



21cm線グローバルシグナルから得られる原始磁場の情報

箕田鉄兵、田代寛之(名古屋大学 理学研究科)、高橋智 (佐賀大学)

第7回観測的宇宙論ワークショップ@山口大学吉田キャンパス

目次

1. イントロ

- ・ 原始磁場について + 観測的制限

2. 研究目的・内容

- ・ 原始磁場のエネルギー散逸
- ・ 21cm線グローバルシグナル

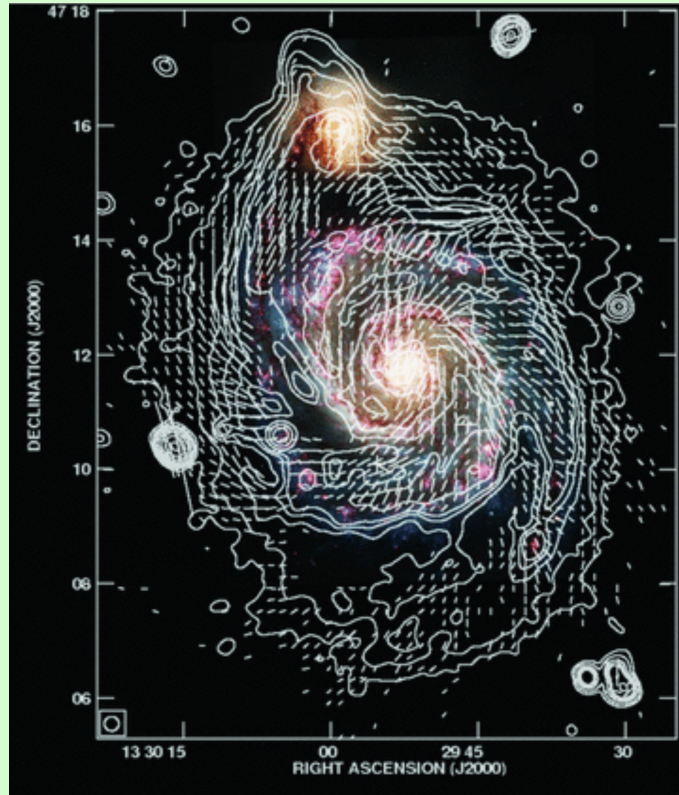
3. 計算手法

4. 計算結果

- ・ 密度・温度の宇宙論的進化
- ・ CMBの温度ゆらぎの予言

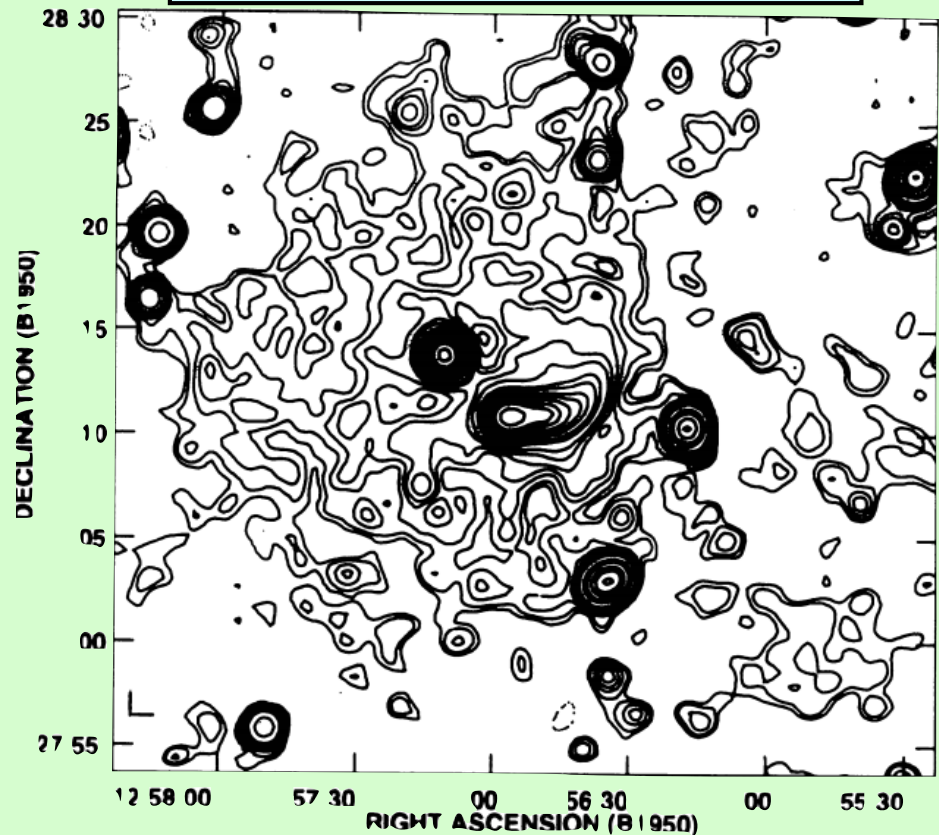
宇宙における磁場の存在

銀河磁場 $\sim 10^{-5}$ G



M51 銀河 [可視光・電波偏光]
VLA/Effelsberg 20cm, HST
(Fletcher+, 2011, MNRAS, 412)

銀河団磁場 $\sim 10^{-6}$ G



かみのけ座銀河団 [電波] WSRT, 90cm
(Giovannini+, 1993, ApJ, 406)

