

数值模拟研究星系周 气体循环与星系演化

星系际介质-星系周介质-星际介质

基于数值模拟(IllustrisTNG) 一定性理解, 物理建模, 谨慎定量

杜敏 (厦门大学)

报告大纲

ILLUSTRIS TNG 模拟

01

研究动机与星系周介质



星系周介质为何是理解星系演化与宇宙重子清查的核心。

02

IllustrisTNG 模拟框架



数值方法、亚网格物理，以及相互补充的 TNG50、TNG100 和 TNG300 模拟体积。

03

重子循环的物理驱动机制



吸积、恒星与 AGN 驱动的外流、气体再循环及多相结构。

04

星系周介质-星系协同演化

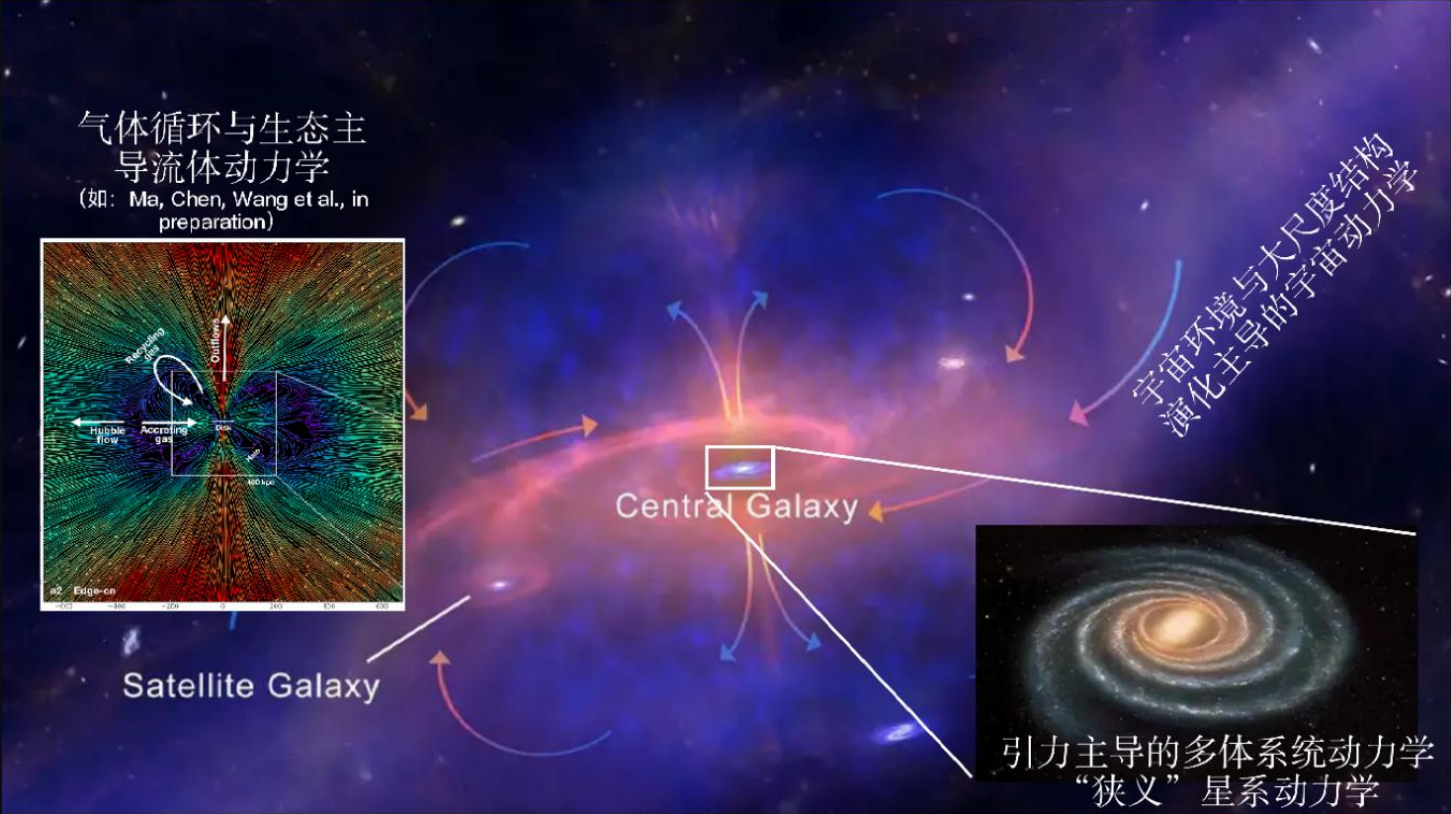


与恒星质量、淬火、角动量、形态和化学富集之间的联系。

为什么星系周介质至关重要

研究背景与动机

星系周生态系统与广义星系动力学



研究领域概览示意图：从宇宙环境与大尺度结构，到星系周介质、气体循环与星系动力学。

核心问题

星系以**开放系统**的方式演化：其增长受到与周围宇宙交换质量、金属和能量的调节，影响甚至主导星系演化。

星系周介质作为物理界面

星系周介质介导**星系际介质**与**星际介质**之间的交换：它既是供给星系的燃料库，也是恒星与AGN 驱动外流的接收端。

为什么模拟不可或缺

低密度气体本身就难以观测。**IllustrisTNG** 提供了自洽且具有时间分辨率的框架，可追踪气体从宇宙网到星系盘的演化。

星系周介质 Circumgalactic mediam (CGM)

ILLUSTRIS TNG 模拟

定义与空间尺度

- 定义：位于暗物质晕内、星系盘之外，以电离态为主的弥散气体。
- 范围：从外盘(~ 10 kpc) 延伸至维里半径(对于 L^* 星系晕约为 $\sim 200\text{--}300$ kpc)。
- 界面：连接星系际介质(IGM) 与星际介质(ISM) 的动力学纽带。

重子与金属储库

- 重子储库：星系周介质保留了相当一部分尚未并入星系的重子。
- 质量尺度：星系周气体质量可与恒星质量相当甚至更高，在大质量星系晕中尤其如此。
- 化学档案：它记录了恒星反馈和 AGN 反馈驱逐金属的历史。

多相热力学

- 冷相 $T \sim 10^4$ K; 由 H I 和低电离吸收线示踪。
- 温-热相 $T \sim 10^5\text{--}10^{5.5}$ K; 通常由 O VI 示踪。
- 热相 $T \sim 10^6\text{--}10^7$ K; 可通过微弱的弥散 X 射线辐射探测。

关键科学问题

- 燃料调控：星系周介质如何获取、控制输送至星系的气体供给？
- 反馈响应：超新星和 AGN 如何重塑星系周介质结构？
- 演化路径：星系周介质的状态如何促成持续恒星形成或星系淬火？

为什么数值模拟不可或缺

ILLUSTRIS TNG 模拟

观测挑战

- **极低的气体密度**
弥散的星系周介质辐射本身极其微弱，难以直接成像。
- **吸收线选择效应**
测量需要类星体等背景光源，而且只能采样离散的视线。
- **空间覆盖不完整**
从星系到维里边界的完整径向范围难以绘制。

模拟能够提供什么

- **自洽的演化历史**
在宇宙时间尺度上追踪重子从宇宙网丝状结构到星系盘的演化。
- **完整的相空间信息**
同时提供三维分布以及密度、温度、金属丰度和速度场。
- **可控的物理实验**
可以改变亚网格处方，从而分离反馈及其他过程的影响。

正向建模

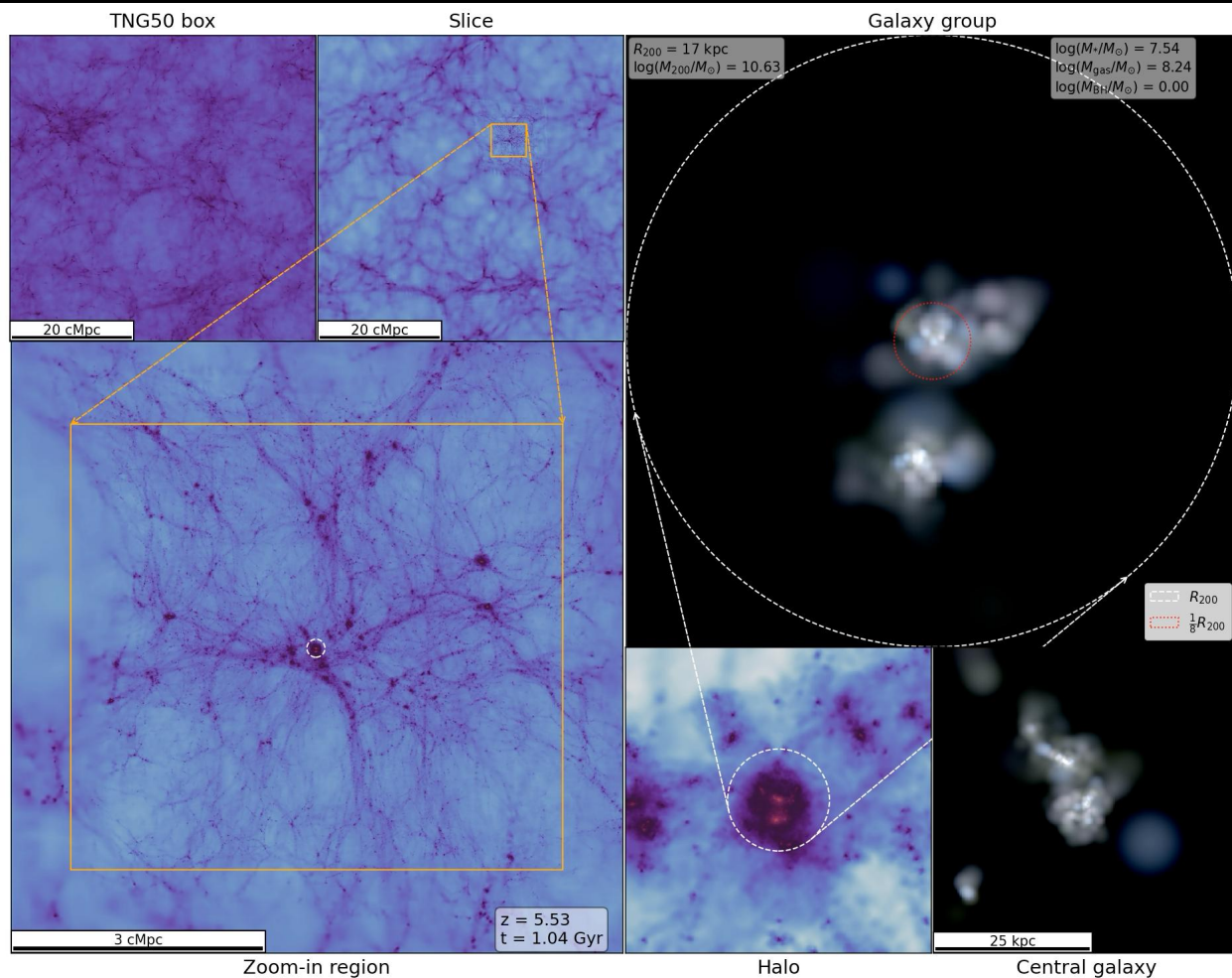
正向建模：可将模拟转换为合成光谱和图像，从而与 SKA、HST/COS、JWST 及其他观测进行同类比较。

数据来源：Pillepich+2018, arXiv:1703.02970

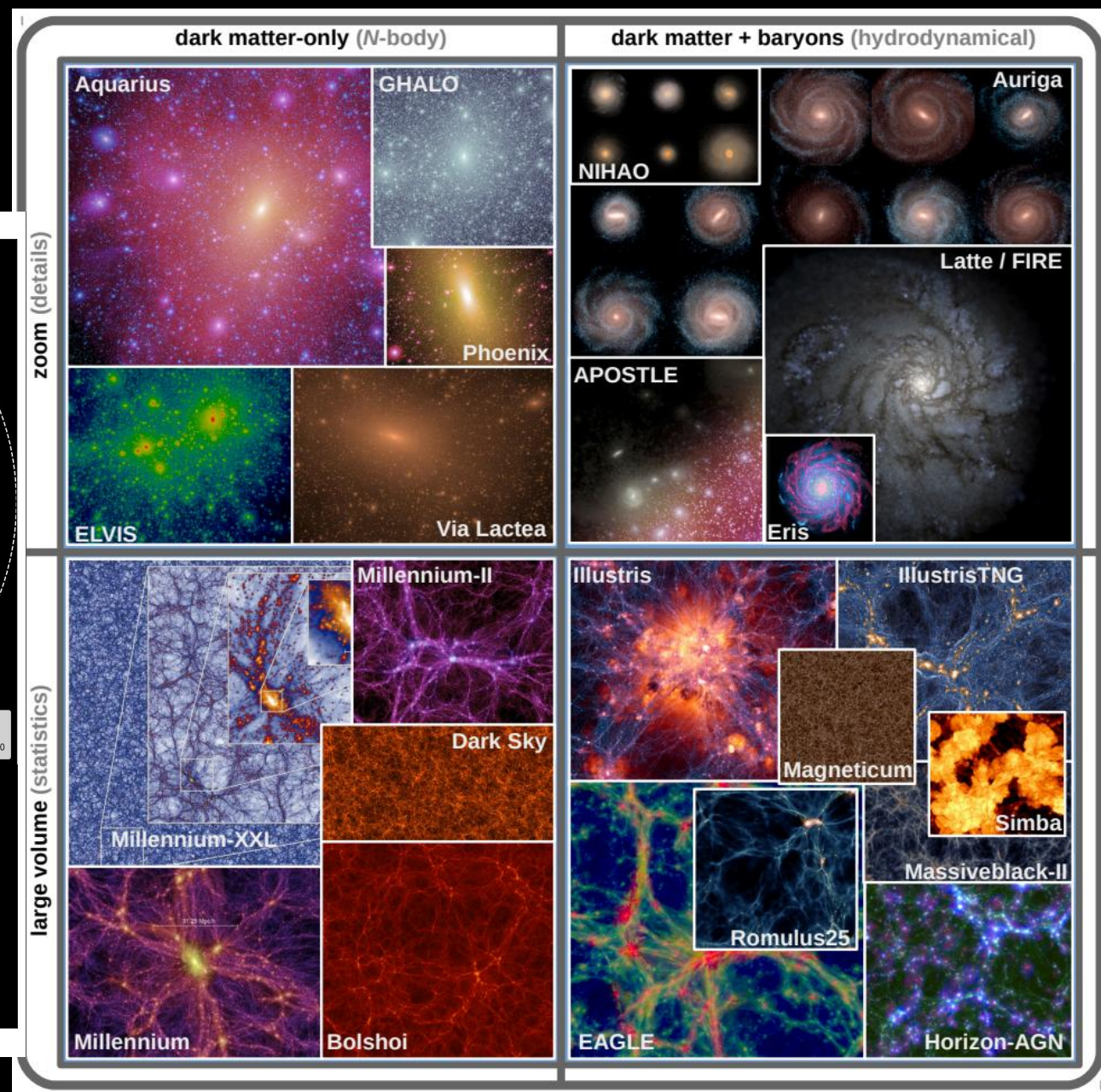
近15年以来，多体+流体星系宇宙学数值模拟取得了重大的进展
科学为基，猜想为翼。混沌重开，再演乾坤。

