

## 暗物质探测技术的最新发展与未来方向

王立伟

厦门大学 福建厦门

**【摘要】**暗物质作为宇宙中最重要却尚未被直接探测到的成分之一，占据了宇宙物质总量的绝大部分，其存在已通过引力效应得到间接证实。然而，暗物质的微观性质、粒子类型以及相互作用机制仍是当今基础物理与宇宙学研究中最为关键的未解之谜。近年来，随着实验物理、量子精密测量、材料科学及深空探测技术的不断发展，暗物质探测技术取得了显著进展。一方面，基于液氙、液氩和高纯锗等材料的低温探测器在灵敏度和背景抑制方面取得突破，为轻质量暗物质和弱相互作用大质量粒子（WIMPs）的搜索提供了新的实验依据。另一方面，量子精密测量、原子干涉仪和新型磁力仪的应用使得对超轻标量暗物质、轴子类暗物质的探测成为可能，为探索更广泛的参数空间提供了新的途径。同时，间接探测技术通过观测高能宇宙线、伽马射线和中微子等信号不断拓展对暗物质分布及湮灭机制的认识，而对撞机实验则在极端高能条件下探索暗物质候选粒子的产生机制，形成了多渠道互补的研究格局。本文在系统梳理暗物质探测技术最新进展的基础上，分析其面临的实验挑战与理论困境，并展望未来可能的研究方向。预计随着量子信息技术的引入、超大规模低背景实验的开展以及太空实验平台的应用，暗物质探测将迎来新一轮跨越式发展。这不仅有助于揭示宇宙的基本构成和演化规律，也将推动多学科技术的融合与应用，为基础科学与前沿工程带来深远影响。

**【关键词】**暗物质；直接探测；间接探测；量子精密测量；未来方向

**【收稿日期】**2024 年 11 月 18 日

**【出刊日期】**2024 年 12 月 21 日

**【DOI】**10.12208/j.pstr.20240010

### Recent developments and future directions in dark matter detection technology

*Liwei Wang*

*Xiamen University, Xiamen, Fujian*

**【Abstract】** Dark matter, as one of the most important but not yet directly detected components in the universe, accounts for the vast majority of the total amount of matter in the universe, and its existence has been indirectly confirmed by gravitational effects. However, the microscopic properties, particle types, and interaction mechanisms of dark matter remain the most critical unsolved mysteries in fundamental physics and cosmology today. In recent years, with the continuous development of experimental physics, quantum precision measurement, materials science and deep space exploration technology, significant progress has been made in dark matter detection technology. On the one hand, cryogenic detectors based on liquid xenon, liquid argon and high purity germanium have made breakthroughs in sensitivity and background suppression, providing new experimental basis for the search of light dark matter and weakly interacting massive particles (WIMPs). On the other hand, the application of quantum precision measurement, atomic interferometer and new magnetometer makes it possible to detect ultra-light scalar dark matter and axial dark matter, which provides a new way to explore a wider parameter space. At the same time, indirect detection technology continuously expands the understanding of dark matter distribution and annihilation mechanism by observing high-energy cosmic rays, gamma rays and neutrinos, while collider experiment explores the generation mechanism of dark matter candidate particles under extremely high energy conditions, forming a multi-channel complementary research pattern. Based on a systematic review of the latest advances in dark matter detection techniques, this paper analyzes the experimental challenges and theoretical dilemmas faced by dark matter

detection techniques, and looks forward to possible research directions in the future. It is expected that with the introduction of quantum information technology, the development of ultra-large-scale low-background experiments and the application of space experimental platforms, dark matter detection will usher in a new round of leapfrog development. This will not only help to reveal the basic composition and evolution of the universe, but also promote the integration and application of multidisciplinary technologies, bringing far-reaching influence to basic science and cutting-edge engineering.

**【Keywords】** Dark matter; Direct detection; Indirect detection; Quantum precision measurement; Future direction

## 引言

暗物质作为现代宇宙学与粒子物理中最深刻的谜题之一，占据了宇宙物质成分的绝大多数，其存在最早由星系旋转曲线、星系团质量分布以及宇宙微波背景等天文观测所揭示。尽管暗物质的引力效应已经得到确凿证实，但其微观属性至今尚未被直接探测到，这也使得暗物质成为基础物理领域的重要前沿问题。如何揭示暗物质的本质，不仅关乎粒子物理标准模型的拓展与修正，也对理解宇宙起源和演化规律具有重要意义。近年来，随着量子精密测量、低温探测器、天文观测和高能对撞机实验的快速发展，暗物质探测技术逐渐呈现多样化与跨学科融合的趋势，为未来的突破奠定了技术与理论基础。

