

孤立的暗物质缺失矮星系

胡慧杰（安庆师范大学）

合作者：郭琦、景英杰、林泽森、石惠、张红欣、张智昱、蔡肇伟、
李瑞恬、郑征、廖世鸿、林令瑞、贺怡、李孚嘉、邵实、李旭志、
王菁、彭影杰、高亮、王杰、方官文



胡慧杰@盱眙 2025/10/25

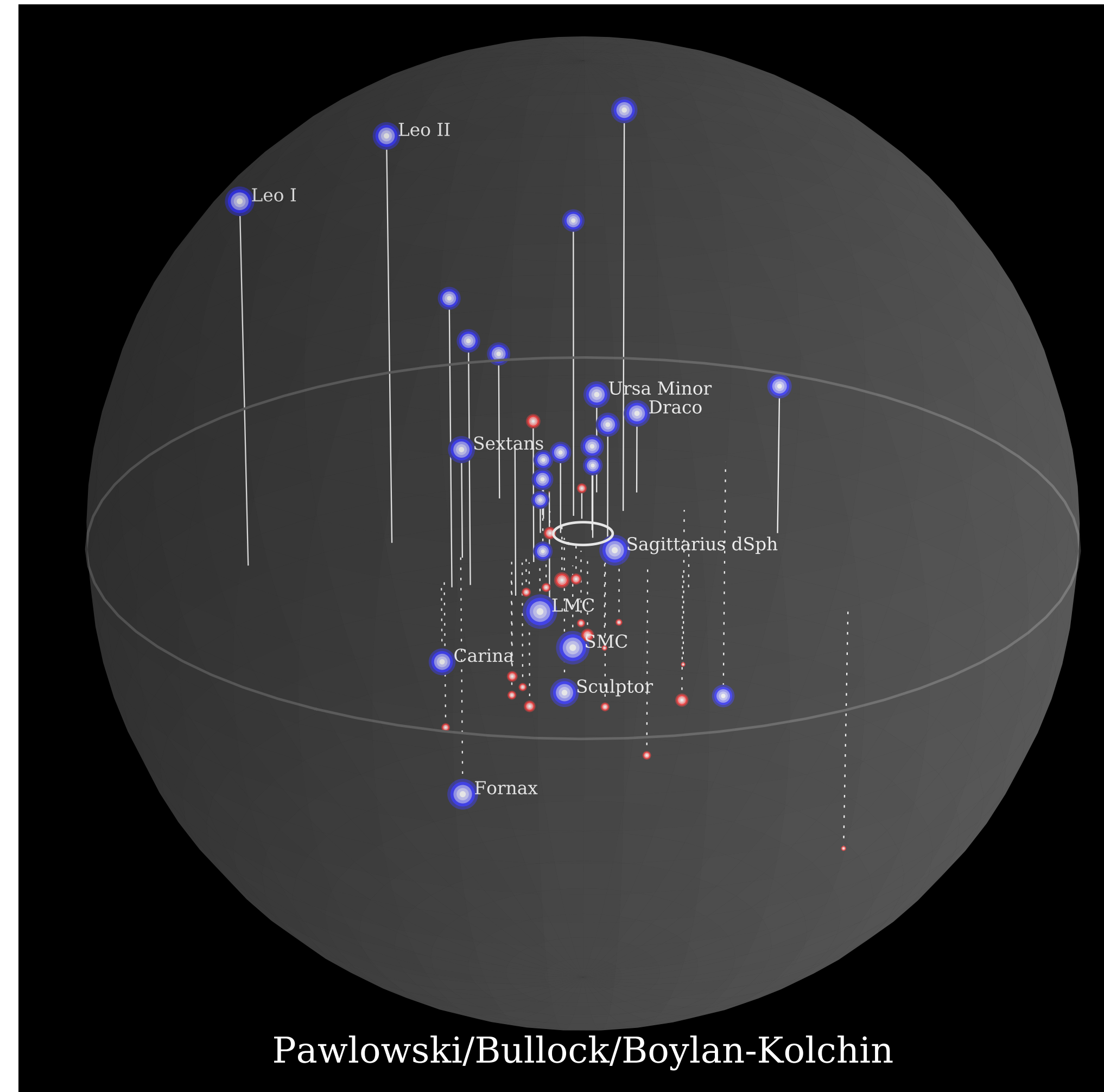
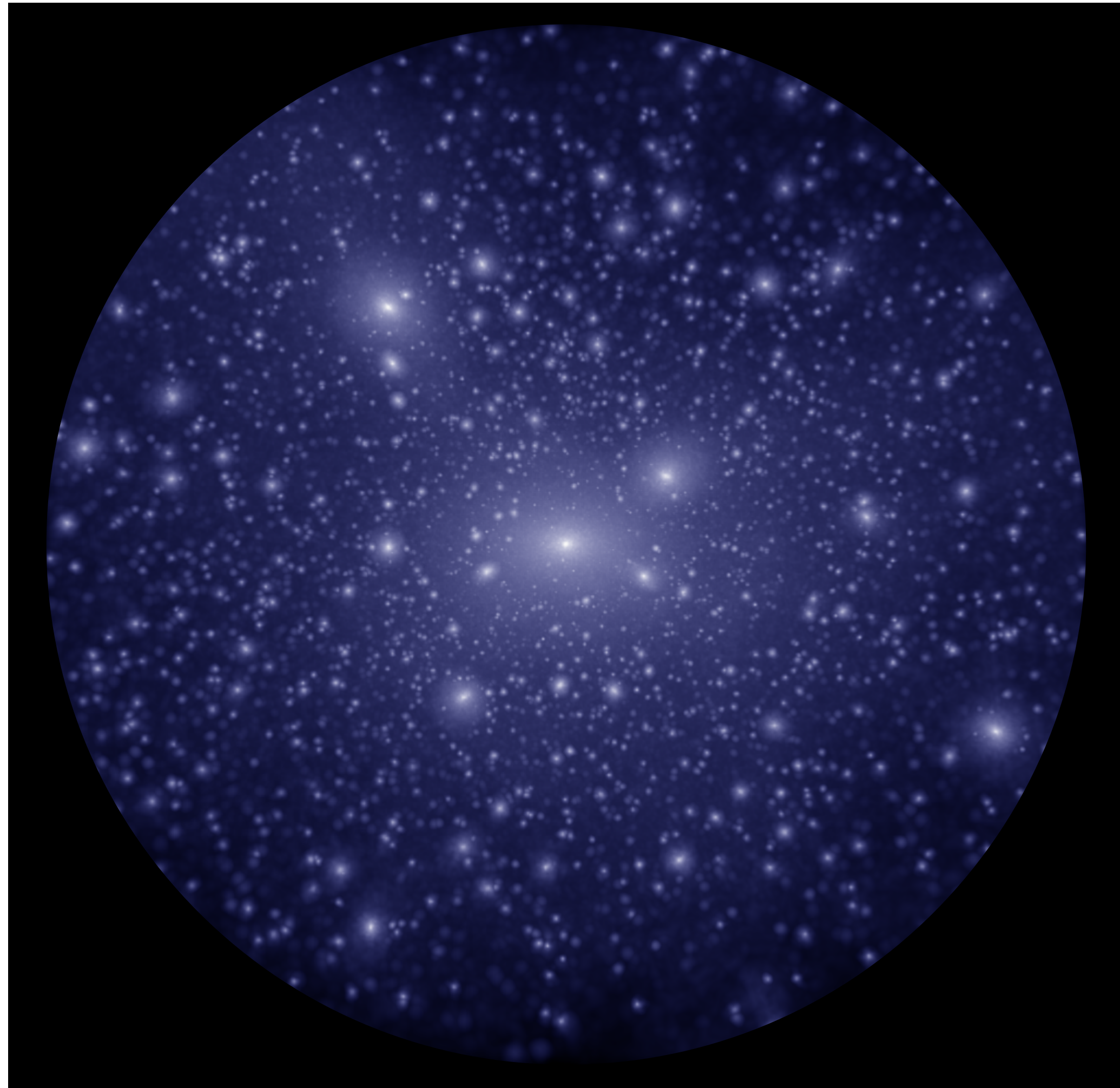


National Astronomical
Observatories, CAS
Computational Cosmology Group

Λ CDM 小尺度挑战



消失的卫星星系； Moore 1999, Klypin 1999

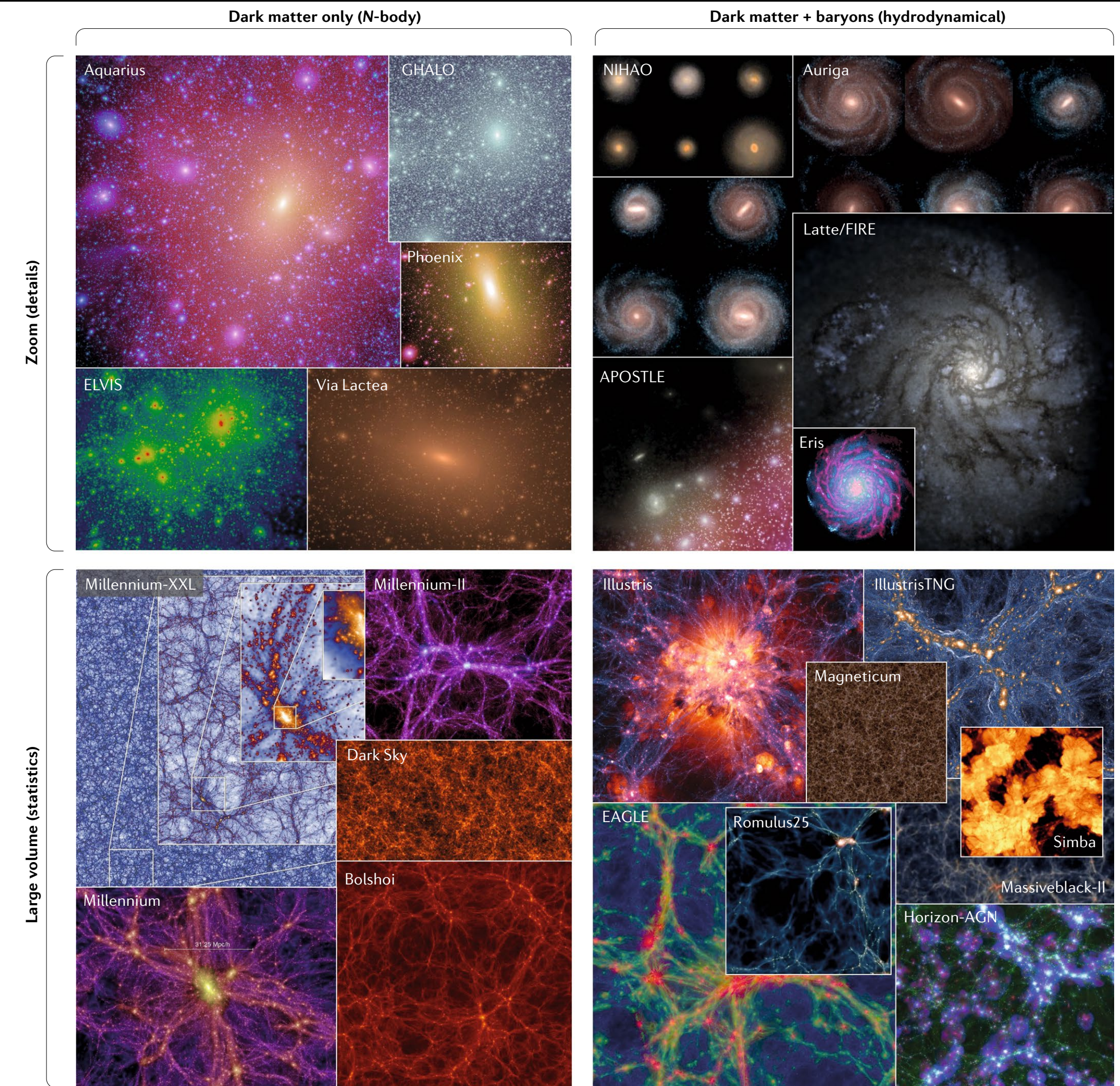


Λ CDM 小尺度挑战



消失的卫星星系; Moore 1999, Klypin 1999
核球-尖端 (Core or cusp); de Blok 1997
大到不能倒 (too-big-to-fail); Boylan-Kolchin 2011
卫星星系的成盘性; Kroupa 2005
矮星系多样性; Oman 2015

这些差异的根本原因目前尚不清楚, 可能需要更深入地理解星系形成中的天体物理过程或暗物质物理, 或者甚至需要对宇宙学理论进行重大修正。因此研究矮星系是解决这些问题的重要路径之一。

