

銀河進化と遠方宇宙 - 2019.3.11 - Kanagawa Univ

天体物理学的効果の中性水素 のクラスタリングへの影響

Rika Ando¹

arXiv:1808.01116

Collaborators: Atsushi J Nishizawa¹

Kenji Hasegawa¹

Ikkoh Shimizu²

Kentaro Nagamine²

¹Nagoya University, ²Osaka University

1. Introduction

- *galaxy survey*
- *21cm line intensity mapping*

2. HI bias

- *BAO peak scale*
- *scale dependence*

3. Redshift space distortion of HI

- *theoretical model*
- *measure using simulation data*
- *SKA*

4. Summary

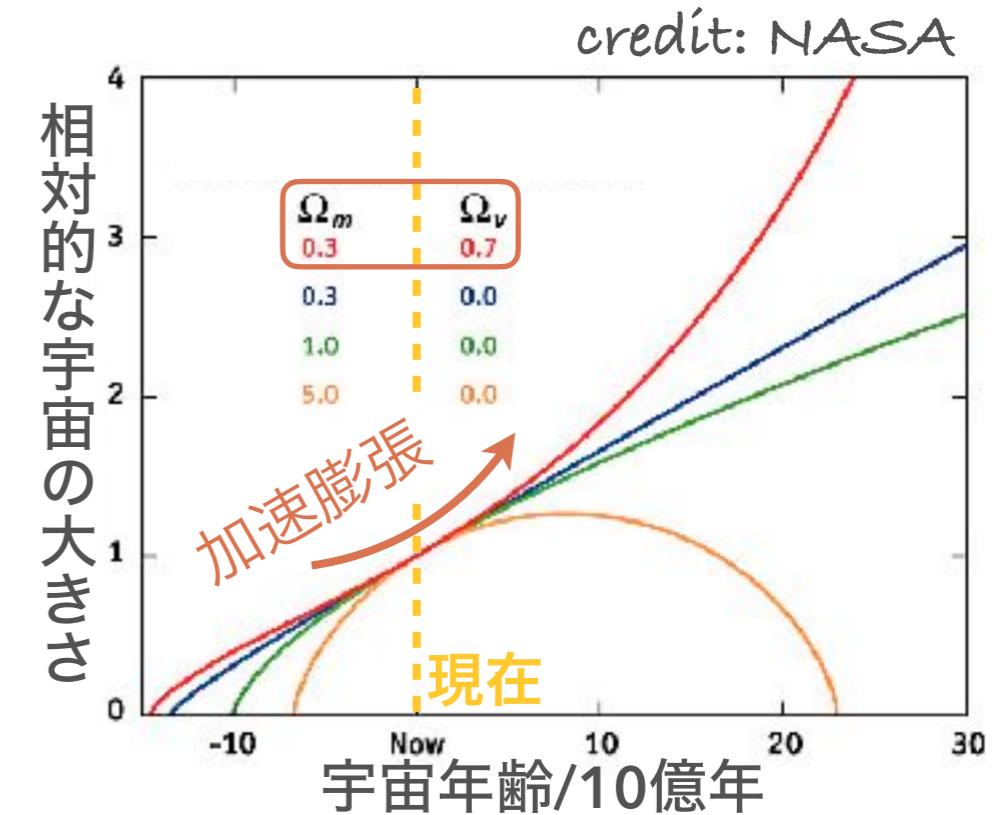
宇宙の加速膨張の起源

(**dark energy** や **modified gravity**)

斥力を及ぼすエネルギー 一般相対論を拡張



- 膨張率の変化
- 密度ゆらぎの進化



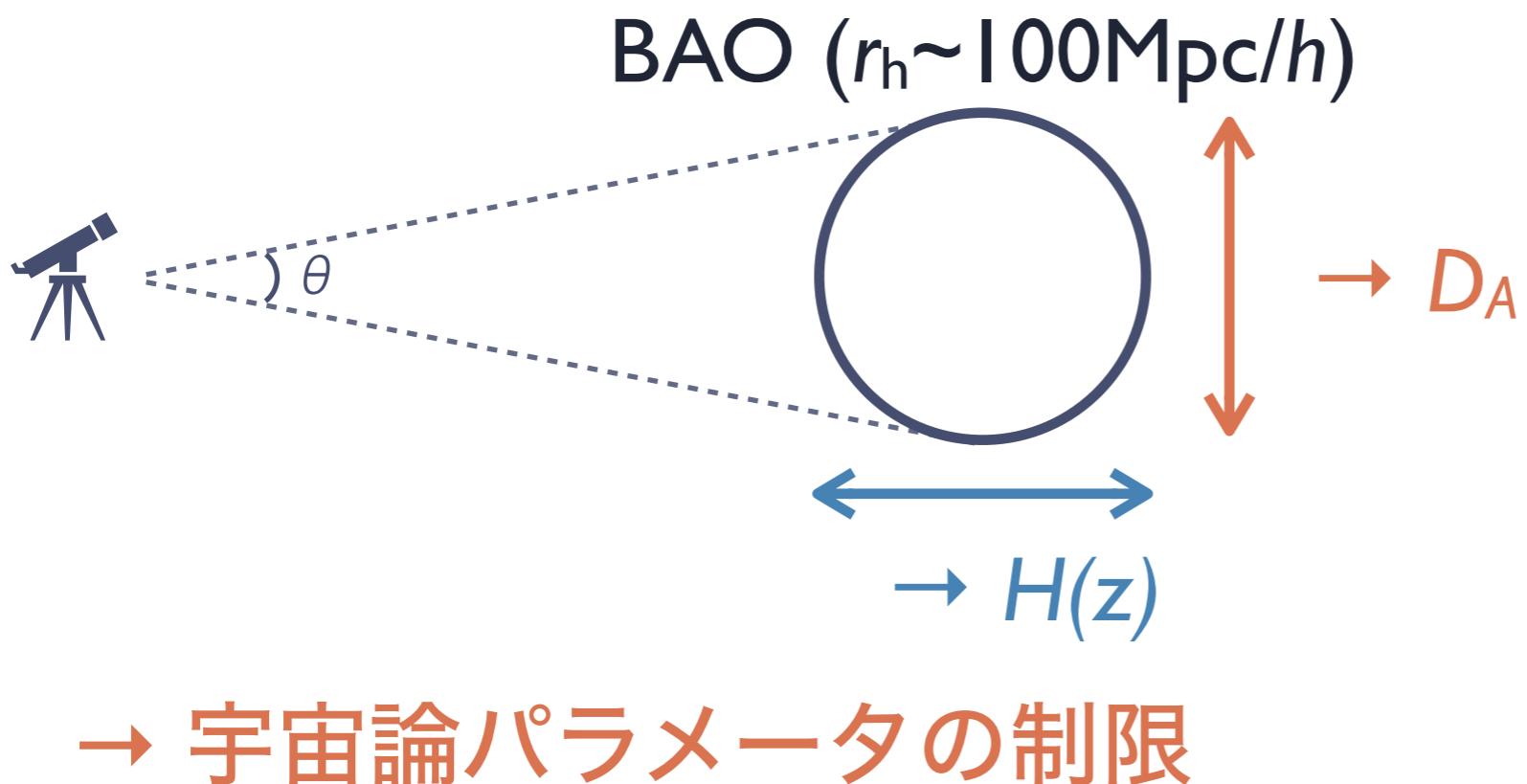
大規模構造の探査による制限

→ パワースペクトル, 相関関数, BAO, RSD ...

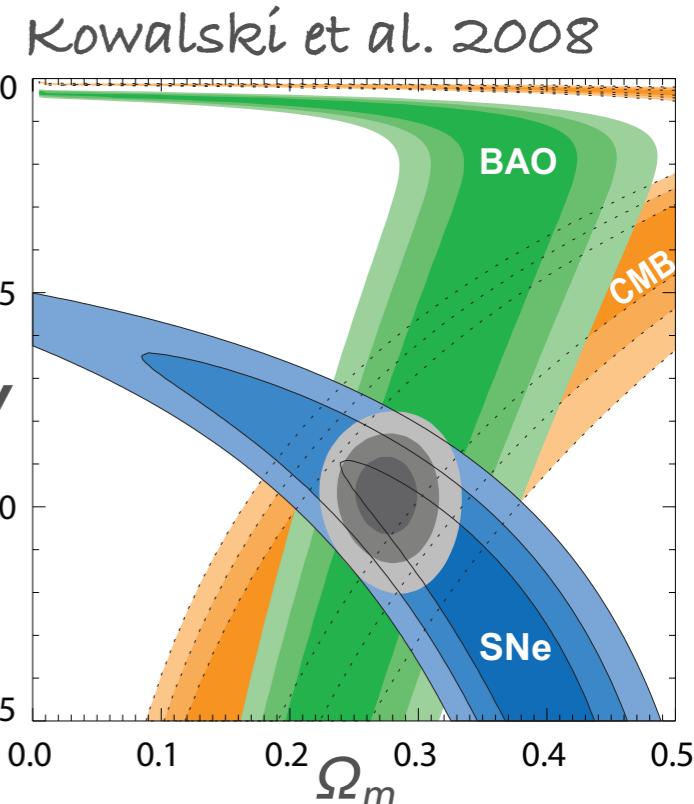
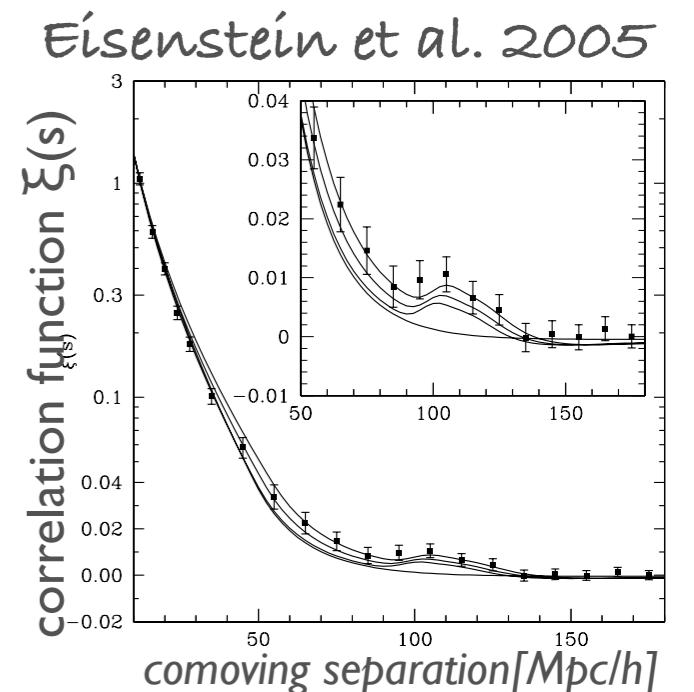
宇宙のものさしとしてのBAO

Baryon Acoustic Oscillation (バリオン音響振動)

