

$\Lambda$ CDM  $\leftarrow$   $\rightarrow$  BTPS

# High- $z$ galaxy formation with blue tilted power spectrum (BTPS)

最遠方銀河観測から迫る始原的パワースペクトル

**Shingo Hirano / 平野 信吾**

(Kanagawa University / 神奈川大学)



# 1 Intro

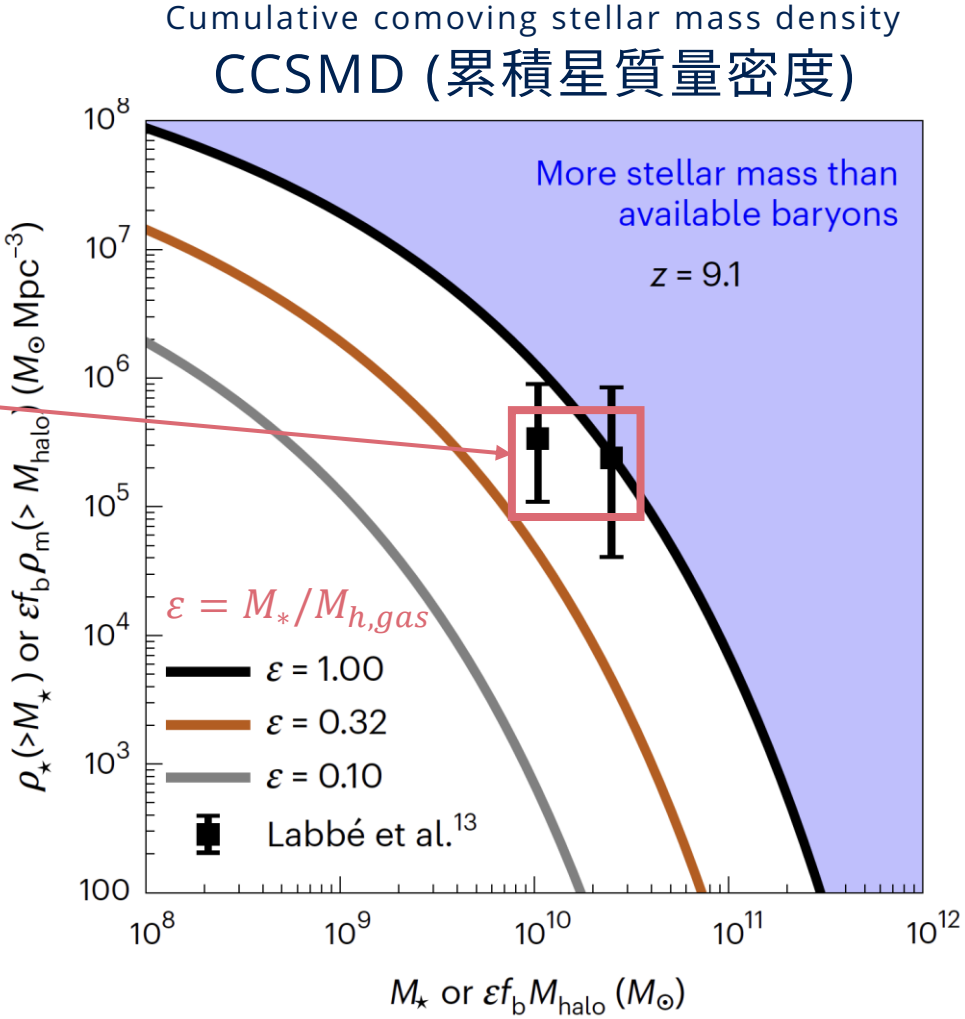
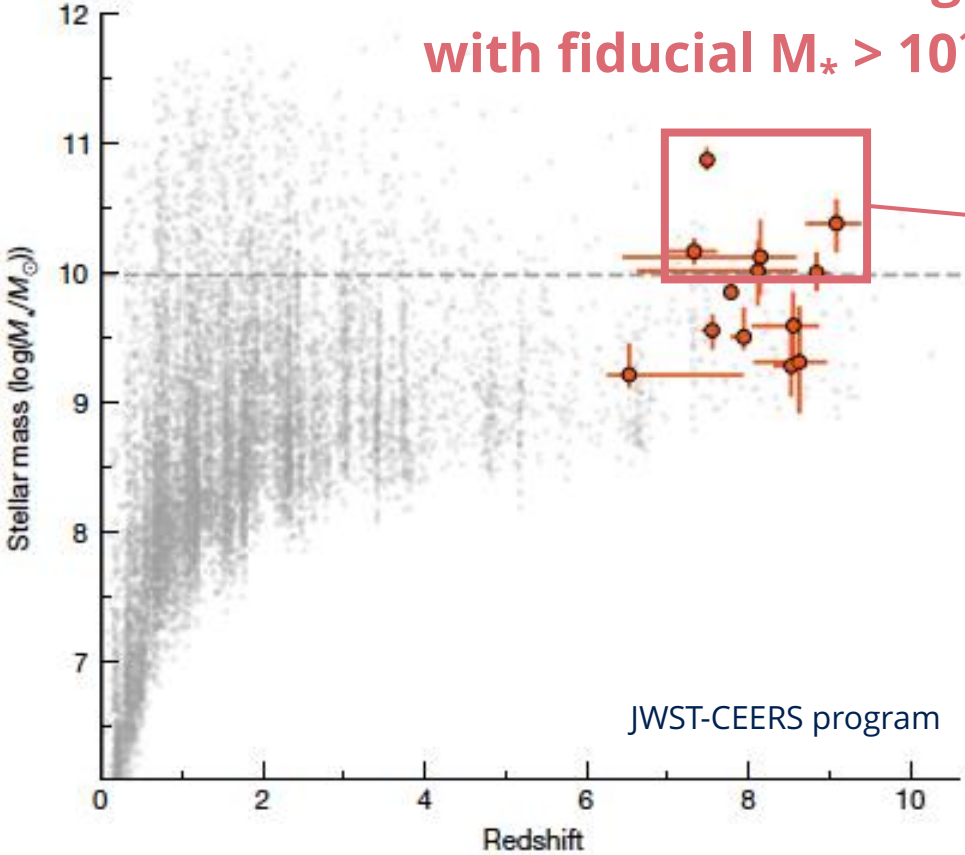
“a tension between  
the JWST observations  
and standard cosmology”

Boylan-Kolchin (2023) NatA, 7, 731

# Massive galaxies ~600 Myr after the Big Bang

References  
Labbe et al. (2023) Nature, 616, 266  
Boylan-Kolchin (2023) NatAs, 7, 731

Six galaxies are candidate massive galaxies with fiducial  $M_* > 10^{10} [M_\odot]$ .



# Stress testing $\Lambda$ CDM

JWSTで見つかった、星質量 $\sim O(10^{10}[M_{\odot}])$  at  $z = 7-10$ の銀河(候補)は、 $\Lambda$ CDM宇宙論より見積もられる銀河数密度・星質量密度と一致しない。  
(over-abundant problem)

いくつかの解釈

(1) 観測手法：赤方偏移を分光同定したのは数天体のみで、それ以外は測光的に同定している。

(2) 銀河形成モデル：星形成率  $\varepsilon = M_*/M_{h,gas}$  はlow-/high- $z$ で一緒？

大向さん講演／鄭さん計算

(3) 星形成モデル：Top heavy Pop III IMFへの着目

伊藤さん講演

**(4) 宇宙論モデル：始原的パワースペクトルへの着目**

- 近年ではPrimordial Black Hole (PBH)に関連した議論
- インフレーション理論に由来するモデルが考えられている

郡さん講演

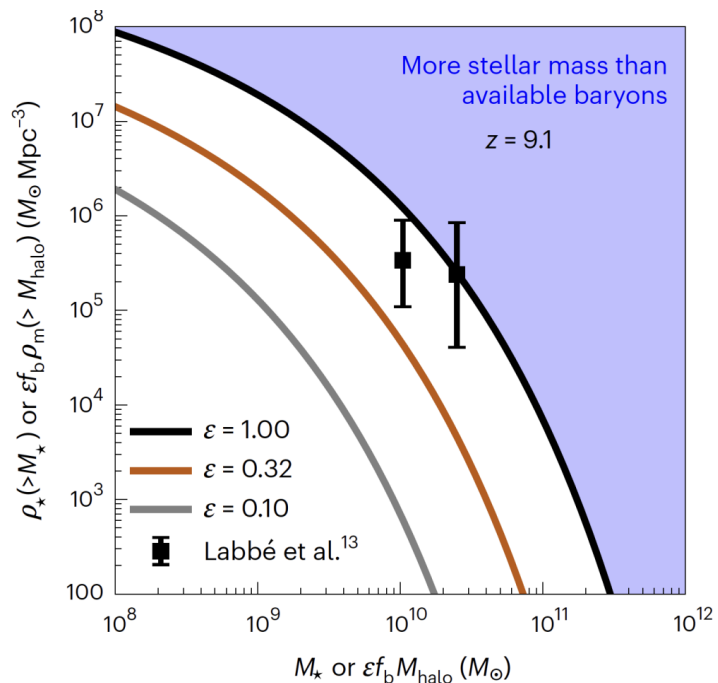
# CCSMD & PPS

References

Boylan-Kolchin (2023) NatAs, 7, 731

CCSMD (Cumulative Comoving Stellar Density; 累積星質量密度)

$$M_* = \epsilon f_b M_{\text{halo}} \begin{cases} f_b = \Omega_b / \Omega_m \\ \epsilon \leq 1 \dots \text{星形成率。銀河形成モデル} \\ \text{が示す上限は } \epsilon < 0.32 \text{ ほど} \end{cases}$$