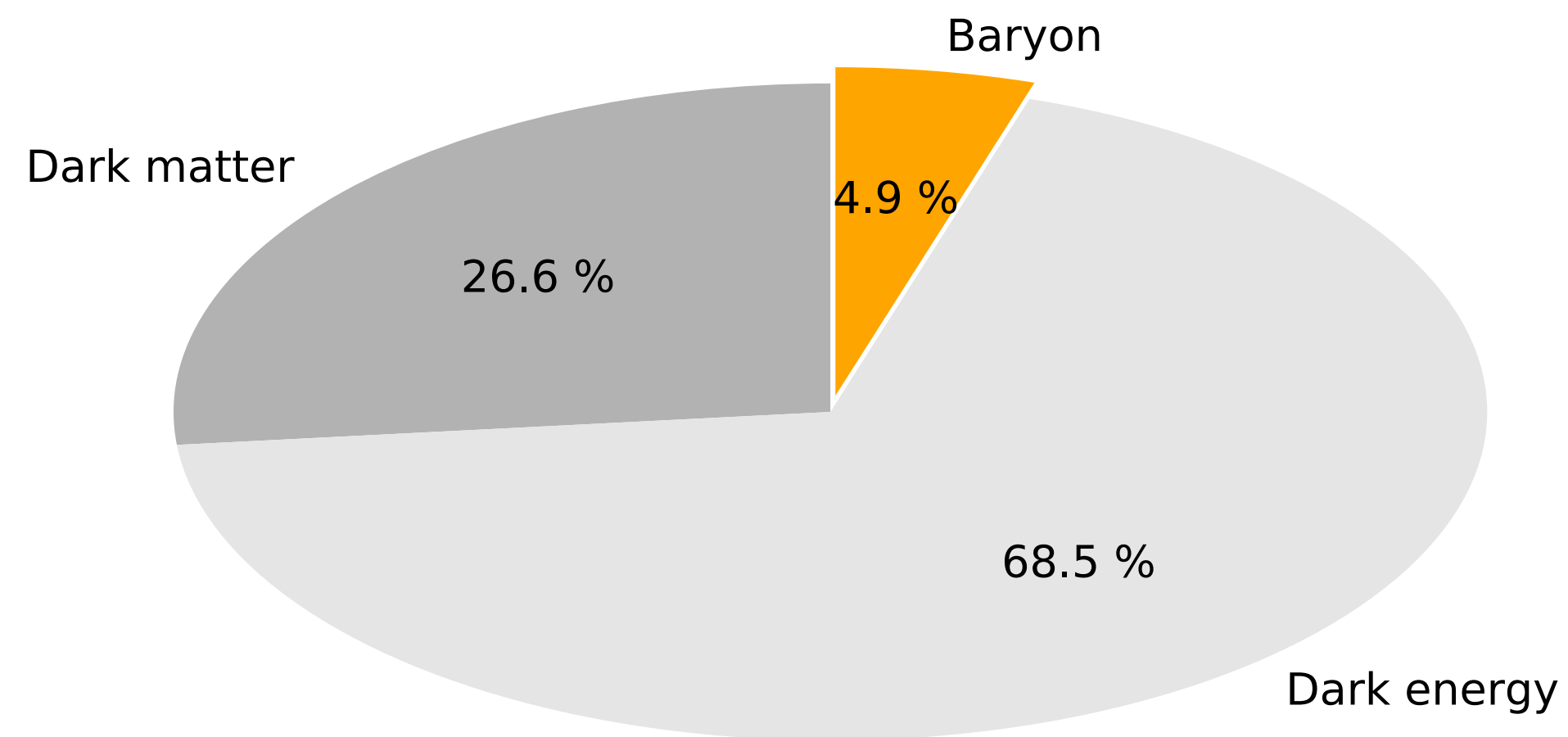


Vogelsberger 2020 Nature reviews

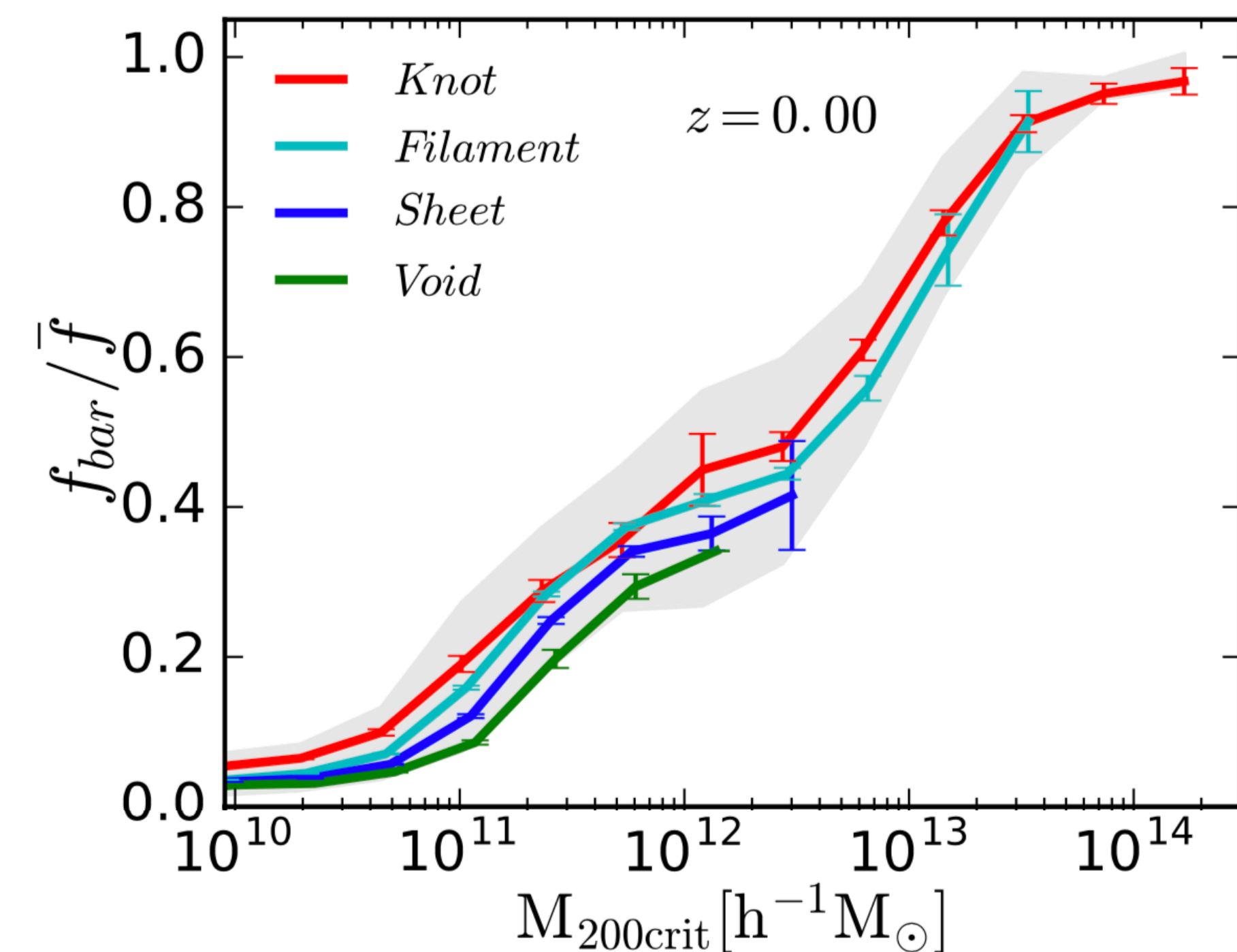
宇宙物质构成



- 在 Λ CDM标准宇宙学下，宇宙的平均重子物质比例分数为($f_{bar} = M_{bar}/M_{tot}$) 15.7% (Planck 2018)。

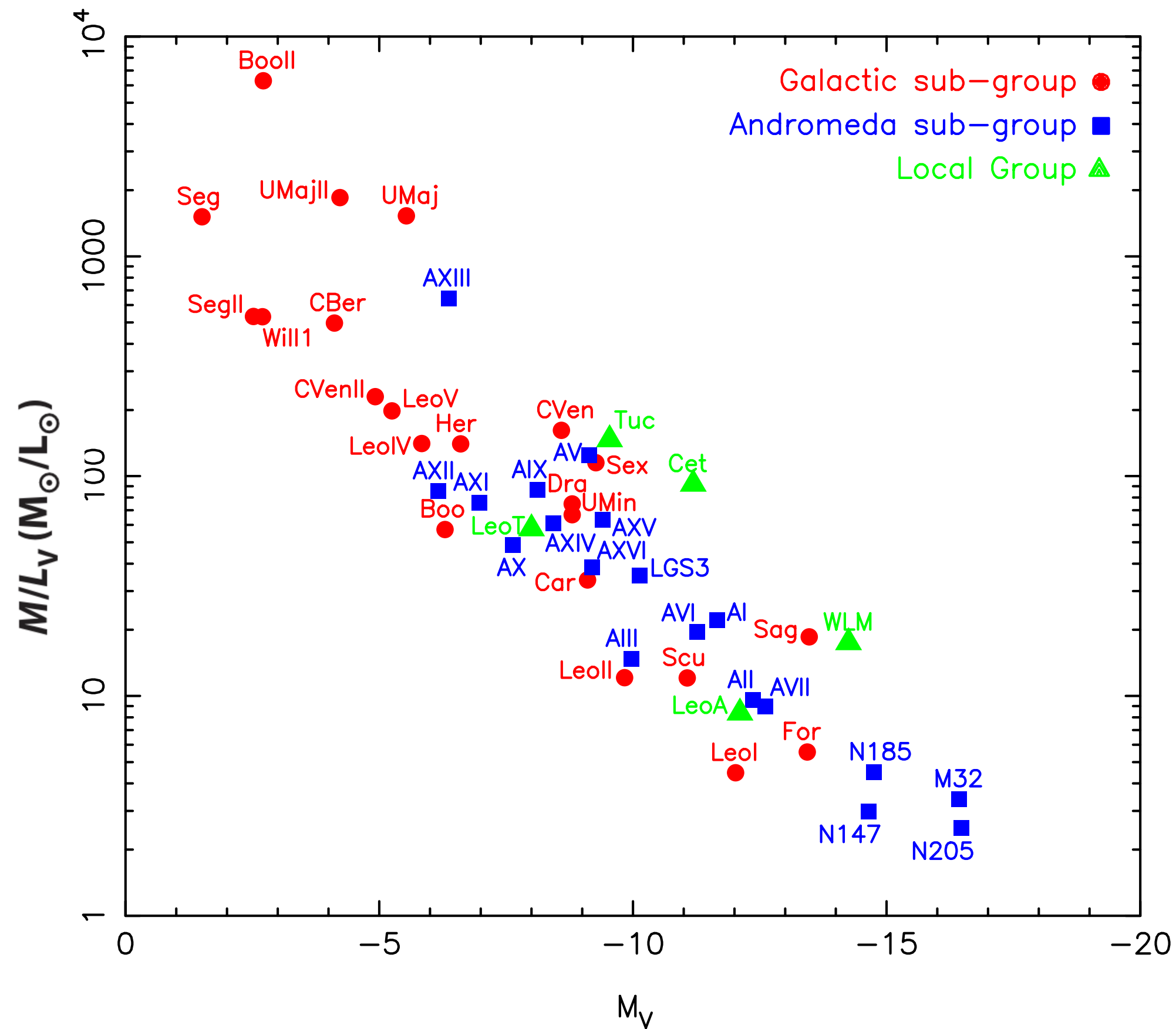


Wenxiao Xu et al. 2020

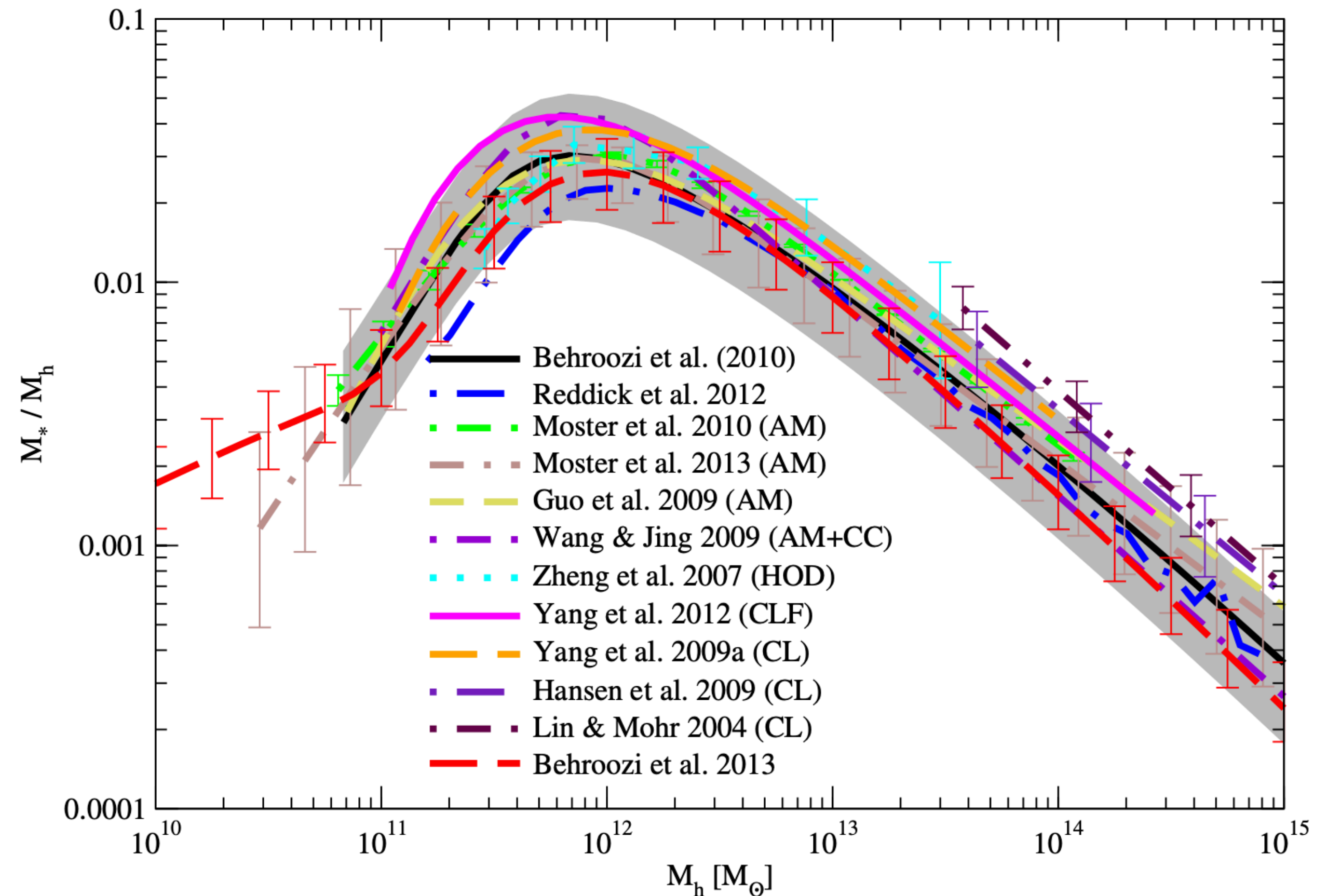


- f_{bar} 在星系团中将达到宇宙平均值，然而在小质量的矮星系中，其暗物质是重子物质的10-1000倍。
(紫外背景以及恒星反馈)

矮星系中的暗物质含量



McConnachie 2012



Behroozi 2013

观测和理论支持：矮星系由暗物质主导！

星系团中暗物质缺失的矮星系的发现



- Dark Matter Deficient dwarf Galaxies (DMDGs)

- 暗物质质量 $\sim$ 重子物质质量

恒星质量 $2 \times 10^8 M_{\odot}$

动力学质量 (球状星团)

Jeans $< 3.2 \times 10^8 M_{\odot}$ (3.1 kpc)

TME $< 3.4 \times 10^8 M_{\odot}$ (7.6 kpc)

van Dokkum, *Nature* 2018

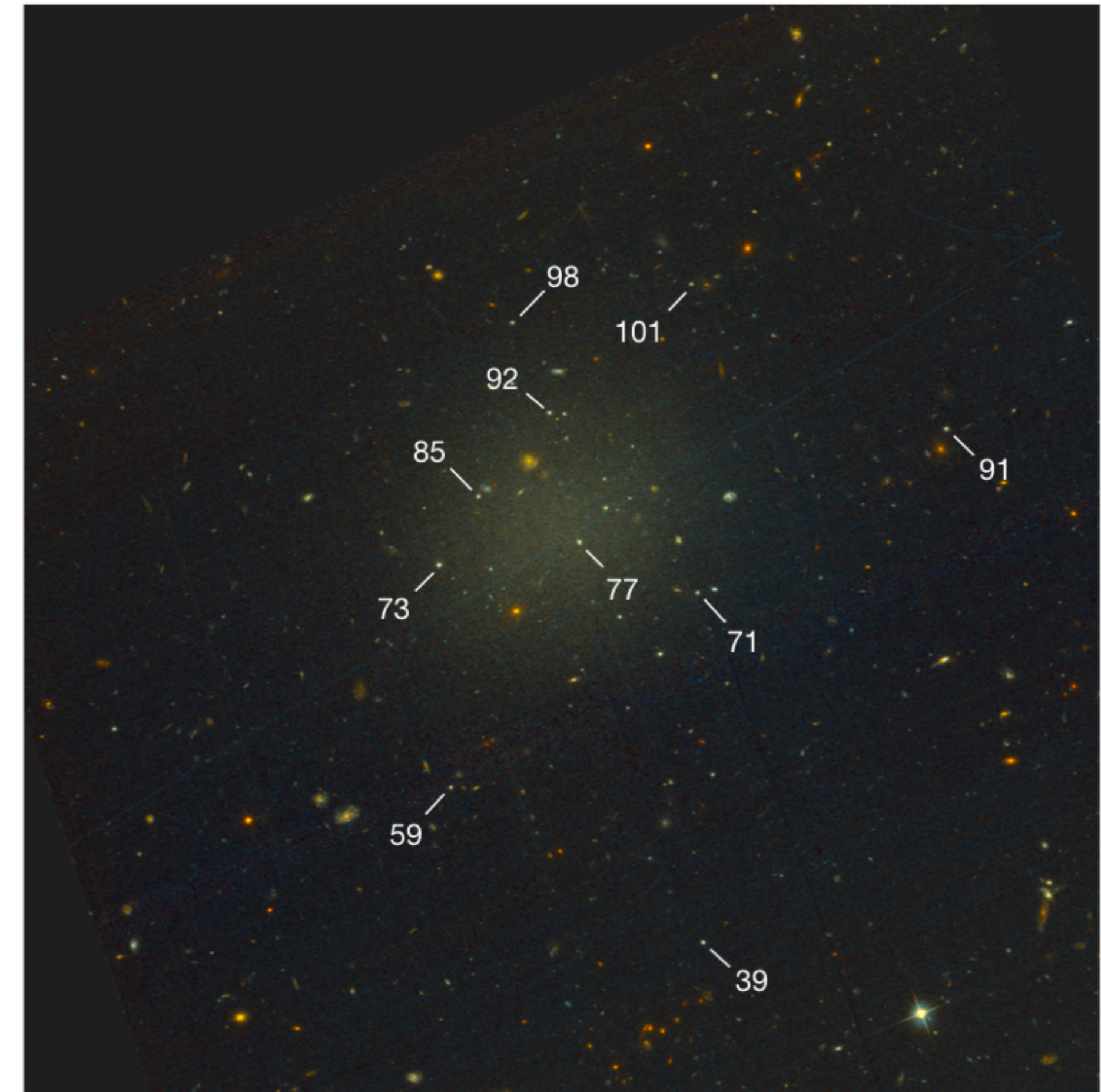


Figure 1 | HST/Advanced Camera for Surveys (ACS) image of NGC1052-DF2. NGC1052-DF2 was identified as a large (approximately 2')

