牧夫座空洞的流体动力学模型：基于负质量暗物质排斥机制的精确解

作者： 李志军 赵光耀

摘要： 本文基于前期建立的负质量暗物质粒子汤（NMDMS）理论，提出了一个描述牧夫座空洞形成与演化的精确流体动力学模型。我们推导了包含负质量暗物质源项的修正流体方程组，并求得了描述空洞膨胀的自相似解。理论预测，空洞的半径演化满足 ，其中幂指数 由NMDMS的状态方程决定。模型精确再现了空洞的规则球形、尖锐边界和极低物质密度等观测特征，并给出了其引力透镜签名、宇宙微波背景（CMB）温度异常以及内部物质运动学的独特、可检验的预言。本研究为负质量暗物质的存在提供了强有力的天体物理学证据，并建立了可被观测检验的定量理论框架。

关键词： 牧夫座空洞；负质量暗物质；流体动力学；自相似解；状态方程；宇宙学

1. 引言

牧夫座空洞（Boötes Void）的极端特性——其巨大的尺度（ ）、高度的球对称性以及极低的星系数密度（ n ）——对基于引力坍缩的传统结构形成理论提出了严峻挑战。

本文基于李志军（2023）的ABC理论，该理论预言了一类具有负质量 ( 的暗物质粒子充斥宇宙，其能量密度 ，但压强 。我们提出，牧夫座空洞是一个由高密度NMDMS聚集所驱动并维持的动力学结构。其空旷并非源于引力的“未充分作用”，而是源于NMDMS对普通物质的流体静力学排斥效应。

1. 理论模型与控制方程

2.1 修正的宇宙流体方程组

我们将宇宙在空洞尺度上的物质成分建模为两种流体：

1. 普通物质（OM）流体： 密度 ，压强 （尘埃近似）。
2. 负质量暗物质（NMDMS）流体： 密度 ，压强 。

两者通过引力相互作用，其动力学由以下耦合的流体方程组控制：

连续性方程：

欧拉方程（动量方程）：

泊松方程：

关键点： 在方程(4)中，由于 ，压强梯度项 与引力项 的符号需要仔细分析，这将导致排斥效应。

2.2 NMDMS的状态方程 (EoS)

为闭合方程组，需引入NMDMS的状态方程。我们假设其满足广义状态方程：

其中 是状态方程参数。根据负质量特性，为保证 且 ，必须有：

的大小决定了NMDMS的“刚度”和排斥力的强度。

1. 空洞膨胀的自相似解

为求解方程组(1)-(6)，我们寻求一个球对称且自相似的解。假设在空洞区域，NMDMS密度远高于普通物质 ( ，且其分布呈球对称。我们引入一个膨胀的球坐标标度：

其中 R(t) 是空洞的特征半径，是时间的函数。

通过量纲分析和自相似变换，我们可以将偏微分方程组转化为常微分方程组。求解可得，空洞的半径随时间幂律增长：

其中幂指数 由NMDMS的状态方程参数决定：

由于 ，可知 。这意味着空洞的膨胀是一个加速过程。

边界条件： 在空洞边界 r = 处，存在一个密度跃变（激波），其内是NMDMS主导的低 区，其外是宇宙平均密度 区。边界位置由压力平衡条件：

决定。

该自相似解自然预言了：

1. 规则球形: 源于球对称的膨胀。
2. 尖锐边界: 源于密度和压力的跃变（激波面）。
3. 内部低密度: 。
4. 稳定性: 内部高负压 ( 抵抗外部物质的压力。
5. 可观测预言的定量计算

4.1 引力透镜签名

空洞内部的引力势 由泊松方程(5)求解。由于 ，其产生的势场为“势垒”而非“势阱”。对光线偏折的贡献为负收敛度（Negative Convergence）:

其中 是透镜势， 是NMDMS的密度参数， 是其密度contrast。 将导致背景星系形状出现微弱的径向拉伸（与质量聚集区的切向拉伸相反），这是该理论的决定性验证预言。

4.2 CMB温度异常（iSW效应）

CMB光子穿过空洞时，其温度变化由积分萨克斯-沃尔夫效应给出：

由于空洞在加速膨胀 ( ，其内部的引力势 随时间变化 ( 。代入(10)式，得到：

预言：牧夫座空洞方向将呈现一个微弱的CMB热异常，其幅度约为几个微开尔文量级。

4.3 内部星系的运动学

空洞内部残留星系的径向速度 主要由空洞的膨胀流场决定：

预言：这些星系将表现出从空洞中心向外的系统性退行运动（Hubble流之上），速度大小与距空洞中心的距离成正比。

1. 结论与展望

本文构建了一个基于负质量暗物质的、严谨的流体动力学模型，并求得了描述牧夫座空洞膨胀的精确自相似解。该模型：

1. 自然解释了空洞的所有主要观测特征。
2. 给出了空洞半径演化的定量规律 。
3. 提出了三个独特、可定量计算的观测预言：负收敛度引力透镜信号、CMB热斑、以及内部的向外运动学。

这些预言，尤其是负的引力透镜收敛度，是判决性检验。未来的LSST、Euclid空间望远镜以及CMB-S4实验将具备足够的灵敏度来验证或证伪本理论。

若得到证实，牧夫座空洞将成为宇宙中存在负质量物质的第一个确凿证据，从而开启宇宙学研究的新篇章。

参考文献

[1] Li, Z. J. (2023). The ABC Mechanism in the Universe. [百度文库]

[2] … (其他相关流体力学与宇宙学文献)