



暗物质间接探测研究进展

黄晓渊^{1,2*}

1. 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文重点实验室, 南京 210023

2. 中国科学技术大学天文与空间科学学院, 合肥 230026

*联系人, E-mail: xyhuang@pmo.ac.cn

收稿日期: 2024-08-23; 接受日期: 2024-11-06; 网络出版日期: 2024-12-16

国家自然科学基金(编号: 12322302)和中国科学院资助项目

摘要 观测表明, 宇宙中存在大量暗物质, 并对宇宙演化起着重要的作用. 然而, 除了引力效应外, 我们对其性质仍知之甚少. 理解暗物质的属性有望扩展标准粒子模型, 并揭示“新物理”. 基于观测要求, 研究者提出了众多暗物质模型, 其质量范围跨越数十个量级. 这些暗物质候选者可能导致不同的天体物理效应, 因此可以通过搜寻超出天体物理背景预期的信号来进行间接探测. 本文回顾了与不同质量暗物质相关的间接探测预期信号和实验进展, 重点讨论了轴子/类轴子和弱相互作用大质量粒子这两类具有良好物理动机的暗物质候选者所面临的观测限制及疑似信号.

关键词 暗物质间接探测, 伽马射线, 宇宙线

PACS: 95.35.+d, 95.85.Nv, 95.85.Pw, 95.85.Ry

1 引言

20世纪30年代, 瑞士天文学家Zwicky^[1]发现后发星系团中的星系速度弥散过大, 由位力定理可知仅靠星系团中的发光物质的引力无法维持整个系统的稳定, 因此提出在星系团中存在着随后被称为暗物质的某种不发光物质. 这一发现开启了人类对暗物质的认识和研究. 20世纪70年代, Rubin和Ford^[2]对仙女星系中气体旋转速度随半径的变化进行了测量, 发现距离星系中心较远处旋转速度并未下降而是趋于定值, 同样需要引入暗物质才能解释观测数据. 随后在宇宙多个尺度的观测都一致地揭示了暗物质的存在, 其中子

弹星系团的观测提供了最有说服力的暗物质证据^[3]. 近年Planck卫星对微波背景辐射的观测发现, 在标准宇宙学模型下我们的宇宙中仅有约5%的质量为普通物质, 剩下约26%和69%分别为暗物质和暗能量^[4].

虽然大量的天文观测通过引力效应表明宇宙中存在暗物质, 但是我们仍对暗物质的粒子属性知之甚少. 根据已有的各种观测, 目前所知的暗物质主要性质包括: 非常稳定, 寿命与宇宙年龄相当; 几乎不参与电磁与强相互作用; 其构成粒子为非重子物质; 不会因运动速度过快而抹掉宇宙早期产生的小尺度结构. 这些性质排除了粒子物理标准模型中各粒子作为暗物质候选者的可能性, 从而暗物质粒子应为某种超出标准模型

引用格式: 黄晓渊. 暗物质间接探测研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 219501

Huang X Y. Progresses in the dark matter indirect detection (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 219501, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0347

的新粒子. 搜寻暗物质粒子引力之外的相互作用形式不仅是天文观测也是粒子物理最重要的研究课题之一, 相关突破有望扩展已知的标准粒子模型而通往“新物理”.

为了满足上述暗物质粒子应具备的性质, 理论物理学家提出了大量的暗物质模型, 其质量范围可以覆盖数十个量级^[5]. 这些暗物质粒子候选者按质量可大致分为超轻暗物质、轴子与类轴子暗物质、轻暗物质、弱相互作用大质量粒子(WIMPs)暗物质、超重暗物质等. 每一类暗物质又有许多具体的模型, 预测其具有不同的性质. 为了寻找这些暗物质候选者的信号并探测其性质, 通常会采用高能物理的对撞机探测、地下实验室中的暗物质直接探测, 以及搜寻超出天体物理背景预期信号的暗物质间接探测. 这些方法可以独立且互补地进行相关研究. 由于暗物质候选者众多, 跨越非常大的质量和相互作用截面范围, 其实验探测具有较大的挑战性. 随着近年来覆盖多种信使和多个波段的天文观测的进步, 基于天文观测的暗物质间接探测也取得了显著的进展. 本文尝试按暗物质候选者的质量分类, 简单介绍近年来暗物质间接探测方向取得的一些进展.

2 超轻暗物质

多种理论预言了自旋为0, 1或2的标量、矢量或张量粒子的存在, 其质量最低可达 10^{-24} eV. 由于质量极小, 这些粒子的德布罗意波长可以达到亚星系尺度. 在这一尺度上, 它们表现出不同于冷暗物质的波动特性, 能够解释星系尺度上暗物质晕的中心密度分布以及卫星星系数量过少等问题. 而在更大尺度上, 这些粒子则表现得与传统冷暗物质一致, 符合宇宙学观测结果, 因此被视为潜在的暗物质候选者.

这些超轻暗物质的引力作用、与普通物质耦合产生的“第五种力”或对引力的修正, 可能导致包括恒星和地球在内的天体在银河系的超轻暗物质晕中产生振荡, 或使天体发出的光表现出额外的周期性现象. 这些振荡的频率与超轻暗物质的质量相关, 其强度则取决于超轻暗物质的密度或耦合强度. 因此, 搜寻遥远恒星在天空中的微小周期性振荡, 或者搜寻脉冲星脉冲到达时间的周期性变化, 都可以间接探测超轻暗物质的性质.

盖亚全天天体测量干涉仪(Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, GAIA)是欧洲空间局的旗舰项目之一, 旨在绘制包含约十亿颗恒星的三维星图. GAIA的测量精度极高, 可达10微角秒量级. 有研究表明, 通过同时拟合小天区内大量恒星的运动, 可以进一步提高位置灵敏度. 因此, 利用GAIA对恒星位置的高精度测量, 搜寻遥远恒星在天空中的周期性振荡, 预期可以对质量在 10^{-23} – 10^{-21} eV内的暗光子等超轻暗物质进行有效探测^[6].

毫秒脉冲星是一类年老的旋转中子星, 具有极高的自转稳定性, 其自转周期在毫秒量级. 这些脉冲星在多个波段发射周期性脉冲信号, 被认为是极为精确的天文时钟. 脉冲星计时阵列通过长期高频次监测几十甚至上百个毫秒脉冲星, 获取极高精度的脉冲到达时间数据, 因此被视为由众多毫秒脉冲星组成的高精度计时系统. 目前, 脉冲星计时阵列的精度已达到百纳秒量级. 脉冲星计时阵列主要的科学目标为纳赫兹引力波探测, 但也可用于超轻暗物质的间接探测等. 目前我国利用FAST已经构建了中国脉冲星计时阵列(CPTA); 除此以外, 国际上还有美国的纳赫兹引力波天文台(NANOGrav)、欧洲脉冲星计时阵列(EPTA)、澳大利亚的帕克斯脉冲星计时阵列(PPTA), 以及利用伽马射线观测构建的费米大面积望远镜脉冲星计时阵列(Fermi-LAT PTA). 通过这些PTA的数据, 可以搜寻超轻暗物质导致的振荡在脉冲到达时间中留下的周期性信号, 从而限制其性质^[7–10]. 由于伽马射线不受射电信号穿过湍动等离子体时产生的噪声影响, 利用Fermi-LAT PTA的数据可以独立且互补地检验射电PTA对超轻暗物质性质的限制^[11,12]. 而对最新的EPTA的数据分析表明, 如果只考虑超轻暗物质的引力效应所导致的星体周期性振荡这一最稳健的假设, 那么在质量范围为 $10^{-24.0}$ – $10^{-23.3}$ eV的超轻暗物质无法满足其他观测所要求的本地暗物质密度 0.4 GeV/cm^3 , 因此在该质量范围内暗物质不可能仅由超轻暗物质构成^[13]. EPTA与Fermi-LAT PTA所得的对本地暗物质密度的限制如图1.