数值模拟是天文学研究的实验室，是强有力的工具。

- 研究普遍规律
- 测试不同物理模型、关键物理参数的影响
- 直观演示复杂物理过程，解释观测现象



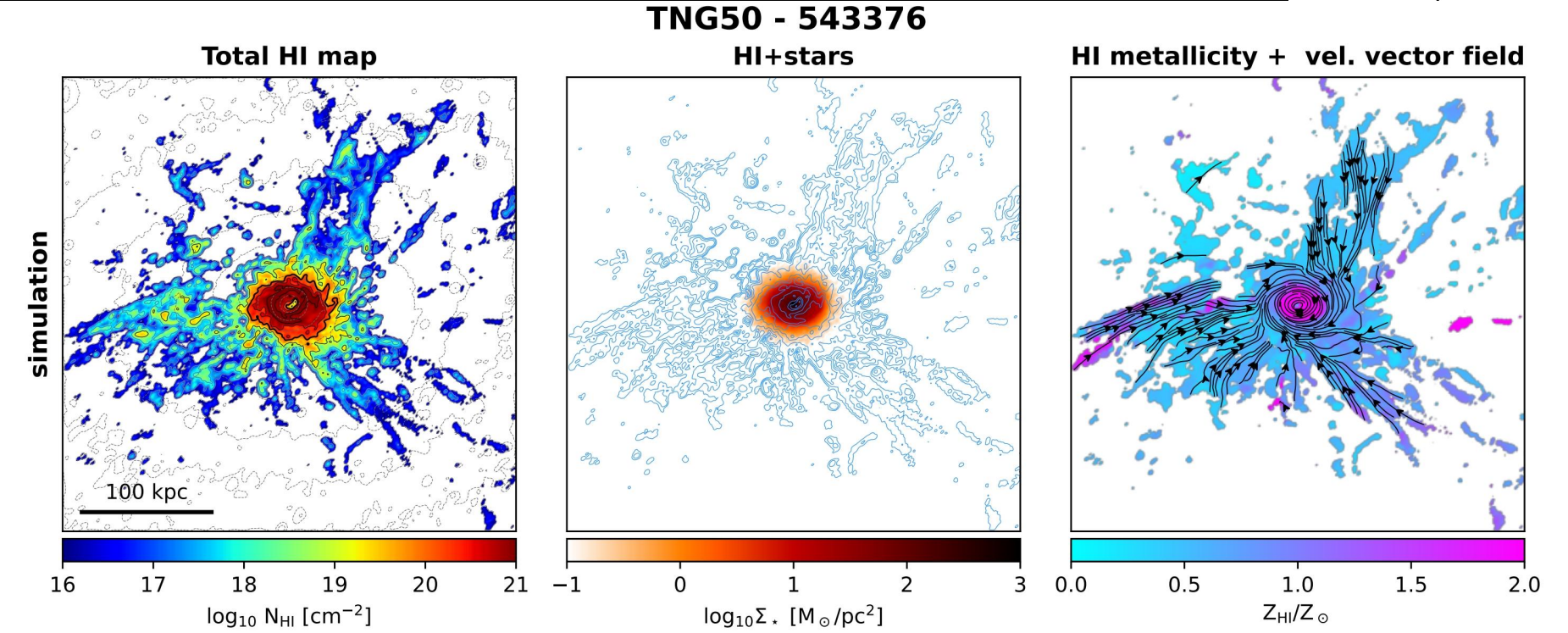
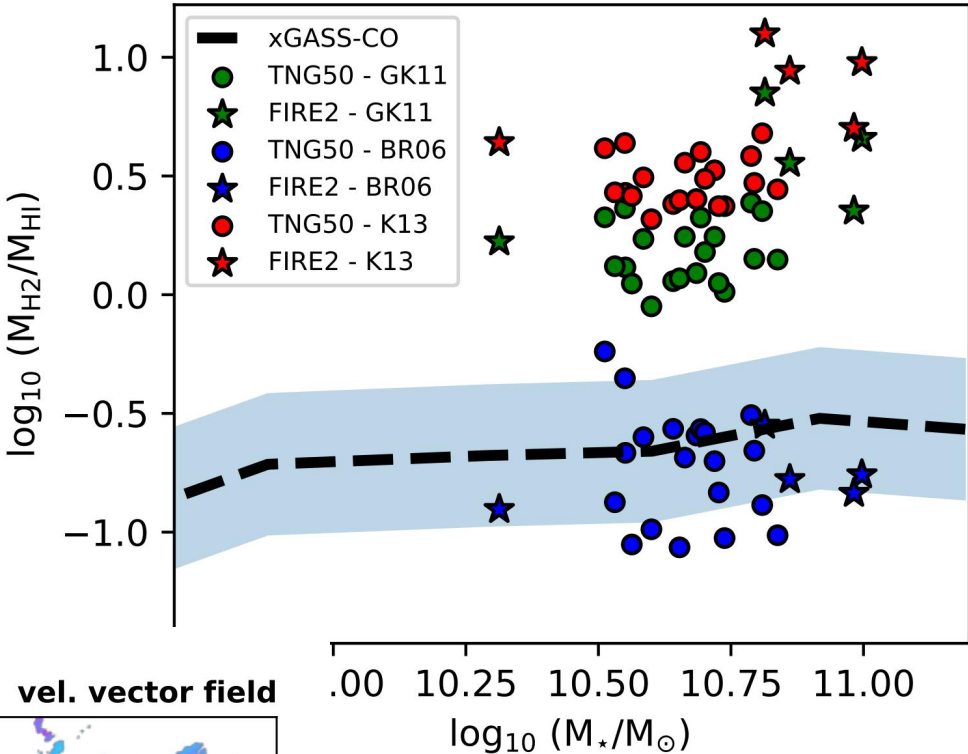
Lu 卢帅



数值模拟的“超级视角” vs. 观测

Comparing MeerKAT observations with mock data from TNG50 and FIRE-2

Marasco et al. (2025)



IllustrisTNG simulations

ILLUSTRIS TNG 模拟

计算程序与设置

代码 AREPO moving mesh

方程 Ideal MHD

AREPO (Springel 2010) 结合了拉格朗日方法与欧拉方法的优势，适用于高度非线性的宇宙结构形成。

红移范围 $z = 127 \rightarrow 0$

输出 100 个快照

Planck 2015 宇宙学

$\Omega_{\Lambda,0}$
0.6911

$\Omega_{m,0}$
0.3089

$\Omega_{b,0}$
0.0486

σ_8
0.8159

h
0.6774

n_s
0.9667

参数值根据当代对宇宙微波背景 (CMB) 和大尺度结构的约束进行了标定。

公开数据发布

数据规模 ~ 1.1 PB

参考文献 Nelson+ 2019

由马克斯·普朗克天体物理学研究所及合作机构牵头的国际合作项目。

数据访问:
www.tng-project.org/data/

IllustrisTNG simulations

ILLUSTRIS TNG 模拟

属性	TNG50	TNG100	TNG300
模拟盒边长(Lbox)	51.7 Mpc	110.7 Mpc	302.6 Mpc
暗物质质量分辨率	$4.5 \times 10^5 M_{\odot}$	$7.5 \times 10^6 M_{\odot}$	$5.9 \times 10^7 M_{\odot}$
重子质量分辨率	$8.5 \times 10^4 M_{\odot}$	$1.4 \times 10^6 M_{\odot}$	$1.1 \times 10^7 M_{\odot}$
最高空间分辨率	70 - 140 pc	~370 pc	~700 pc
主要科学用途	星系内部结构与星系周介质微观物理	星系群体与演化趋势	星系团与大尺度环境统计



TNG50 在保留宇宙学环境的同时，将恒星形成区解析至 70–140 pc，因此特别适合研究冷云演化和湍流混合等小尺度星系周介质过程。

IllustrisTNG 中的亚网格物理

亚网格物理机制

01

✳ 辐射冷却与恒星形成

原初气体冷却与金属线冷却作用于随红移变化的电离背景，并包含自屏蔽修正。

冷却：与金属富集耦合

恒星形成：有效状态方程

阈值：依赖密度的随机转化

02

⚙ 化学富集与恒星反馈

追踪来自 Ia 型超新星、II 型超新星、AGB 星和中子星并合的富集过程，同时追踪将金属沉积到星系周介质中的动能风。

追踪元素：H、He、C、N、O、Ne、Mg、Si、Fe

反馈：能量驱动的动能风

03

↻ 双模式 AGN 反馈

TNG 的核心创新之一：反馈模式随吸积状态变化，从而调节气体供给并促成大质量星系淬火。

类星体模式：高吸积率 → 局域热耦合

动能模式：低吸积率 → 动量驱动的大尺度外流

04

⤿ 磁流体力学(MHD)

AREPO 移动网格求解理想 MHD；微弱的种子磁场在结构形成过程中被放大至具有动力学意义的强度。

种子磁场： 10^{-14} 共动高斯

放大：具有动力学意义的星系周介质磁场

IllustrisTNG 如何模拟星系周介质

❄️ 冷却与吸积

辐射冷却和引力流入共同决定跨越**维里半径**的气体供给。

⇒ 恒星驱动风

动能风在 ISM 与星系周介质之间重新分配气体、能量和金属。

🌀 双模式 AGN 反馈

热反馈和**动能模式**通道在不同吸积状态下调节中心与星系晕气体。

U 磁流体力学

磁场支持对压力支撑、输运和星系周介质稳定性的检验。

☄️ 多相电离

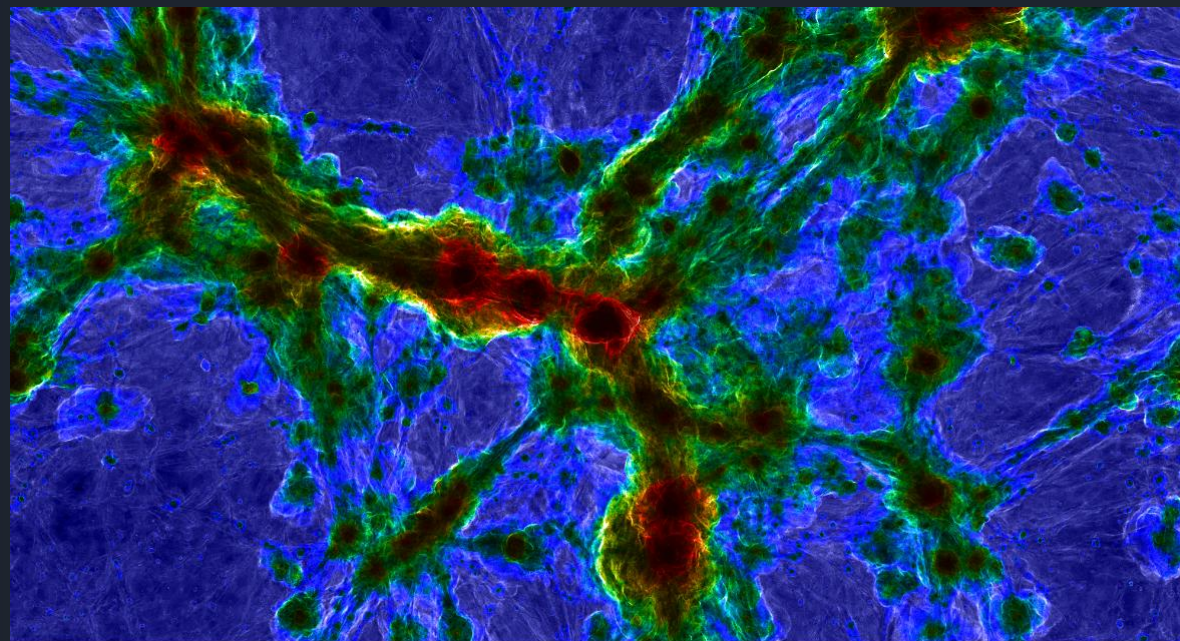
O VI、**O VII** 和 **O VIII** 的离子预言将模拟气体与吸收线和 X 射线示踪量相连。

🔄 耦合演化

星系周介质可观测测量源于星系晕、星系及未解析物理过程的共同历史。

模拟宇宙环境

TNG100-1 中的气体温度与激波结构



气体场的大尺度可视化：热结构和激波给出了单个星系周介质晕演化所处的环境背景。

图片：TNG Collaboration / IllustrisTNG Project (TNG100-1)。

星系周介质(CGM) 注入的复杂性: 气体冷模与热模吸积

两种理想化吸积通道 · 示意图而非定量分类

❄️ 冷模吸积 cold-mode accretion



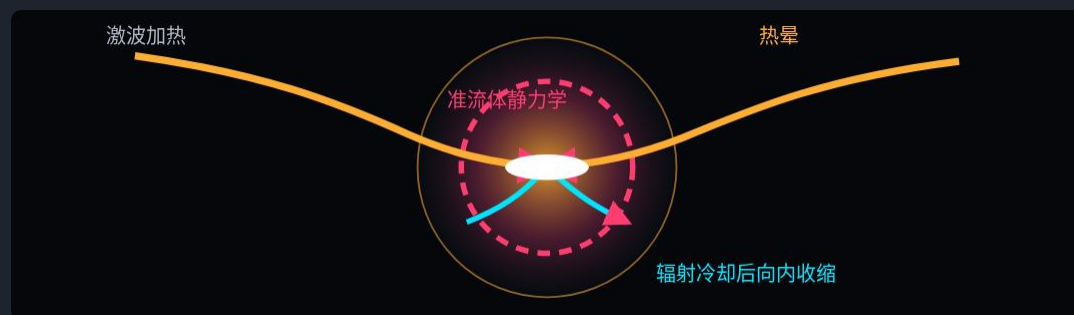
→ 丝状、非均匀

较冷气体沿优选通道进入晕，并可能向中心输运。

→ 时期与模型依赖

高红移常更显著；存续受晕质量、混合与反馈影响。

🔥 热模吸积 hot-mode accretion



→ 热晕储库

落入气体先被加热，形成近似准流体静力学的晕。

→ 反馈与冷却决定供给

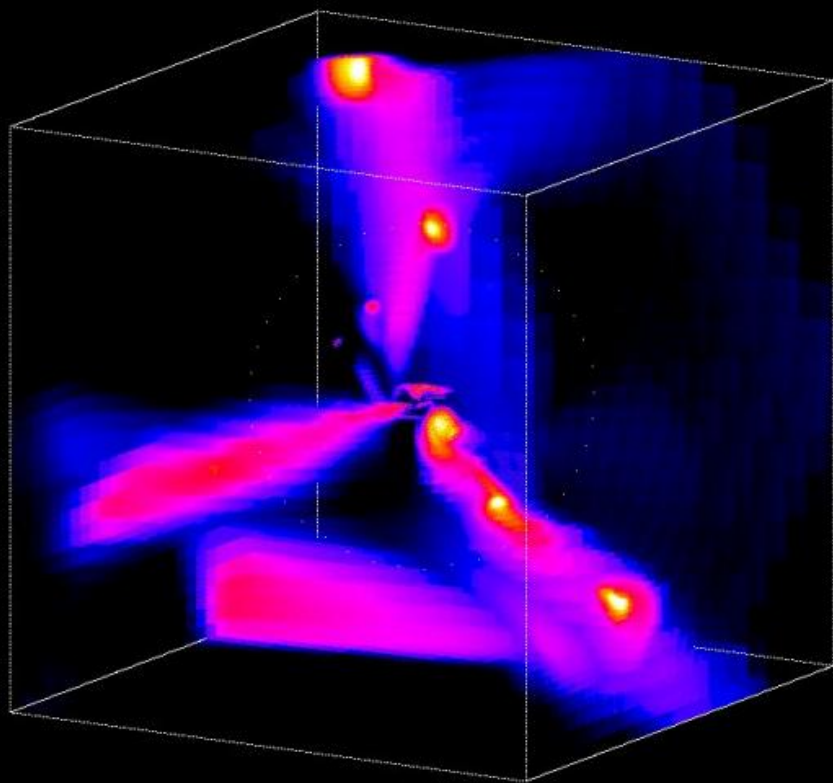
到达星系前需辐射冷却；AGN与恒星 反馈可能改变供给效率。

🔗 如何理解两种模型

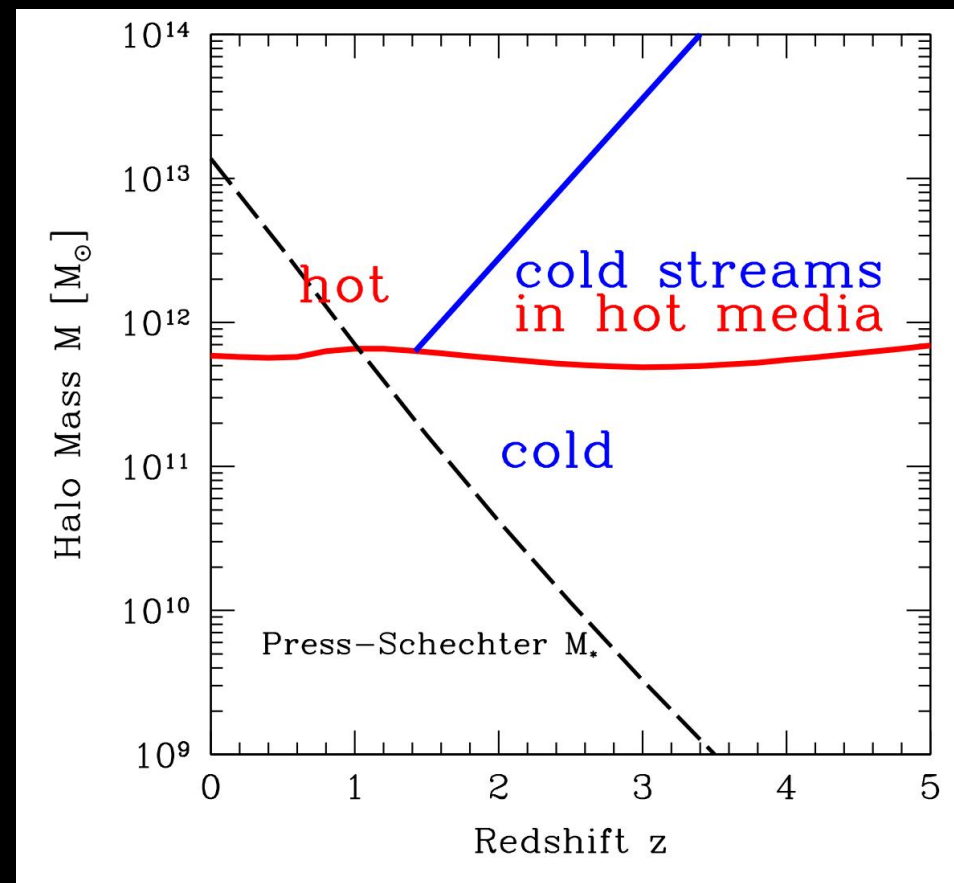
冷流与热模是有用的**理想化图景**，实际 CGM 中可能同时存在并相互转化。相对贡献取决于 **晕质量、红移、几何、混合与反馈模型**；本页图示用于建立物理直觉，不是对单个星系的分类或定量预测。

