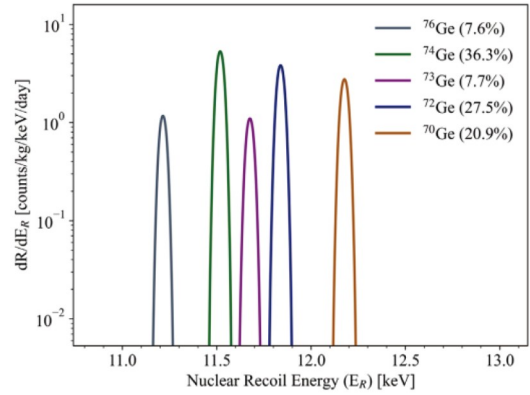


图 7 Ge 元素所有同位素的费米子暗物质吸收信号核反冲能谱, 暗物质质量 $m_\chi = 40 \text{ MeV}/c^2$, 暗物质核子耦合截面 $\sigma_{\text{NC}} = 10^{-45} \text{ cm}^2$ [26]

Figure 7 Nuclear recoil energy spectra of the fermionic DM absorption signals for Ge target for all Ge isotopes, with a DM mass $m_\chi = 40 \text{ MeV}/c^2$ and the DM-nucleon cross section $\sigma_{\text{NC}} = 10^{-45} \text{ cm}^2$ [26].

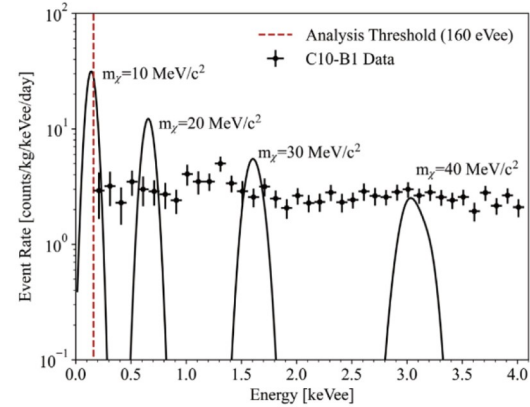


图 8 对 $m_\chi = 10, 20, 30, 40 \text{ MeV}/c^2$ 的费米子暗物质吸收信号的预期能谱, $\sigma_{\text{NC}} = 10^{-45} \text{ cm}^2$. C10-B1 能谱由黑色十字表示, 能量 bin 宽度为 100 eV, 红色虚线为分析阈值 [26]

Figure 8 Expected energy spectra of the fermionic DM absorption signals for $m_\chi = 10, 20, 30, 40 \text{ MeV}/c^2$ with a DM-nucleon cross section $\sigma_{\text{NC}} = 10^{-45} \text{ cm}^2$. The C10-B1 spectrum is shown as the black crosses with a bin size of 100 eV. The red dashed line represents the analysis threshold [26].

暗物质核子吸收反应的截面限制下推到了 $\sim 10 \text{ MeV}/c^2$ 暗物质质量区间 [26].

5 暗物质核子 $3 \rightarrow 2$ 非弹性散射

在暗物质核子 $3 \rightarrow 2$ 非弹性散射反应中, 两个暗物质粒子 (χ) 同时与核子 (A) 发生相互作用 ($\chi + \chi + A \rightarrow \phi + A$), 其中两个暗物质粒子反应后合并为一个粒子 (ϕ), ϕ 可能是束缚态的暗物质的粒子, 也可能是暗光

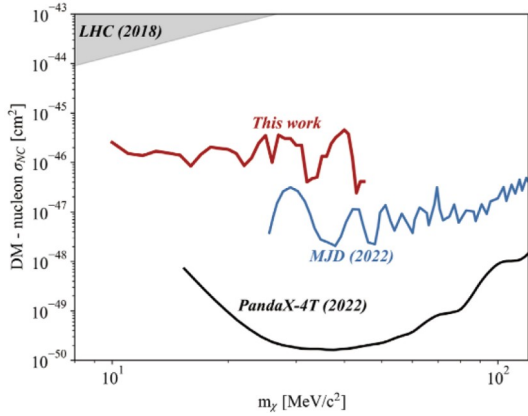


图 9 费米子暗物质吸收截面 σ_{NC} 的90%置信水平排除曲线, 也展示了另外两个直接探测实验的结果: MAJORANA DEMONSTRATOR (MJD, 蓝线)和PandaX-4T (黑线)^[26]

Figure 9 Upper limit (90% C.L.) of the fermionic DM absorption cross section σ_{NC} , results from two other direct detection experiments, the MAJORANA DEMONSTRATOR (MJD, blue line) and PandaX-4T (black line), are superimposed [26].

