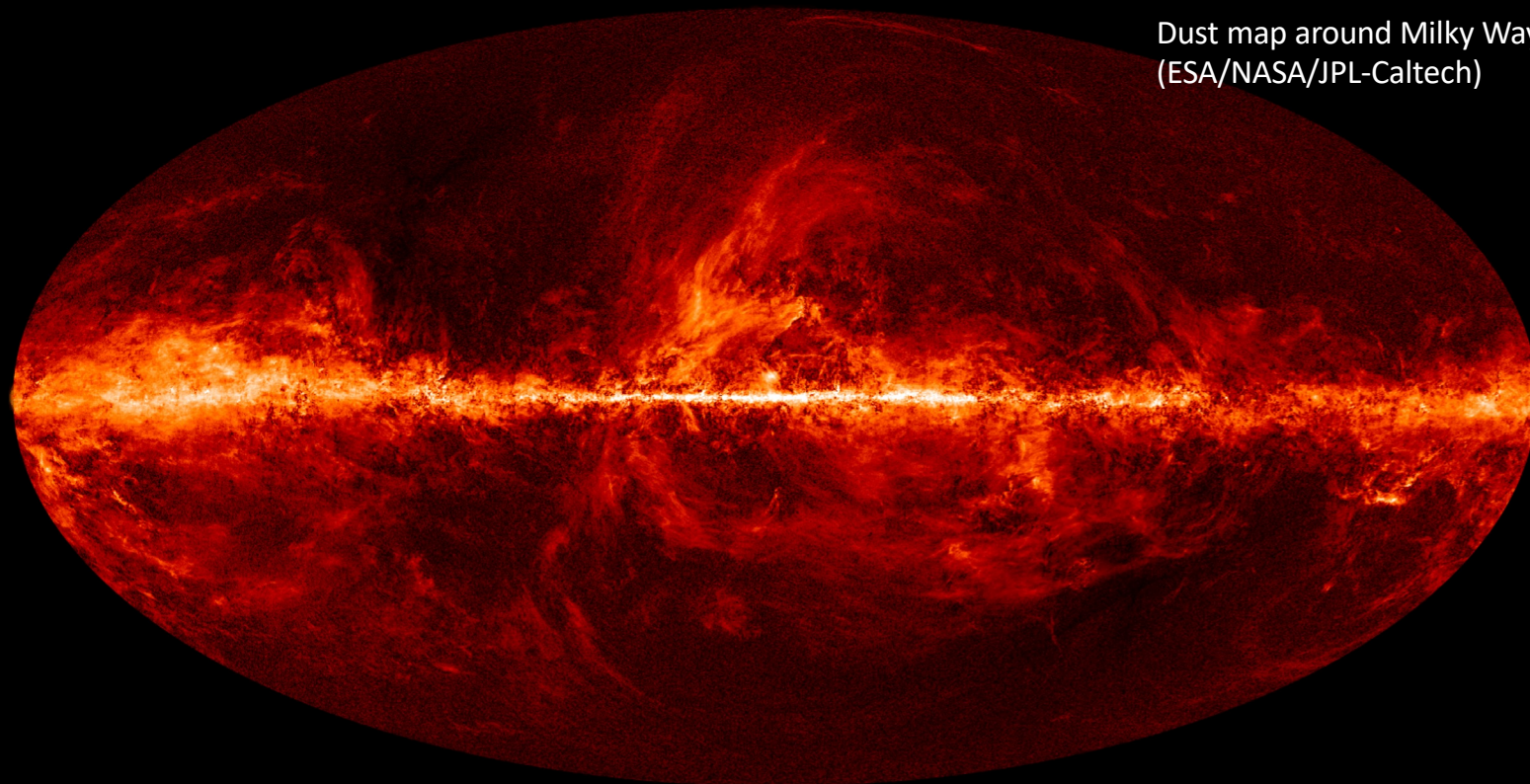


第4回：21cm線ミニワークショップ 2025.10.07

原始磁場に由来する 密度ゆらぎの非ガウス性

Dust map around Milky Way by Planck
(ESA/NASA/JPL-Caltech)

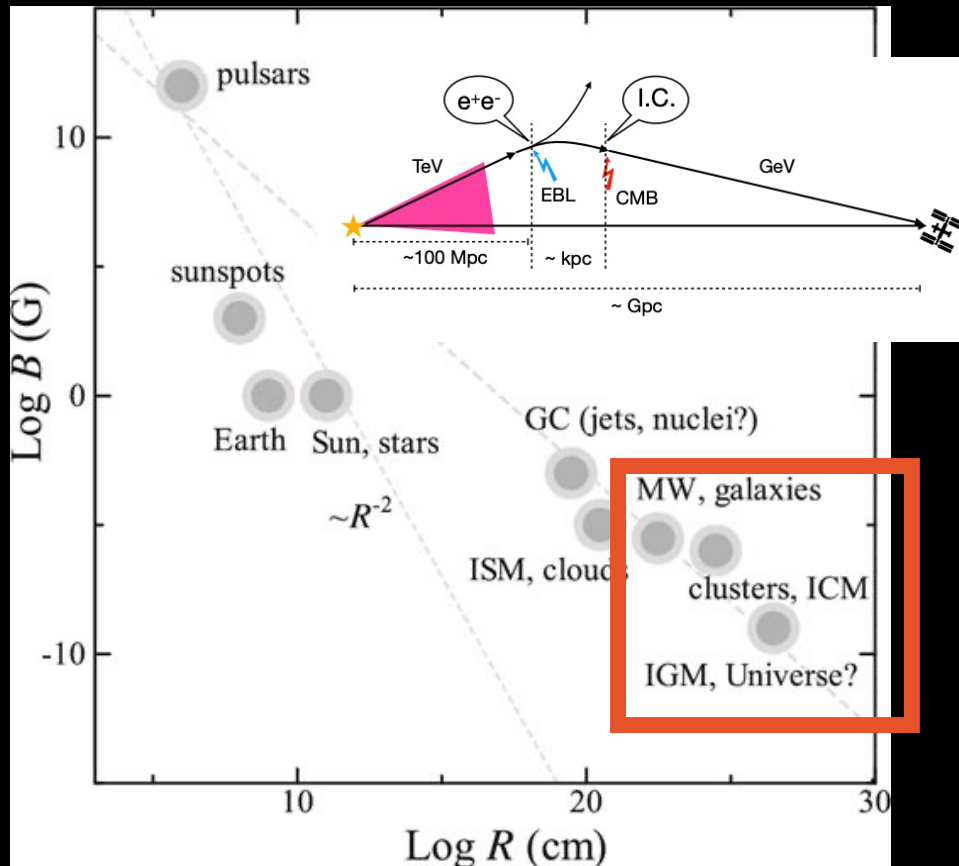


清华大学天文系
Department of Astronomy, Tsinghua University

箕田鉄兵 (清华大学)

嵯峨承平 (名古屋大), 島袋隼士 (雲南大),
Yi Mao (清華大)

宇宙における磁場の存在



- 様々なスケールに磁場が存在
- その起源と進化は不明
- とりわけ大スケール ($\geq \text{Mpc}$) では宇宙論・天体物理の両面と関連
- 原始磁場 (primordial magnetic fields, PMFs) ?

