

PlanckのCMB前景放射データ を用いた原始曲率揺らぎの制限

箕田鉄兵、阿部克哉、田代寛之（名大理）

Abe, TM, and Tashiro (<https://arxiv.org/abs/2108.00621>)

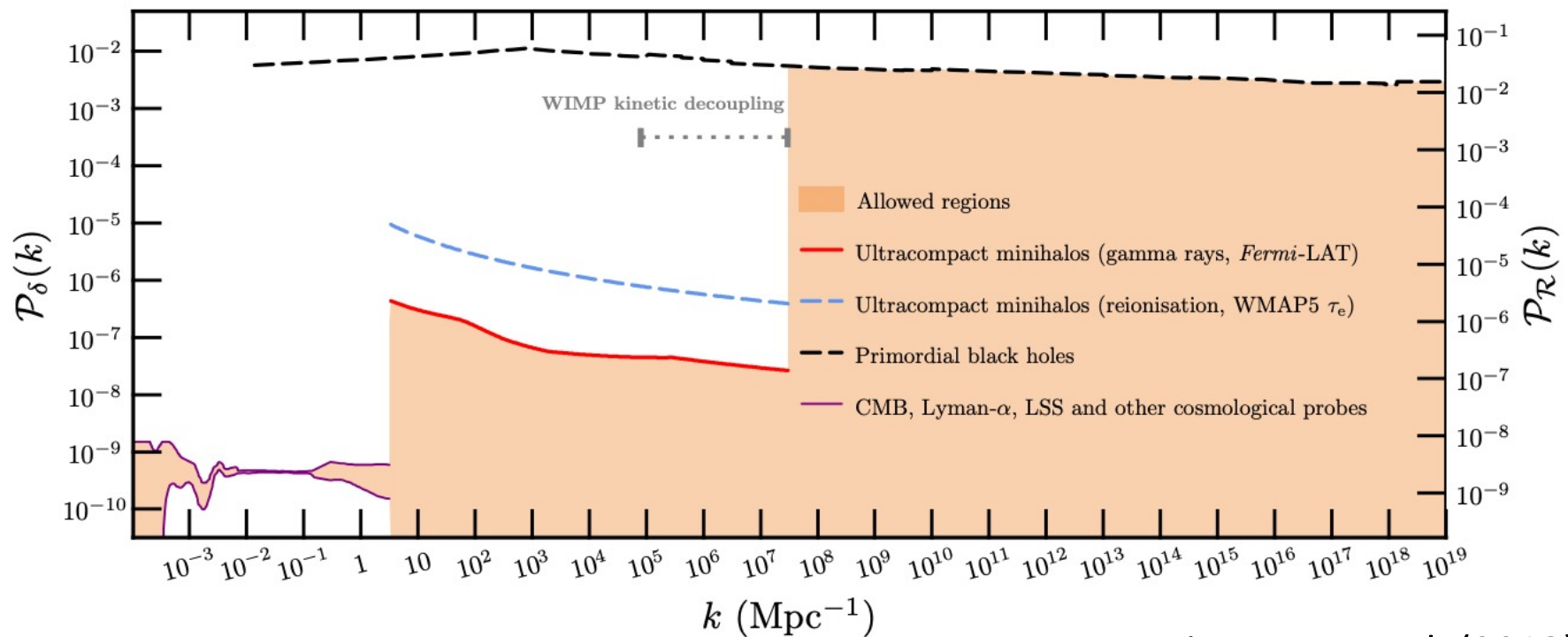
Tashiro, Abe, and TM (<https://arxiv.org/abs/2108.01916>)

目次

- Motivation – 原始曲率揺らぎとその制限
- ダークマターハローの内部構造
- 熱的制動放射による全天の電波強度

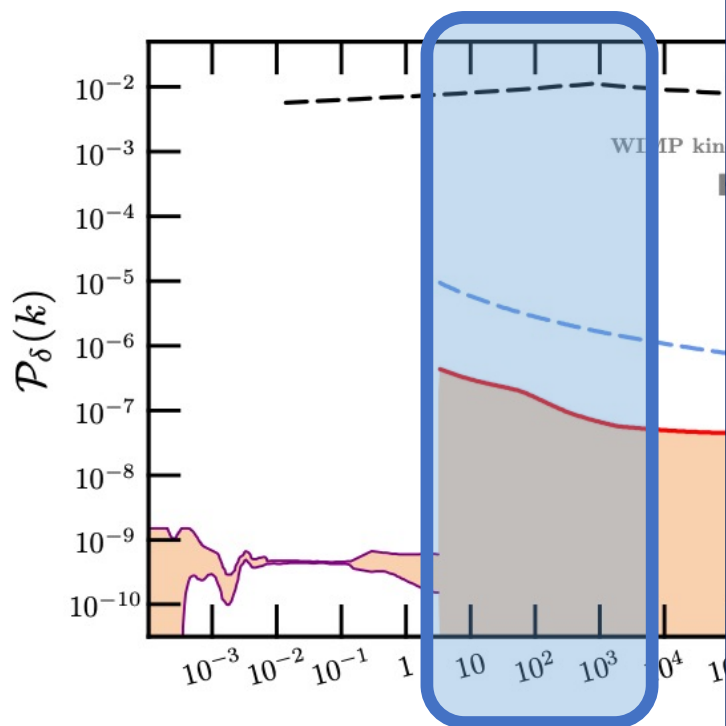
Motivation

原始曲率揺らぎ



Bringmann et al. (2013)

原始曲率揺らぎ



小スケールのゆらぎに着目
 $1 < k < 100 \text{ [Mpc}^{-1}\text{]}$
 $\Leftrightarrow 10^7 < M < 10^{13} \text{ [Msun]}$
 のハローが早い時代 ($z \geq 10$)
 でたくさんできるはず
 着目する **probe**:
 ハロー内のガスによる
 熱的制動放射

Bringmann et al. (2013)

熱的制動放射の見積もり：概観

$$\frac{dI_{\nu}^{\text{ff}}(z, M_{\text{halo}})}{dz} = \int_z^{\infty} f_{\text{sky}} I_{\nu}^{\text{ind}} \frac{dn_{\text{halo}}^{\text{com}}}{dz_f} dz_f \frac{dV_{\text{com}}}{dz}$$

$$f_{\text{sky}} = \frac{\Omega_{\text{halo}}}{4\pi} : \text{個別のハローの天球面に占める面積比}$$

$$I_{\nu}^{\text{ind}}(z, z_f, M_{\text{halo}}) = \frac{\int \epsilon_{\nu}^{\text{ff}} dV}{S_{\text{halo}}}$$

: 個別のハローから放射される電波強度

$$\frac{dn_{\text{halo}}^{\text{com}}}{dz_f} : \text{赤方偏移 } z_f \text{ で形成されるハローの数密度}$$

