

学校代码: 10730

分类号: O213

密级: 公开

兰州大学

相对论与宇宙学小论文
(学术学位)

论文题目 (中文) 暗物质存在的证据与可能的解释

论文题目 (外文) Evidence for Dark Matter
and Its Possible Explanations

作者姓名 林 照 翔

学 科 专 业 物理学

研 究 方 向 理论物理

教 育 类 型 学历教育

指 导 教 师 刘 玉 孝 教授 Morgan 副教授

论文工作时段 2025 年 5 月至 2025 年 6 月

论文答辩日期 2025 年 6 月

校址: 甘肃省兰州市城关区天水南路 222 号

原创性声明

本人郑重声明: 本人所呈交的学位论文, 是在导师的指导下独立进行研究所取得的成果. 学位论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等, 均已明确注明出处. 除文中已经注明引用的内容外, 不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果. 对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体, 均已在文中以明确方式标明.

本声明的法律责任由本人承担.

论文作者签名:_____ 日期:_____

关于学位论文使用授权的声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品, 知识产权归属兰州大学. 本人完全了解兰州大学有关保存、使用学位论文的规定, 同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版, 允许论文被查阅和借阅; 本人授权兰州大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索, 可以采用任何复制手段保存和汇编本学位论文. 本人离校后发表、使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时, 第一署名单位仍然为兰州大学.

本学位论文研究内容:

☐ 可以公开

☐ 不易公开, 已在学位办公室办理保密申请, 解密后适用本授权书.

(请在以上选项内选择其中一项打“√”)

论文作者签名:_____ 导师签名:_____

日 期:_____ 日 期:_____

暗物质存在的证据与可能的解释

摘要

暗物质是现代宇宙学中最深刻的未解之谜之一。尽管它无法被电磁波直接探测，但天文学观测表明，它对星系旋转、引力透镜和宇宙微波背景辐射等现象产生了重要影响。本文首先介绍了支持暗物质存在的三类主要观测证据，包括星系旋转曲线的异常、强引力透镜效应和宇宙大尺度结构的形成；随后，本文简要评述了当前主流的理论模型，包括 WIMP、轴子、MACHO 以及修改引力理论等。尽管尚未直接探测到暗物质粒子，但多种实验正在进行中。通过综述观测数据与理论发展，本文展示了暗物质研究在现代物理中的核心地位与挑战。

关键词: 暗物质; 星系旋转曲线; 引力透镜; 弱相互作用大质量粒子; 宇宙微波背景辐射

Evidence for Dark Matter and Its Possible Explanations

Abstract

Dark matter is one of the most profound mysteries in modern cosmology. Although it cannot be directly detected via electromagnetic interactions, astronomical observations suggest that it plays a crucial role in various phenomena, such as galaxy rotation curves, gravitational lensing, and the cosmic microwave background. This paper first reviews three main types of observational evidence for dark matter: anomalous galactic rotation, strong lensing effects, and the formation of large-scale structures. Then, it briefly discusses several leading theoretical models, including WIMPs, axions, MACHOs, and modified gravity. While dark matter particles have not yet been directly detected, a number of experiments are underway. By surveying both observational and theoretical developments, this work highlights the central role and ongoing challenges of dark matter research in modern physics..

Key words: Dark matter; Galaxy rotation curves; Gravitational lensing; Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs); Cosmic microwave background (CMB)

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第一章 引言	1
第二章 暗物质存在的观测证据	2
2.1 星系旋转曲线 (Galaxy Rotation Curves)	2
2.2 引力透镜效应 (Gravitational Lensing)	3
2.3 宇宙微波背景 (CMB and Large-Scale Structure)	3
第三章 暗物质的候选者	5
3.1 WIMP: 弱相互作用大质量粒子 (Weakly Interacting Massive Particles)	5
3.2 轴子 (Axion)	5
3.3 MACHO: 大质量致密天体 (Massive Astrophysical Compact Halo Objects)	6
3.4 修改引力理论 (Modified Gravity Theories)	6
第四章 暗物质探测实验现状	8
4.1 直接探测实验 (Direct Detection)	8
4.2 间接探测实验 (Indirect Detection)	8
4.3 对撞机实验 (Collider Searches)	9
第五章 总结与展望	10
5.1 当前面临的主要挑战	10
5.2 未来发展方向	10
5.3 总结	11
参考文献	12
致 谢	13