子等暗辐射. 该反应在探测器中同样产生准单能信号, 信号的能量与暗物质的质量、发生作用的核子以及暗物质初态(χ)和末态(ϕ)的质量比有关.

忽略暗物质粒子的初始动能, 核反冲能为

$$E_R \simeq \frac{(4 - \xi^2)m_\chi^2}{2(M + 2m_\chi)}, \quad (10)$$

其中, M 为核子的质量, ξ 为 ϕ 与 χ 的质量比. ξ 是模型依赖的. 在本文中, 考虑两个模型: 一个无质量的 ϕ (ϕ 是暗光子, $\xi=0$)以及一个束缚态的 ϕ . 对于束缚态的 ϕ , 质量比 $\xi = 2(m_\chi + \epsilon)/m_\chi$, 其中束缚能 ϵ 由耦合量 g_D 决定^[27]:

$$\epsilon = -(g_D^4 \cdot m_\chi)/(64\pi^2). \quad (11)$$

根据文献^[28], 设置耦合量 $|g_D|=3$, 得到质量比 $\xi=1.87$.

3 $\rightarrow$ 2非弹性散射反应的总事例率为

$$R_{3 \rightarrow 2} = \frac{\rho_\chi}{m_\chi} \cdot n_\chi \sigma_{3 \rightarrow 2} \cdot v_\chi^2 \frac{1}{M_T} \cdot \sum_j N_j M_j A_j^2 F_j^2(q_{3 \rightarrow 2}), \quad (12)$$

其中, $\sigma_{3 \rightarrow 2} \cdot v_\chi^2$ 为平均的三体非弹性截面与暗物质初速平方乘积. 其余符号含义与第4节暗物质吸收一致.

图10为暗物质核子3 $\rightarrow$ 2非弹性散射的预期能谱, 其中黑色虚线为无质量暗光子($\xi=0$)的情况, 黑色实线

为束缚态暗物质末态($\xi=1.87$)情况. 暗物质核子耦合量均为 $\sigma_{3 \rightarrow 2} \cdot v_\chi^2 n_\chi = 10^{-5} \text{cm}^2$. C10-B1能谱数据为黑色十字, 红色虚线表示分析阈值.

在该物理通道的分析中, 本底模型与第4节平本底加多个高斯峰模型一致, 基于CDEX-10实验205.4 kg d的数据, 使用minimum χ^2 方法给出了 $(m_\chi, \sigma_{3 \rightarrow 2} \cdot v_\chi^2 n_\chi)$ 参数^[28]对无质量暗光子和束缚态暗物质末态的90%置信度的上限值(图11).

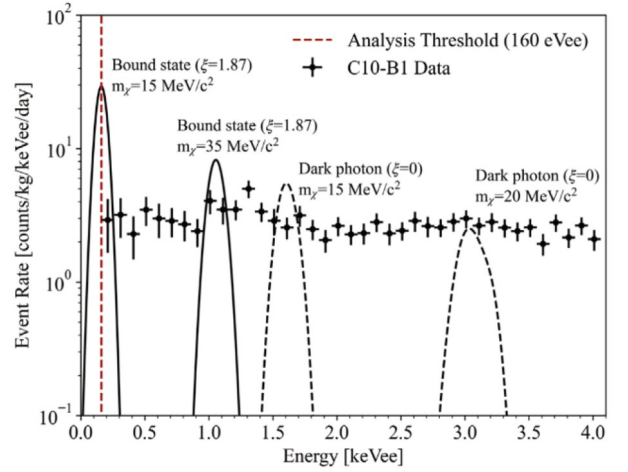


图 10 暗物质核子3 $\rightarrow$ 2散射预期能谱信号^[26]

Figure 10 Expected energy spectra of the DM-nucleus 3 $\rightarrow$ 2 scattering signals [26].