個別のハローから放射される電波強度

ダークマターハローの内部構造

制動放射の emissivity

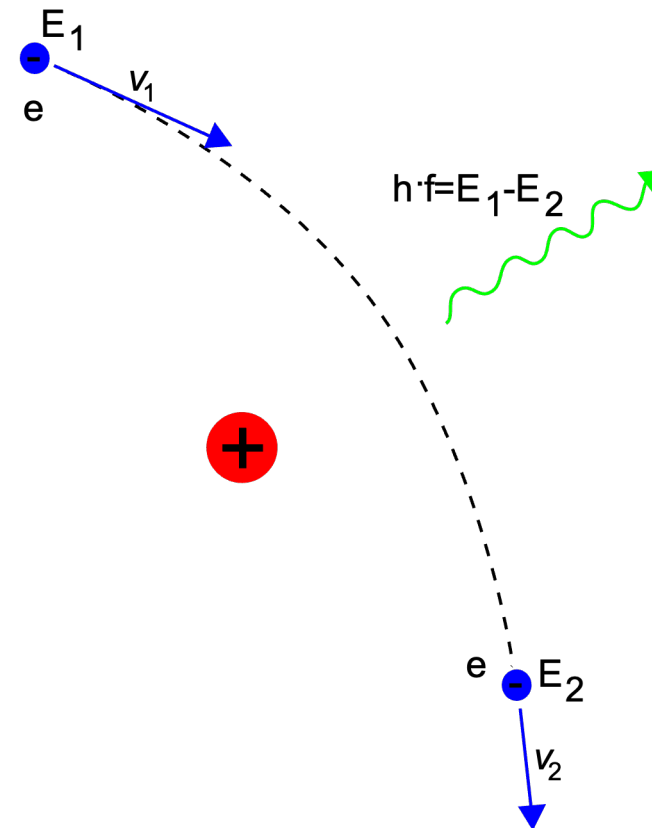
$$\epsilon_{\nu}^{\text{ff}} = 2.72 \times 10^{-33} n_b^2 x_e^2 T_{\text{halo}}^{-1/2} \exp^{-h\nu/k_B T_{\text{halo}}} \bar{g}_{\text{ff}} \quad [\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ Hz}^{-1}]$$

静水圧平衡を仮定：

- Dark matter density
- Gas temperature
- Ionization fraction



Gas density profile



Dark matter density

NFW profile

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \frac{\rho_s}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

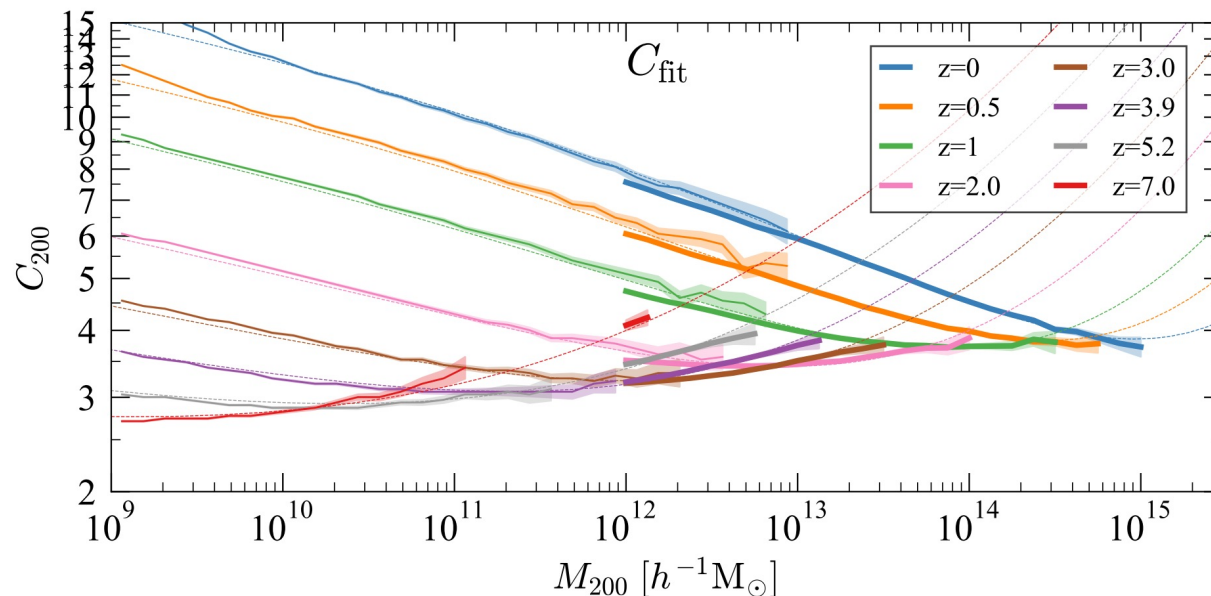
r_s : scale radius

ビリアル半径

$$R_{\text{vir}}(M_{\text{halo}}) = \left(\frac{3M_{\text{halo}}}{4\pi\Delta_c\rho_{\text{cri}}(z_f)} \right)^{1/3}$$

Concentration parameter

$$c_s \equiv R_{\text{vir}}/r_s$$



Uchuu Simulations
で得られた結果
を利用

Ishiyama et al. (2021)

Gas temperature

$$T_{\text{halo}}(M, z, z_f) = T_{\text{vir}}(M, z_f) \exp\left(-\frac{t(z, z_f)}{t_{\text{cool}}}\right)$$

$$t(z, z_f) \approx \frac{2}{3} \left(\frac{1}{H(z)} - \frac{1}{H(z_f)} \right)$$

冷却のタイムスケール

$$t_{\text{cool}} = \min(t_{\text{C}}, t_{\text{ff}})$$

Compton 散乱による冷却

$$t_{\text{C}}(z) = \frac{3m_e c}{4\sigma_{\text{T}} a T_{\gamma}^4} = 1.4 \times 10^7 \left(\frac{1+z}{20} \right)^{-4} \text{ yr}$$

制動放射による冷却

$$t_{\text{ff}}(M, z) = \frac{3/2 n_{\text{gas}} T_{\text{halo}}}{\int d\nu \epsilon_{\nu}^{\text{ff}}}$$

Ionization fraction

$$\frac{dx_e}{dt} = C_{\text{coll}} n_{\text{H}} (1 - x_e) + A_{\text{rec}} n_{\text{H}} x_e = 0$$

$$\Leftrightarrow x_e(T_{\text{halo}}) = \frac{C_{\text{coll}}}{C_{\text{coll}} + A_{\text{rec}}}$$

衝突電離

$$C_{\text{coll}} \approx 5.85 \times 10^{-9} T_4^{1/2} e^{-T_{\text{H}}/T_{\text{halo}}} n_{\text{H}} \quad [\text{cm}^3/\text{s}]$$