星系周介质(CGM) 注入的复杂性: 气体冷模与热模吸积

两种理想化吸积通道 · 示意图而非定量分类



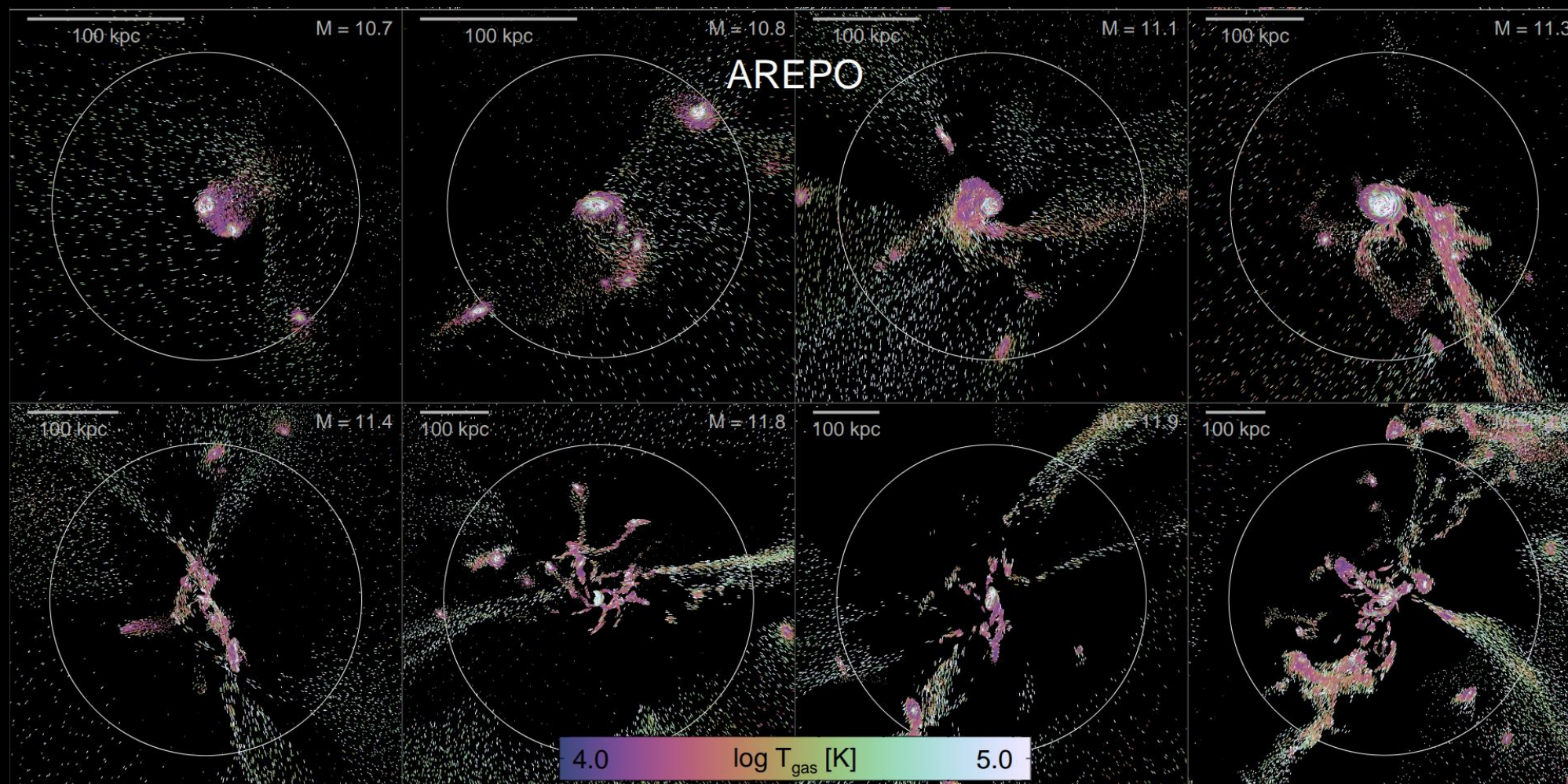
Dekel et al. (2010)



Analytic prediction for the regimes dominated by cold flows and shock-heated medium in the plane of halo mass and redshift

星系周介质(CGM) 注入的复杂性: 不同质量星系, 不同吸积形式

两种理想化吸积通道 · 示意图而非定量分类

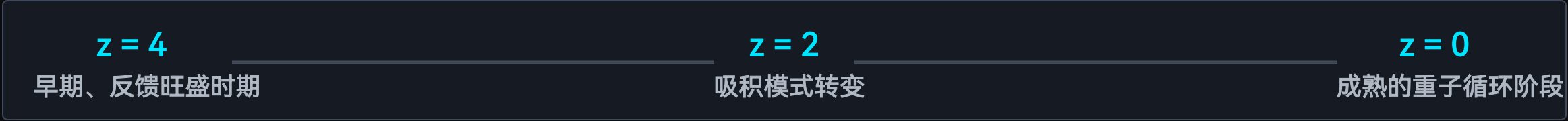


AREPO模拟 $z=2$ 时刻不同吸积模式

低质量星系 - 圆吸积
大质量星系 - 冷模
filament吸积

CGM 的宇宙学演化

IllustrisTNG 数值模拟



化学富集与质量增长

- O VI 演化:** 承载 O VI 的气相随暗晕增长、金属富集和热状态变化而演化；在所有晕质量范围内，其变化并不预期是单调的。
- 金属富集:** 恒星演化与反馈的累积作用不断富集晕气体；延迟发生的 Ia 型超新星与 AGB 恒星贡献进一步塑造丰度比。
- 梯度形成:** 大质量星系可形成持续的负金属丰度梯度，随后受到混合与 AGN 驱动输运的改造。



动力学与吸积模式

- 外流动力学:** 高红移时气体分数与恒星形成活动更高，反馈驱动的星系风通常也更强。
- 吸积转变:** 早期冷丝状吸积占主导；在低红移的大质量晕中，维里加热对入流的调控日益增强。
- 重子平衡:** 入流、外流与再循环的相对重要性随红移、晕质量及反馈历史而变化。



CGM 化学富集

ILLUSTRATING · 重子循环



核坍缩超新星

大质量恒星的快速爆炸，主导 CGM 早期的 α 元素富集。

O

Mg

Ne

Si



Ia 型超新星

延迟发生的热核爆炸，在更长时间尺度上以铁峰元素富集暗晕气体。

Fe

Ni

Cr

Mn



AGB 恒星

演化后的低质量与中等质量恒星提供延迟的 C、N 富集，补充超新星产额。

C

N

He

重子循环与运输

- 原初入流：低金属丰度气体沿宇宙网进入暗晕。
- 反馈外流：超新星与 AGN 将 ISM 中富集的物质输送到 CGM。
- 再循环：富集的晕气体可以冷却，并沿星系喷泉路径再次吸积。

空间与时间趋势

径向梯度

金属丰度通常随半径增大而降低；AGN 驱动的运输可重塑大质量晕中的这一模式。

质量依赖

更深的势阱与反馈历史决定金属如何被保留、运输和混合。

红移演化

晕气体金属丰度反映恒星形成、恒星演化和反馈的累积历史。

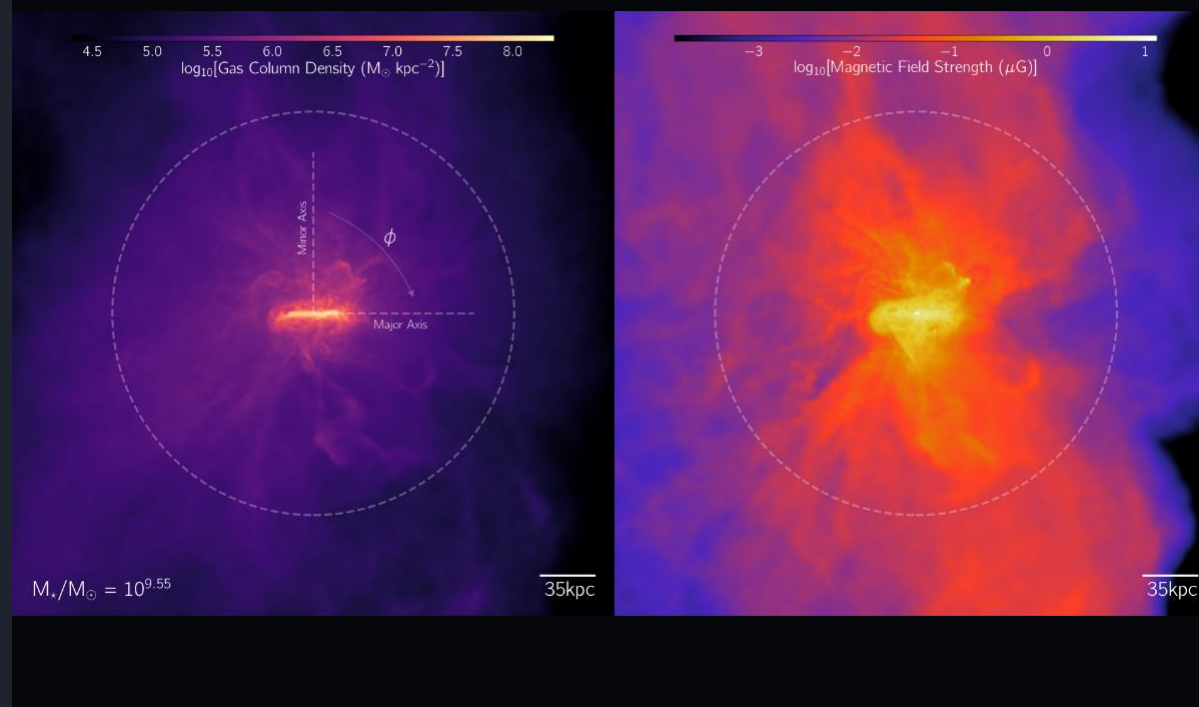
混合

已解析的平流与未解析的混合处方仍是重要的建模不确定性。

来源: Naiman et al. (2018) ; Pillepich et al. (2018)

星系周介质的复杂性：磁化星系周介质

直接 MHD 模拟可视化 · $z = 0$ 时的 TNG50



代表性的 TNG50 MHD 星系，侧视。左图为气体柱密度，右图为质量加权磁场强度；虚线圆标示维里半径。这是直接模拟可视化，并非真实星系晕的测量。

除密度、温度和速度外，磁场还为星系周介质状态引入了**各向异性且依赖历史**的分量。

反馈塑造的几何形态

在模拟中，较强磁场出现在扁平的中心区域，并优先沿受反馈影响的方向延展。

输运过程可能改变

磁场几何可影响混合、热传导和宇宙线输运；这些效应必须结合模型的 MHD 处理加以解释。

物理诊断，而非普适模板

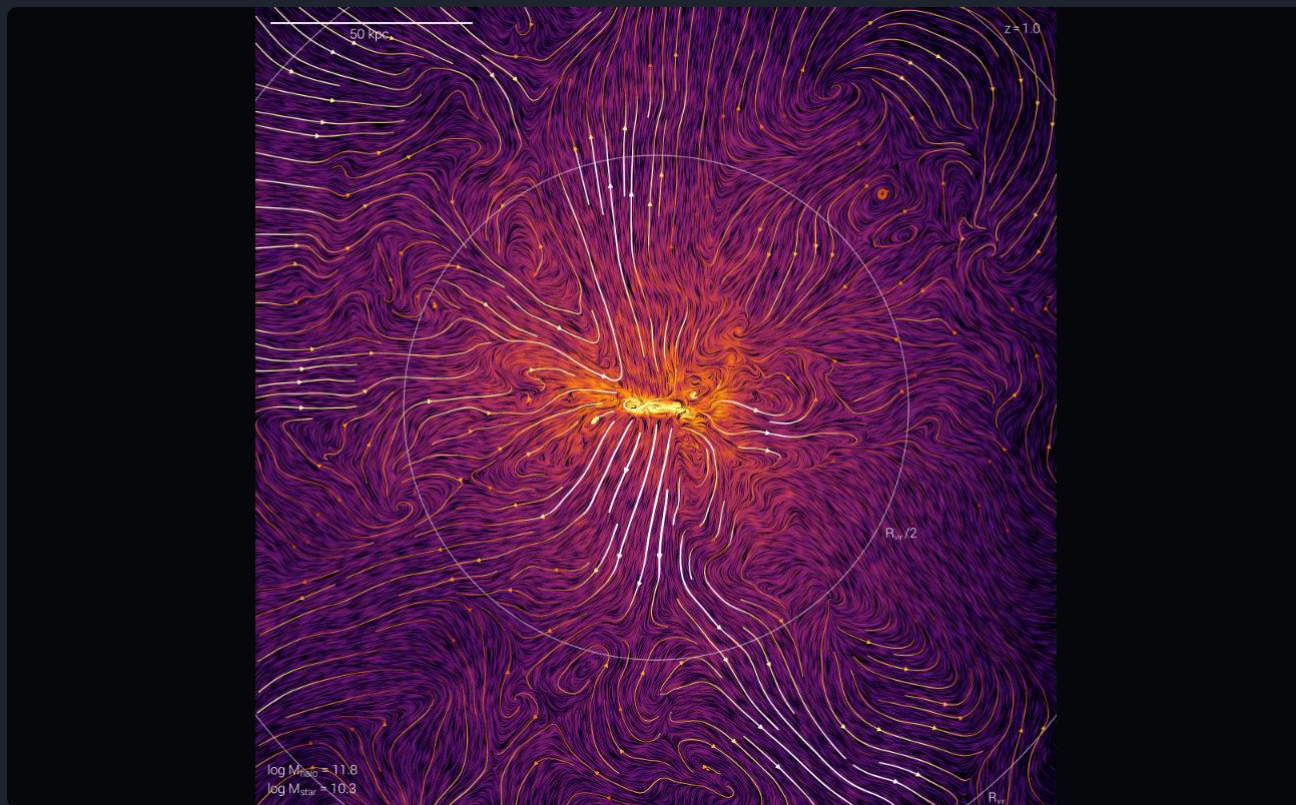
单个渲染星系仅展示一种可能构型。群体趋势需要跨质量、演化阶段与反馈历史的受控样本。

解释边界

磁场各向异性依赖模型。该图激励对星系周介质磁化的检验，而非给出一一对应的观测预言。

星系周介质的复杂性：模拟星系热晕中的丝状流入

直接模拟可视化 · $z = 1$ 时的 TNG50



TNG50 中的星系晕尺度流动拓扑。在密度渲染图上叠加流线，展示单个模拟星系晕中同时存在的流入与流出路径。这是直接模拟可视化，并非观测。

热晕并非静态储库：它可被**各向异性流入**贯穿，同时反馈沿其他路径将气体向外驱动。

丝状运输

气体供给受宇宙网组织，流入集中在优选通道，而非均匀分布于星系晕表面。

多相界面

较冷的流入物质遭遇更热的星系周环境，使混合、激波和辐射冷却成为决定吸积命运的核心过程。

与冷流的联系

在更高红移，专门的 TNG50 分析识别出大质量星系晕中的狭窄冷流；其存续取决于星系晕质量、时代以及对混合和反馈的建模。

星系周介质的复杂性：气体再循环与星系喷泉流

ILLUSTRIS TNG 模拟

快速气体再循环

在高红移，超新星和 AGN 反馈可建立延展的**星系晕气体储库**，而非将所有物质完全逐出星系晕。

冷却的晕气体可重新吸积，并沉降为薄的旋转支撑盘。

晚期 ISM 流入中有相当一部分是**再循环喷泉气体**，而非首次吸积。

- 再循环气体表现出 ~ 400 Myr 的运动学去相关时间尺度和 ~ 500 Myr 的相分离时间尺度。

重子循环动力学

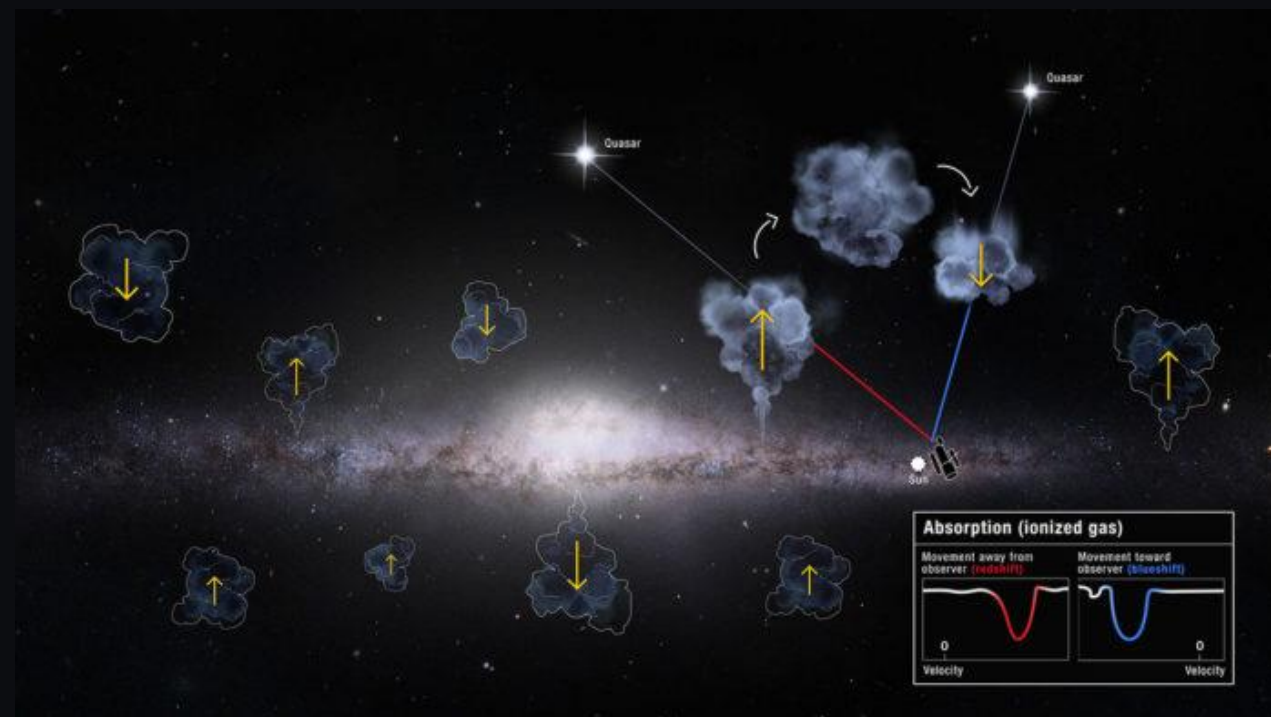
在 $z \geq 2$ ，星系通常表现出显著的星系晕尺度净流入。

到较晚时期，动能模式 AGN 反馈可使流入与流出趋于近似平衡。

在星系完全淬火前，气体再循环可延长恒星形成。

反馈模型与星系周介质形态

星系的重子循环依赖于反馈模型的设置，如恒星形成效率、星风模型、超新星反馈模型和 AGN 模型。进一步重塑星系周介质的形成。



星系周介质的复杂性：恒星与 AGN 反馈过程，具有高模型依赖度

IllustrisTNG 模拟

★ 恒星反馈

反馈通道

反馈能量驱动动能风与热能的模型。

模型标定

风速和能量学随局域暗物质速度弥散度标度变化，并设置速度下限。

质量加载(H)