様々な天体の大きさと磁場強度の関係

原始磁場の生成

原始磁場の生成機構とその強度

- Inflation $\ll 10^{-15}$ G (scale-invariant, helical)
 - Phase transition $\sim 10^{-9}$ G on 50 kpc or 10^{-10} G on 0.3 kpc,
 - Topological defects $\sim 10^{-17}$ G on 6 Mpc
 - Baryon-photon streaming $\sim 5 \times 10^{-24}$ G on 20 Mpc
- ✓ 強度は小さいが、銀河磁場や銀河間磁場のタネ磁場にはなりうる？
- ✓ そもそも天文観測データと整合的なのか？
- ⇒ **観測的制限**

原始磁場が構造形成に与える影響

➤ MHDによるエネルギー散逸とIGM加熱

Ex. 21cm global signal, magnetic reheating, CMB optical depth

(Minoda et al. 2019; Saga et al. 2018)

➤ ローレンツ力による密度揺らぎの生成

Ex. 21cm power spectrum, galaxy number count, CMB anisotropy and optical depth, Hubble tension

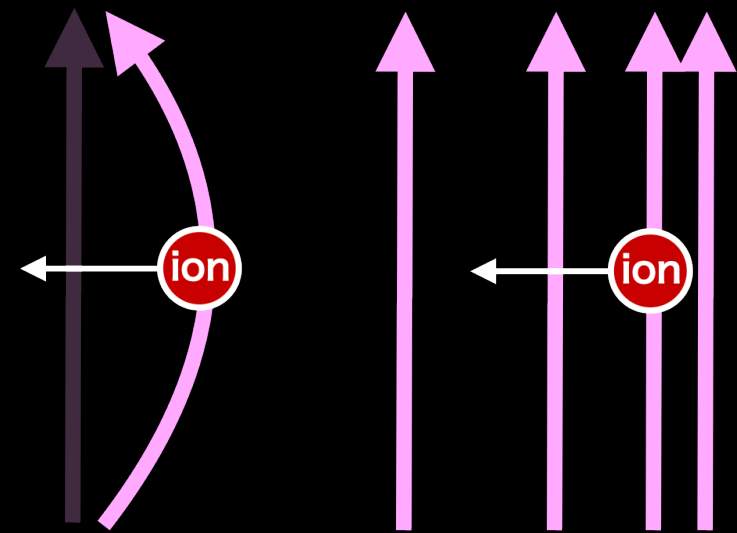
(Cruz et al. 2024; Sanati et al. 2020; Safarzadeh and Loeb 2019; Galli et al. 2022; Jedamzik et al. 2025, Minoda et al. in prep.)

原始磁場が構造形成に与える影響

荷電粒子に対するローレンツ力

$$f_{\text{Lorentz}} = \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{4\pi} = \frac{(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}}{4\pi} - \nabla \left(\frac{B^2}{8\pi} \right)$$

Magnetic fields \mathbf{B}



磁気張力

磁気圧

ローレンツ力がガスの運動や構造形成に影響

- ローレンツ力の統計的分布を知る必要がある

原始磁場のモデル

- 原始磁場の二点相関関数

$$\langle B_i(\mathbf{k})B_j(\mathbf{k}') \rangle = \frac{(2\pi)^3}{2} \delta_D(\mathbf{k} - \mathbf{k}') (\delta_{ij} - \hat{k}_i \hat{k}_j) P_B(k)$$

パワースペクトルを単一冪乗で仮定

$$P_B(k) \propto B_{1\text{Mpc}}^2 k^{n_B}$$

↓
normalizing
amplitude

↓
scale dependence

密度揺らぎの非ガウス性

流体方程式（連続の式、オイラーの式）

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_b \mathbf{v}_b) = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{v}_b}{\partial t} + (\mathbf{v}_b \cdot \nabla) \mathbf{v}_b = -\frac{\nabla p}{\rho_b} + \frac{\mathbf{f}_{\text{Lorentz}}}{\rho_b} - \nabla \Phi \end{cases}$$

密度揺らぎ： $\rho_b = \bar{\rho}_b (1 + \delta_b)$

(線形近似 $\delta_b \ll 1$)

$$\ddot{\delta}_b + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{\delta}_b - 4\pi G[\bar{\rho}_c \delta_c + \bar{\rho}_b \delta_b] = \frac{\nabla \cdot \mathbf{f}_{\text{Lorentz}}}{\bar{\rho}_b}$$

