负质量暗物质的引力束缚态与“暗洞”的形成：基于ABC理论的拓扑凝聚模型

作者： 李志军，赵光耀

摘要：  
本文基于李志军ABC理论，首次系统地提出了负质量暗物质（NMDM）在特定条件下形成宏观量子束缚态——“暗洞”（Dark Void）的理论模型。与普通物质形成的黑洞（正质量，引力吸引）不同，暗洞由负质量暗物质粒子通过其排斥性引力的某种自组织机制形成，表现为一个稳定的、具有宏观量子特性的低密度真空区域。核心论点为：在宇宙学尺度下，负质量暗物质可通过其与希格斯场 真空的特定耦合，发生拓扑相变，形成一种反束缚态。该态的能量密度低于周围时空的平均值，形成一个引力势阱（但符号相反）。我们构建了描述负质量物质引力相互作用的修正爱因斯坦场方程，推导了暗洞形成的临界条件，给出了其稳定性的拓扑判据，并计算了其独特的引力透镜与宇宙学信号。该模型预言了一类全新的天体，为探测负质量暗物质提供了可检验的观测窗口。

关键词： 负质量暗物质；暗洞；拓扑凝聚；排斥引力；修正场方程；ABC理论；宇宙学探针

1. **引言：负质量暗物质的宇宙学困境与新范式**

1.1 负质量暗物质的特性

根据李志军ABC理论，负质量暗物质（NMDM）与普通物质（OM）的唯一区别在于其耦合的希格斯场真空符号相反：

* 普通物质（OM）： 耦合于 真空， ，产生吸引性引力。
* 负质量暗物质（NMDM）： 耦合于 真空， ，产生排斥性引力（其应力-能量张量 导致测地线偏离）。

1.2 形成“暗洞”的物理直觉

正质量物质在自引力下坍缩形成黑洞（高密度，强吸引）。那么，负质量物质在其“自斥力”下，会如何演化？

直觉上，排斥力应导致物质扩散。然而，在一定条件下，自排斥系统可以通过与背景场的相互作用达到一种平衡，形成稳定的低密度结构。这类似于玻色子排斥相互作用导致的空间分布均匀化，但发生在引力层面。

我们将这种由NMDM形成的、具有清晰边界和内部结构的稳定态称为 “暗洞”（Dark Void） 。

1. **理论框架：负质量物质的引力与场方程**

2.1 修正的爱因斯坦场方程

包含负质量暗物质时，总应力-能量张量为：

其中 的迹 。

爱因斯坦场方程保持不变：

但由于 的分量符号特殊，会导致独特的几何效应。

2.2 负质量物质的流体力学方程

将NMDM视为理想流体，其能量-动量张量为：

其中 。状态方程假设为 。

由能动量守恒 ，在牛顿极限下，可得修正的泊松方程：

由于 ，NMDM贡献负的引力势源项，等效于产生排斥力。

2.3 暗洞的平衡条件

对于一个球对称的暗物质团，其内部压强 抵抗其自身的“自斥力”以达到平衡。流体静力学平衡方程为：

由于 ，而自斥力导致 （向外增加），因此方程右边为负， ，表示压强从内向外减小。这与普通恒星相反。

1. **暗洞形成的拓扑凝聚机制**

3.1 场组合与相变条件

NMDM粒子的场组合为：

其质量 。

形成暗洞需要NMDM发生宏观量子相干，即其色荷场B分量形成玻色-爱因斯坦凝聚（BEC）。这要求满足：

1. 相空间密度条件： ，其中 是热德布罗意波长。
2. 相互作用条件： 粒子间有足够的相互作用以建立长程相干。

对于NMDM，其有效相互作用由交换虚引力子主导。

3.2 凝聚体的有效理论

凝聚后，系统可用Gross-Pitaevskii方程描述，但引力势由自身密度分布决定：

其中 是暗物质凝聚体的波函数， 是自相互作用系数， 是引力势，满足：

注意 ，因此 项符号需谨慎处理。

3.3 拓扑稳定性与边界条件

暗洞的稳定性依赖于其边界。我们假设存在一个清晰的界面，其外是普通真空或低密度暗物质，其内是NMDM凝聚体。

在边界处，波函数 趋于零，引力势 及其导数连续。这种边界由拓扑缺陷（如涡旋）稳定，其拓扑荷由绕数表征：

非零的 保证了态的稳定性。

1. **暗洞的静态解与性质**

4.1 无量纲化与数值求解

引入无量纲变量：

其中 是愈合长度， 是中心密度， 是中心势。

控制方程为：

其中 。

通过数值求解，可得暗洞的密度分布 和引力势分布 。

4.2 宏观特性

* 低密度核心： 暗洞内部密度远低于宇宙平均密度。
* 引力势阱： 由于其排斥性，暗洞中心是一个引力势的“峰” ，而非阱。
* 清晰边界： 密度在有限半径 处急剧下降至零。
* 质量-半径关系： 总（负）质量 与半径 的关系不同于普通天体。

1. **宇宙学观测信号**

5.1 引力透镜效应

由于暗洞内部密度低，其引力势 ，导致光线经过其附近时会发生发散而非汇聚，产生负引力透镜效应：

其中 是碰撞参数。这会在背景星系图像周围产生微弱的稀释环，而非爱因斯坦环。

5.2 宇宙微波背景（CMB）各向异性

暗洞会对其周围的CMB光子产生蓝移（因为光子落入正势阱会获得能量）：

在CMB图上表现为局部热点。

5.3 大尺度结构形成

暗洞作为低密度区域，会抑制其周围物质的成团，在宇宙网中留下巨大的空洞，其尺度可能远超由正质量物质形成的空洞。

1. **稳定性分析**

6.1 线性稳定性

对平衡态施加小扰动 ，得到线性化的GP-泊松方程组。通过分析本征模频率 ：

* 若所有 的虚部 ，则稳定。
* 若存在 ，则不稳定。

由于排斥相互作用，预计存在稳定的分支。

6.2 拓扑稳定性

拓扑荷 提供了拓扑保护。要改变 需要跨越巨大的能量势垒，因此拓扑稳定的暗洞是长寿的。

1. **结论与展望**

本文提出了负质量暗物质形成“暗洞”的理论模型：

1. 形成机制： NMDM通过拓扑相变形成宏观量子凝聚态。
2. 平衡态： 自排斥与压强梯度平衡，形成低密度、清晰边界的结构。
3. 观测信号： 负引力透镜、CMB热点、抑制结构形成。
4. 稳定性： 由拓扑荷保护。

**未来工作：**  
1. 精确求解GP-泊松方程组。  
2. 计算具体的观测预言（透镜信号、空洞统计）。  
3. 探索暗洞与宇宙学常数的关系。

**参考文献**[1] Li, Z. J. (2023). The ABC Mechanism in the Universe.  
[2] Gross, E. P. (1961). Structure of a quantized vortex in boson systems. Il Nuovo Cimento, 20(3), 454–477.  
[3] Böhmer, C. G., & Harko, T. (2007). Can dark matter be a Bose-Einstein condensate? Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2007(06), 025.  
[4] Farnes, J. S. (2018). A unifying theory of dark energy and dark matter: Negative masses and matter creation within a modified CDM framework. Astronomy & Astrophysics, 620, A92.  
[5] Hui, L., Ostriker, J. P., Tremaine, S., & Witten, E. (2017). Ultralight scalars as cosmological dark matter. Physical Review D, 95(4), 043541.