3 轴子与类轴子暗物质

为了解决强相互作用中的电荷共轭-宇称(强CP)问题, Peccei和Quinn引入了一种新的对称性, 该对称

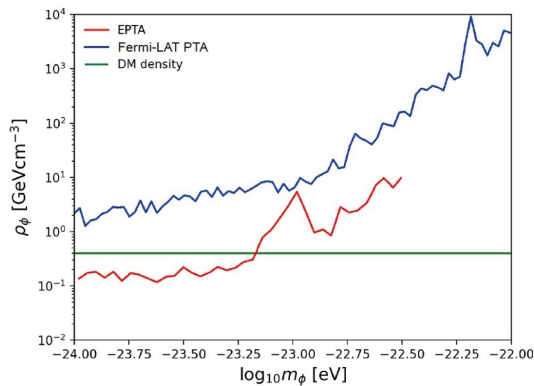


图 1 (网络版彩图) EPTA^[13](红色实线)与Fermi-LAT PTA^[11](蓝色实线)所得的自旋为0超轻暗物质本地密度的95%上限

Figure 1 (Color online) Constraints on the local density of spin-0 ultralight dark matter, from EPTA (red solid line) [13] and Fermi-LAT PTA (blue solid line) [11] respectively, at 95% confidence level.

性的破缺预言了轴子这一新粒子的存在, 其质量与描述相互作用强度的耦合系数成反比. 轴子稳定、不带电, 与普通物质的相互作用极为微弱, 因此也被认为是冷暗物质的有力候选者. 由于轴子能够同时解决强CP问题和暗物质问题, 具有很强的物理动机, 近年来引起了广泛关注. 在其他理论中, 如弦论, 也预言了具有类似轴子相互作用形式的赝标量粒子. 虽然这些粒子不能解决强CP问题, 但在质量和耦合强度等参数上具有更大的自由度, 因此也被视为理想的暗物质候选者. 轴子和类轴子作为超出标准模型的新物理对象, 具有重要的研究价值, 其理论和实验探索已成为粒子物理的前沿热点. 近年来, 研究者通常采用类似的方法对轴子和类轴子进行间接探测. 尽管从质量上看, 轴子和类轴子也可以归为超轻暗物质, 但由于它们独特的性质和多样的探测方法, 本文将对它们进行单独讨论.

轴子可以与电磁场耦合, 具有质量的轴子能够衰变为光子, 并且强外磁场将增大这一反应概率; 在外电磁场下, 光子与轴子可以相互转化, 从而产生与轴子质量相当的单能光子, 或导致伽马光子能谱的振荡; 此外, 线偏振光在轴子场中传播时, 其偏振面会发生偏转. 除了与电磁场耦合外, 在一些模型中, 轴子还可能与电子、核子等发生作用, 从而影响恒星的演化过程.

如果暗物质由轴子构成, 那么暗物质晕中的轴子可能会通过衰变产生光子. 因此, 在低背景、高暗物质密度的天体中搜寻相关信号, 可以间接探测轴子暗

物质的性质. 矮椭球星系是被银河系引力束缚的小型星系, 也称为卫星星系, 它们含有极少的普通物质, 天体活动微弱, 主要由暗物质构成, 是搜寻暗物质信号的理想对象. 由于轴子的质量较小, 其衰变产生的单能光子可能出现在射电波段, 因此可以通过射电望远镜的数据寻找线谱结构来研究轴子暗物质^[14]. 500 m口径球面射电望远镜(FAST)是世界上最大的单口径望远镜, 具有极高的探测灵敏度. 有研究利用FAST对Coma Berenices矮椭球星系的观测, 限制了轴子-光子耦合常数^[15]. 如果矮椭球星系中存在磁场, 暗物质晕中的轴子还可能通过Primakoff过程转化为光子, 因此也有研究利用FAST搜寻这些由轴子转化的射电光子. 然而, 由于矮椭球星系的磁场强度通常较弱, 转化效率较低, 因此无法对轴子的性质给出强有力的限制. 另外, 中子星磁层中存在宇宙中最强的磁场, 光子在磁层等离子体中可以获得有效质量. 在距中子星表面特定的距离处光子质量将等于轴子质量, 从而暗物质晕中的轴子暗物质就能共振转化为光子, 形成与轴子质量对应的线谱^[16,17]. 基于这一效应, 有研究利用Green Bank Telescope和Effelsberg 100-m Telescope等单天线望远镜对孤立中子星的射电观测得出了在某些质量范围内比地面实验更强的限制^[18]. 也有工作利用Very Large Array和MeerKAT等望远镜阵列对磁星及孤立中子星的观测给出了较宽质量范围内对轴子暗物质性质的限制^[19,20]. 在银心和球状星团等天体系统中, 存在大量由恒星演化末期形成的中子星. 尽管这些中子星难以单独分辨, 但它们可集体贡献轴子暗物质在中子星附近共振转化产生的单能射电光子, 特别是银心附近较高的暗物质密度使得这个过程更有希望被观测到^[21]. 有研究利用Green Bank Telescope和Effelsberg 100-m Telescope对银心的观测, 进一步限制了轴子-光子耦合常数^[18,22].

由于轴子和类轴子能够与电磁场耦合, 遥远天体发出的光在穿过其自身、宇宙空间及银河系的磁场时, 可能与轴子相互转化, 从而在天体能谱中留下特殊印记, 如能谱中的不规则振荡现象. 此外, 宇宙中存在的河外背景光会与能量高于TeV的甚高能伽马射线相互作用, 生成正负电子对, 使得这些伽马射线无法到达地球. 这意味着我们通常只能观测到近邻宇宙中的甚高能伽马射线源. 然而, 如果存在轴子或类轴子, 来自宇宙深处的甚高能伽马射线可能会先转化为轴子或类

轴子, 从而避免与河外背景光的相互作用, 并在靠近地球的磁场中再次转化为伽马光子, 使其能够被观测到, 这显著延长了探测距离. 基于这些效应, 有研究利用Chandra X射线望远镜对Hydra星系团的keV能段能谱进行了观测, 并给出了类轴子与光子耦合常数的限制^[23]. 也有研究利用Fermi-LAT伽马射线望远镜对Perseus星系团中心星系NGC 1275进行GeV能段伽马射线能谱分析, 在质量范围为 5×10^{-10} – 5×10^{-9} eV内对类轴子-光子耦合常数给出了极为严格的限制^[24]. 此外, 还有工作利用H.E.S.S.和MAGIC对河外源百GeV到TeV伽马射线能谱的观测, 对类轴子性质进行了约束^[25,26]. 2022年10月9日, 多个实验探测到了历史上最亮的伽马射线暴GRB 221009A. 位于四川省稻城县海子山的高海拔宇宙线观测站(LHAASO)也高置信度地探测到了该事件, 并且其子阵列——地面簇射粒子探测器阵列(KM2A)疑似探测到能量高达18 TeV的伽马光子, 而Baksan Neutrino Observatory的Carpet-2实验组更是宣称观测到可能与GRB 221009A相关的251 TeV的伽马光子. 考虑到该伽马暴的红移高达0.151, 这些高能光子应该被河外背景光吸收, 无法到达地球. 有研究提出, 质量在 10^{-11} – 10^{-7} eV且类轴子-光子耦合常数为 3×10^{-12} – 5×10^{-12} GeV⁻¹的类轴子可以解释这一现象^[27]. 然而, 随后LHAASO将最高能量光子修正为13 TeV, 并在能谱分析中未发现显著的类轴子效应, 因此对类轴子-光子耦合常数给出了新的限制^[28]. 对轴子/类轴子-光子振荡效应的描述依赖于对磁场的理解, 但上述针对河外源的研究中, 磁场的模型存在较大不确定性. 相对而言, 银河系的磁场结构有更好的模型描述. 因此, 也有研究利用Fermi-LAT对银河系内脉冲星的伽马射线观测来寻找类轴子信号, 并报道了显著性超过5个标准差的疑似信号. 然而, 该信号的参数区域与地面实验的排除范围相矛盾, 可能是分析中未充分考虑其他效应所致^[29]. 此外, 也有研究利用H.E.S.S., LHAASO等对银河系内源的观测, 对类轴子暗物质的性质进行了限制^[30–32]. 利用射电以及伽马射线观测对类轴子与光子耦合常数的限制如图2.