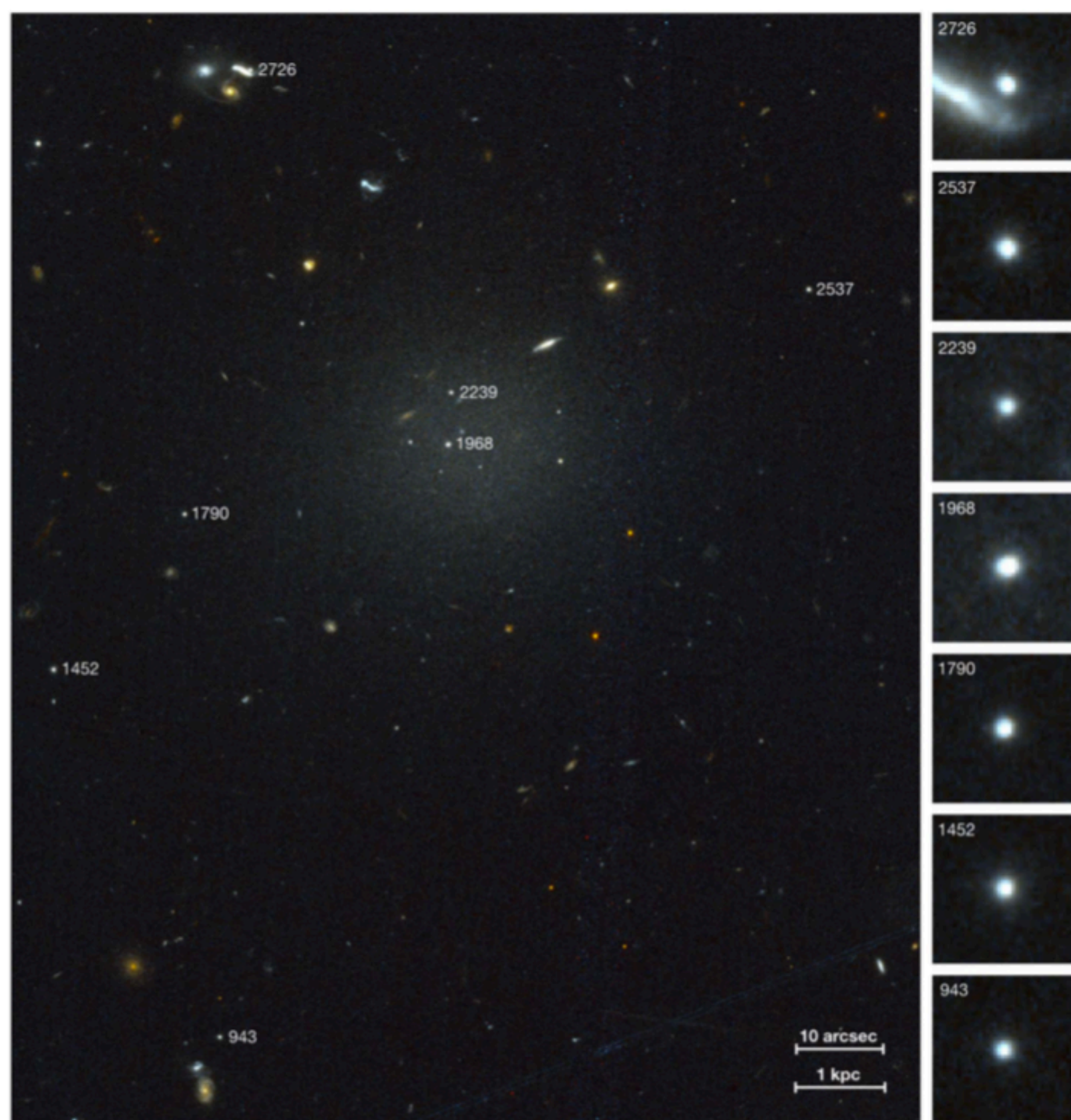
暗物质缺失的矮星系-NGC1052-DF4



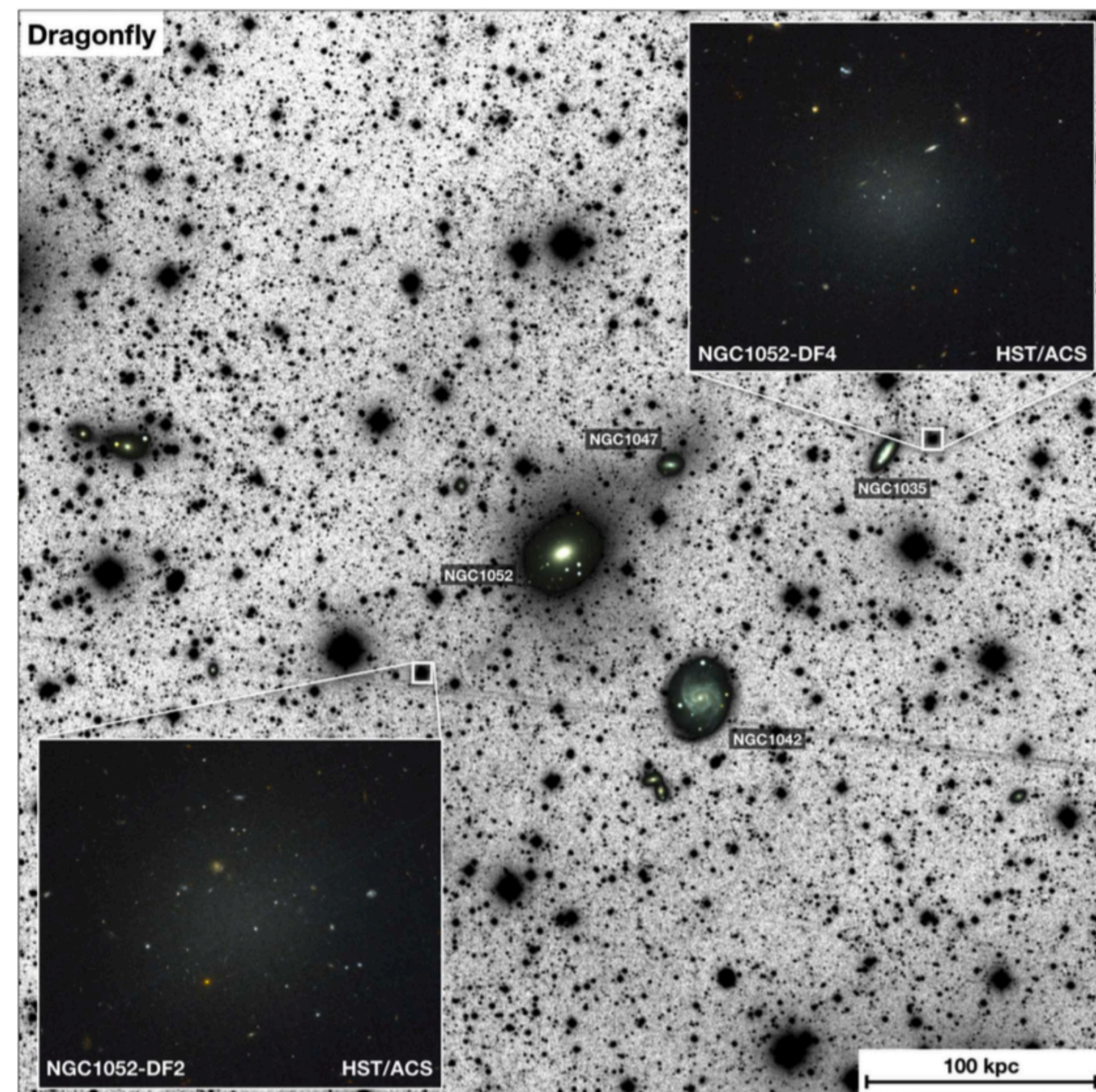
恒星质量 $1.5 \times 10^8 M_{\odot}$

动力学质量 $TME \sim 0.4 \times 10^8 M_{\odot}$ (7 kpc)

van Dokkum, *ApJ* 2019



DMDGs 如何形成?