Bell et al. (1983)

再結合

$$A_{\text{rec}} = -1.14 \times 10^{-13} \frac{aT_4^b}{1+cT_4^d} \quad [\text{cm}^3/\text{s}]$$

$$a = 4.309, b = -0.6166, c = 0.6703, d = 0.5300, \text{ and } T_4 = T_{\text{halo}}/10^4 \text{K.}$$

Pequignot et al. (1991)

個別のハローから放射される電波強度

ダークマターハローの内部構造

制動放射の emissivity

$$\epsilon_{\nu}^{\text{ff}} = 2.72 \times 10^{-33} n_b^2 x_e^2 T_{\text{halo}}^{-1/2} \exp^{-h\nu/k_B T_{\text{halo}}} \bar{g}_{\text{ff}} \quad [\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ Hz}^{-1}]$$

静水圧平衡を仮定：

- Dark matter density
- Gas temperature
- Ionization fraction



Gas density profile

$$\frac{k_B T_{\text{halo}}}{\mu m_p} \frac{d \ln \rho_g}{dr} = - \frac{GM(r)}{r^2}$$



$$\rho_g(r) \propto (1 + r/r_s)^{27b/(2r/r_s)}$$

Makino et al. (1998)

個別のハローから放射される電波強度

ダークマターハローの内部構造

制動放射の emissivity

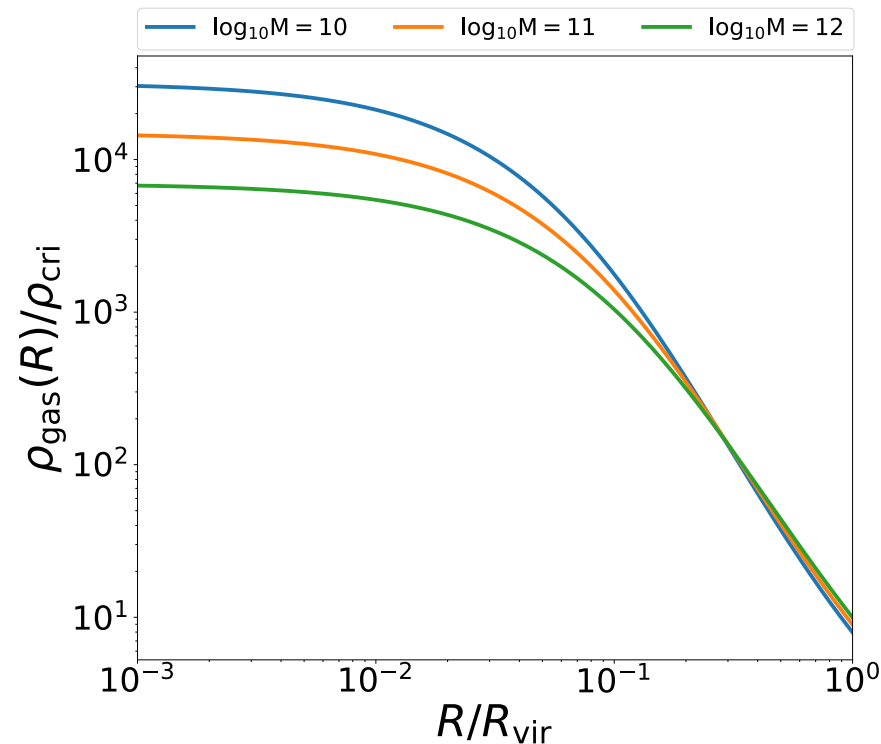
$$\epsilon_{\nu}^{\text{ff}} = 2.72 \times 10^{-33} n_b^2 x_e^2 T_{\text{halo}}^{-1/2} \exp^{-h\nu/k_B T_{\text{halo}}} \bar{g}_{\text{ff}} \quad [\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ Hz}^{-1}]$$

静水圧平衡を仮定：

- Dark matter density
- Gas temperature
- Ionization fraction



Gas density profile



$$\rho_g(r) \propto (1 + r/r_s)^{27b/(2r/r_s)}$$

熱的制動放射の見積もり：概観

$$\frac{dI_{\nu}^{\text{ff}}(z, M_{\text{halo}})}{dz} = \int_z^{\infty} f_{\text{sky}} I_{\nu}^{\text{ind}} \frac{dn_{\text{halo}}^{\text{com}}}{dz_f} dz_f \frac{dV_{\text{com}}}{dz}$$

$$f_{\text{sky}} = \frac{\Omega_{\text{halo}}}{4\pi} : \text{個別のハローの天球面に占める面積比}$$

$$I_{\nu}^{\text{ind}}(z, z_f, M_{\text{halo}}) = \frac{\int \epsilon_{\nu}^{\text{ff}} dV}{S_{\text{halo}}}$$

: 個別のハローから放射される電波強度

$$\frac{dn_{\text{halo}}^{\text{com}}}{dz_f}$$

: 赤方偏移 z_f で形成されるハローの数密度

ハロー形成史の見積もり

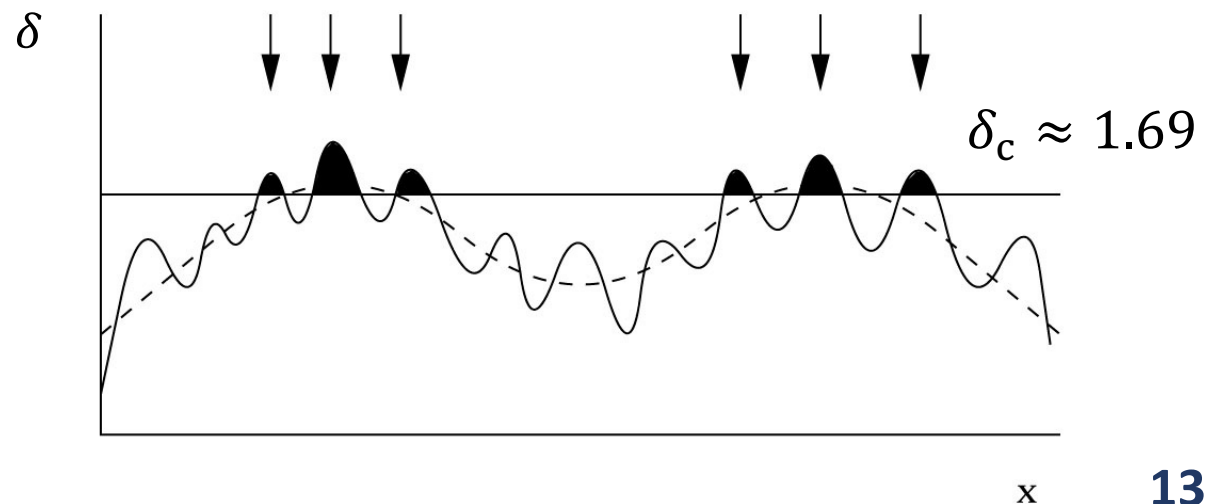
Press-Schechter theory:

$$\frac{dn_{\text{halo}}^{\text{com}}}{dz_f} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Omega_m \rho_{\text{crit}}}{M_{\text{halo}}} \frac{\delta_c}{\sigma_0} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\delta_c}{D(z)\sigma_0} \right)^2 \right]$$