彭罗斯提出, 轴子或类轴子等自旋为整数的玻色子可以通过超辐射过程从旋转黑洞中提取能量, 形成围绕黑洞的高密度玻色云. 当玻色子的康普顿波长与黑洞视界的大小相当时, 这一过程尤为有效. 由于轴子与光子之间的相互作用, 轴子场中可能会产生类似

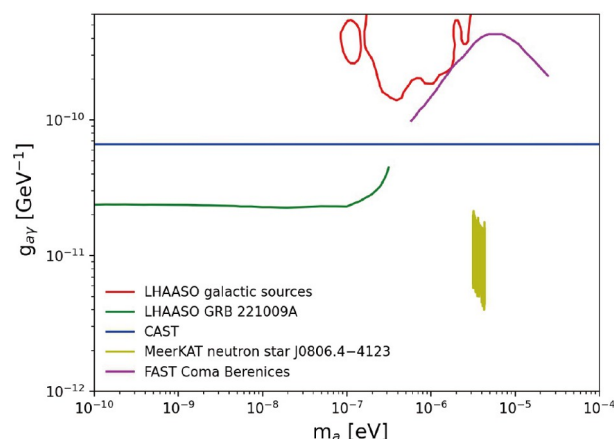


图2 (网络版彩图)不同实验对类轴子与光子耦合常数在95%置信水平给出的上限. 红色实线来自LHAASO对河内源的伽马射线观测^[32], 绿色实线来自LHAASO对GRB 221009A的伽马射线观测^[28], 黄色实线来自MeerKAT对 neutron star J0806.4-4123的射电观测^[20], 洋红色实线来自FAST对矮椭圆星系Coma Berenices的观测预期^[15].

Figure 2 (Color online) Upper limits on the coupling constant between axion-like particles and photons at the 95% confidence level from various experiments. The red solid line represents the limits from gamma-ray observations of galactic sources by LHAASO [32], the green solid line represents the limits from gamma-ray observations of GRB 221009A by LHAASO [28], the yellow solid line represents the limits from radio observations of neutron star J0806.4-4123 by MeerKAT [20], and the magenta solid line represents the expected limits from observations of the dwarf spheroidal galaxy Coma Berenices by FAST [15].

于磁场中法拉第旋转的效应, 使线偏振光的偏振面发生旋转. 如果黑洞周围因超辐射过程形成致密的轴子云, 这一效应将被显著放大. 有研究利用EHT对Messier 87中心黑洞的高分辨率偏振成像, 检验了这一理论, 并在轴子质量为 10^{-21} – 10^{-20} eV的范围内, 对轴子-光子耦合强度给出了最为严格的限制^[33,34]. 此外, 超辐射形成的轴子云在引力作用下可形成具有类氢原子能级结构的巨大玻色-爱因斯坦凝聚态, 称为“引力原子”. 轴子在“引力原子”不同能级间的跃迁或轴子湮灭为引力子的过程可以产生单频引力波, 因此通过引力波观测也有可能对轴子的性质进行限制^[35].

由于轴子与光子等物质的耦合, 这些轻质量粒子可以在恒星中心的高温高密环境中通过Primakoff过程、类康普顿过程以及类韧致辐射过程产生, 并带走部分能量. 基于这一效应, 可以利用恒星年龄和能量损失率的观测来限制轴子/类轴子的性质^[36]. (1) 白矮星没有新的能量来源, 最初炽热的白矮星会因中微子辐射而逐渐冷却. 通过研究白矮星的光度函数以及白

矮星变星周期的变化, 可以搜寻超出预期的冷却效率, 从而限制轴子-电子耦合常数. (2) 除此之外, 恒星在主序星阶段之后会形成中心未聚变的氦核, 周围氢燃烧包层供能的红巨星. 随着核心温度和压力不断上升, 氦最终开始聚变, 导致恒星达到最大光度. 然而, 轴子的存在可能引入额外的冷却机制, 延缓氦聚变的点燃并增加恒星的最高光度. 有研究通过分析星团中红巨星支尖的光度, 检验红巨星阶段的冷却率, 并对轴子-电子耦合常数进行了限制. (3) 在氢燃烧阶段, 通过Primakoff过程和类康普顿过程产生的轴子可能导致额外的能量损失, 加速氢的燃烧, 从而缩短恒星在水平分支阶段的时间. 因此, 有研究通过星团中红巨星分支与水平分支恒星数量的比值, 限制了轴子-光子耦合常数. (4) 某些恒星在演化末期会经历剧烈爆炸, 形成超新星, 爆发能量主要由中微子带走. 但轴子的存在可能加速冷却, 缩短观测到的超新星中微子信号持续时间. 有研究利用超新星1987A的中微子辐射观测数据, 限制了轴子-核子耦合常数. (5) 由于轴子-核子耦合可以提供额外的冷却机制, 有研究分析了超新星遗迹Cassiopeia A中的中子星表面温度的变化, 并对轴子-核子耦合常数进行了限制.

4 轻暗物质

在考虑热产生机制的情况下, 通常认为WIMPs的质量应大于2 GeV, 这一限制被称为Lee-Weinberg bound. 然而, 许多研究也提出了质量小于1 GeV的暗物质模型, 这些质量从keV到GeV的暗物质通常被称为轻暗物质.

轻暗物质可能通过衰变或湮灭产生伽马射线、正负电子等粒子, 因此可以在X射线和伽马射线波段搜寻相应的信号. 另外, 宇宙中的轻暗物质衰变或湮灭可以产生光子与正负电子, 这些粒子与普通物质相互作用, 可能导致气体加热并改变宇宙的电离历史, 从而影响宇宙微波背景辐射(CMB)的各向异性; 这些粒子也可以与CMB的光子相互作用改变CMB的能谱, 因此可以利用CMB观测来探测轻暗物质的性质.

如果惰性中微子的质量在keV左右, 它可以解释观测到的暗物质残留丰度, 并成为理想的暗物质候选者. 近年来, 有研究对临近星系团的X射线数据进行了叠加分析, 发现在3.5 keV处出现了无法用原子跃迁解

释的线谱, 而且不同探测器得到的流强一致. 这一超出现象可以用质量约为7 keV的惰性中微子来解释, 并且所需的参数与其他实验结果不冲突, 因此被视为潜在的暗物质信号^[37]. 随后, 多个研究团队利用不同的X射线望远镜观测星系、星系团和银河系, 均支持该线谱的存在. 然而, XMM-Newton对银河系晕的空白天空观测未能探测到相应的超出, 其限制结果不支持该信号来源于惰性中微子的衰变^[38].