其质量依赖性反映恒星反馈与 AGN 反馈的耦合作用。

🔗 TNG模拟中，AGN 反馈

🔥 热 / 类星体模式

在高吸积率下，热能局域耦合于黑洞周围，并调节中心气体。

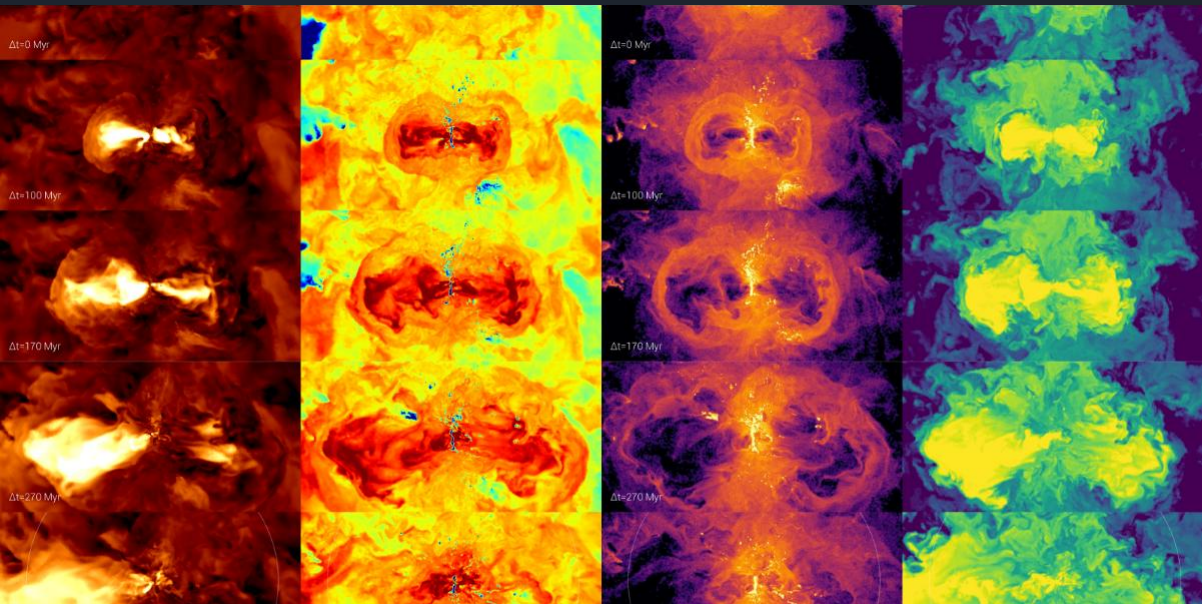
⇌ 动能 / 低吸积率模式

在较低吸积率下，机械反馈可加热并重新分配星系晕气体，有助于维持淬火。

解释要点。反馈通过随时间演化、依赖模型的历史改变星系周介质；右图为模拟可视化，而非直接观测。

TNG50 个例研究

随时间演化的双极 AGN 外流



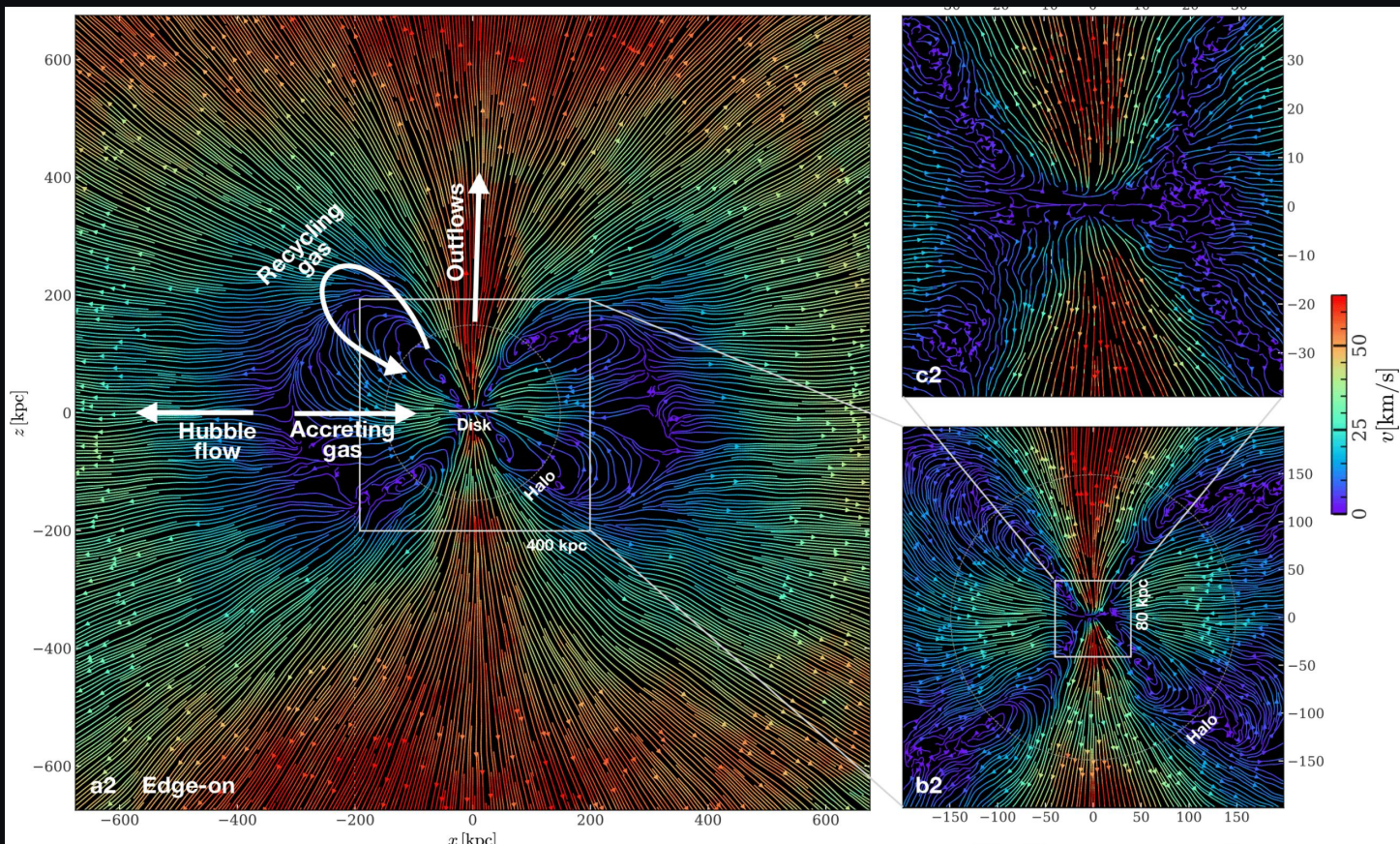
TNG50 可视化展示了外流在与周围星系周气体相互作用时，如何发展出准直的双极形态。

图片：TNG Collaboration / IllustrisTNG Project (TNG50)。

星系周介质的规律性：模拟星系热晕中的整体气体循环

直接模拟可视化 · $z = 1$ 时的 TNG50

Ma 马成宇, Chen 陈洋遥, et al. (include Du, 2026, SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy)



热晕并非静态储库：它可被**各向异性流入**贯穿，同时反馈沿其他路径将气体向外驱动。

丝状运输

气体供给受宇宙网组织，流入集中在优选通道，而非均匀分布于星系晕表面。

多相界面

较冷的流入物质遭遇更热的星系周环境，使混合、激波和辐射冷却成为决定吸积命运的核心过程。

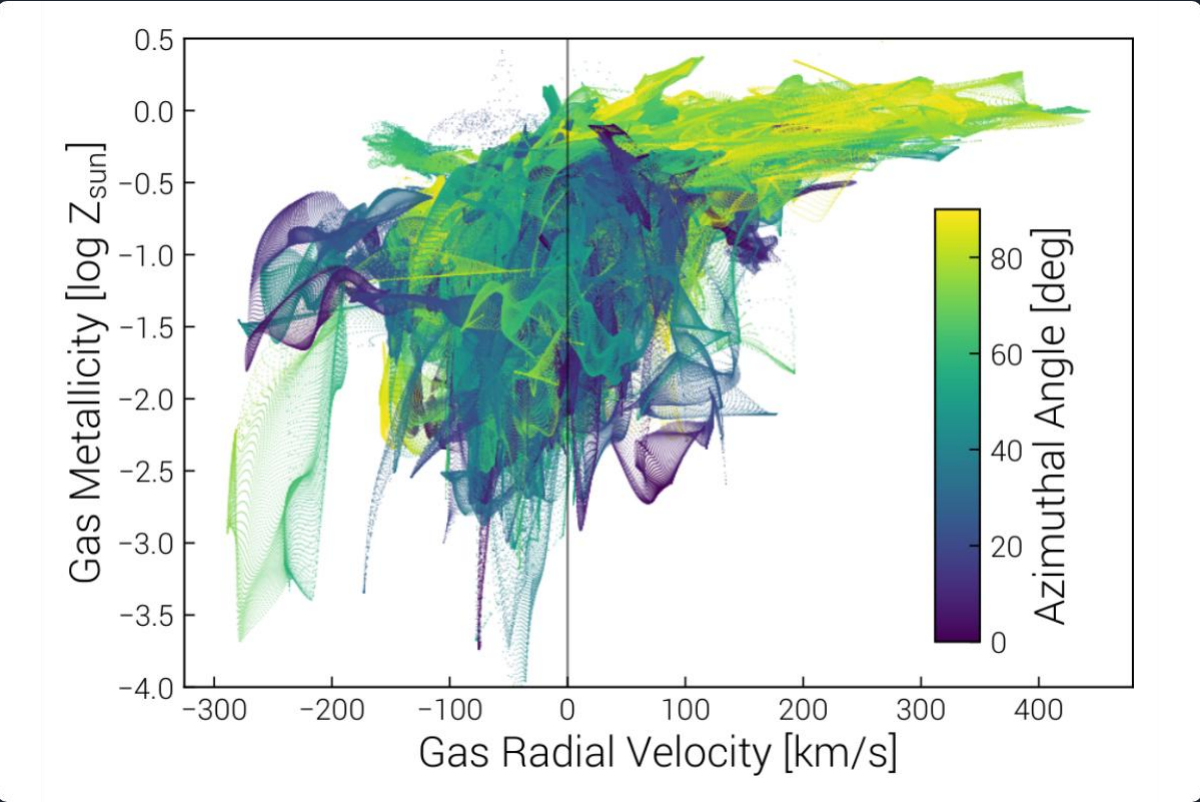
输送路径的随机性与规律性

流动路径可以弯曲、合并并与星系风相互作用——因此穿越维里半径并不保证气体会输送至星系。但是，气体的统计性质具有规律性。

TNG50 中的星系暗晕尺度流动叠加流线的规律性。在密度渲染图上叠加流线，展示模拟星系晕中同时存在的流入与流出统计路径。这是直接模拟可视化，并非观测。

星系周介质的规律性：各向异性金属输运

模拟数据可视化 · $z = 0.5$ 时的 TNG50



叠加的 TNG50 星系周介质分布。模拟星系群体周围的金属丰度与径向速度关系。负速度表示流入，正速度表示流出；颜色编码方位角。这是模拟数据，而非观测吸收线样本。

重子循环不仅携带质量和能量，也携带先前恒星形成与反馈留下的**化学记忆**。

流出侧

在该 TNG50 叠加样本中，正径向速度优先对应金属更丰富的气体。

流入侧

负径向速度优先对应金属更贫乏的气体，与外部供给一致。

几何形态至关重要

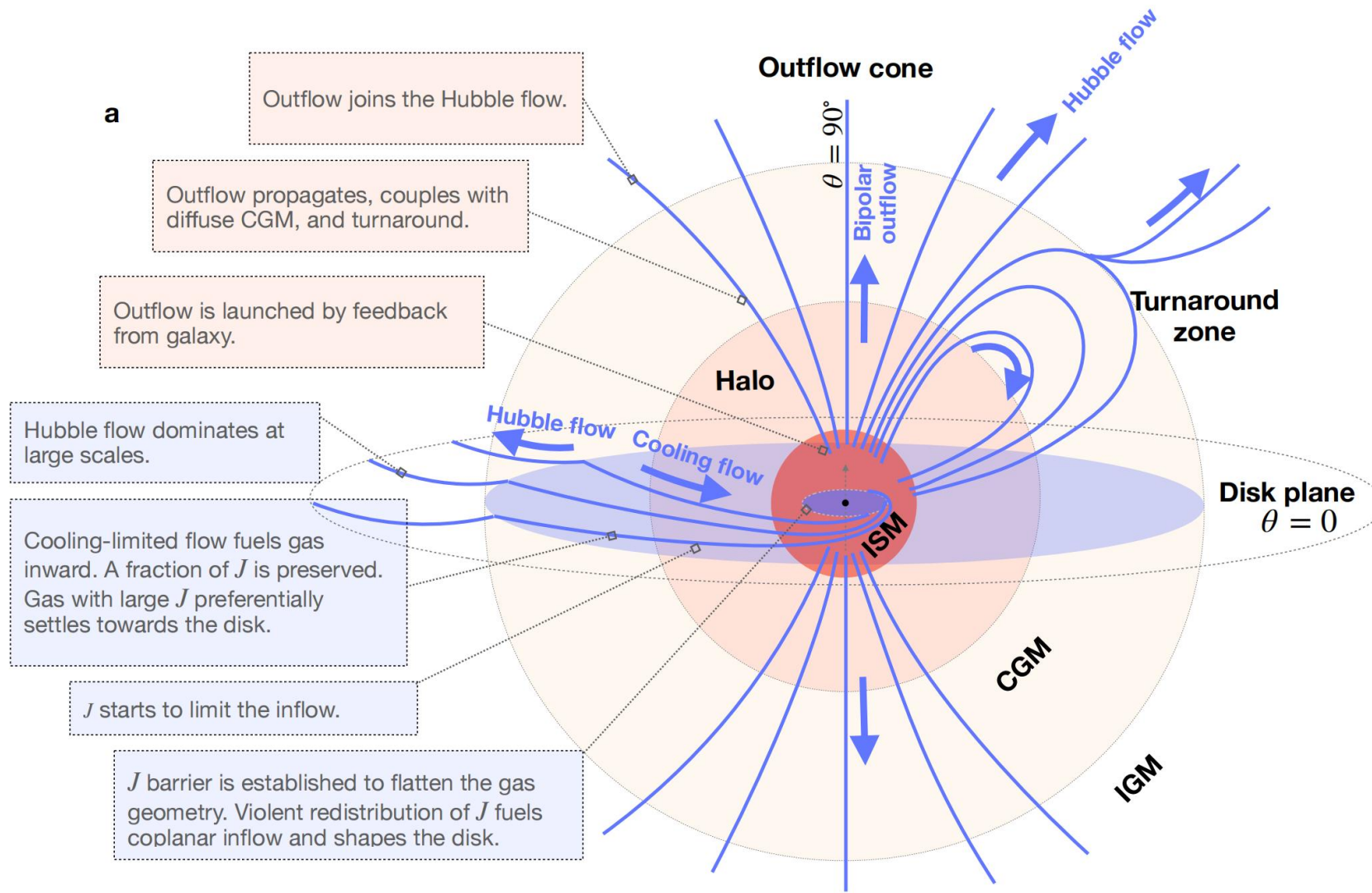
方位角模式将统计性的金属-速度信号与各向异性循环联系起来：富集风物质在短轴附近更显著，而模型中的吸积优先为共面分布。