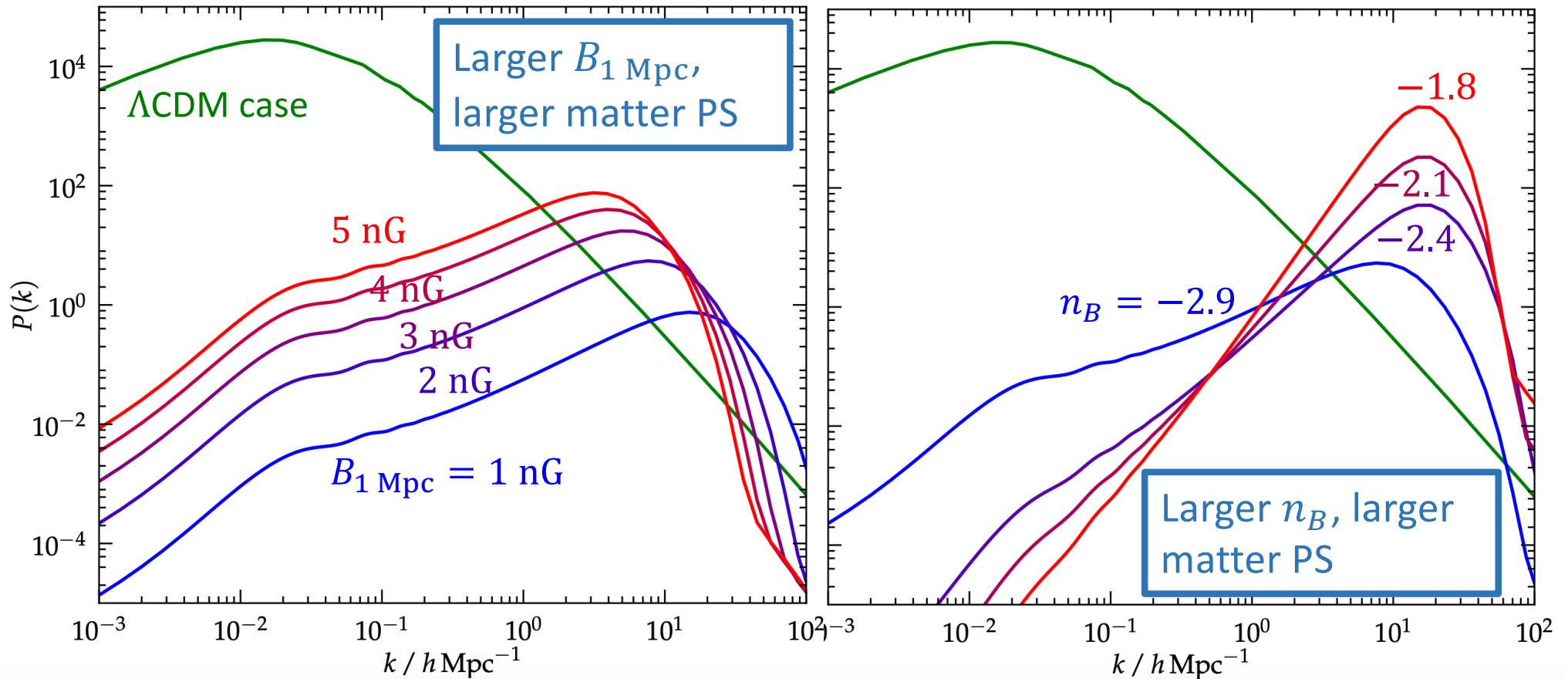
➤ 磁場の統計的分布を調べてローレンツ力の項を計算

物質パワースペクトル

$$P_B(k) \propto B_{1\text{Mpc}}^2 k^{n_B}$$

$$n_B = -2.9$$

$$B_{1\text{Mpc}} = 2\text{ nG}$$



Solving the baryon-photon fluid equations,
Calculate matter power spectrum with PMFs

(Shaw and Lewis 2012)

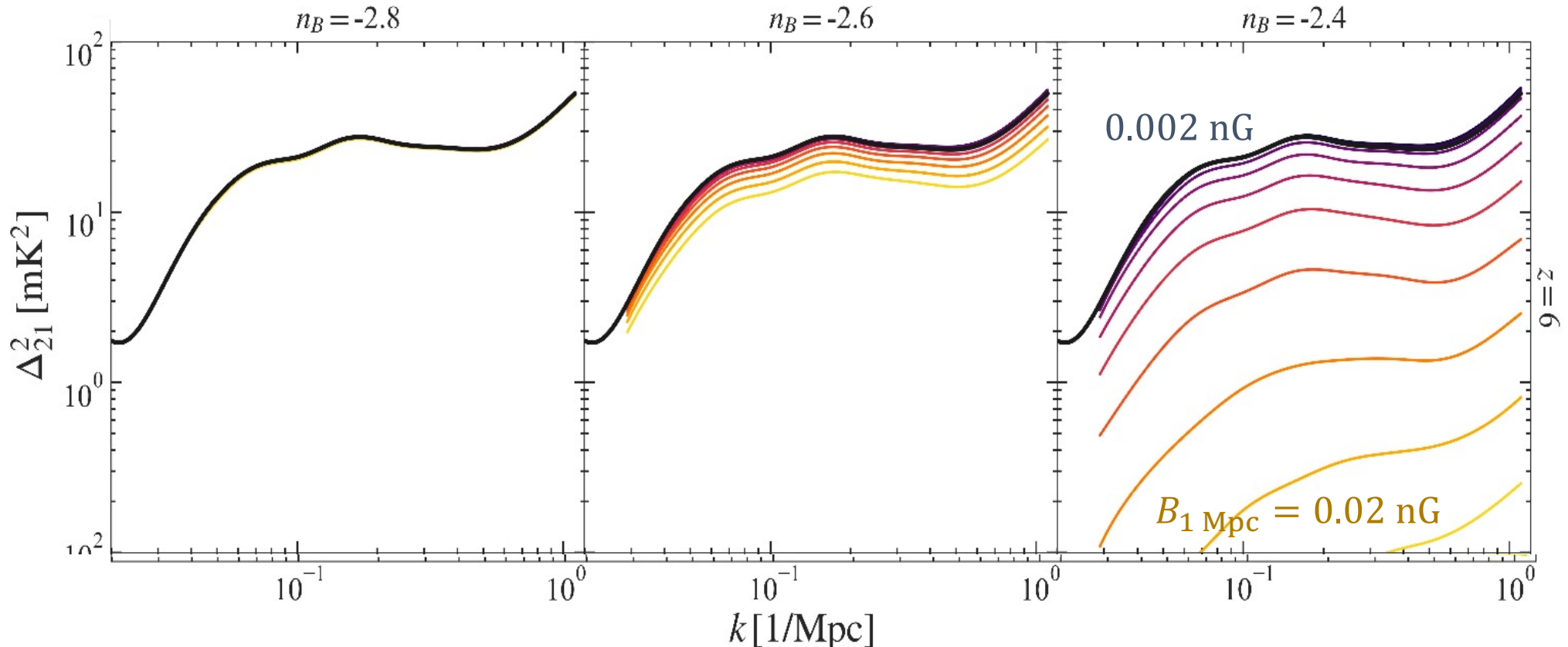
21cm パワースペクトル (z=6)

$$P_B(k) \propto B_{1\text{Mpc}}^2 k^{n_B}$$

磁場のスペクトル指数

Flat (white)