HMF (Halo mass function; ハロ一質量関数)

$$\frac{dn}{d \ln M} = M \frac{\rho_0}{M^2} f(\sigma) \left| \frac{d \ln \sigma}{d \ln M} \right|$$

$$\sigma^2(R) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty k^2 P(k) W^2(kR) dk$$

$$P(k) = \underline{P_{\text{prim}}(k)} T^2(k)$$

**Primordial Power Spectrum  
(PPS; 始原的パワースペクトル)**

# Primordial Power Spectrum

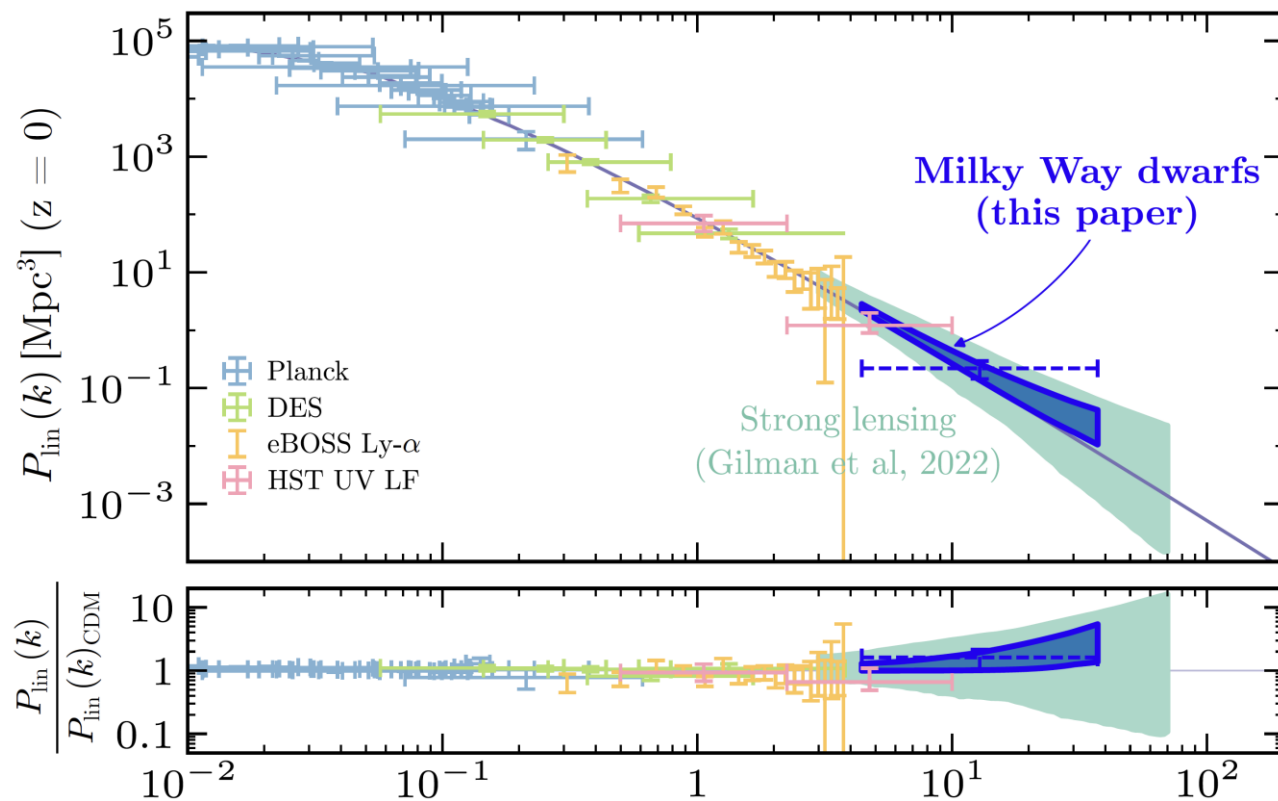
References

Esteban et al. (submitted) arXiv:2306.04674

Honma et al. (submitted) arXiv:2311.05439

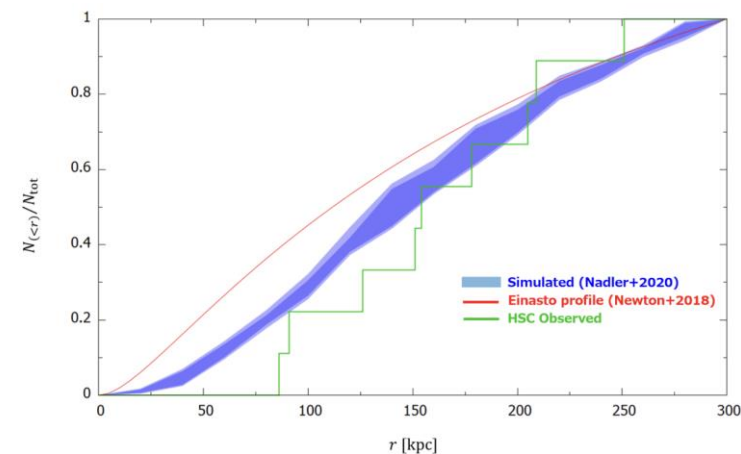
scale-free  $P_{\text{prim}}(k) \propto k^{n_s}$  でよく再現

...まだ自由度がある



大きな揺らぎ ←  $k$  [Mpc<sup>-1</sup>] → 小さな揺らぎ  
(大きな構造の種) (小さな構造の種)

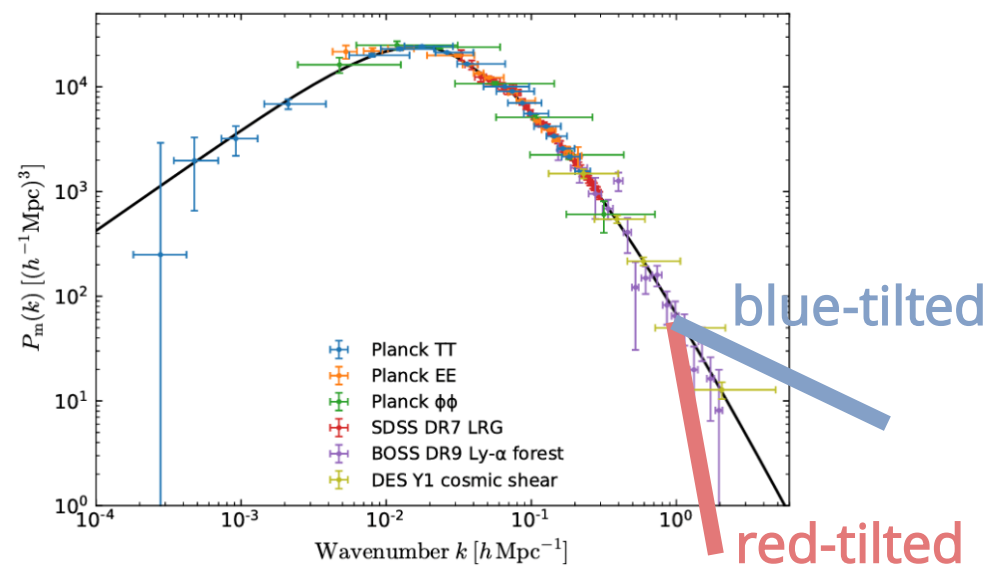
最近 *too much satellite*  
という観測報告も  
(これも stressing  $\Lambda$ CDM)



**Fig. 8.** Expected radial distribution of MW satellites reproduced from the work of Nadler et al. (2020) (blue bands), compared to the observed satellite distribution from HSC (green histogram). The red curve shows the Einasto profile fit to the radial distribution of satellites predicted by Newton et al. (2018).

