

# 非线性星系成团性的暗晕流模型

阮承宗

杜伦大学计算宇宙学研究所



Durham  
University



**CSST 科学年会 · 喀什 · 2026 年 7 月**

[arXiv:2603.10179](https://arxiv.org/abs/2603.10179)

[github.com/chzruan/freyja](https://github.com/chzruan/freyja)

# 现代红移巡天：向非线性进军

- ▶ 光谱巡天观测到的是红移空间：  
星系位置与视向速度耦合。
- ▶ 扰动理论在线性/准线性尺度上生效，  
有效尺度  $s_{\min} = 20\text{--}25 h^{-1}\text{Mpc}$
- ▶ 小尺度同时包含非线性结构形成、暗  
晕排斥、卫星运动与星系-暗晕联系。

可利用的信息增加



## 核心问题：

能否保留小尺度信息，同时  
保持物理可解释性？

# 红移空间成团性的流模型

- 流模型将红移空间的两点关联函数解耦：

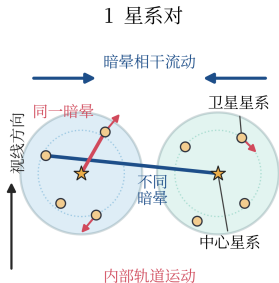
$$1 + \underbrace{\xi^S(s_\perp, s_\parallel)}_{\text{红移空间成团性 (位置} \otimes \text{速度)}} = \int_{-\infty}^{\infty} dr_\parallel \underbrace{[1 + \xi^R(r)]}_{\text{实空间成团性 (位置)}} \underbrace{\mathcal{P}(v_\parallel | r_\perp, r_\parallel)}_{\text{速度分布}}$$

- **精确关系**：流模型的物理起源是，实空间中相距为  $(r_\perp, r_\parallel)$ 、相对速度为  $v_\parallel$  的星系对，映射到红移空间的间隔为  $(s_\perp = r_\perp, s_\parallel = r_\parallel + \frac{v_\parallel}{aH})$ ，在全尺度上成立
- **流模型分解**：红移空间关联函数  $\xi^S(s_\perp, s_\parallel)$  被分解为更基本的模型成分：
  - 实空间关联函数  $\xi^R(r)$ ;
  - 相对速度的概率分布  $\mathcal{P}(v_\parallel | r_\perp, r_\parallel)$ ; 通过它的矩参数化: 均值、离散、偏度、峰度

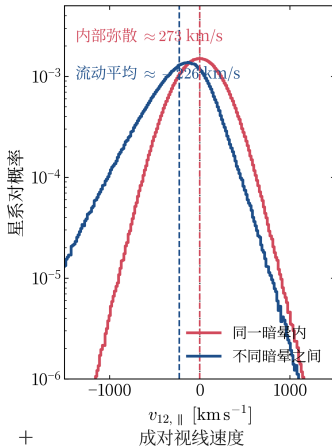
# 暗晕模型

暗晕之间的相干运动决定大尺度各向异性；暗晕内部卫星星系的运动造成小尺度拉长。

## 2 星系对如何运动



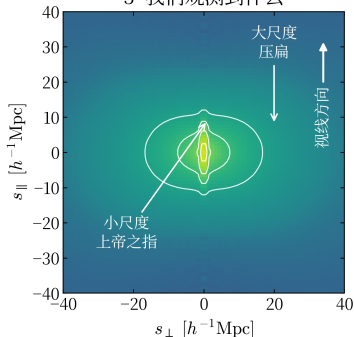
实空间星系对分布



+

→

## 3 我们观测到什么



红移空间成团性

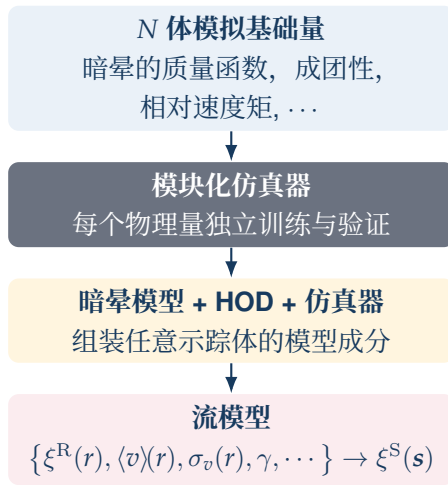
{ 中心星系、卫星星系 }  $\otimes$  { 1-halo、2-halo }  $\Rightarrow$  对每一种情况分别建模