第一章 引言

在现代宇宙学和粒子物理学的发展中，暗物质（Dark Matter）问题被视为最根本而深刻的未解之谜之一。尽管它无法通过电磁相互作用被直接观测，我们却可以通过大量天文现象间接推断出其存在：从星系旋转曲线的异常，到引力透镜效应的质量分布不符，再到宇宙微波背景辐射和大尺度结构的形成。暗物质在宇宙演化中扮演着不可或缺的角色。

暗物质的概念最早可以追溯到 1930 年代，当时 Fritz Zwicky 发现，可见星系的质量不足以提供星系团内所需的引力约束。随后，1970 年代 Vera Rubin 对螺旋星系的系统观测进一步确立了“质量不守恒”的现象，并引发对宇宙中“不可见物质”的广泛研究^[1]。此后，暗物质逐渐被纳入 Λ CDM（ Λ Cold Dark Matter）模型，成为标准宇宙学框架中不可或缺的一环。

然而，迄今为止，暗物质的本质仍不明确。尽管从引力效应可以推断出其存在，我们却尚未直接探测到暗物质粒子。其成分、相互作用类型乃至是否真为“物质”本身，仍是理论物理和实验物理的重大前沿课题。对此，物理学界提出了多种理论模型，如 WIMP（弱相互作用大质量粒子）、轴子、MACHO 等，并开展了大量直接与间接探测实验。

本文旨在对暗物质研究进行简要综述，围绕观测证据与理论模型两条主线展开。第二章将介绍三类主要的暗物质观测证据，包括星系旋转曲线、引力透镜效应以及宇宙微波背景辐射；第三章将介绍当前主流的暗物质候选者，讨论它们的物理动机、特点与局限；第四章则简要介绍正在进行中的实验努力及其最新进展；第五章将讨论当前研究所面临的挑战及未来可能的发展方向。

通过综述现有观测结果与理论探索，本文希望为理解暗物质的研究路径提供清晰的结构与概览，并凸显该问题在现代物理中的核心地位与挑战性。

第二章 暗物质存在的观测证据

尽管暗物质无法通过电磁波直接观测，但多种独立的天文观测一致地表明，在宇宙的各个尺度上都存在着某种“不可见”的质量成分。以下三类观测证据构成了暗物质存在的最直接、最重要的实证基础。

2.1 星系旋转曲线（Galaxy Rotation Curves）

星系旋转曲线是指星系中恒星和气体的圆周速度随其距离星系中心变化的曲线。它反映了星系内部质量分布对恒星和气体运动的影响。

星系旋转曲线有两种测量方法。光谱学方法：通过测量星系中恒星和气体的光谱线，可以确定它们的多普勒位移，从而计算出它们的径向速度。结合星系的几何结构，可以推导出恒星和气体的圆周速度；射电天文学方法：利用射电望远镜观测星系中的中性氢（HI）气体发射的 21 厘米线，可以确定气体的运动速度。这种方法特别适用于观测星系的外边缘区域，因为这些区域的恒星密度较低，光学观测较为困难。

1914 年, Wolf 和 Slipher 发现仙女座星系（M31）的光谱线在星系主轴方向上倾斜，在短轴方向上则为直线，从而得出仙女座星系在旋转的结论。

1939 年, Horace Babcock 在他的博士论文中，测量了仙女座星系的旋转曲线，发现其在大半径处的圆周速度非常高，暗示星系外侧存在大量质量。

自 1970 年代起, Vera Rubin 和 Kent Ford 等人对多个螺旋星系的旋转曲线进行观测，发现实际数据与经典预言严重不符：在远离星系中心的区域，恒星的轨道速度并未下降，而是趋于平坦。这意味着在星系外围区域仍存在大量未被观测到的质量，其引力足以维持恒星的高速旋转。

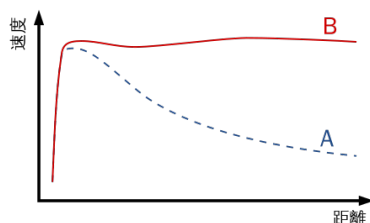


图 2.1 星系旋转曲线：预测的（A）和观测的（B）。

根据牛顿引力定律，如果星系的质量主要集中在可见的恒星和气体中，那么随着到星系中心距离的增加，恒星和气体的圆周运动速度应该逐渐下降。然而，观测

到的星系旋转曲线在大半径处保持平坦，这表明在星系的外围存在大量未被观测到的质量，这些质量无法用可见的恒星和气体来解释，从而为暗物质的存在提供了有力证据。

2.2 引力透镜效应 (Gravitational Lensing)