在实验探索方面，量子技术的引入极大提升了暗物质探测的灵敏度。例如，王敏（2024）报道了利用量子精密测量技术创造新的暗物质探测纪录，显示出量子传感器在弱相互作用信号检测中的巨大潜力<sup>[1]</sup>。另一方面，理论物理学的发展推动了对自相互作用暗物质模型的深入研究，许武龙（2024）的研究表明，自相互作用机制可能解释星系尺度上一些标准冷暗物质模型无法解释的现象<sup>[2]</sup>。此外，中微子观测也被广泛应用于暗物质研究，例如郭学康（2024）和吕宜霏（2024）的博士论文分别基于超重暗物质及邻近星系的中微子观测，提出了新的探测路径<sup>[3,4]</sup>。这些研究为暗物质探测开辟了更广阔的视角。

在地面实验中，大型高能粒子物理观测装置也为暗物质搜寻提供了数据支持。李军（2024）利用中国高海拔宇宙线观测站（LHAASO）的数据开展了暗物质信号的搜寻，为间接探测提供了关键证据<sup>[5]</sup>。同时，探测器灵敏度的提升也成为研究热点。云在（2024）提出通过极化核子探测暗物质的非弹性特征，为直接探测提供了新的思路<sup>[6]</sup>。量子精密磁测量

技术同样展现出前景，杨颖慧（2024）的研究表明，该技术能够显著降低背景噪声水平，提高对弱信号的探测能力<sup>[7]</sup>。在此基础上，苏昊文（2023）提出基于自旋量子放大器的实验方案，为微弱相互作用信号的放大与识别提供了实验依据<sup>[8]</sup>。赵一心等（2023）的研究则进一步验证了原子磁力仪在异常作用力及类轴子暗物质探测中的应用潜力<sup>[9]</sup>。这些成果共同展示了量子测量在暗物质探测中的应用前景。

在交叉学科研究中，暗物质与引力波、中微子等其他前沿物理领域的结合也带来了新机遇。江通（2023）的研究将暗物质环境探测与引力波波源定位相结合，为宇宙大尺度结构研究提供了新的实验支撑<sup>[10]</sup>。赵凌波（2023）则通过研究交变强磁场中的轴子暗物质电磁响应，为实验室条件下模拟暗物质效应提供了可能<sup>[11]</sup>。与此同时，暗物质空间实验平台的技术准备也在推进，例如敬雅冉（2022）提出的下一代暗物质粒子探测卫星关键探测器读出技术方案，为未来空间实验的开展奠定了工程基础<sup>[12]</sup>。在实验原理探索方面，赵伟（2022）研究了基于原子干涉仪的超轻标量与矢量暗物质探测方案，展现了原子干涉技术在极低能量尺度探测中的独特优势<sup>[13]</sup>。

低背景实验与材料科学的结合同样在推进暗物质探测前沿。李任明杰（2022）针对高纯锗暗物质实验中的体事例本底问题进行了深入研究，提出了甄别方法以提升信号判别能力<sup>[14]</sup>。苏亮亮（2022）的研究则聚焦于轻暗物质的直接探测，进一步丰富了对低质量区间暗物质的实验探索<sup>[15]</sup>。在探测器工程技术方面，黄沛尧（2022）设计并优化了 PandaX-30T 暗物质探测器中的低温精馏系统，该成果有效提升了探测器的纯净度与稳定性<sup>[16]</sup>。与此同时，戴皓斑（2022）利用暗物质粒子探测卫星实验测量空间电子能谱，为空间环境下的暗物质研究积累了数据<sup>[17]</sup>。

在国际前沿方面，研究者们不断探索新材料与

新技术以提升探测灵敏度。例如, Razeto 和 Rossi (2024) 讨论了硅光电倍增器 (SiPMs) 在直接探测中的挑战与机遇<sup>[18]</sup>; Yu 等 (2023) 提出利用固态氦低温声子探测器进行暗物质搜索, 为冷却材料的应用提供了新思路<sup>[19]</sup>; Singh 等 (2023) 发展了低阈值的 p 型锗探测器模型, 用于低质量暗物质的探测<sup>[20]</sup>; Hyelim 等 (2023) 探索基于磁性微量热计的冷却粒子探测方案, 在稀有事例搜寻中展现出独特优势<sup>[21]</sup>; Holland (2023) 则提出全耗尽电荷耦合器件 (CCD) 的新设计, 推动了成像探测技术的发展<sup>[22]</sup>。在理论和实验结合方面, E.M. T 等人 (2022) 比较了不同电磁光谱仪对轴子暗物质与高频引力波的灵敏度, 为跨领域实验提供了比较依据<sup>[23]</sup>。Marco (2022) 则探索了稀有气体固体晶体在暗物质探测中的可行性实验, 为未来材料选择提供了可能<sup>[24]</sup>。Yonatan 与 Tongyan (2022) 的研究强调了凝聚态物理系统在轻暗物质探测中的潜在应用, 进一步推动了跨学科方向的融合<sup>[25]</sup>。