# 暗晕模型 × 流模型

$$1 + \xi_X^S(s_\perp, s_\parallel) = \int dr_\parallel [1 + \xi_X^R(r)] \mathcal{P}_X(v_\parallel | r_\perp, r_\parallel)$$

$X \in \{\text{中心-中心, 中心-卫星, 卫星-卫星}\} \times \{1h, 2h\}$

- ▶ HOD 描述中心/卫星星系在宿主暗晕的分布;
- ▶ 暗晕模型将星系和宿主暗晕的性质联系起来;
- ▶ 流模型将实空间映射到红移空间。

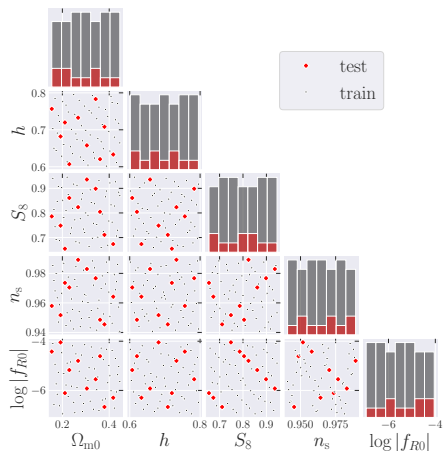


# DEGRACE-Pilot 数值模拟

- **DEGRACE-Pilot** 数值模拟: 一组包含 64 个  $f(R)$  修改引力理论的  $N$  体模拟及其相应的  $\Lambda$ CDM 模型。
- 4 个标准宇宙学参数 +1 个修改引力理论参数

$$\theta_{\text{cos}} = \left\{ \Omega_{\text{m}0}, h, S_8, n_s, \log_{10} |f_{R0}| \right\}$$

- $L_{\text{box}} = 1.024 h^{-1} \text{Gpc}$ ,  $N_{\text{particle}} = 2048^3$ .
- 基于快速  $N$  体代码 MG-GLAM, 每个模型 5 个盒子以减少样本方差。
- 精度可用于 DESI 亮红星系成团性建模。