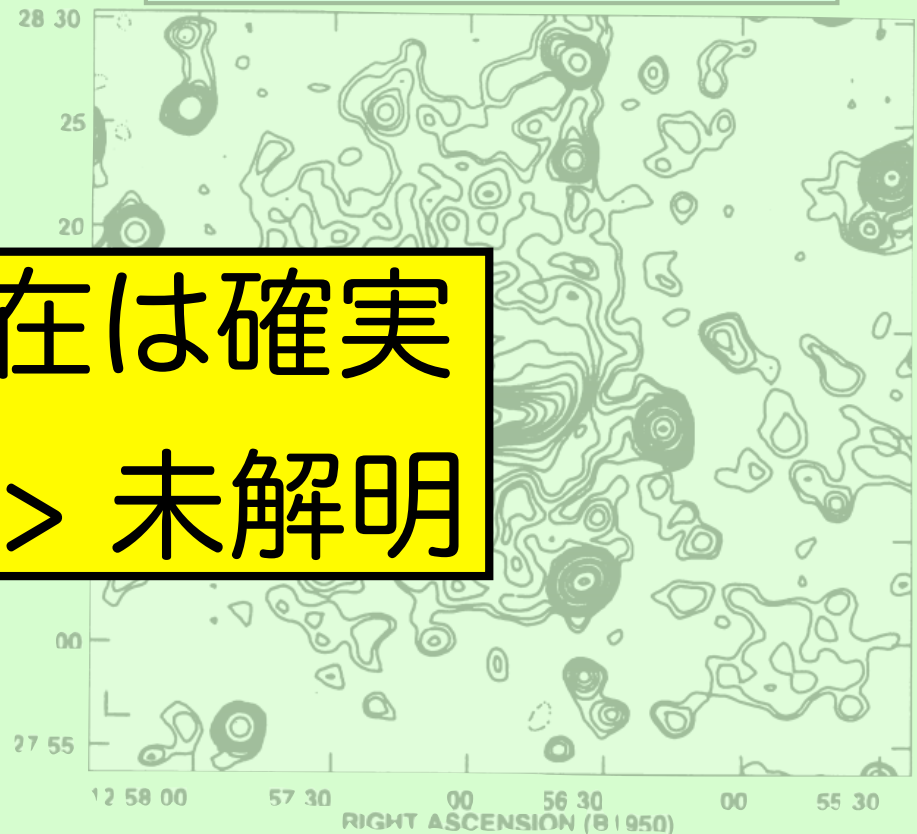
宇宙における磁場の存在

銀河磁場 $\sim 10^{-5}$ G



M51 銀河 [可視光・電波偏光]
VLA/Effelsberg 20cm, HST
(Fletcher+, 2011, MNRAS, 412)

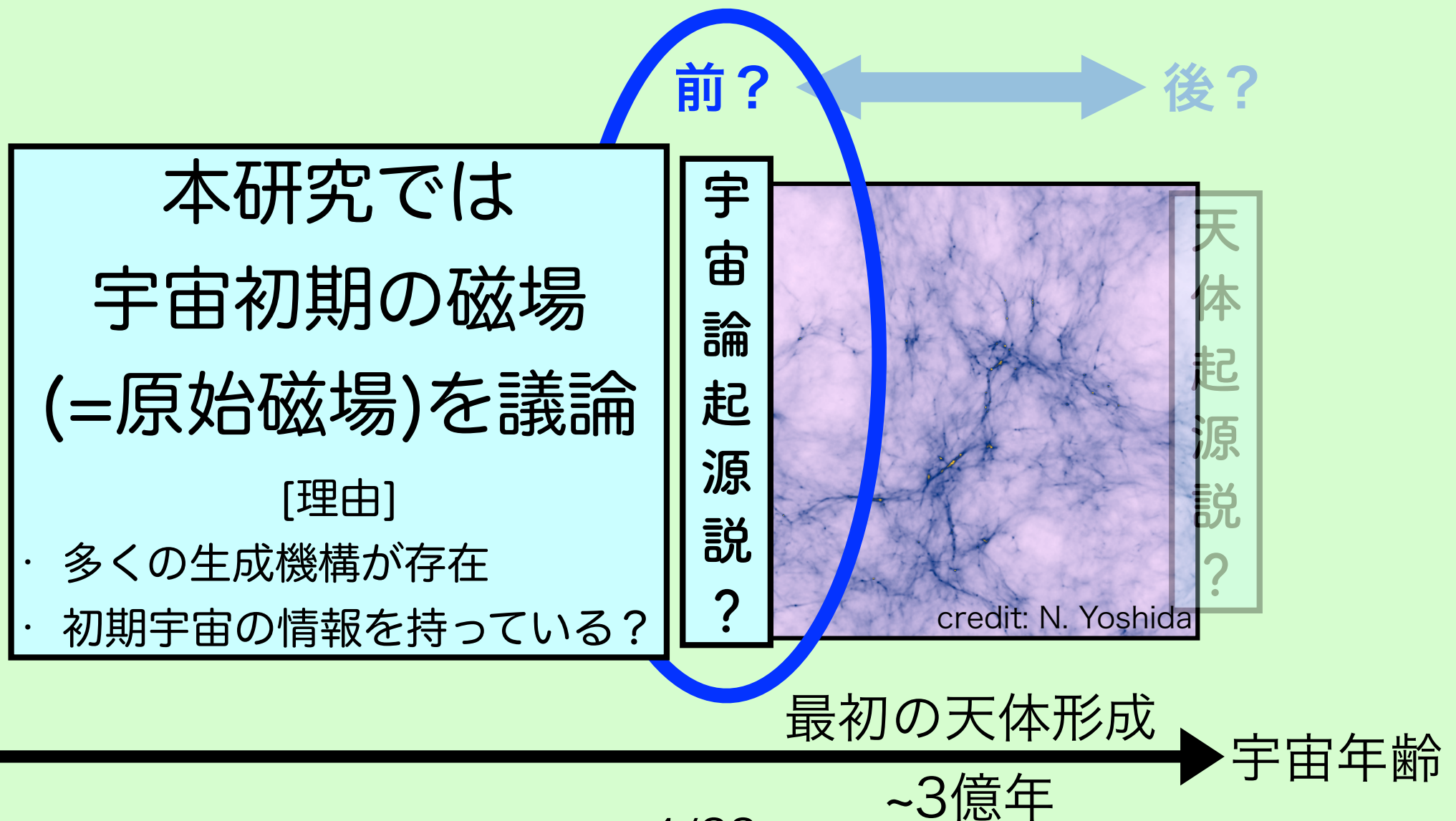
銀河団磁場 $\sim 10^{-6}$ G



かみのけ座銀河団 [電波] WSRT, 90cm
(Giovannini+, 1993, ApJ, 406)

