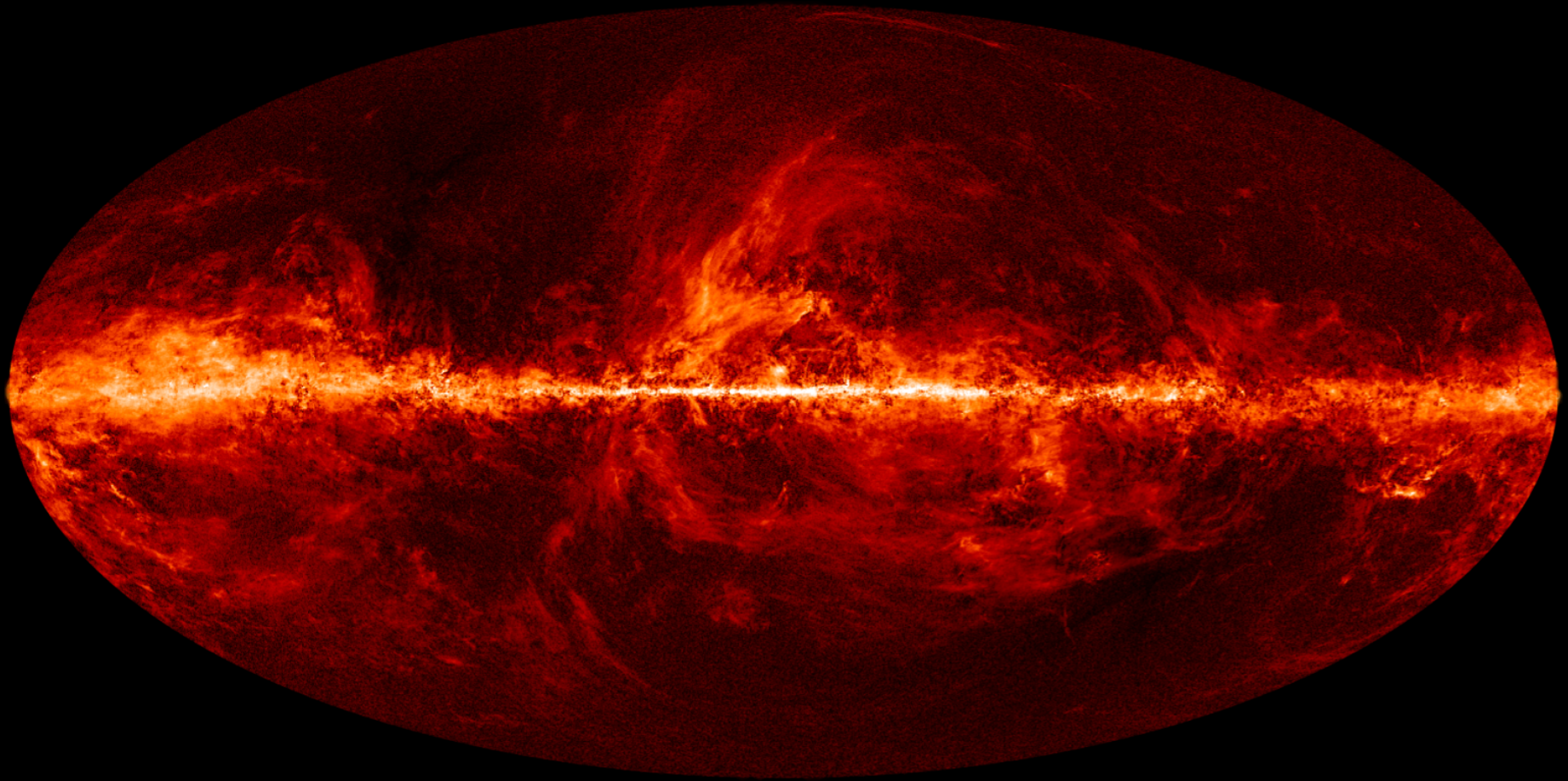


高赤方偏移宇宙における 磁場の観測的制限



(観測的)宇宙論の研究対象

●宇宙は何でできているのか？

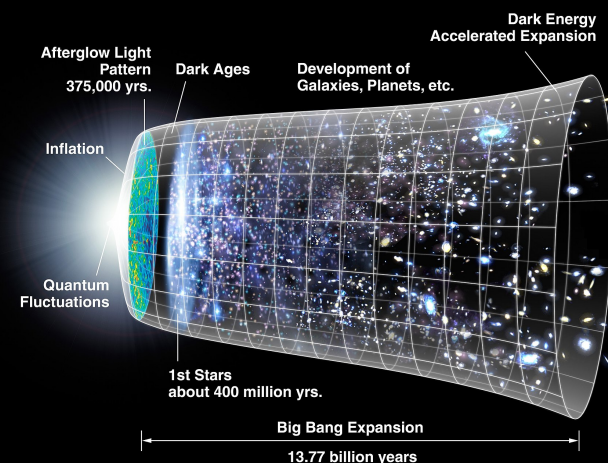
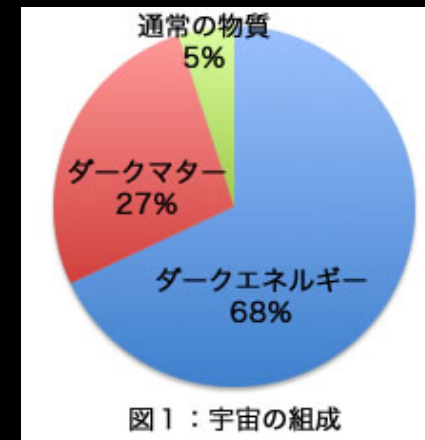
- ・ ダークマター、ダークエネルギーの正体は？