银河系中存在弥散的511 keV伽马射线辐射, 源于正负电子的湮灭. INTEGRAL探测器的精确观测显示, 该511 keV线谱辐射的空间分布是一个较弱的盘状结构与一个银心方向的球状结构的叠加^[39,40]. 银盘上的511 keV线谱辐射可以通过超新星爆发或大质量恒星产生的不稳定核素导致的正电子注入来解释. 然而, 银心方向的球状结构扩展超过10°, 超出大量恒星分布的范围, 较难利用天体物理过程解释. 另外, 银心方向的球状结构具有较陡峭的空间分布, 与暗物质湮灭的预言一致. 因此, 有研究认为这可能是由质量不超过3 MeV的轻暗物质湮灭产生的正电子与星际环境中的电子湮灭所产生的信号, 且所需的湮灭截面与其他实验结果不冲突^[41,42]. 如果该信号确实源于暗物质湮灭, 那么在其他暗物质密度较高的天体中也应观察到类似的现象. 有研究利用INTEGRAL数据在临近的39个矮椭圆星系中寻找相应的511 keV线谱辐射, 虽然未发现显著的超出, 但对湮灭截面的限制仍未能排除银心附近的511 keV线谱辐射来自暗物质的可能性^[43]. 而如果不考虑511 keV线谱辐射来自暗物质, 也有研究利用INTEGRAL在51 keV–8 MeV的银心方向的能谱数据对轻暗物质的湮灭截面给出了很强的限制^[44]. 由于探测技术的限制, sub-GeV能段的实验已有多年的进展. 下一代探测器预计将大幅提升对轻暗物质的探测能力.

由于质量的限制, 轻暗物质的湮灭或衰变通常会产生产生光子和正负电子. 这些粒子通过电磁相互作用能够加热或电离气体, 其效率取决于红移. 有研究详细计算了这一效率, 并利用Planck对CMB各向异性功率谱的精确观测, 强有力地限制了质量在GeV以下的暗物质湮灭截面^[45]. 另外, 轻暗物质产生的光子也可能直接成为CMB的一部分, 电子也可以与背景光子发生康普顿散射等作用, 从而改变其能谱. 近期的研究分析了轻暗物质湮灭或衰变对CMB能谱的影响, 并预测未

来的实验可能有能力探测到这一效应^[46].

5 WIMPs暗物质

Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)是一类流行的暗物质粒子候选者, 即为“弱相互作用大质量粒子”. WIMPs之所以备受关注, 是因为它们可以在早期宇宙中自然产生. 早期宇宙温度非常高, WIMPs可以和其他粒子相互作用从而达到热平衡; 随着宇宙的膨胀和温度的降低, 暗物质粒子的相互作用逐渐减慢. 当暗物质粒子参与相互作用的速度小于宇宙的膨胀速度时, 暗物质粒子就会脱离热平衡, 从而与宇宙背景“解耦”. 如果暗物质的相互作用强度和位于电弱能标附近, 就能够自然解释宇宙中的暗物质残留密度, 这一现象被称为“WIMPs奇迹”. 另外, 为了解决规范等级等问题, 粒子物理学家提出了许多超出标准模型的新物理理论, 如超对称性和额外维度理论等. 这些新物理理论通常预言存在符合WIMPs特征的新粒子, 例如在超对称模型中, *neutralino*就是一种理想的WIMPs候选暗物质粒子. 正是由于这些优越的物理特性, 过去多年里, 暗物质的直接探测、间接探测以及对撞机探测的主要目标都是WIMPs暗物质.

如WIMPs奇迹所要求的, WIMPs能够与普通物质发生非引力相互作用. 因此, 在解耦之后, WIMPs仍然可能在矮椭圆星系、星系中心、星系团等暗物质密度较高的区域发生湮灭, 产生标准模型粒子, 从而可以通过搜寻这些信号进行间接探测.

搜寻WIMPs湮灭产生的光子是最重要的间接探测方式之一: 光子不带电荷, 不会在传播过程中受磁场的影响而偏转, 从而我们能够基于对不同天体系统的理解, 选择信噪比高的区域进行观测; 另外, 由于预期的暗物质产生的光子的空间分布与天体背景有一定的区分, 在间接探测的分析中除了考虑WIMPs湮灭的能谱信息还可以结合暗物质晕的空间分布进行研究; 而且相对于中微子, 光子的反应截面较大, 更容易被探测. 在伽马射线能段, 天体物理过程难以产生线谱, 但是WIMPs湮灭或衰变却可能产生直接反映暗物质质量信息的伽马线谱, 因此一旦在伽马射线中搜寻到线谱很可能是暗物质信号的最有说服力的证据. 过去数年, 有多项研究利用Fermi-LAT在银河系中心、星系团和矮星系等区域的伽马射线数据, 搜寻GeV–TeV能

区的线谱信号. 虽然一些工作曾报道在银心附近发现疑似线谱信号^[47,48], 但随着数据积累, 这些信号变得不再显著. 中国的首颗空间科学卫星, 暗物质粒子探测卫星(DAMPE, 又名“悟空”号)相比于Fermi-LAT有效面积较小, 但最佳能量分辨率优于1%, 居于世界领先地位, 在线谱搜寻方面具有独特的优势. 为提升线谱搜寻的灵敏度, “悟空”号合作组构造了一个与线谱灵敏度相关的探测器参数, 根据参数优化光子挑选策略获得了线谱灵敏度最优的数据; 挑选出在量能器内转化的光子事例, 并将它们纳入到数据分析中以提高统计量; 针对不同的暗物质分布选择高信噪比的分析天区. 虽然该研究未发现显著线谱信号, 但“悟空”号在接收度仅为Fermi-LAT的1/10的情况下, 达到了与Fermi-LAT相当的限制水平, 证明了高能量分辨探测器在暗物质搜寻中的巨大潜力^[49]. 除了线谱之外, WIMPs暗物质的湮灭或衰变还可能产生连续能谱. 在暗物质密度较高的天区, 搜寻伽马射线的连续能谱超出也是一种重要的间接探测手段. 近年来, 对Fermi-LAT数据的分析表明, 银河系中心可能存在一个近似球对称的GeV能段连续能谱超出. 这样的空间分布和能谱形状可以通过几十个GeV的暗物质湮灭来解释, 其所需的暗物质湮灭截面也和WIMPs假设下暗物质残留丰度所要求的湮灭截面一致^[50,51]. 因此, 这一可能的超出被认为是一个极具吸引力的暗物质疑似信号. 然而, 相关分析需要对天体物理过程产生的弥散伽马射线背景有充分理解. 由于银河系中心存在超大质量黑洞及众多各类天体和气体, 弥散伽马射线背景非常复杂, 不同模型给出的预言相差甚远. 一些研究通过多种方法构建了弥散伽马射线背景模型, 发现尽管不同背景模型下超出的具体能谱有所差异, 但该超出在GeV附近始终存在一个峰值, 并未因所选背景模型不同而消失. 这表明银心GeV超出确实存在^[52–54]. 除了WIMPs暗物质湮灭外, 毫秒脉冲星也被认为可能解释银心GeV超出. 毫秒脉冲星是恒星演化到末期的一种致密天体, 其伽马射线能谱与银心GeV超出相似, 且银河系中心预期存在大量毫秒脉冲星. 因此有研究认为, 银心GeV超出可能源自大量暗弱的毫秒脉冲星, 这些脉冲星的光度低于费米卫星的探测灵敏度, 从而被误判为弥散伽马射线^[55]. 进一步分析还发现, 银河系核球的空间分布可以很好地描述银心GeV超出, 这些研究支持了银心GeV超出的天体物理起源假说^[56,57]. 为了进