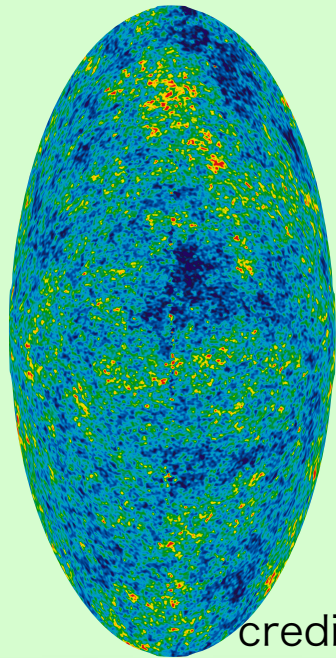
磁場の存在は確実
起源は？ > 未解明

磁場の起源



原始磁場の観測的制限

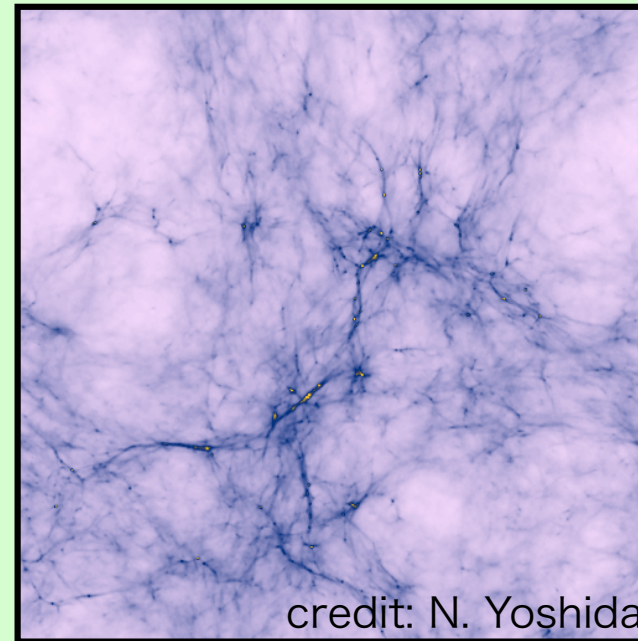
CMB(宇宙マイクロ波背景放射)
による原始磁場の制限



credit: Planck

$$B_1 \text{ Mpc} \lesssim 4 \text{ nG}$$

~38万年



credit: N. Yoshida

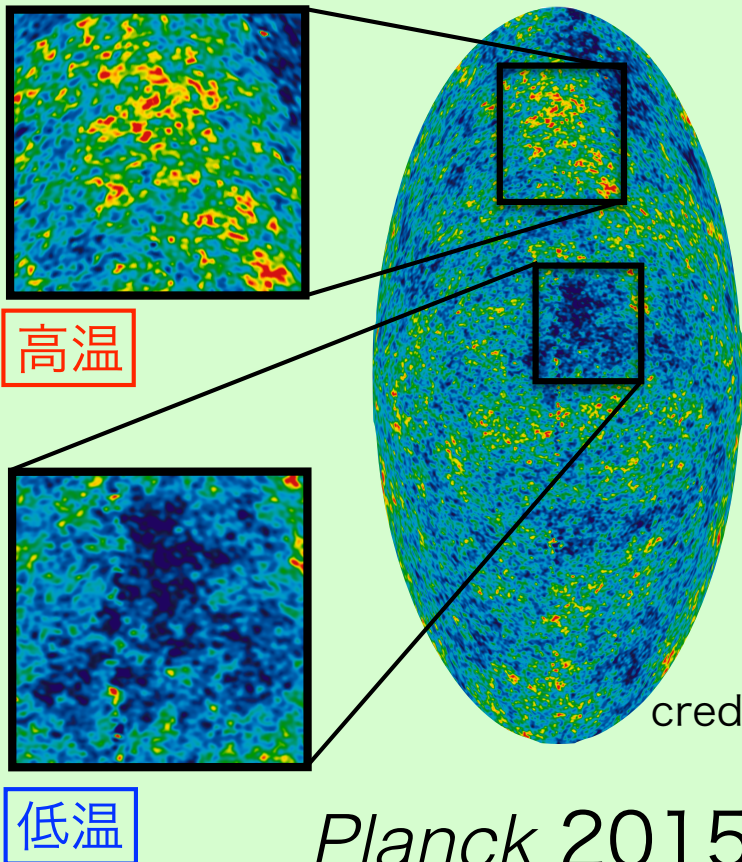
最初の日体形成

~3億年

宇宙年齢

原始磁場の観測的制限

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)



T~2.725 Kのほぼ一様な放射
実際にはわずかにゆらぎが存在
→ 初期宇宙の空間(エネルギー)
にゆらぎ？

磁場のエネルギーのゆらぎに制限



Planck 2015による制限

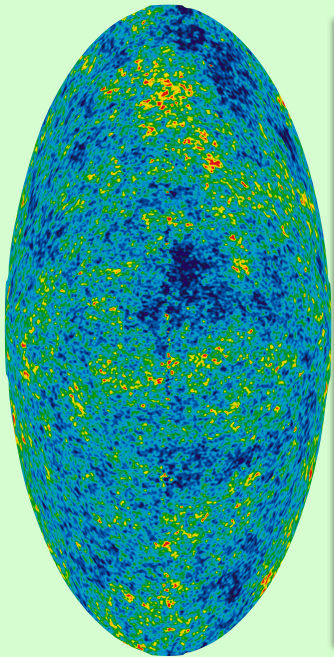
$$B_{1 \text{ Mpc}} \lesssim 4 \text{ nG}$$

(Planck Collaboration, 2016, A&A, 594)