●どのように誕生したのか？

- ・ インフレーション、再加熱の機構？

●どのように進化してきたのか？

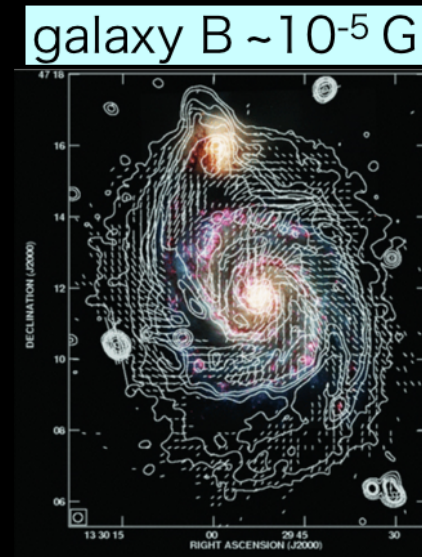
- ・ 階層的構造形成、 Λ CDM モデルで OK？
- ・ 多くの天体が磁場を伴う => 時間進化？



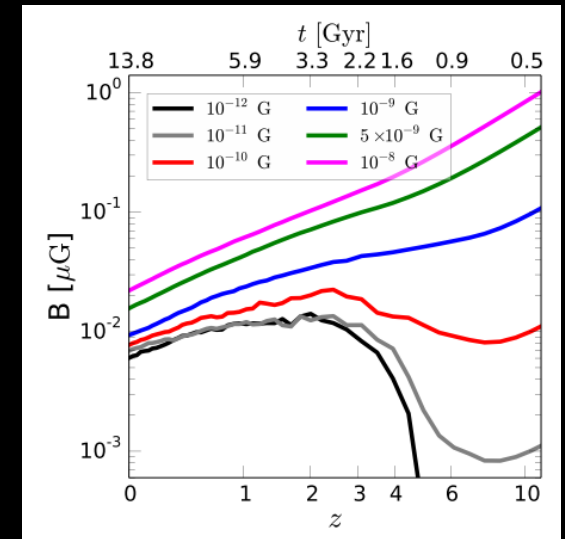
銀河・銀河団における磁場

●観測的

- 多くの観測的証拠が存在
- 磁場の強度も(比較的)明らか
(銀河 $\sim 10^{-5}$ G, 銀河団 $\sim 10^{-6}$ G)



M51 銀河



宇宙論的MHD計算による磁場の時間進化

●理論的

- 銀河や銀河団の形成過程がMHDシミュレーションによって計算
- 銀河形成の初期段階に $\sim 10^{-12}$ G の磁場 $\Rightarrow$ ダイナモによって増幅

低密度領域・初期宇宙の磁場

●観測的

- ボイド領域の磁場の観測 $\sim 10^{-15}$ - 10^{-20} G
- 天体物理学的過程 (ビアマンバッテリーなど) では生成が困難？

●理論的

- 初期宇宙での磁場生成が鍵となる(=原始磁場)
- 生成機構の理論モデルが数多く提唱

原始磁場の生成機構

様々なモデルと生成される磁場の強度

- インフレーション $\sim 10^{-15}$ G (scale-invariant, helical)
- 宇宙の相転移 $\sim 10^{-9}$ G on 50 kpc or 10^{-10} G on 0.3 kpc,
- 位相欠陥 $\sim 10^{-17}$ G on 6 Mpc
- ハリソン機構 $\sim 5 \times 10^{-24}$ G on 20 Mpc

- ✓ いずれも強度は小さいが、銀河の種磁場、ボイド磁場として期待
- ✓ そもそも初期宇宙に磁場を作ってよいか
(他の観測と矛盾しないのか?) => 観測的上限

原始磁場の観測的制限

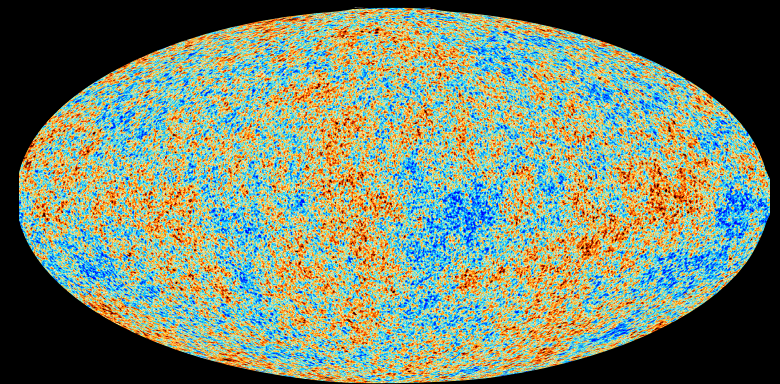
● CMBの温度揺らぎによる制限

CMBとは

- 温度 ~ 2.7 K のほぼ等方なマイクロ波
- 実際にはわずかに揺らぎが存在
- (インフレーション起源の空間曲率に由来すると考えられる)