一步区分银心GeV超出的暗物质解释与毫秒脉冲星解释, 考虑到来自于弥散源和大量点源的光子计数在空间分布上可能的不同, 一些精细的统计方法被引入相关研究. 最初, 这些新方法倾向于认为毫秒脉冲星的贡献可以解释银心GeV超出^[58,59]; 然而, 一些进一步的分析也认为暗物质湮灭对于银心GeV超出的贡献仍可能显著^[60]. 如果银心GeV超出确实源于WIMPs暗物质湮灭, 那么相关联的信号也可能在其他天区、波段或宇宙线中被探测到. 例如, 矮椭圆星系是暗物质占主导的天体, 自身的天体物理背景较弱, 有研究利用Fermi-LAT数据搜寻这些天体中的伽马射线辐射, 发现了一些疑似信号也对相应的暗物质参数空间给出了一定的限制^[61–63]. 如果银心GeV超出来自暗物质, WIMPs暗物质湮灭除了产生伽马射线之外, 还会产生正负电子, 这些正负电子在磁场中可以产生射电波段的同步辐射信号. 因此也有工作利用FAST对Coma Berenices矮椭圆星系的射电观测限制了相应的参数空间. 然而, 由于矮椭圆星系中的磁场强度和扩散系数存在较多的模型假设, 射电观测对WIMPs暗物质性质的限制仍然存在较大不确定性^[64]. 如果银心GeV超出确实源于WIMPs暗物质信号, 它可能与其他实验中发现的超出标准模型预期的现象存在内在联系. 例如, 有研究在惰性双希格斯二重态的暗物质框架下发现, 解释银心GeV超出所需的参数空间与解释宇宙线中反质子超出及CDF-II实验组报道的W玻色子质量超重现象所需的参数空间相重叠, 这表明这三种异常现象可能具有共同的物理起源^[65]. 用暗物质湮灭解释银心GeV超出与AMS-02反质子超出所需的参数空间, 以及其他观测对湮灭截面的限制如图3.

银河系中存在着被称为宇宙线的高能带电粒子, 其成分包括质子、氦核、电子、正电子、反质子以及更高质量的其他原子核等. 这些宇宙线粒子可能来源于银河系中的年轻大质量星团、超新星遗迹和脉冲星风云等的加速. 此外, 银河系暗物质晕中的WIMPs暗物质通过衰变或湮灭也可产生带电粒子, 这些粒子在银河系磁场中传播后可能成为宇宙线的一部分, 从而改变宇宙线的能谱, 使总能谱的形状发生变化或产生新的结构. 由于天体物理过程产生的电子、正电子和反质子等宇宙线流量较小, WIMPs暗物质湮灭或衰变引发的变化可能更为显著, 因此在宇宙线实验中搜寻这些能谱上的变化成为了一种重要的间接探测手段.

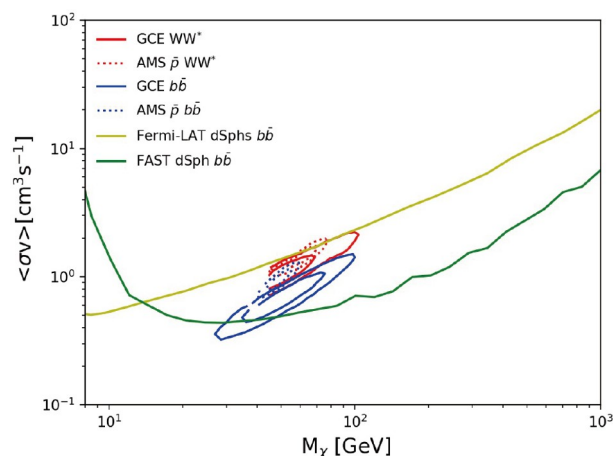


图3 (网络版彩图)对银心区域伽马射线超出拟合所得的1 sigma与2 sigma暗物质信号参数范围, 其中红色实线为WW*湮灭末态, 而蓝色实线为b $\bar{b}$ 湮灭末态; 对AMS-02的反质子超出拟合所得的1 sigma与2 sigma暗物质信号参数范围, 其中红色点线为WW*湮灭末态, 而蓝色点线为b $\bar{b}$ 湮灭末态^[65]. 此外, 黄色实线表示Fermi-LAT对多个矮椭圆星系观测所给出的b $\bar{b}$ 湮灭末态的暗物质湮灭截面的95%上限^[61], 绿色实线则是FAST对矮椭圆星系Coma Berenices观测所给出的b $\bar{b}$ 湮灭末态暗物质湮灭截面的95%上限^[64].

Figure 3 (Color online) The favored dark matter parameter space (1 sigma and 2 sigma) via fitting to the GCE data, with red solid line for the WW* channel and blue solid line for the b $\bar{b}$ channel; the favored dark matter parameter space (1 sigma and 2 sigma) via fitting to the antiproton data, with red dotted line for the WW* channel and blue dotted line for the b $\bar{b}$ channel [65]. The yellow solid line denotes the 95% upper limit on the dark matter annihilation cross-section for the b $\bar{b}$ channel from Fermi-LAT observations of a group of dwarf spheroidal galaxies [61], while the green solid line represents the 95% upper limit for the b $\bar{b}$ annihilation channel from FAST observations of the dwarf spheroidal galaxy Coma Berenices [64].

2008年, 具有正负电子区分能力的PAMELA实验公布了1.5–100 GeV能量范围内的正电子与正负电子总流量的比例, 并发现10 GeV以上存在明显超出背景预期的现象^[66]. 同年, 使用高空气球搭载BGO量能器的ATIC实验组公布了正负电子总流量, 发现在300–800 GeV存在超出, 并且大约在1 TeV回归背景预期^[67]. 此外, Fermi-LAT不仅能够探测伽马射线, 还可以测量宇宙线中的正负电子, 并在地球磁场的帮助下实现对正负电子的区分. Fermi-LAT的观测结果表明, 正负电子总能谱的具体结构与ATIC结果不尽相同, 但同样显示出相对背景预期的超出, 而正电子与正负电子总流量的比例则与PAMELA的观测到的超出较为一致^[68,69]. 不久后, 具有更高精度的宇宙线测量能力的磁谱仪AMS-02在正电子与正负电子总流量的比例上观测到与之前实验一致的超出, 但在正负电子总能谱上

的超出较小^[70]. 这些超出现象可以通过临近的天体物理源(如脉冲星、超新星遗迹等)注入的正负电子来解释, 也有研究尝试利用WIMPs暗物质的湮灭或衰变进行解释^[71,72]. 如果这些超出现象来自暗物质湮灭, 那么所需的湮灭截面必须远大于WIMPs暗物质在热退耦时的截面. 为了解决这一不一致, 有研究分析了是否可以通过暗物质子结构增强或索末菲效应增强等机制来解释^[73,74]. 另外, 为了解释这些超出现象, WIMPs暗物质需要主要湮灭或衰变为轻子, 这也会伴随伽马光子的产生. 相关研究利用Fermi-LAT数据进行了搜寻, 并对参数空间进行了限制^[75]. 2017年, “悟空”号公布了其对正负电子总能谱的精确测量, 首次直接测量到大约1 TeV处的拐折, 其精确的下降行为对研究WIMPs暗物质对电子宇宙线的贡献有重要意义; 此外, “悟空”号的数据初步显示在大约1.4 TeV处存在能谱的精细结构, 也可能与WIMPs暗物质信号存在关联^[76,77]. 除了正负电子之外, 天体物理过程产生的反质子、反氦等反粒子的背景也较低, 因此WIMPs暗物质的湮灭或衰变产物可能对这些反物质宇宙线产生显著影响. 有研究分析了AMS-02的反质子数据, 发现在1–30 GeV处存在超出. 若用WIMPs暗物质湮灭进行解释, 所需的参数空间与解释银心GeV超出所需的参数一致^[78,79]. 此外, 还有研究探讨了利用反氦宇宙线寻找WIMPs暗物质信号的可能性^[80].