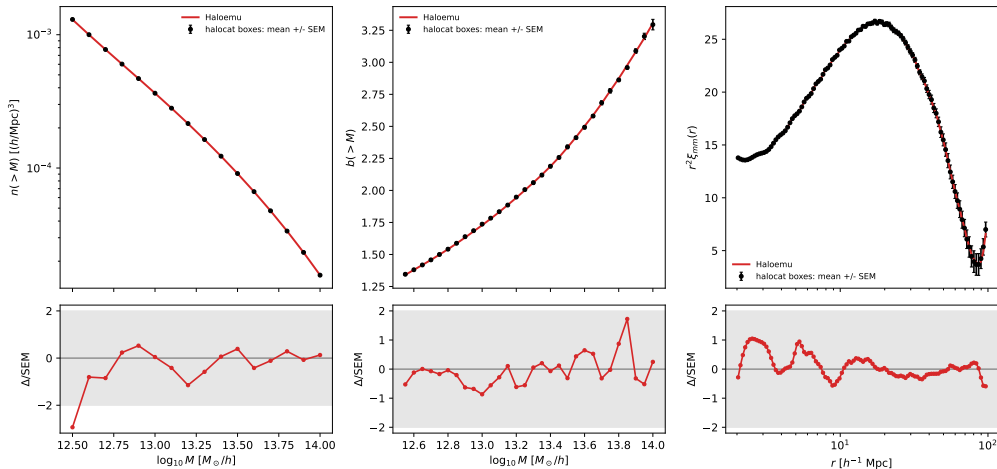


# 暗晕性质仿真器

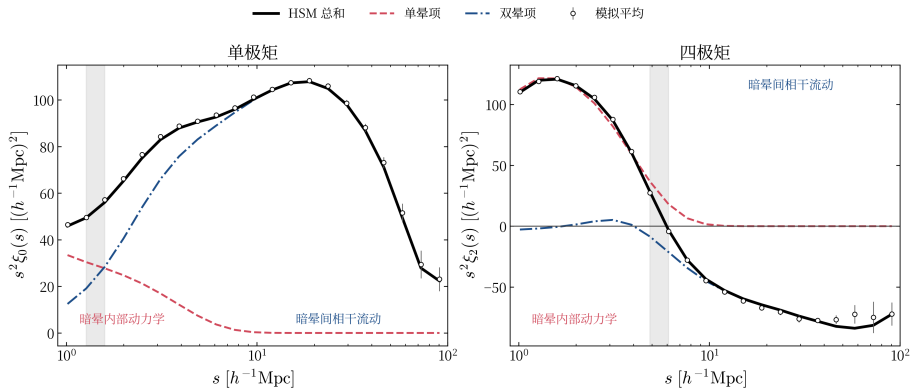
| 物理量       | 建模对象                                | 作用                         |
|-----------|-------------------------------------|----------------------------|
| 暗晕质量函数    | $n(> M)$ / 理论比值                     | 星系数密度与 HOD 权重              |
| 物质功率谱     | $P_{\text{mm}}(k)$                  | 大尺度成团性基准                   |
| 线性暗晕 bias | $b(M)$                              | 线性极限与质量依赖                  |
| 尺度依赖 bias | $\beta_{\text{nl}}(r M_1, M_2)$     | 暗晕排斥与非线性 $\xi_{\text{hh}}$ |
| 相对速度矩     | $\mu, \sigma^2, \gamma_1, \gamma_2$ | 流模型速度分布                    |

# 暗晕性质仿真器

$\Lambda$ CDM,  $z=0.25$ , imodel=2, boxes 1-5: halo ingredients



# 暗晕流模型



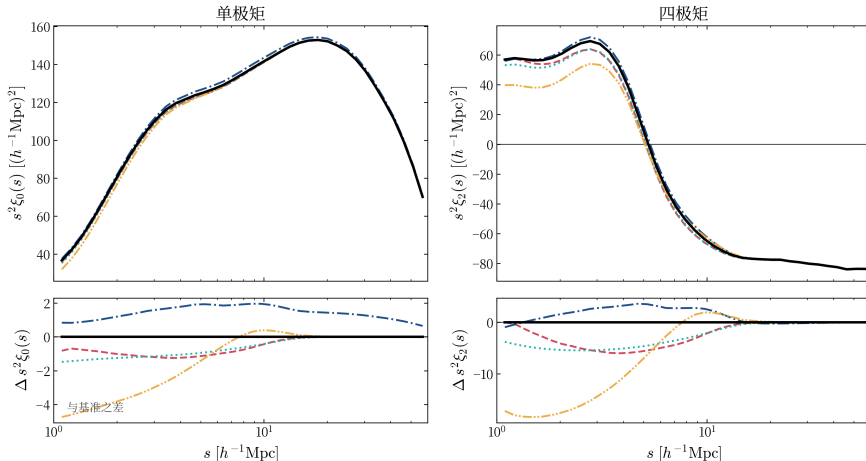
小尺度由暗晕内部动力学主导；大尺度由暗晕间相干流主导；过渡区由模型自然连接。

# 暗晕流模型

## 同一套暗晕物理量，多种星系模型

保持固定：暗晕质量函数、偏置、 $\xi_{\text{mm}}$ 、暗晕成对速度矩

— 基准：Zheng07 + NFW 卫星    -.- 占据数： $\alpha$  1.0  $\rightarrow$  1.35    -.- 速度偏置： $\alpha_s^{\text{rel}}$  1.2  $\rightarrow$  1.8  
-.- 卫星轮廓： $c_s = 2c_h$     -.- 随机性：亚泊松卫星