研究目的・内容

$$B_1 \text{ Mpc} \lesssim 4 \text{ nG}$$

晴れ上がり後の宇宙にも影響を与える？



credit: *Planck*

暗黒時代

最初の日体形成

credit: N. Yoshida

現在

credit: SDSS

宇宙の晴れ上がり

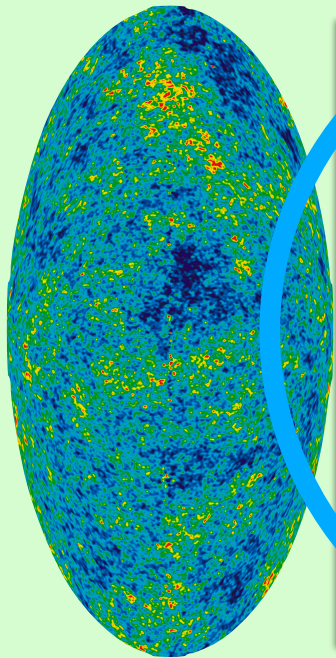
~38万年

宇宙年齢

研究目的・内容

$$B_1 \text{ Mpc} \lesssim 4 \text{ nG}$$

晴れ上がり後の宇宙にも影響を与える？



credit: Planck

- ・ 原始磁場のエネルギー散逸
- ・ 暗黒時代のIGMの熱史
- ・ 21cm線グローバルシグナル

暗黒時代

最初の日体形成

現在

credit: N. Yoshida

credit: SDSS

宇宙の晴れ上がり

~38万年

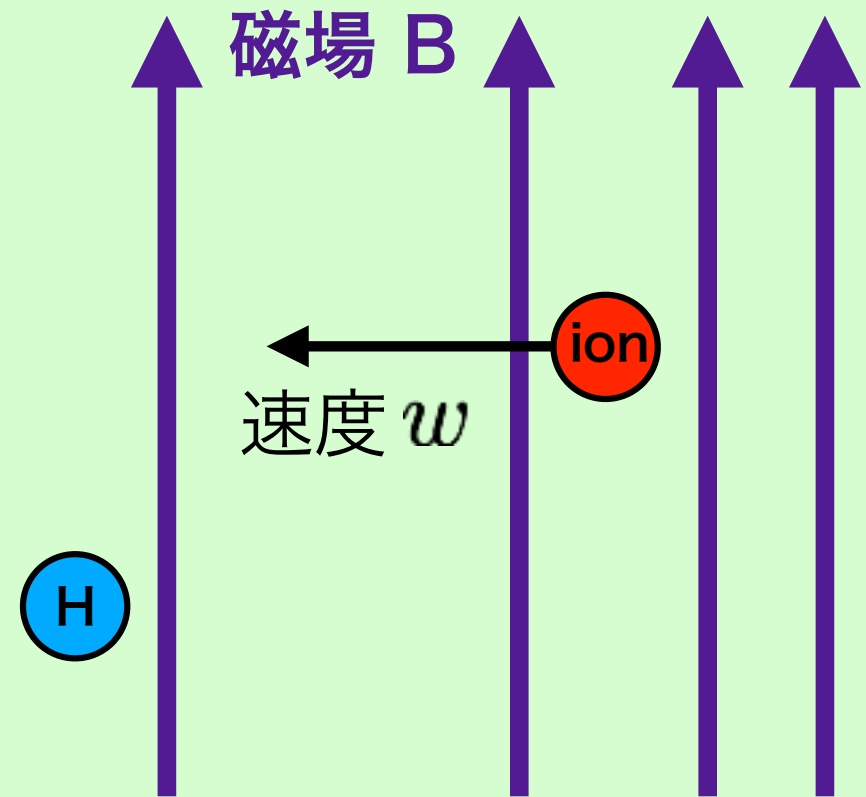
宇宙年齢

磁場のエネルギー散逸

先行研究 (Sethi & Subramanian, 2005, MNRAS, 356)

[先行研究の概要]

- 原始磁場はエネルギー散逸によりIGMガスを加熱する
- 双極性散逸(中性粒子と荷電粒子の衝突による散逸)
- 乱流減衰(乱流によって小スケールの渦=磁場が散逸)



双極性散逸の概念図

磁場のエネルギー散逸

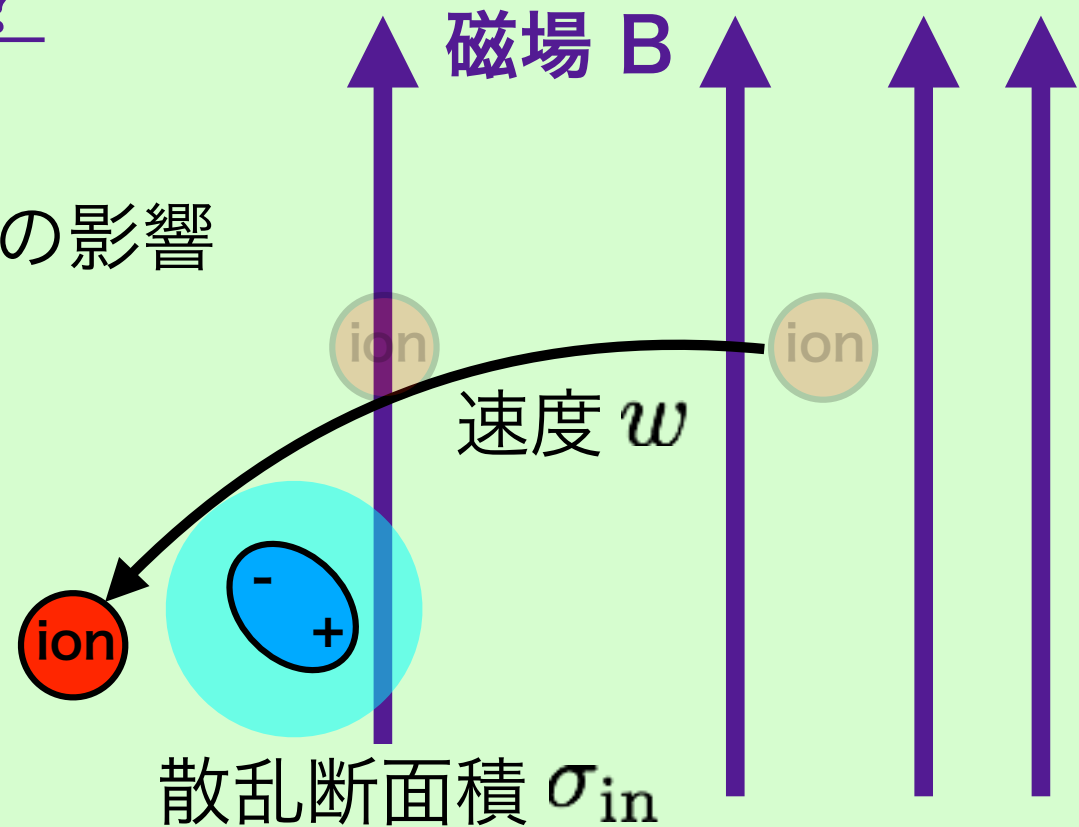
先行研究 (Sethi & Subramanian, 2005, MNRAS, 356)

双極性散逸とは？

中性粒子 流体の運動のみ

荷電粒子 流体の運動+磁場の影響

- > 相対速度が発生
- > 接近すると中性粒子に
電気双極子モーメント
を誘発
- > 散乱して磁場による運動が熱化



双極性散逸の概念図

磁場のエネルギー散逸

先行研究 (Sethi & Subramanian, 2005, MNRAS, 356)

双極性散逸による加熱率

$$\Gamma = \frac{|(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}|^2 (1 - x_i)}{16\pi^2 \xi \rho_b^2 x_i}$$

