

# CDM 的存在小尺度危机吗？

## 存在危机观点

邓静一、付泽华、黄震洋、王泽毅

高等天文学课程

2024 年 4 月 30 日



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

## ① 研究背景

## ② LCDM 的小尺度危机的佐证观点

## ① 研究背景

## ② LCDM 的小尺度危机的佐证观点

# 研究背景

- $\Lambda$ CDM =  $\Lambda$  + CDM
- $\Lambda$  (宇宙学常数): 解释当前宇宙观测到的加速膨胀的暗能量项, 暗能量是一种均匀分布在宇宙中的能量形式。
- CDM: 冷暗物质, 构成宇宙大部分物质的假设的暗物质类型之一。
- $\Lambda$ CDM 模型即标准宇宙模型, 它尝试解释了对宇宙微波背景辐射、宇宙大尺度结构以及宇宙加速膨胀的超新星观测。它是当前能够对这些现象提供融洽合理解释的最简单模型。

## ① 研究背景

## ② LCDM 的小尺度危机的佐证观点

卫星系位置分布问题

Too Big Too Fail(TBTF) Problem

卫星系缺失问题

Too-dense-to-be-satellite Problem

The Baryonic Tully-Fisher Relation(BTFR) Problem

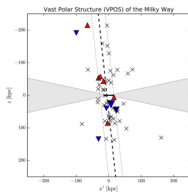
CORE-CUSP(CC) Problem

Solutions

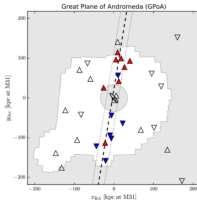
角动量灾难问题

空洞问题

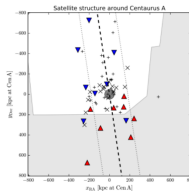
# 卫星系位置分布问题



银河系



仙女座星系

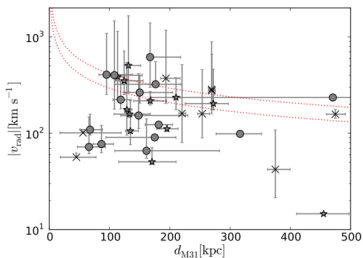


半人马座 A

- LCDM 模型预测：卫星星系应该呈现出随机的、近似各向同性的分布。
- 小尺度危机：该图所展示的结构表明卫星星系集中分布在主星系薄平面周围，并且呈现出非随机的分布模式。

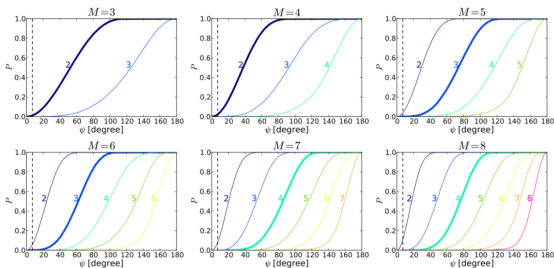
1802.02579 (arxiv.org)

# 卫星系位置分布问题



- LCDM 模型预测：卫星应该沿着冷暗物质流被吸积到 M31 的周围，其速度不应该超过逃逸速度。
- 危机：M31 周围具有速度超过相应逃逸速度的卫星星系，这表明它们可能已经脱离了 M31 的引力束缚，与 LCDM 模型预测不符。

# 卫星系位置分布问题



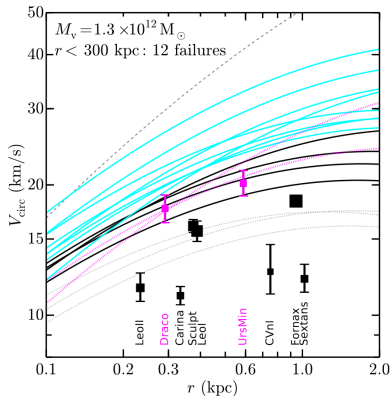
- LCDM 模型：卫星星系是沿着几个共同的冷暗物质流被吸积到主星系中的，那么随着供应主星系的流的数量 ( $M$ ) 增加，预计在给定的角度范围内找到与观测到的主星系相一致的卫星星系数量的期望值也会增加。
- 小尺度危机：观测结果显示在给定的角度范围内观测到与主星系相一致的卫星星系的概率随着  $M$  的增加而降低。实际观测结果与 LCDM 模型预测相冲突。

stu1005.pdf (silverchair.com)