密度揺らぎの分散:

$$\sigma_0^2(M) = \int d\log k \mathcal{P}_\zeta(k) T^2(k) W_k^2(kR_M(M))$$

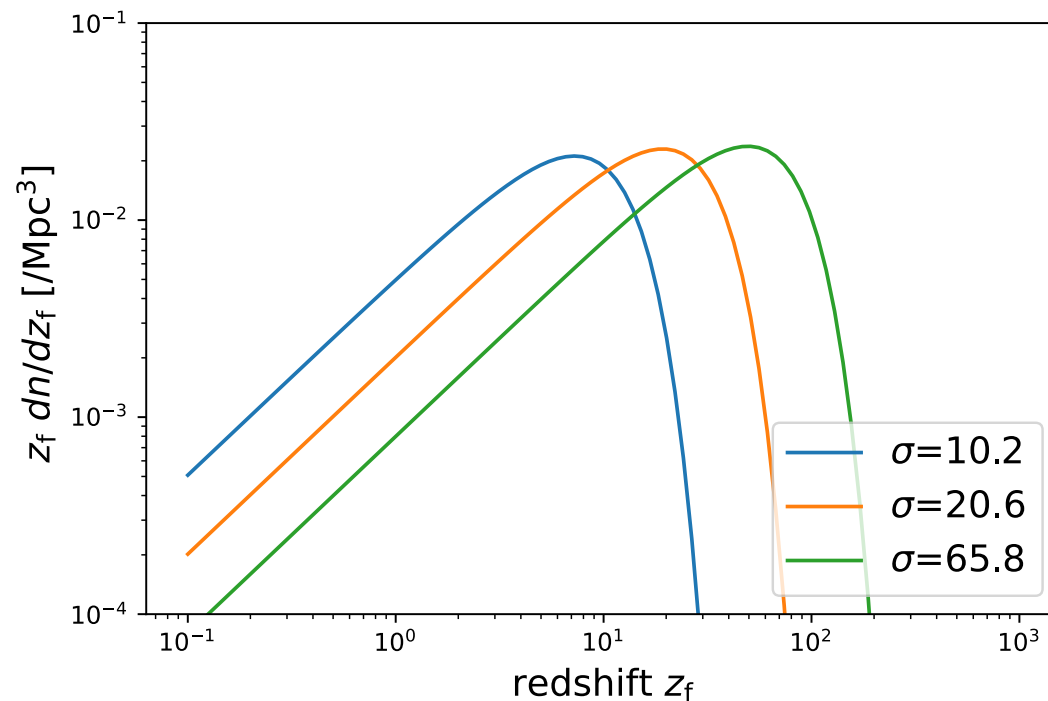
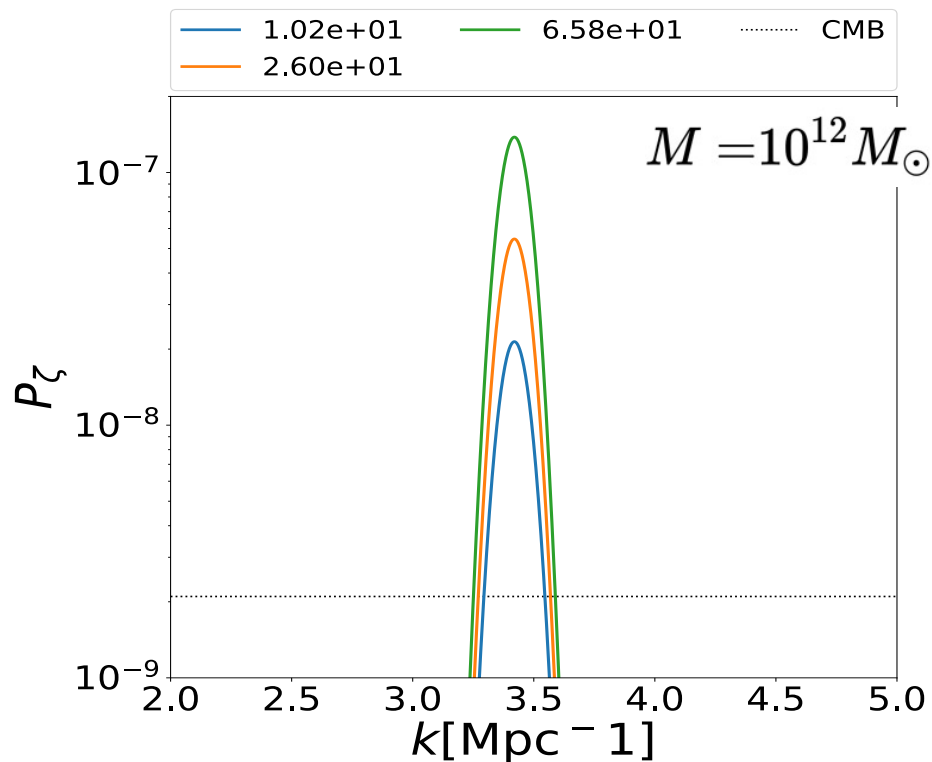
原始曲率揺らぎが大きい
> 密度揺らぎの分散が大きい
> 早く、多くハローが形成