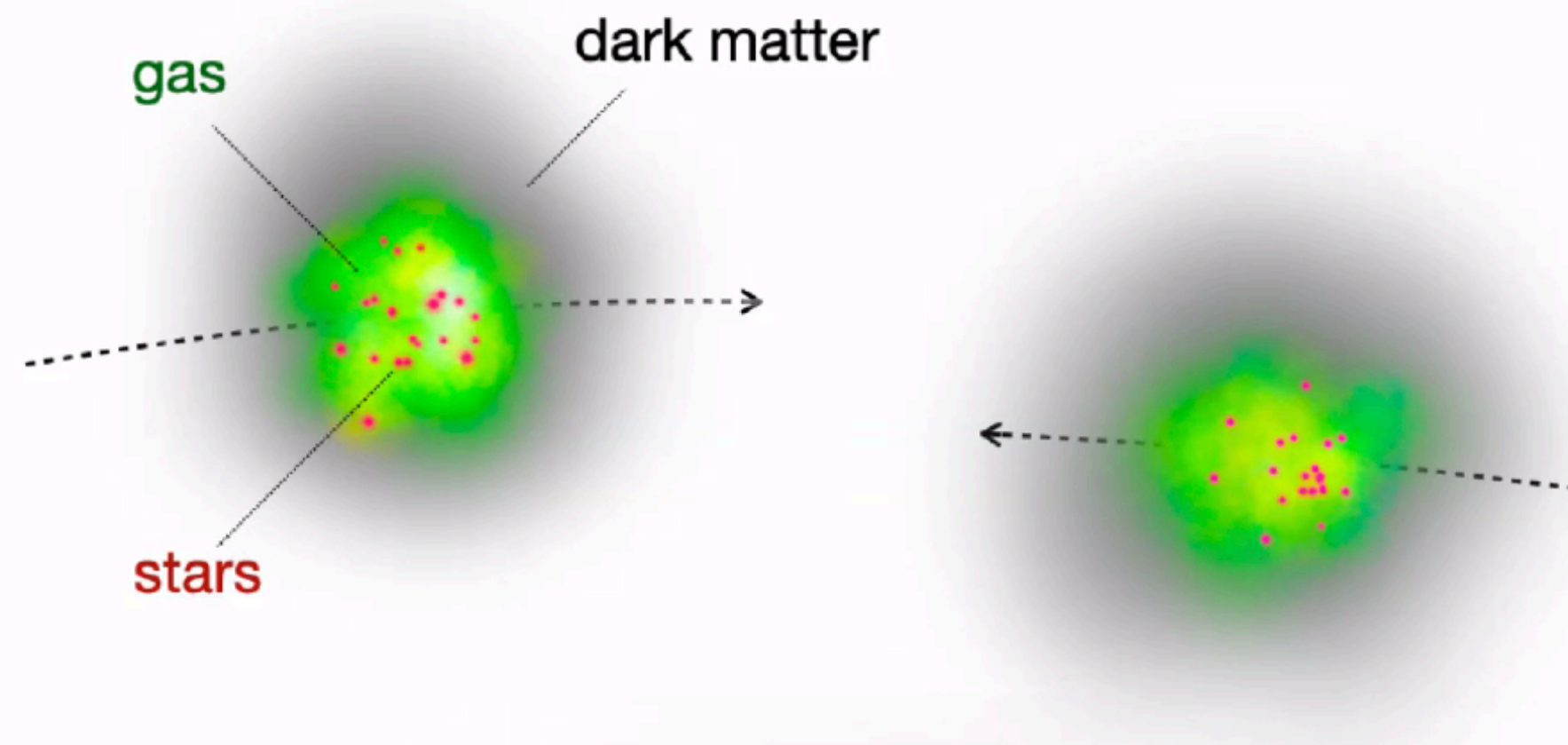
富气体暗晕高速碰撞



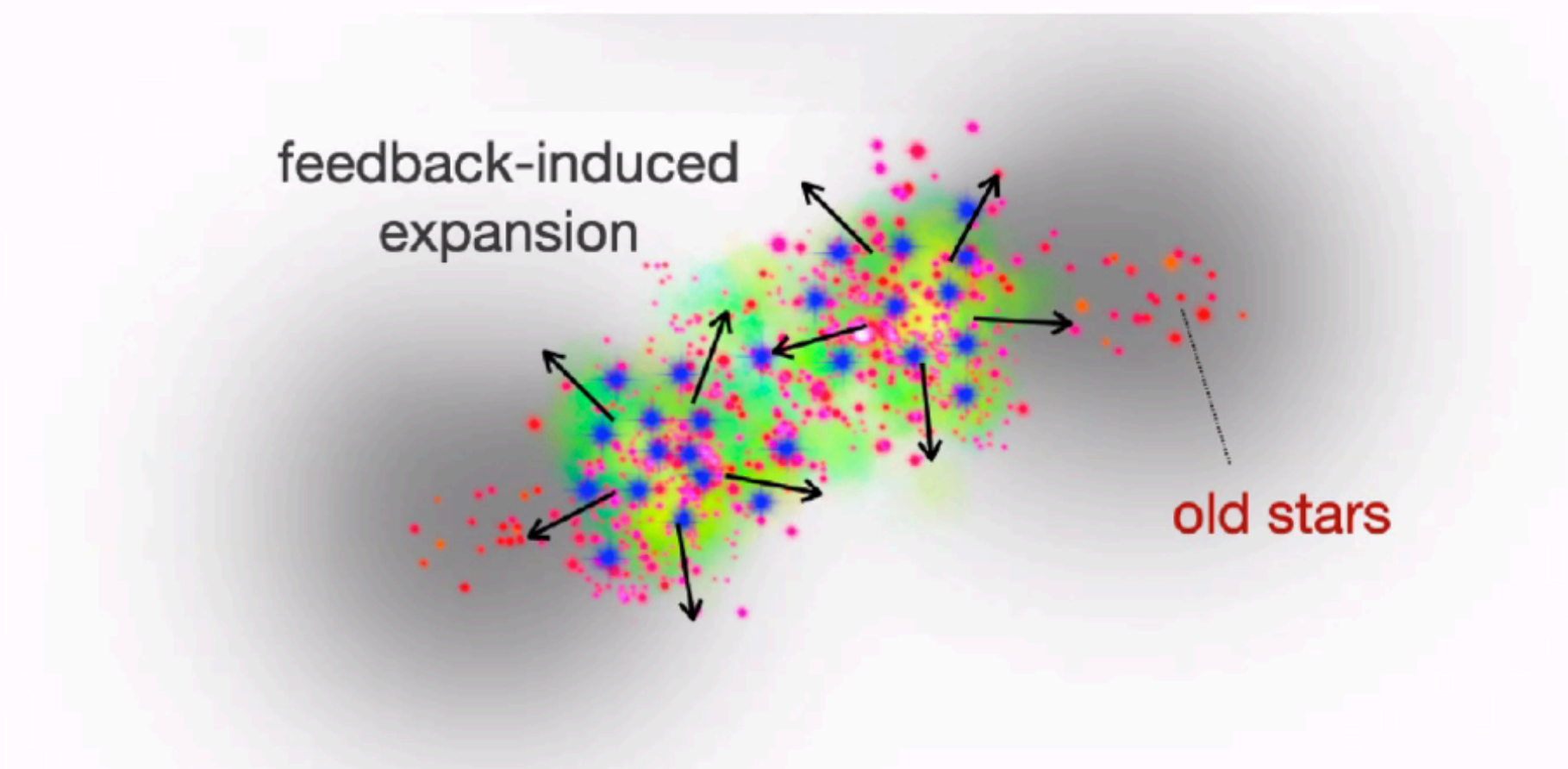
Mini Bullet Cluster

van Dokkum Nature 2022

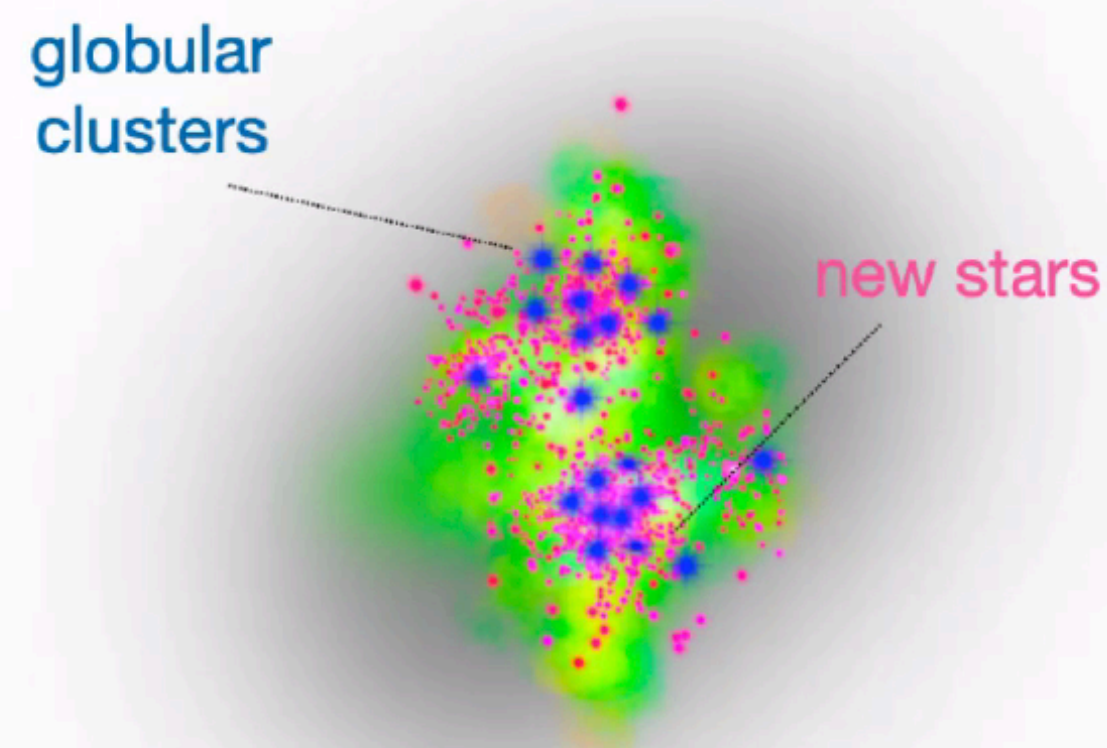
1



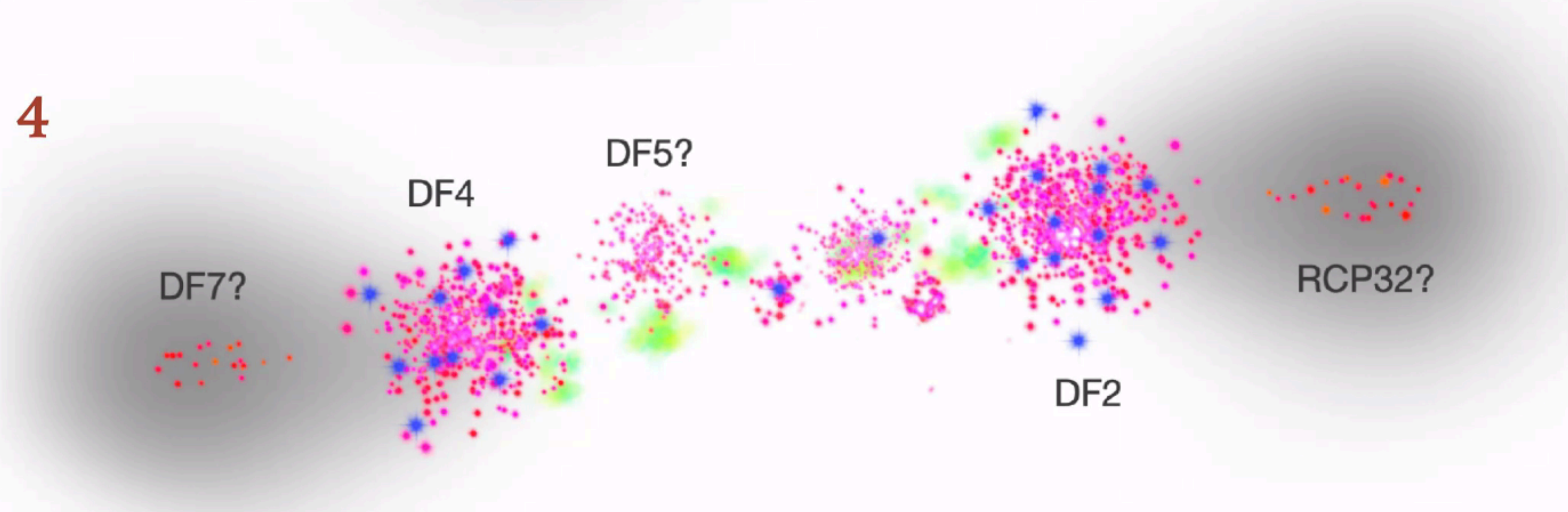
3



2



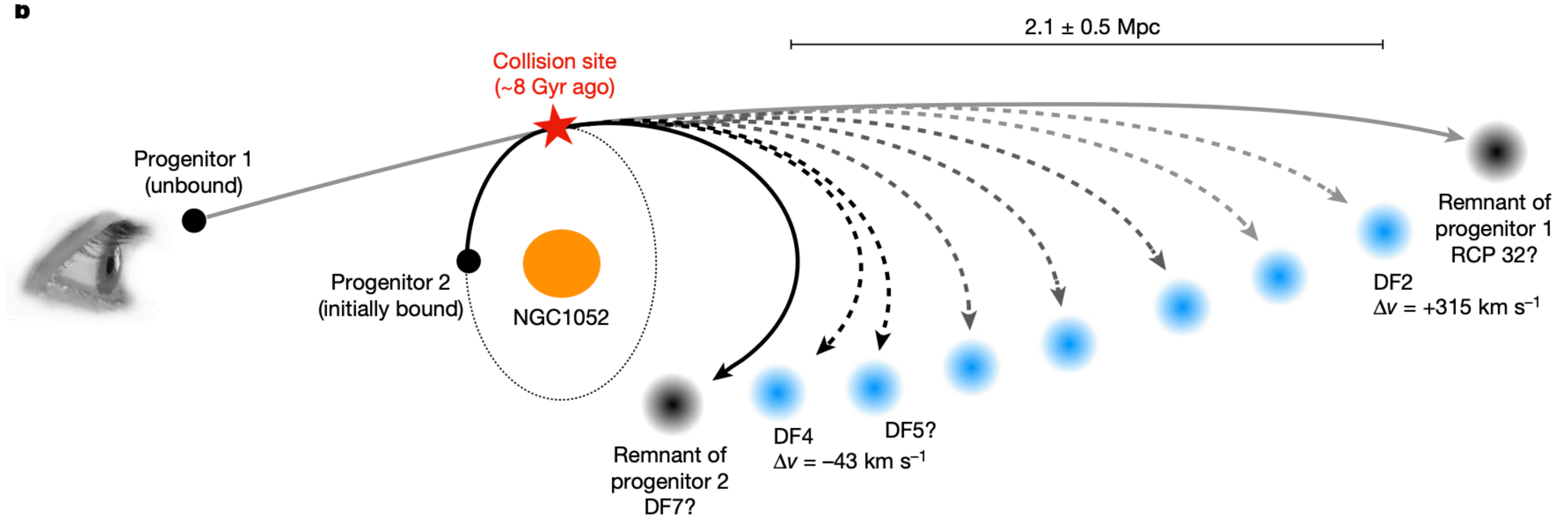