- 宇宙初期に物質の分布に刻印されたゆらぎ
- 特徴的な振動スケールの値は精密に測定



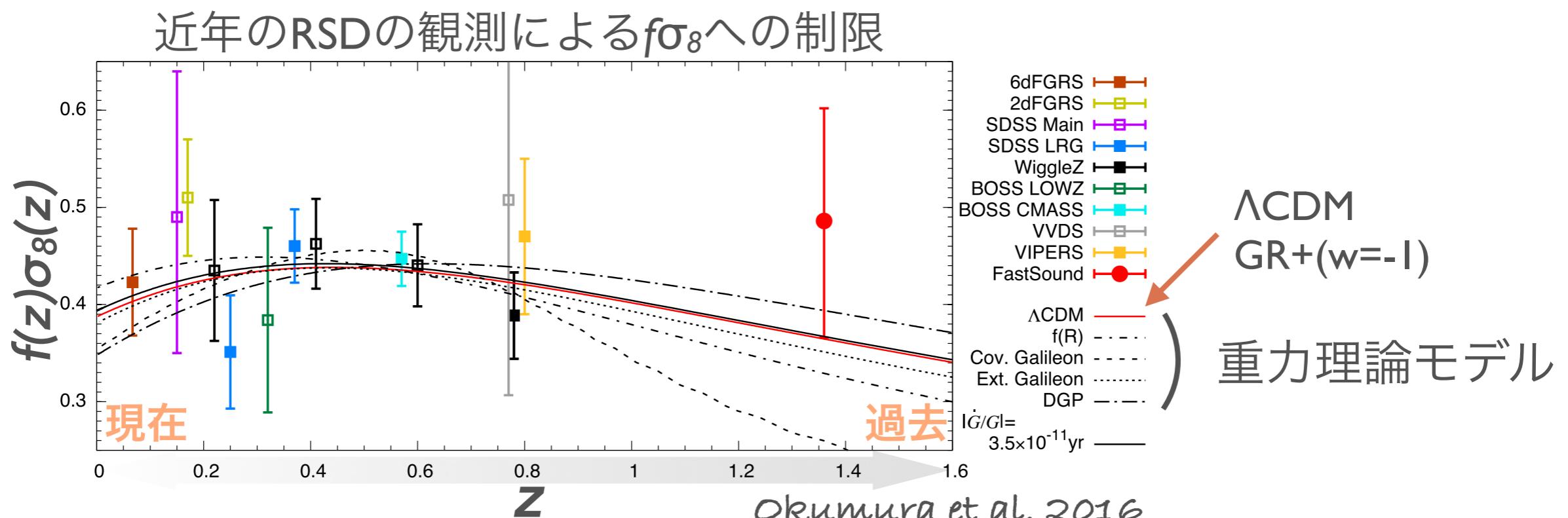
状態方程式
 $p_{de} = w \rho_{de}$



RSDによる重力理論の検証

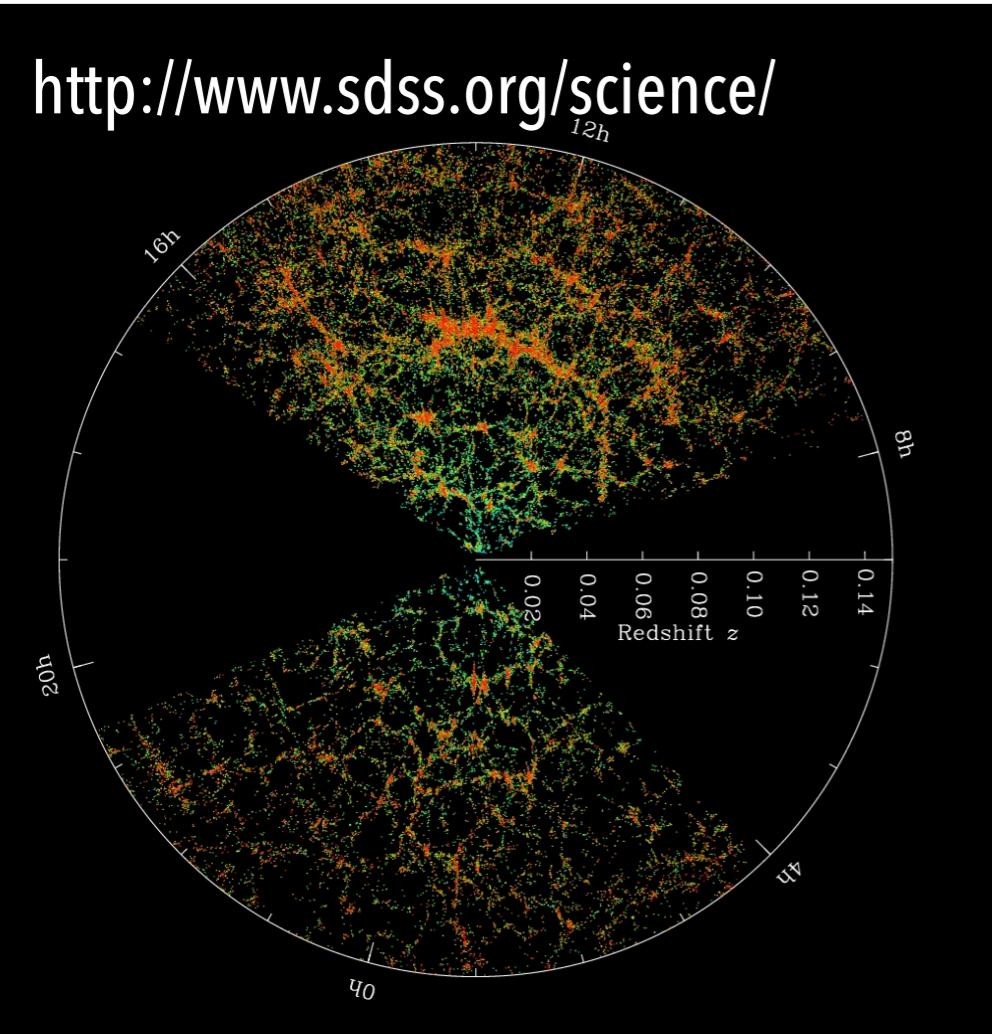
Redshift Space Distortion (赤方偏移空間歪み)

- 天体の特異速度によって赤方偏移空間における相関関数に歪み(非等方性)が生じる
- RSDの観測より、密度ゆらぎの成長率 f へ制限



→ 重力理論の検証

<http://www.sdss.org/science/>



※点は銀河

銀河をトレーサー大規模構造の探査

メリット

- 銀河の3次元分布が得られる
- 理論モデルが確立されている

デメリット

- 遠方の銀河の赤方偏移の観測が困難

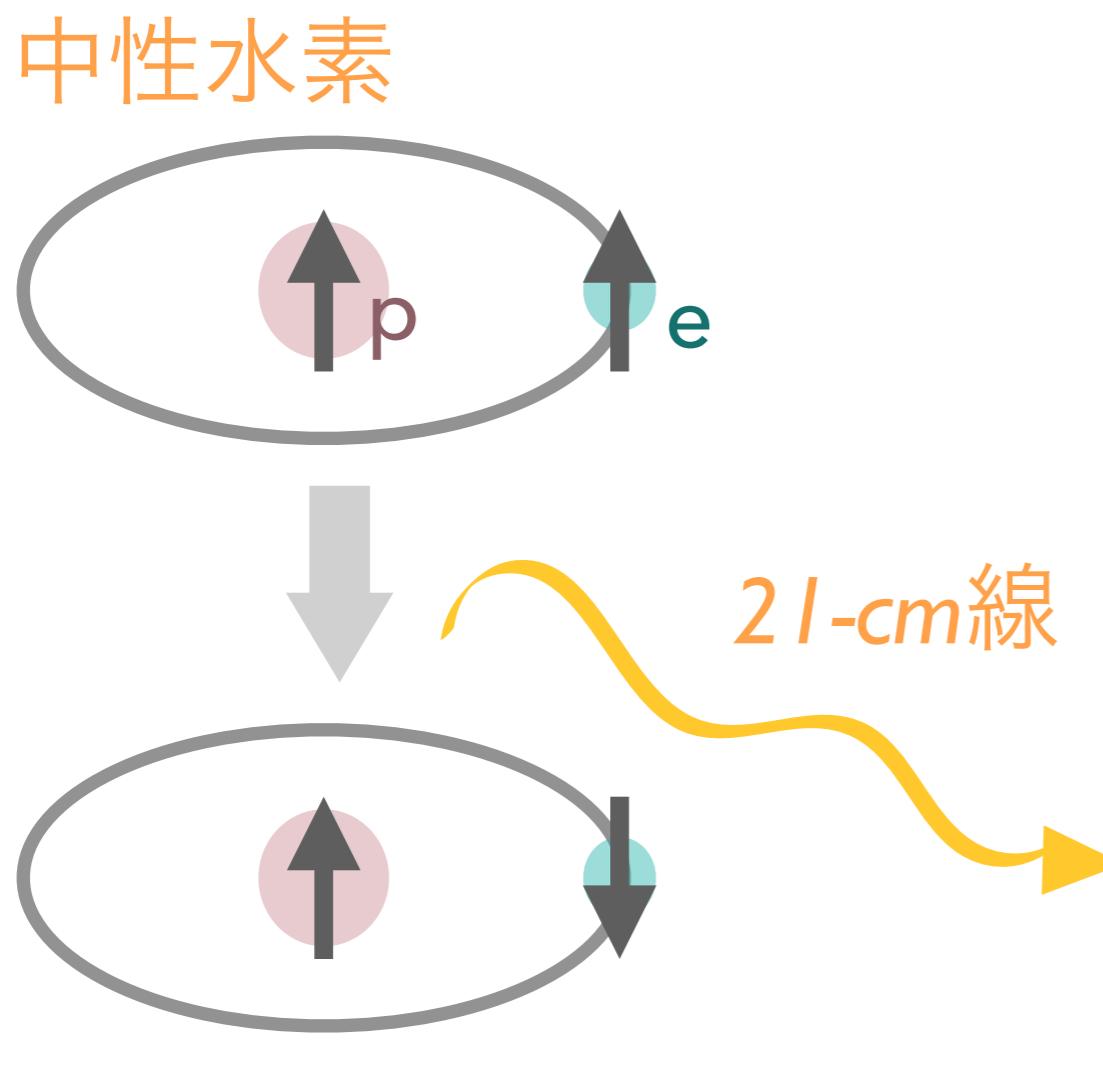
ダークマターの新たなトレーサーとしての中性水素(HI)

21cm線 intensity mapping

7 /26

銀河を分解せずにHIから放射された21cm線強度を観測

→ 中性水素の3次元分布



intensity mapping

- 広い領域
- より遠方まで
- 高い周波数分解能

$$\lambda_{obs} = \lambda_{21cm}(1+z)$$



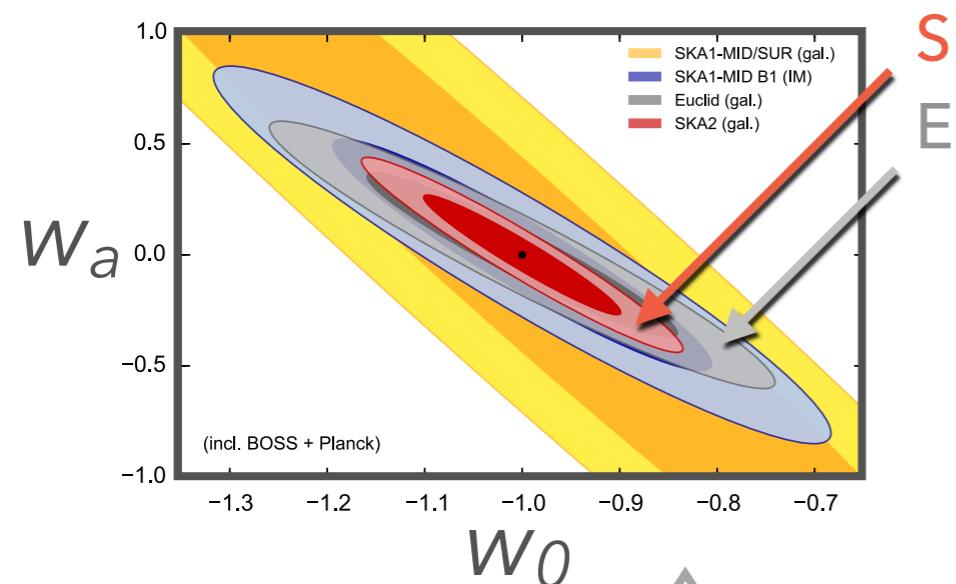
21cm線intensity mappingによる宇宙論モデルへの制限

先行研究: 線形モデルを用いた将来観測による制限予測



21cm線intensity mappingによる宇宙論モデルへの制限

先行研究: 線形モデルを用いた将来観測による制限予測



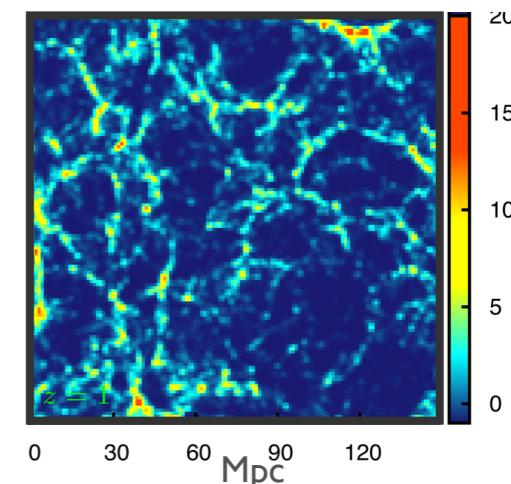
ダークマターのハロー質量に応じてHIの分布を計算

Sarkar et al. 2018, Wang et al. 2019

N体シミュレーション
ダークマターの
重力相互作用のみを計算

$M_{\text{halo}}-M_{\text{HI}}$
モデル
を仮定

HIの
密度場



バリオン物理を計算していない
 $M_{\text{halo}}-M_{\text{HI}}$ モデルに依存

- HIバイアスのモデル化
- HIのRSDの測定

※HIバイアス: HIとダークマターの密度分布のずれ

宇宙論的流体シミュレーションを使用

- ・ ダークマターだけでなく中性水素の時間発展も同時に計算



より現実に近い理論モデルの構築

宇宙論的流体シミュレーションを使用

- ・ ダークマターだけでなく中性水素の時間発展も同時に計算



より現実に近い理論モデルの構築



銀河スケール以下の物理モデルの不定性が存在

星形成や銀河からの質量放出



物理モデルの異なる2つのシミュレーションを使用

HIの宇宙論的なスケールのクラスタリングへの影響を調べる

e.g. BAOのスケール $r_h \sim 100 \text{Mpc}/h$

小スケールの天体物理のモデルが異なる

(星形成活動、超新星・AGN feedbackなど)



Illustris simulation

moving mesh code AREPO

ボックスサイズ: $(75 \text{ cMpc}/h)^3$

粒子数: $2*455^3$

強い AGN feedback

minimum softening [ckpc/h] : gravity: ~ 6 , baryon: ~ 0.6

particle mass [M_{sun}/h] : DM: $\sim 6*10^7$, baryon: $\sim 3*10^8$

Osaka simulation

N-body/SPH code Gadget-3

ボックスサイズ: $(85 \text{ cMpc}/h)^3$

粒子数: $2*512^3$

AGN feedback を含まない

vogelsberger et al. (2014), Nelson et al. (2015)