综上所述, 暗物质探测在过去十年中已从传统的直接与间接探测拓展至量子技术、低温物理、材料科学以及空间实验等多学科融合的综合体系。尽管取得了诸多进展, 但暗物质的本质问题仍未得到解答。主要挑战包括: 如何进一步降低背景噪声、如何扩展对超轻和极重暗物质的探测能力, 以及如何在实验结果与理论模型之间建立更紧密的联系。本文将在梳理暗物质探测技术发展的基础上, 系统分析当前成果与局限性, 并展望未来的发展方向。通过多维度比较与趋势研判, 本文力图为后续暗物质研究提供理论参考与技术借鉴。

## 1 方法

暗物质探测方法的设计与发展, 本质上是为了在极低能量沉积、极高噪声背景和未知粒子属性的条件下寻找潜在信号。由于暗物质的微观性质尚不清楚, 科学界提出了多种实验路径, 主要包括直接探测、间接探测、对撞机实验三大传统策略, 同时, 近年来量子精密测量与新兴技术的崛起为探索新的参数区间提供了可能。这些方法相辅相成, 共同构成了暗物质实验研究的综合体系。

### 1.1 直接探测

直接探测的基本思想是利用暗物质粒子与探测材料之间的散射或吸收效应, 通过核反冲、电子反

冲或其他相互作用产生的信号来推断暗物质的存在。这类实验通常在深地下实验室进行, 以屏蔽宇宙射线背景, 并采用多重技术抑制本底噪声。

液氙与液氩探测器是最常见的直接探测装置。液氩探测器的优势在于其高原子序数和高密度特性, 能够增强暗物质散射截面, 同时具备良好的自屏蔽效应。通过光电倍增管或硅光电倍增器对闪烁光与电离信号的双重读取, 实验能够区分核反冲事件与电子反冲背景。液氩探测器虽然体积通常小于液氙装置, 但其出色的脉冲形状判别能力, 使其在低能信号甄别上具有优势。随着探测体积不断扩大, 液氙与液氩实验已经成为对弱相互作用大质量粒子 (WIMPs) 灵敏度最高的手段之一。

除了惰性气体, 半导体探测器在低阈值暗物质探测中也发挥着重要作用。高纯锗探测器与硅基探测器凭借优异的能量分辨率与低噪声特性, 能够捕捉能量沉积低至几十电子伏的信号, 这使得它们在轻质量暗物质以及电子反冲信号探测方面极具潜力。近年来, 超低温操作与电荷倍增技术的结合, 使得半导体探测器的灵敏度进一步提升, 为探索亚 GeV 质量区间的暗物质开辟了新窗口。

此外, 低温声子探测器通过记录晶格振动信号, 直接捕捉散射过程中产生的热量或声子激发。在结合磁性微量热计与超导量子干涉器件后, 这类探测器实现了能量分辨率的显著提升。通过多通道读出与材料工程的优化, 实验者能够在超低噪声背景下对暗物质的相互作用进行放大, 从而进入前所未有的灵敏度水平。

总体来看, 直接探测方法已从早期的千克级实验发展到如今的吨级甚至数十吨级装置, 其覆盖的暗物质质量范围不断拓展。然而, 它仍面临诸多挑战, 包括不可避免的本底噪声、太阳中微子背景以及灵敏度饱和问题。如何在扩大探测体积的同时, 进一步抑制本底并降低能量阈值, 是未来直接探测的核心任务。

### 1.2 间接探测

间接探测的基本思路是通过观测暗物质湮灭或衰变过程中产生的次级粒子, 例如高能伽马射线、宇宙线正电子、中微子等, 来推断暗物质的存在。这类方法主要依赖天文观测与空间探测装置。

伽马射线观测是间接探测的重要手段。由于暗

物质在星系中心或矮星系中密度较高，其湮灭可能产生可观测的伽马射线信号。地面切伦科夫望远镜与空间伽马射线探测器不断提升观测灵敏度，能够对高能区间的信号进行限制。尤其在 TeV 能区的极高能观测中，实验结果为暗物质模型的排他性检验提供了坚实基础。