ハロー形成史の見積もり

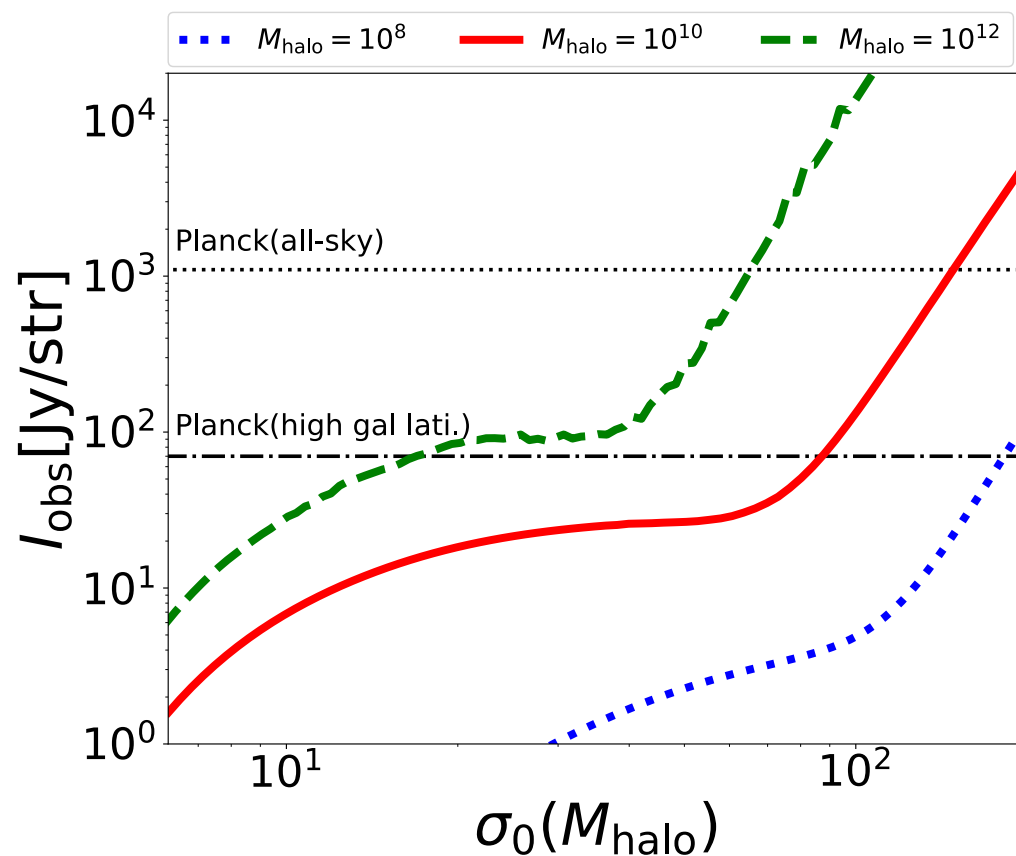
Press-Schechter theory:

$$\frac{dn_{\text{halo}}^{\text{com}}}{dz_f} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Omega_m \rho_{\text{crit}}}{M_{\text{halo}}} \frac{\delta_c}{\sigma_0} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\delta_c}{D(z) \sigma_0} \right)^2 \right]$$



制動放射の強度

$$I_{\nu_{\text{obs}}}^{\text{sky}} = \int dz \frac{1}{(1+z)^3} \frac{dI_{\nu_{\text{em}}}^{\text{sky}}(z, M)}{dz},$$