该图展示与未展示的内容

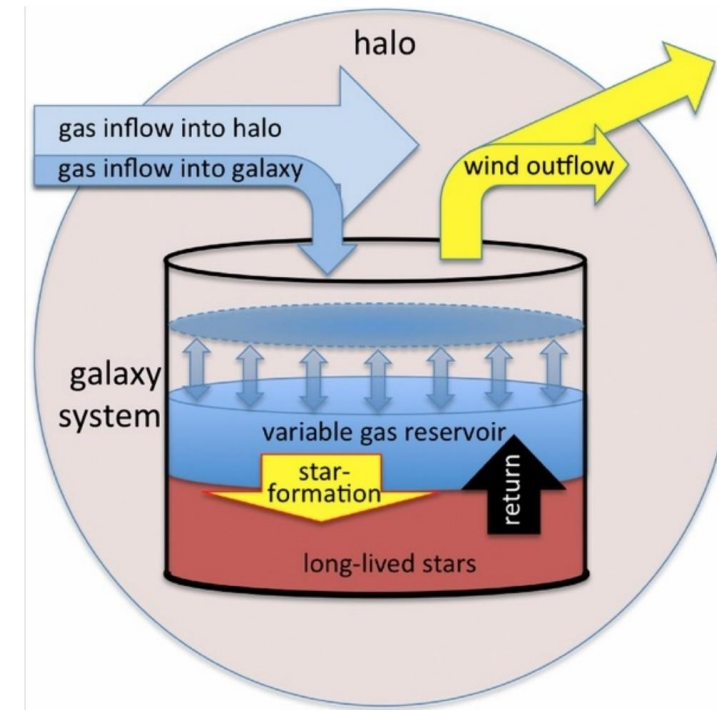
这是固定冲击参数下的群体叠加，并非气体单元的电影或直接观测测量。它诊断相关性，而非证明个体因果轨迹。

观测桥梁

吸收线研究可以检验该预言，但匹配需要考虑示踪量选择、电离建模、视线几何与测量不确定性。



“水库”模型



中心、无并合星系：从星系周介质吸积角动量到星系大小

星系的形态与尺度，不只是“形成了多少恒星”，还取决于气体在进入星系的过程中携带、重分配并最终保留下来的**角动量**。

01

宇宙网气体吸积

宇宙网、冷流与热晕把气体输送到星系周介质；流入方向和速度决定角动量输入。

02

角动量的继承与演化

混合、反馈、盘内耗散与并合改变气体和恒星的角动量分布。

03

星系恒星形成与结构响应

在给定质量和旋转速度下，较高的比角动量通常对应更扩展的盘；核球与外扰会改变这一映射。

角动量的宇宙学传递链：如果星系一定程度上继承其周围暗晕的角动量

从宇宙网到星系盘 · 方向、输运与保留

SCHEMATIC FLOW · 说明性示意图



● 冷流或有序流入

● 角动量转移与保留

● 反馈、混合、并合造成的重排

输入气体的流入方向、速度与冲量决定角动量通量。

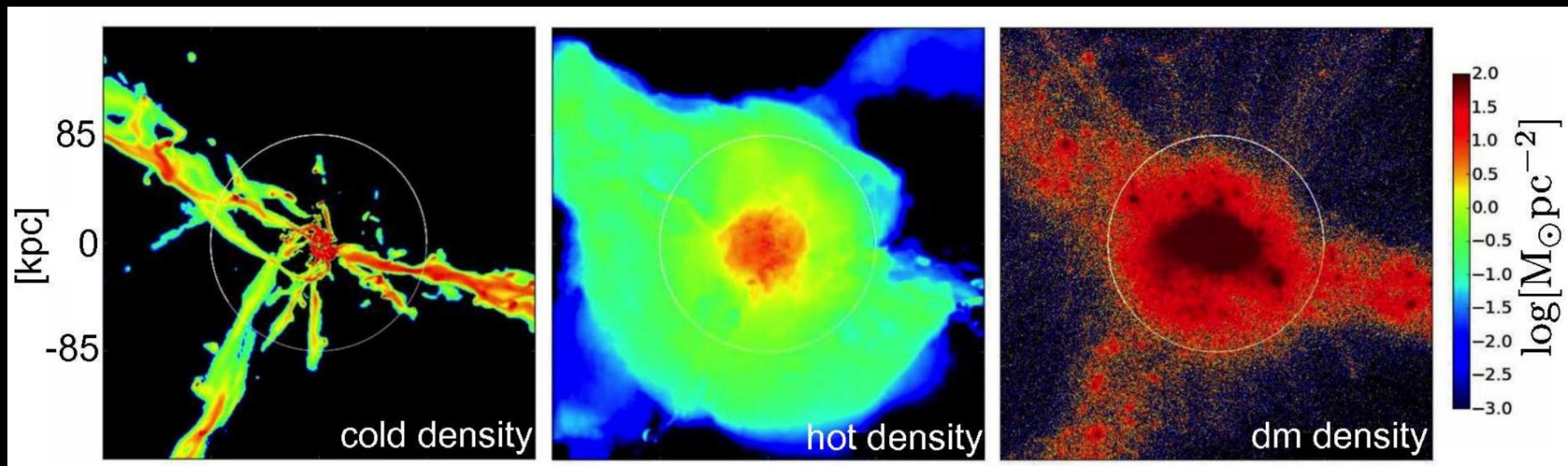
中间层CGM 不是被动管道；热晕、冷却和反馈会改变气体是否继续向内。

输出进入盘的比角动量与质量分布共同决定盘的空间尺度。

Mo, Mao, White (1998) 盘形成模型(角动量守恒假设)

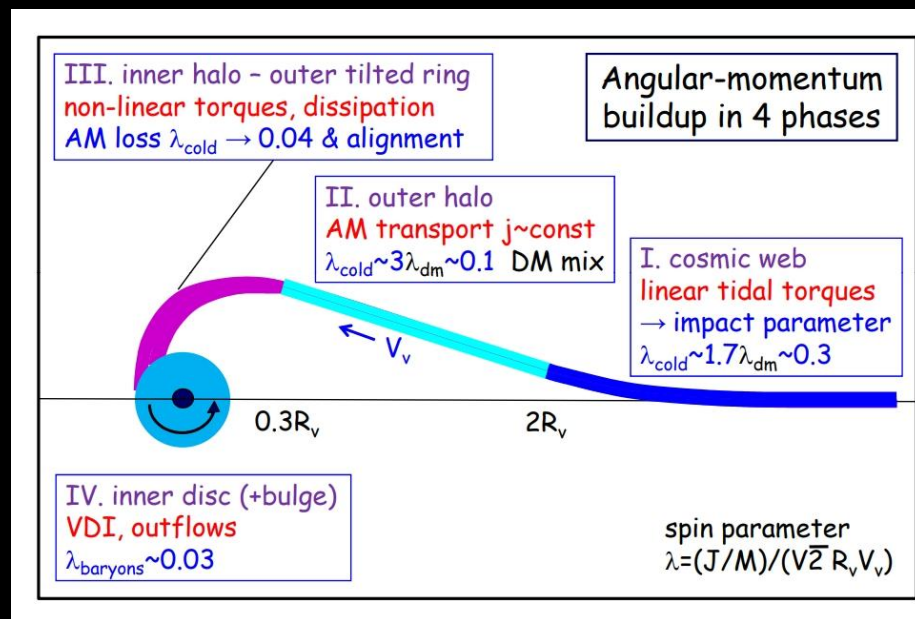
角动量的宇宙学传递链：星系是否、如何继承其周围暗晕的角动量？

从宇宙网到星系盘 · 方向、输运与保留



Danovich et al. (2015) 模拟

- 气体由宇宙网吸积进入CGM过程中经历复杂的输运、混合过程
- 气体的碰撞性决定其无法直接保留其物质、能量和角动量信息
- 气体粒子落入CGM时，大量损失角动量 --> 角动量不守恒？

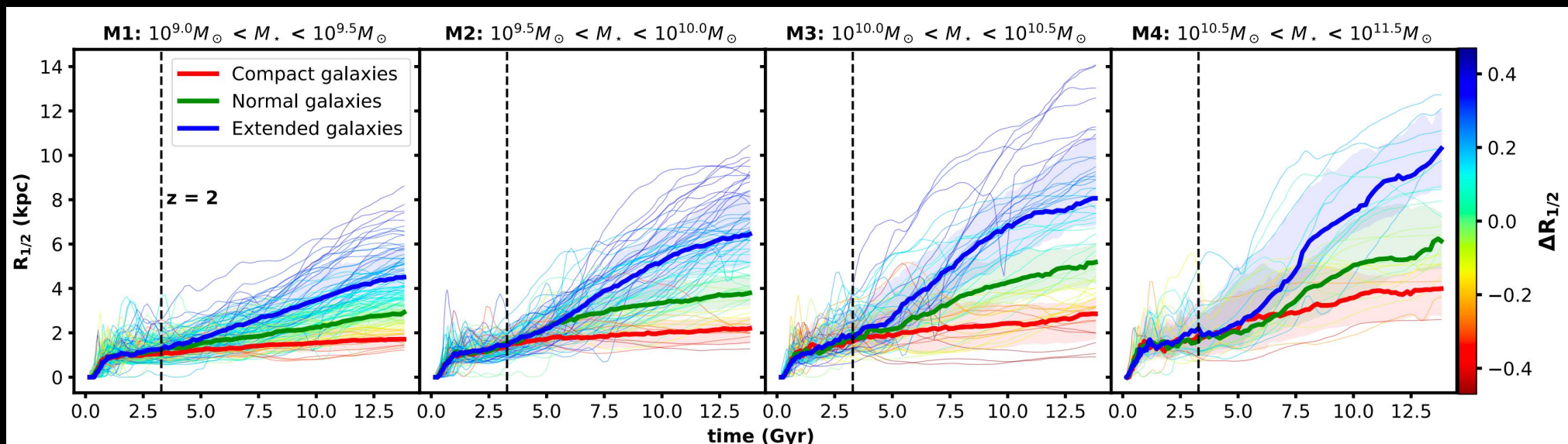
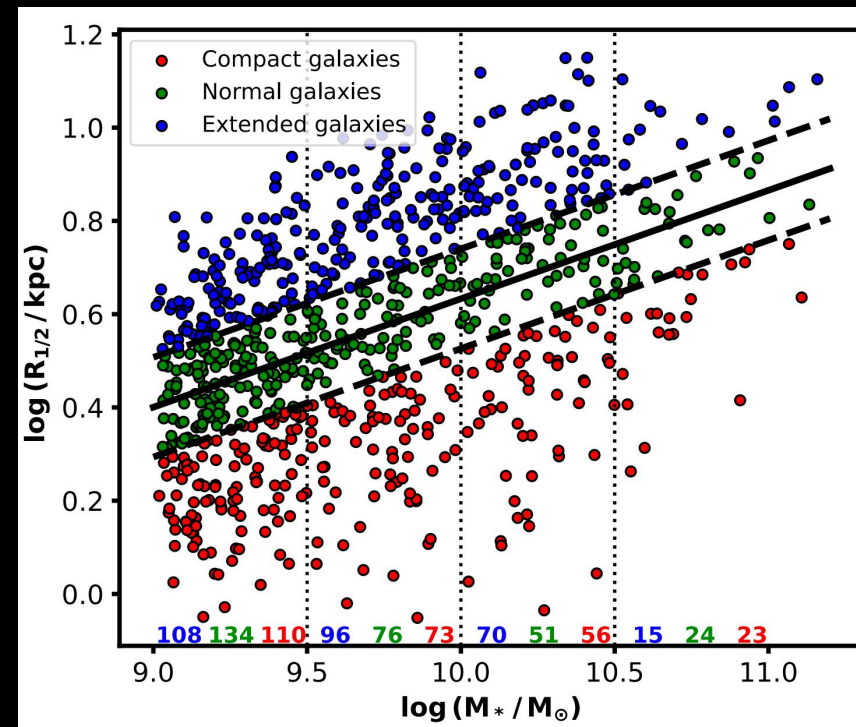


角动量-->星系如何生长?

从宇宙网到星系盘 · 方向、输运与保留

Ma, Du* et al. (2024, A&A, 689, A293)

- IllustrisTNG中, 选择无/弱并合影响的星系
- 分类为致密型(compact)、普通型和疏散型(extended) 星系
- 疏散型(extended) 星系在 $z < 1$ 的阶段经历了更显著的尺度生长



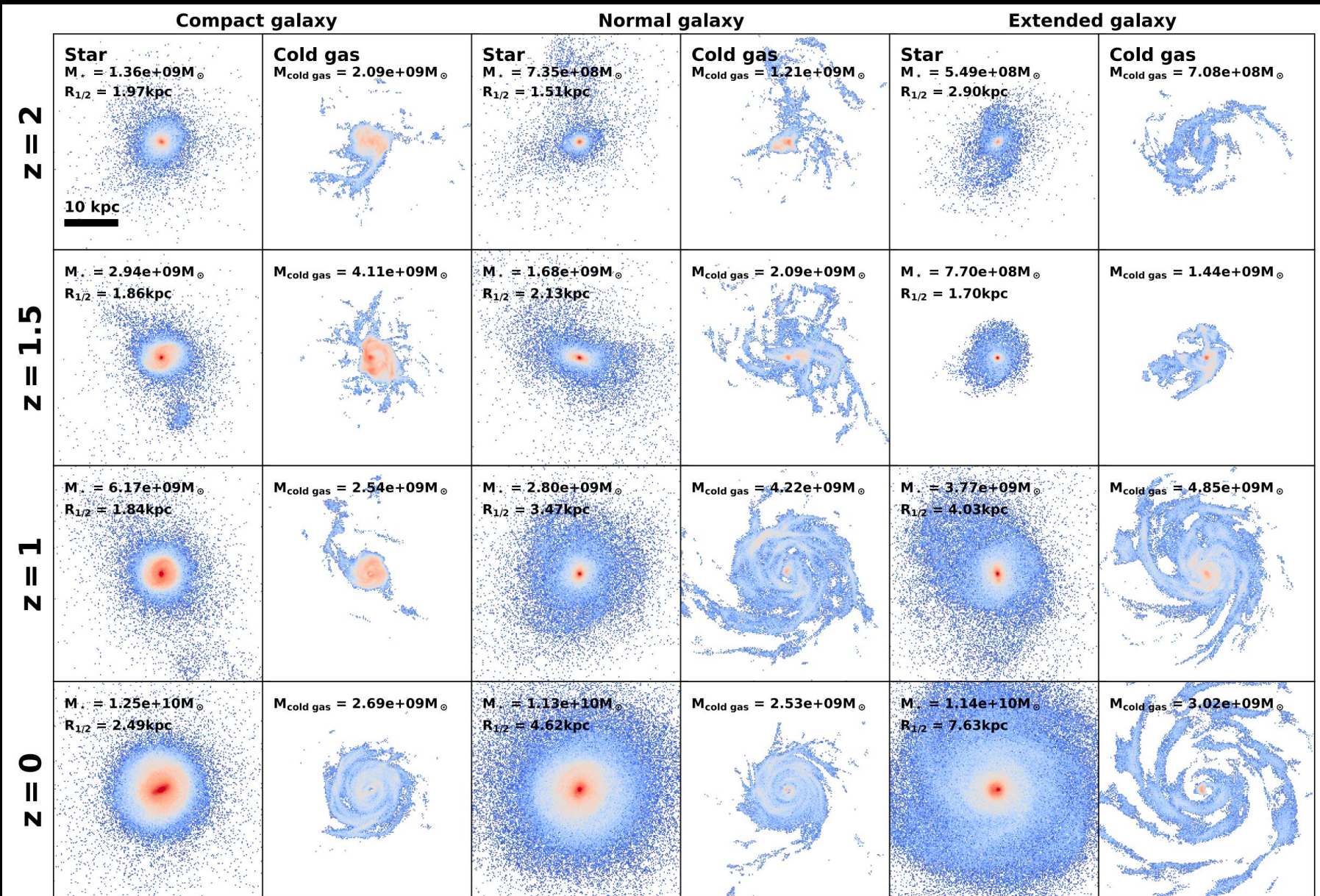
角动量的宇宙学传递链：以CGM为媒介

从宇宙网到星系盘 · 方向、输运与保留

Ma, Du* et al. (2024, A&A, 689, A293)