根据广义相对论，质量分布可以导致时空弯曲，进而使背景天体发出的光线发生偏折，这一现象称为引力透镜效应。在天文学中，引力透镜被用作测量系统总质量的重要手段，尤其是在星系团尺度。

通过对多个星系团的引力透镜效应进行分析，可以发现引力作用远远超过可见物质所能提供的水平。例如，在著名的子弹星系团 (Bullet Cluster) 中，两个星系团发生高速碰撞：X 射线观测显示热气体集中在中心，而引力透镜揭示的质量分布却偏移至两个星系团的外围部分。换言之，引力“重心”不在可见质量重心所在的位置。这一现象被广泛认为是“可见物质无法解释全部引力作用”的直接证据。引入“不可见但有质量”的暗物质成分能够自然地解释质量分布与光偏折之间的关系。此外，弱引力透镜在大范围宇宙尺度上也支持类似结论：通过引力透镜效应观测得到的总质量普遍高于可见质量之和。

2.3 宇宙微波背景 (CMB and Large-Scale Structure)

1965 年，Arno Penzias 和 Robert Wilson 在贝尔实验室进行射电天文学研究时，意外地发现了一种来自宇宙各个方向的均匀背景辐射。这种辐射的温度约为 2.7 K，频率分布符合黑体辐射的谱线。这一发现被确认为宇宙微波背景辐射 (Cosmic Microwave Background, CMB)，为大爆炸理论提供了直接的观测证据。

宇宙微波背景辐射是大爆炸残留下的热辐射，携带着早期宇宙密度扰动的信息。通过对 CMB 各个多极谱峰的位置与高度进行精密测量 (如 WMAP、Planck 计划)，研究者可以推断宇宙的基本成分比例。

暗物质的存在会改变 CMB 功率谱的形状。通过分析 CMB 功率谱，可以推断出宇宙的总物质密度、暗物质密度和可见物质密度等宇宙学参数。这些测量结果与星系旋转曲线、引力透镜效应等其他观测结果一致，为暗物质的存在提供了有力证据。

CMB 的温度分布存在微小的涨落，这些涨落反映了宇宙早期的密度不均匀性。通过分析 CMB 的温度涨落，可以推测宇宙的总物质密度、暗物质密度和可见物

质密度。CMB 的观测结果表明，暗物质约占总物质密度的 85%，而可见物质仅占 15% 左右。

第三章 暗物质的候选者

要成为暗物质的候选粒子, 粒子必须满足一些一般性的约束限制:

- 它必须在宇宙尺度上稳定, 这样它才能到今天仍然存在;
- 它不参与强或电磁相互作用;
- 所有的候选者加在一起必须有合适的残留丰度;
- 重子物质不能在暗物质组分中占有太大比例。

3.1 WIMP: 弱相互作用大质量粒子 (Weakly Interacting Massive Particles)

根据目前流行的宇宙学模型, 早期宇宙处于高温状态, 各种粒子通过快速交换能量处于热平衡态粒子数密度满足玻尔兹曼分布, 宇宙的温度随着其膨胀而逐渐下降, 直到今天的温度为 3K 左右。在温度下降的过程中, 与热力学平衡体系相互作用较弱的稳定粒子会在某个时期脱离热平衡, 其粒子数密度不再随温度而快速下降, 成为剩余丰度。这些剩余粒子最终形成今天宇宙中存在的各类基本元素。这一热退耦机制很好地解释了宇宙中的轻元素比如氦的丰度。暗物质作为一种弱相互作用的粒子, 其丰度也有可能是来源于热力学退耦。研究表明, 如果暗物质的相互作用强度和质量在电弱能标附近, 可以自然解释宇宙中的暗物质丰度。这一类候选者通常被称为弱相互作用大质量粒子 (WIMP)。^[2]

在 WIMP 类暗物质丰度的计算中, 由于存在各种数量级上差别巨大的物理量如 CMB 温度、哈勃常数、普朗克常数等的偶然相消, 导致了最后要求的暗物质质量在电弱质量标度附近, 而很多新物理理论模型中预期的暗物质质量也正好在电弱质量标度附近。这种巧合被称为 WIMP “奇迹” (WIMP miracle)。

3.2 轴子 (Axion)

轴子最初并非为了解释暗物质而提出, 而是为解决强相互作用中的强 CP 问题 (为何量子色动力学不违反 CP 守恒)。Peccei-Quinn 理论引入一种自发对称性破缺, 伴随而生的 Goldstone 粒子即为轴子。