6 超重暗物质

由于幺正性和暗物质残留密度的限制, 通常认为热产生的暗物质粒子质量不会超过数百TeV. 然而, 许多模型也构建出符合观测的、质量范围在10 TeV至普朗克能标之间的超重暗物质.

这类超重暗物质由于质量过大, 难以通过当前对撞机实验有效探测, 也不在现有直接探测实验的灵敏区间内, 因此间接探测成为最重要的手段. 一些研究考虑了更加合理的电弱能标之上的物理过程, 给出了超重暗物质可能的湮灭和衰变能谱^[81], 可以通过伽马射线和中微子进行相应的搜寻.

由于超重暗物质质量较高, 其湮灭或衰变产物能量也非常高. LHAASO对高能伽马射线具有极强的探测能力, 因此对超重暗物质产生的信号具有极高的灵敏度. 有工作利用LHAASO对排除银盘干扰的银河系

暗晕进行了研究, 并对质量超过100 TeV的超重暗物质的衰变寿命进行了极为严格的限制^[82]; 也有工作利用LHAASO数据搜寻来自银河系16个矮椭球星系的暗物质湮灭所产生的高能伽马射线信号, 并对质量大于约10 TeV的暗物质湮灭截面进行了严格约束^[83]. 另外, IceCube中微子天文台由于其巨大的探测面积, 对高能中微子具有良好的探测能力. 基于IceCube数据的一些研究也对超重暗物质相关的中微子信号进行了搜寻, 并对其衰变寿命和湮灭截面提供了较强的限制^[84,85]. 不同实验对超重暗物质湮灭截面的限制如图4.

7 总结与展望

多项天文观测支持暗物质的存在, 且暗物质与超出粒子物理标准模型的新物理现象密切相关, 因此研究暗物质的粒子性质已成为当前理论和实验研究的重要方向之一. 然而, 迄今为止, 除引力作用外, 我们对暗物质的特性仍知之甚少. 此前, 基于对超出粒子物理标准模型的新物理的能标的预期, 暗物质的对撞机探测,

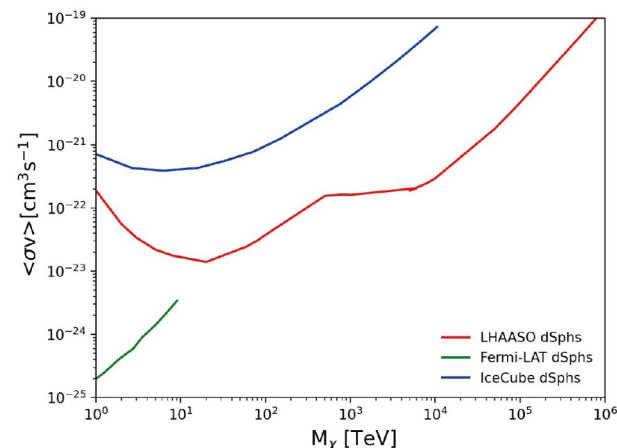


图4 (网络版彩图)不同实验对超重暗物质湮灭截面在95%置信水平给出的上限. 红色实线来自LHAASO对多个矮椭球星系的伽马射线观测给出的限制^[83], 蓝色实线来自IceCube对多个矮椭球星系的中微子观测给出的限制^[85], 绿色实线来自Fermi-LAT对多个矮椭球星系的伽马射线观测给出的限制^[61]

Figure 4 (Color online) Upper limits on the annihilation cross-section of ultraheavy dark matter at the 95% confidence level from various experiments. The red solid line represents the limits from gamma-ray observations of a group of dwarf spheroidal galaxies by LHAASO [83]; the blue solid line represents the limits from neutrino observations of a group of dwarf spheroidal galaxies by IceCube [85]; the green solid line represents the limits from gamma-ray observations of a group of dwarf spheroidal galaxies by Fermi-LAT [61].

直接探测与间接探测大多集中于电弱能标附近的质量范围. 然而, 经过十余年的LHC运行, 并未发现显著的超出标准模型的信号. 随着探测技术的不断进步, 直接探测实验也取得了显著发展, 多个实验未能发现可靠的可重复的暗物质疑似信号, 从而对WIMPs暗物质的参数空间施加了强有力的限制. 位于四川的中国锦屏地下实验室是世界上最深的地下实验室, 具备极低的背景噪声. 其中的PandaX实验和CDEX实验均获得了具有国际竞争力的物理结果, 预计不久后其排除能力将接近中微子地板, 从而对WIMPs暗物质的参数空间形成强有力限制. 除了WIMPs暗物质外, 许多模型还提出了多种有吸引力的暗物质候选者, 其质量范围跨越多个数量级. 为了有效检验这些模型并搜寻暗物质信号, 基于天文观测的间接探测方法极为重要. 近年来, 探测装置的灵敏度显著提升, 暗物质间接探测领域也取得了快速进展. 已有研究对一些暗物质模型的参数空间进行了有效检验, 并发现了一些异常信号,

如正电子超出、反质子超出以及银心GeV超出, 3.5 keV线谱超出等, 这些疑似信号的起源仍需进一步确认. 本文回顾了与不同质量的暗物质相关的间接探测预期信号和实验进展, 重点讨论了轴子/类轴子和WIMPs这两类具有良好物理动机的暗物质候选者所面临的观测限制及疑似信号. 暗物质间接探测需要对天体物理背景有深入理解, 多波段和多信使观测将有助于进一步探索参数空间, 澄清疑似信号的物理起源. 随着天文探测技术的发展, 新的观测设备, 如射电望远镜阵列FAST核心阵以及SKA、切伦科夫望远镜阵列CTA、MeV伽马射线探测器COSI、高能辐射探测装置HERD等, 将在不久的将来开始运行或发射; 新的引力波探测装置也有望在不同频段提高探测灵敏度. 此外, 更多的装置如伽马射线望远镜VLA、SWGO、中微子望远镜GRAND及IceCube-Gen2等已被提出. 随着这些高灵敏度天文设备的投入使用, 暗物质间接探测领域有望在不久的将来取得突破性进展.