IllustrisTNG中，致密型
(compact)、普通型和疏散型
(extended) 星系演化示例。

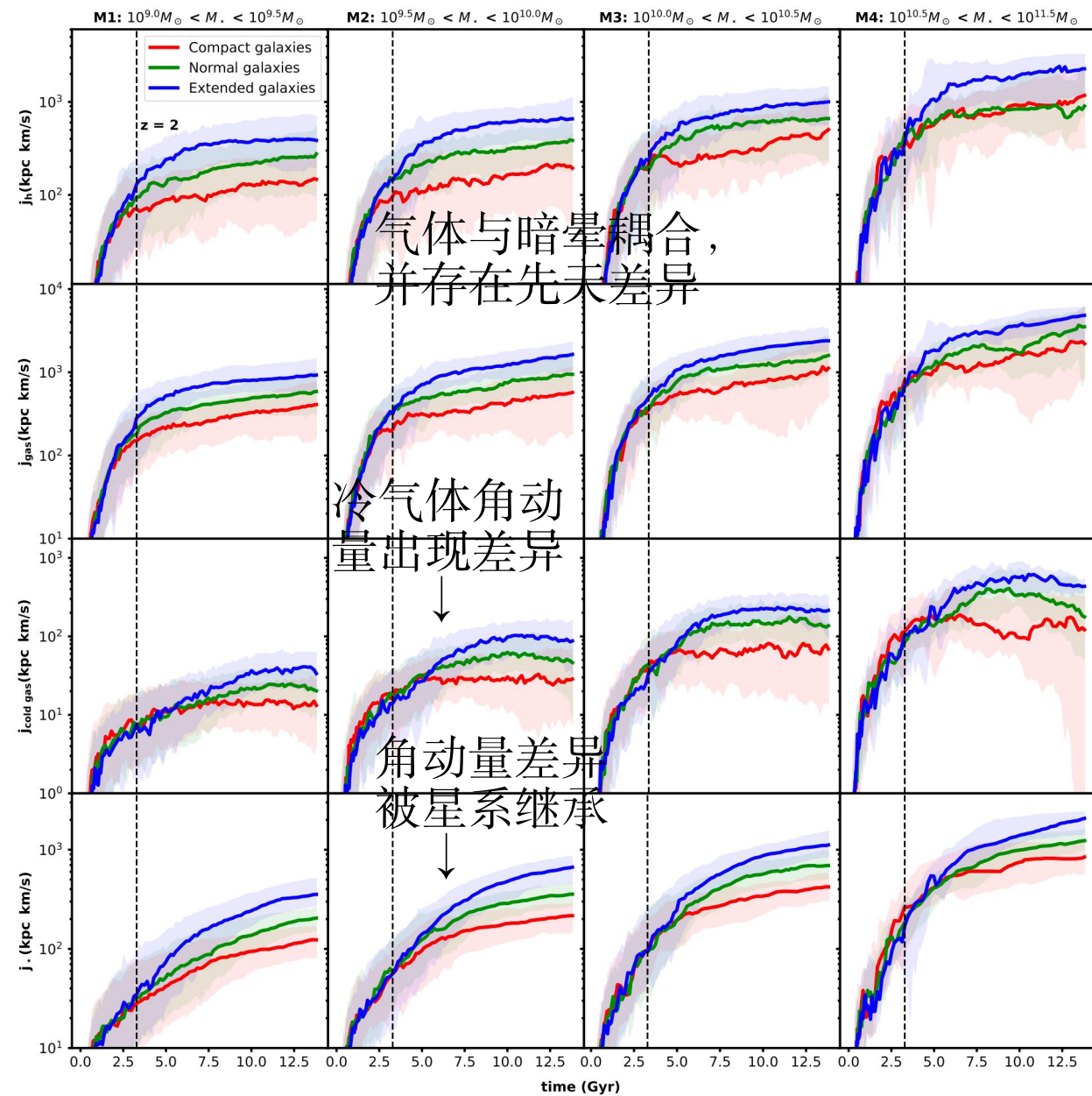
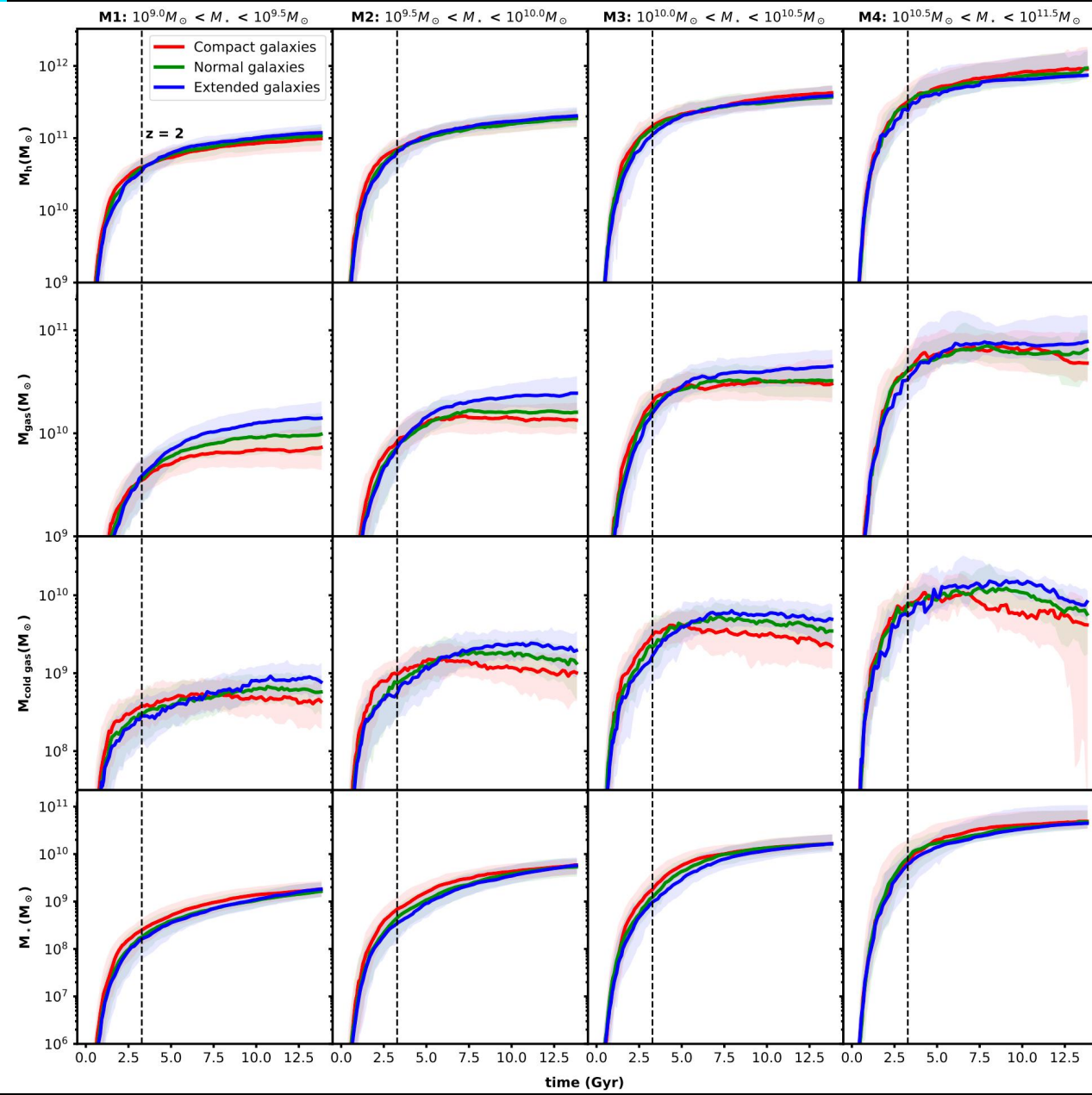
规律的盘生长过程是决定星系大
小的主要因素 <-- 星系气吸积与
周介质



角动量的宇宙学传递链：以CGM为媒介，角动量比例守恒

从宇宙网到星系盘 · 方向、输运与保留

角动量由 暗晕→(星系周) 气体→(星际) 冷气体→恒星



比角动量如何设定星系大小

盘的质量—大小关系是 j - M -size 关系的投影

D&A-YAN 框架中的盘星系近似：指数盘 + 旋转支持

$$j_{\star} = j_{\text{disk}} f_{\text{disk}}$$

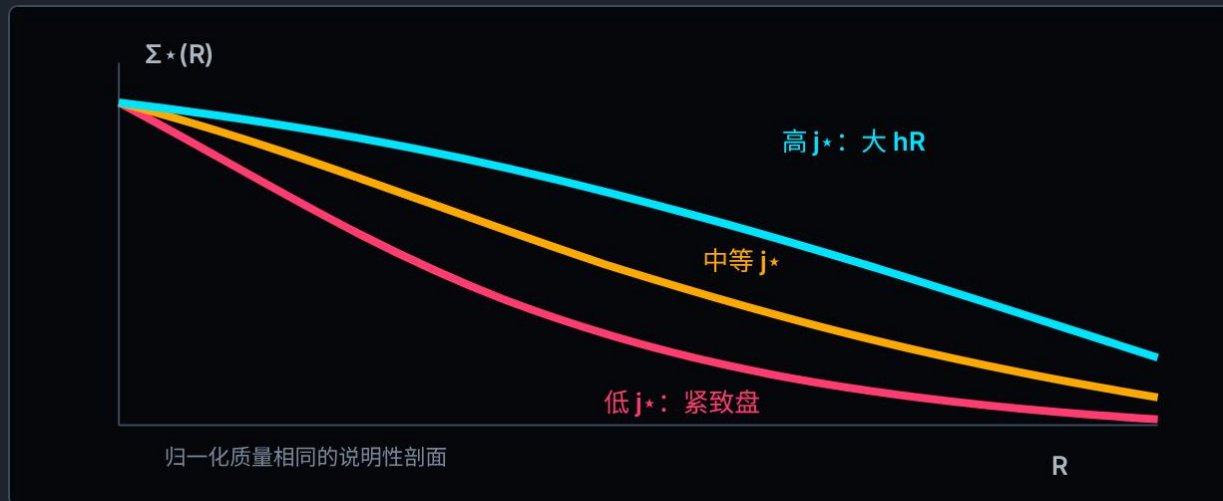
$$j_{\star, \text{theory}} = 2 \varepsilon f_{\text{disks}} V_{\text{flat}} hR, \text{theory}$$

$$hR, \text{theory} \propto j_{\star, \text{theory}} / (f_{\text{disk}} V_{\text{flat}})$$

直观含义：在恒星质量与旋转速度相近时，进入盘并被保留的比角动量越高，指数尺度长度 hR 越大，星系盘越扩展。

重要限定：这是一阶结构模型；核球、非圆轨道、角动量损失和质量随半径变化都会改变实际映射。

同一质量下：角动量改变盘的空间分布



输入角动量

冷流优选通道、热晕旋转和大尺度环境共同决定 j_{gas} 。

盘内转化

气体冷却后向盘沉降，角动量可在气体、恒星和核球之间交换。

外部重排

并合、潮汐力和反馈会增加、损失或重新分配角动量。

可观测结果

最终表现为 hR 、 R_e 、旋转支持与表面密度剖面的差异。

科学边界：“高 $j \rightarrow$ 大盘”是有条件的结构解释，不是对所有星系的唯一因果定律。

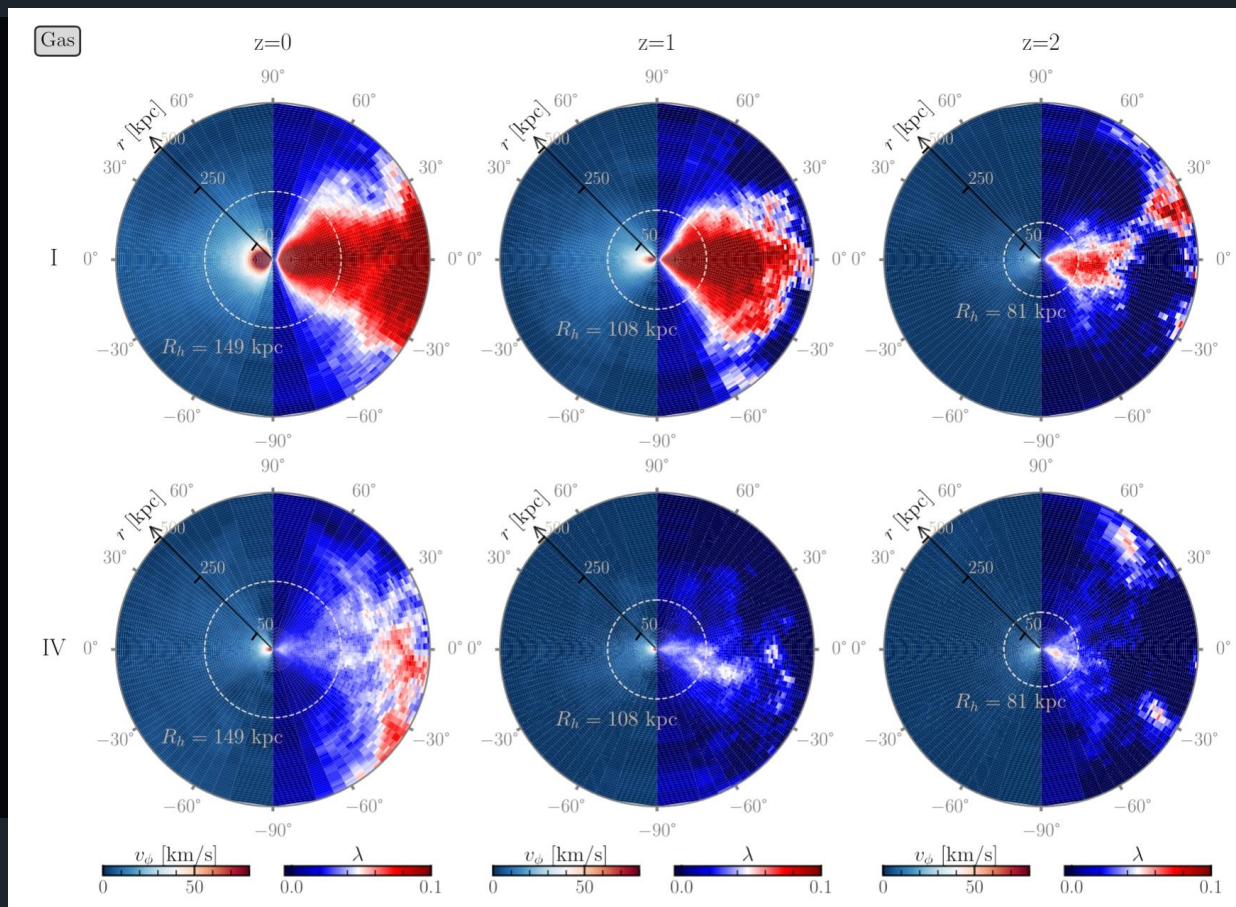
热晕中气体的性质与角动量——星系生长的原料

直接模拟可视化 · $z = 0-2$ 时的 TNG50 气体状态演化

Chen 陈晓萱, Wang, Du et al. (in preparation) · TNG50 星系暗晕尺度气体性质

疏散型
(extended)

致密型
(compact)