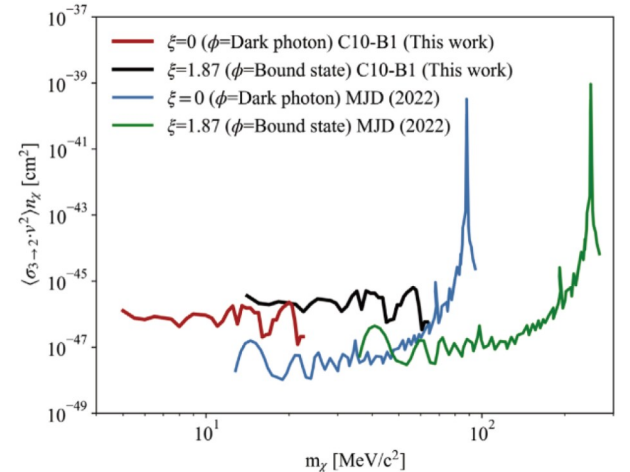


图 11 暗物质核子3 $\rightarrow$ 2散射的无质量暗光子末态以及束缚态 $\xi=1.87$ 的90%置信水平排除曲线^[26]

Figure 11 Upper limit (90% C.L.) of the DM-nucleus 3 $\rightarrow$ 2 scattering coupling $\langle \sigma_{3 \rightarrow 2} \cdot v_\chi^2 \rangle n_\chi$. $\xi=0$ is a massless dark photon final state, and $\xi=1.87$ is a bound state [26].

得益于探测器低阈值的特点, 本项研究对暗物质核子 $3 \rightarrow 2$ 非弹性散射反应截面的限制下推到了 $\sim 5 \text{ MeV}/c^2$ (暗光子暗物质末态) 和 $\sim 14 \text{ MeV}/c^2$ (束缚态暗物质末态)^[26].

6 总结

本文介绍了CDEX实验组对几种新型暗物质模型, 包括轴子、暗光子、费米子暗物质的探测结果. 其中对轴子暗物质参数限制给出了当时800 eVee以下高纯锗探测器的世界最好结果. 对太阳暗光子动量混合参数限

制给出了当时10–300 eVee区间上国际最好的直接探测实验结果. 对费米子暗物质核子吸收反应的截面限制下推到了 $\sim 10 \text{ MeV}/c^2$ 暗物质质量区间. 对暗物质核子 $3 \rightarrow 2$ 非弹性散射反应截面的限制下推到了 $\sim 5 \text{ MeV}/c^2$ (暗光子暗物质末态) 和 $\sim 14 \text{ MeV}/c^2$ (束缚态暗物质末态).

在下一阶段的CDEX-50实验中, 将使用50 kg的锗探测器阵列进行暗物质探测, 预期本底水平将降低两个数量级, 在2–2.5 keVee能区, 预期本底为 $\sim 0.01 \text{ counts keVee}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ^[29]. 更低的本底水平将对轴子、暗光子、费米子暗物质等新型暗物质探测给出更灵敏的实验限制.

致谢 感谢CJPL实验室工作人员对工作的支持. CJPL实验室由清华大学和雅砻江水电开发有限公司联合建设和运行.