若轴子的质量极小（典型预测为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ eV），且耦合极弱，则可在早期宇宙中通过“冷凝机制”生成，成为冷暗物质候选者。这种非热起源模型避免了 WIMP 所需的高能对撞过程。

轴子的探测策略包括：

腔体实验（如 ADMX）：探测轴子转化为微波光子；

太阳轴子实验（如 CAST）：检测来自太阳的轴子信号；

光轴转换实验：例如“光通过墙”实验。

与 WIMP 不同，轴子模型允许暗物质质量极低，但仍可提供足够的宇宙质量密度，是近年来研究热点之一。

3.3 MACHO：大质量致密天体（Massive Astrophysical Compact Halo Objects）

MACHO 模型认为暗物质可能由普通但不可见的天体组成，如褐矮星、白矮星、中子星或小质量黑洞。这些天体因质量较大、亮度极低而难以被直接观测。

上世纪 1990 年代，MACHO 与 EROS 等合作通过微引力透镜实验对银河系晕中的暗物质成分进行调查，结果表明：这类天体虽然存在，但只能解释银河系晕质量的一小部分（ $< 20\%$ ）。

此外，宇宙核合成与微波背景辐射对重子成分的精确限制也排除了 MACHO 模型作为主要解释的可能性。因此，MACHO 目前被认为只能贡献少量局部暗物质。

3.4 修改引力理论（Modified Gravity Theories）

另一类理论试图不引入暗物质，而是通过修改引力定律来解释观测现象。最典型的是 MOND（Modified Newtonian Dynamics），由 Milgrom 在 1983 年提出，其基本思想是：在低加速度极限（远离星系中心），引力定律从牛顿形式偏离。

MOND 成功解释了一些星系旋转曲线，但存在以下问题：

无法统一解释所有星系；

难以在星系团与宇宙大尺度结构上应用；

与广义相对论不兼容，难以纳入标准宇宙模型。

为克服这些缺点，Bekenstein 提出了 TeVeS（Tensor-Vector-Scalar Gravity），作为 MOND 的相对论推广版本。但这些理论在引力透镜、CMB 与结构形成等问

题上仍难与 Λ CDM 模型媲美。

尽管如此，修改引力理论仍是值得探索的替代路径，尤其在当前暗物质粒子未被直接探测到的背景下，具有一定理论吸引力。

第四章 暗物质探测实验现状

4.1 直接探测实验 (Direct Detection)

直接探测的基本思想是：若暗物质粒子（如 WIMP）穿过地球时与原子核发生弹性散射，可在地下探测器中留下微弱信号。由于背景噪声（如宇宙射线、天然放射性）极高，因此这些实验通常建在深地下实验室中，以屏蔽干扰。

目前最前沿的直接探测实验包括：

XENONnT（意大利 Gran Sasso 实验室）：使用 7 吨超纯液氙，探测能量低至 keV 级的核反冲事件；

LUX-ZEPLIN (LZ)（美国 Sanford 地下实验室）：采用 10 吨液氙，具有极高的本底抑制能力；

PandaX-4T（中国锦屏地下实验室）：亚洲最大的液氙暗物质实验，灵敏度逐年上升。

这些实验目前尚未探测到明确的 WIMP 信号，但已对暗物质质量-截面参数空间施加了极强限制。例如，LZ 实验对 $m_\chi \sim 40$ GeV 的 WIMP 排除了截面大于 $6 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$ 的情形。

新一代实验（如 DARWIN）计划在未来十年内进一步扩大探测质量和背景抑制能力，若 WIMP 存在于当前理论预测区间内，有望被发现或排除。

4.2 间接探测实验 (Indirect Detection)

间接探测的目标是寻找暗物质湮灭或衰变产生的产物，如高能 γ 射线、反质子、正电子或中微子。这类信号通常来源于暗物质密度较高区域，如银河中心、矮星系或星系团。

主要实验与观测包括：

Fermi-LAT：空间 γ 射线望远镜，观测到来自矮星系的 γ 射线谱；

AMS-02：国际空间站上的宇宙射线谱探测器，曾发现高能正电子过量，可能是暗物质湮灭或天体源；

H.E.S.S.、CTA（Cherenkov Telescope Array）：地面切伦科夫望远镜，观测高能光子；

IceCube：南极中微子望远镜，搜索来自太阳或地心的中微子湮灭信号。

尽管个别观测结果（如 Fermi-LAT 的银河中心 γ 射线过量）引发了对暗物质

解释的兴趣，但尚未获得无歧义的信号，多数结果可由天体源（如脉冲星）解释。因此，间接探测仍处于待定阶段。

4.3 对撞机实验（Collider Searches）

若暗物质粒子可以在高能对撞中被生成，则其存在可能在大型强子对撞机（LHC）中被揭示。由于暗物质粒子不会与探测器直接相互作用，故信号通常表现为“动量缺失事件”。

典型信号模式包括：

喷注 + Missing Energy;