气体流入过程具有随机性，但其整体的统计性质具体规律性 --> 不同角动量的气体产生不同大小的星系。

丝状运输

气体供给受宇宙网组织，流入集中在优选通道，而非均匀分布于星系晕表面。

多相界面

较冷的流入物质遭遇更热的星系周环境，使混合、激波和辐射冷却成为决定吸积命运的核心过程。

输送路径的随机性与规律性

流动路径可以弯曲、合并并与星系风相互作用——因此穿越维里半径并不保证气体会输送至星系。但是，气体的统计性质具有规律性。

TNG50 中的星系暗晕尺度，不同大小星系中气体分布叠加。疏散星系由高角动量气体吸积过程主导，形成延展盘结构，较致密的星系则由更低角动量的气体吸积过程主导。

中心、无并合星系的生长：继承宿主暗晕角动量 --> 内向外生长 inside-out growth

内盘先建立 → 后续高比角动量气体沉降到外侧 → 形成半径向外推进

FROM ANGULAR MOMENTUM TO STRUCTURE

简单理解，盘不是一次成形，而是沿半径逐层建立：**内区先、外区后**。

1 内盘先建立

早期冷却气体在中心区域形成恒星；较小的形成半径先被点亮，留下相对较老的内盘。

2 形成半径推进

持续吸积、冷却与角动量输入改变气体沉降位置，恒星形成区域逐步向外扩展。

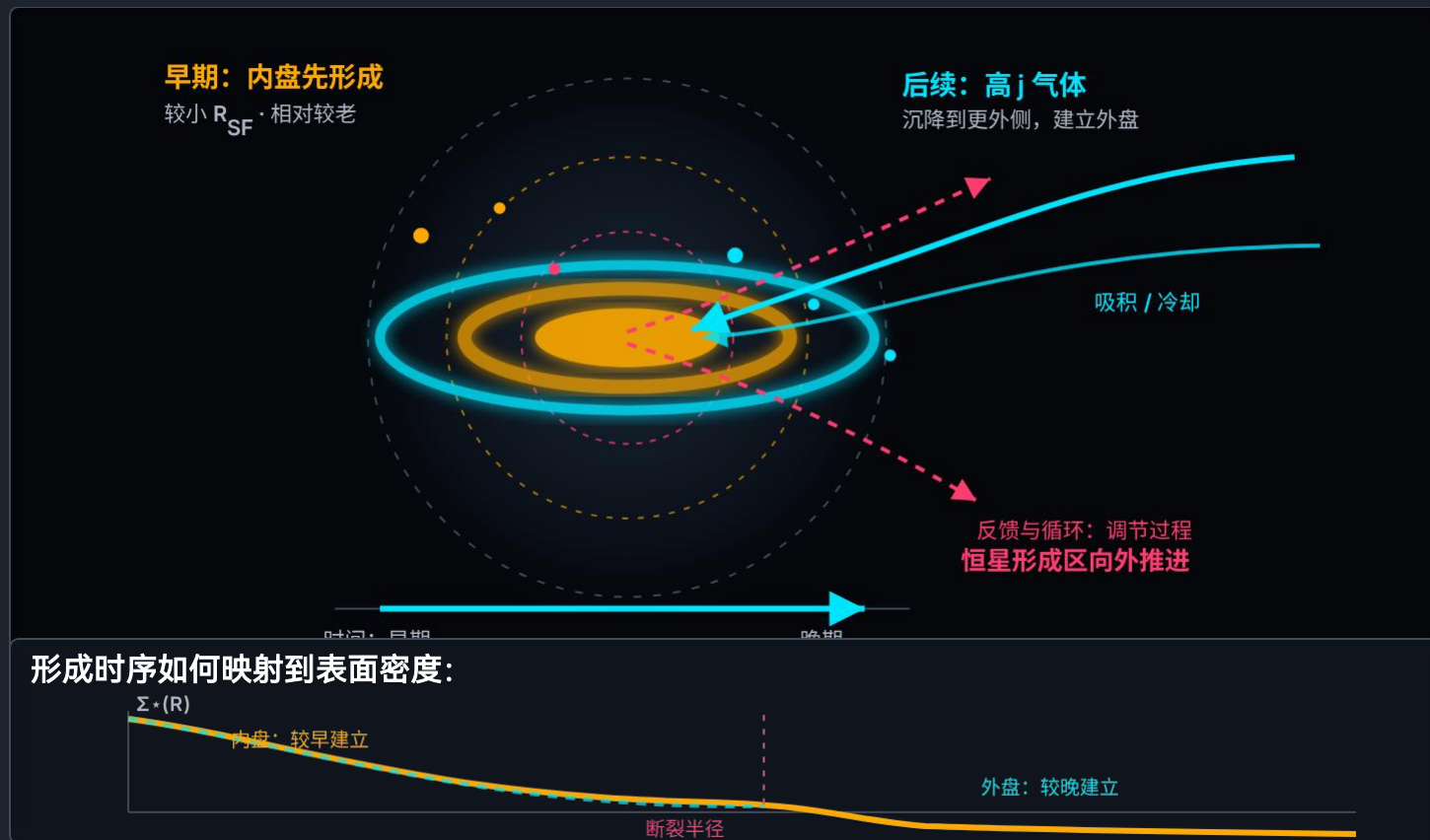
3 外盘晚于内盘

后续较高比角动量的气体更容易建立外侧盘；反馈与气体循环会调节推进速度。

金色： 较早形成的内盘 **青色：** 后续高 j 气体与外盘
洋红： 恒星形成时序

同一星系的“生长轨迹”

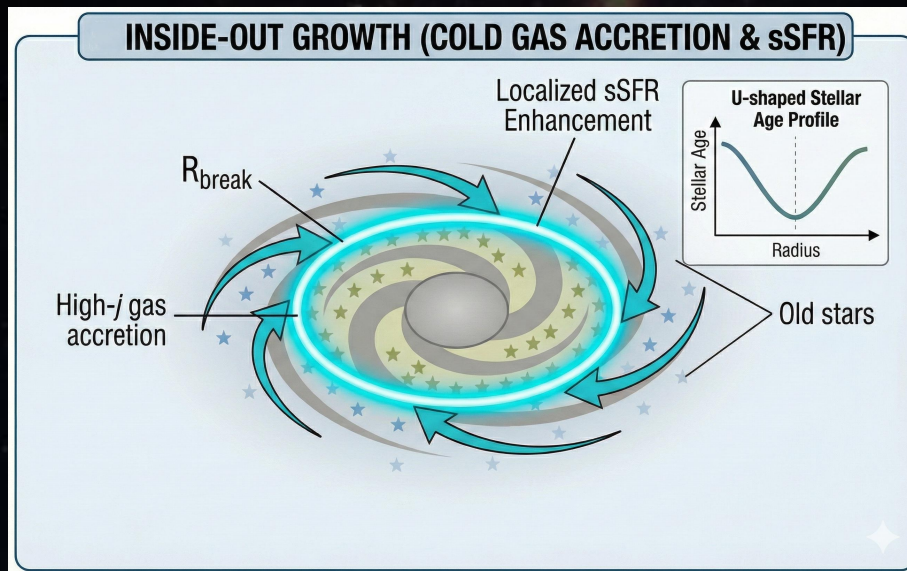
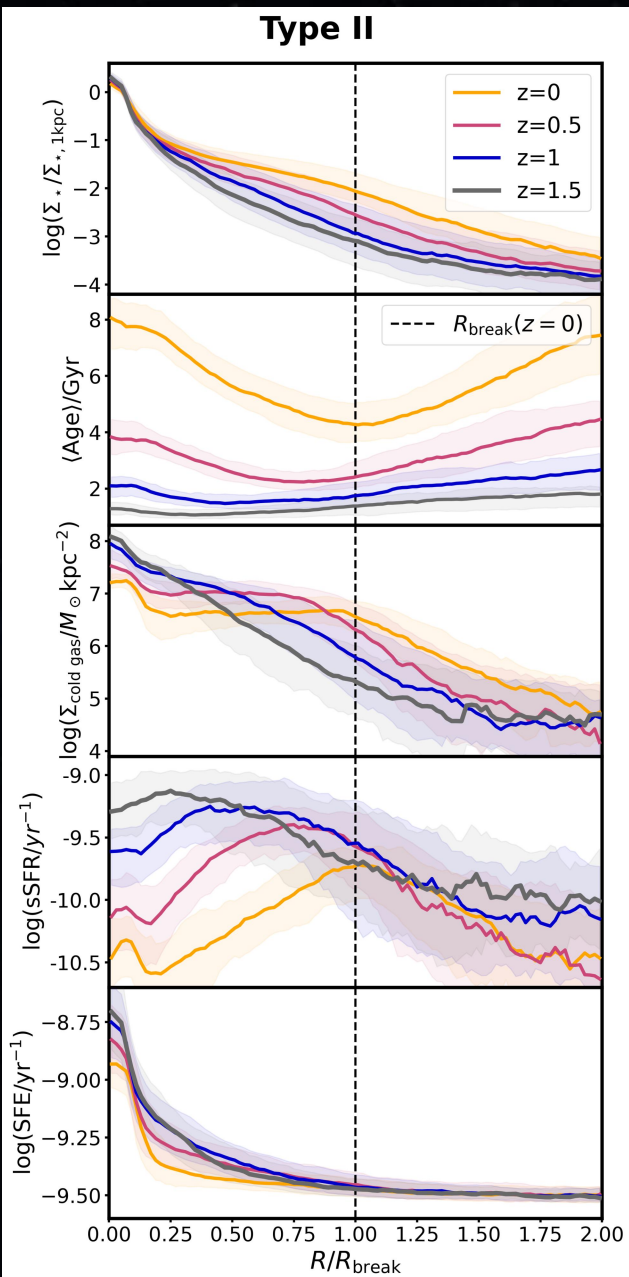
空间上：形成半径 R_{SF} 随时间外移；颜色表示相对形成先后，不代表统一年龄标尺。



星系大小的演化：内向外生长 inside-out growth --> Type II 向下弯曲盘

内盘先建立 → 后续高比角动量气体沉降到外侧 → 形成半径向外推进

Chen 陈柳霏, Du*, et al. (2026, ApJL, 1003, 2)



When? $z \sim 0.5$

How?

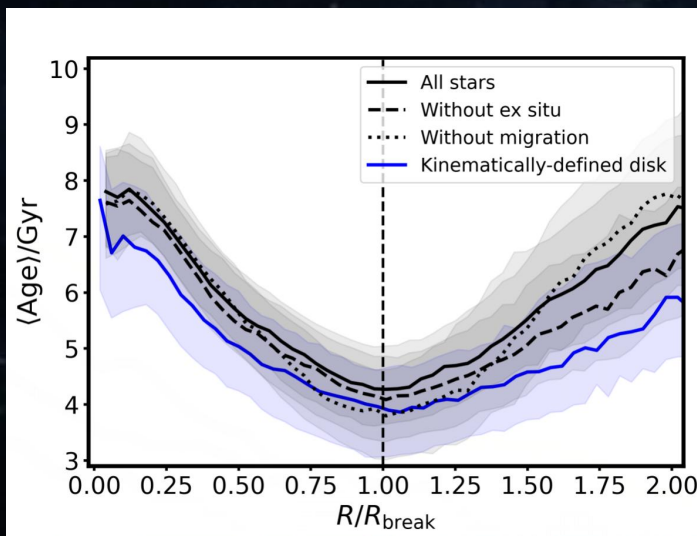
Secular flatten $\Sigma_{\text{cold, gas}}$

→ localized enhancement of sSFR

→ increased stellar mass assembly

→ radial break and U-shape age profile

All shift outward with time.

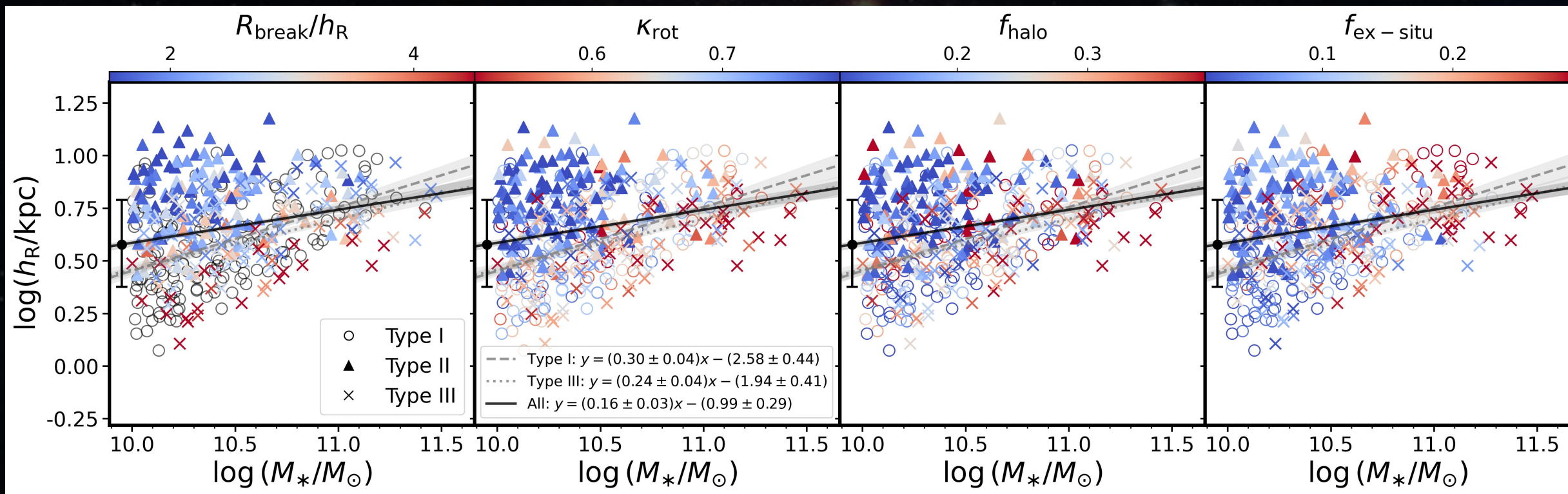


Down-bending Breaks in Galactic Disks Are an Intrinsic Byproduct of Inside-out Growth

星系大小的演化：内向外生长 inside-out growth --> Type II 向下弯曲盘

内盘先建立 → 后续高比角动量气体沉降到外侧 → 形成半径向外推进

Chen 陈柳霏, Du*, et al. (2026, ApJL, 1003, 2)



Mass-size: Type I and Type III obey a mass-size relation

Rotation: Type II: $\kappa_{\text{rot}} = 0.75$; Type III: $\kappa_{\text{rot}} = 0.63$; Type I: $\kappa_{\text{rot}} = 0.66$

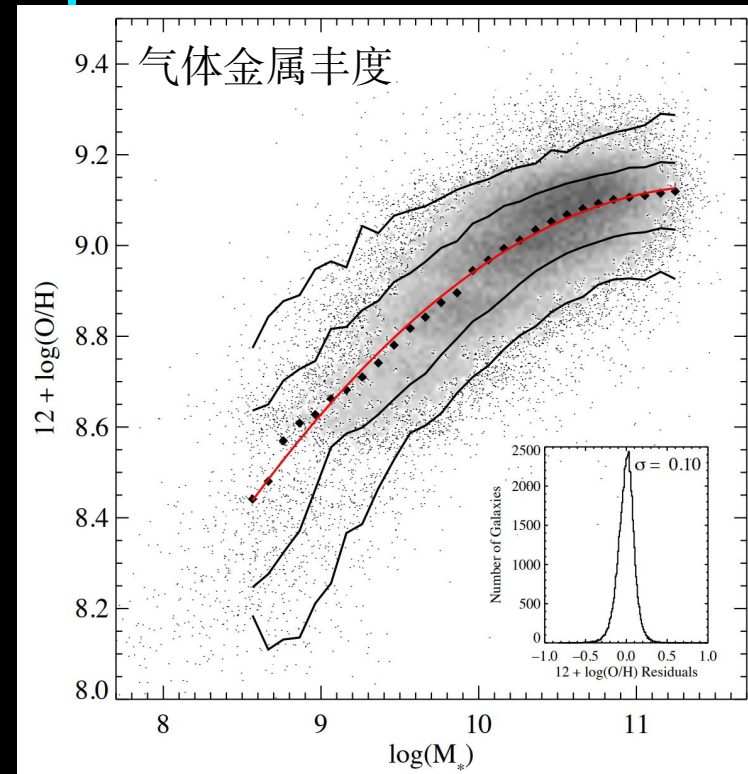
Merger diagnostics:

(i) Stellar halo fraction: Type II: $f_{\text{halo}} = 0.14$ Type III: $f_{\text{halo}} = 0.26$ Type I: $f_{\text{halo}} = 0.20$

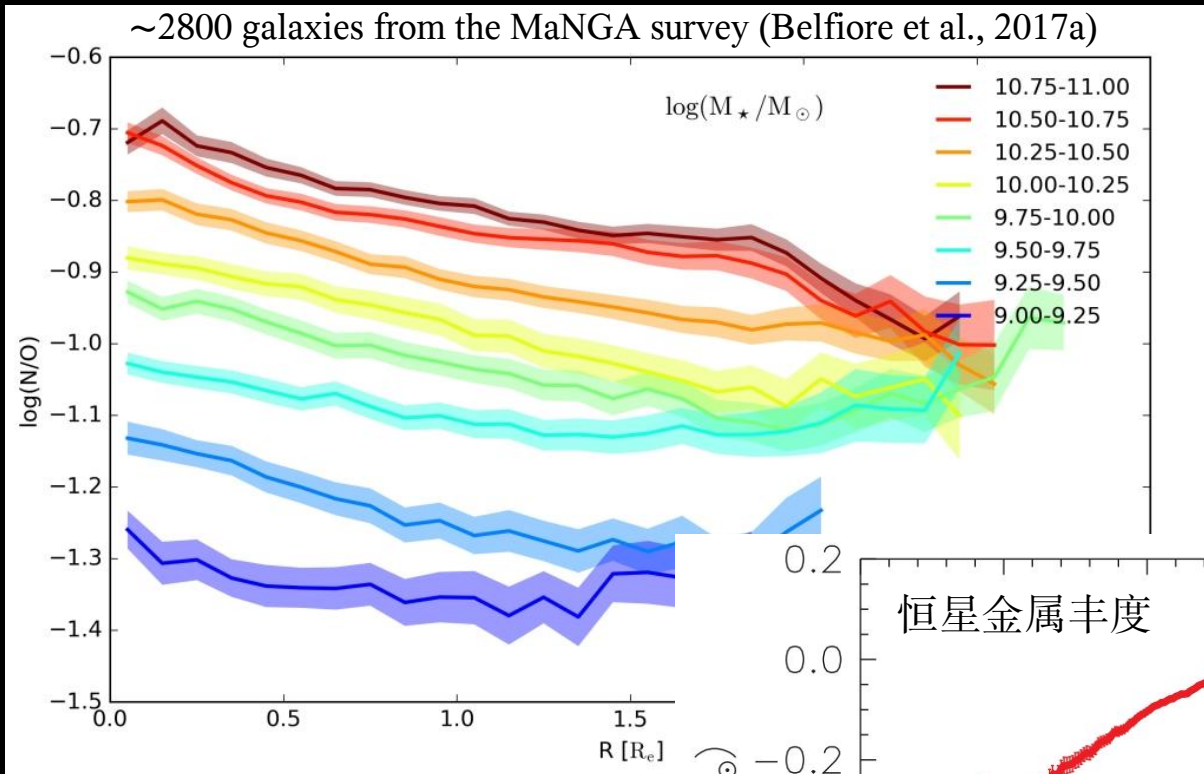
(ii) Ex-situ fraction: Type II: $f_{\text{ex-situ}} = 0.05$; Type III: $f_{\text{ex-situ}} = 0.19$; Type I: $f_{\text{ex-situ}} = 0.08$