Aoyama et al. 2017, Shimizu et al. 2019

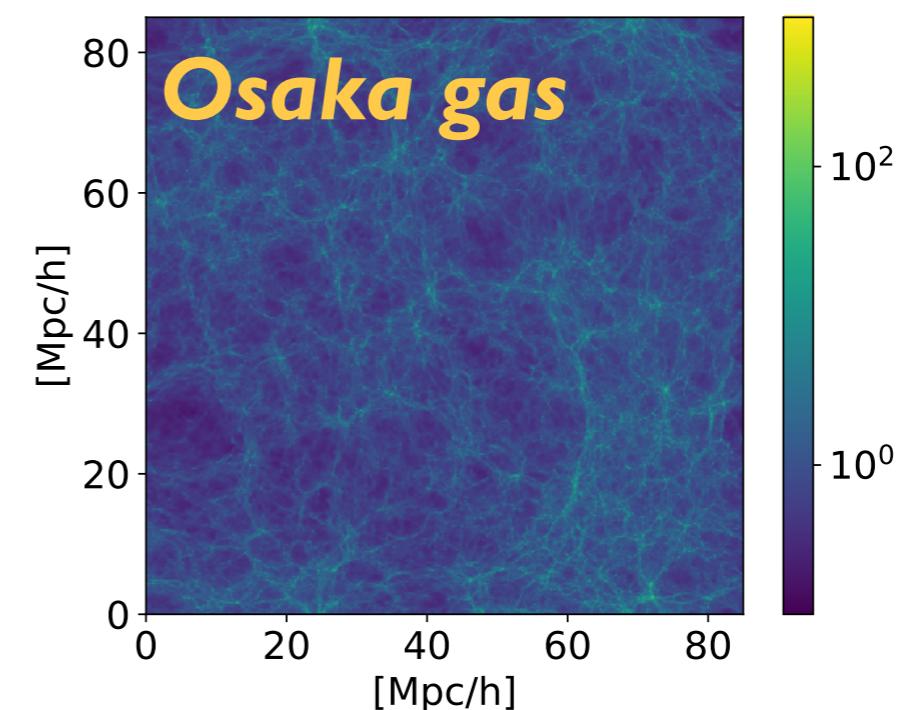
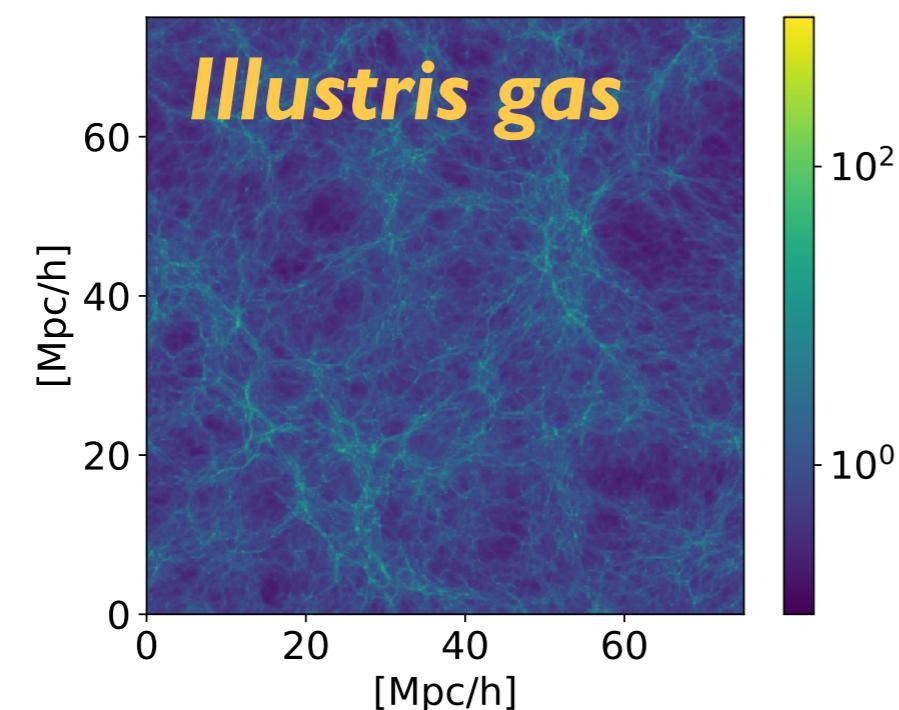
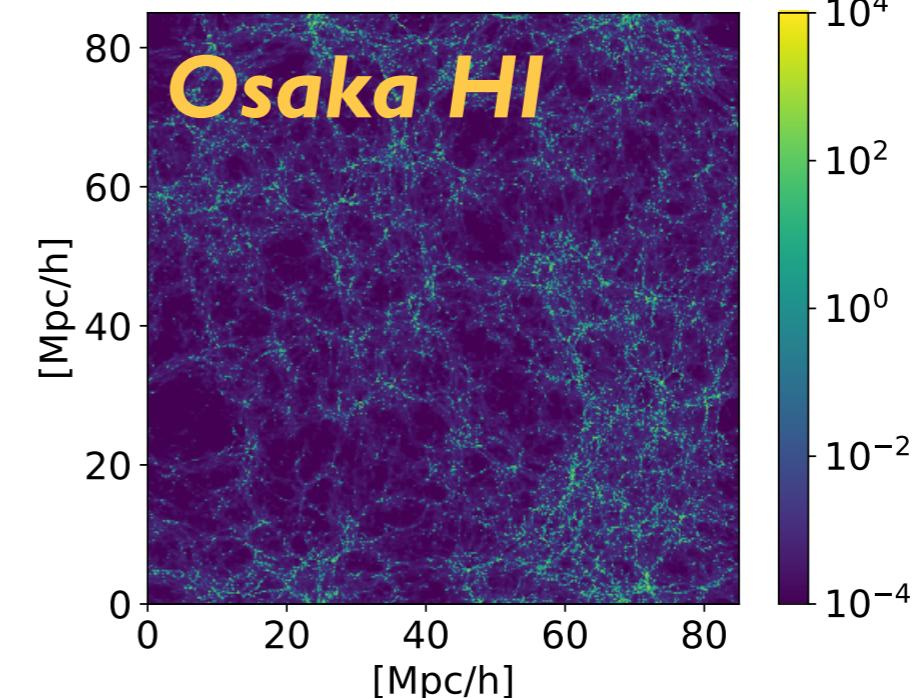
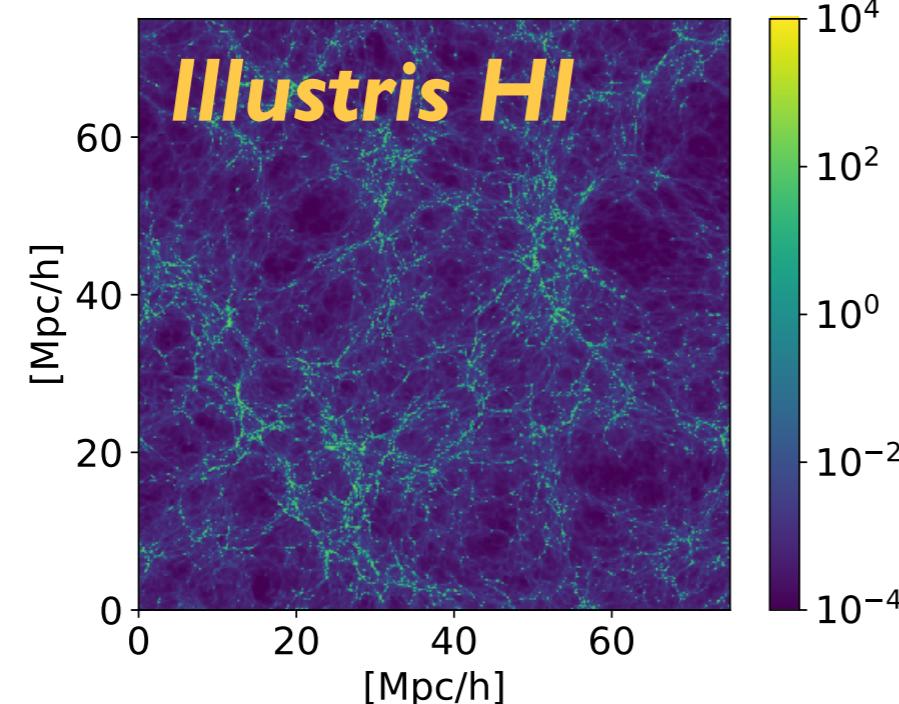
※Uniform UVB model, 宇宙論パラメータや粒子解像度はほとんど同じ