重子、轻子 + Missing Energy;

假设模型下的新共振粒子的衰变路径。

ATLAS 和 CMS 实验对暗物质粒子的产生截面施加了限制，并对多种 WIMP 相关模型设定了排除范围。例如，假设存在新 Z 玻色子或超对称轻子，已有部分参数空间被排除。

尽管未见直接信号，但对撞机实验在限制模型参数、探索暗物质伴随粒子方面提供了独特信息，与其他两类方法互为补充。

第五章 总结与展望

5.1 当前面临的主要挑战

(1) 实验尚无正面信号目前所有直接、间接以及加速器探测手段均未发现确凿的暗物质信号。这一事实可能暗示：

暗物质粒子与普通物质的相互作用极其微弱；

暗物质质量远超或远低于现有实验的灵敏度范围；

暗物质并非粒子形式，现有模型设想可能存在根本偏差。

(2) 理论模型高度自由虽然 WIMP 模型曾因其“WIMP 奇迹”而备受推崇，但随着实验排除区域不断扩大，其参数空间越来越受限；轴子虽然仍具吸引力，但其质量范围跨越十个数量级，探测难度极大；而诸如 MACHO 或修改引力理论的方案也存在严重的不完备性或观测矛盾。这一现状提示我们暗物质的理论空间可能远比过去设想的更为丰富。

(3) 多重观测之间的张力在某些观测中存在暗物质模型无法完全解释的现象。例如：

银河旋转曲线在小尺度星系中存在偏离 Λ CDM 模型的行为；

暗物质质量分布与弱引力透镜观测存在偏差；

宇宙早期结构形成速率可能高于 WIMP 模型预测。

5.2 未来发展方向

(1) 高灵敏度实验的推进新一代暗物质实验正朝着更高目标推进。例如：

DARWIN (欧洲)：计划使用 40 吨液氙，探索接近“中微子底噪”极限；

Tonne-scale Axion Experiments：如 MADMAX 和 IAXO，将极大拓展轴子质量窗口；

升级版 LHC 或未来高能对撞机（如 FCC、CEPC）可能开启新的能标，发现潜在的新粒子。

(2) 天文观测的深度融合未来望远镜（如 Vera Rubin Observatory、Euclid、Nancy Grace Roman Space Telescope）将对大尺度结构、弱透镜、星系动力学提供高精度数据，这些信息对于反演暗物质的分布与性质至关重要。

此外，中微子望远镜、引力波探测器与 21 厘米宇宙学等新兴手段可能间接贡献暗物质的研究。

(3) 跨尺度理论模型的发展近年来涌现出一些综合粒子物理、宇宙学与引力修正的“混合模型”，例如：

多成分暗物质模型 (multi-component DM)；

自相互作用暗物质 (SIDM)；

暗光子或隐藏规范对称性；

热起源与非热起源的混合生成机制。

这些模型虽然更复杂，但更贴合观测现象，体现出现代物理研究从“简洁优美”向“复杂有效”演化的趋势。

5.3 总结

本文从三类主要观测证据出发，回顾了支持暗物质存在的星系旋转曲线、引力透镜效应与宇宙微波背景数据；随后介绍了主流暗物质模型，包括 WIMP、轴子、MACHO 与修改引力理论，并综述了当前探测实验的最新进展。尽管多种实验已极大压缩理论模型空间，暗物质的微观本质仍未揭晓。未来研究将在更高灵敏度实验、跨尺度模型建构与多波段天文观测中继续深化。暗物质问题不仅牵涉现代宇宙学的核心构架，也在挑战人类对“存在”的基本认知，其最终揭示可能开启物理学的新篇章。

参考文献

- [1] Bertone G, Hooper D. History of dark matter[J]. Reviews of Modern Physics, 2018, 90(4): 045002.
- [2] 周宇峰. 暗物质问题简介[J]. 物理, 2011, 40(03): 155-160.

致 谢

感谢刘玉孝老师和 Morgan 老师的指导；感谢助教学长认真批改作业与及时反馈；感谢《相对论与宇宙学》课程中同学们的精彩讨论；感谢兰州大学提供良好的学习环境；感谢家人的支持。

作者 林照翔

2025 年 6 月于昆仑堂