# Too Big Too Fail(TBTF) Problem

- 在无耗散 CDM 模拟预测中，银河系中大多数最大质量的子晕都过于密集，无法容纳任何已知的明亮卫星系。这些缺失的巨大系统应该非常明亮，具有  $M > 10^6$  太阳质量。
- WDM 模型中的暗物质晕体形成较晚，中心密度较低，因此其中的星系质量较小。更符合观测到的低质量星系的数量。
- 右图的线是可能的暗物质晕轨道，黑点是已发现的卫星系（银河系）



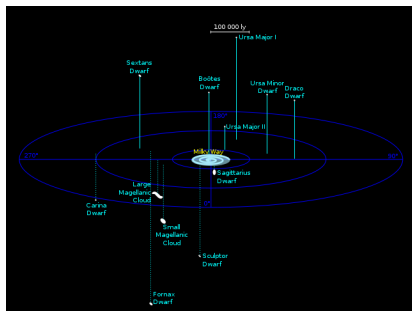
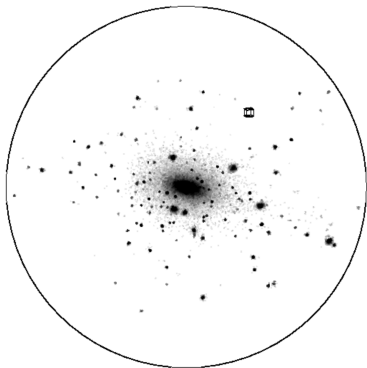
arXiv:1103.0007, arXiv:1404.5313

# 卫星系缺失问题

- LCDM 预言的银河系卫星系数量（约 1000 个）比实际观测到的卫星系数量（约 50 个）大了数量级。其他星系所观测到的卫星系数量也少于 CDM 模型的预言。有观点认为是观测上的误差导致，但是数量级相差过大。将重子物理添加到通常的无耗散 DM 模型中也许是一种方法，例如流体动力学模拟。
- 最近的研究中，有研究者测试了 M83 附近的矮星系卫星数量是否与当今的 CDM 模型模型相符，结果表示在亮度函数的较暗端（下至  $10^6$  太阳质量）时，它们低估了数量，低估程度超过了  $3\sigma$  和  $5\sigma$  的水平。这表明在 CDM 模型下，M83 存在矮星系卫星过多的问题。