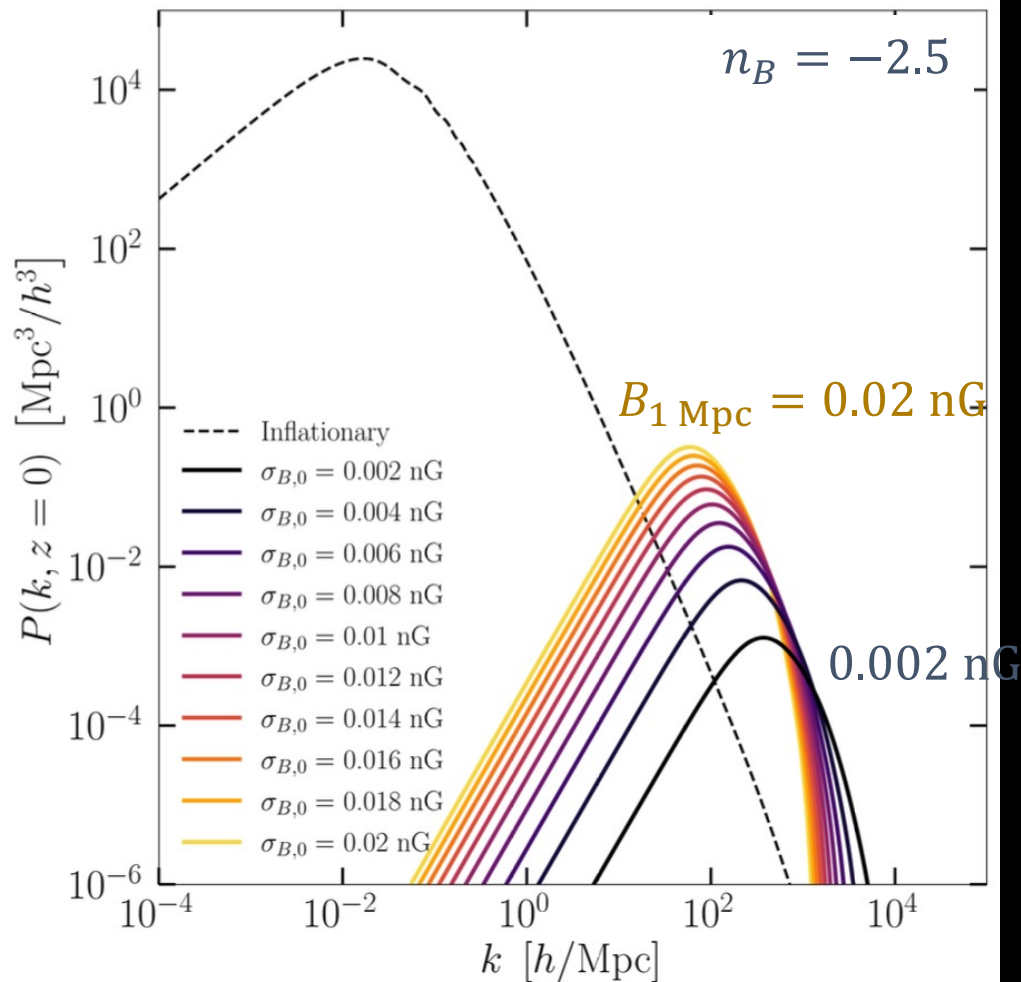
Steep (blue)



Using 21cmFAST (input matter PS with PMFs). Larger $B_{1\text{Mpc}}$ and n_B , earlier reionization ends. Smaller amplitude 21cm PS

(Cruz et al. 2024)

物質パワースペクトル再考



物質パワースペクトルを増幅

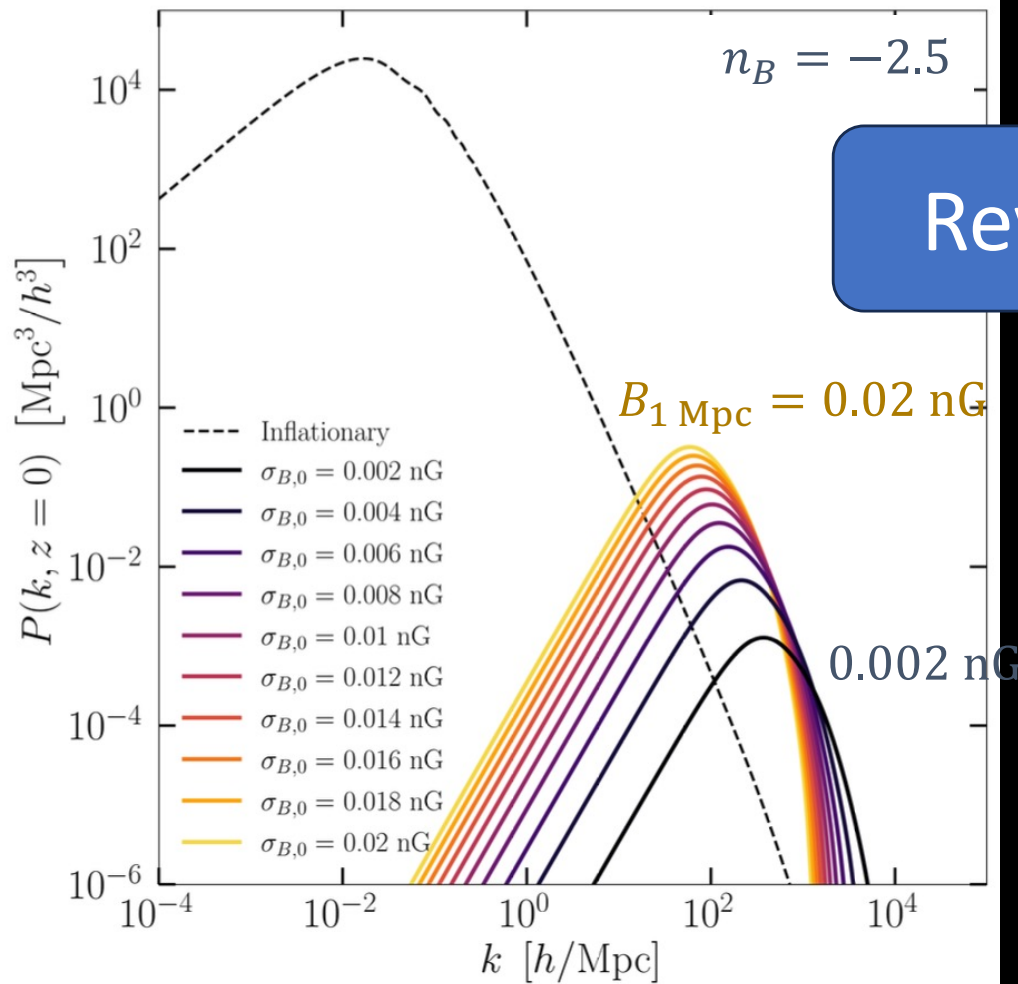


ハロー質量関数



種々の観測量 (21-cm line, ionization history, galaxy distribution, Ly-alpha, cosmic shear, ...)

物質パワースペクトル再考



物質パワースペクトルを増幅

Revisit?

