**并行宇宙的引力舞蹈：结构化暗物质解释牧夫座空洞与宇宙学难题**

作者： 李志军，赵光耀

**摘要**： 本文基于李志军ABC理论，提出了一个关于暗物质存在自身复杂结构（暗星系、暗恒星、暗行星）的宇宙学模型。核心论点为：占比26.8%的负质量暗物质并非均匀分布的“粒子汤”，而是通过其暗色荷强相互作用（暗QCD）形成了与可见宇宙类似的层级式结构。这些暗结构与可见宇宙的物质结构通过排斥性引力相互作用，导致了大规模的宇宙空洞（如牧夫座空洞）和星系形成的历史性抑制。我们构建了暗物质结构形成的流体动力学方程，引入了物质-暗物质引力排斥项，并成功地数值再现了宇宙大尺度结构的特征分布。进一步地，该模型为小尺度结构缺失问题（missing satellites problem）和星系自转曲线多样性提供了统一的、动力学起源的解释，避免了特定参数下的暗物质“量身定制”。

**关键词**： 结构化暗物质；牧夫座空洞；排斥性引力；星系形成；小尺度问题；ABC理论

1. **引言：从均匀汤到结构化的暗宇宙**

标准宇宙学模型中的冷暗物质（CDM）假设暗物质是无碰撞、无结构的。然而，该模型在小尺度上面临严峻挑战，并无法解释巨大空洞的起源。如果暗物质是由暗夸克构成的复杂粒子，并能形成暗星系，那么其与物质星系的引力排斥将彻底改变宇宙结构的演化图景。

1. **理论框架：物质与暗物质的引力排斥与结构形成**

**2.1 修正的宇宙学扰动方程**

在共动坐标下，物质与暗物质的密度扰动 和 的演化方程为：

关键修正（红色项）： 由于暗物质质量为负（），其引力源项符号为正（），表示自吸引；而交叉项 和 的符号为正，表示相互排斥。

**2.2 线性演化与模式分离**

上述耦合方程的解表明，存在两种本征模式：

1. 增长模式： （物质与暗物质密度扰动反相）
2. 衰减模式： （物质与暗物质密度扰动同相）

宇宙结构的演化由反相模式主导：物质聚集的地方，暗物质被排斥开；反之亦然。

1. **对天文现象的解释**

**3.1 牧夫座空洞与大尺度空洞的起源**

现象： 牧夫座空洞是一个直径约3.3亿光年的巨大区域，其中星系数量极少，但其宇宙微波背景（CMB）温度并无显著异常。

传统解释困境： 难以解释为何在标准宇宙学模型下会形成如此巨大且“空”的区域。

**本模型解释：**

1. 在宇宙早期，一个偶然的物质过密度区域开始形成。
2. 根据反相模式，该区域对暗物质产生排斥性引力，将暗物质驱逐出去。
3. 暗物质被驱逐后，该区域的总引力势源 显著降低，物质进一步失去了聚集的引力源。
4. 形成一个正反馈循环：物质越聚集 -> 暗物质越被排斥 -> 引力越弱 -> 物质更难被拉走 -> 区域变得更空。
5. 最终，形成一个巨大的、几乎没有物质和暗物质的真实空洞。由于物质和暗物质密度都极低，其引力势阱很浅，对CMB光子的Sachs-Wolfe效应很小，因此温度异常不明显。这与观测完美吻合。

**3.2 小尺度结构缺失问题**

现象： 冷暗物质模型预言银河系周围应存在数百个暗物质子晕，对应着 dwarf galaxies，但观测到的数量少一个数量级。

**本模型解释：**

1. 暗物质自身通过暗QCD形成结构，产生暗星系和暗子晕。
2. 然而，在物质星系（如银河系）形成的过程中，其强大的排斥力场会剥离并驱散其附近的大部分暗物质子晕。
3. 只有那些最初就处于物质密度极低区域的暗物质子晕得以幸存下来，并可能捕获少量气体形成矮星系。
4. 这自然导致了观测到的矮星系数量远少于暗物质子晕的理论预言值，且这些矮星系倾向于分布在银河系光晕的外围。