参考文献

- 1 Zwicky F. Die rotverschiebung von extragalaktischen nebeln. *Helv Phys Acta*, 1933, 6: 110–127
- 2 Rubin V C, Ford W K J. Rotation of the andromeda nebula from a spectroscopic survey of emission regions. *Astrophys J*, 1970, 159: 379–403
- 3 Clowe D, Bradač M, Gonzalez A H, et al. A direct empirical proof of the existence of dark matter. *Astrophys J*, 2006, 648: L109–L113
- 4 Aghanim N, Akrami Y, Ashdown M, et al. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2020, 641: A6
- 5 Ferreira E G M. Ultra-light dark matter. *Astron Astrophys Rev*, 2021, 29: 7
- 6 Guo H K, Ma Y, Shu J, et al. Detecting dark photon dark matter with GAIA-like astrometry observations. *J Cosmol Astropart Phys*, 2019, 2019 (5): 015
- 7 Porayko N K, Zhu X, Levin Y, et al. Parkes pulsar timing array constraints on ultralight scalar-field dark matter. *Phys Rev D*, 2018, 98: 102002
- 8 Nomura K, Ito A, Soda J. Pulsar timing residual induced by ultralight vector dark matter. *Eur Phys J C*, 2020, 80: 419
- 9 Xue X, Xia Z Q, Zhu X, et al. High-precision search for dark photon dark matter with the Parkes Pulsar timing array. *Phys Rev Res*, 2022, 4: L012022
- 10 Wu Y M, Chen Z C, Huang Q G. Pulsar timing residual induced by ultralight tensor dark matter. *J Cosmol Astropart Phys*, 2023, 2023(9): 021
- 11 Xia Z Q, Tang T P, Huang X, et al. Constraining ultralight dark matter using the Fermi-LAT pulsar timing array. *Phys Rev D*, 2023, 107: L121302
- 12 Luu H N, Liu T, Ren J, et al. Stochastic wave dark matter with Fermi-LAT γ -ray pulsar timing array. *Astrophys J Lett*, 2024, 963: L46
- 13 Smarra C, Goncharov B, Barausse E, et al. Second data release from the European Pulsar timing array: Challenging the ultralight dark matter paradigm. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 171001
- 14 Caputo A, Garay C P, Witte S J. Looking for axion dark matter in dwarf spheroidal galaxies. *Phys Rev D*, 2018, 98: 083024
- 15 Guo W Q, Xia Z Q, Huang X. Constraining axion-like particles dark matter in Coma Berenices with FAST. *Phys Lett B*, 2024, 852: 138631
- 16 Huang F P, Kadota K, Sekiguchi T, et al. Radio telescope search for the resonant conversion of cold dark matter axions from the magnetized astrophysical sources. *Phys Rev D*, 2018, 97: 123001
- 17 Hook A, Kahn Y, Safdi B R, et al. Radio signals from axion dark matter conversion in neutron star magnetospheres. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 241102
- 18 Foster J W, Kahn Y, Macias O, et al. Green bank and Effelsberg radio telescope searches for axion dark matter conversion in neutron star

- magnetospheres. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 171301
- 19 Darling J. Search for axionic dark matter using the magnetar PSR J1745-2900. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 121103
- 20 Zhou Y F, Houston N, Józsa G I G, et al. Searching for axion dark matter with the MeerKAT radio telescope. *Phys Rev D*, 2022, 106: 083006
- 21 Safdi B R, Sun Z, Chen A Y. Detecting axion dark matter with radio lines from neutron star populations. *Phys Rev D*, 2019, 99: 123021
- 22 Foster J W, Witte S J, Lawson M, et al. Extraterrestrial axion search with the breakthrough listen Galactic center survey. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 251102
- 23 Wouters D, Brun P. Constraints on axion-like particles from X-ray observations of the hydra galaxy cluster. *Astrophys J*, 2013, 772: 44
- 24 Ajello M, Albert A, Anderson B, et al. Search for spectral irregularities due to photon-axionlike-particle oscillations with the Fermi large area telescope. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 161101
- 25 Abramowski A, Acero F, Aharonian F, et al. Constraints on axionlike particles with H.E.S.S. from the irregularity of the PKS 2155-304 energy spectrum. *Phys Rev D*, 2013, 88: 102003
- 26 Abe H, Abe S, Abhir J, et al. Constraints on axion-like particles with the Perseus galaxy cluster with MAGIC. *Phys Dark Univ*, 2024, 44: 101425
- 27 Galanti G, Nava L, Roncadelli M, et al. Observability of the very-high-energy emission from GRB 221009A. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 251001
- 28 Cao Z, Aharonian F, An Q, et al. Very high energy gamma-ray emission beyond 10 TeV from GRB 221009A. *Sci Adv*, 2023, 9: Adj2778
- 29 Majumdar J, Calore F, Horns D. Search for gamma-ray spectral modulations in Galactic Pulsars. *J Cosmol Astropart Phys*, 2018, 2018(4): 048
- 30 Liang Y F, Zhang C, Xia Z Q, et al. Constraints on axion-like particle properties with TeV gamma-ray observations of Galactic sources. *J Cosmol Astropart Phys*, 2019, 2019(6): 042
- 31 Xia Z Q, Liang Y F, Feng L, et al. Searching for the possible signal of the photon-axionlike particle oscillation in the combined GeV and TeV spectra of supernova remnants. *Phys Rev D*, 2019, 100: 123004
- 32 Li J, Bi X J, Gao L Q, et al. Constraints on axion-like particles from the observation of Galactic sources by the LHAASO. *Chin Phys C*, 2024, 48: 065107
- 33 Chen Y, Shu J, Xue X, et al. Probing axions with event horizon telescope polarimetric measurements. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 061102
- 34 Chen Y, Liu Y, Lu R S, et al. Stringent axion constraints with Event Horizon Telescope polarimetric measurements of M87*. *Nat Astron*, 2022, 6: 592–598
- 35 Arvanitaki A, Baryakhtar M, Huang X. Discovering the QCD axion with black holes and gravitational waves. *Phys Rev D*, 2015, 91: 084011
- 36 Giannotti M, Irastorza I G, Redondo J, et al. Stellar recipes for axion hunters. *J Cosmol Astropart Phys*, 2017, 2017(10): 010
- 37 Bulbul E, Markevitch M, Foster A, et al. Detection of an unidentified emission line in the stacked X-ray spectrum of galaxy clusters. *Astrophys J*, 2014, 789: 13
- 38 Dessert C, Rodd N L, Safdi B R. The dark matter interpretation of the 3.5-keV line is inconsistent with blank-sky observations. *Science*, 2020, 367: 1465–1467
- 39 Jean P, Knödlseider J, Lonjou V, et al. Early SPI/INTEGRAL measurements of 511 keV line emission from the 4th quadrant of the galaxy. *Astron Astrophys*, 2003, 407: L55–L58
- 40 Knödlseider J, Jean P, Lonjou V, et al. The all-sky distribution of 511 keV electron-positron annihilation emission. *Astron Astrophys*, 2005, 441: 513–532
- 41 Boehm C, Hooper D, Silk J, et al. MeV dark matter: Has it been detected? *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 101301
- 42 Ascasibar Y, Jean P, B hm C, et al. Constraints on dark matter and the shape of the Milky Way dark halo from the 511-keV line. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 368: 1695–1705
- 43 Siebert T, Diehl R, Vincent A C, et al. Search for 511 keV emission in satellite galaxies of the Milky Way with INTEGRAL/SPI. *Astron Astrophys*, 2016, 595: A25
- 44 Siebert T, Calore F, Serpico P D. Sub-GeV dark matter annihilation: Limits from Milky Way observations with INTEGRAL. *Mon Not R Astron Soc*, 2024, 528: 3433–3440
- 45 Slatyer T R. Indirect dark matter signatures in the cosmic dark ages. I. Generalizing the bound on s-wave dark matter annihilation from Planck results. *Phys Rev D*, 2016, 93: 023527
- 46 Liu H, Qin W, Ridgway G W, et al. Exotic energy injection in the early universe. II. CMB spectral distortions and constraints on light dark matter. *Phys Rev D*, 2023, 108: 043531
- 47 Bringmann T, Huang X, Ibarra A, et al. Fermi LAT search for internal bremsstrahlung signatures from dark matter annihilation. *J Cosmol*