宇宙线信号探测也为暗物质研究提供了间接证据。暗物质湮灭或衰变可能产生过量的正电子或反质子，这些信号在空间探测器中可被捕捉。例如，地磁环境下的电子能谱与高能宇宙线组成，都可能携带暗物质的痕迹。尽管这些信号往往与天体物理过程难以区分，但多通道观测和跨波段数据的联合分析，正在逐步缩小理论不确定性。

中微子观测为暗物质研究提供了另一种独特的窗口。若暗物质在天体内部（如太阳、地球核心）发生捕获与湮灭，将产生高能中微子信号。通过中微子望远镜对这些信号进行探测，可以为暗物质存在提供佐证。近年来，利用冰立方望远镜等装置，人们已对多个暗物质候选模型进行了限制，展示了中微子物理与暗物质研究的紧密联系。

总体而言，间接探测为大尺度验证暗物质分布和湮灭机制提供了宝贵信息。然而，由于天体物理背景的复杂性，如何从嘈杂的背景中识别出真正的暗物质信号，仍是间接探测面临的重大难题。

### 1.3 对撞机实验

对撞机实验旨在通过高能条件下产生暗物质粒子，从而间接推断其存在。在大型强子对撞机(LHC)等设施中，研究者通过分析能量动量不守恒事件，寻找暗物质候选粒子。若在碰撞产物中出现明显的“缺失能量”，则可能意味着暗物质被产生并逃逸。

该方法的优势在于可直接探索暗物质与标准模型粒子之间可能的耦合机制。通过对单光子、单喷注、单 Z 或单 W 等过程的研究，实验者可以设置对暗物质参数空间的排他性限制。随着加速器亮度与能量的不断提升，未来对撞机实验有望在更高能区间探测暗物质。

然而，对撞机方法同样面临困难。一方面，缺失能量的信号并不专属于暗物质粒子，可能由中微子等已知粒子引起，因此需要结合复杂的事例模拟与背景建模。另一方面，即便产生了暗物质粒子，其寿命、相互作用强度与模型选择的不确定性，仍然使

得实验结论较为间接。尽管如此，对撞机实验依然是检验暗物质与高能物理理论的重要手段。

### 1.4 量子与新兴技术

随着传统方法逐渐接近灵敏度极限，量子精密测量与新兴交叉技术为暗物质探测开辟了全新方向。

量子传感器能够通过超高精度的测量手段捕捉极微弱的物理效应。例如，原子干涉仪可以对空间中存在的超轻暗物质引起的时空扰动做出响应；自旋量子放大器能够放大暗物质与电子或核自旋之间的微弱相互作用，从而突破传统探测器的阈值限制。原子磁力仪与超导量子干涉器件在微弱磁信号探测方面的应用，也为类轴子暗物质的研究提供了实验路径。

在新材料方面，稀有气体固态晶体与新型低声子晶体逐渐成为研究热点。这些材料能够在极低噪声环境下放大暗物质与晶格相互作用产生的信号，兼具低能阈值与高灵敏度优势。同时，冷原子阵列、量子比特探测器等新兴技术，正在从理论方案逐步过渡到实验验证阶段。

未来，量子技术与大规模实验的结合将可能推动暗物质探测进入全新阶段。一方面，量子精密测量可拓展对超轻暗物质参数区间的探索；另一方面，新兴材料与器件的应用能够降低背景与能量阈值。随着跨学科融合加速，暗物质探测技术正逐步走向“量子化”与“多元化”。

## 2 结果

在对暗物质的探索过程中，科学界已经通过长期实验积累了大量观测与实验结果。尽管至今尚未获得确凿的暗物质粒子信号，但不同实验方法均已在灵敏度、数据量和理论验证等方面取得显著进展。这些结果不仅为暗物质的存在设定了新的参数边界，也推动了物理学实验技术的发展。以下将从四个主要研究路径展开阐述。

### 2.1 直接探测结果

直接探测实验主要依赖深地下实验室的低背景探测器来记录暗物质与原子核可能的散射事件。近年来，液氙探测器、液氩探测器和超低温半导体探测器在灵敏度上取得了突破。

液氙探测器实验已将暗物质核反冲的上限截面推到前所未有的低水平，覆盖了传统 WIMPs 质量区间的核心部分。这意味着，如果暗物质粒子的相

相互作用截面高于该值，它们应当已经被探测到。

液氙实验则在背景抑制方面显示了优势，能够更有效地区分暗物质信号与电子反冲信号。

超低温实验在轻质量暗物质粒子搜索方面表现突出，可以探测到低至几 GeV 质量区间的候选者。

这些结果共同建立了暗物质相互作用的“排除曲线”，有效地限制了主流理论模型，迫使研究者将注意力扩展至非传统候选粒子和非弹性散射模型。

## 2.2 间接探测结果

间接探测通过观测暗物质湮灭或衰变产生的高能粒子信号来寻找其存在的痕迹。近年来，空间和地面观测设施取得了多项具有指示意义的结果：

伽马射线观测在银河系中心和矮星系的研究中发现了一些高能信号过剩现象，部分结果与暗物质湮灭模型存在一定吻合，但仍未排除天体物理背景源的可能性。

宇宙射线研究显示电子与正电子谱中存在能量分布异常，尤其在百 GeV 能区出现的“正电子过剩”引起广泛讨论。虽然部分模型可由脉冲星解释，但暗物质湮灭的可能性依旧存在。