ハロー質量関数

種々の観測量 (21-cm line, ionization history, galaxy distribution, Ly-alpha, cosmic shear, ...)

一口一質量関数 (Press-Schechter)

Primordial perturbations $\mathcal{P}_R(k)$

Matter power spectrum $P_m(k)$

Assuming Gaussian

$$P_G(\delta) \propto \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right)$$

Mass dispersion $\sigma(M)$

Collapsed fraction

$$f(\delta > \delta_c) = \int_{\delta_c}^{\infty} d\delta P_G(\delta)$$

Halo mass function $n(M)dM$

ハロ一質量関数 (Press-Schechter)

Primordial perturbations $\mathcal{P}_R(k)$

Matter power spectrum $P_m(k)$

(1) 磁場が揺らぎを生成
> 多くの先行研究

Mass dispersion $\sigma(M)$

Halo mass function $n(M)dM$

Assuming Gaussian

$$P_G(\delta) \propto \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right)$$

(2) 磁場が非ガウス性を生成
> 本研究で着目

Collapsed fraction

$$f(\delta > \delta_c) = \int_{\delta_c}^{\infty} d\delta P_G(\delta)$$

密度揺らぎの非ガウス性

Vector potential \mathbf{A}

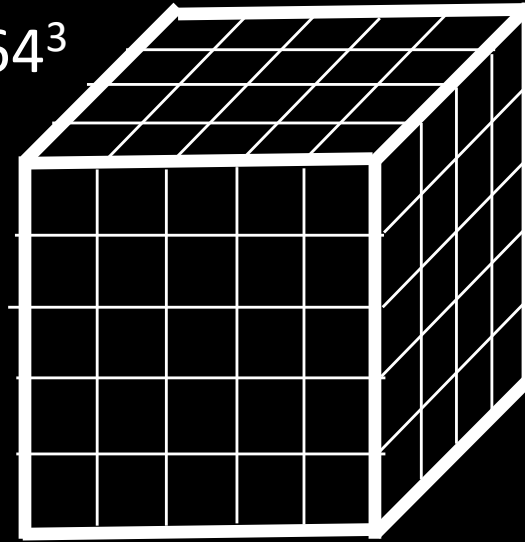
PMF itself is
Gaussian

Magnetic fields $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$

Lorentz force

$$\mathbf{f}_{\text{Lorentz}} = \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{4\pi}$$

Grid 64^3

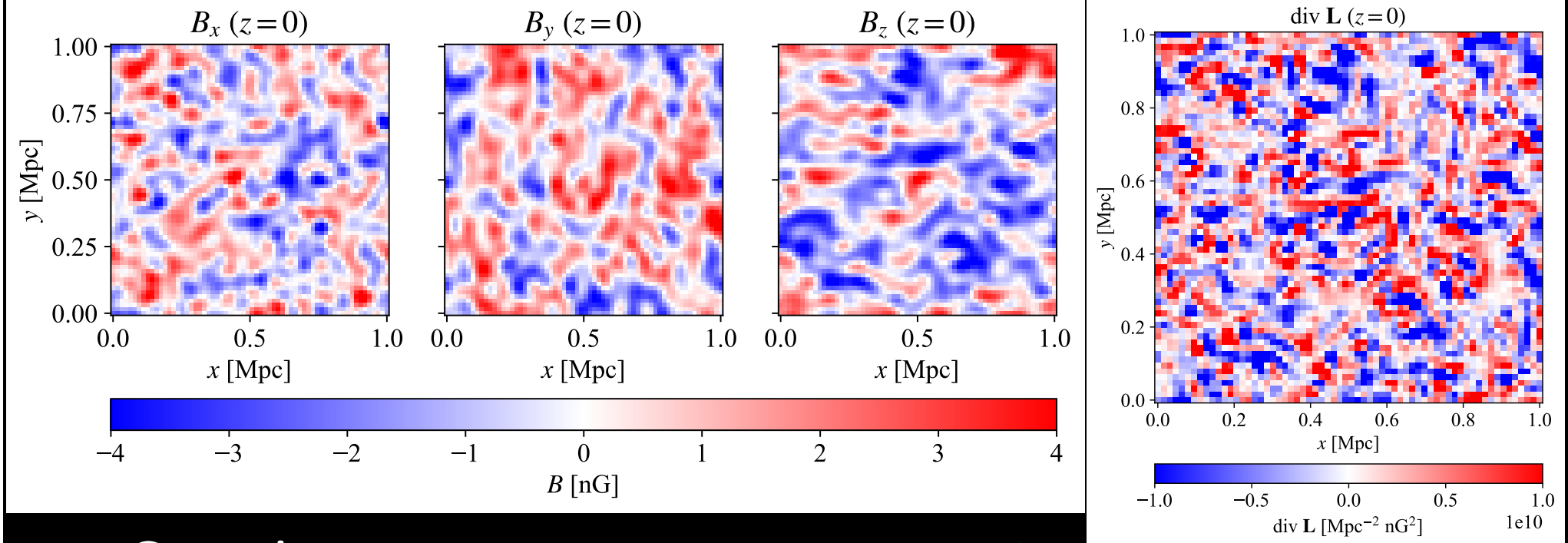


Box length = 5 Mpc

Gaussian, or non-Gaussian?

$$\ddot{\delta}_b + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{\delta}_b - 4\pi G[\bar{\rho}_c\delta_c + \bar{\rho}_b\delta_b] = \frac{\nabla \cdot \mathbf{f}_{\text{Lorentz}}}{\bar{\rho}_b}$$