# Blue, Tilted Power Spectrum (BTPS)

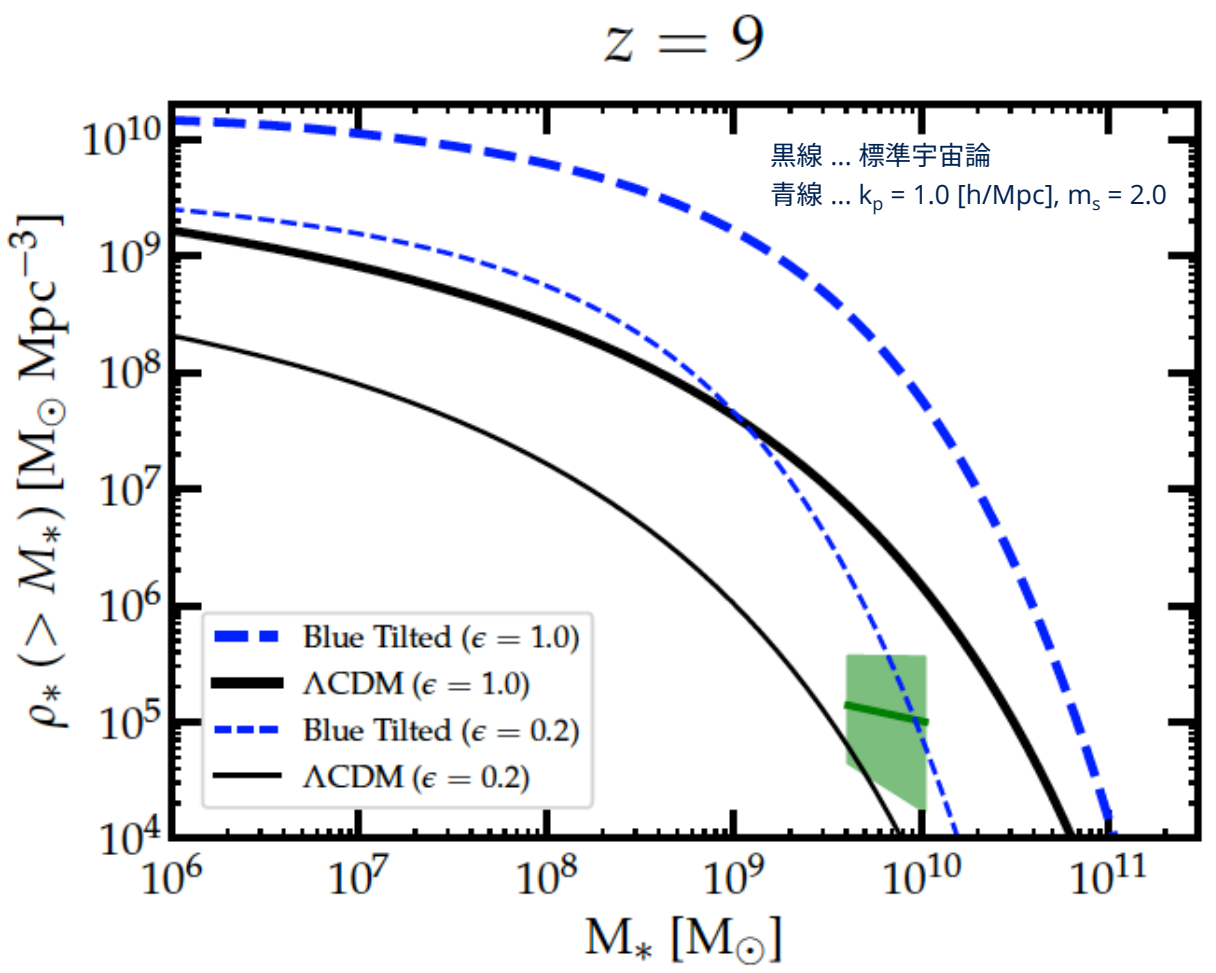
References  
Parashari & Laha (2023) MNRASL, 526, L63



$$P_{\text{prim}}(k) \propto k^{n_s}, \quad \text{for } k < k_p,$$

$$\propto k_p^{n_s - m_s} k^{m_s}, \quad \text{for } k > k_p.$$

$k_p$  ... pivot scale  
 $m_s$  ... if  $m_s > n_s \rightarrow$  blue-tilted  
 if  $m_s < n_s \rightarrow$  red tilted



# BTPS for first stars $\rightarrow$ high-z galaxies

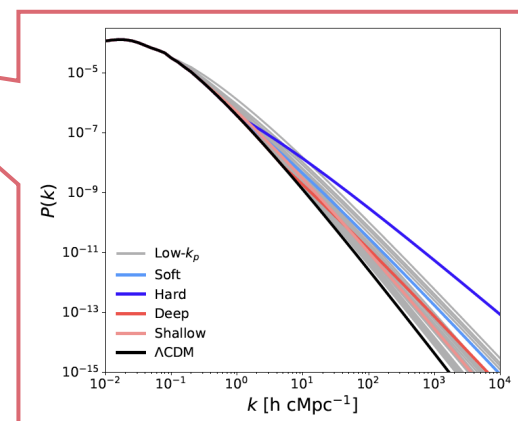
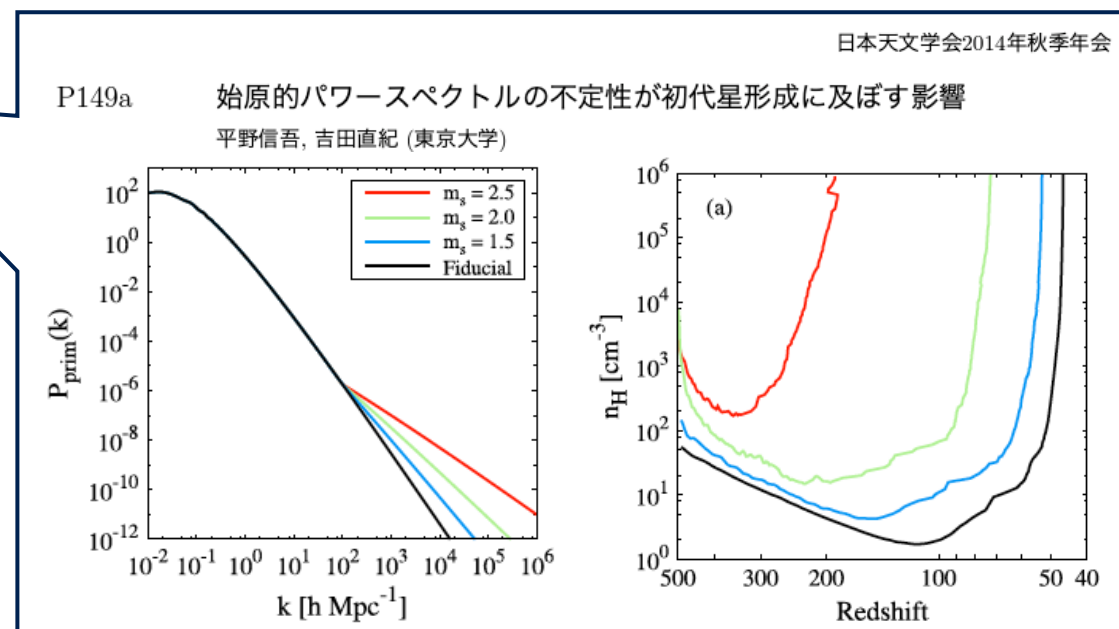
References

Hirano et al. (2015) ApJ, 814, 18

かつて、BTPSが初代星形成へのBTPSの影響を調べたことがあった。

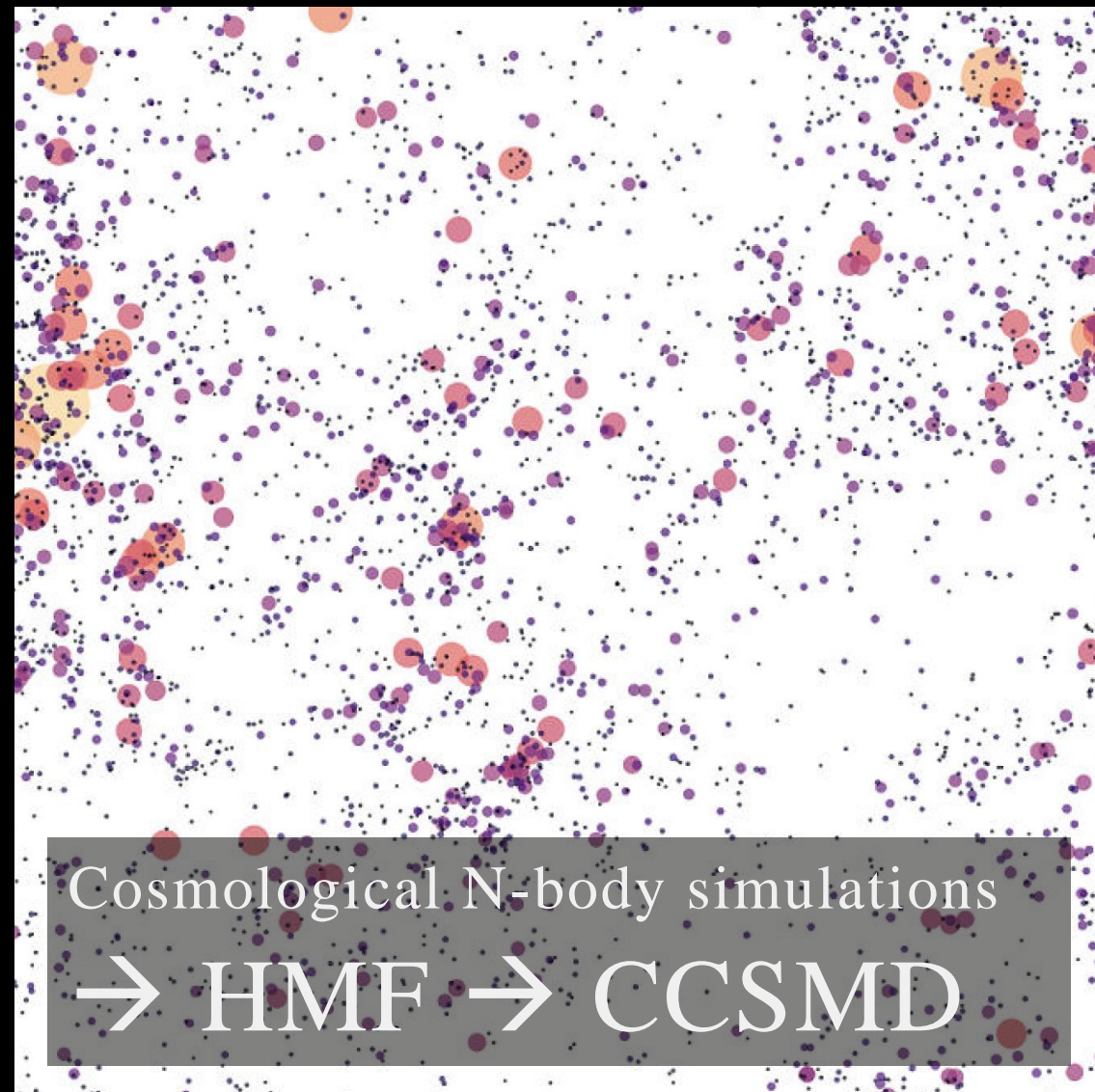
## 本研究

- 高赤方偏移銀河への影響を調べる。
- BTPSを与えた宇宙論的初期条件を生成し、N体計算を行いHMFを求める。
- 先行研究 (Parashari & Laha 2023) に比べて、**緩やかな傾きを与えた場合 (shallow models) のパラメータ・サーベイ**を行った。
- 観測を説明するCCSMDとなるために必要なBTPSパラメータを特定した。