密度ゆらぎ 1+ δ map

12 /26

ガス(baryon w/o star,BH)とHIの密度map

$$\frac{\rho_i}{\bar{\rho}_i} = 1 + \delta_i \quad (i=\text{gas, HI})$$



1. Introduction

- *galaxy survey*
- *21cm line intensity mapping*

2. HI bias

- *BAO peak scale*
- *scale dependence*

3. Redshift space distortion of HI

- *theoretical model*
- *measure using simulation data*

4. Summary

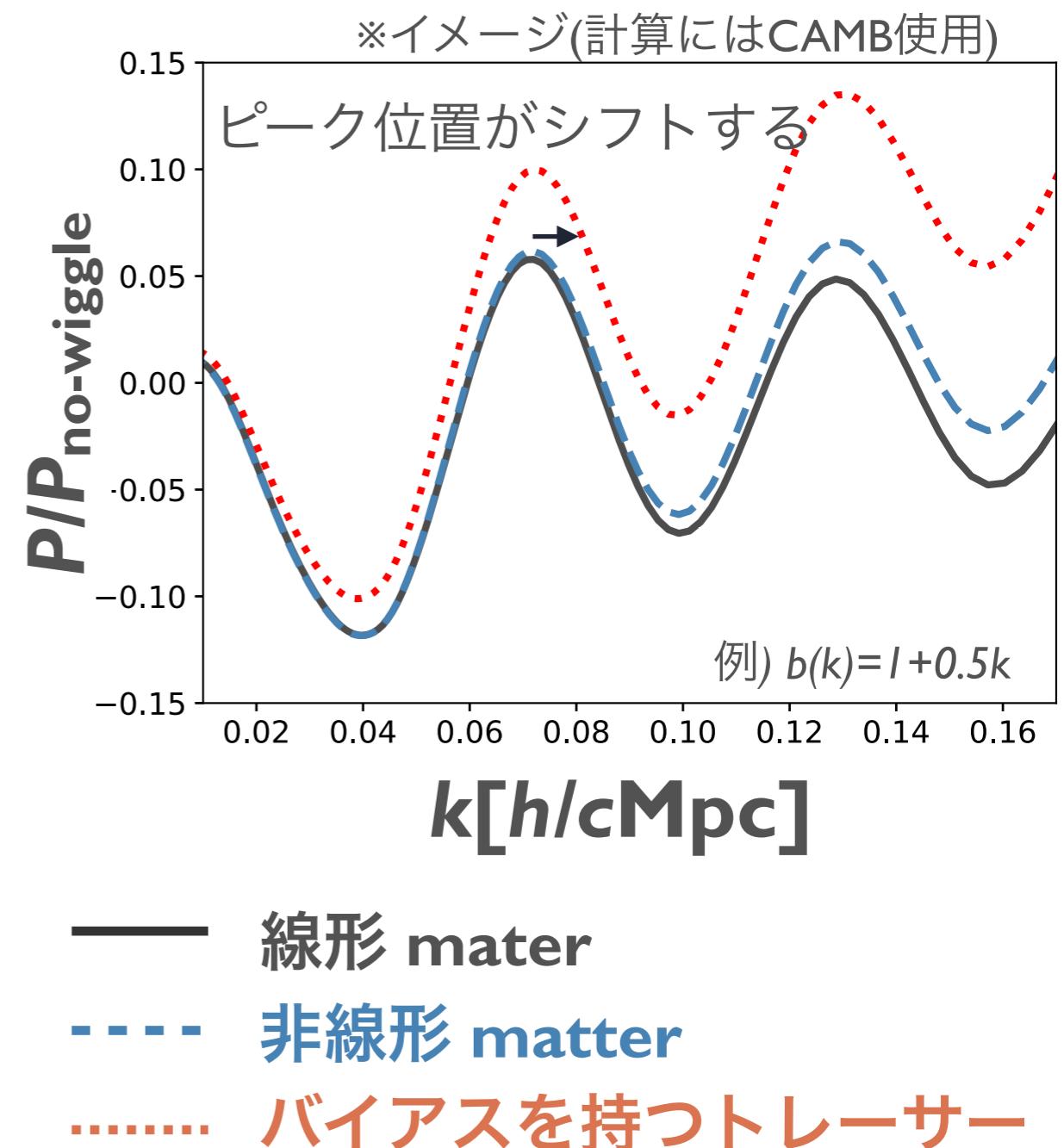
観測から得られるBAOの振動スケールは

線形理論から予言される値からずれる

- 重力の非線形性
- バイアスのスケール依存性

$$\delta_{\text{HI}} = b_{\text{HI}}(k) \delta_m$$

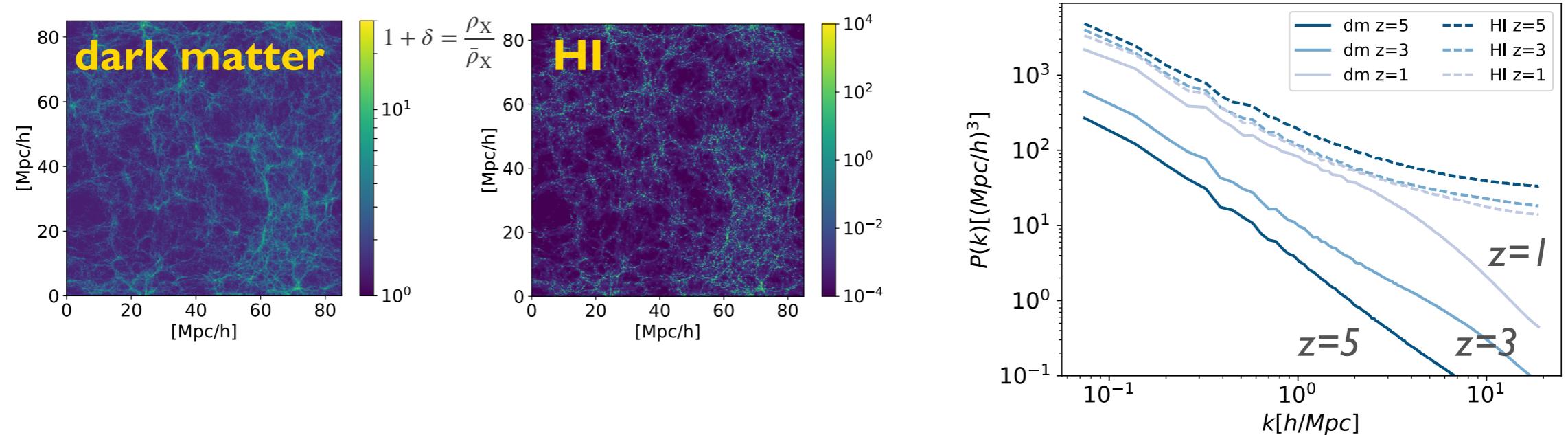
密度ゆらぎ : $\delta = \frac{\rho}{\bar{\rho}} - 1$



HIバイアスのスケール・赤方偏移依存性

15 / 26

密度場からHIとダークマターのパワースペクトルを測定



method:

$1 < z < 5$ のパワースペクトルの比をとることで

HIバイアスを測定・モデル化

$$b(k) = \frac{P_{\text{HI}-m}}{P_m}$$

HI バイアス *HI-matter* 相互相関
 matter 自己相関

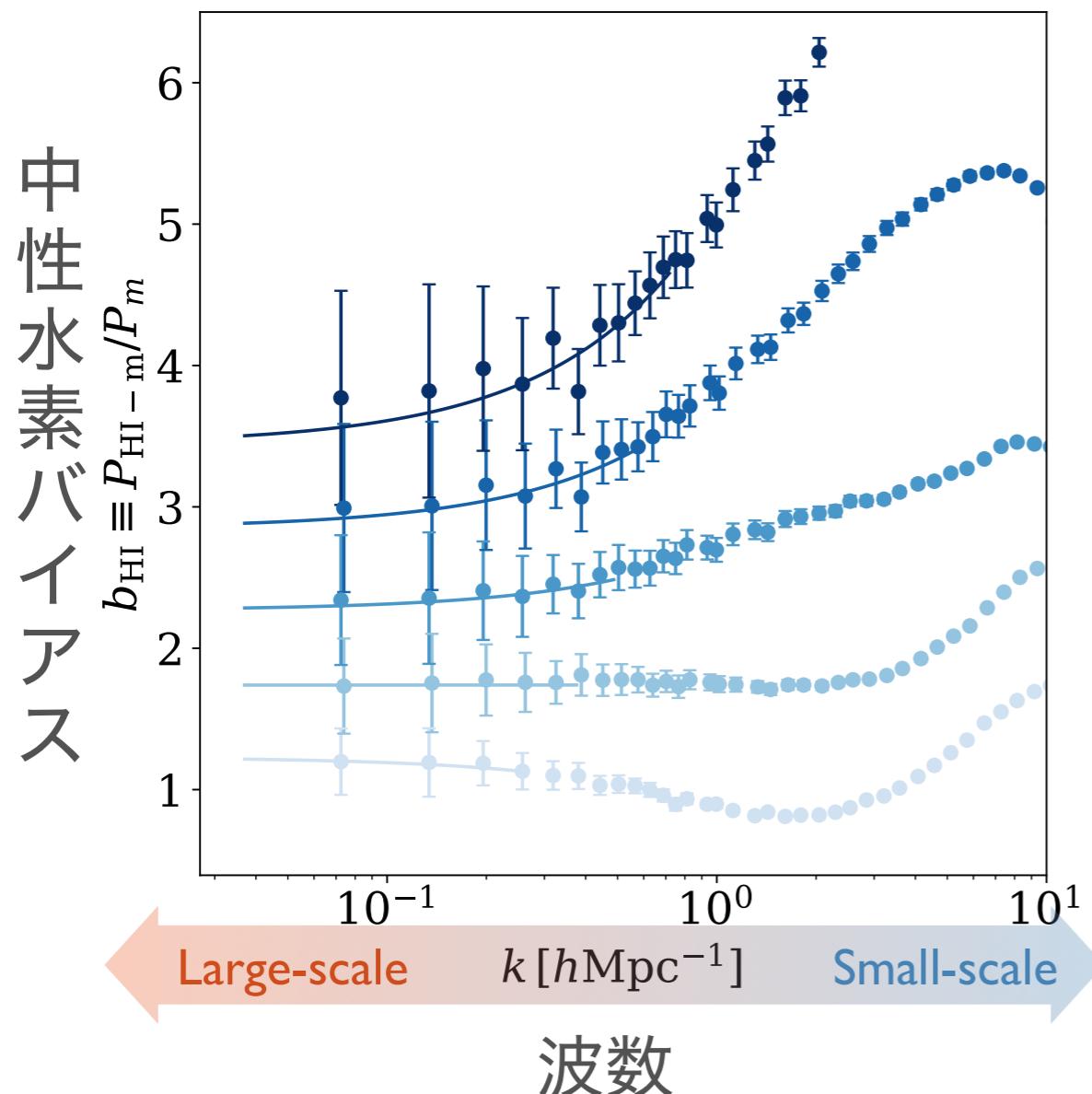
HI バイアス

$$b(k) = \frac{P_{\text{HI}-m}}{P_m}$$

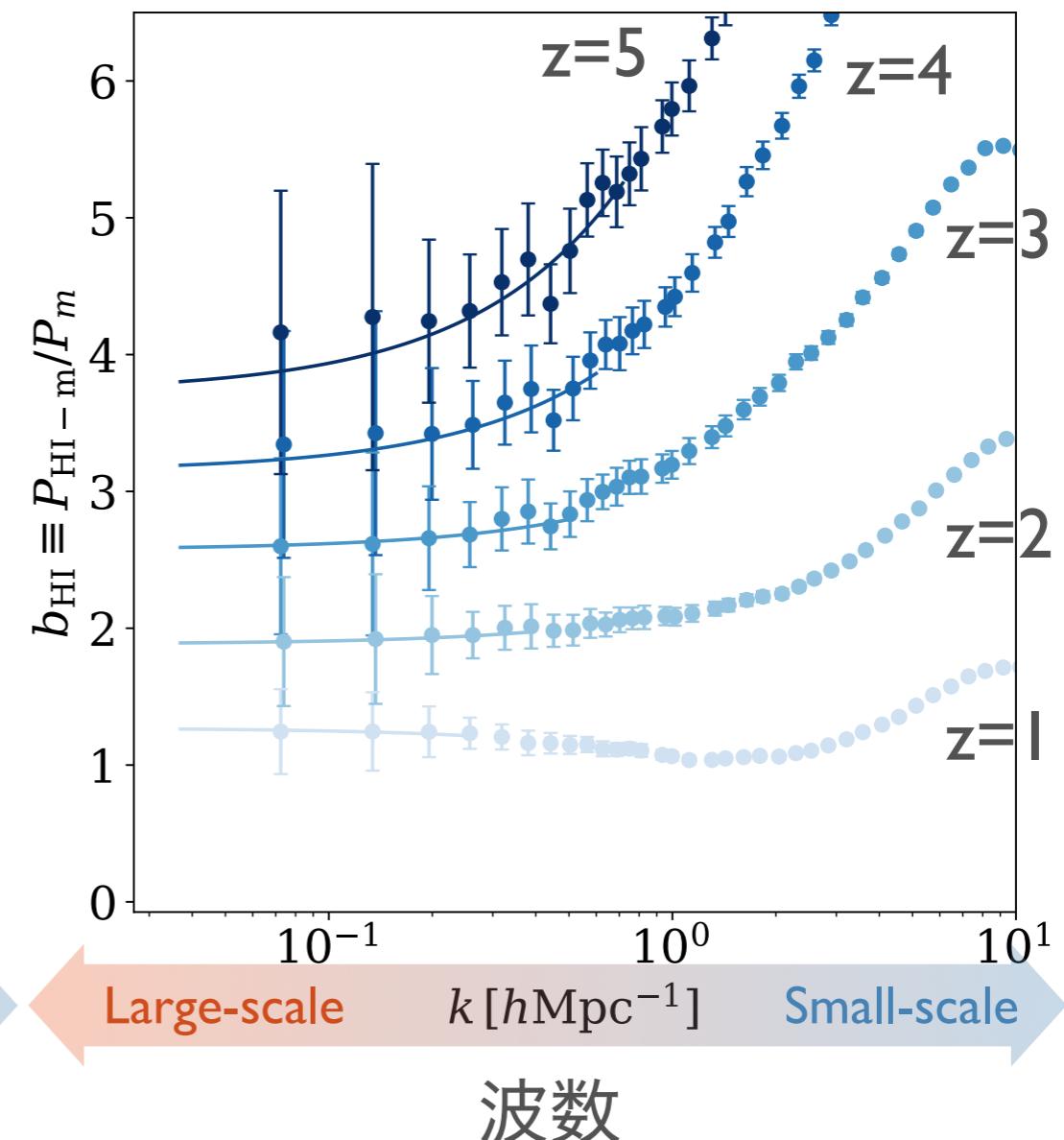
点 : simulation data
曲線: $b(k)=b_0+b_1k$

16 / 26

Illustris (w/ AGN)