4



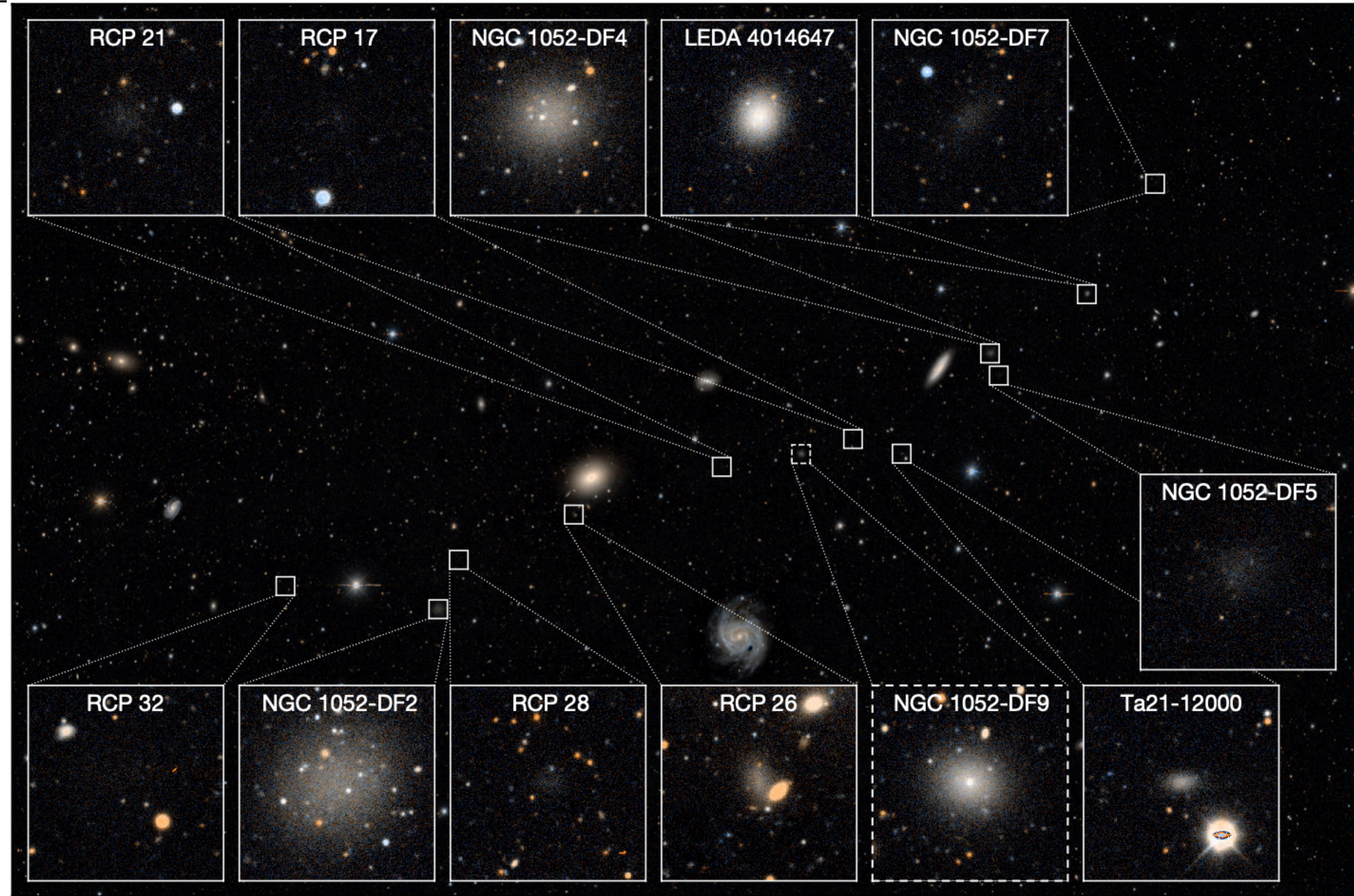
富气体暗晕高速碰撞



van Dokkum Nature 2022



富气体暗晕高速碰撞



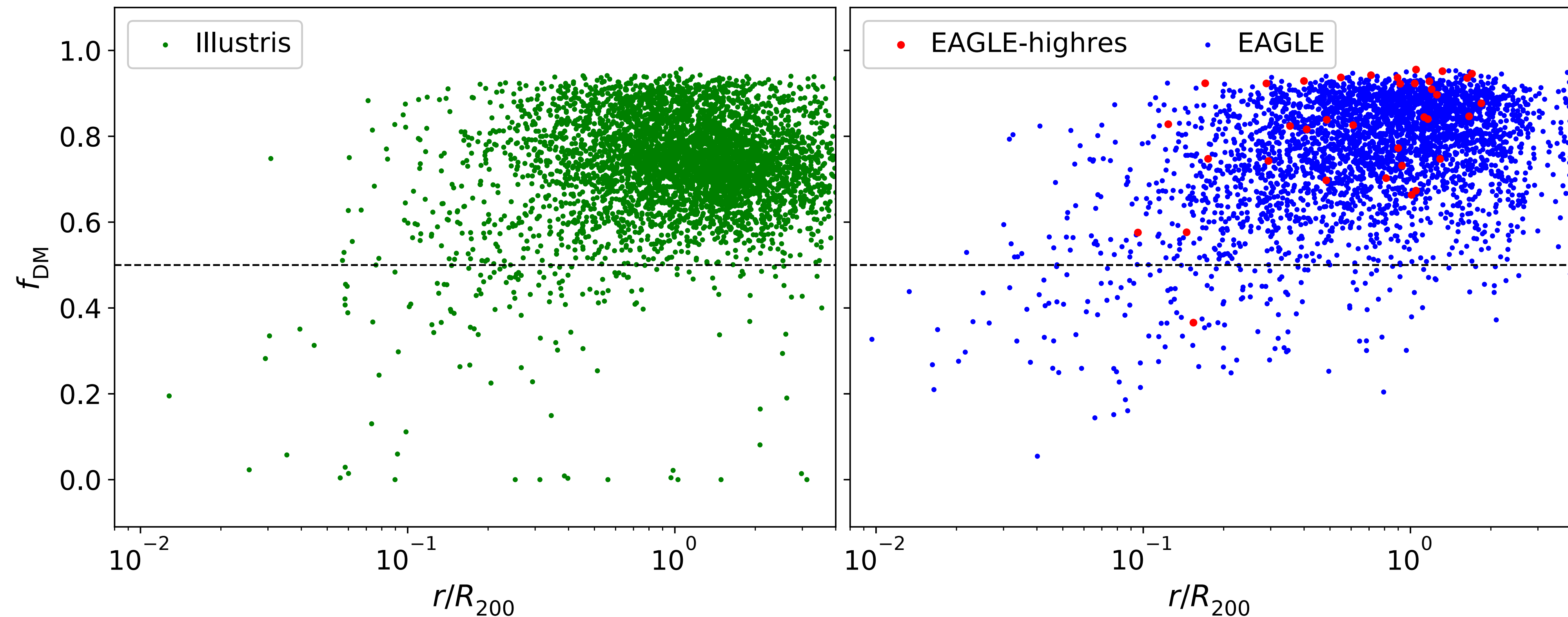
模拟中的暗物质缺失的矮星系



Table 1. Fraction of satellite galaxies with $f_{\text{DM}} < 0.5$ in haloes with $M_{200} > 10^{13} M_{\odot}$.