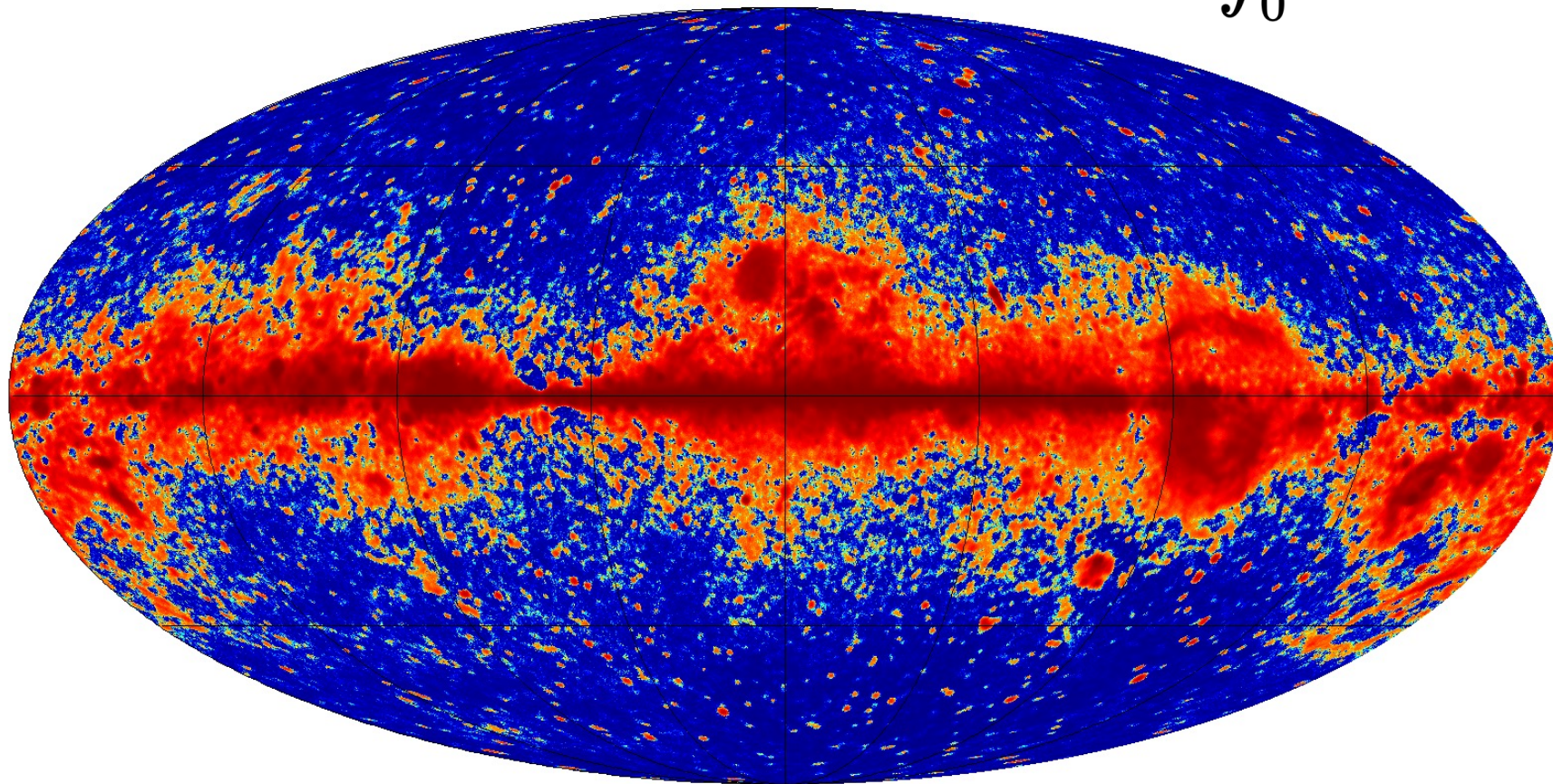


熱的制動放射による全天の電波強度

Planck 観測との比較

emission measure: $EM = \int_0^L n_e n_p dx$

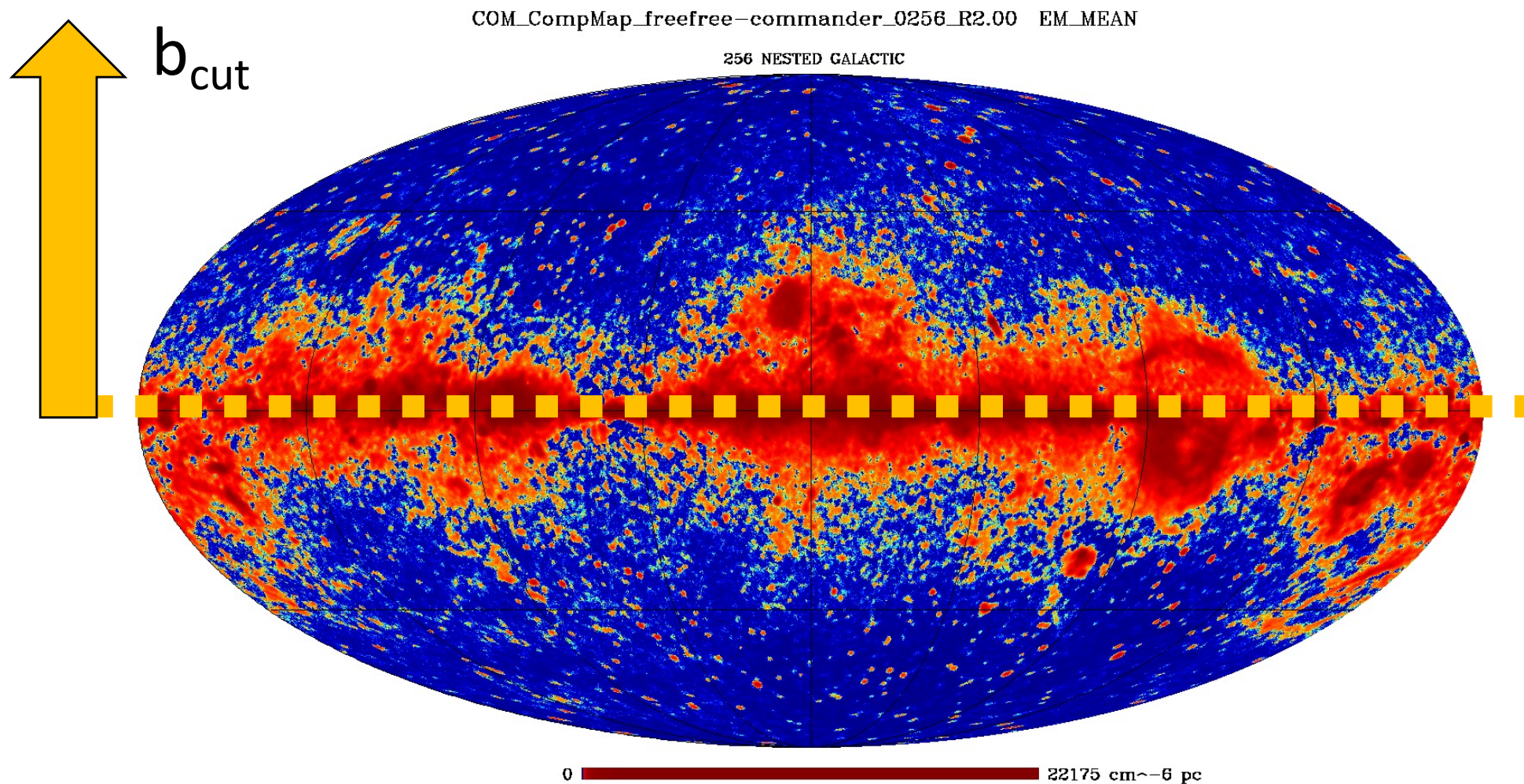
256 NESTED GALACTIC



0 22175 cm⁻⁶ pc

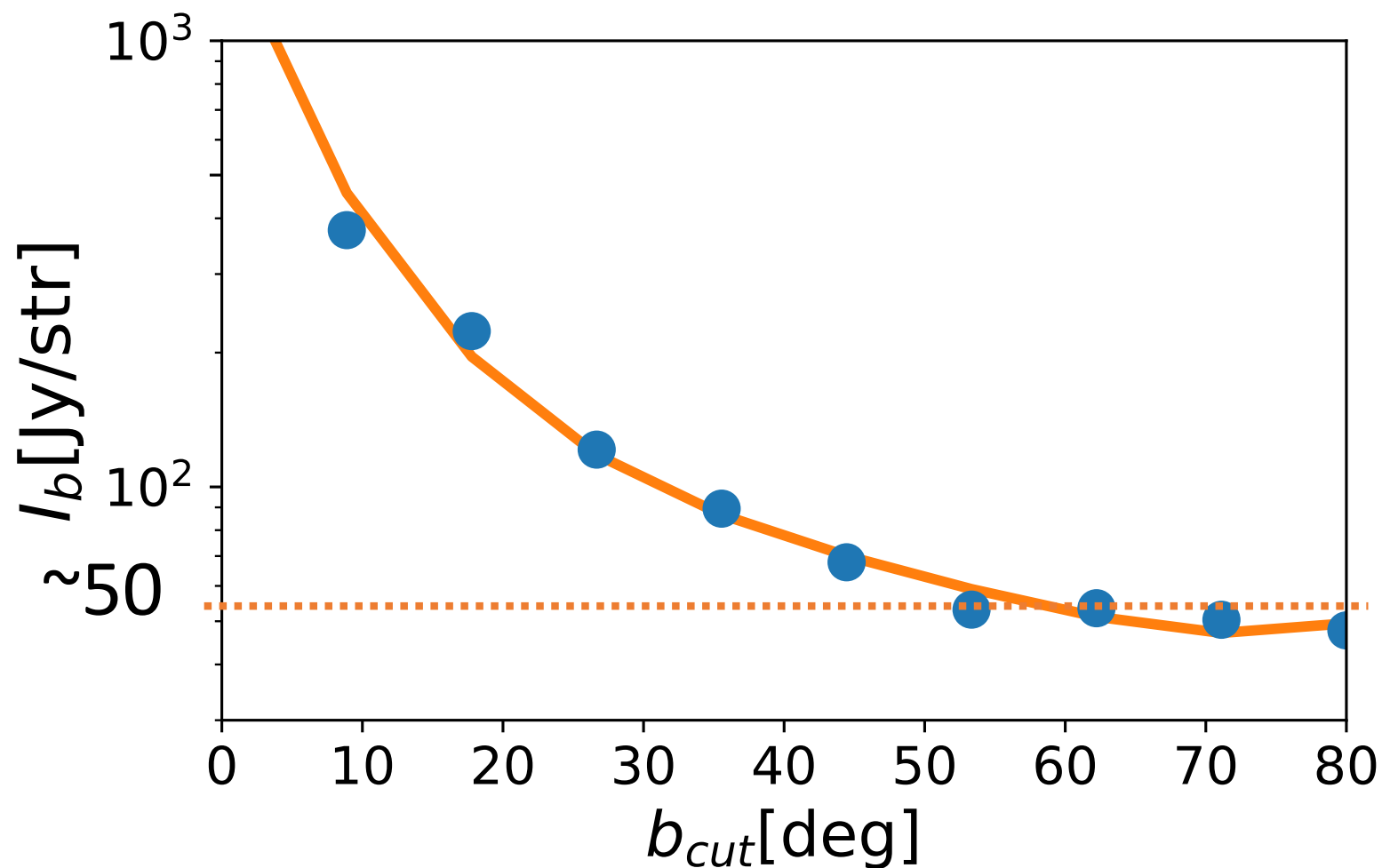
熱的制動放射による全天の電波強度

Planck 観測との比較

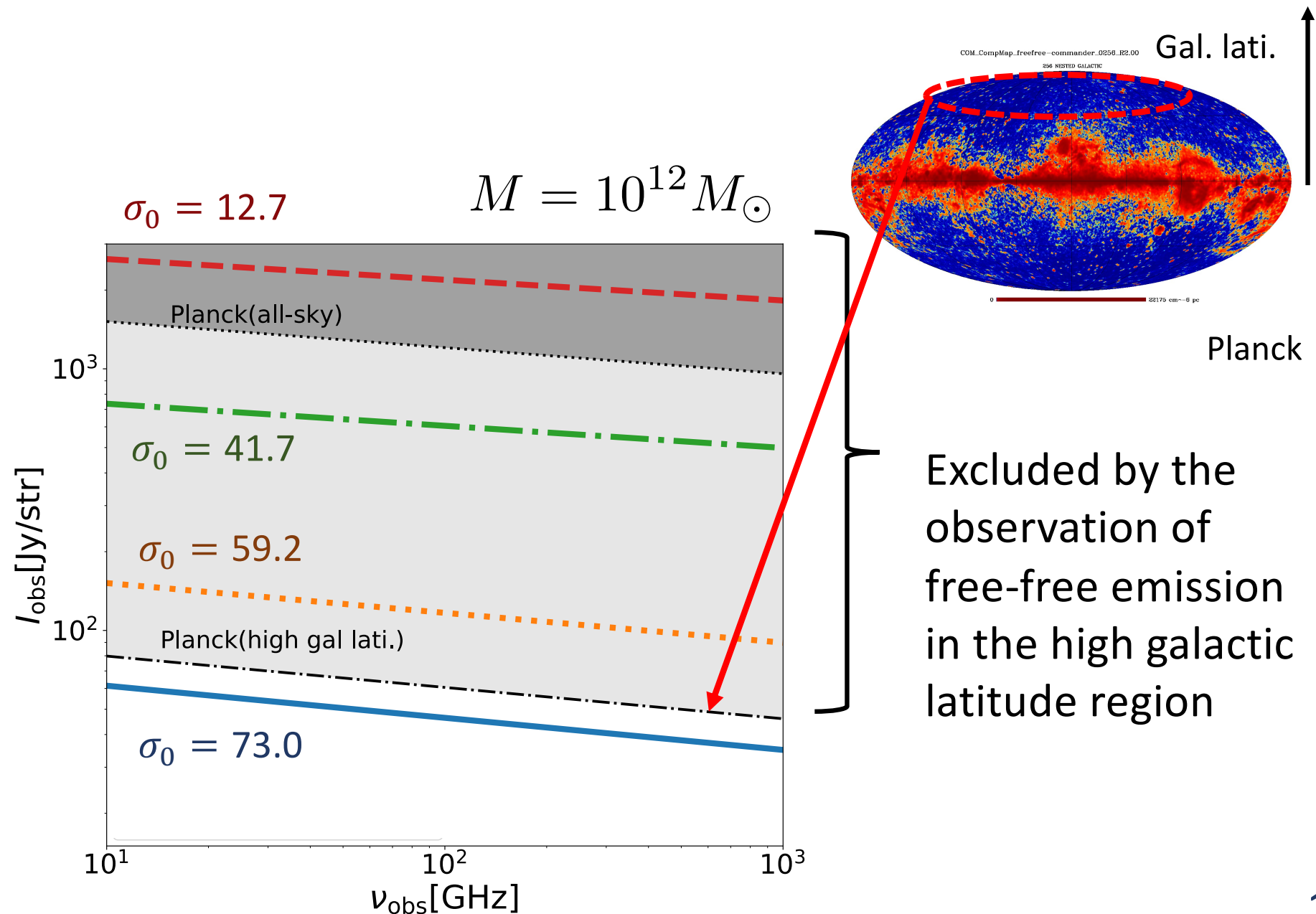


熱的制動放射による全天の電波強度