10.3390/galaxies5010017

# 卫星系缺失问题

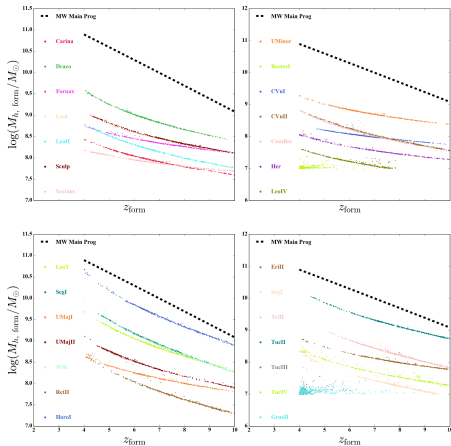


- 左图为 LCDM 预言的银河系卫星系数量
- 右图为实际观测到的一些卫星系，用作对比

10.1086/307643

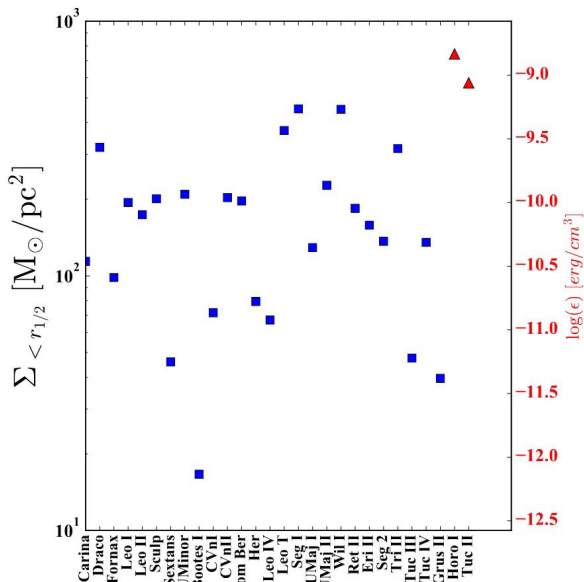
# Too-dense-to-be-satellite Problem

- 一个比较新的问题是银河系的两个卫星星系 (Horologium I 和 Tucana II) 的密度过高, 其形成质量和红移与 CDM 模型下的卫星星系不相符。这个问题在重子物理领域没有解决方案, 目前的暗物质替代模型也无法解释。
- 当根据半光半径内封闭质量密度的单个数据点拟合 NFW 剖面时, 对经典矮星系和超微弱矮星系的形成红移 (水平) 和相应晕质量 (垂直) 的约束。MW 的卫星应始终远低于黑色虚线, 否则会因动力摩擦而与主要祖先合并

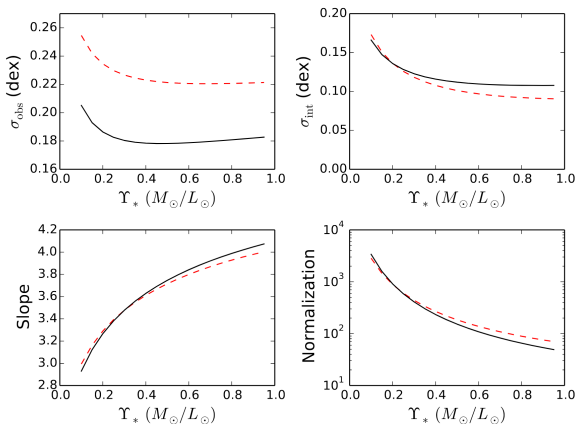


arXiv:2107.03478

# Too-dense-to-be-satellite Problem



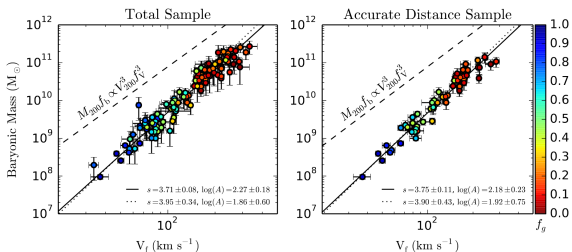
# The Baryonic Tully-Fisher Relation (BTFR) Problem



- 预测：BTFR 应该具有较大的内在离散, 最小预期值为 0.15 dex
- 观测：BTFR 的内在离散只有 0.10-0.11 dex, 远低于  $\Lambda\text{CDM}$  预期

arXiv:1301.0623

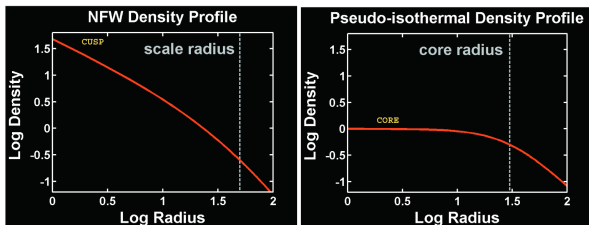
# The Baryonic Tully-Fisher Relation (BTFR) Problem



$$M_b = A * V_f^\eta$$

- 左图：采用  $\Upsilon_* = 0.5M/L$  时的 BTFR 实线为加权拟合，权重为测量误差，虚线为进一步增大气体主导星系权重的拟合
- 右图：BTFR 的规范化和斜率，斜率接近 4；这与 LCDM 模型的预期不符（斜率只有 3），规范化偏离其假设的  $f_b = 0.17$ （旋转速度与暗物质晕的 virial 速度之比）和  $f_V = 1$ （表示星系中重子物质质量与宇宙学重子物质总量的比例）的初始条件。