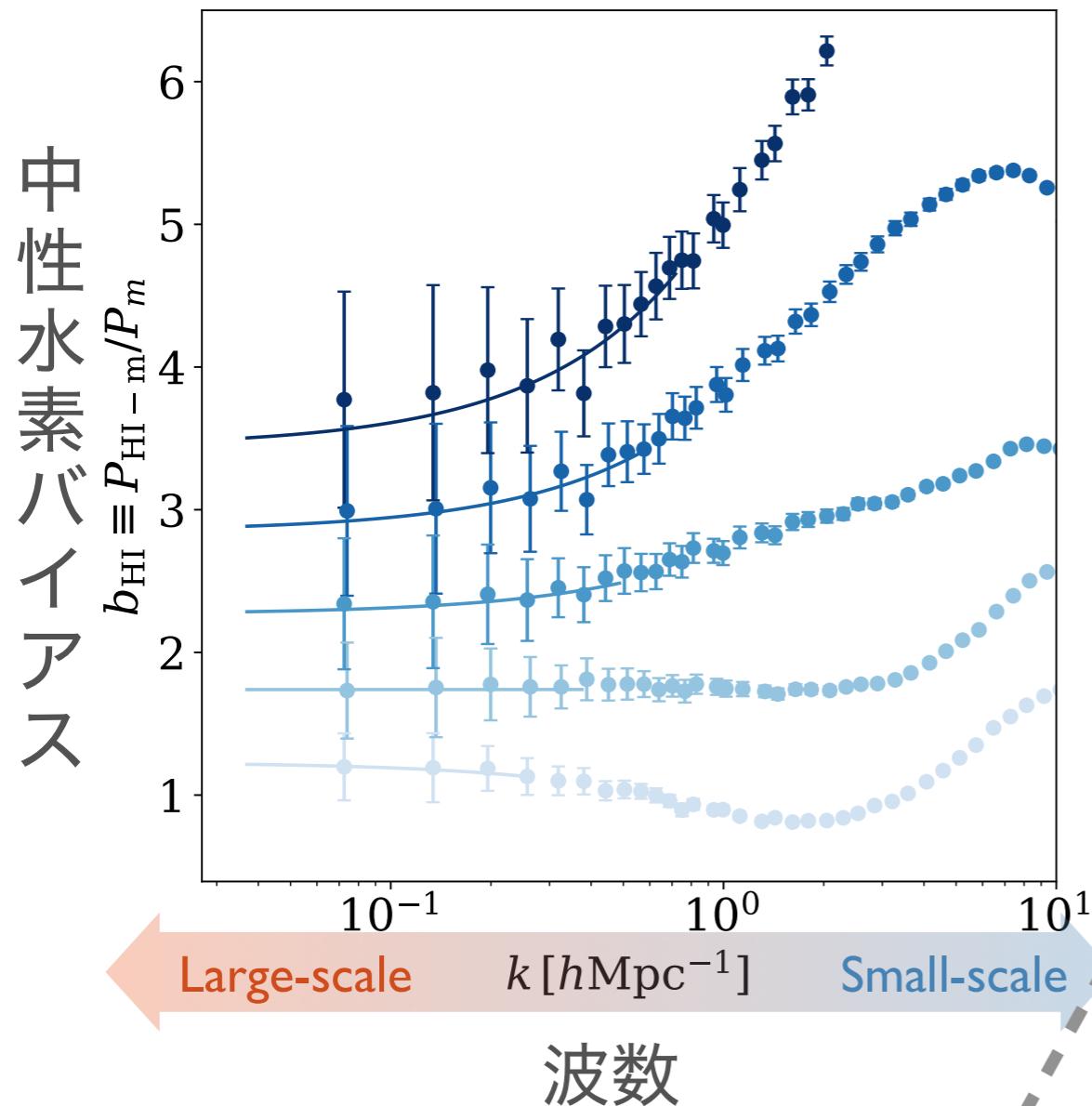
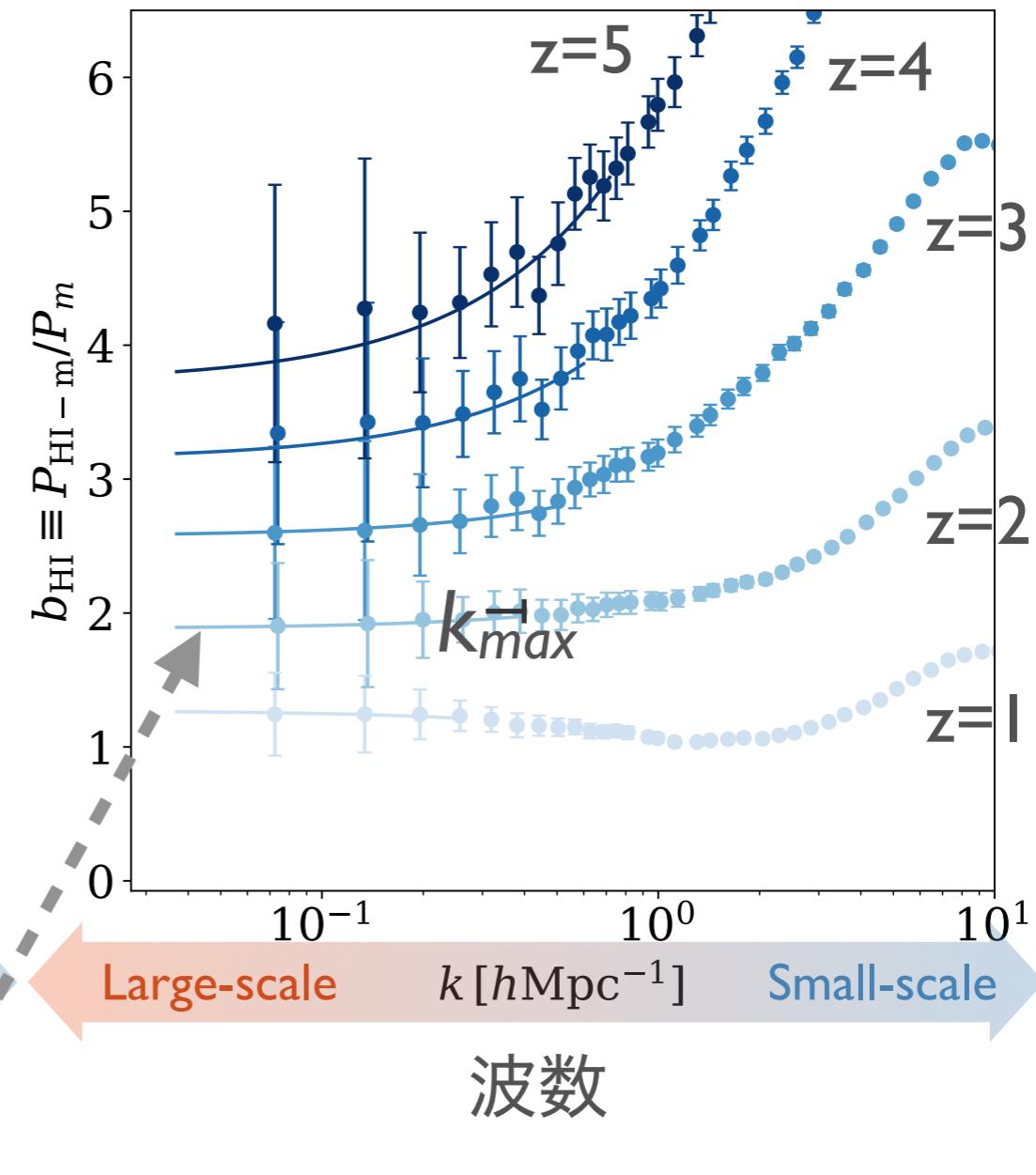
Osaka (w/o AGN)



$$\frac{k_{\max}^2}{6\pi^2} \int_0^{k_{\max}} dk P^{\text{lin}}(k, z) = C \sim 0.7$$

$$b(k) = \frac{P_{\text{HI}-m}}{P_m}$$

点 : simulation data
曲線: $b(k)=b_0+b_1k$

Illustris (w/ AGN)*Osaka (w/o AGN)*

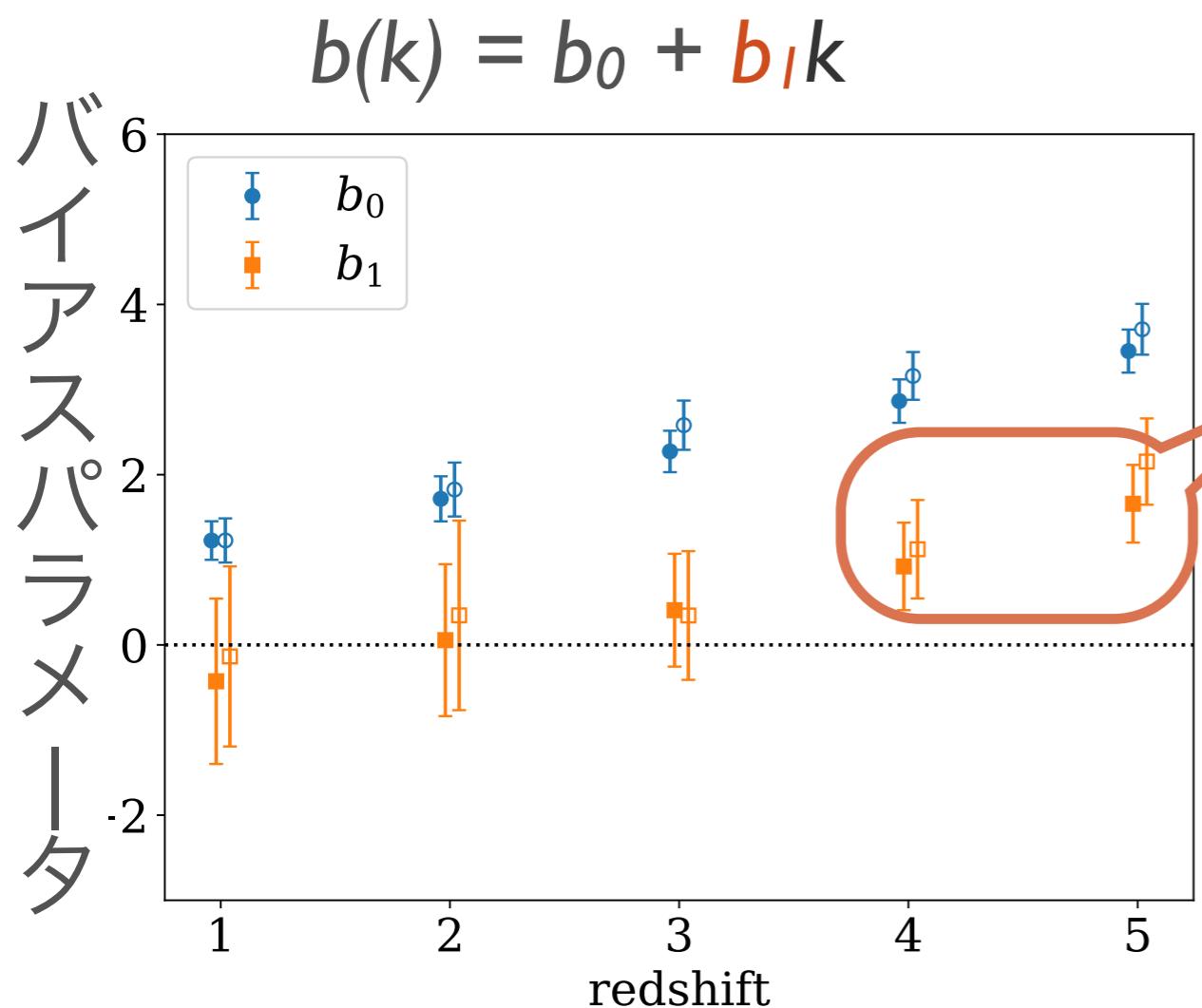
$$b(k) = b_0 + b_1 k$$

スケール依存性

$$\frac{k_{\text{max}}^2}{6\pi^2} \int_0^{k_{\text{max}}} dk P^{\text{lin}}(k, z) = C \sim 0.7$$

スケール依存性と天体物理の影響

17 / 26



大スケールのHIバイアスは
(例. $k < 0.5 \text{ h/Mpc}$ @ $z=3$)

- スケール依存性を持つ
at $z > 3$
- 小スケールの天体物理への
依存性が弱い
(星形成, 超新星/AGNフィードバック)

- **filled: Illustris (w/ AGN)**
- **open: Osaka (w/o AGN)**

1. Introduction

- *galaxy survey*
- *21cm line intensity mapping*

2. HI bias

- *BAO peak scale*
- *scale dependence*

3. Redshift space distortion of HI

- *theoretical model*
- *measure using simulation data*

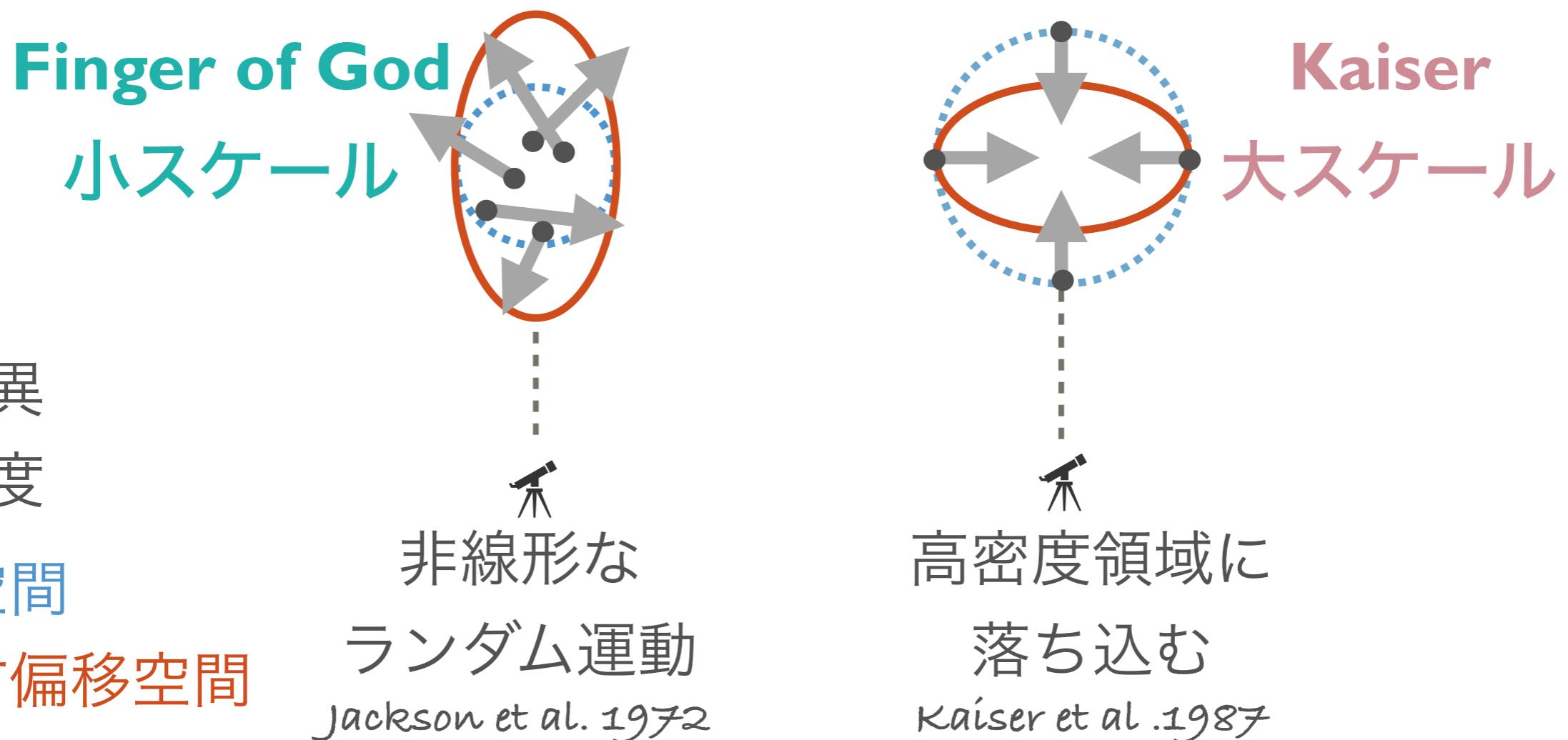
4. Summary

f : 線形成長率

非等方パワースペクトルの理論モデル

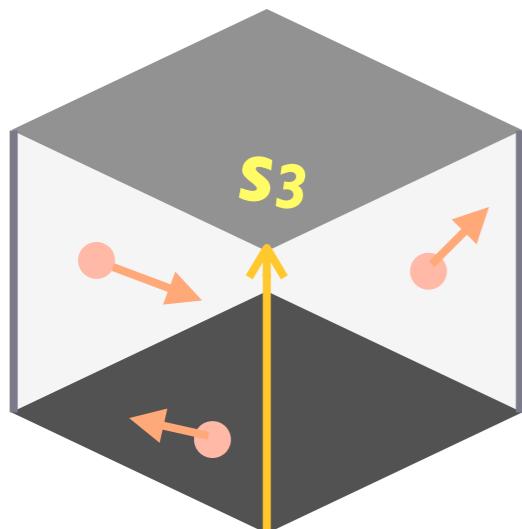
$$P_{\text{HI}}(k, \mu) = e^{-(k\mu f\sigma_v)^2} b_{\text{HI}}^2 (1 + \beta\mu^2)^2 P_{\text{m}}(k)$$