星系的化学演化：星系周介质中 恒星产生富金属 + 吸积混合贫金属 + 引力束缚与逃逸

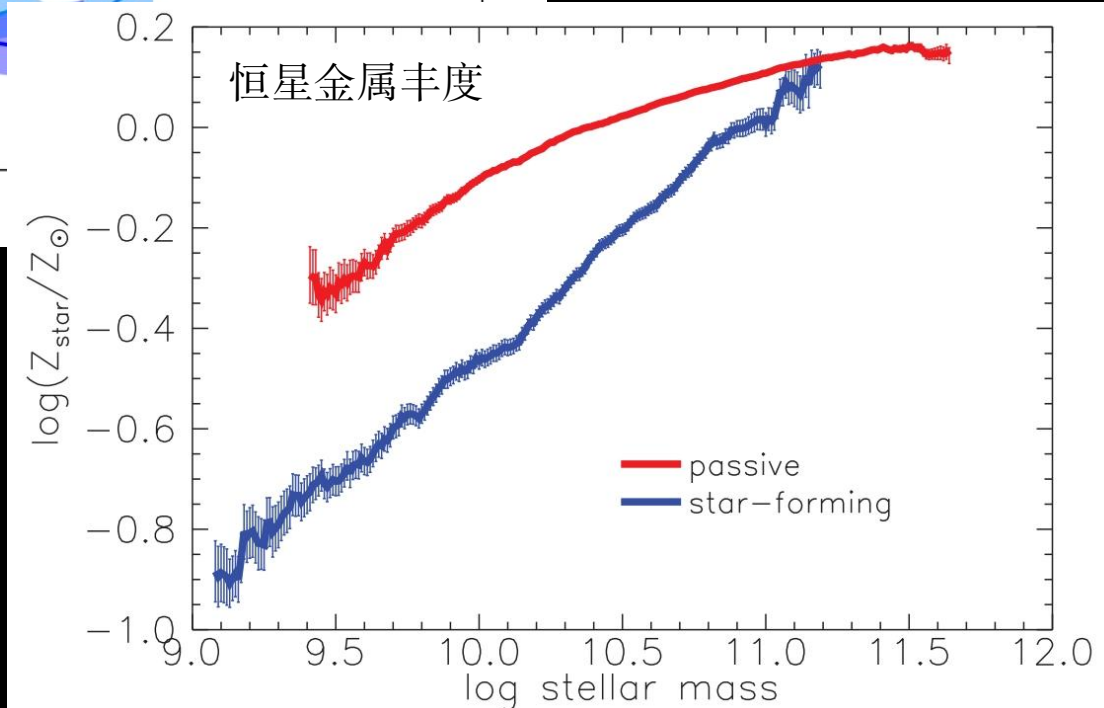
核合成与恒星反馈 → 气体增丰 → 恒星增丰



SDSS galaxies from Tremonti et al. (2004)



Peng et al. (2015)



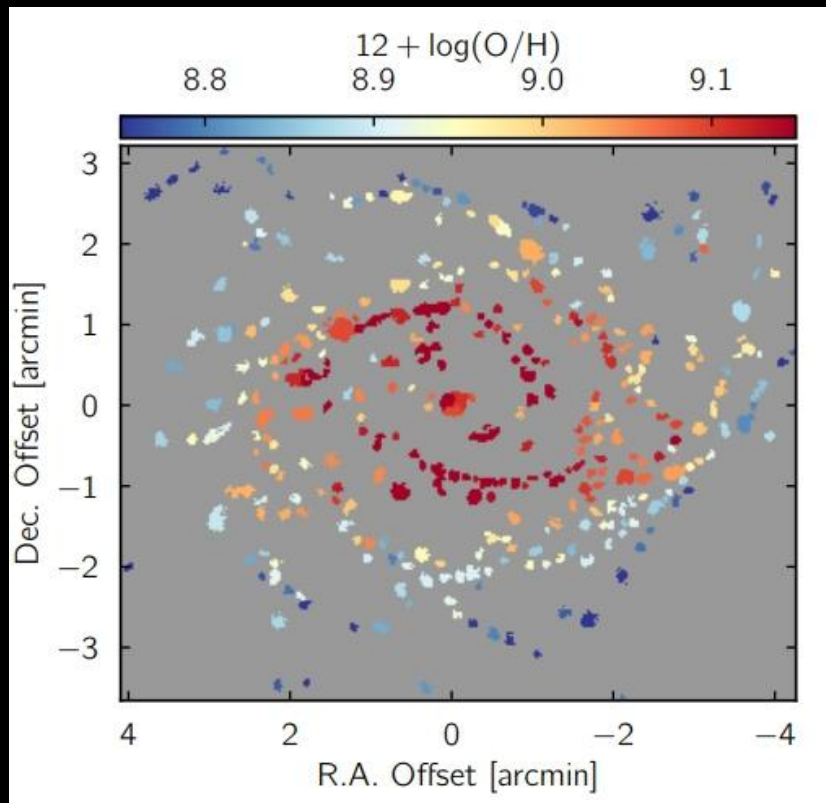
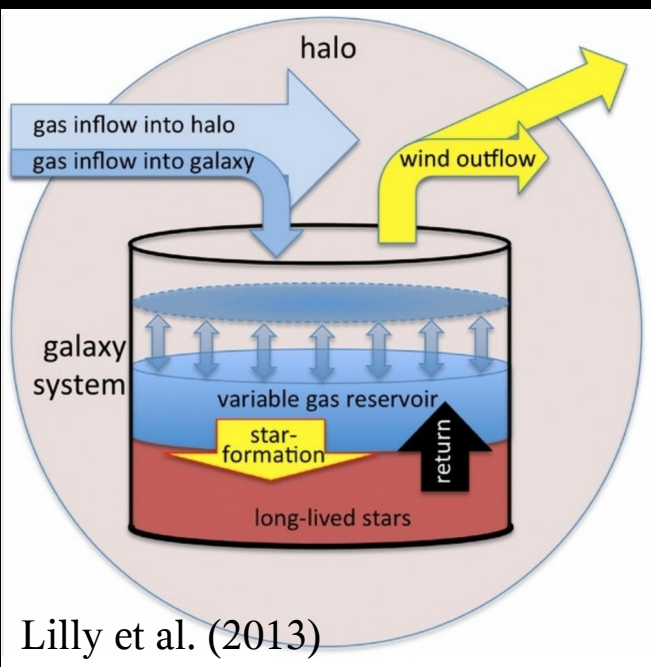
星系周介质不只是物质循环，也是化学元素循环

- 恒星形成核合成富金属气体通过反馈注入
- 宇宙网吸积贫金属气体混合、稀释星系周介质
- 引力束缚不足时(如：宇宙早期和小质量星系中)，部分富金属气体易外流逃逸
- 气体 表征短时标化学演化；恒星 表征长时标化学演化

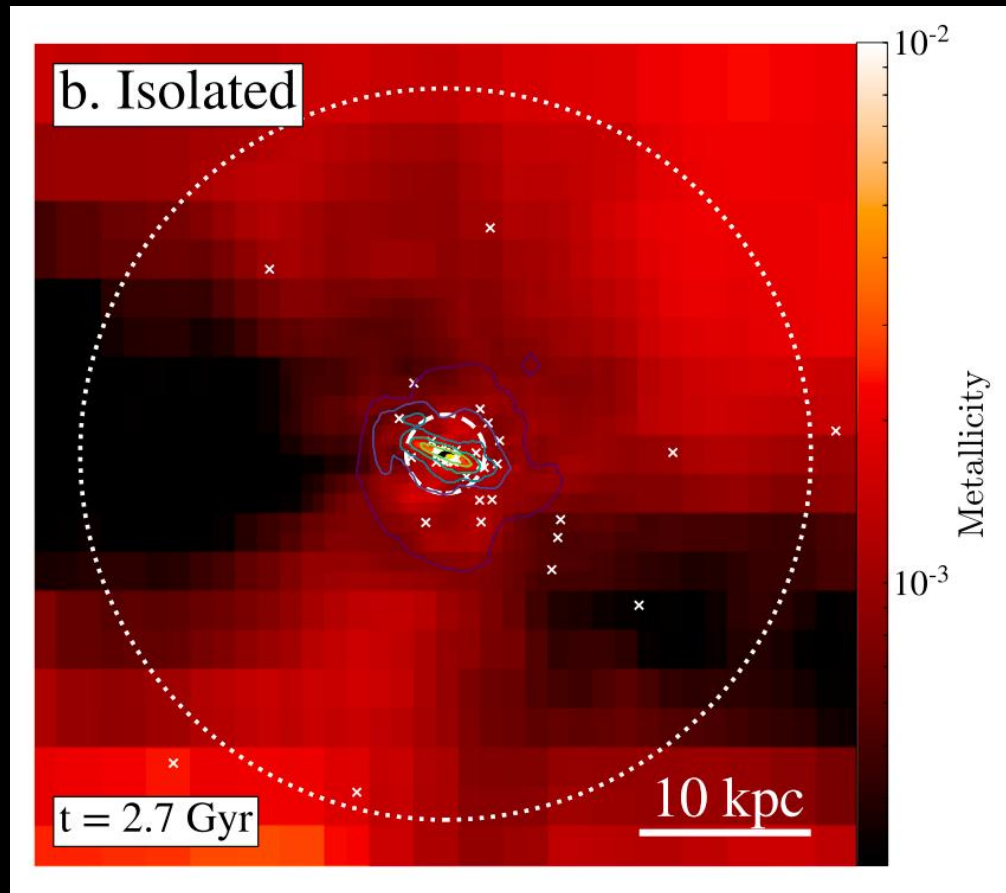
星系的化学演化：星系周介质中 恒星产生富金属 + 吸积混合贫金属 + 引力束缚与逃逸

核合成与恒星反馈 → 气体增丰 → 恒星增丰

染色“水库”模型



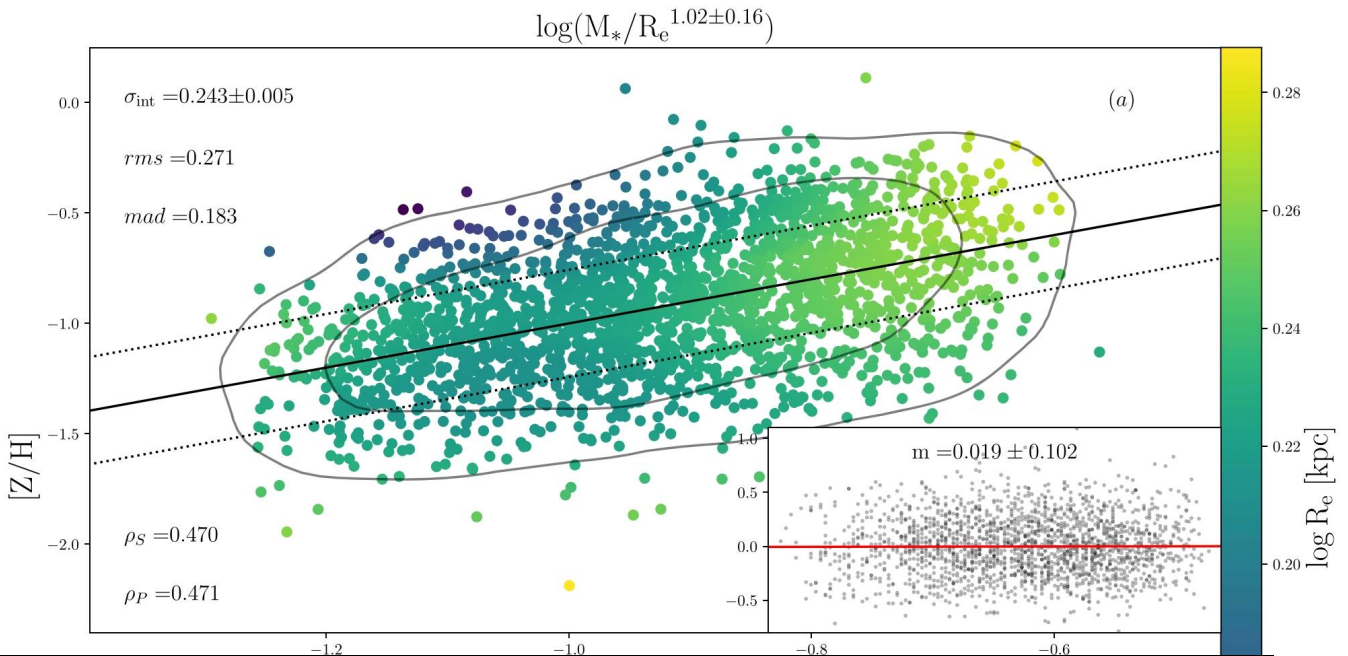
Metallicity distribution of HII regions in the galaxy NGC2997 from Ho et al. (2018)



孤立矮星系中，富金属气体易逃逸出其引力势场 (Du et al. 2019 模拟)

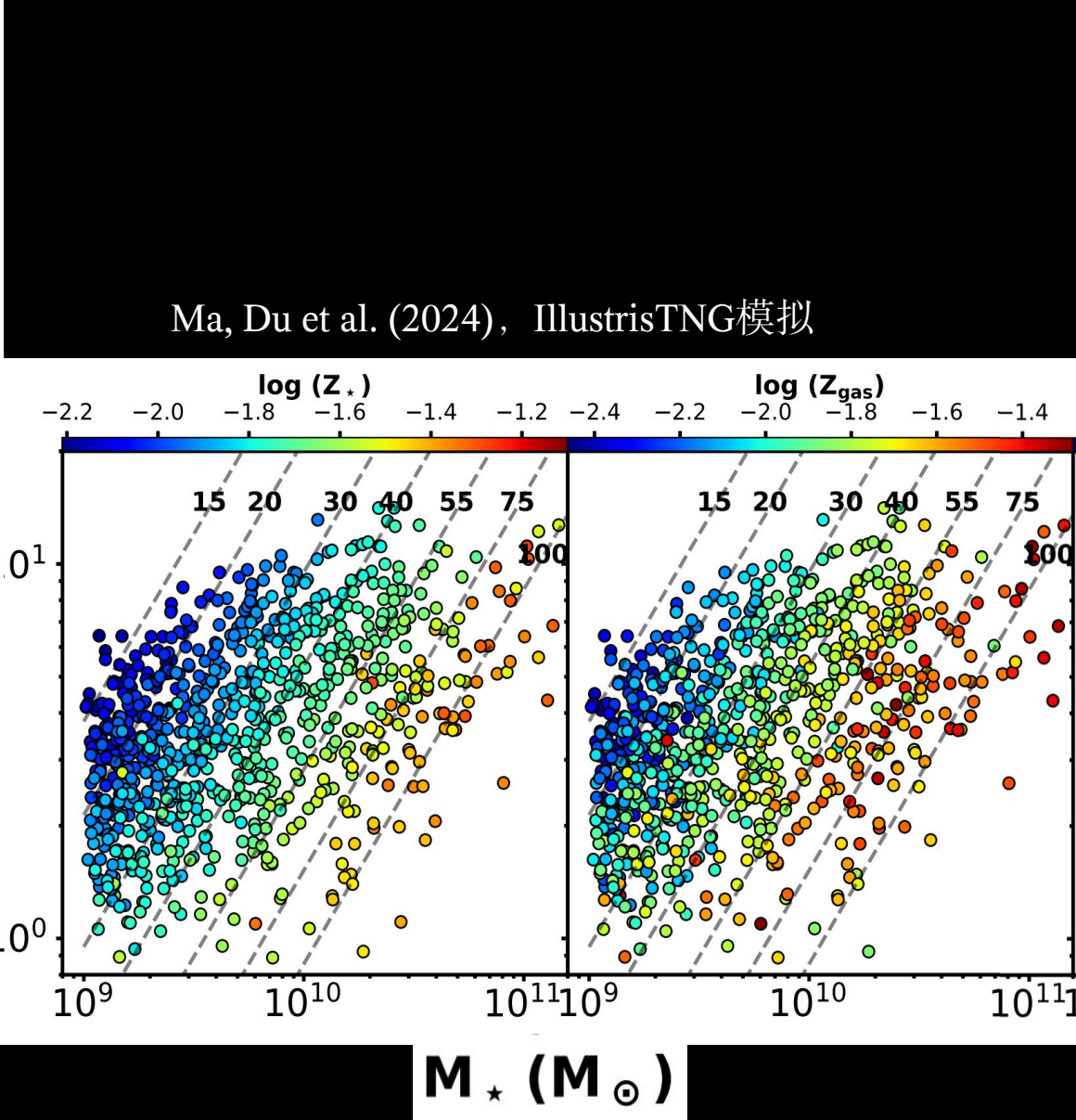
星系的化学演化：星系周介质中 恒星产生富金属 + 吸积混合贫金属 + 引力束缚与逃逸

核合成与恒星反馈 → 气体增丰 → 恒星增丰



Barone et al. (2020), 观测

星系的元素增丰经历了长期的累积效应，在多种因素调节下的复杂过程



总结：先天机制(nature) 主导下星系周气体循环与星系演化

初始条件与持续宇宙环境的演化 + 星系周气体循环 + 恒星与ANG反馈调节 + 星系内部恒星形成与动力学演化

规律性强，可模型化