# 2 Method



# Cosmological N-body simulations

## Initial condition (IC)

- Cosmological IC (MUSIC; Hahn & Abel 2011)  
+ BTPS (blue tilted power spectrum)

$$P_{\text{prim}}(k) \propto k^{n_s} \quad (\text{for } k \leq k_p),$$

$$\propto k_p^{n_s - m_s} \cdot k^{m_s} \quad (\text{for } k > k_p)$$

- $L_{\text{box}} = 10, 25, \text{ and } 50 \text{ [cMpc/h]}$
- $z = 99 \rightarrow 0$

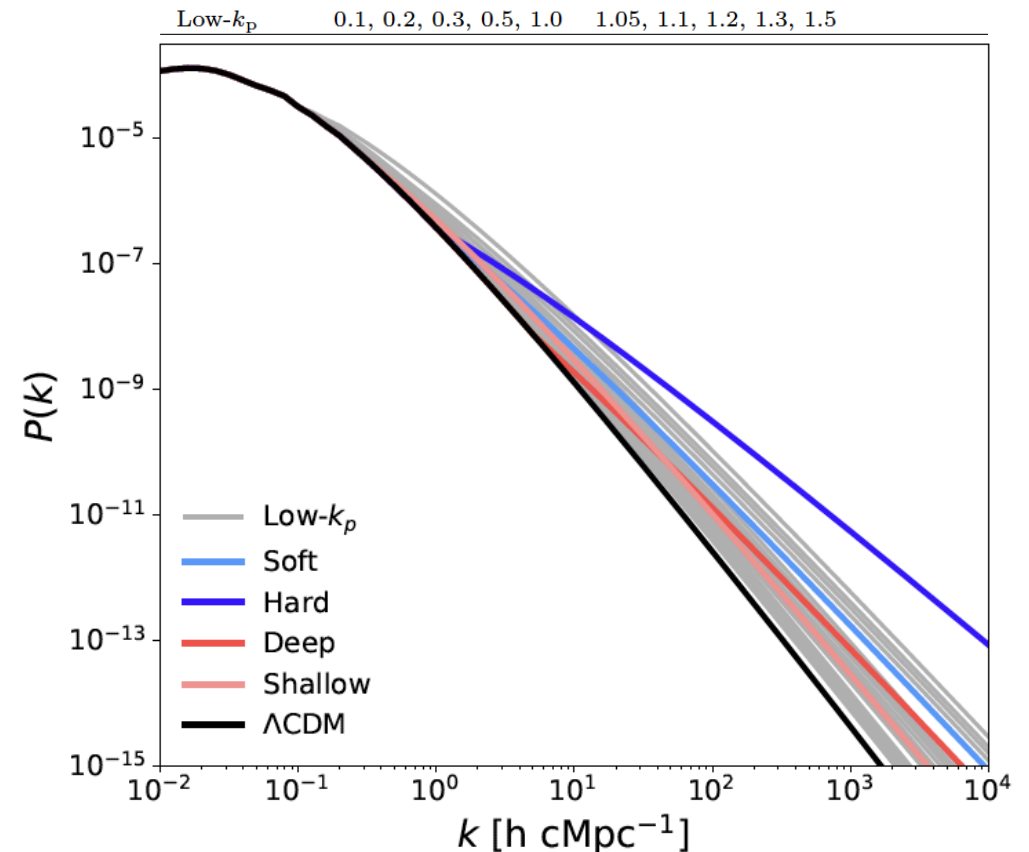
## Numerical code

- Gadget-2 (Springel 2005)

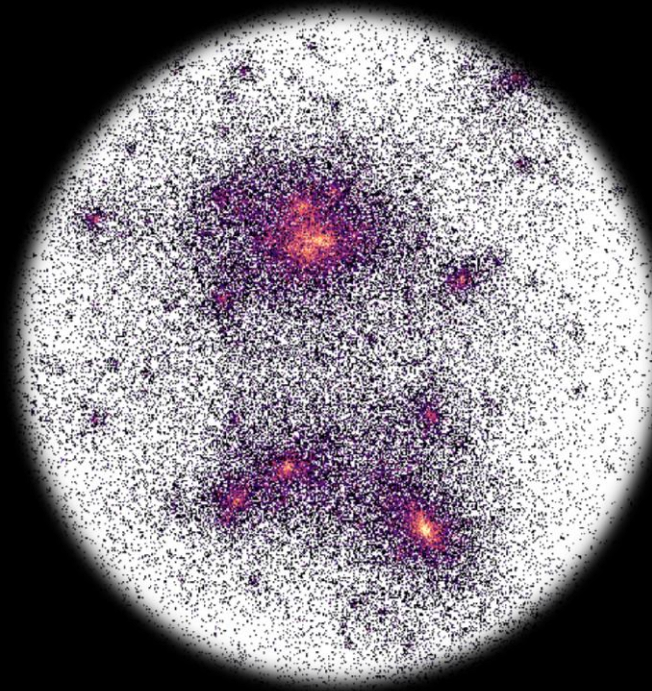
## Analysis

- CCSMD (cumulative comoving stellar mass density)
- UVLF (ultra-violet luminosity function)

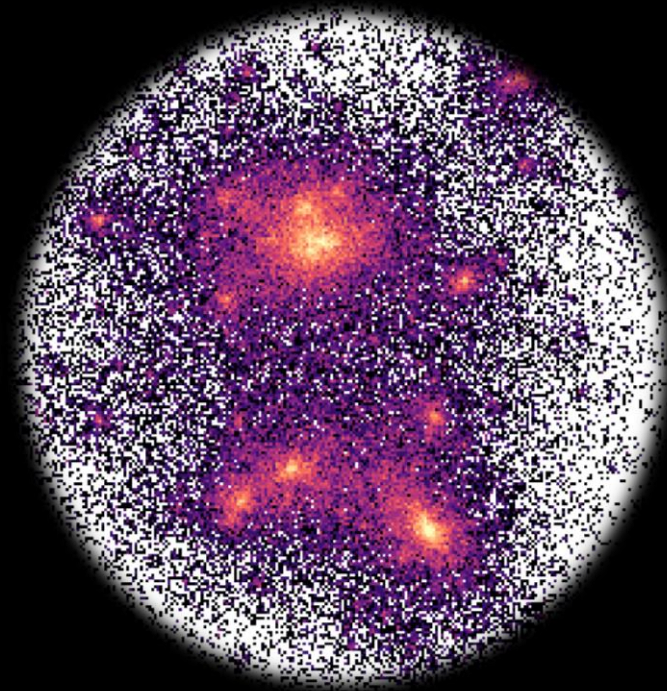
PPS model	$k_p$	$m_s$	$\sigma_8$
$\Lambda$ CDM	-	-	0.8111
Soft	1.0	1.5	0.8112334
Hard	1.0	2.0	0.8114093
Deep	5.0	1.5	0.8111017
Shallow	0.3	1.2	0.8142659