もし磁場が存在すると

- 電磁場のエネルギーテンソルも時空の曲率をつくるはず



アインシュタイン方程式:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時空の曲率

物質(エネルギー)

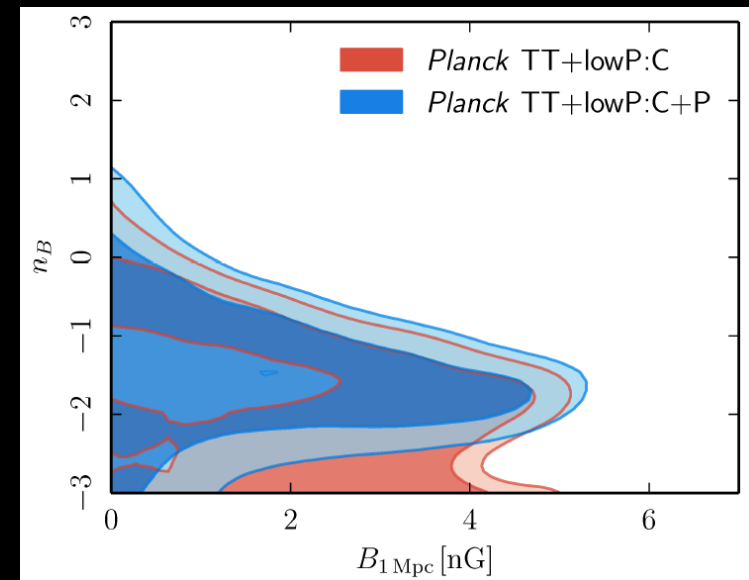
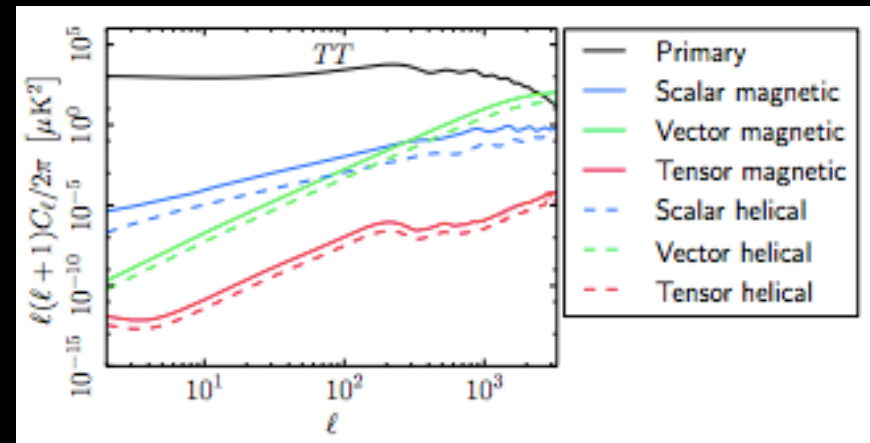
原始磁場の観測的制限

● CMBの温度揺らぎによる制限

- 原始磁場のスペクトルを仮定
- 電磁場のエネルギーテンソルで揺らぎ(曲率)をつくる
- 磁場の強度が大きいと、観測されているCMBの温度揺らぎを超えてしまう(偏光やdistortionもつくる)

$$B_{1 \text{ Mpc}} < 4.5 \times 10^{-9} \text{ G}$$

1Mpcで平均化した原始磁場の強度



まとめ I

低赤方偏移では多くの観測がある

高赤方偏移の宇宙磁場に観測的制限を与えることで、

- ✓ 磁場の進化シナリオの検証
- ✓ 宇宙磁場の起源の解明が期待出来る。

初期宇宙での磁場生成 $\sim 10^{-20}$ G

(CMB: $\lesssim 10^{-9}$ G)
at $z \sim 1000$

銀河の種磁場

銀河・銀河団磁場
 $\sim 10^{-6}$ G

ボイド磁場
 $\sim 10^{-15} - 10^{-20}$ G

$z \ll 10$

宇宙論的な磁場の時間進化。
(理論的な検証が必要)