赤方偏移空間 でのHI	Finger of God	Kaiser	実空間 でのmatter
	抑制	上昇	



特異速度 → 視線方向の距離 → 相関関数の非等方性

simulation box



HIのRSDに適用できる理論モデルを検証

method: 赤方偏移空間における粒子の位置

$$(s_1, s_2, s_3) = \left(x_1, x_2, x_3 + \frac{v_3}{aH} \right)$$

赤方偏移空間 実空間 天体の
での位置 での位置 特異速度

SKAによる21cm線intensity mapping

21 /26

大規模電波干渉計のSKAによるintensity mapping

観測量: 輝度温度

$$\delta T_b = \frac{3}{32\pi} \frac{hc^3 A_{10}}{k_B m_p \nu_{21}^2} \frac{(1+z)^2}{H(z)} \bar{\rho}_{\text{HI}} \delta_{\text{HI}}$$

<https://www.skatelescope.org/>

SKA Organisation

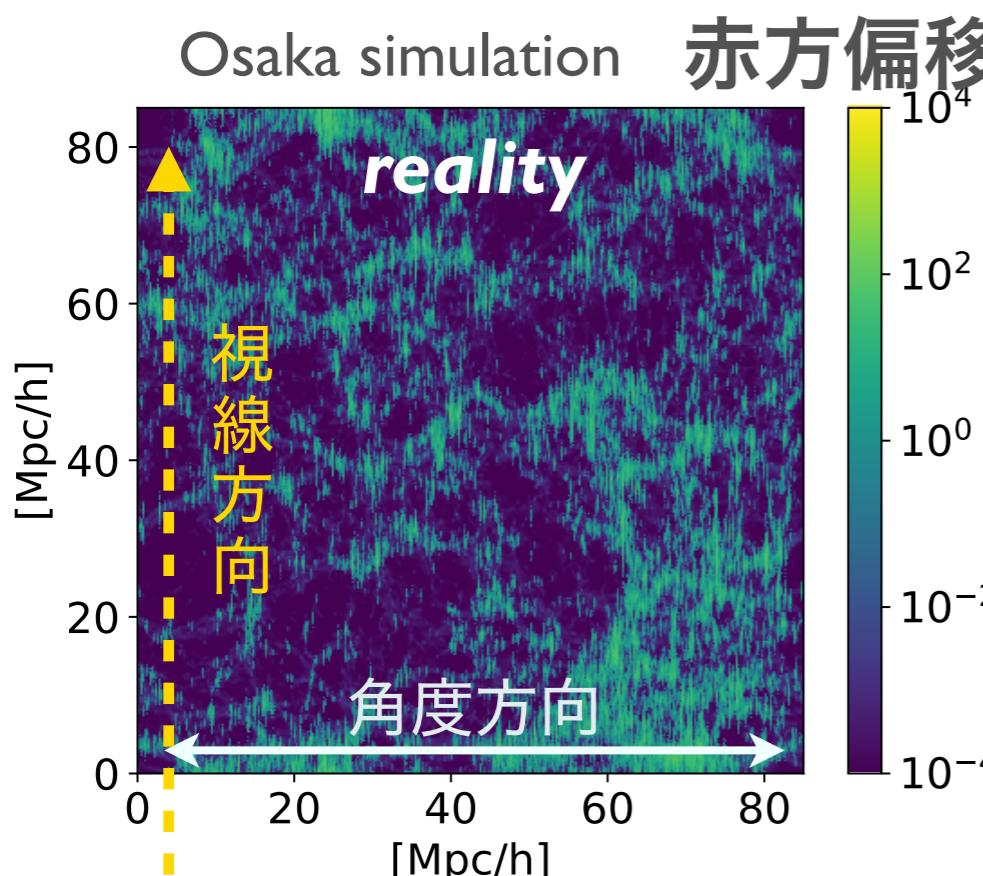


Bull et al. 2015

	SKA1-MID	
	Band 1	Band 2
T_{inst} [K]	28	20
z_{min}	0.35	0.00
z_{max}	3.05	0.49
ν_{min} [MHz]	350	950
ν_{max} [MHz]	1050	1760
D_{dish} [m]	15	15
$\delta\nu$ [kHz]	50	50
Ω_{sur} [10^3 deg 2]	25	25
$N_{\text{dish}} \times N_{\text{beam}}$	254×1	254×1

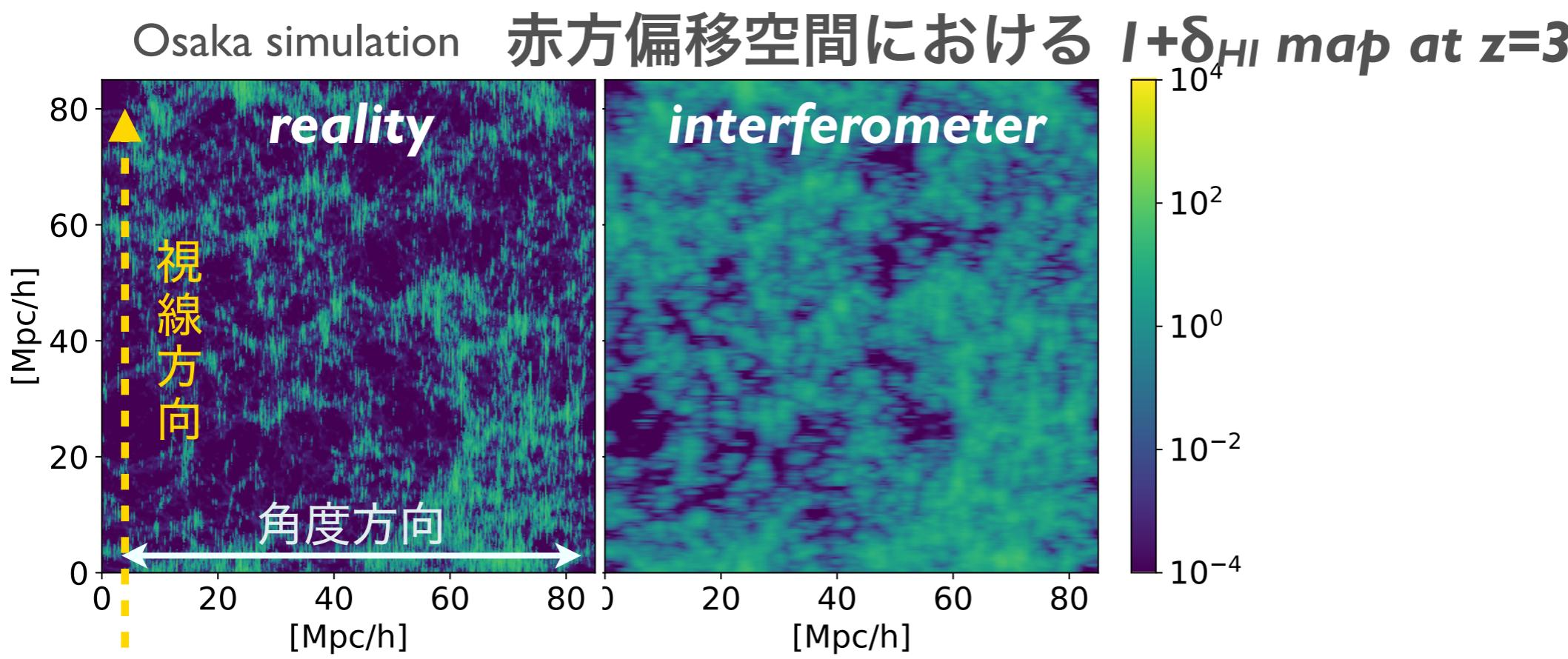
角度方向の密度ゆらぎは均される

	干渉計モード interferometer	単一鏡モード single-dish
角度方向の 空間分解能	$\sim 2 \text{cMpc}/h @ z=1$	$\sim 65 \text{cMpc}/h @ z=1$
	Osaka simulation 赤方偏移空間における $I + \delta_{HI}$ map at $z=3$	