# 3 Results



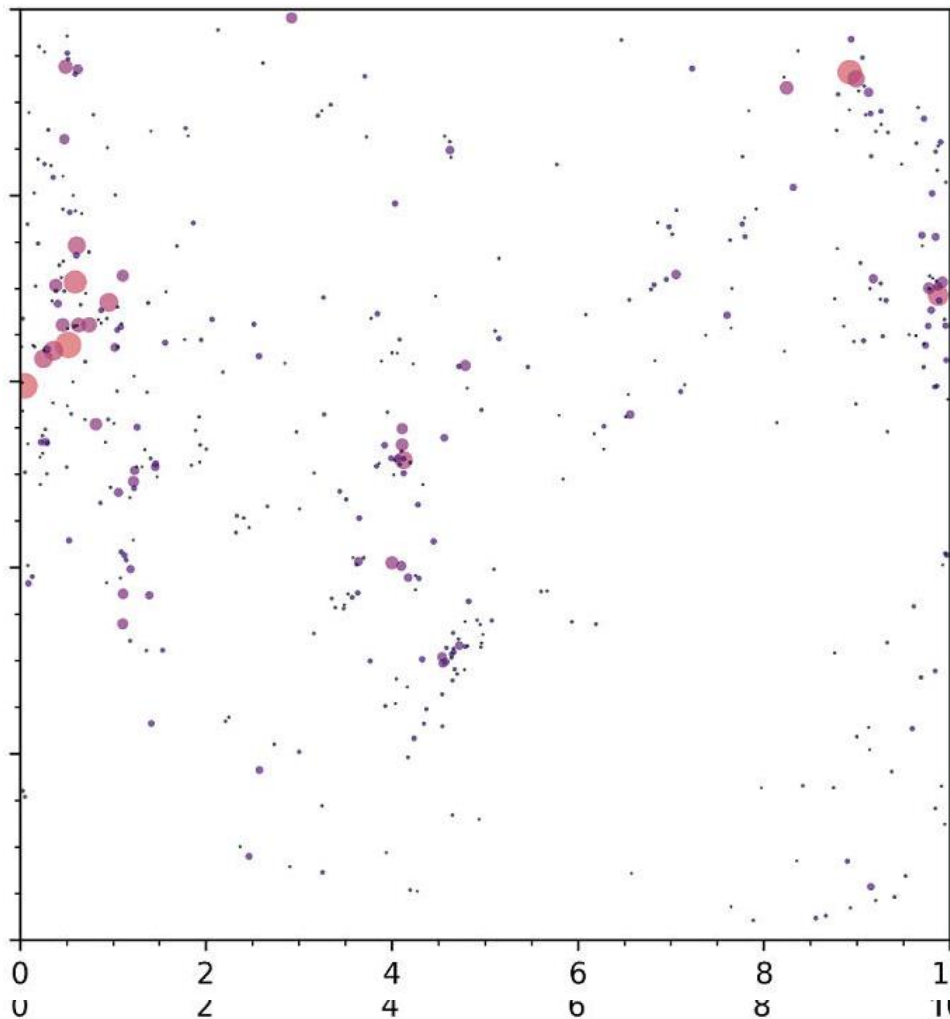
scale-free



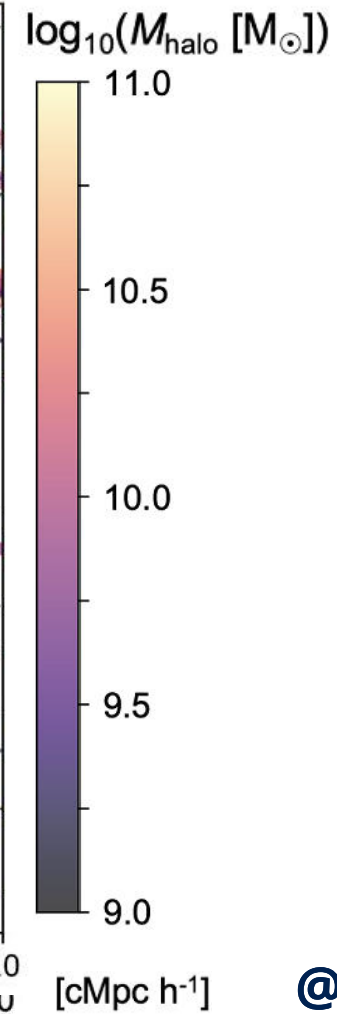
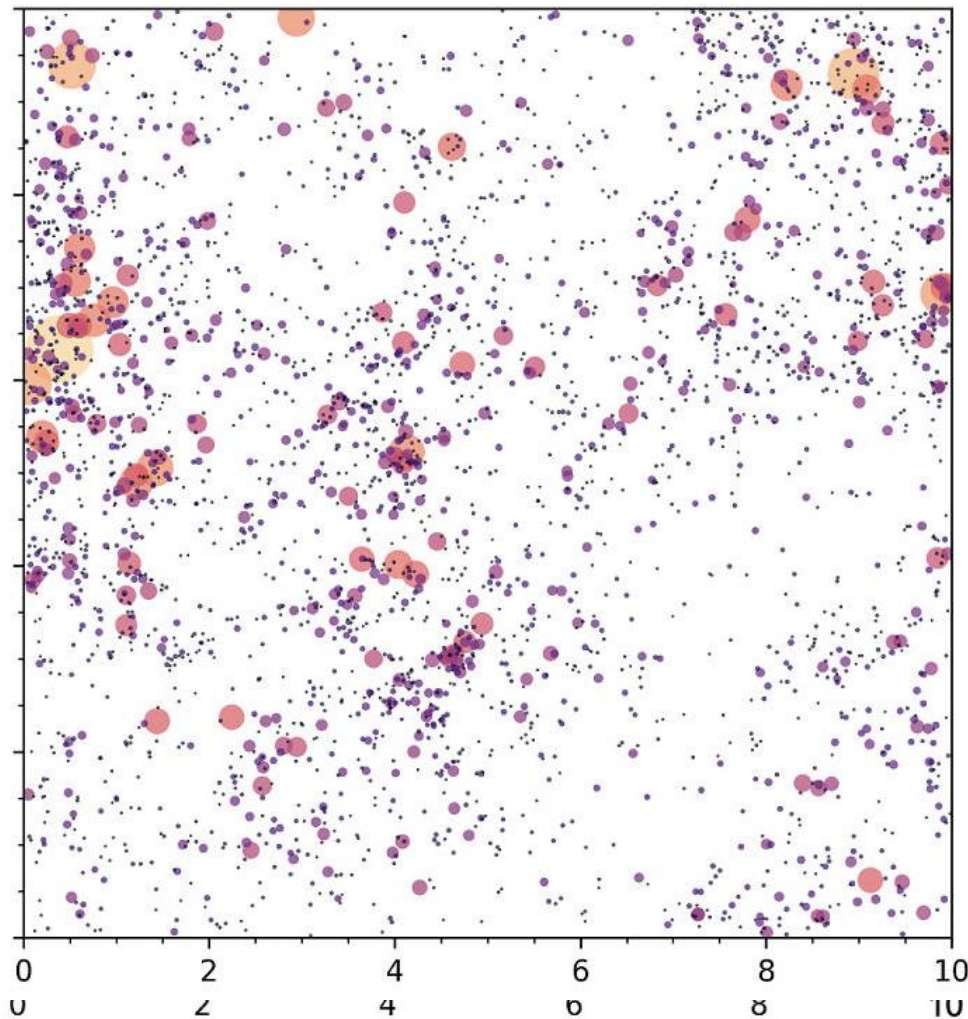
BTPS

# Structure Formation: $\Lambda$ CDM vs Soft

$\Lambda$ CDM

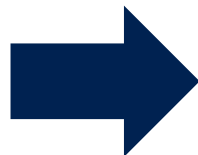
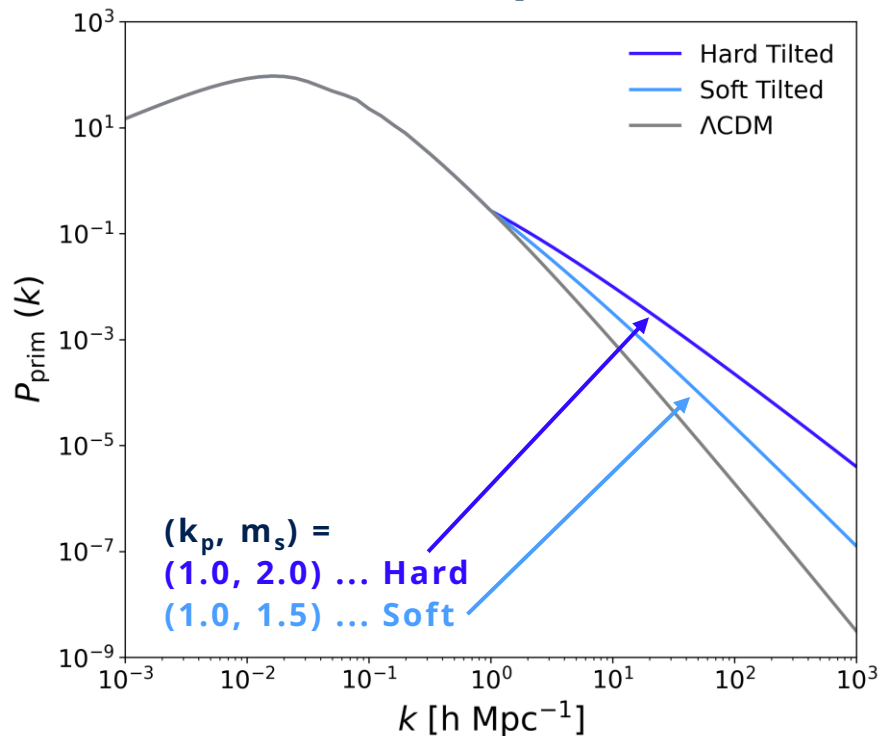


Soft model ( $k_p, m_s$ ) = (1.0, 1.5)