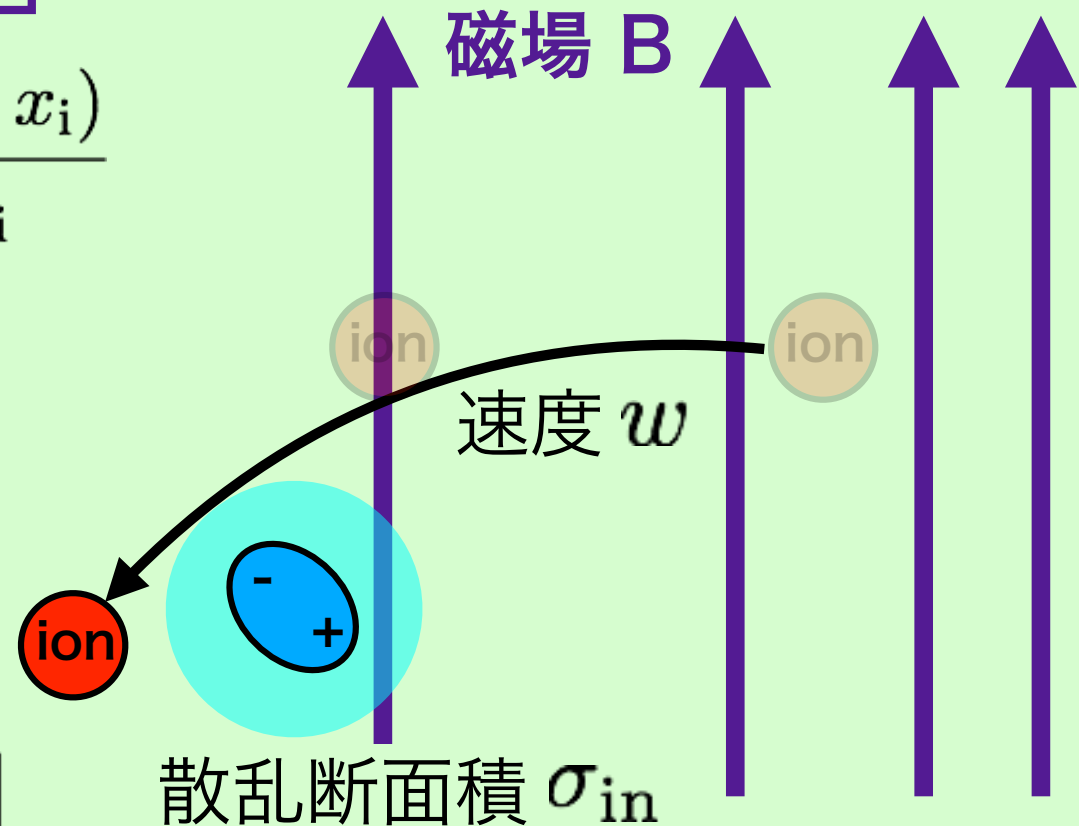
ρ_b : バリオン質量密度

x_i : 水素原子の電離度

$$\text{衝突率} \quad \xi = \frac{\langle w \sigma_{in} \rangle}{m_i + m_n}$$

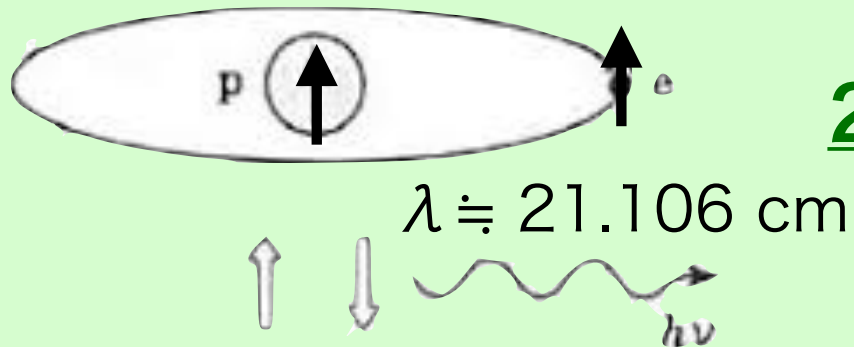
$$\simeq 3.5 \times 10^{13} \text{ [cm}^3/\text{g/s]}$$

(Draine+, 1983, ApJ, 270)



双極性散逸の概念図

21cm線グローバルシグナル



21cm線とは、中性水素原子HIの超微細構造に起因する電磁波

[特徴]

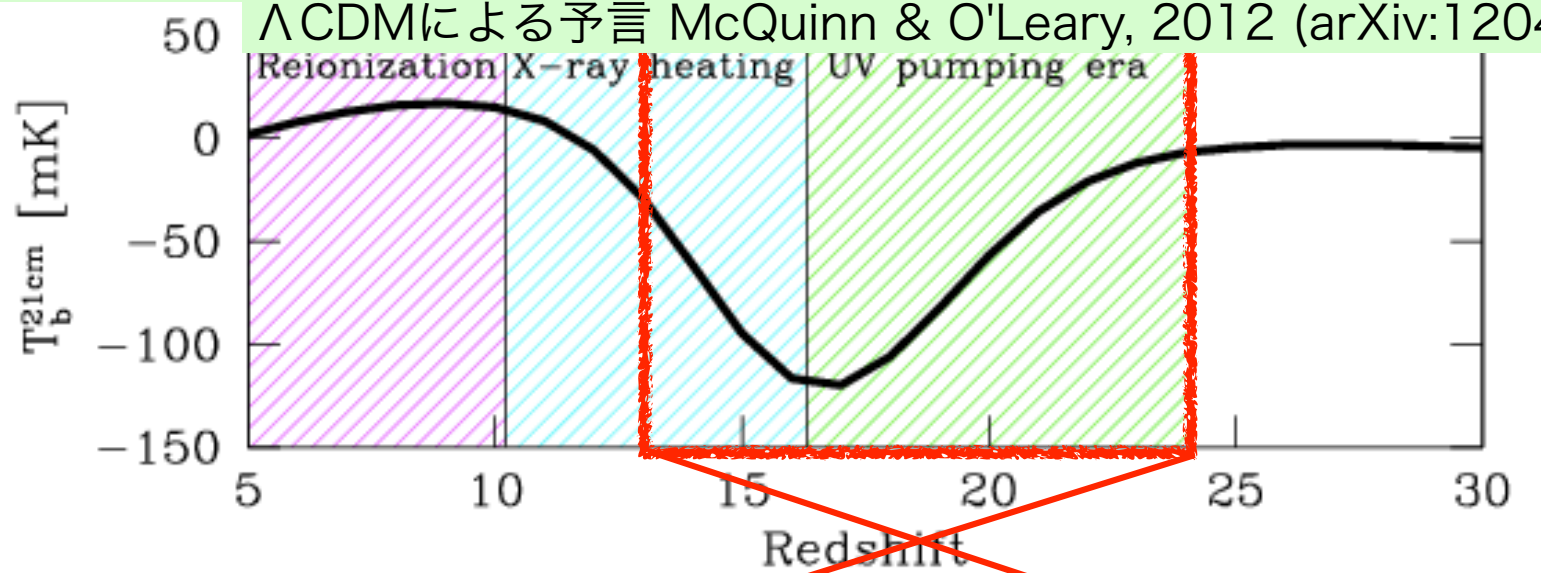
1. 水素の電離度、温度、密度を反映 (=IGMの熱史、小スケールの構造形成がわかる)