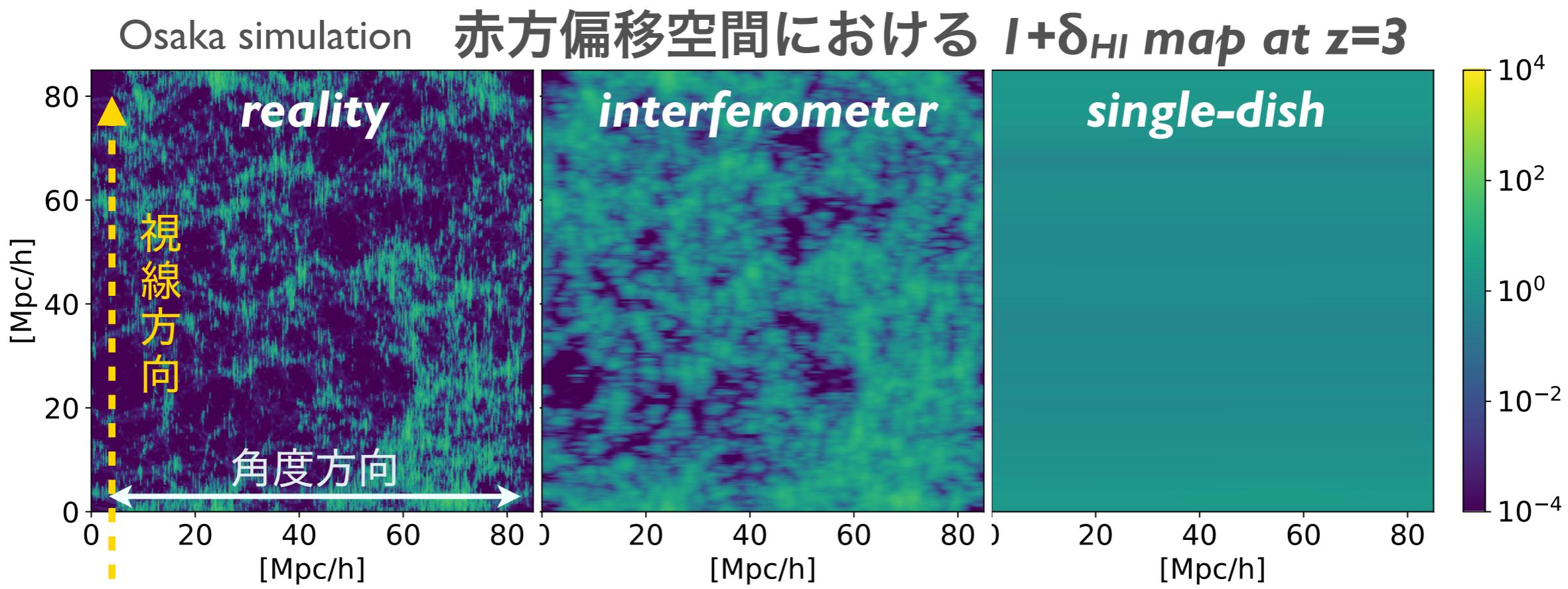
角度方向の密度ゆらぎは均される

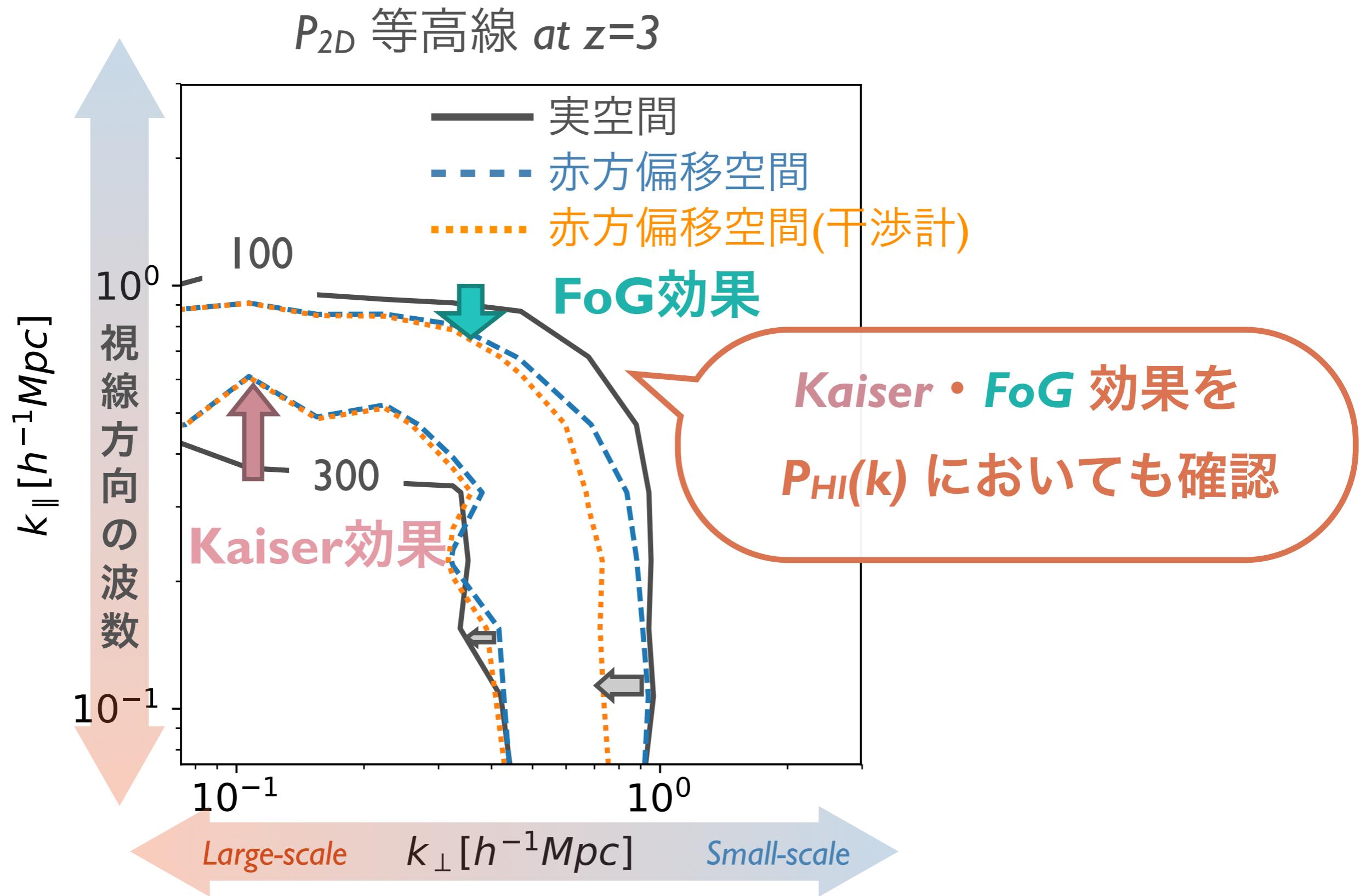
	干渉計モード interferometer	単一鏡モード single-dish
角度方向の 空間分解能	$\sim 2 \text{cMpc}/h @ z=1$	$\sim 65 \text{cMpc}/h @ z=1$
	Osaka simulation 赤方偏移空間における $I + \delta_{HI}$ map at $z=3$	



角度方向の密度ゆらぎは均される

	干渉計モード interferometer	単一鏡モード single-dish
角度方向の 空間分解能	$\sim 2 \text{cMpc}/h @ z=1$	$\sim 65 \text{cMpc}/h @ z=1$
	Osaka simulation 赤方偏移空間における $I + \delta_{HI}$ map at $z=3$	





多重極パワースペクトル シミュレーション vs 理論

free parameters

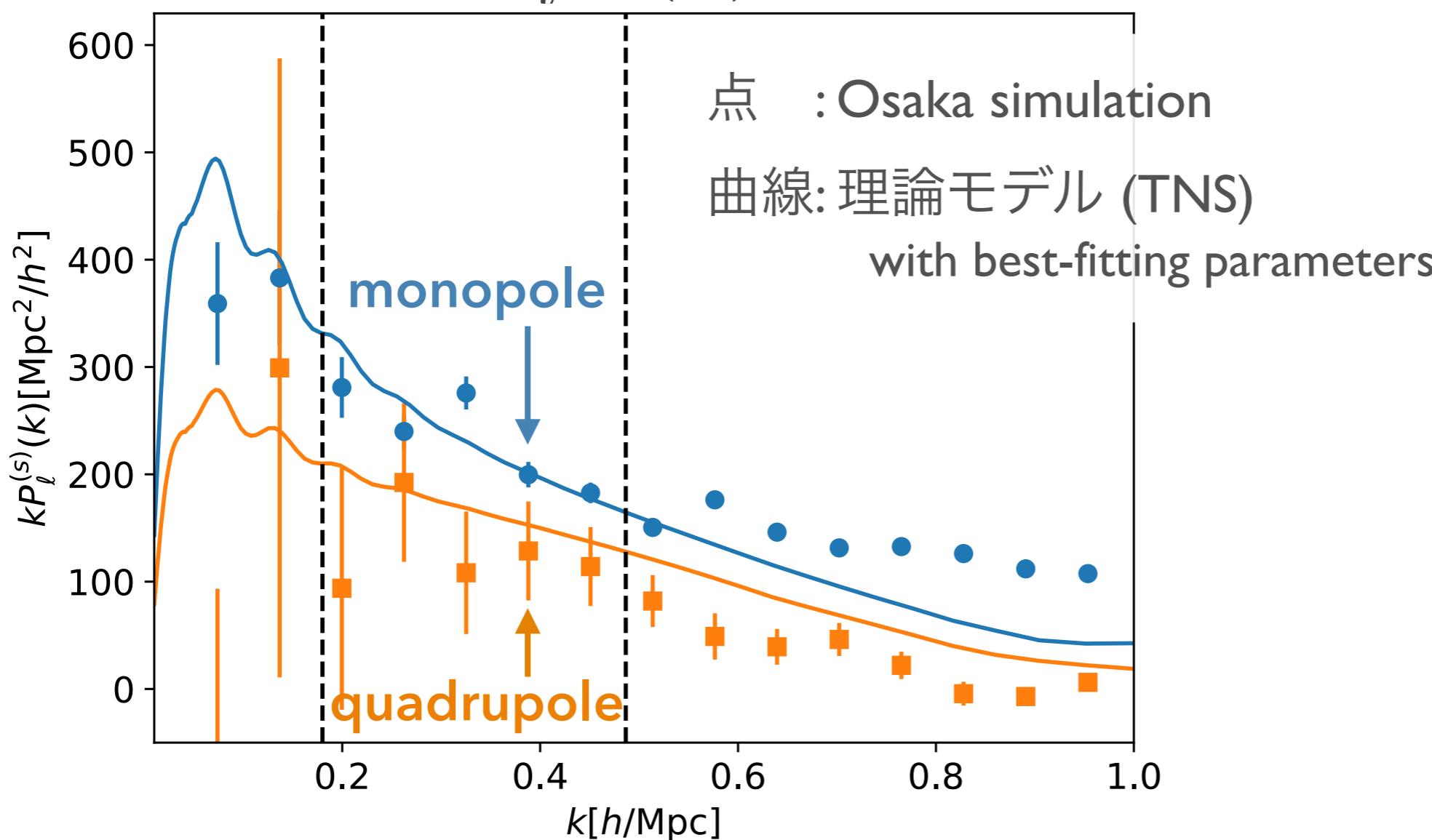
24 /26

model: $P_{\text{HI}}(k, \mu) = W_{\text{beam}}^2(k, \mu) e^{-(k\mu f\sigma_v)^2} b_{\text{HI}}^2 \left(1 + \frac{f}{b_{\text{HI}}} \mu^2\right)^2 P_{\text{m}}(k)$

+ TNS 補正項

Taruya et al. 2010

$$kP_l^{(s)}(k)$$



$$\frac{k_{\max}^2}{6\pi^2} \int_0^{k_{\max}} dk P^{\text{lin}}(k, z) = C \sim 0.7$$

多重極パワースペクトル シミュレーション vs 理論

free parameters

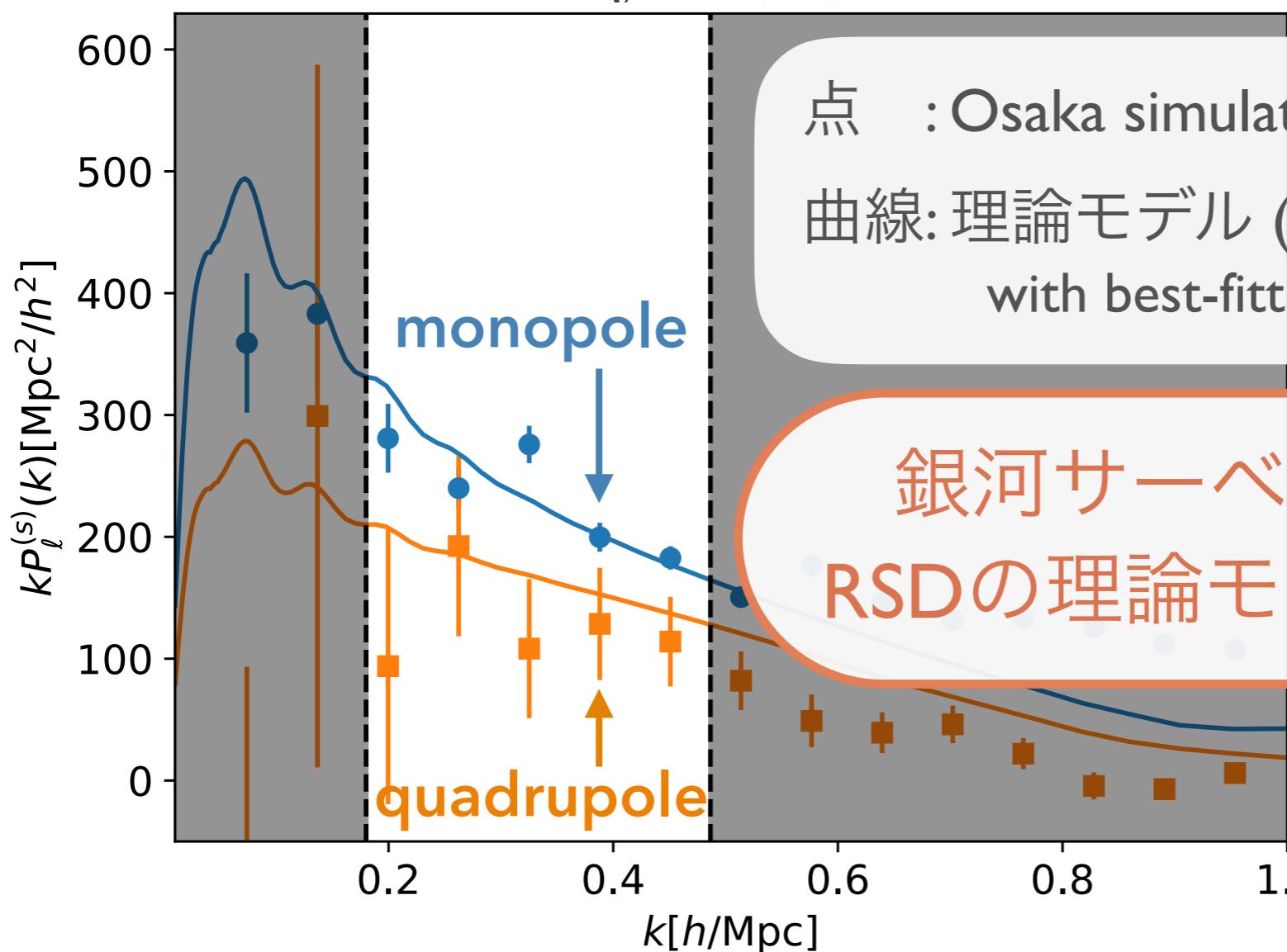
24 /26

$$\text{model: } P_{\text{HI}}(k, \mu) = W_{\text{beam}}^2(k, \mu) e^{-(k\mu f\sigma_v)^2} b_{\text{HI}}^2 \left(1 + \frac{f}{b_{\text{HI}}} \mu^2\right)^2 P_{\text{m}}(k)$$