まとめ I

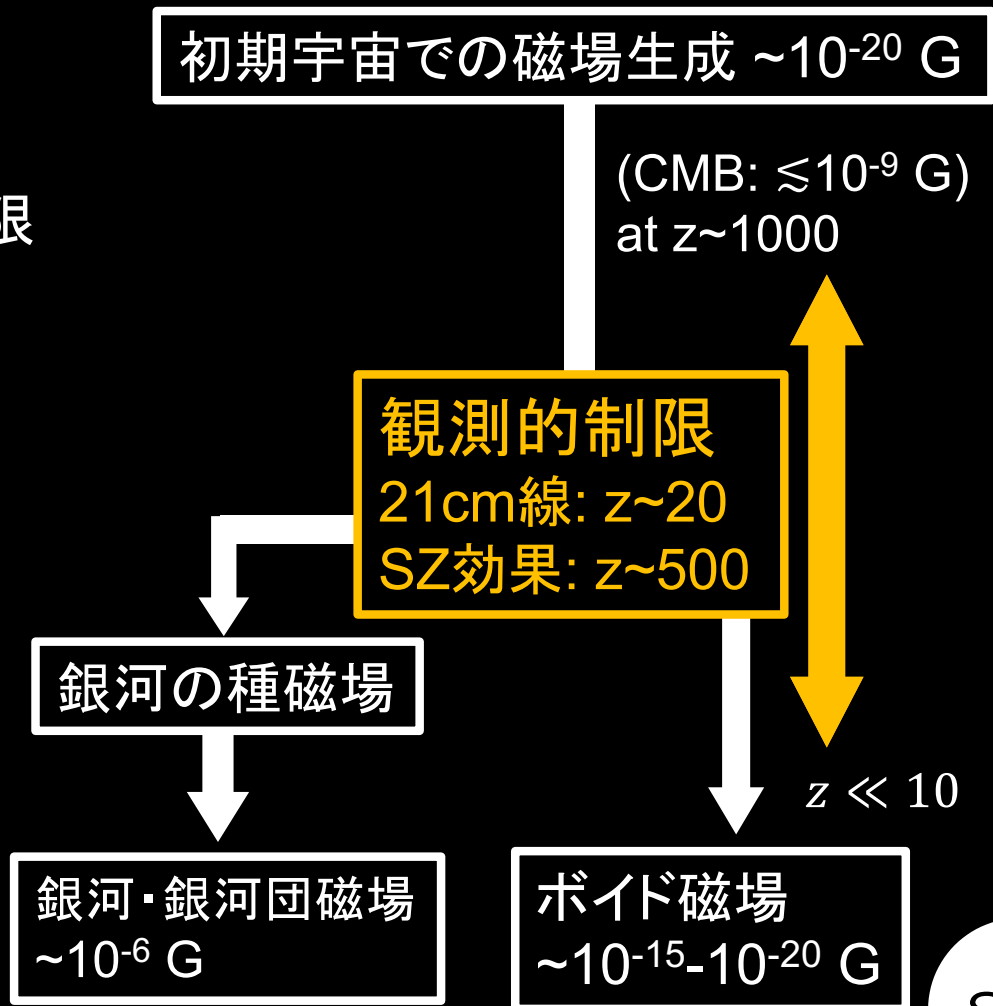
低赤方偏移では多くの観測がある

高赤方偏移の宇宙磁場に観測的制限を与えることで、

- ✓ 磁場の進化シナリオの検証
- ✓ 宇宙磁場の起源の解明が期待出来る。

本発表では

- 21-cm線による磁場の制限
- 磁場により生じるSZ効果について議論する。



宇宙論的な磁場の時間進化。
(理論的な検証が必要)

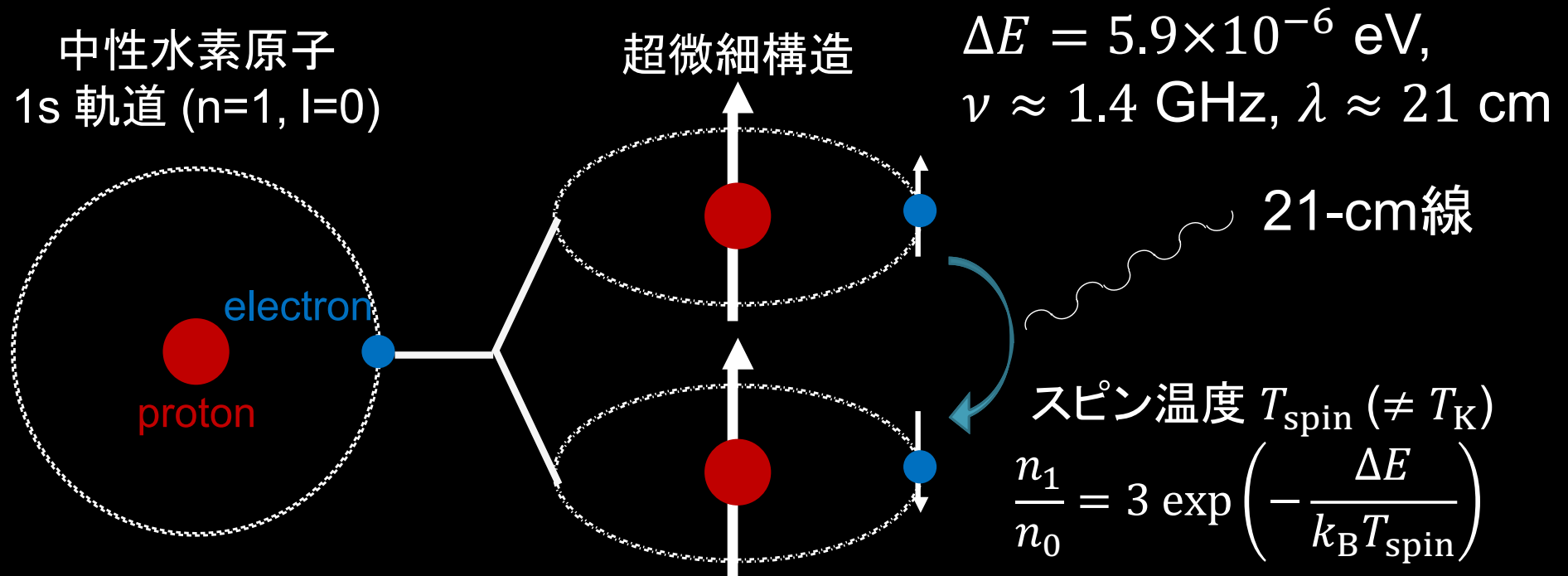
21cm線観測による 原始磁場の新たな制限

箕田鉄兵、田代寛之（名古屋大学 C研）
高橋智（佐賀大学）

arXiv:1812.00730, MNRAS, 488, 2001 (2019)

21-cm線について

21-cm線は、中性水素原子HIの超微細構造に起因する電磁波



赤方偏移した21-cm線の観測 => 過去のHIの物理的な状態
(物質の密度場, IGM の熱史, 再電離の進行状況, ...)