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} \exp \left(-\frac{E_{10}}{k_B T_{\text{spin}}} \right)$$

$$\delta T_b(z) \simeq 27 x_{\text{HI}}(z) \left[1 - \frac{T_\gamma(z)}{T_{\text{spin}}(z)} \right] \times \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.02} \right) \left(\frac{0.15}{\Omega_m h^2} \right)^{1/2} \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} [\text{mK}]$$

21cm線グローバルシグナル

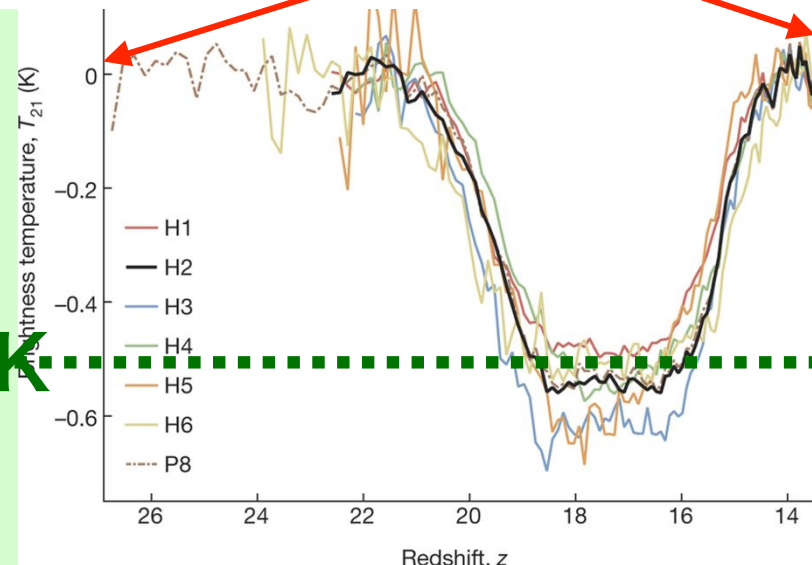
Λ CDMによる予言 McQuinn & O'Leary, 2012 (arXiv:1204.1345)



EDGESの観測

Bowman et al.
2018, Nature
555, 67

$T_b = -500$ mK



- redshift ~ 17
 - > 理論と観測が一致
 - 吸収線の深さ
 - > 2-3倍以上のズレ
- 追検証に期待。
今回は前者に注目！

21cm線グローバルシグナル

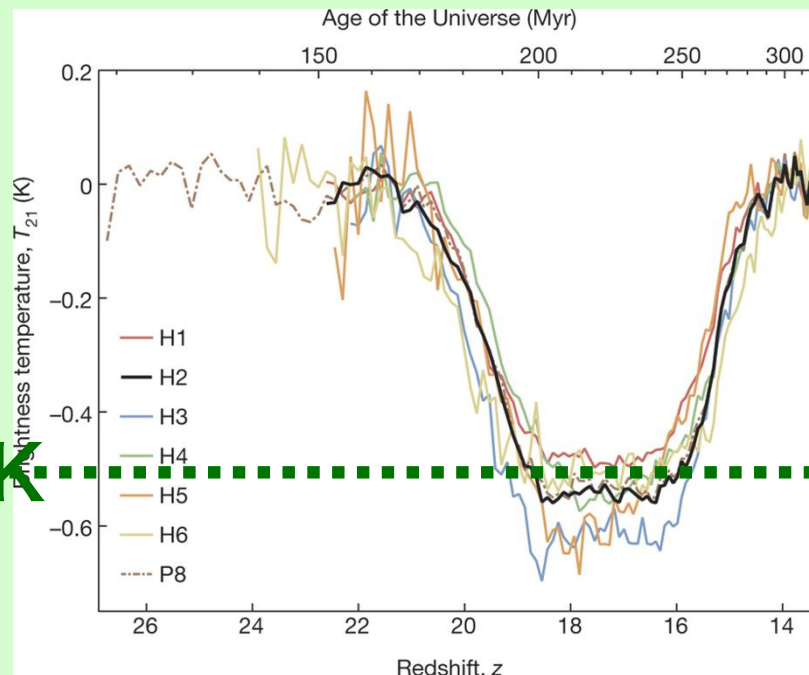
$$\delta T_b(z) \simeq 27 x_{\text{HI}}(z) \left[1 - \frac{T_\gamma(z)}{T_{\text{spin}}(z)} \right] \times \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.02} \right) \left(\frac{0.15}{\Omega_m h^2} \right)^{1/2} \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} [\text{mK}]$$

$T_{\text{spin}} < T_\gamma \Rightarrow T_{\text{gas}} < T_\gamma$ が吸収線を出すために必要！

EDGESの観測

Bowman et al.
2018, Nature
555, 67

$T_b = -500 \text{ mK}$



- redshift ~ 17
> 理論と観測が一致
- 吸収線の深さ
> 2-3倍以上のズレ
追検証に期待。
今回は前者に注目！

原始磁場のモデル

二点相関

パワースペクトル

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

$$P_B(k) = \begin{cases} A_B k^{n_B} & (k < k_c) \\ 0 & (k \geq k_c) \end{cases} \quad A_B = \frac{(2\pi)^{n_B+5}}{\Gamma\left(\frac{n_B+3}{2}\right)} k_n^{-(n_B+3)} B_n^2$$