# CORE-CUSP(CC) Problem



- CDM 模型得到的物质密度轮廓在中心成幂率模式

$$\rho(r) \propto r^{-\gamma}$$

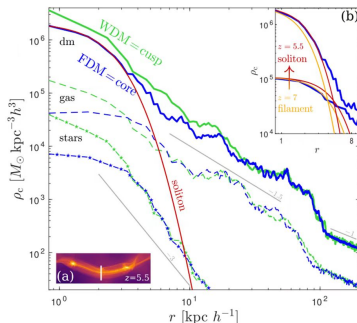
- 在 CDM 模型中  $\gamma \approx 0.8 - 1.4$  是一个尖峰 (cuspy), 而实际观测到的更平  $\gamma \approx 0 - 0.5$  是一个核球 (cored) 的状态。

arXiv:astro-ph/9508025, arXiv:1606.07790 [astro-ph]

Navigation icons: back, forward, search, etc.

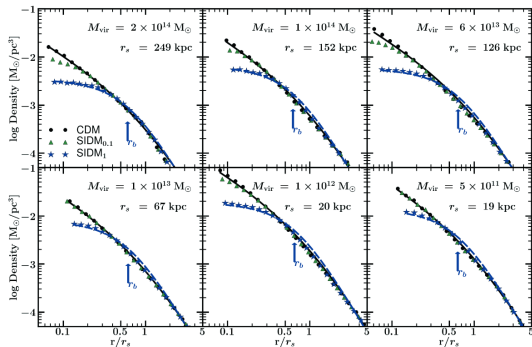


# Solutions: 新的暗物质模型 ? FDM and WDM



- WDM 粒子保持比 CDM 模型更高的速度，小尺度聚集更少，从而更平坦。
- 上图看出 WDM 在小半径处也是比较尖，FDM 则更平滑。且由于量子压的支撑，FDM 可以抵抗暗物质的自引力，形成一个半径为几 kpc 的球型孤子核。(arXiv:1910.01653)
- 而 WDM 中，缺少量子压，这一尖峰最终会形成一个 10pc 的核。

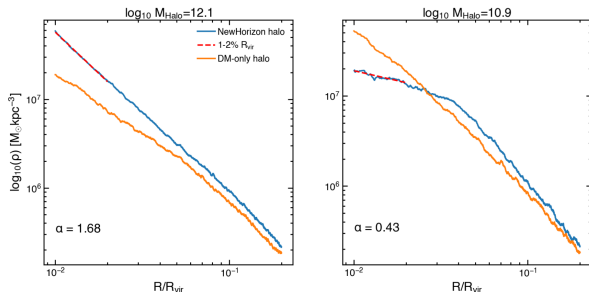
# Solutions: 新的暗物质模型 ? SIDM



- Spergel 和 Steinhardt 首次提出 SIDM, 认为暗物质粒子之间的弹性散射可以抑制暗物质在中心区域的聚集, 从而有核心密度分布。
- 上图将 NFW (黑线) 和 Burkert (蓝线) 密度剖面与 SIDM 宇宙的模拟进行比较。