	Illustris	EAGLE	EAGLE-highres
Stellar mass limit	$M_* > 10^9 M_{\odot}$	$M_* > 10^9 M_{\odot}$	$M_* > 10^8 M_{\odot}$
Fraction of DMDGs in satellites	3.2%	5.0%	2.8%

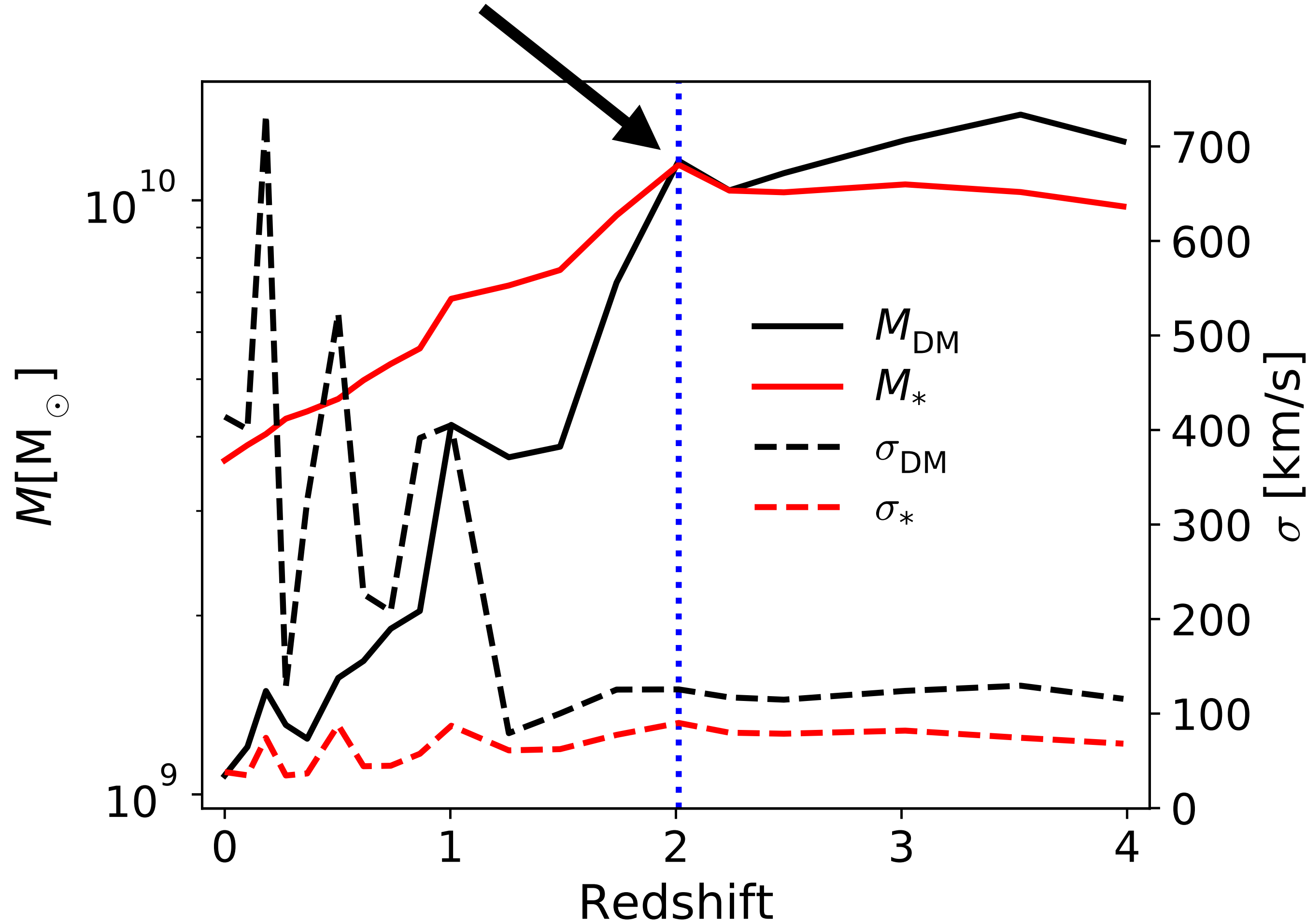
Yingjie Jing 2019



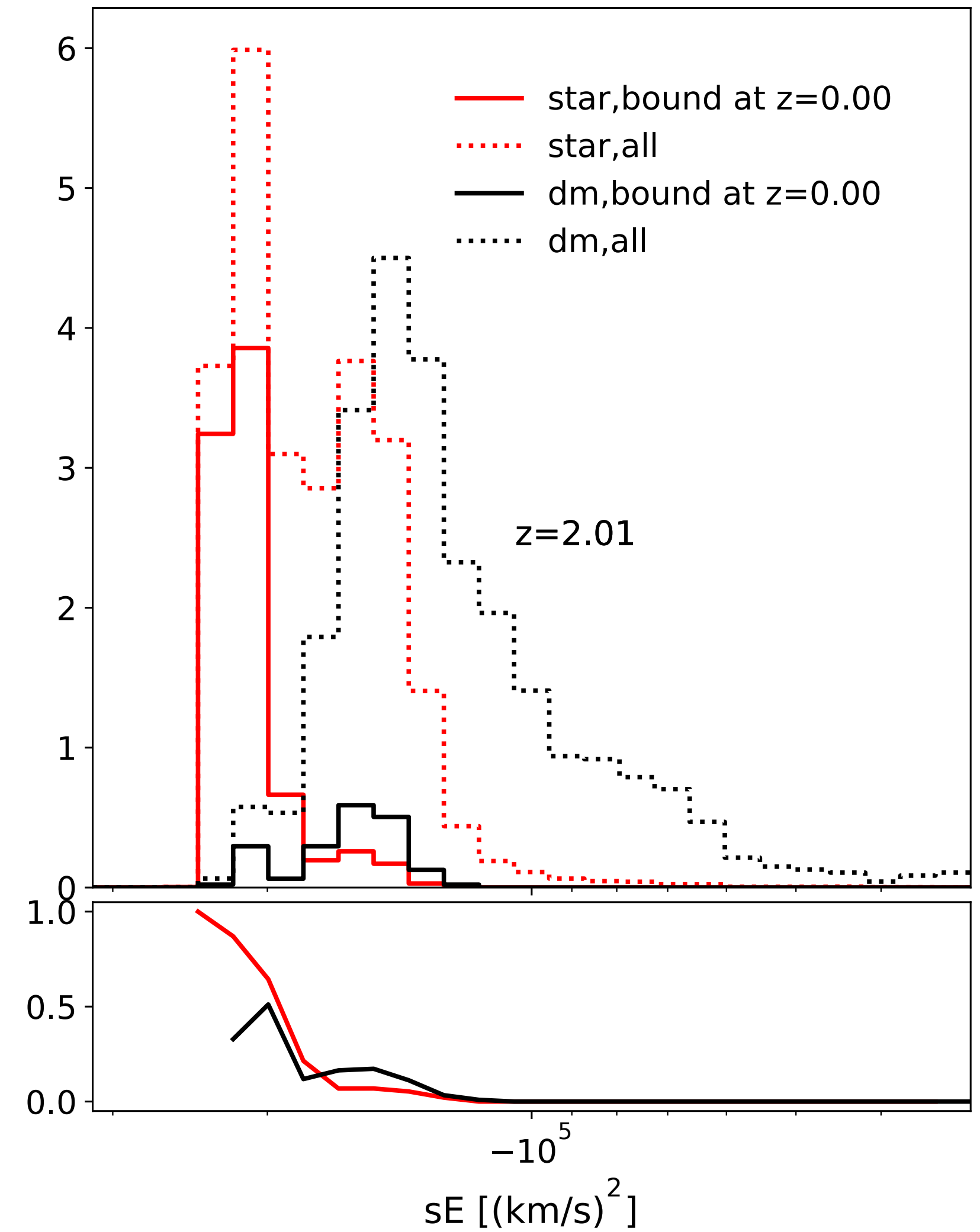
潮汐剥离形成机制



强潮汐剥离



Yingjie Jing 2019

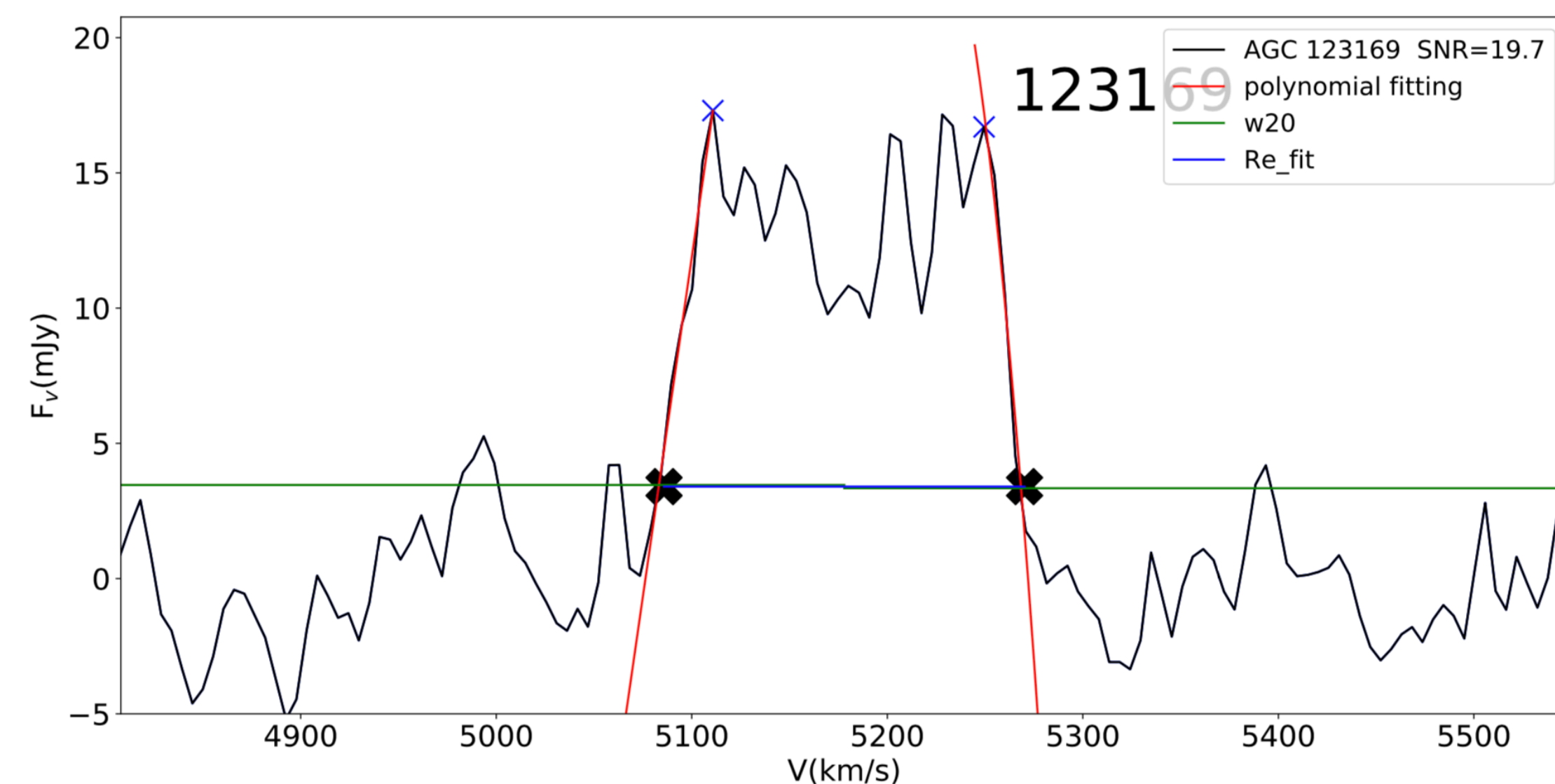


孤立环境中的DMDGs?