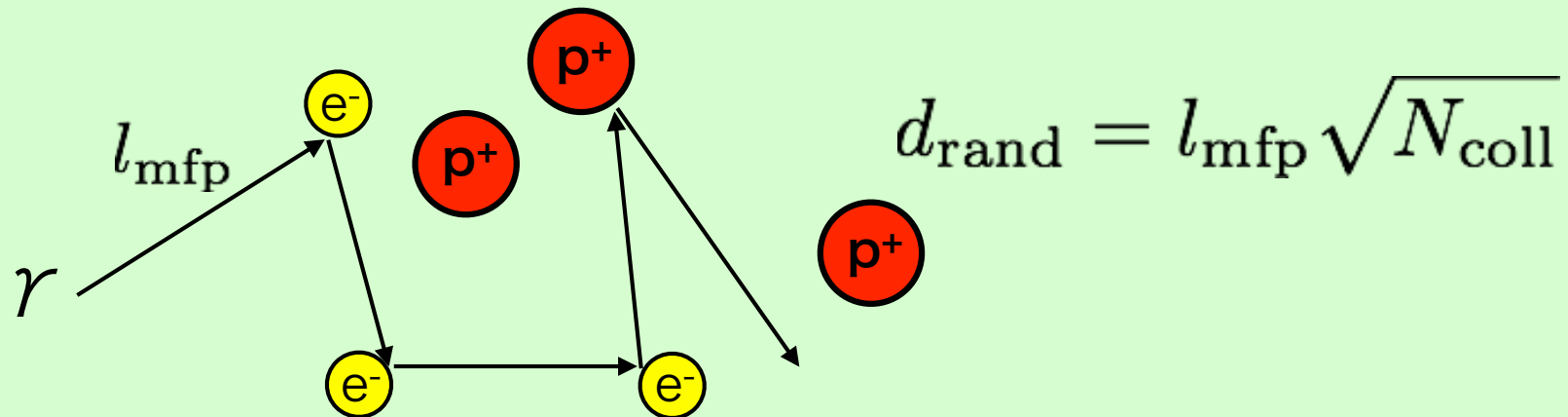
原始磁場のカットオフスケール

$$B_\lambda^2 = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{k_\lambda} k^2 dk P_B(k) = B_n^2 \left(\frac{k_\lambda}{k_n} \right)^{n_B+3}$$

2つのパラメータ
で磁場のモデル
が決定

原始磁場のモデル

バリオンのゆらぎが光子との衝突でならされる：Silk 減衰
特徴的なスケール：光子のランダムウォーク長



原始磁場も光子との散乱でエネルギーを失うはず

$$k_c^{-2} = V_A^2 \frac{d_{\text{rand}}^2}{c^2} = \frac{B_{\lambda_c}^2(t_r)}{4\pi\rho_\gamma(t_r)} \int_0^{t_r} \frac{l_\gamma(t')}{a^2(t')} dt'$$

(Jedamzik+, 1998, PRD, 57)

計算手法

ガス温度の時間進化

$$\frac{dT_{\text{gas}}}{dt} = -2H(t)T_{\text{gas}}$$

宇宙膨張による断熱冷却

$$+ \frac{x_i}{1+x_i} \frac{8\rho_\gamma\sigma_T}{3m_e c} (T_\gamma - T_{\text{gas}})$$

CMBとのコンプトン散乱

$$+ \frac{\Gamma(t)}{1.5k_B n_b}$$

原始磁場の散逸による加熱

T_{gas} : バリオンガスの温度

ρ_γ : CMBのエネルギー密度

T_γ : CMBの温度

σ_T : トムソン散乱の断面積

H : ハッブルパラメータ

計算手法

双極性散逸 $\Gamma_{AD} = \frac{|(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}|^2}{16\pi^2 \xi \rho_b^2} \frac{1 - x_e}{x_e}$

乱流減衰 $\Gamma_{DT} = \frac{3w_B}{2} H \frac{|\mathbf{B}|^2}{8\pi} a^4 \frac{[\ln(1 + t_d/t_{rec})]^{w_B}}{[\ln(1 + t_d/t_{rec}) + \ln(t/t_{rec})]^{1+w_B}}$

$$\begin{aligned} |(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}|^2 &= \int \left(\frac{dk_1}{2\pi} \right)^3 \int \left(\frac{dk_2}{2\pi} \right)^3 k_1^2 P_B(k_1) P_B(k_2) (1+z)^{10} f^2(t) \\ &= \frac{A_B^2 k_{cut}^{2(n_B+4)}}{4\pi^4 (n_B+3)(n_B+5)} (1+z)^{10} f^2(t) \end{aligned}$$

$$\frac{|\mathbf{B}|^2}{8\pi} = \frac{\int \left(\frac{dk}{2\pi} \right)^3 P_B(k)}{8\pi} (1+z)^4 f(t) = \frac{1}{16\pi^3} A_B \frac{k_{cut}^{n_B+3}}{n_B+3} (1+z)^4 f(t)$$

計算手法

ガス電離度の時間進化

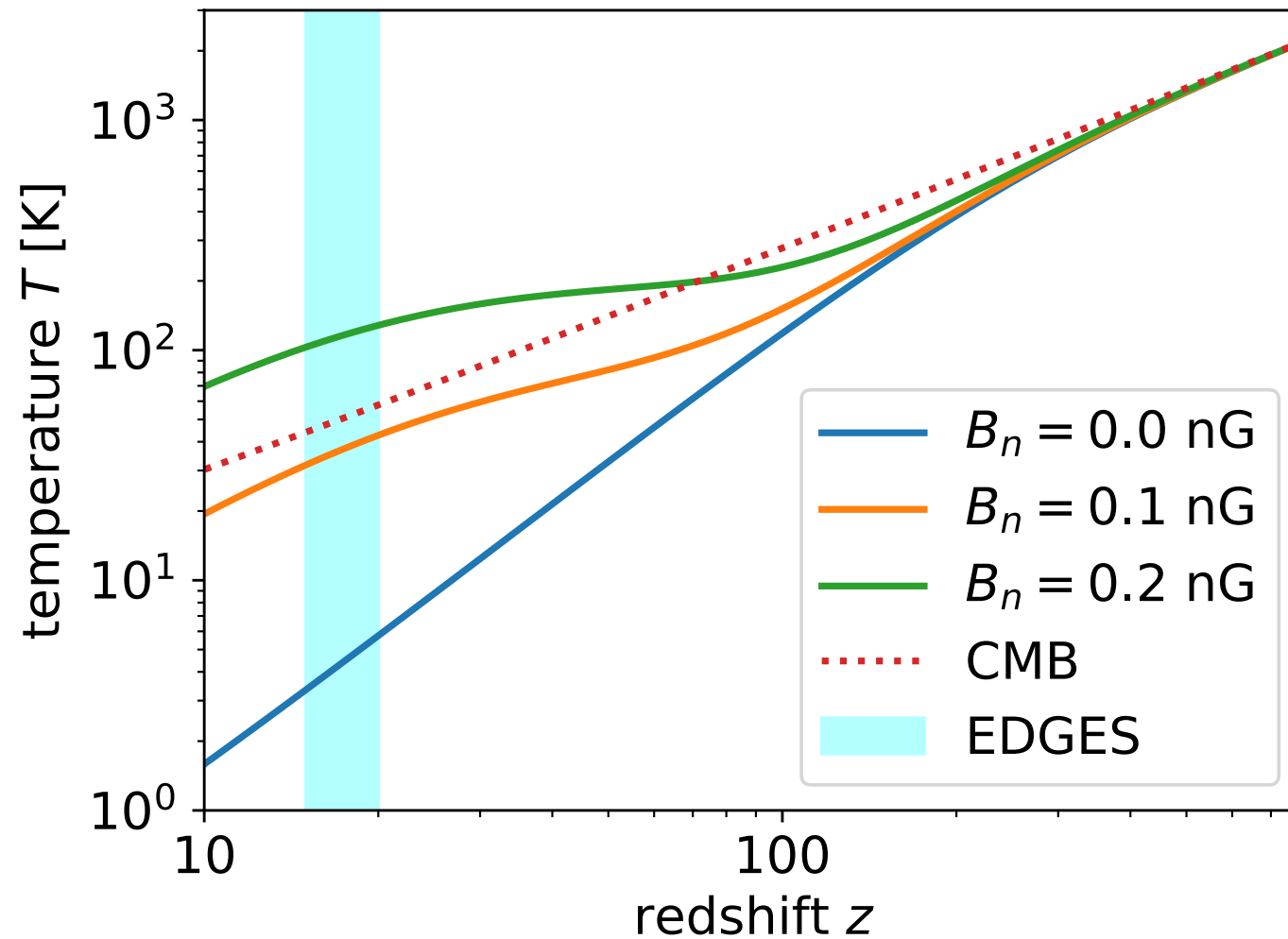
$$\frac{dx_i}{dt} = \left[\underbrace{-\alpha_e n_b x_i^2}_{\text{再結合}} + \underbrace{\beta_e (1 - x_i) \exp\left(-\frac{E_{12}}{k_B T_\gamma}\right)}_{\text{CMBによる光電離}} \right] D + \underbrace{\gamma_e n_b (1 - x_i) x_i}_{\text{衝突電離}}$$