21cm線グローバルシグナル

観測量  HIの物理的な情報

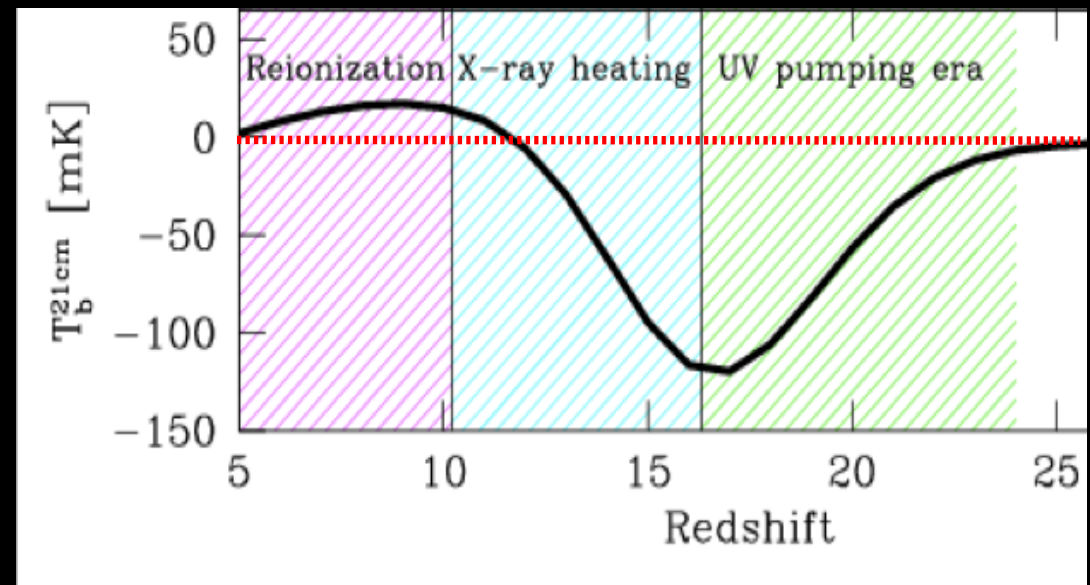
大雑把に言うと

$$T_K \geq T_{\text{spin}} \geq T_\gamma$$

のとき輝線

$$T_K \leq T_{\text{spin}} \leq T_\gamma$$

のとき吸収線



21-cm線グローバルシグナルの理論予測
McQuinn & O'Leary, 2012 (arXiv:1204.1345)