密度揺らぎの非ガウス性



Gaussian

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

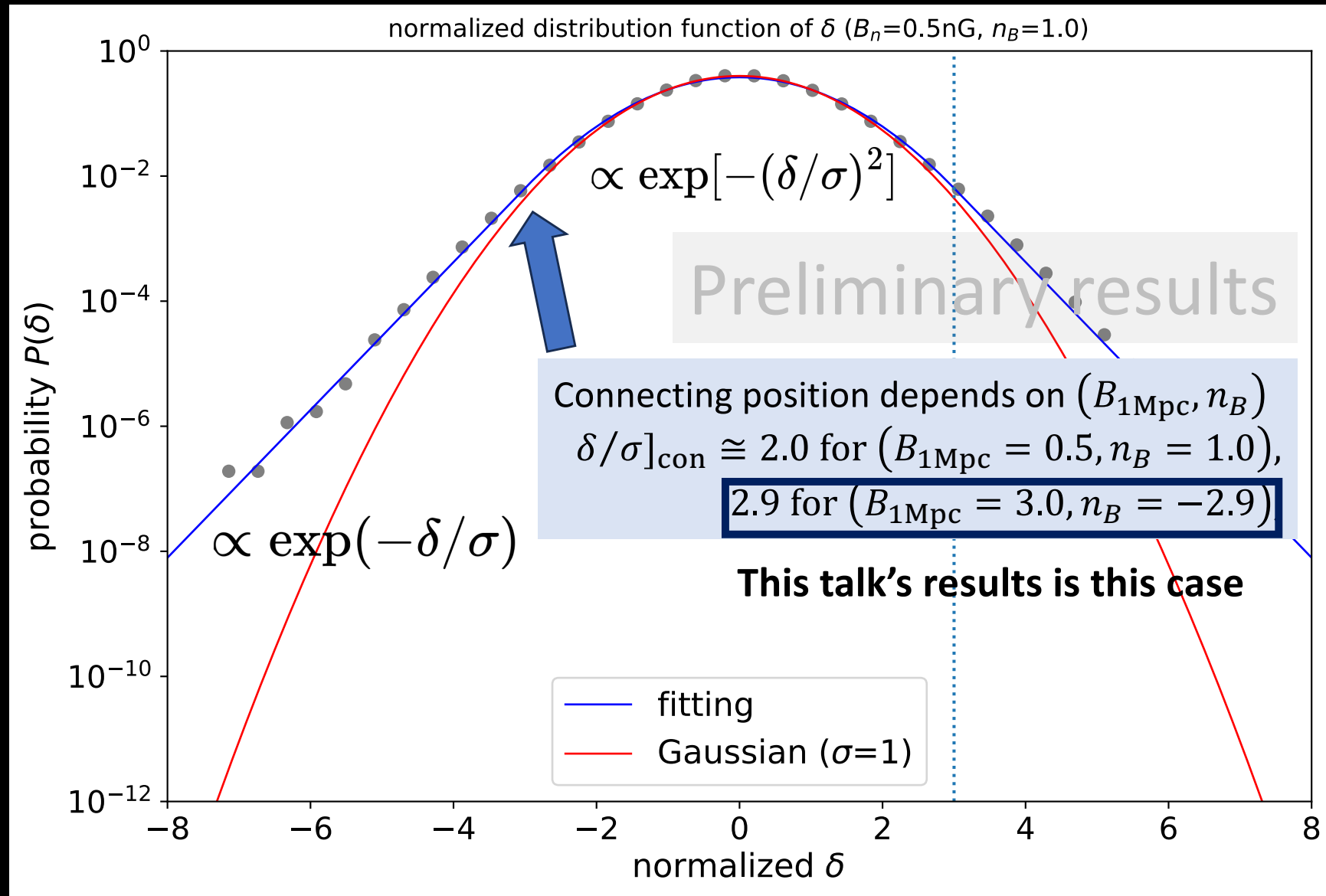
Non-Gaussian

$$\nabla \cdot \mathbf{f}_{\text{Lorentz}} \propto \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

密度揺らぎの時間発展の式においてソース項として現れる

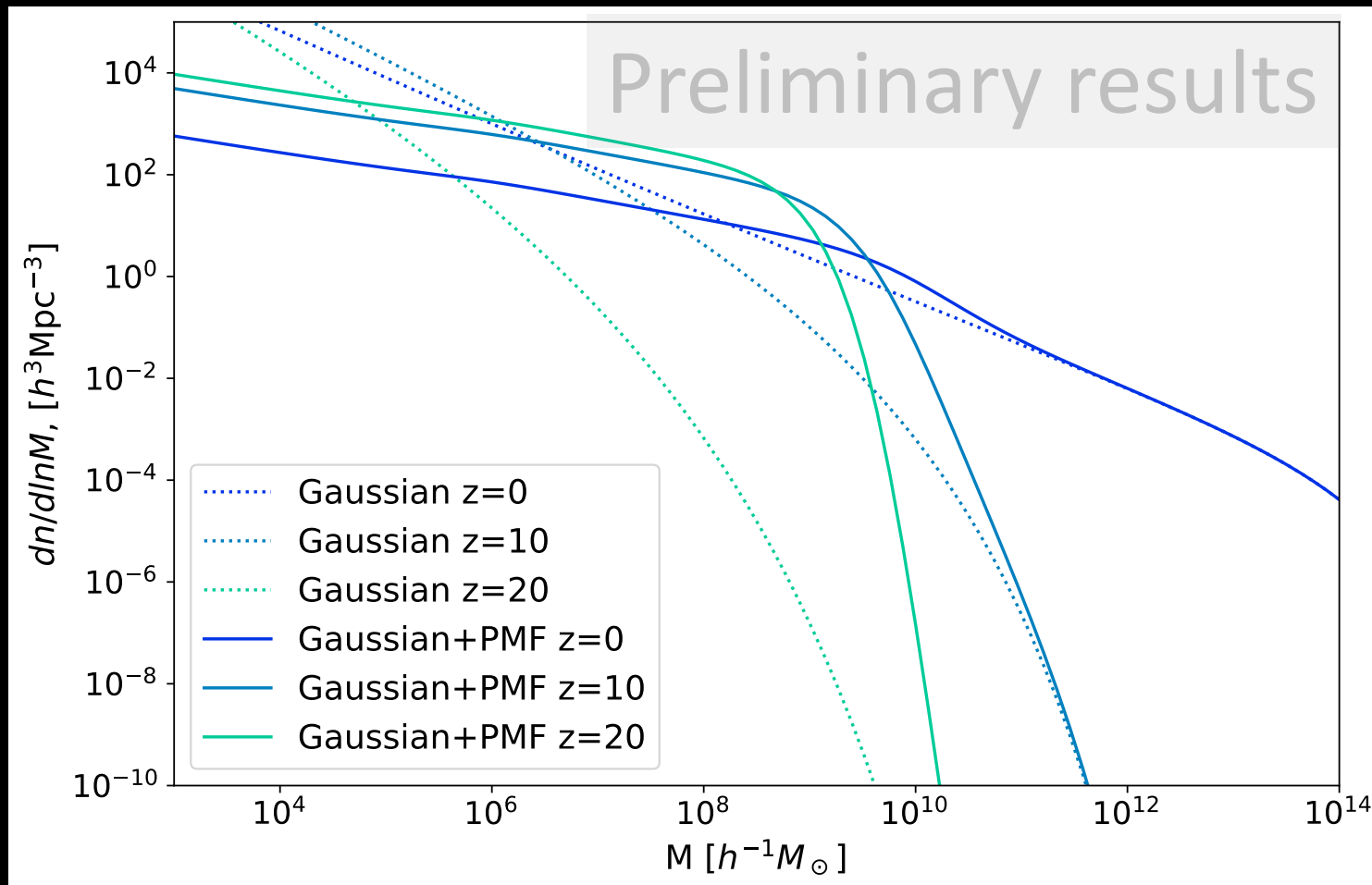
$$\ddot{\delta}_b + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{\delta}_b - 4\pi G[\bar{\rho}_c\delta_c + \bar{\rho}_b\delta_b] = \frac{\nabla \cdot \mathbf{f}_{\text{Lorentz}}}{\bar{\rho}_b}$$