中微子探测在太阳和地球的观测中尚未发现显著异常，但给出了暗物质俘获与湮灭速率的上限约束。

这些间接探测结果虽未提供直接证据，但不断收紧暗物质参数空间，使理论模型更具针对性。

## 2.3 对撞机实验结果

对撞机实验通过高能质子对撞，尝试直接产生暗物质粒子并通过“缺失能量”信号进行识别。

在大规模数据积累下，对撞机实验已排除了部分低质量区间的 WIMPs，并对一些超对称模型的参数空间提出了严格约束。

近年来对“单光子+缺失能量”“单喷注+缺失能量”等信号的系统分析，使得对新物理的灵敏度持续提升。

虽然未发现直接的暗物质迹象，但实验结果对模型建立具有重要意义。例如，部分理论预测的轻质量暗物质粒子已被彻底排除。

总体而言，对撞机实验的结果强化了与天体物理观测互补的研究格局，即使未能直接发现暗物质，也推动了对基础物理理论的修正。

## 2.4 量子与新兴技术的探索结果

新兴的量子技术和先进实验手段在探索暗物质方面展现出前所未有的潜力：

量子传感器实验已能探测到极其微弱的能量沉积，这为轻质量暗物质甚至亚电子伏区间的粒子候选者提供了检测手段。

超导量子器件显示了在亚电子噪声水平下运行的能力，使得微小散射信号的识别成为可能。

引力波干涉仪和原子干涉仪被用于限制暗物质与引力或空间涨落的耦合强度，已给出比传统实验更严格的约束区间。

新型材料探测器（如二维材料和拓扑绝缘体）展现了对暗光子、轴子等非标准暗物质粒子的高灵敏度。

这些新兴技术尚处于探索阶段，但初步结果已在部分质量区间超过传统实验的灵敏度，显示出颠覆性潜力。

## 2.5 综合分析

总体来看，目前的实验结果尚未确认任何暗物质粒子的存在，但各类实验的持续进展不断缩小候选粒子的参数范围，并推动研究从传统 WIMPs 模型扩展到更广泛的候选者，包括轴子、暗光子、超轻玻色子等。直接探测、间接探测、对撞机实验和新兴技术相辅相成，形成了覆盖从低质量到高质量、从粒子物理到宇宙学的全方位搜索格局。这一系列结果不仅逐步推动暗物质理论向更精准的方向发展，也促进了实验物理技术本身的跨越式提升。

## 3 讨论

暗物质的存在已在天体物理和宇宙学观测中得到广泛证实，但迄今为止，实验室环境中仍未能直接或间接地捕获到其确凿信号。前文所述的直接探测、间接探测、对撞机实验以及量子与新兴技术探索，分别代表了当下科学界在不同方向上的努力。讨论部分旨在对这些方法与结果进行系统梳理，分析它们的互补性与不足，进一步思考未来研究的突破口。

### 3.1 不同方法的互补性

首先需要明确的是，不同方法并非彼此孤立，而是共同构成了一个多维度的探测网络。直接探测关注暗物质与核子的散射作用，具有清晰的实验逻辑，但灵敏度受限于本底噪声。间接探测则利用天体物理观测寻找暗物质湮灭或衰变的产物，可以覆

盖更高能量的参数空间，但往往受到宇宙射线背景和天体物理模型的不确定性影响。对撞机实验能够直接在受控条件下测试暗物质候选粒子的产生机制，尽管缺失能量信号的解释存在多解性，但其价值在于可以探索直接和间接探测尚未覆盖的质量区间。与此同时，量子传感器、超冷原子干涉仪和光学腔等新兴技术，则有望打破传统方法在灵敏度和尺度上的限制，尤其是在极轻质量暗物质或超弱相互作用场景下展现潜力。

因此，可以将四类方法看作相互交织的探测网络：直接探测负责“地面实验窗口”，间接探测打开“天体观测窗口”，对撞机实验承担“人工创造窗口”，而新兴量子技术提供“前沿突破窗口”。只有当这些窗口的结果能够互相印证，才有可能最终锁定暗物质的真实特性。