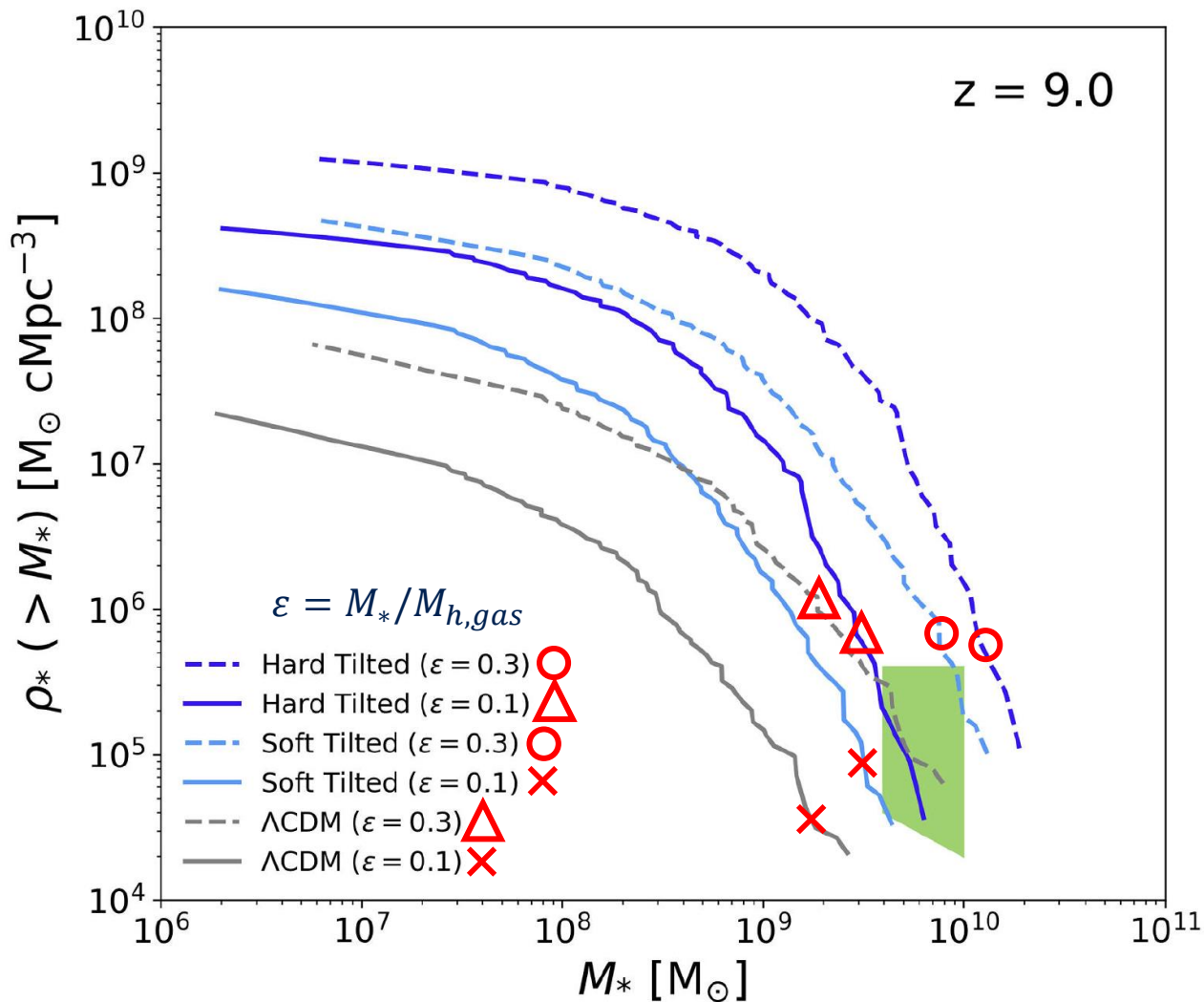


# 傾き $m_s$ 依存性

### BTPS model parameter



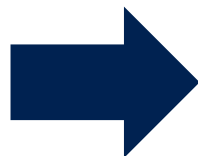
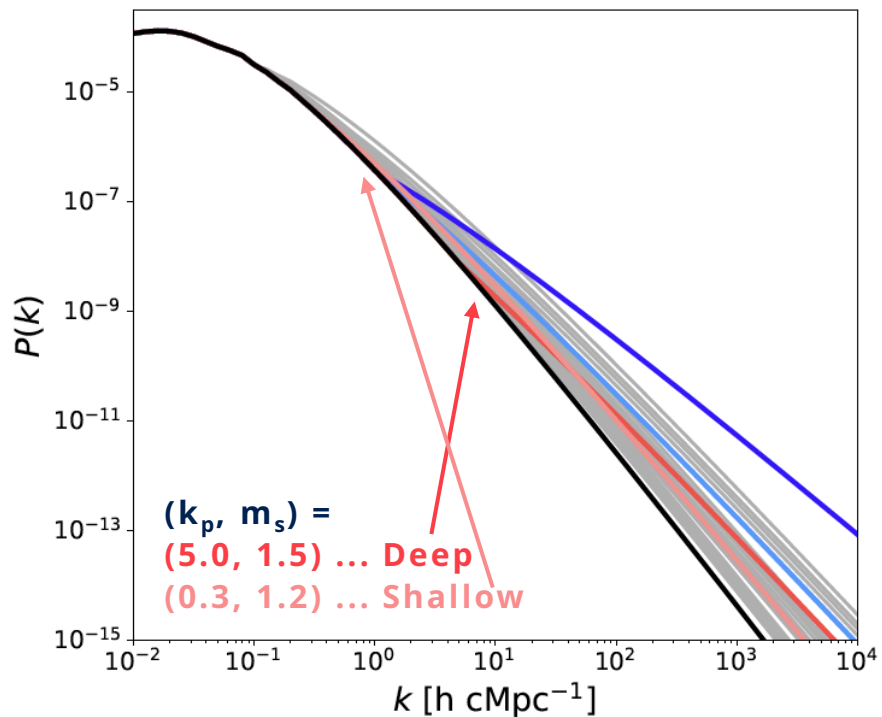
### CCSMD: simulation vs observation



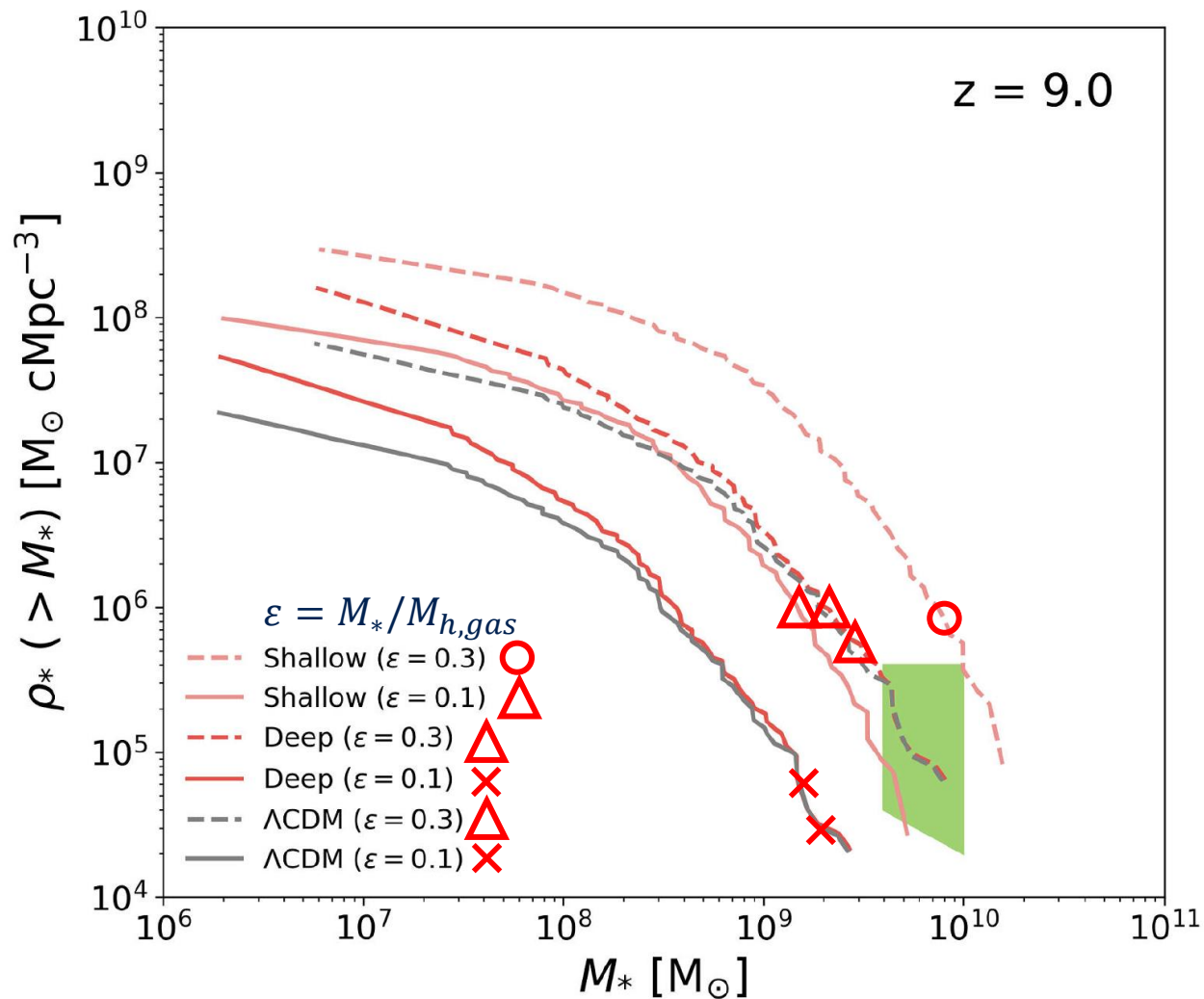
傾斜  $m_s$  を大きく変えない限り  
 星形成率  $\epsilon = M_*/M_{h,gas}$  を下げられない