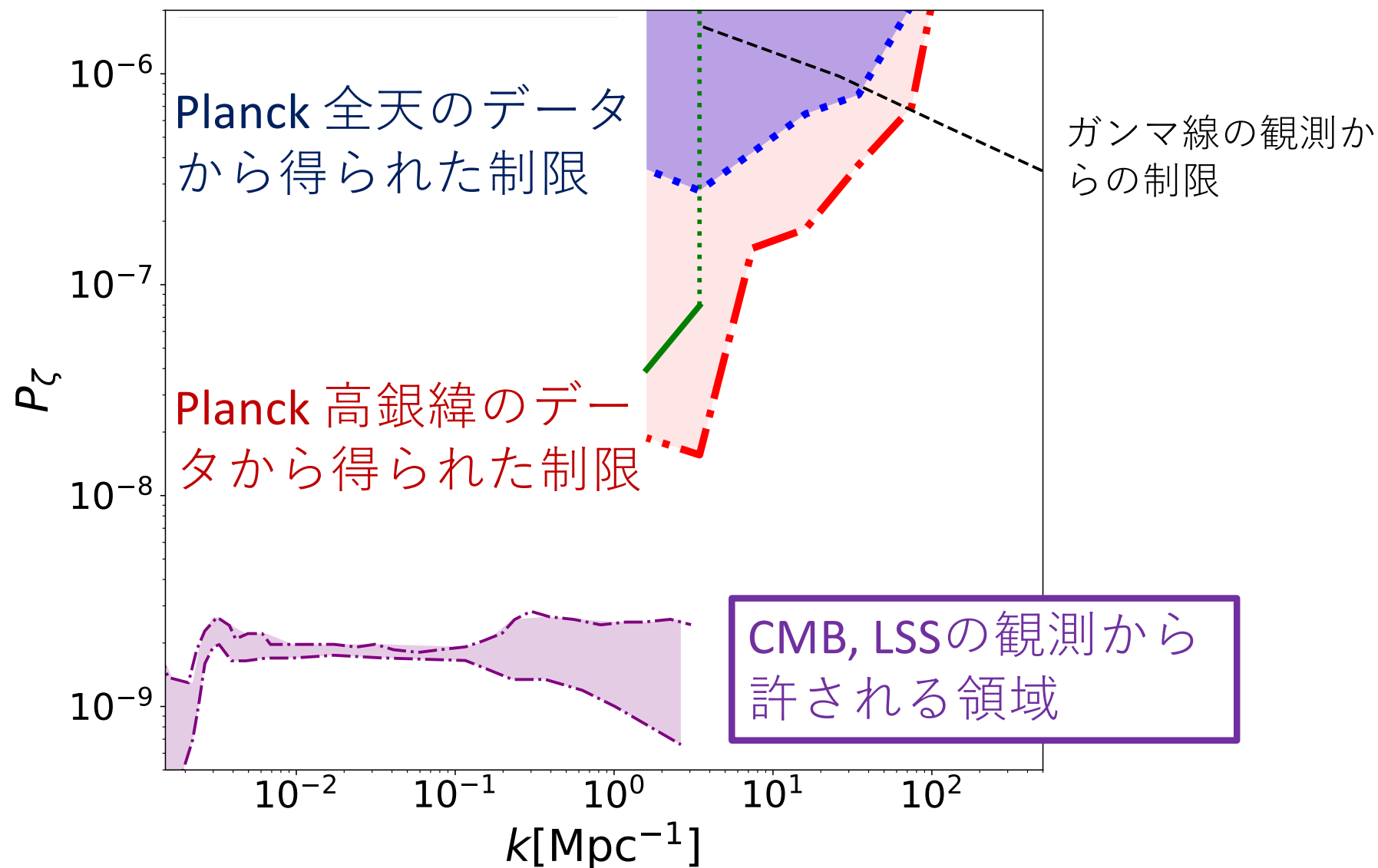
Planck 観測との比較



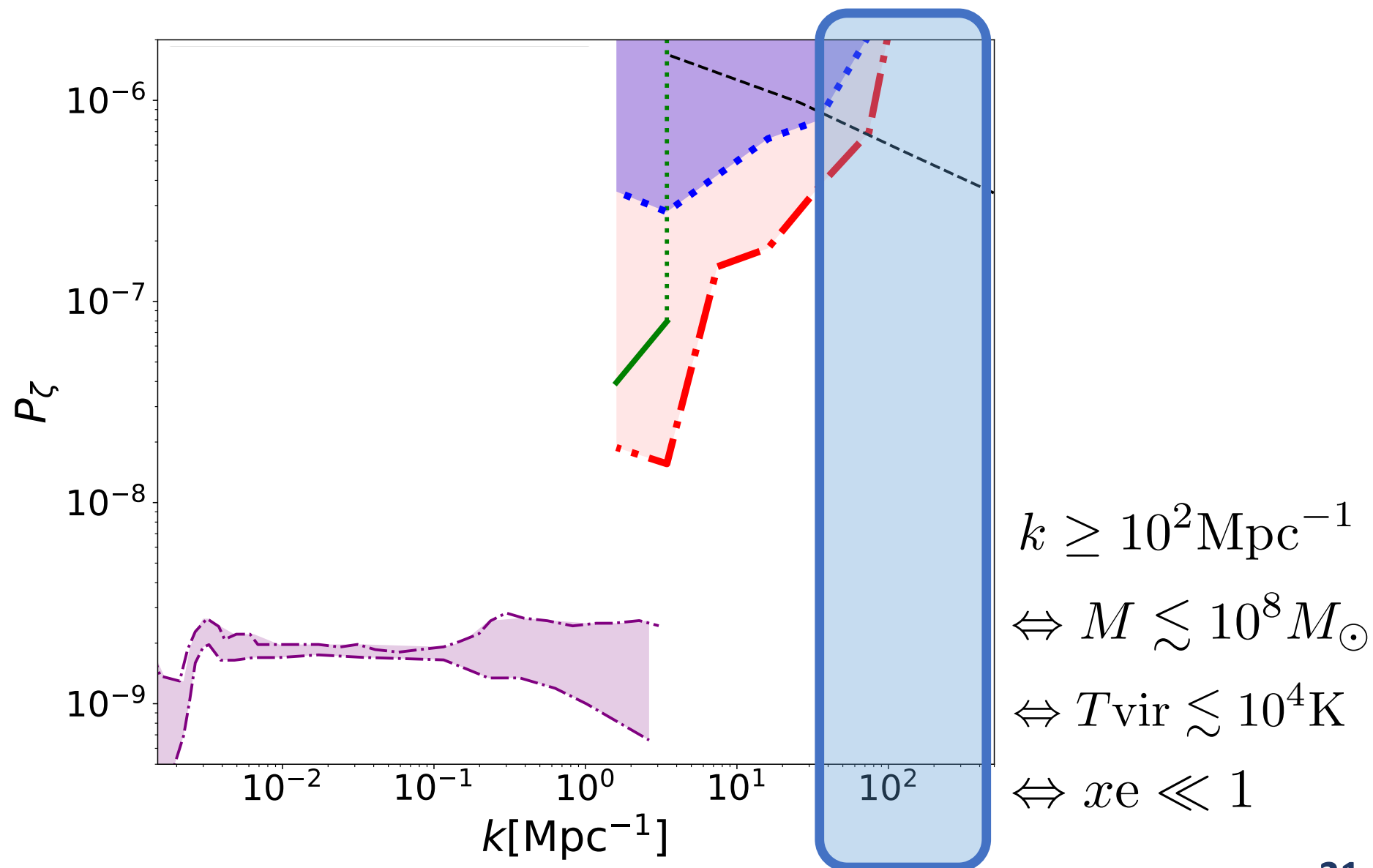
Planckの高銀緯データを用いた制限



原始曲率揺らぎの制限



原始曲率揺らぎの制限



制限のrobustness

- Λ CDMモデルと大きく異なる初期条件(小スケールでのenhancement)を仮定したときに、Press-Schechterの方法が妥当かは非自明
- ただし、BBKSのpeak theoryを使った場合はより多くhaloができ、signalが(数倍)大きくなる
- バリオンガスのdensity profileについての不定性
- 星形成などのより複雑なbaryon physicsを考慮すると大きく変わるはず。。

Summary

- 原始曲率揺らぎから作られるハロー内部のガスから放射される制動放射の強度を見積もった。
- Planck の前景放射の観測 (diffuse component analysis) から、原始曲率揺らぎに新たな制限を与えた。

$$P_{\zeta} \lesssim 10^{-8} \quad \text{at} \quad k \sim 1 \text{ Mpc}^{-1}$$

$$P_{\zeta} \lesssim 10^{-7} \quad \text{at} \quad k \sim 10 \text{ Mpc}^{-1}$$