### 3.2 实验局限与挑战

尽管全球范围内投入了巨大的人力物力，暗物质实验仍面临诸多挑战。

#### (1) 背景抑制难题

直接探测实验必须在极低本底的环境中运行。地下实验室通过厚重的屏蔽层阻挡宇宙射线，但来自地壳放射性衰变的背景事件依旧不可避免。液氙、液氩等探测器虽然在抑制背景方面取得显著进展，但当灵敏度提升到探测太阳中微子散射的水平时，就不可避免地进入所谓的“中微子底”（neutrino floor），这将成为未来几十年内直接探测的根本瓶颈。

#### (2) 信号解释的多解性

间接探测的最大困难在于宇宙射线本底的不确定性。高能伽马射线或中微子观测的过量可能既来自暗物质湮灭，也可能源于脉冲星或其他高能天体。即使在银河中心观测到异常信号，也难以排除天体物理的替代理论。这意味着间接探测必须依赖多波段、多平台联合观测，才能逐步排除背景。

#### (3) 对撞机实验的模型依赖性

LHC 等设施确实能够产生缺失能量信号，但要从推断出暗物质粒子的性质，需要强烈依赖于理论模型。相同的实验结果可能对应不同的物理解释，这导致对撞机结果往往只能给出约束范围，而难以单独确认暗物质的存在。

#### (4) 新兴技术的成熟度不足

量子传感器与超冷原子等方法虽然前景广阔，

但目前多数还停留在实验室原型阶段，距离大规模应用尚有差距。例如，干涉仪对环境噪声极为敏感，需要极端稳定的条件；光学腔和超导探测器则需要材料与制冷技术上取得进一步突破。

### 3.3 理论与实验的互动

在暗物质研究中，理论和实验的互动起着决定性作用。一方面，理论物理学为实验提供了搜索方向。无论是弱相互作用大质量粒子（WIMP）、轴子、惰性中微子还是暗光子模型，都是理论先行提出，再由实验针对性地进行探测。另一方面，实验的结果反过来推动理论的修正与发展。例如，WIMP 在数十年的实验搜索中屡次未果，推动理论物理学者将目光转向轻质量暗物质或超弱相互作用的候选者。近期的一些量子技术实验正是受到理论修正的启发。

理论与实验的互动还体现在跨学科的合作上。天体物理学的观测为理论设定了暗物质密度与分布的边界条件，粒子物理实验提供了相互作用的限制，而量子信息和凝聚态物理则贡献了全新的实验手段。这种跨领域的融合，正是未来暗物质研究取得突破的关键。

### 3.4 未来发展方向

展望未来，暗物质研究有几个值得关注的方向：

#### (1) 多信号联合分析

单一实验很难独立确认暗物质信号。未来更可行的路径是结合直接、间接和对撞机的结果，寻找彼此之间的相互印证。例如，如果间接探测发现某一能量范围的伽马射线过量，而对撞机在相应的质量区间内排除了部分模型，就可以缩小参数空间，从而指导下一步的直接探测设计。

#### (2) 进入中微子底后的创新方案

当直接探测实验到达中微子底时，如何区分中微子与暗物质信号将成为突破口。方向灵敏探测器（directional detection）被认为是潜在的解决方案，通过重建核反冲的方向来区分信号来源，从而突破传统探测的局限。

#### (3) 量子与新兴技术的工程化

未来十年内，量子干涉仪和光学腔探测器有望逐渐从实验室原型走向可扩展应用。随着量子计算和量子通信的快速发展，相关的技术积累将加速转化为暗物质实验的突破。例如，量子传感器可以通过“量子纠缠”提高灵敏度，从而在极轻质量暗物质

区间获得前所未有的优势。

#### (4) 新一代对撞机计划

目前 LHC 仍是全球最大粒子加速器,但其能量极限已经限制了暗物质研究的延展。未来的高能电子-正电子对撞机(如 FCC-ee、CEPC)或更高能量的质子-质子对撞机(FCC-hh、SPPC),有望在更宽的参数空间中寻找暗物质线索。特别是在超重候选粒子和暗部门粒子的研究上,对撞机实验仍然不可替代。

#### (5) 跨学科合作与数据共享

随着实验复杂度和规模的增加,单一团队难以独立完成。未来更可能出现国际合作的大型联合体。例如,暗能量巡天(DES)、平方公里阵列(SKA)等天文项目,与地下直接探测实验或量子实验平台实现数据共享,将形成真正意义上的全球暗物质探测网络。