# 切替スケール $k_p$ 依存性

### BTPS model parameter



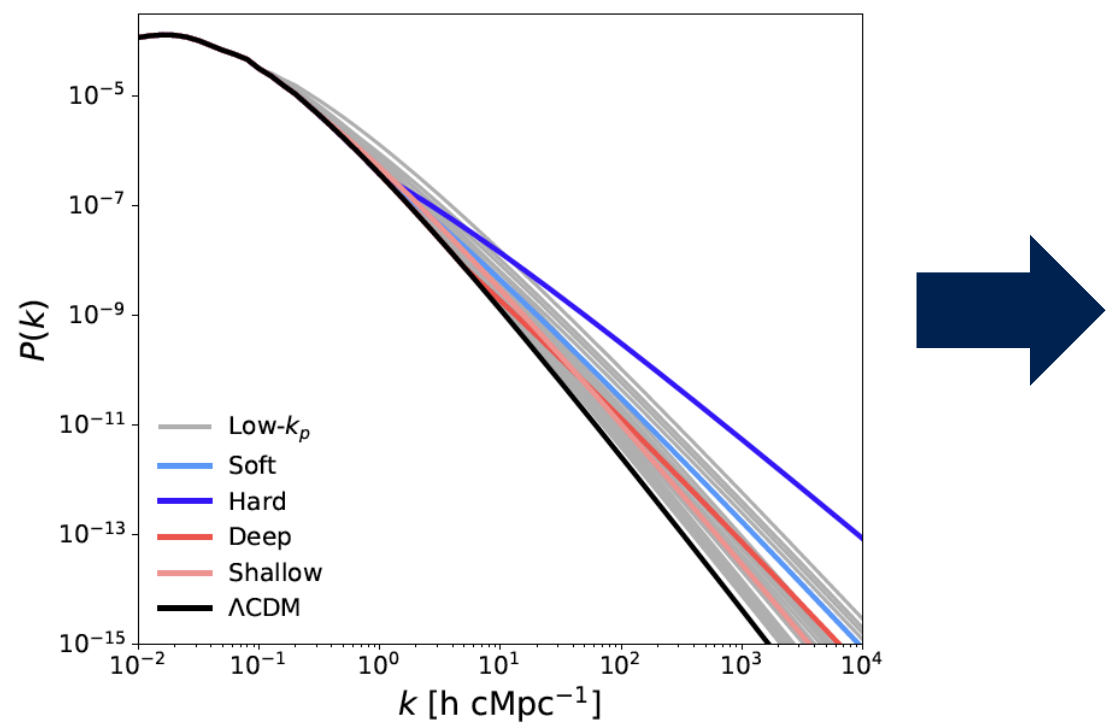
### CCSMD: simulation vs observation



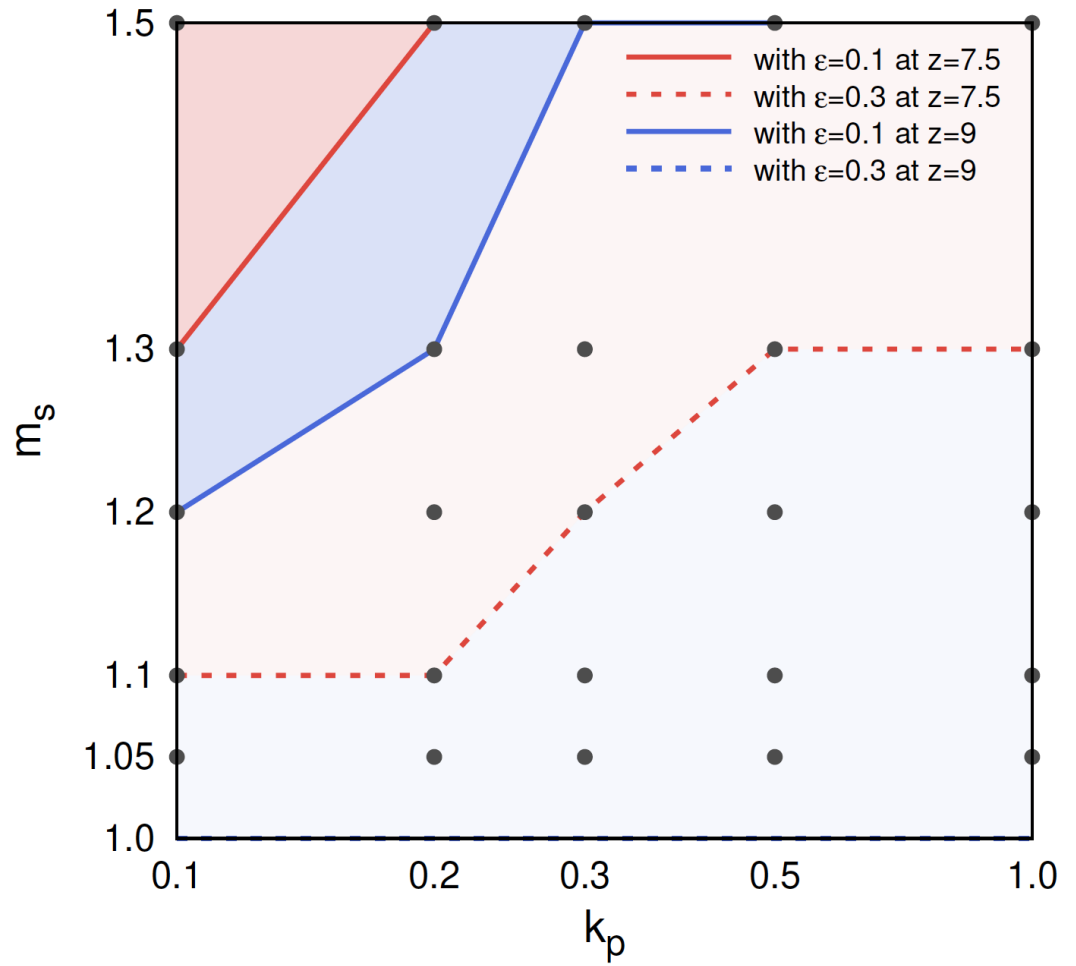
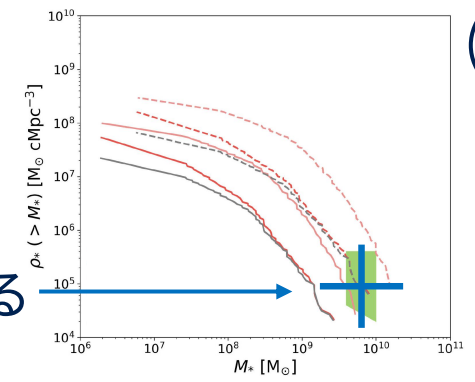
切替スケール  $k_p$  が小さければ、  
 わずかな傾斜変化で十分