密度揺らぎの非ガウス性



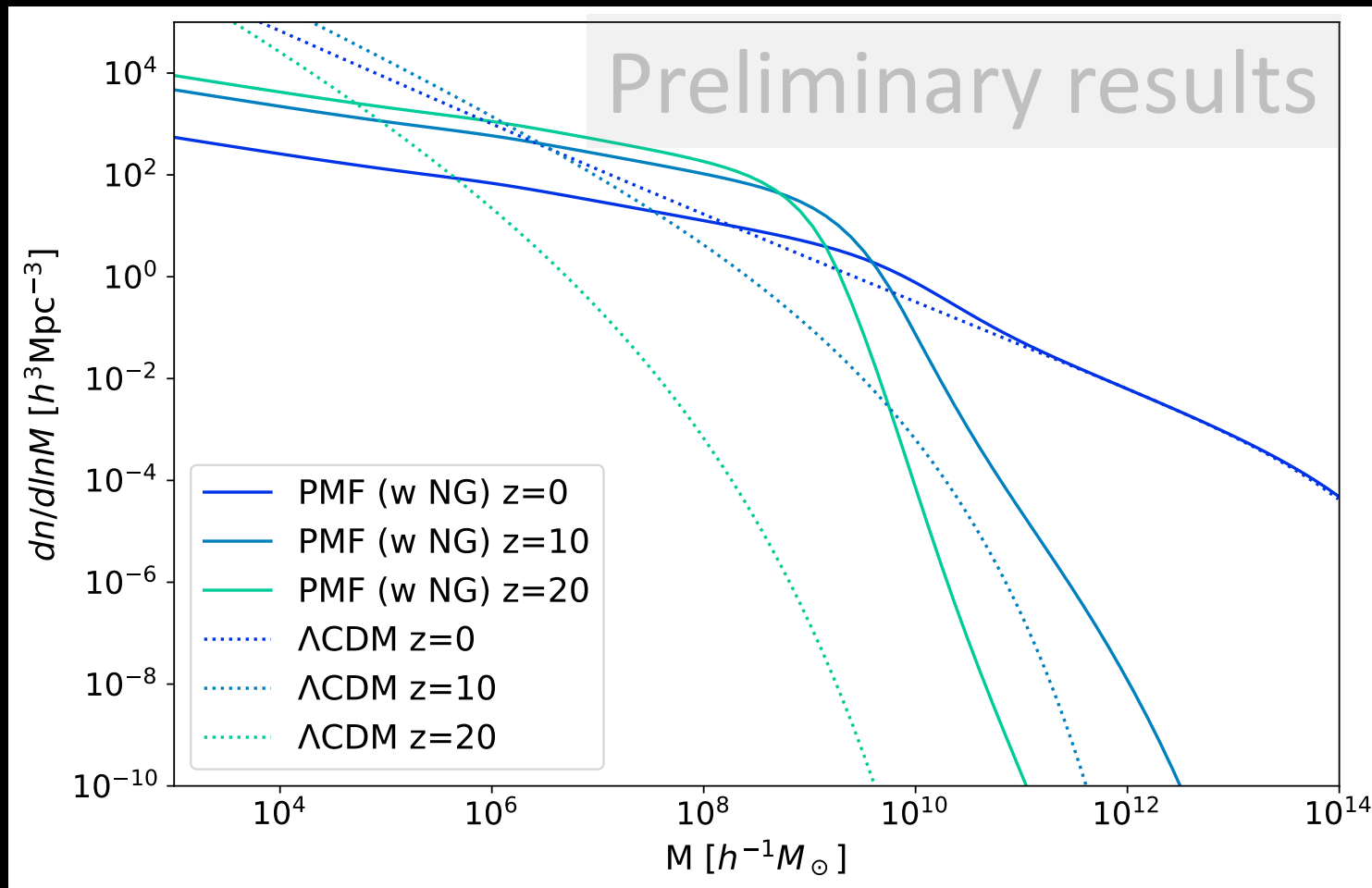
原始磁場とハロ一質量関数

Matter power spectrum	LCDM + PMFs
1-pt. PDF	Gaussian



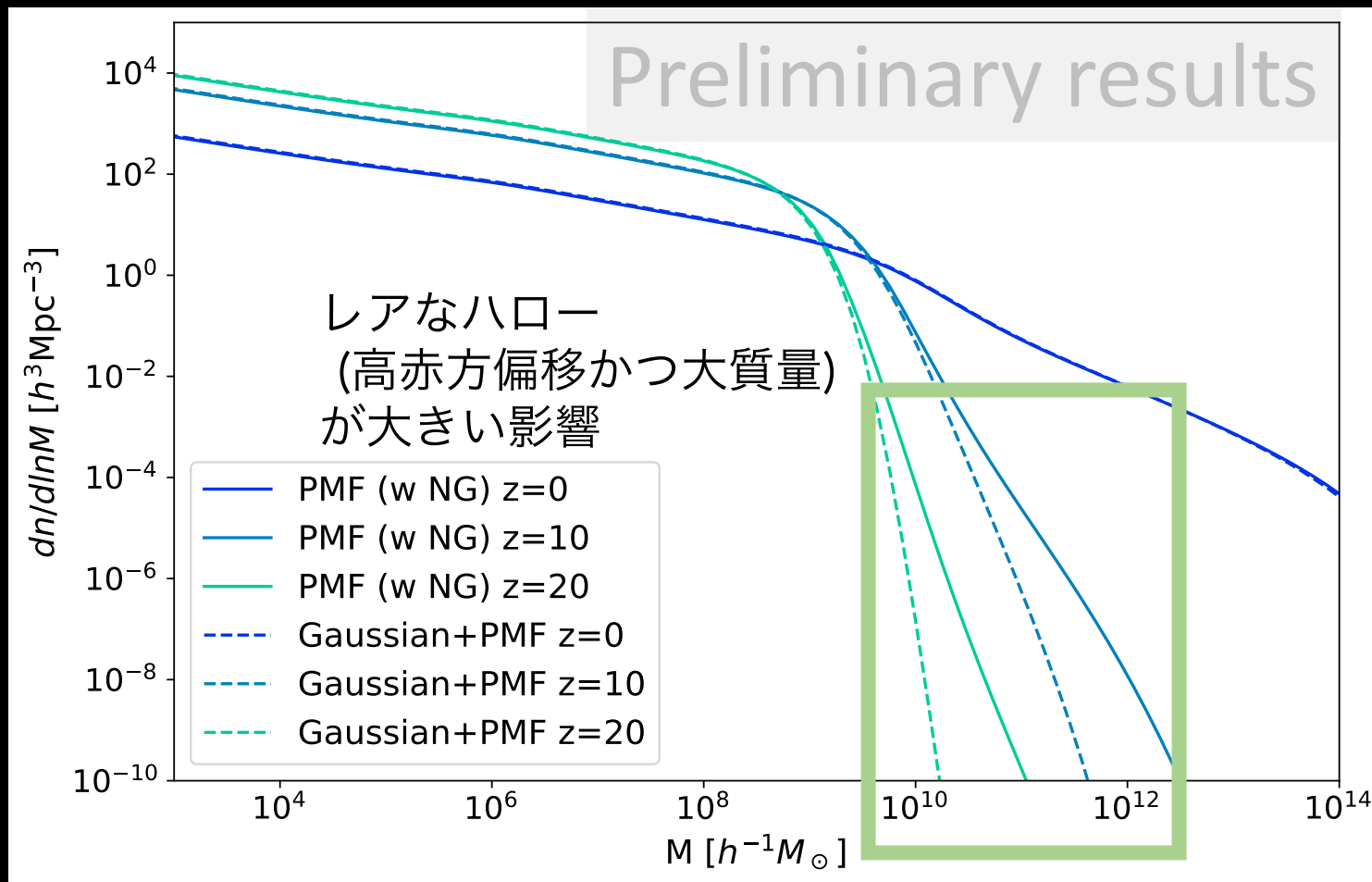
原始磁場とハロ一質量関数

Matter power spectrum	ΛCDM + PMFs
1-pt. PDF	Non-Gaussian