# 暗晕流模型：解析和模拟方法的交界处

## 物理透明

丰度、成团性、速度  
等等模型成分  
模块化处理  
可分别诊断与优化  
定位误差来源

## 示踪体灵活

星系-暗晕联系模块  
和宇宙学模块解耦  
适配多种星系样本

## CSST 路线

红移误差与选择函数  
巡天几何/协方差/AP  
效应  
多红移与联合探针  
迈向真实数据似然

把非线性成团性从“黑箱”变成可逐项检验的物理模型。

[arXiv:2603.10179](https://arxiv.org/abs/2603.10179)

[github.com/chzruan/freyja](https://github.com/chzruan/freyja)

# CSST 红移误差可以用流模型表述

$$1 + \xi_{\text{obs}}^{\text{S}}(\mathbf{s}) = \int d\mathbf{r}_{\parallel} [1 + \xi^{\text{R}}(r)] \mathcal{P}_{\text{eff}}(v_{\parallel} | \mathbf{r}),$$

$$\mathcal{P}_{\text{eff}} = \mathcal{P}_{\text{HSM}} \circledast \mathcal{G}_{\text{pair}}.$$

$$c_{20}^{\text{LOS}} \longrightarrow c_{20}^{\text{LOS}} + 2\sigma_{\text{err}}^2$$

高斯单星系误差只平移一个 LOS 二阶累积量；  
其余速度矩保持不变。

$$6.8 h^{-1} \text{Mpc}$$

单星系视线方向位移误差  $\sigma_{\text{err}}$

$$9.7 h^{-1} \text{Mpc}$$

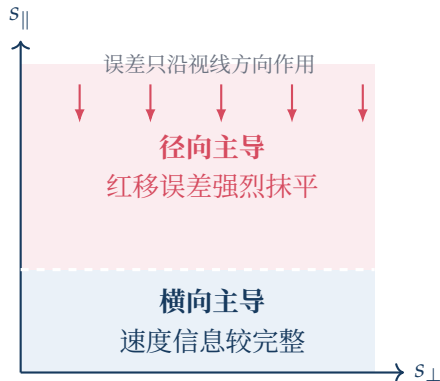
星系对误差  $\sigma_{\text{pair}} = \sqrt{2}\sigma_{\text{err}}$

$$\sim 4.5 h^{-1} \text{Mpc}$$

典型 ELG 物理相对速度尺度

$z = 0.5$ ,  $\sigma_z = 0.002(1+z)$ ; 位移量均为估算, 不是 CSST 数据标定结果。

# 径向信息被模糊后，最优的统计量必须转向横向



- ▶ 标准勒让德多极矩  $\xi_0, \xi_2, \xi_4$  混合受损与未受损方向，不应成为唯一的数据压缩统计量。
- ▶ 首选  $s_{\perp}-s_{\parallel}$  二维似然或 wedges：保留“大  $s_{\perp}$ 、小  $s_{\parallel}$ ”区域。
- ▶ 保守选择：一维投影  $w_p(r_p)$ ， $\Pi_{\max} \gtrsim 80 h^{-1} \text{Mpc}$

## CSST $\times$ DESI 交叉相关

每对只有一个宽红移误差： $\sigma_{\text{pair}} \simeq \sigma_{\text{err}}$ ，  
而不是 CSST auto 的  $\sqrt{2}\sigma_{\text{err}}$ 。