arXiv:1208.3026

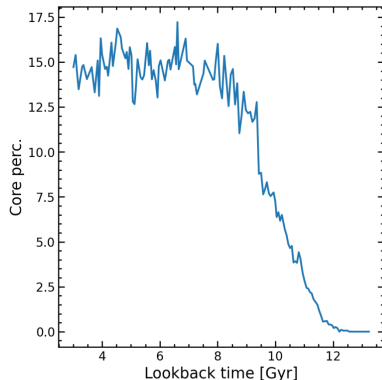
# 在 LCDM 上的改进：重子反馈



- 左图显示了一个类似于 NFW 轮廓的暗物质晕 (斜率为 1.68)。相比于只有暗物质的模拟, NewHorizon 模拟中包含重子物质后, 中心区域的密度进一步增大, 因为重子物质加深了引力势。
- 右图显示了一个具有核心 (core) 结构的暗物质晕 (斜率为 0.43)。与只有暗物质的模拟相比, NewHorizon 模拟中暗物质从中心区域被推到了较大半径, 形成了平坦的密度轮廓。

# 在 LCDM 上的改进：重子反馈

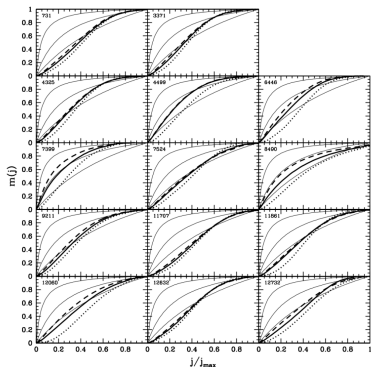
- 核心的频率在最后 9Gyrs 中相对恒定，表明么核心一旦形成，就有弹性并且难以破坏
- 70% 的核心已经存在了至少 3 Gyrs，这意味着大多数核心的寿命相对较长
- 正是在宇宙恒星形成开始增加然后达到顶峰的时期



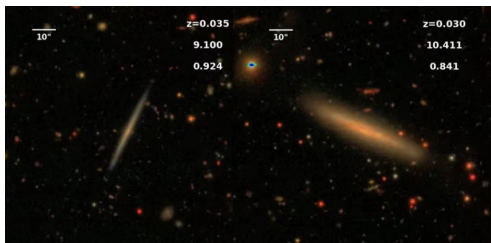
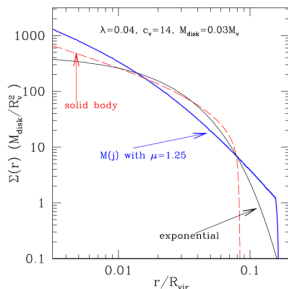
arxiv 2310.13055

# 角动量灾难问题

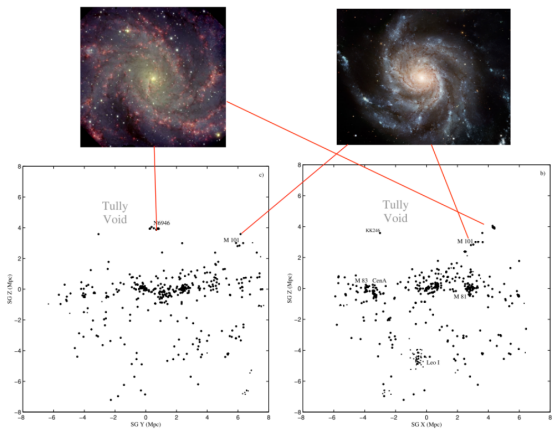
- 角动量灾难涉及光滑流体动力学模拟的盘状星系形成过程中的角动量损失，产生了与冷暗物质晕的角动量分布不同的矮星系盘；此外，根据 CDM 的预测，模拟形成的星系盘比实际观测到的星系盘要小得多，椭圆系统也过于集中。



# 角动量灾难问题



# 空洞问题



在 LCDM 背景下的宇宙学 N 体模拟预测许多小的暗物质晕应该存在在空洞中，这与大尺度的观测结果一致，但与小尺度的观测结果不一致，即局部空洞内所观测到的矮星系数量比所预测的矮星系数量要少得多。

*Thanks!*