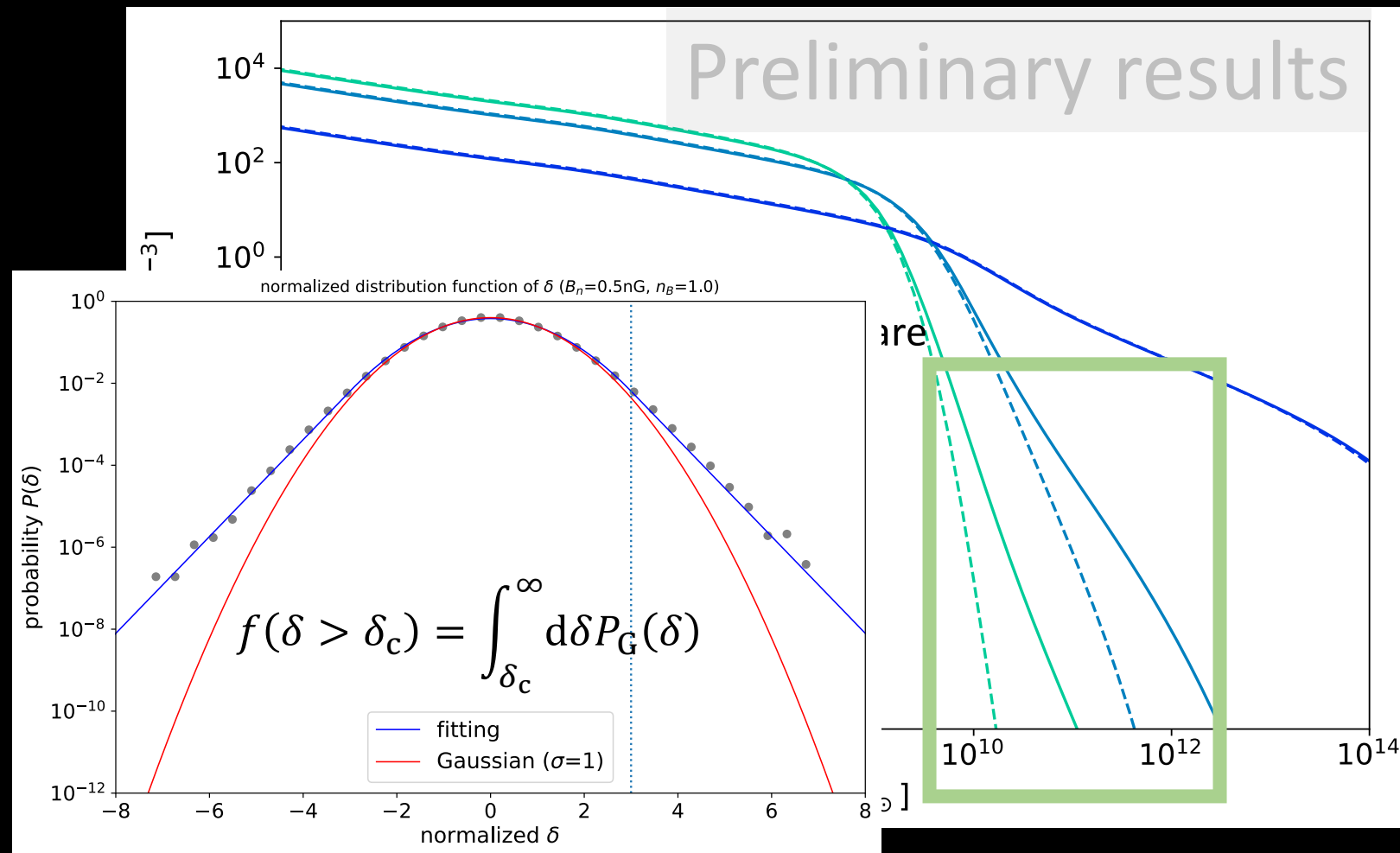
原始磁場とハロー質量関数

異なる分布関数を用いた計算結果の比較



原始磁場とハロー質量関数

異なる分布関数を用いた計算結果の比較



まとめ

- ✓ 原始磁場によって生じる密度揺らぎ δ の分布関数を調べた
- ✓ ハロー質量関数を見積もった
- ✓ 今後の展望：
観測量への適用
原始磁場のパラメータなどの依存性

Thank you very much!