+ TNS 補正項

Taruya et al. 2010

$$kP_l^{(s)}(k)$$



銀河サーベイに用いられている
RSDの理論モデルがHIに適用できた

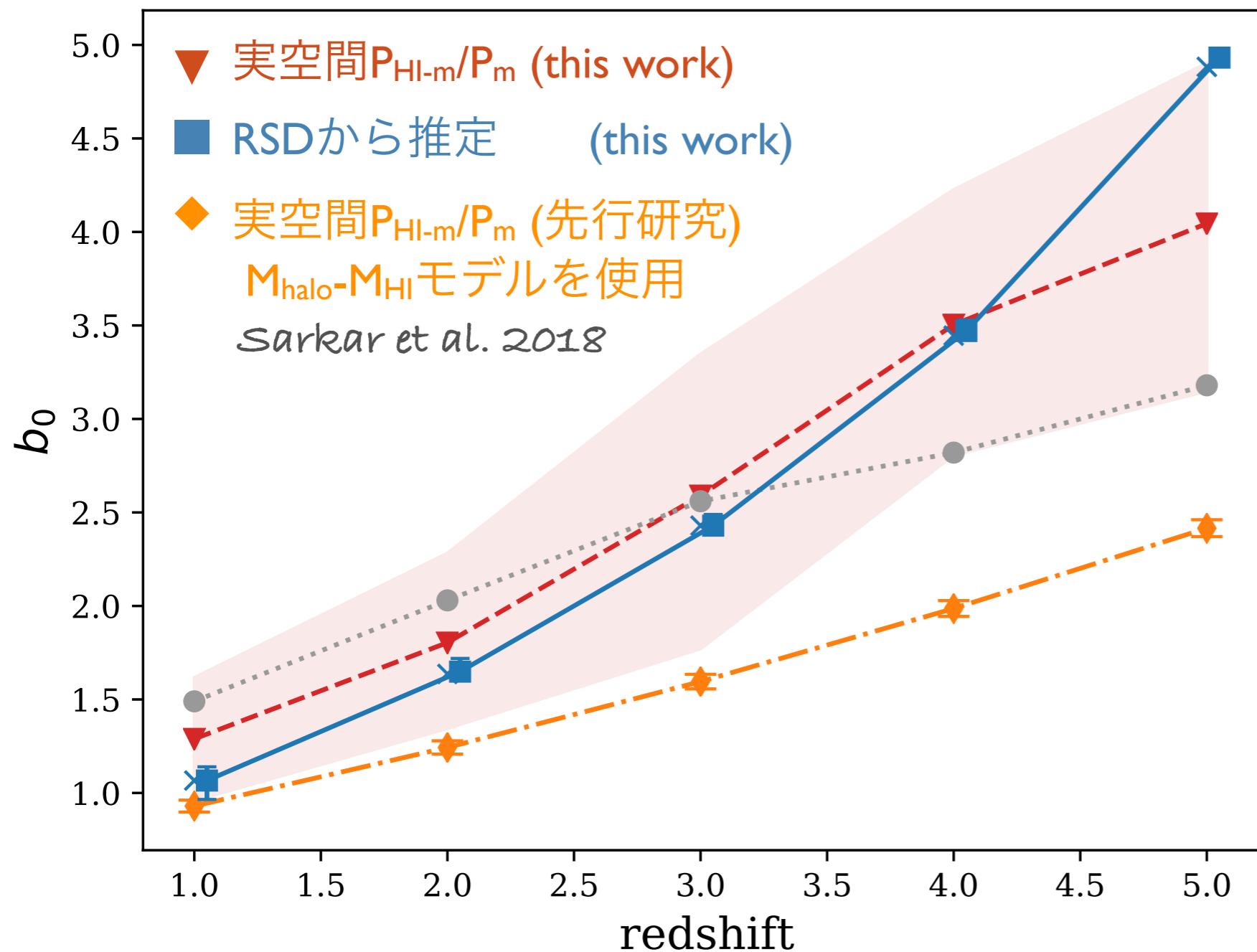
$$\frac{k_{\max}^2}{6\pi^2} \int_0^{k_{\max}} dk P^{\text{lin}}(k, z) = C \sim 0.7$$

推定値の比較: HIバイアス

$$P_{\text{HI}}(k, \mu) = W_{\text{beam}}^2(k, \mu) e^{-(k\mu f\sigma_v)^2} b_{\text{HI}}^2 \left(1 + \frac{f}{b_{\text{HI}}} \mu^2\right)^2 P_{\text{m}}(k)$$

+ TNS 補正項

Taruya et al. 2010

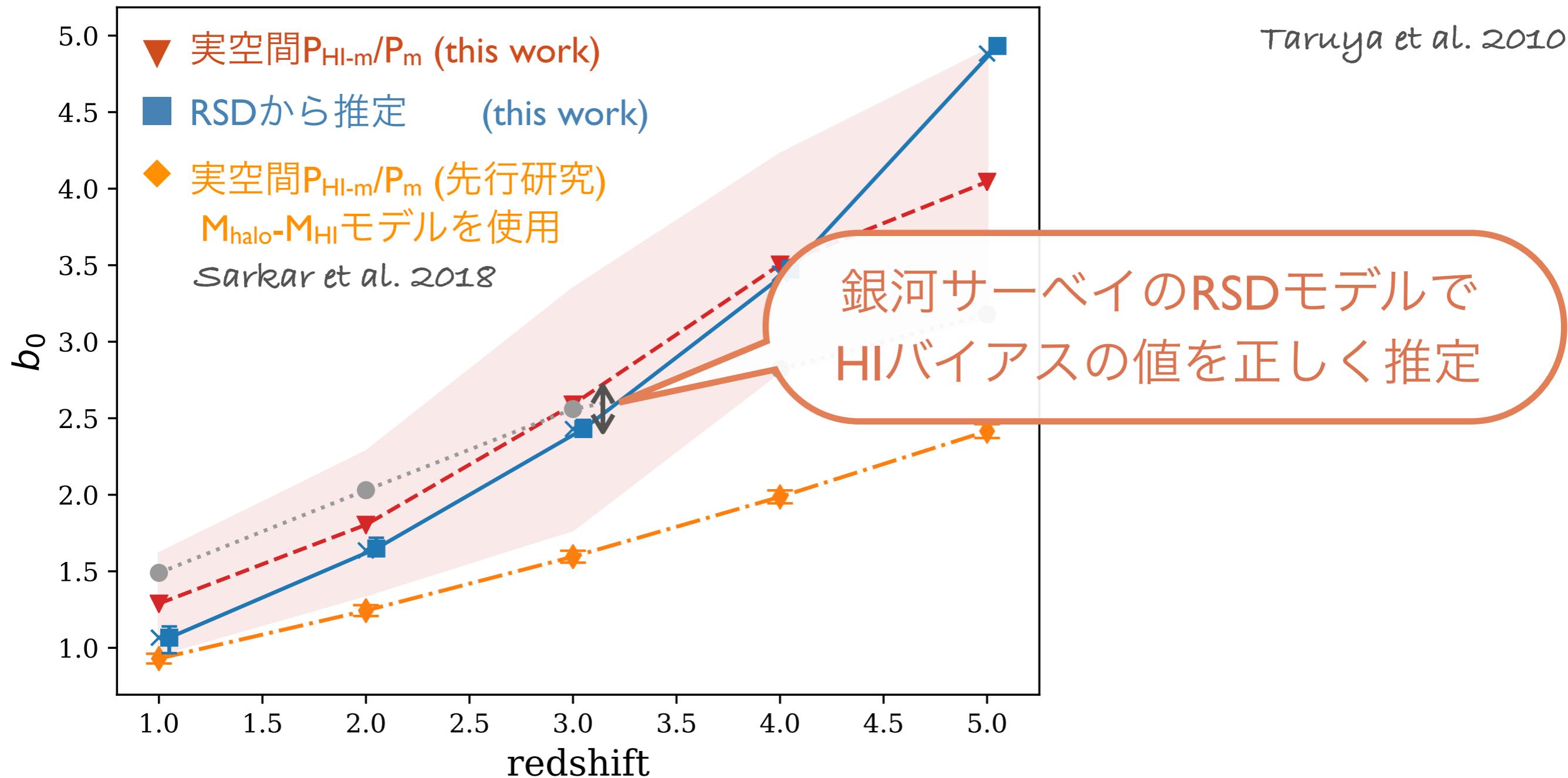


推定値の比較: HIバイアス

$$P_{\text{HI}}(k, \mu) = W_{\text{beam}}^2(k, \mu) e^{-(k\mu f\sigma_v)^2} b_{\text{HI}}^2 \left(1 + \frac{f}{b_{\text{HI}}} \mu^2\right)^2 P_{\text{m}}(k)$$

+ TNS 補正項

Taruya et al. 2010

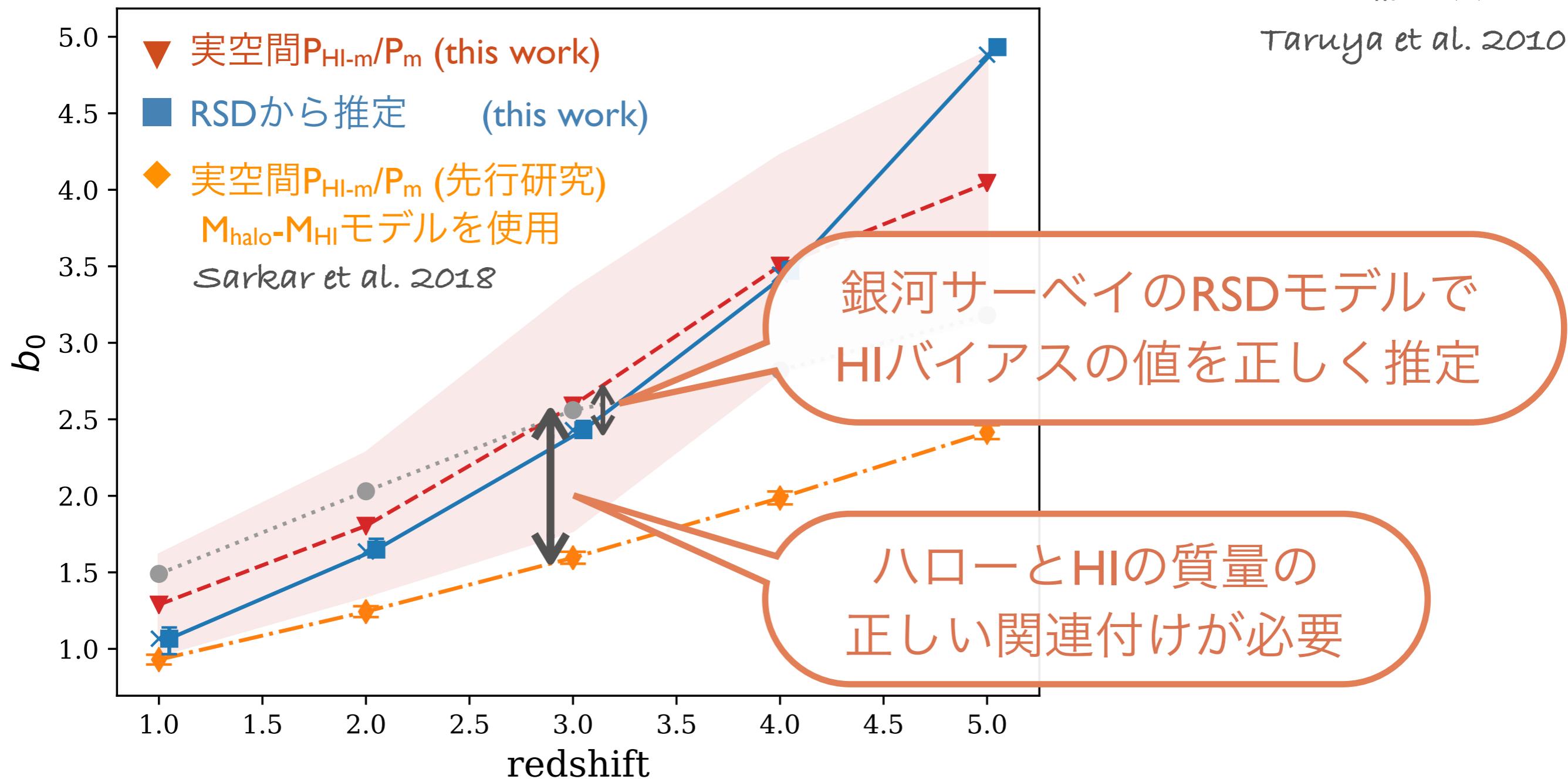


推定値の比較: HIバイアス

$$P_{\text{HI}}(k, \mu) = W_{\text{beam}}^2(k, \mu) e^{-(k\mu f\sigma_v)^2} b_{\text{HI}}^2 \left(1 + \frac{f}{b_{\text{HI}}} \mu^2\right)^2 P_{\text{m}}(k)$$

+ TNS 補正項

Taruya et al. 2010



目的: 中性水素(HI)を用いた宇宙論解析のための理論的枠組みの構築

手法: 2つの宇宙論的流体シミュレーションを用いて
HIバイアスとHIの赤方偏移空間歪み(RSD)を測定

結果 実空間で測定したHI bias

- スケール依存性 (at $z>3$)
- 銀河スケール以下の物理モデルの不定性の影響は小さい
e.g. 星形成や超新星/AGN フィードバック

結果 赤方偏移空間歪み(RSD)

- 銀河サーベイで用いられる理論モデルをHIにも適用可能
- ハローとHIの質量の関係のより詳細な調査が必要

Thank you for listening

arXiv:1808.01116