### 3.5 综合反思

在经历数十年的探索后,暗物质研究正处于关键转折点。一方面,传统的 WIMP 假设已经受到严峻挑战;另一方面,新兴的理论与技术不断涌现,为研究开辟了新的方向。当前的实验结果虽然尚未找到确凿证据,但已经极大地压缩了暗物质可能的参数空间。这种“排除式的进展”同样具有重要意义,它帮助科学界避免在无效区域内投入过多资源,同时推动理论的不修正。

更为重要的是,暗物质问题的研究价值已远超粒子物理本身。它不仅关系到宇宙的基本构成与演化,也可能为人类带来新的物理学范式。正如量子力学和相对论在上世纪改变了科学的整体格局,暗物质研究也有可能成为 21 世纪基础科学的核心突破口。

### 4 小结

综上所述,直接探测、间接探测、对撞机实验以及量子与新兴技术在暗物质研究中各有优势与局限,它们的互补性决定了未来研究必须采取多方法并行的策略。实验结果虽然尚未锁定候选粒子,但通过不断排除与修正,科学界正在逐步逼近暗物质的真实面貌。未来的发展方向将聚焦于跨学科合作、技术创新与多信号联合分析。可以预期,暗物质探测之路虽然艰难,但每一次实验结果都在为最终的发现积累基石。

## 5 结论

暗物质作为现代宇宙学与粒子物理学最重要的前沿问题之一,其研究已经进入到一个由理论与实验共同驱动的关键阶段。经过数十年的努力,科学界在直接探测、间接探测、对撞机实验以及量子与新兴技术探索等方面均取得了具有代表性的结果。这些成果虽尚未导致暗物质的直接发现,但已经深刻地塑造了对暗物质性质的理解,推动了实验技术和理论模型的持续发展。

首先,在直接探测方面,实验灵敏度的提升已经将暗物质与普通物质相互作用截面的上限大幅降低。低本底实验室建设、深冷探测器应用、多靶核策略的引入,使得直接探测实验能够覆盖更大范围的参数空间。虽然当前尚未观察到确凿信号,但一系列“排除区”不断压缩理论模型的自由度,促使研究者对 WIMP、轴子以及其他轻暗物质候选体进行更为精细的参数修正。这一结果说明,未来暗物质的探测可能需要跳出传统的理论框架,转而拥抱更为多样化的模型设想。

其次,在间接探测方面,天文观测与高能物理手段相结合,为暗物质研究提供了新的线索。伽马射线望远镜、宇宙线探测器和中微子观测实验陆续报告了部分异常信号,例如银河系中心的高能辐射过剩现象。然而,这些信号大多存在天体物理解释的可能性,使得其真实性仍存争议。尽管如此,这些观测为研究者提供了数据积累和方法验证的机会,也推动了基于多信号联合分析的研究路径。间接探测的结果表明,暗物质研究不应局限于单一渠道,而需要在全球范围内推动跨实验、跨学科的合作。

第三,在对撞机实验方面,高能物理设施的快速发展为人工生成暗物质开辟了新思路。尽管目前在 LHC 等对撞机实验中尚未发现确定性的暗物质迹象,但“缺失横动量”事件的搜寻不断刷新约束条件。相关结果不仅排除了部分超对称理论的参数区间,同时也为其他模型(如隐藏规范力学、复合暗物质模型等)的提出与发展提供了动力。随着未来更高能量、更高亮度对撞机的规划逐步推进,对撞机实验仍将是验证暗物质存在性与性质的重要平台。

第四,在量子与新兴技术方面,新型方法的应用已经展现出突破传统瓶颈的潜力。基于量子传感器的超高灵敏度测量、低温探测器的噪声抑制能力、

以及利用中微子和引力波探测平台开展的跨领域实验,均在近年取得了初步成果。虽然这些方法尚处于发展阶段,但它们为暗物质研究开辟了全新方向,有望在未来成为直接证认暗物质的关键手段。可以预见,随着量子计算、量子通信等相关领域的进一步成熟,这些新兴方法将与传统实验形成互补,构建更为完整的研究体系。

综合而言,多种方法的研究结果虽未带来决定性发现,却显著推动了暗物质研究的纵深发展。直接探测不断缩小候选粒子的生存空间,间接探测提供了可能的天体物理信号,对撞机实验不断刷新理论模型的约束,而量子与新兴技术则开辟了新的可能性。这种多元并行的研究格局,使得暗物质问题不再仅仅依赖单一实验,而逐渐演化为跨学科、跨尺度、跨技术平台的系统性探索。