磁場のエネルギー進化

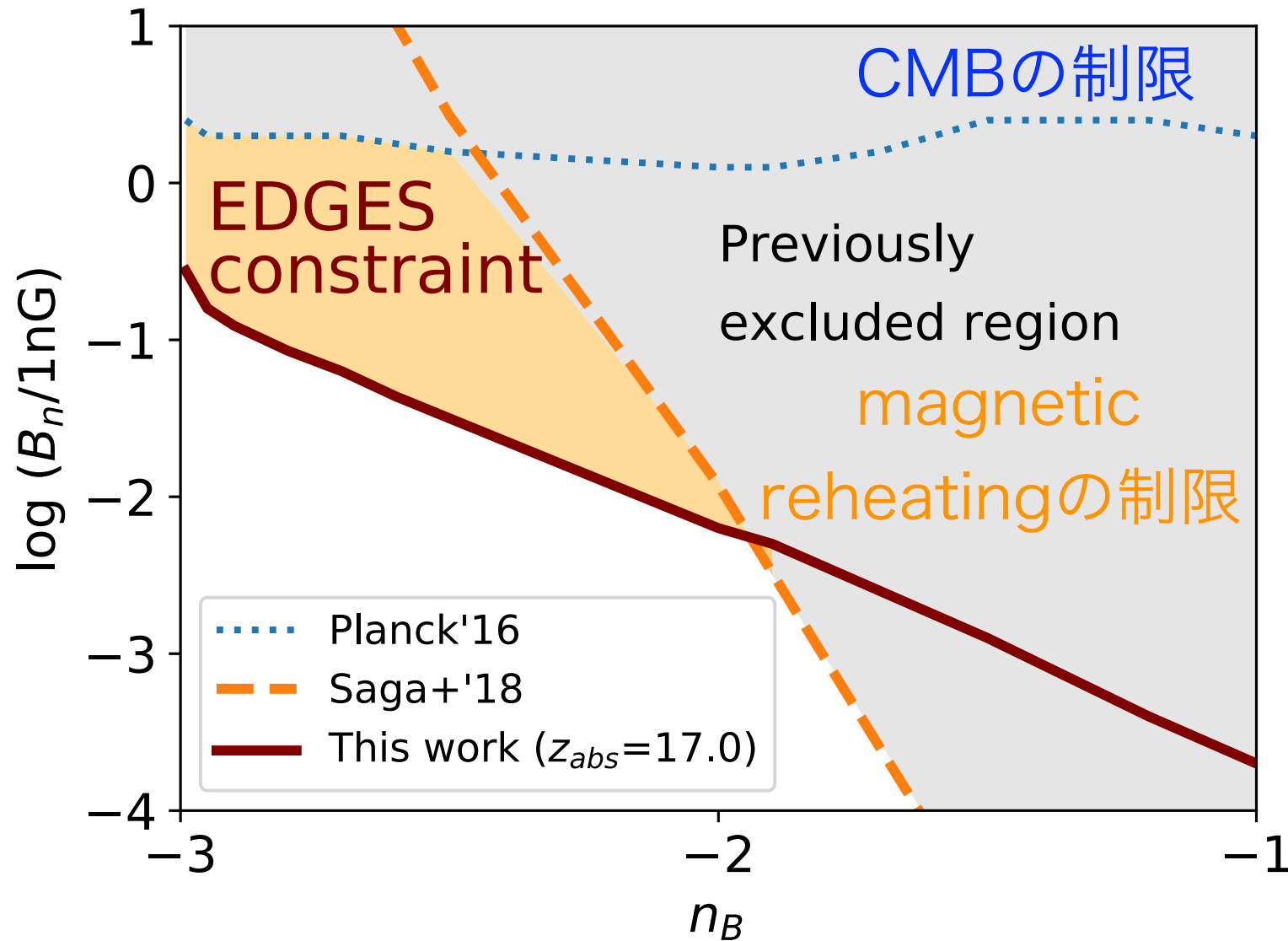
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{|\mathbf{B}|^2}{8\pi} \right) = -4H \frac{|\mathbf{B}|^2}{8\pi} - \Gamma_{\text{AD}} - \Gamma_{\text{DT}}$$

計算結果

IGM温度の宇宙論的進化($n_B = -2.9$)



計算結果



本研究のまとめ

- ・ 磁場の起源の候補として原始磁場に着目した
- ・ $B_{1\text{Mpc}} < 1\text{nG}$ の原始磁場が暗黒時代のIGMの熱史に与える影響を調べた
- ・ バリオンガスの電離度と温度を矛盾なく計算して、ガス温度とCMB温度の時間進化を比較した
- ・ $z \sim 17$ での吸収線が出るための条件から、原始磁場に対するこれまでで最も強い制限を得た