[Astropart Phys](#), 2012, 2012(7): 054

- 48 Weniger C. A tentative gamma-ray line from dark matter annihilation at the Fermi large area telescope. [J Cosmol Astropart Phys](#), 2012, 2012(8): 007
- 49 Alemanno F, An Q, Azzarello P, et al. Search for gamma-ray spectral lines with the dark matter particle explorer. [Sci Bull](#), 2022, 67: 679–684
- 50 Hooper D, Goodenough L. Dark matter annihilation in the Galactic center as seen by the Fermi gamma ray space telescope. [Phys Lett B](#), 2011, 697: 412–428
- 51 Daylan T, Finkbeiner D P, Hooper D, et al. The characterization of the gamma-ray signal from the central Milky Way: A case for annihilating dark matter. [Phys Dark Univ](#), 2016, 12: 1–23
- 52 Zhou B, Liang Y F, Huang X, et al. GeV excess in the Milky Way: The role of diffuse Galactic gamma-ray emission templates. [Phys Rev D](#), 2015, 91: 123010
- 53 Calore F, Cholis I, Weniger C. Background model systematics for the Fermi GeV excess. [J Cosmol Astropart Phys](#), 2015, 2015(3): 038
- 54 Huang X, Enßlin T, Selig M. Galactic dark matter search via phenomenological astrophysics modeling. [J Cosmol Astropart Phys](#), 2016, 2016(4): 030
- 55 Yuan Q, Zhang B. Millisecond pulsar interpretation of the Galactic center gamma-ray excess. [J High Energy Astrophys](#), 2014, 3-4: 1–8
- 56 Macias O, Gordon C, Crocker R M, et al. Galactic bulge preferred over dark matter for the galactic centre gamma-ray excess. [Nat Astron](#), 2018, 2: 387–392
- 57 Bartels R, Storm E, Weniger C, et al. The Fermi-LAT GeV excess as a tracer of stellar mass in the Galactic bulge. [Nat Astron](#), 2018, 2: 819–828
- 58 Bartels R, Krishnamurthy S, Weniger C. Strong support for the millisecond pulsar origin of the Galactic center GeV excess. [Phys Rev Lett](#), 2016, 116: 051102
- 59 Lee S K, Lisanti M, Safdi B R, et al. Evidence for unresolved γ -ray point sources in the inner galaxy. [Phys Rev Lett](#), 2016, 116: 051103
- 60 Leane R K, Slatyer T R. Revival of the dark matter hypothesis for the Galactic center gamma-ray excess. [Phys Rev Lett](#), 2019, 123: 241101
- 61 Ackermann M, Albert A, Anderson B, et al. Searching for dark matter annihilation from Milky Way dwarf spheroidal galaxies with six years of Fermi large area telescope data. [Phys Rev Lett](#), 2015, 115: 231301
- 62 Geringer-Sameth A, Walker M G, Koushiappas S M, et al. Indication of gamma-ray emission from the newly discovered dwarf galaxy reticulum II. [Phys Rev Lett](#), 2015, 115: 081101
- 63 Li S, Liang Y F, Duan K K, et al. Search for gamma-ray emission from eight dwarf spheroidal galaxy candidates discovered in year two of dark energy survey with Fermi-LAT data. [Phys Rev D](#), 2016, 93: 043518
- 64 Guo W Q, Li Y, Huang X, et al. Constraints on dark matter annihilation from the FAST observation of the Coma Berenices dwarf galaxy. [Phys Rev D](#), 2023, 107: 103011
- 65 Zhu C R, Cui M Y, Xia Z Q, et al. Explaining the GeV antiproton excess, GeV γ -ray excess, and W-Boson mass anomaly in an inert two higgs doublet model. [Phys Rev Lett](#), 2022, 129: 231101
- 66 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV. [Nature](#), 2009, 458: 607–609
- 67 Chang J, Adams J H, Ahn H S, et al. An excess of cosmic ray electrons at energies of 300–800 GeV. [Nature](#), 2008, 456: 362–365
- 68 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Measurement of the cosmic ray $e^+ + e^-$ spectrum from 20 GeV to 1 TeV with the Fermi large area telescope. [Phys Rev Lett](#), 2009, 102: 181101
- 69 Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. Measurement of separate cosmic-ray electron and positron spectra with the Fermi large area telescope. [Phys Rev Lett](#), 2012, 108: 011103
- 70 Aguilar M, Ali Cavazonza L, Ambrosi G, et al. The alpha magnetic spectrometer (AMS) on the international space station: Part II—Results from the first seven years. [Phys Rep](#), 2021, 894: 1–116
- 71 Lin S J, Yuan Q, Bi X J. Quantitative study of the AMS-02 electron/positron spectra: Implications for pulsars and dark matter properties. [Phys Rev D](#), 2015, 91: 063508
- 72 Jin H B, Wu Y L, Zhou Y F. Cosmic ray propagation and dark matter in light of the latest AMS-02 data. [J Cosmol Astropart Phys](#), 2015, 2015(9): 049
- 73 Lavalle J, Yuan Q, Maurin D, et al. Full calculation of clumpiness boost factors for antimatter cosmic rays in the light of Lambda-CDM N -body simulation results. [Astron Astrophys](#), 2008, 479: 427–452

- 74 Arkani-Hamed N, Finkbeiner D P, Slatyer T R, et al. A theory of dark matter. *Phys Rev D*, 2009, 79: 015014
- 75 Huang X, Vertongen G, Weniger C. Probing dark matter decay and annihilation with Fermi LAT observations of nearby galaxy clusters. *J Cosmol Astropart Phys*, 2012, 2012(1): 042
- 76 Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R, et al. Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons. *Nature*, 2017, 552: 63–66
- 77 Fan Y Z, Huang W C, Spinrath M, et al. A model explaining neutrino masses and the DAMPE cosmic ray electron excess. *Phys Lett B*, 2018, 781: 83–87
- 78 Cui M Y, Yuan Q, Tsai Y L S, et al. Possible dark matter annihilation signal in the AMS-02 antiproton data. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 191101
- 79 Cuoco A, Krämer M, Korsmeier M. Novel dark matter constraints from antiprotons in light of AMS-02. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 191102
- 80 Ibarra A, Wild S. Prospects of antideuteron detection from dark matter annihilations or decays at AMS-02 and GAPS. *J Cosmol Astropart Phys*, 2013, 2013: 021
- 81 Bauer C W, Rodd N L, Webber B R. Dark matter spectra from the electroweak to the Planck scale. *J High Energy Phys*, 2021, 2021: 121
- 82 Cao Z, Aharonian F, An Q, et al. Constraints on heavy decaying dark matter from 570 days of LHAASO observations. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 261103
- 83 Cao Z, Aharonian F, An Q, et al. Constraints on ultraheavy dark matter properties from dwarf spheroidal galaxies with LHAASO observations. *Phys Rev Lett*, 2024, 133: 061001
- 84 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Search for neutrinos from decaying dark matter with IceCube. *Eur Phys J C*, 2018, 78: 831
- 85 Guo X K, Lü Y F, Huang Y B, et al. Searching for dark-matter induced neutrino signals in dwarf spheroidal galaxies using 10 years of IceCube public data. *Phys Rev D*, 2023, 108: 043001

Progresses in the dark matter indirect detection

HUANG XiaoYuan^{1,2*}

¹ Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China;

² School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

*Corresponding author (email: xyhuang@pmo.ac.cn)

Observations suggest that dark matter constitutes a significant portion of the universe and plays a pivotal role in its evolution. Despite its profound impact, little is known about dark matter beyond its gravitational effects. Unraveling the nature of dark matter could expand the standard model of particle physics and lead to “new physics”. A wide range of dark matter models have been proposed based on observational evidence, with candidate particles spanning many orders of magnitude in mass. These candidates may give rise to distinct astrophysical phenomena, enabling indirect detection by identifying signals that deviate from expected astrophysical backgrounds. This study reviews the theoretical predictions and experimental progress in the indirect detection of dark matter across various mass scales, with a particular focus on the observational constraints and potential signals associated with axions/axion-like particles and weakly interacting massive particles, two candidates with strong theoretical motivation.

dark matter indirect detection, gamma-ray, cosmic-ray

PACS: 95.35.+d, 95.85.Nv, 95.85.Pw, 95.85.Ry

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0347](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0347)