寻找孤立的暗物质缺失的矮星系



- Arecibo Legacy Fast ALFA (ALFALFA) survey
巡天深度: $z < 0.06$ 。
分辨率: $3.5'$
- 中性氢光谱 $S/N > 10$
 $M_r > -18$
 $b/a: 0.3 \sim 0.6$
- 我们获得 324 个矮星系母样本
- 我们这里定义中性氢半径内(R_{HI}) $M_{bar} > M_{DM}$
即为暗物质缺失的矮星系



方法



• 气体质量

$$M_{\text{HI}} = 2.36 \times 10^5 d^2 \int F dv [M_{\odot}]$$

$$1.33 \times M_{\text{HI}} (Y_{\text{P}}^{\text{BBN}} = 0.247)$$

• 恒星质量 (Bell, et al. 2003)

$$\log_{10}(M/L) = a_{\lambda} + b_{\lambda} \times (M_g - M_r). \text{ Kroupa IMF}$$

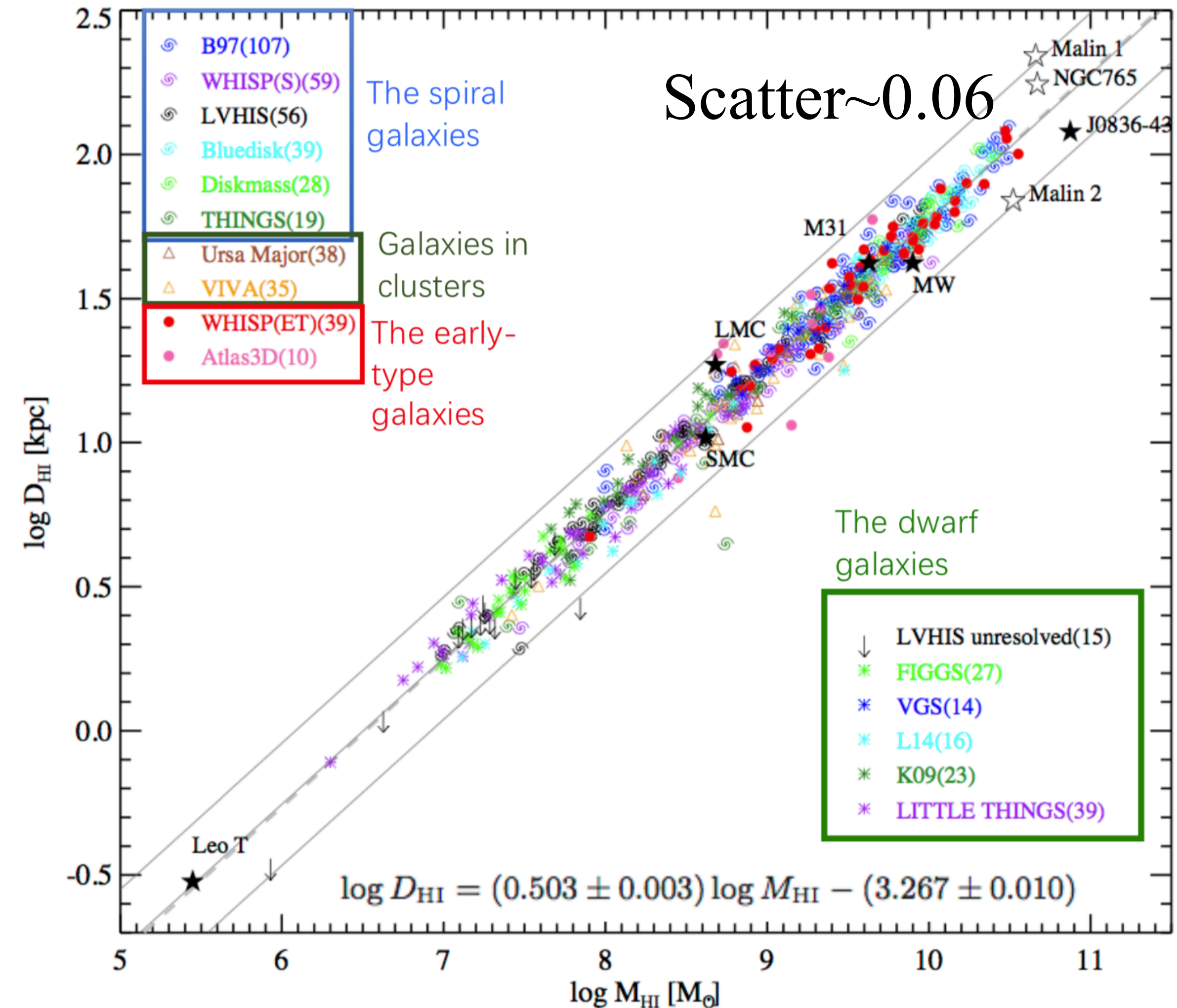
• 动力学质量

$$M_{\text{dyn}} (< r_{\text{HI}}) = V_{\text{HI}}^2 r_{\text{HI}} / G$$

$$\log r_{\text{HI}} = (0.506 \pm 0.003) \log M_{\text{HI}} - (3.293 \pm 0.009) - \log 2$$

(Jing Wang, et al. 2016)