21cm線グローバルシグナル

観測量



HIの物理的な情報

大雑把に言うと

$$T_K \geq T_{\text{spin}} \geq T_\gamma$$

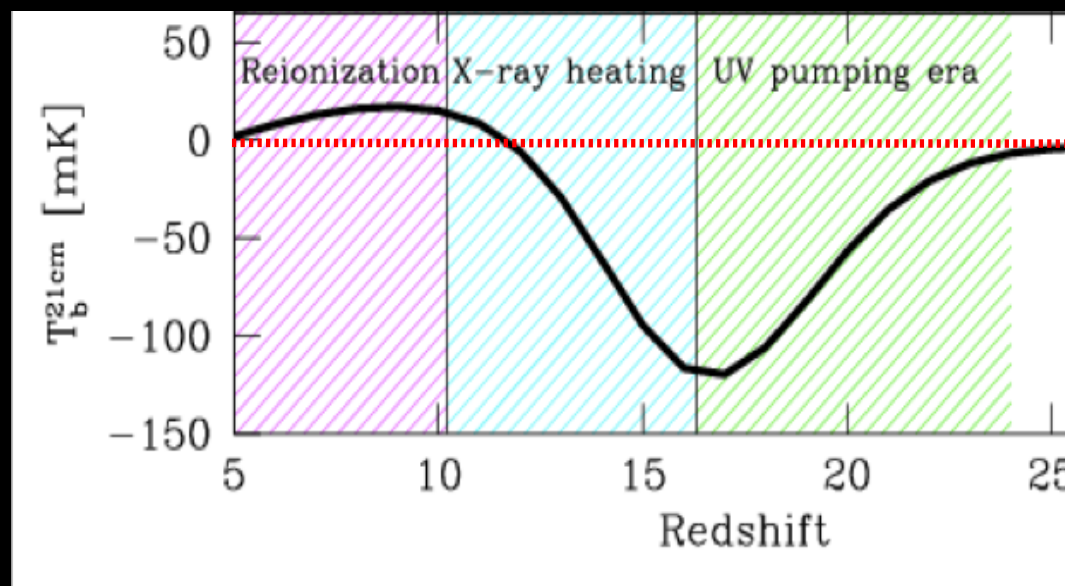
のとき輝線

$$T_K \leq T_{\text{spin}} \leq T_\gamma$$

のとき吸収線

本研究では

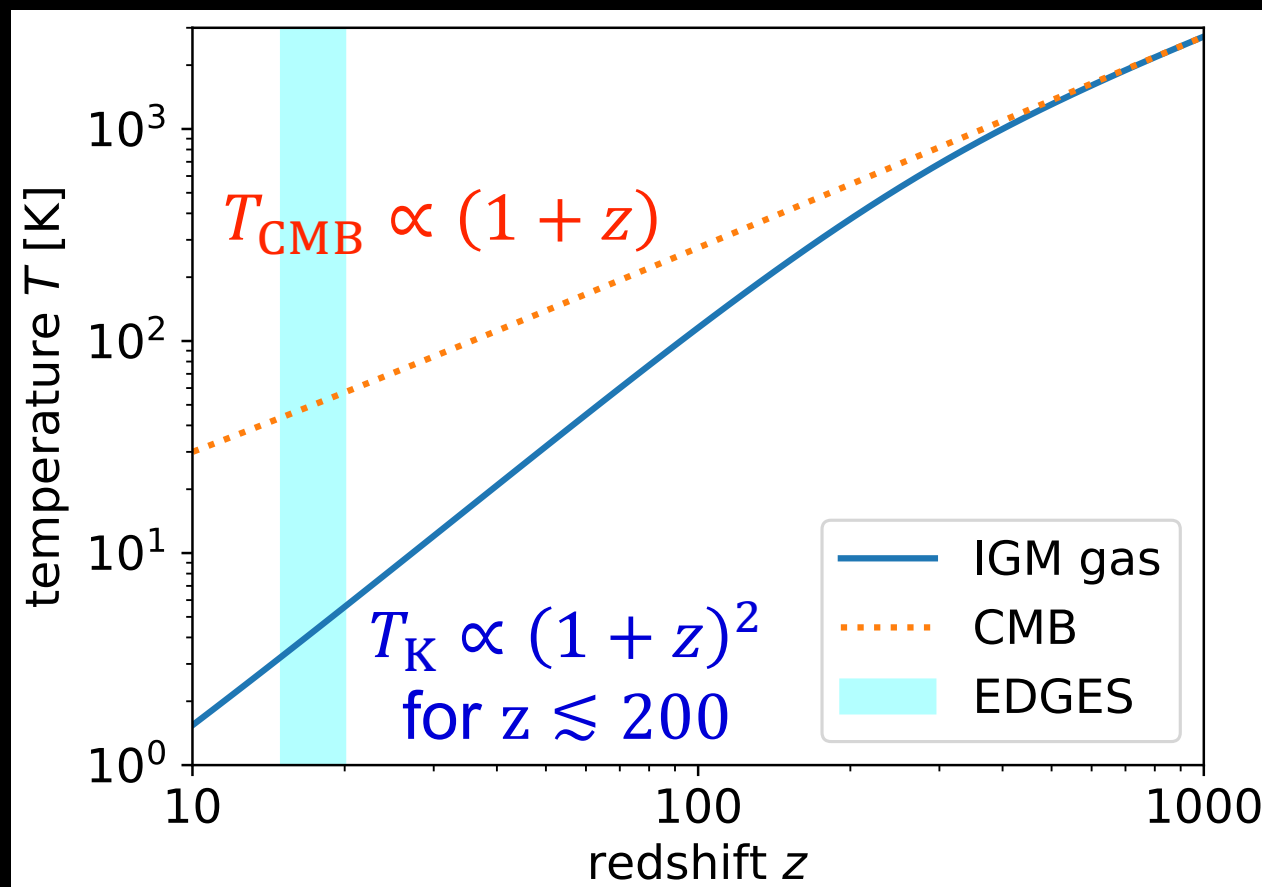
z~17 の暗黒時代の
吸収線に着目！



21-cm線グローバルシグナルの理論予測
McQuinn & O'Leary, 2012 (arXiv:1204.1345)