展望未来,暗物质研究的发展方向主要体现在以下几个方面:其一,更大规模的国际合作与实验协同将成为趋势,以实现观测数据的共享和交叉验证;其二,跨学科的融合研究将日益重要,尤其是将天文学、粒子物理、量子技术和人工智能算法有机结合;其三,未来的新型实验装置(如下一代深地实验室、未来环形对撞机、空间高能探测卫星等)有望在更大范围内探索暗物质的可能性。最终,随着理论与实验的不断互动,人类或将在不久的将来揭开暗物质的面纱,从而在宇宙学和基本物理学中实现新的突破。

综上所述,暗物质研究虽然仍处于探索阶段,但已经从“寻找证据”逐步过渡到“系统验证与跨学科创新”的新阶段。未来的发展不仅有望回答“暗物质是什么”的根本问题,更将深刻影响我们对宇宙起源、结构演化乃至自然规律的整体认知。这既是现代科学最艰难的挑战之一,也是最具潜力的突破口之一。

### 参考文献

- [1] 王敏.科学家利用量子精密测量技术创造暗物质探测纪录[N].中国科学报,2024-11-15(001).
- [2] 许武龙.自相互作用暗物质及其相关研究[D].北京工业大学,2024.
- [3] 郭学康.基于中微子观测的超重暗物质搜寻与研究[D].广西大学,2024.
- [4] 吕宜霏.基于邻近星系的中微子观测的暗物质搜寻研究[D].广西大学,2024.
- [5] 李军.基于 LHAASO 数据的暗物质信号搜寻[D].中国科学技术大学,2024.
- [6] 云在.通过极化核子探测暗物质的非弹性特征[D].烟台大学,2024.
- [7] 杨颖慧.基于量子精密磁测量的暗物质搜寻技术[D].中国科学技术大学,2024.
- [8] 苏昊文.基于自旋量子放大器的暗物质实验研究[D].中国科学技术大学,2023.
- [9] 赵一心,刘曦屿,于东睿,等.原子磁力仪在异常作用力及类轴子暗物质探测中的应用[J].计测技术,2023,43(04):1-14.
- [10] 江通.引力波波源定位、暗物质环境探测及 Brans-Dicke 理论检验的研究[D].华中科技大学,2023.
- [11] 赵凌波.交变强磁场中的轴子暗物质电磁响应研究[D].东华大学,2023.
- [12] 敬雅冉.用于下一代暗物质粒子探测卫星中塑闪阵列探测器的前端读出 ASIC 关键技术研究[D].中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所),2022.
- [13] 赵伟.基于原子干涉仪的超轻标量和矢量暗物质探测方案研究[D].中国科学院大学(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院),2022.
- [14] 李任明杰.高纯锗暗物质实验中超快体事例本底的研究与甄别[D].四川大学,2022.
- [15] 苏亮亮.轻暗物质的直接探测[D].南京师范大学,2022.
- [16] 黄沛尧.PandaX-30T 暗物质探测器用超高纯氦氙低温精馏系统设计与优化分析[D].上海交通大学,2022.
- [17] 戴皓珽.暗物质粒子探测卫星实验上利用地磁效应测量空间正负电子能谱[D].中国科学技术大学,2022.
- [18] Razeto A, Rossi N. Challenges for dark matter direct search with SiPMs[J]. Frontiers in Physics, 2024, 11.
- [19] Yu L, 钰刘, Lei Z, et al. Cryogenic phonon-detector model with solid argon for detecting dark matter[J]. Chinese Physics C, 2023, 47(12):
- [20] Singh M R, Dongming M, Sanjay B, et al. Development of Low-Threshold Detectors for Low-Mass Dark Matter

- Searches with a p-Type Germanium Detector Operated at Cryogenic Temperature[J].Journal of Low Temperature Physics,2023,212(3-4):138-152.
- [21] Hyelim K ,Hamb Y K ,Rae K W . Cryogenic particle detection based on magnetic microcalorimeters for rare event searches[J].The European Physical Journal Plus,2023,138(6):
- [22] Holland E S . Fully depleted charge - coupled device design and technology development[J].Astronomische Nachrichten,2023,344(8-9):
- [23] E. M T ,A. C T ,M. W C , et al. Comparing Instrument Spectral Sensitivity of Dissimilar Electromagnetic Haloscopes to Axion Dark Matter and High Frequency Gravitational Waves[J].Symmetry,2022,14(10):2165-2165.
- [24] Marco G . Particle detection in rare gas solid crystals: a feasibility experimental study—exploring new ways for dark matter searches[J].The European Physical Journal Plus,2022,137(6):
- [25] Yonatan K ,Tongyan L . Searches for light dark matter using condensed matter systems.[J].Reports on progress in physics. Physical Society (Great Britain),2022,85(6):
- 版权声明：**©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**