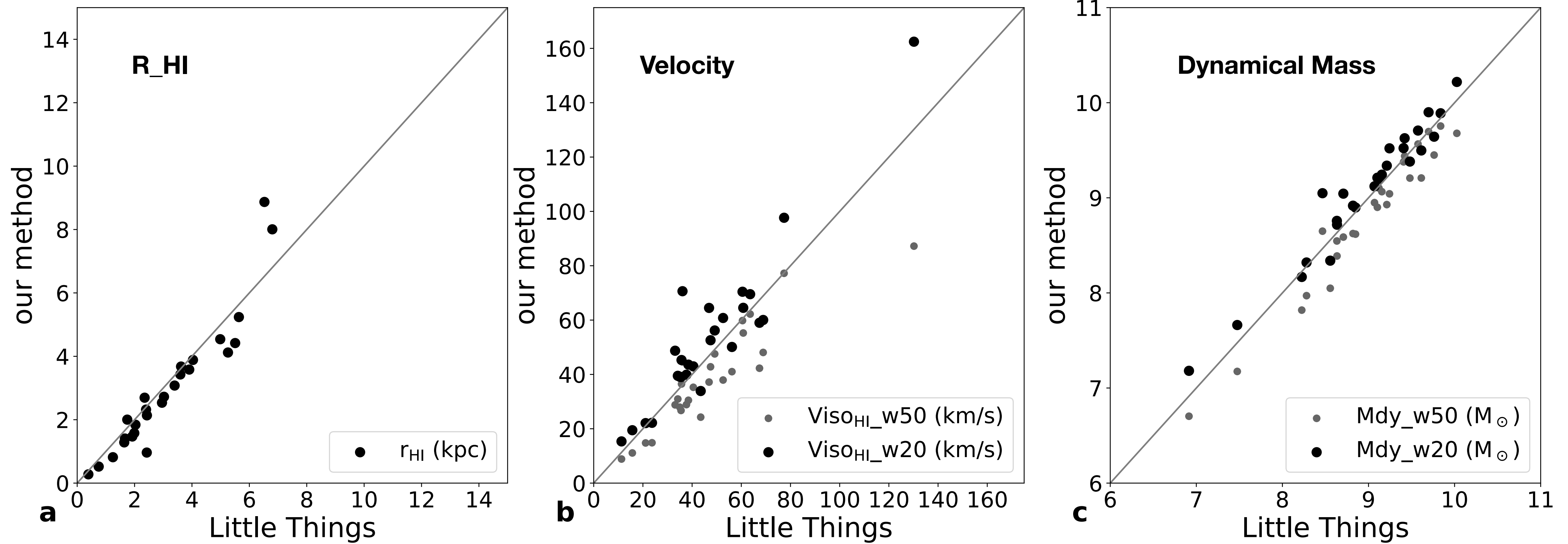
中心氢面密度到 $1 M_{\odot}/pc^2$ 的半径



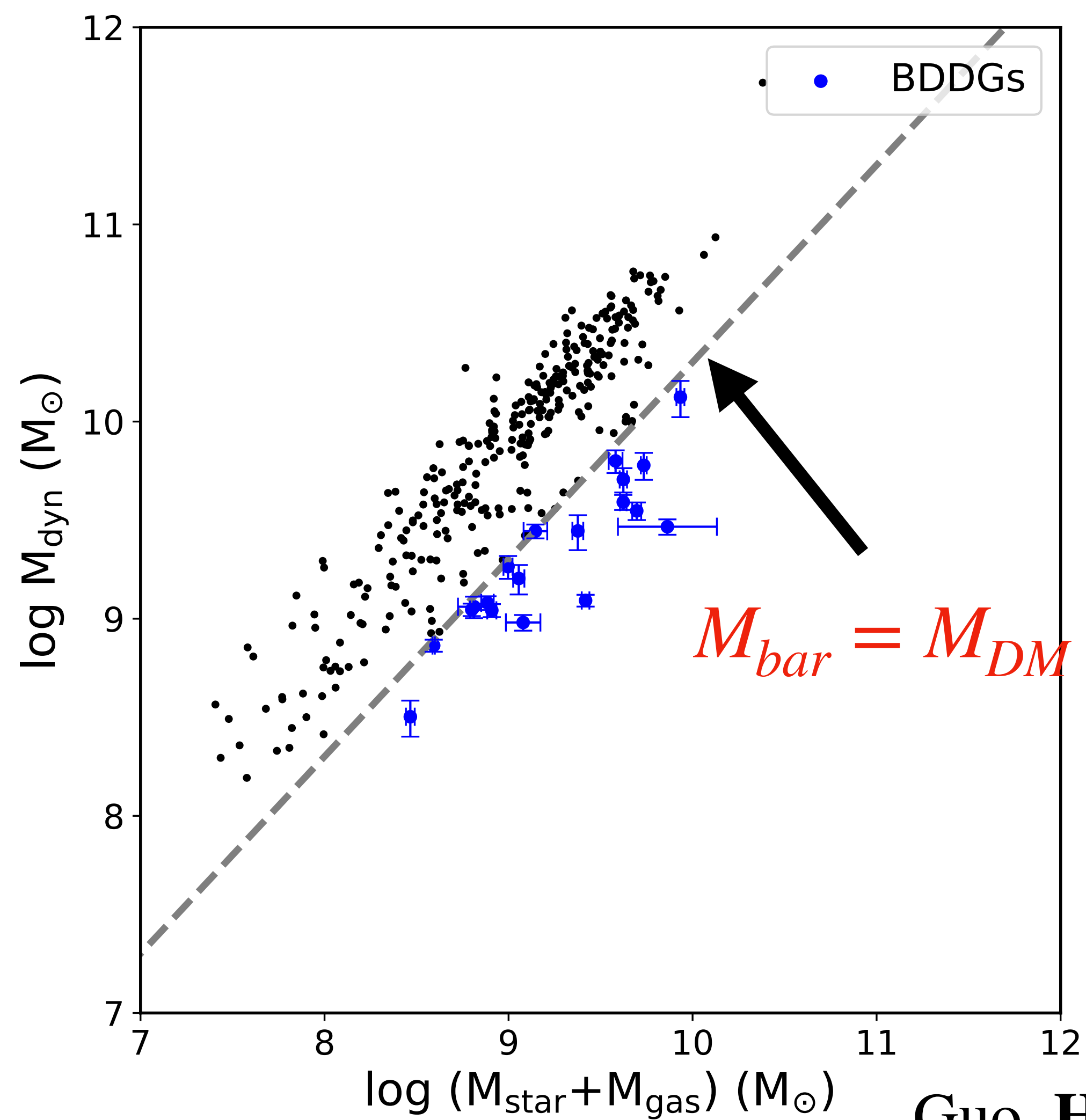
方法适用性



- LITTLE THINGS : a high-resolution, very-large-array(VLA) HI survey

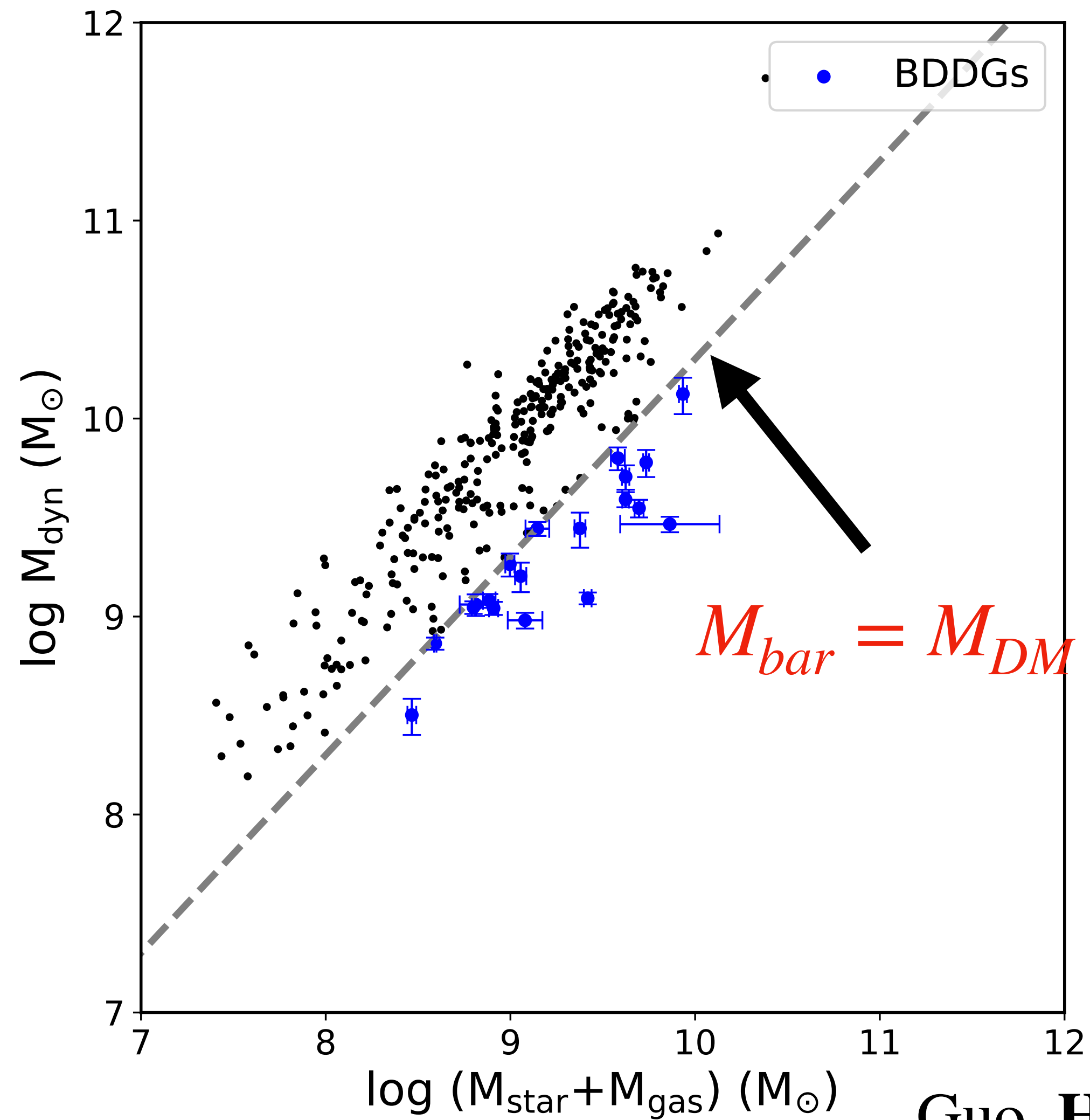


19个DMDGs候选体

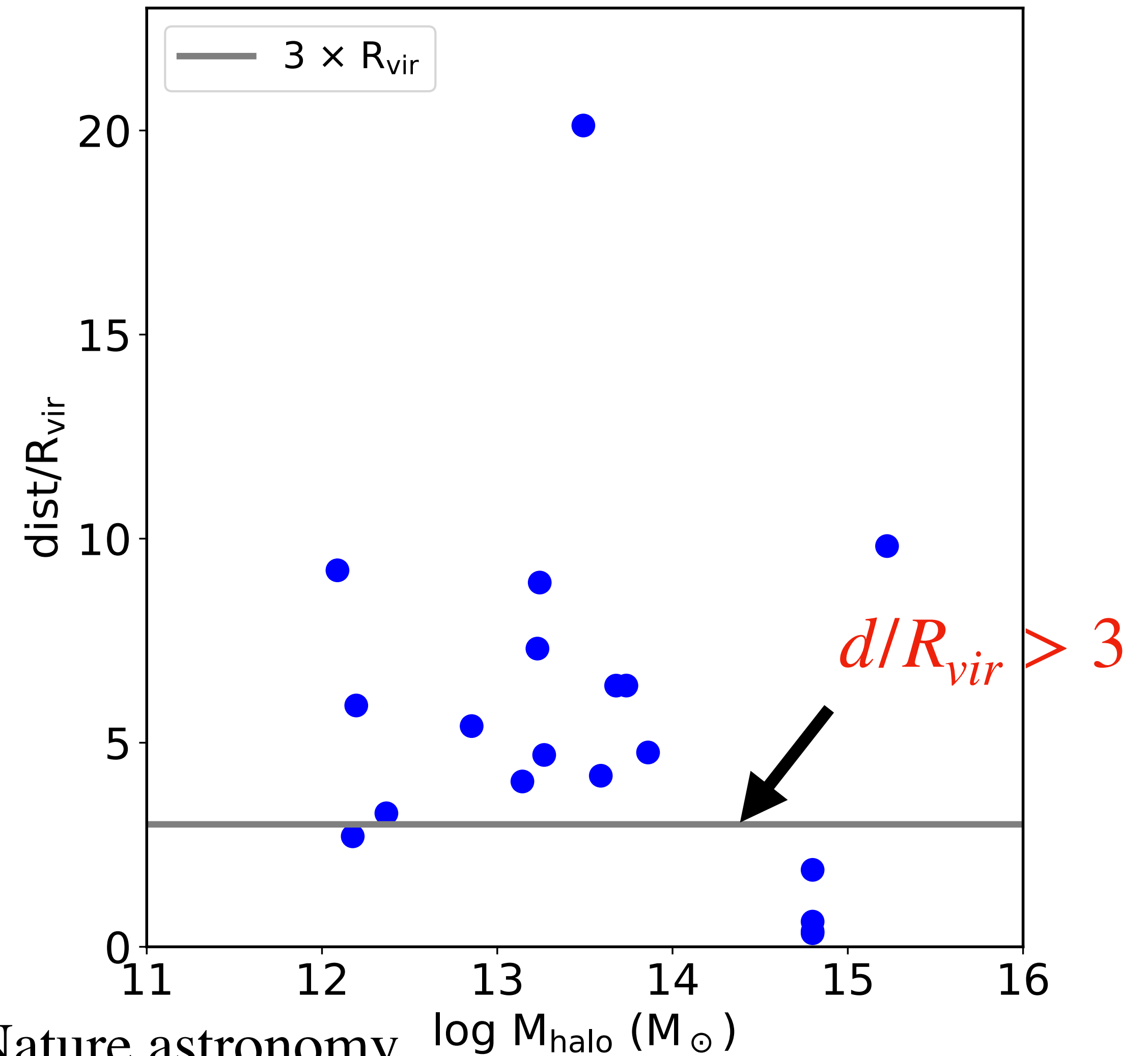


Guo, Hu+ 2020 Nature astronomy

19个DMDGs候选体, 14个在孤立环境中



Guo, Hu+ 2020 Nature astronomy



19个DMDGs候选体，14个在孤立环境中



目前模拟中没有发现孤立的DMDGs，这类星系挑战了当前的星系形成模型，并为暗物质的本质(温暗物质、模糊暗物质、自相互作用暗物质或是修改牛顿动力学)提供新的线索。

nature
astronomy

LETTERS

<https://doi.org/10.1038/s41550-019-0930-9>

Further evidence for a population of dark-matter-deficient dwarf galaxies

Qi Guo^{1,2,3*}, Huijie Hu^{1,2}, Zheng Zheng^{1,4}, Shihong Liao^{1,3}, Wei Du^{1,5}, Shude Mao^{1,6}, Linhua Jiang⁷, Jing Wang⁷, Yingjie Peng⁷, Liang Gao^{1,2,3}, Jie Wang^{1,2,3} and Hong Wu^{1,2,5}

Guo, Hu+ 2020 Nature astronomy

精确测量DMDGs的动力学质量



单天线的数据：无法获取星系中性氢盘的倾角和速度弥散引起的非对称漂移，需要借助于干涉阵列的高空间分辨率。

截止到目前，我们申请并获得了多个国际大型望远镜的公开时间：光学PCWI（3个晚上）射电干涉阵列GMRT（10小时）、VLA（60+60小时）。目前这些观测都已完成共计观测了7个DMDGs候选体，未来我们还会继续申请以上外加MUSE、MeerKAT的观测时间来扩充样本。

Proposal ID: VLA/25B-283

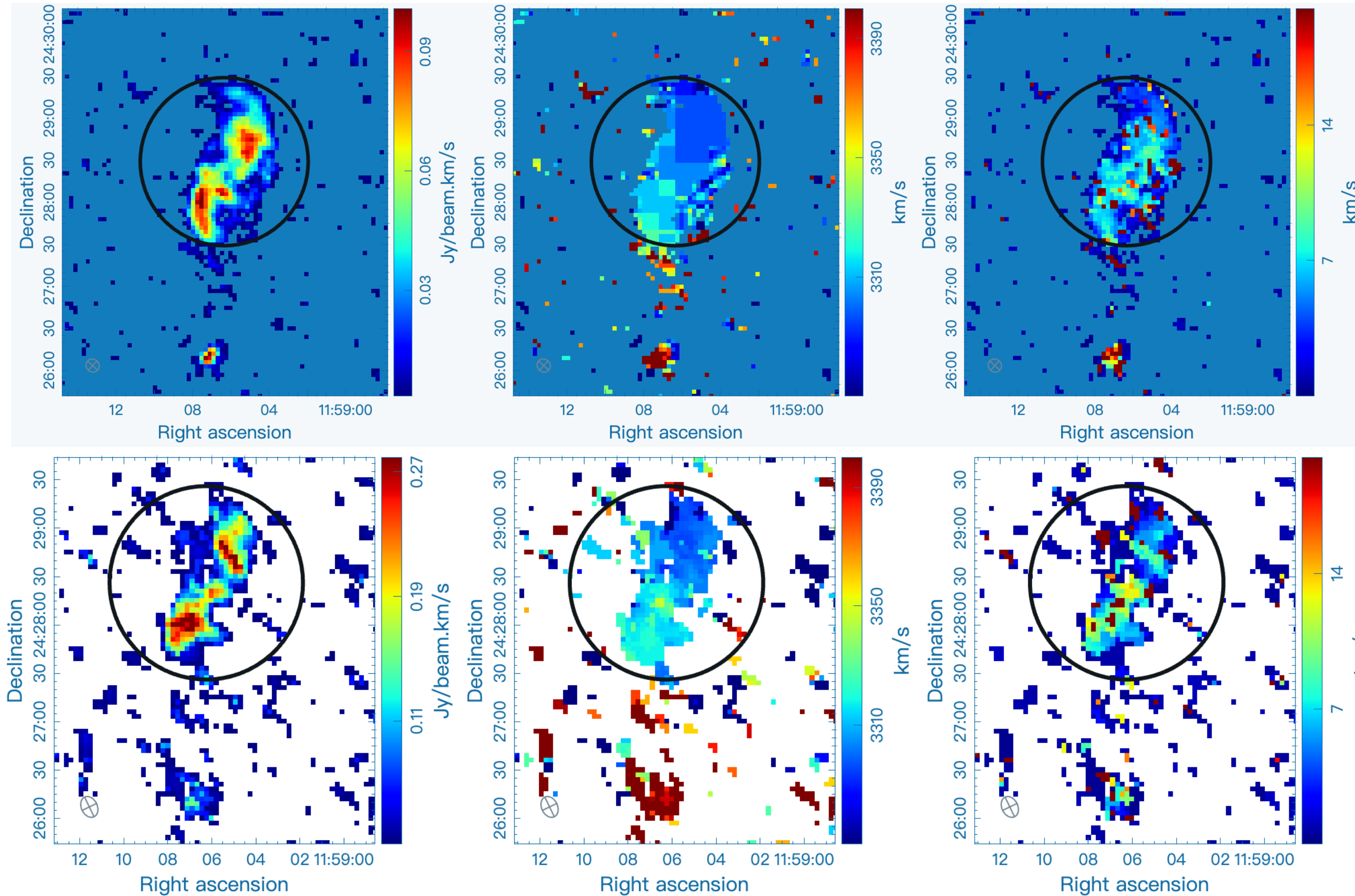
Proposal Title: Isolated dark matter deficient dwarf galaxies

Time Allocation Summary:
20.00 hours at Priority B.
40.00 hours at Priority C.





高分辨率观测初步结果



VLA

GMRT

Hu et al in prep

总结



- 矮星系应该是**暗物质主导的**，星系群中的暗物质缺失的矮星系可以被解释为**高速碰撞**或高度**潮汐剥离**的产物。我们在模拟中也找到这样的例子。
- 然而我们发现了14个**孤立的DMDGs**，目前这些系统无法被当前的宇宙学模拟/模型所解释，这给当前的星系形成理论和宇宙学提出了挑战。
- 观测不确定性确实影响我们的结果，因此后续高空间分辨率观测的进一步认证是十分必要的，一旦证实，这类星系将严重**挑战当前的星系形成模型**，并为暗物质的本质(或是**修改牛顿动力学**)提供新的线索。





谢谢!



胡慧杰@盱眙 2025/10/25



National Astronomical
Observatories, CAS
Computational Cosmology Group

中性氢半径与光学半径



- R_{HI} of BDDGs are well beyond r_e