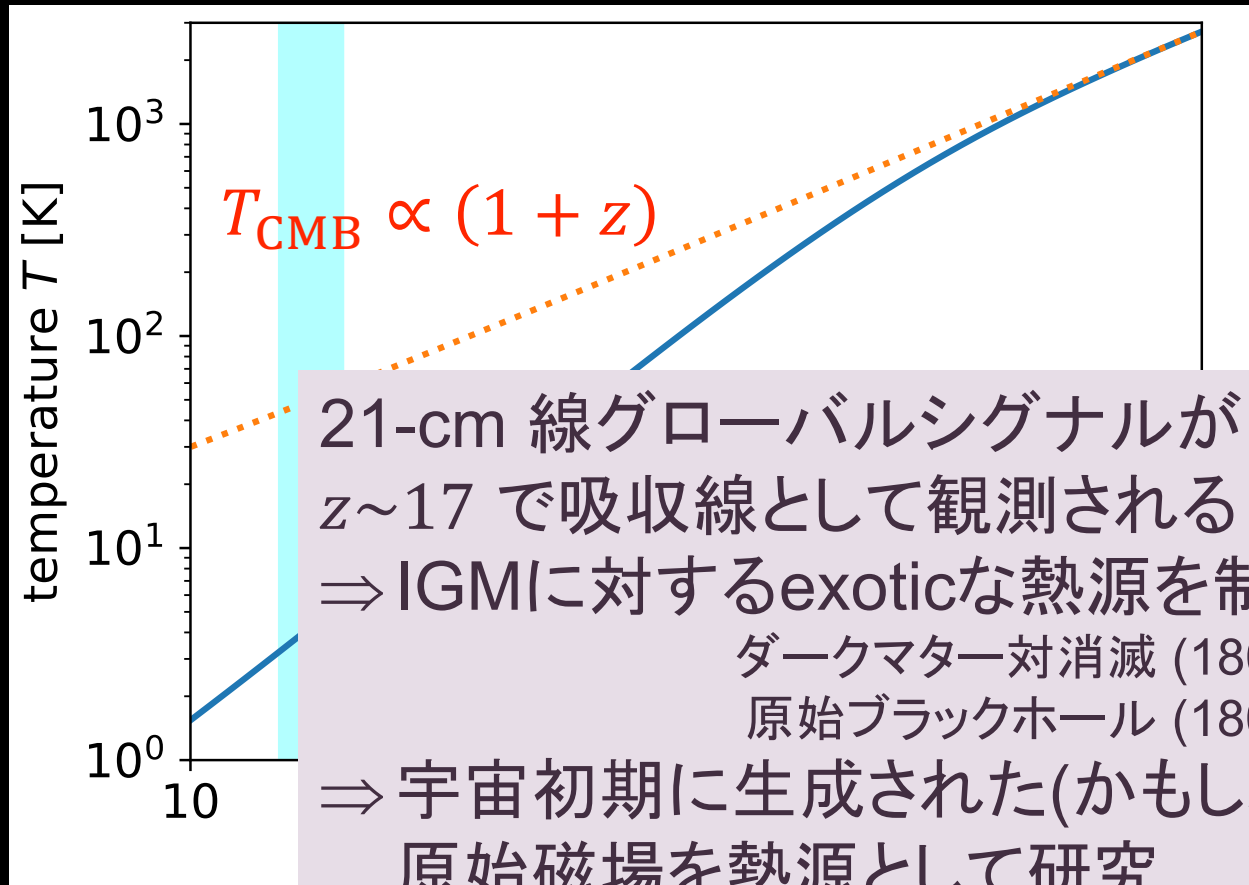
暗黒時代の $thermal\ history$

Λ CDM宇宙論ならば $z \sim 17$ のとき $T_{\text{CMB}} > T_{\text{K}}$ (吸収線)



暗黒時代の*thermal history*

Λ CDM宇宙論ならば $z \sim 17$ のとき $T_{\text{CMB}} > T_{\text{K}}$ (吸収線)



IGMの熱源としての原始磁場

➤ 双極性散逸

磁場を担う荷電粒子と中性粒子の摩擦によって生じる散逸機構

加熱率はローレンツ力の大きさに比例

$$\dot{Q}_{AD} \propto |(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}|^2$$

➤ 乱流減衰

磁気乱流により生じる小サイズの渦がオーム散逸によって熱化

加熱率は磁場のエネルギー密度に比例

$$\dot{Q}_{DT} \propto |\mathbf{B}|^2$$

原始磁場の分布モデル

- 統計的一様性と等方性を仮定
- ヘリシティ、電場なしの近似

磁場の2点相関

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

磁場のパワースペクトルはべき乗を仮定

$$P_B(k) \propto B_1 \text{ Mpc} k^{n_B}$$

↓
normalizing
amplitude

↓
scale dependence

温度・電離度・磁場の強度

➤ガスの温度進化

$$\frac{dT_K}{dt} = (\text{宇宙膨張}) + (\text{コンプトン}) + (\text{磁場の散逸})$$

➤ガスの電離度の進化

$$\frac{dx_e}{dt} = (\text{衝突電離}) + (\text{再結合}) + (\text{CMBによる光電離})$$

➤原始磁場のエネルギー

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{|B|^2}{8\pi} \right) = (\text{宇宙膨張}) - (\text{磁場の散逸})$$

IGMの温度進化

$$\frac{dT_{\text{gas}}}{dt} = \frac{x_e}{1+x_e} \frac{8\rho_{\text{CMB}}\sigma_T}{3m_e c} (T_{\text{CMB}} - T_{\text{gas}}) - 2HT_{\text{gas}}$$