参考文献

- 1 Cho A. Universe's high-def baby picture confirms standard theory. *Science*, 2013, 339: 1513
- 2 Cheng J P, Kang K J, Li J M, et al. The China Jinping Underground Laboratory and its early science. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2017, 67: 231–251
- 3 Zhao W, Yue Q, Kang K J, et al. Search of low-mass WIMPs with a p-type point contact germanium detector in the CDEX-1 experiment. *Phys Rev D*, 2016, 93: 092003
- 4 Jiang H, Jia L P, Yue Q, et al. Limits on light weakly interacting massive particles from the first 102.8 kg×day data of the CDEX-10 experiment. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 241301
- 5 Jiang H, Yang L T, Yue Q, et al. Performances of a prototype point-contact germanium detector immersed in liquid nitrogen for light dark matter search. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 31012
- 6 Weinberg S. A new light boson? *Phys Rev Lett*, 1978, 40: 223–226
- 7 Wilczek F. Problem of strong P and T invariance in the presence of instantons. *Phys Rev Lett*, 1978, 40: 279–282
- 8 Guo S Y, Khlopov M, Liu X, et al. Footprints of axion-like particle in pulsar timing array data and James Webb Space Telescope observations. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2024, 67: 111011
- 9 Rubin S G. Unveiling the early universe: Axion-like particles and their role in primordial structure formation. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2024, 67: 111031
- 10 Armengaud E, Arnaud Q, Augier C, et al. Axion searches with the EDELWEISS-II experiment. *J Cosmol Astropart Phys*, 2013, 2013(11): 067
- 11 Andriamonje S, Aune S, Autiero D, et al. Search for 14.4 keV solar axions emitted in the M1-transition of ^{57}Fe nuclei with CAST. *J Cosmol Astropart Phys*, 2009, 2009(12): 002
- 12 Wang Y, Yue Q, Liu S K, et al. Improved limits on solar axions and bosonic dark matter from the CDEX-1B experiment using the profile likelihood ratio method. *Phys Rev D*, 2020, 101: 052003
- 13 Böhm C, Fayet P. Scalar dark matter candidates. *Nucl Phys B*, 2004, 683: 219–263
- 14 Pospelov M, Ritz A, Voloshin M. Bosonic super-WIMPs as keV-scale dark matter. *Phys Rev D*, 2008, 78: 115012
- 15 Jaeckel J, Ringwald A. The low-energy frontier of particle physics. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2010, 60: 405–437
- 16 Jaeckel J. A force beyond the standard model-status of the quest for hidden photons. *Frascati Phys Ser*, 2012, 56: 172
- 17 Chen J, Chen J Y, Chen J F, et al. Prospective study of light dark matter search with a newly proposed DarkSHINE experiment. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2022, 66: 211062
- 18 Jing Y. Hunting for the dark sector by searching for dark photons with the newly proposed DarkSHINE experiment. *Sci China-Phys Mech*

- [Astron](#), 2023, 66: 211061
- 19 Navarro J F, Frenk C S, White S D M. A universal density profile from hierarchical clustering. [Astrophys J](#), 1997, 490: 493–508
- 20 An H, Pospelov M, Pradler J, et al. Direct detection constraints on dark photon dark matter. [Phys Lett B](#), 2015, 747: 331–338
- 21 Read J I. The local dark matter density. [J Phys G-Nucl Part Phys](#), 2014, 41: 063101
- 22 She Z, Jia L P, Yue Q, et al. Direct detection constraints on dark photons with the CDEX-10 experiment at the China Jinping Underground Laboratory. [Phys Rev Lett](#), 2020, 124: 111301
- 23 Dror J A, Elor G, McGehee R. Directly detecting signals from absorption of fermionic dark matter. [Phys Rev Lett](#), 2020, 124: 181301
- 24 Dror J A, Elor G, McGehee R. Absorption of fermionic dark matter by nuclear targets. [J High Energ Phys](#), 2020, 2020(2): 134
- 25 Baxter D, Bloch I M, Bodnia E, et al. Recommended conventions for reporting results from direct dark matter searches. [Eur Phys J C](#), 2021, 81: 907
- 26 Dai W H, Jia L P, Ma H, et al. Exotic dark matter search with the CDEX-10 experiment at China's Jinping Underground Laboratory. [Phys Rev Lett](#), 2022, 129: 221802
- 27 Petraki K, Postma M, Wiechers M. Dark-matter bound states from Feynman diagrams. [J High Energ Phys](#), 2015, 2015(6): 128
- 28 Chao W, Jin M, Peng Y Q. Directly detecting sub-MeV dark matter via 3-body inelastic scattering process. [Phys Rev D](#), 2023, 107: 093009
- 29 Geng X P, Yang L T, Yue Q, et al. Projected WIMP sensitivity of the CDEX-50 dark matter experiment. [J Cosmol Astropart Phys](#), 2024, 2024(7): 009

Exotic dark matter research

LIU JiaXuan, YANG LiTao^{*} & YUE Qian^{*}

Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Corresponding authors (YANG LiTao, email: yanglt@mail.tsinghua.edu.cn; YUE Qian, email: yueq@mail.tsinghua.edu.cn)*

Weakly interacting massive particles (WIMPs) are among the most well-known candidates for dark matter. Currently, numerous direct detection experiments have explored the parameter space of WIMPs, with constraint contours nearly reaching the neutrino floor. As a result, research into light dark matter particles has gained popularity. Various models for new light dark matter candidates have been proposed. This study will discuss the CDEX experiment and its investigations into several light dark matter models, including axion dark matter, dark photons, and fermionic dark matter.

axion, dark photon, fermionic dark matter, CDEX

PACS: 95.35.+d, 95.55.Vj, 29.40.WK

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0460](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0460)