# Parameter survey for low- $k_p$

### BTPS model parameter



観測中央値を上回る  
パラメータ範囲



星形成率  $\epsilon = 0.1$  で説明するには、  
 $(k_p, m_s) = (0.2, 1.3)$  などをとればよい。

# Discussion

# 4

Big Bang

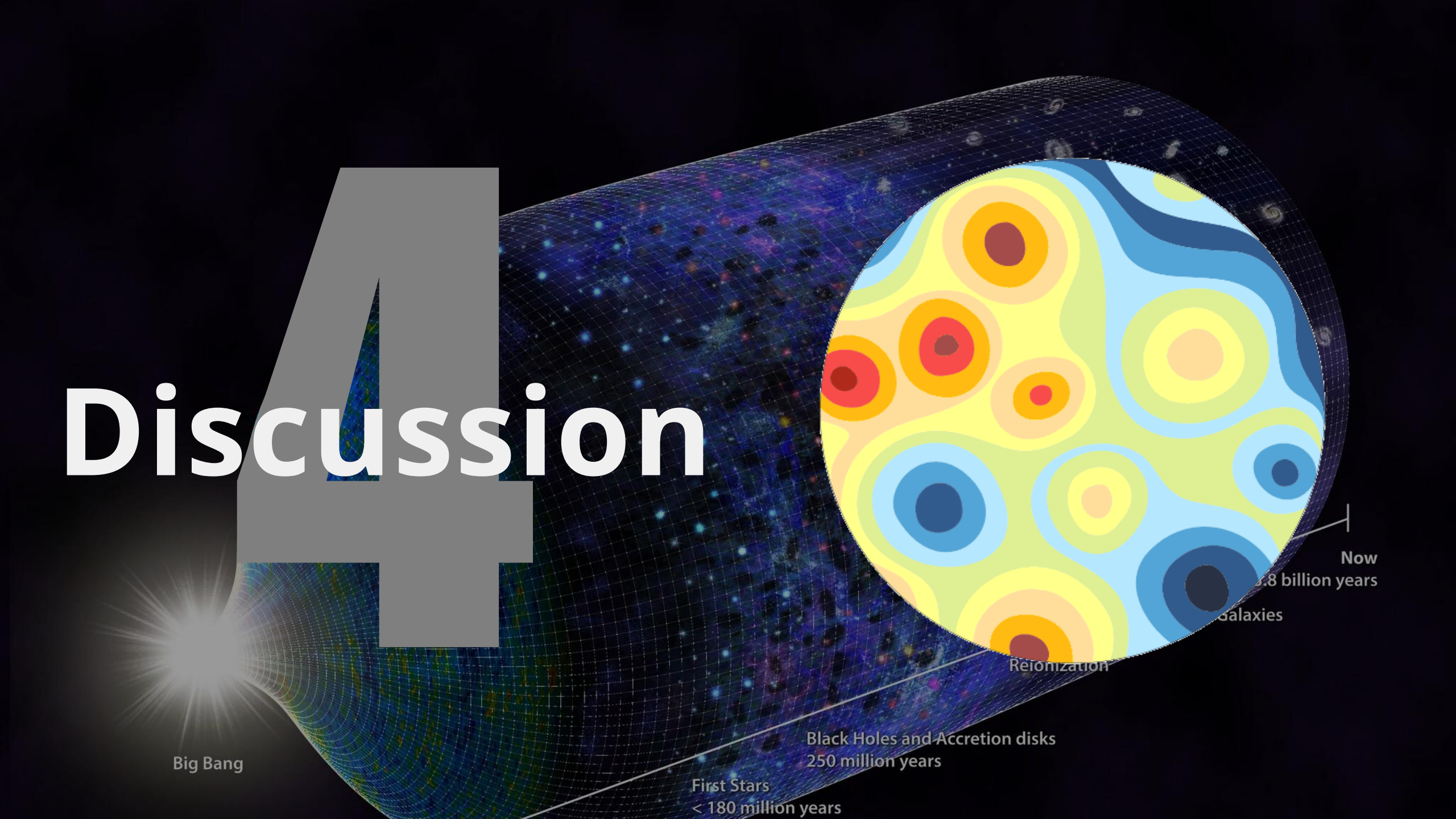
First Stars  
< 180 million years

Black Holes and Accretion disks  
250 million years

Reionization

Galaxies

Now  
13.8 billion years





# Effects on the first star formation

References

Hirano et al. (2015) ApJ, 814, 18

伊藤さん講演

小スケール揺らぎを強めると、初代星の

- 形成時期  $z$  は早まる
- 星質量  $M_*$  は増加

初代星形成に影響するためには、始原的パワースペクトルの傾斜  $m_s$  を大きく変化させる必要があった。

→ 今回調べたlow- $k_p$ は  $k_p < 1$ ,  $m_s = 1.0-1.5$

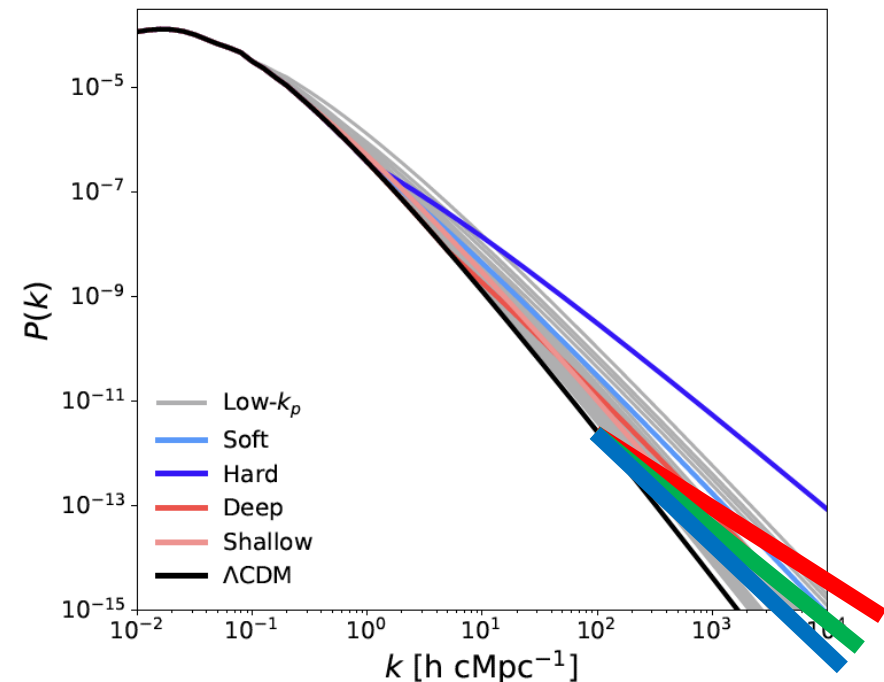
傾斜  $m_s$  が小さくても、low- $k_p$ を選択すると、ミニハロースケールの揺らぎは強まる。

JWST観測に合わせた場合、初代星形成への影響も同時に考慮する必要がある。

e.g., event rates of BH-BH merger, SMBH formation

$k_p$	$m_s$	$z_{\text{form}}$	$M_{\text{vir}}$ [ $10^5 M_\odot$ ]	$M_{*,\text{est}}$ [ $M_\odot$ ]
Scale-free		46.2	0.83	220
100	1.5	52.6	0.65	153
100	2.0	72.1	0.22	67
100	2.5	186.3	0.37	245

Hirano+2015



# Star formation efficiency

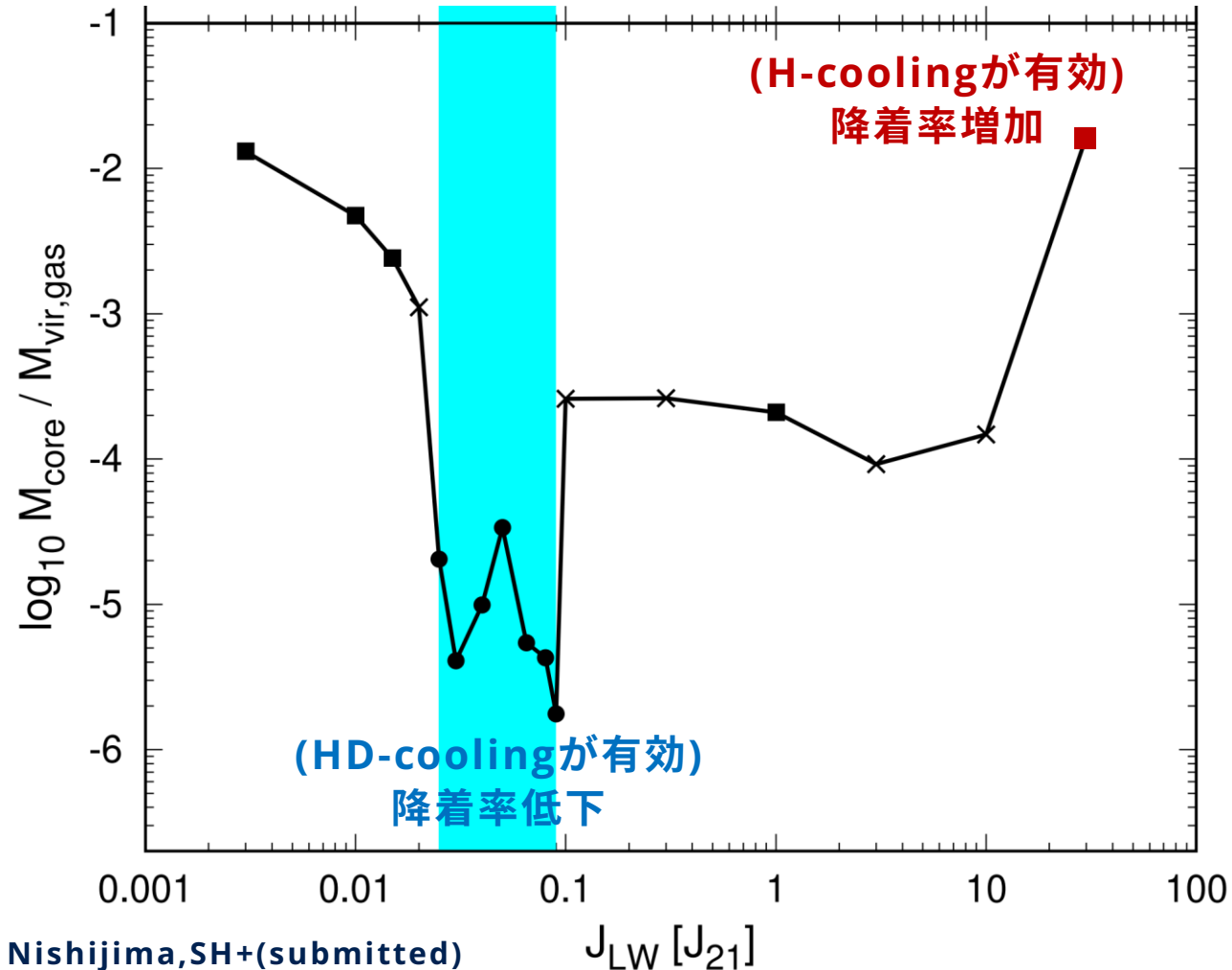
References

Hirano et al. (2023) MNRAS, 525, 5737

Nishijima, SH+ (submitted) arXiv:2311.10386

大向さん講演 / 鄭さん計算

高密度領域 ( $n > 10^8$  [cm<sup>-3</sup>])のガス質量  
ビリアルスケールのガス質量



銀河形成における星形成率として

$$\varepsilon = \frac{M_*}{M_{\text{halo,gas}}} \leq 0.3$$

を上限として、観測を説明可能なシナリオを探っている。

これはhigh-z galaxies (first galaxies) にも適用可能か。

# High-z galaxy formation with BTPS

最遠方銀河観測から迫る始原的パワースペクトル

- A tension between the JWST observations and standard cosmology
    - Extremely high star formation efficiency ( $\varepsilon$ )
  - Blue-tilted power spectrum (BTPS) with two parameters:  $m_s$  (slope),  $k_p$  (scale)
    - Models with low- $k_p$  reproduce observations with adequate star formation rates
- ✓ Is first star formation acceptable if the BTPS model is adopted?  
→ high-z, massive first stars?

Hirano & Yoshida (submitted) arXiv:2306.11993