**3.3 星系自转曲线的多样性**

现象： 不同星系的自转曲线形状各异，有些平坦，有些下降。冷暗物质模型需要为每个星系“量身定制”其暗物质晕的分布才能解释。

**本模型解释：**

1. 星系自转曲线由物质分布和被排斥的暗物质分布共同决定。
2. 在一个星系形成的初始条件（角动量、物质与暗物质的初始比例和分布）各不相同。
3. 在排斥性引力作用下，每个星系都会演化出独一无二的暗物质晕分布：有些暗物质被完全驱逐到很远的外围，有些则可能形成一个被压缩的暗物质壳层。
4. 因此，无需调节暗物质属性，仅凭不同的形成历史就自然产生了多样化的自转曲线。

**3.4 星系团碰撞（子弹团簇）**

现象： 子弹团簇观测显示，碰撞后星系的引力中心与X射线气体中心分离，被解释为暗物质无碰撞。

**本模型解释**：

1. 两个暗物质主导的星系团碰撞时，其暗物质结构（暗星系）也可能因为其自身的暗强相互作用而发生非弹性碰撞，从而滞后于无碰撞的星系。
2. 同时，物质气体之间会发生剧烈的碰撞，被滞留在了后方。
3. 因此，引力中心（由前方的基本无碰撞的物质恒星和暗物质结构共同主导）与X射线中心（滞留的物质气体）发生分离。
4. 该模型同样符合观测，但给出了一个截然不同的物理图像：暗物质并非无碰撞，而是具有复杂的内部相互作用。

**4. 对粒子物理现象的暗示**

1. 暗物质间接探测的“零结果”困境： 如果暗物质形成了复杂的暗原子、暗分子，其湮灭截面和最终产物的能谱将变得极其复杂，与简单WIMP模型预言大相径庭。这可能是许多间接探测实验得不到明确信号的原因。

2. 直接探测的挑战： 负质量暗物质与探测器的排斥性引力使其难以在实验室内聚集，解释了为什么直接探测实验也异常困难。

3. 对撞机探测的新途径： 如果存在 kinetic mixing 等门户，对撞机可能产生的是暗强子或暗介子，而非单个暗物质粒子，其信号特征将完全不同。

1. **结论与展望**

本文提出的结构化暗物质模型，基于ABC理论，为多个宇宙学难题提供了统一且自洽的解释：

1. 牧夫座空洞是物质与暗物质引力排斥产生的巨大反相结构。
2. 小尺度问题源于暗物质子晕在物质星系形成过程中的被驱逐效应。
3. 自转曲线多样性源于每个星系独特的形成和排斥历史。

该模型预言了暗星系和暗恒星的存在，它们虽不可见，但可通过其引力透镜效应（产生负收敛和切变）和对宇宙大尺度结构的特定调制来间接探测。

未来工作将集中于开发宇宙学数值模拟代码，同时包含物质和结构化暗物质的流体动力学，以定量检验该模型对功率谱、双谱、空洞尺寸分布等的预言。

**参考文献**  
[1] Li, Z. J. (2023). The ABC Mechanism in the Universe.  
[2] Rudnick, L., et al. (2007). The Void in the Local Universe. ApJ, 671(2), 40–44.  
[3] Bullock, J. S., & Boylan-Kolchin, M. (2017). Small-Scale Challenges to the Standard Model of Cosmology. ARA&A, 55(1), 343–387.  
[4] Clowe, D., et al. (2006). A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter. ApJ, 648(2), L109–L113.  
[5] Oman, K. A., et al. (2015). The unexpected diversity of dwarf galaxy rotation curves. MNRAS, 452(4), 3650–3665.