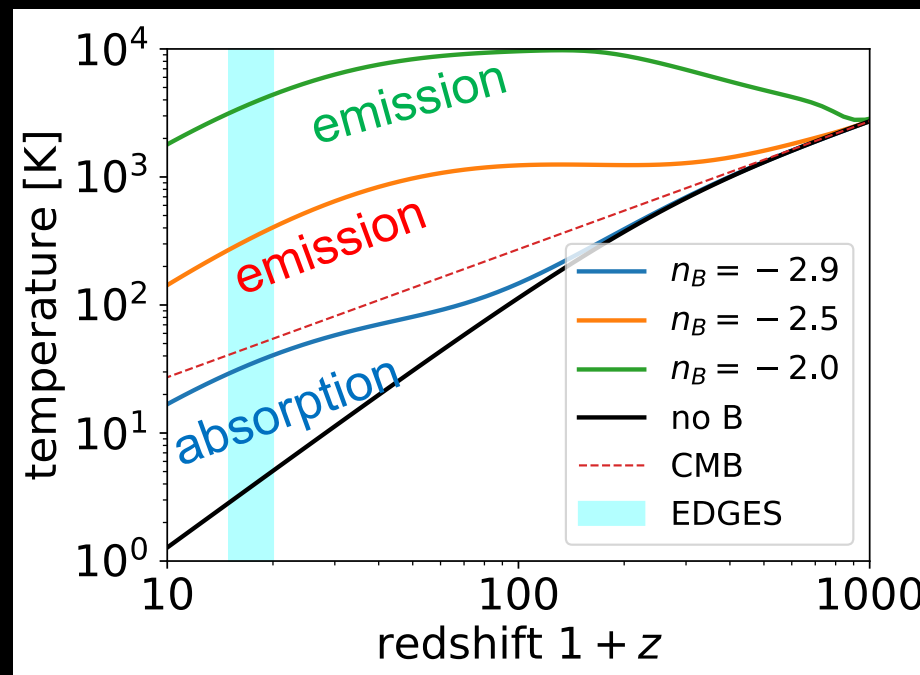
Compton散乱による効果

宇宙膨張

$$+ \frac{\dot{Q}_{\text{AD}} + \dot{Q}_{\text{DT}}}{1.5k_B n_b}$$

原始磁場による加熱
(双極性散逸
+ オーム散逸)

(+電離度と磁場の時間進化)

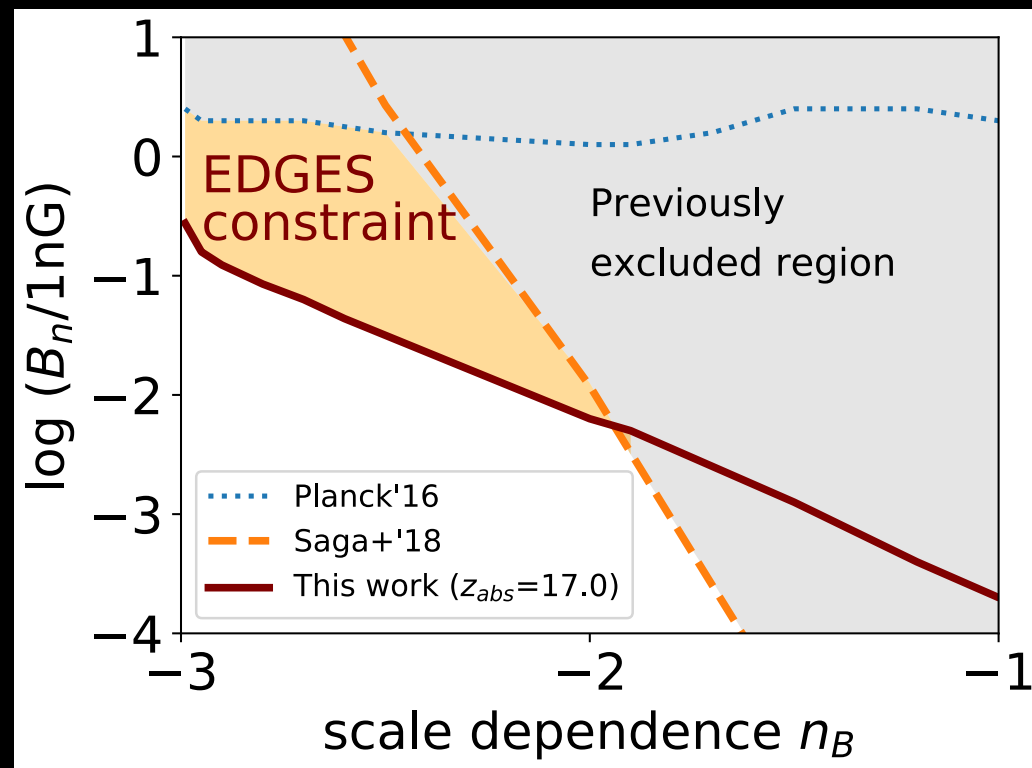


原始磁場の新たな制限

- 様々な磁場のモデル(B_n, n_B)に対して T_K の時間進化を計算した
- 21-cm線の吸収線条件
- $T_K < T_{\text{CMB}}$ (for $z \sim 17$)
- を満たすように
- 原始磁場の上限を与えた。

$$B_{1 \text{ Mpc}} \lesssim 0.1 \text{ nG}$$

- これまでで最も強い制限



まとめ //

- ✓ 21cm線の観測による原始磁場の制限を行った。
- ✓ 暗黒時代のIGMの温度進化に磁場が与える影響を見積もった。
- ✓ 温度、電離度、磁場のエネルギーを同時に矛盾なく解いた。
- ✓ 赤方偏移 $z \sim 17$ の吸収線 $\Rightarrow B_{1 \text{ Mpc}} < 0.1 \text{ nG}$ という制限を得た
(特に $n_B < -2$ に対してはこれまでに最も強い制限を得た)。

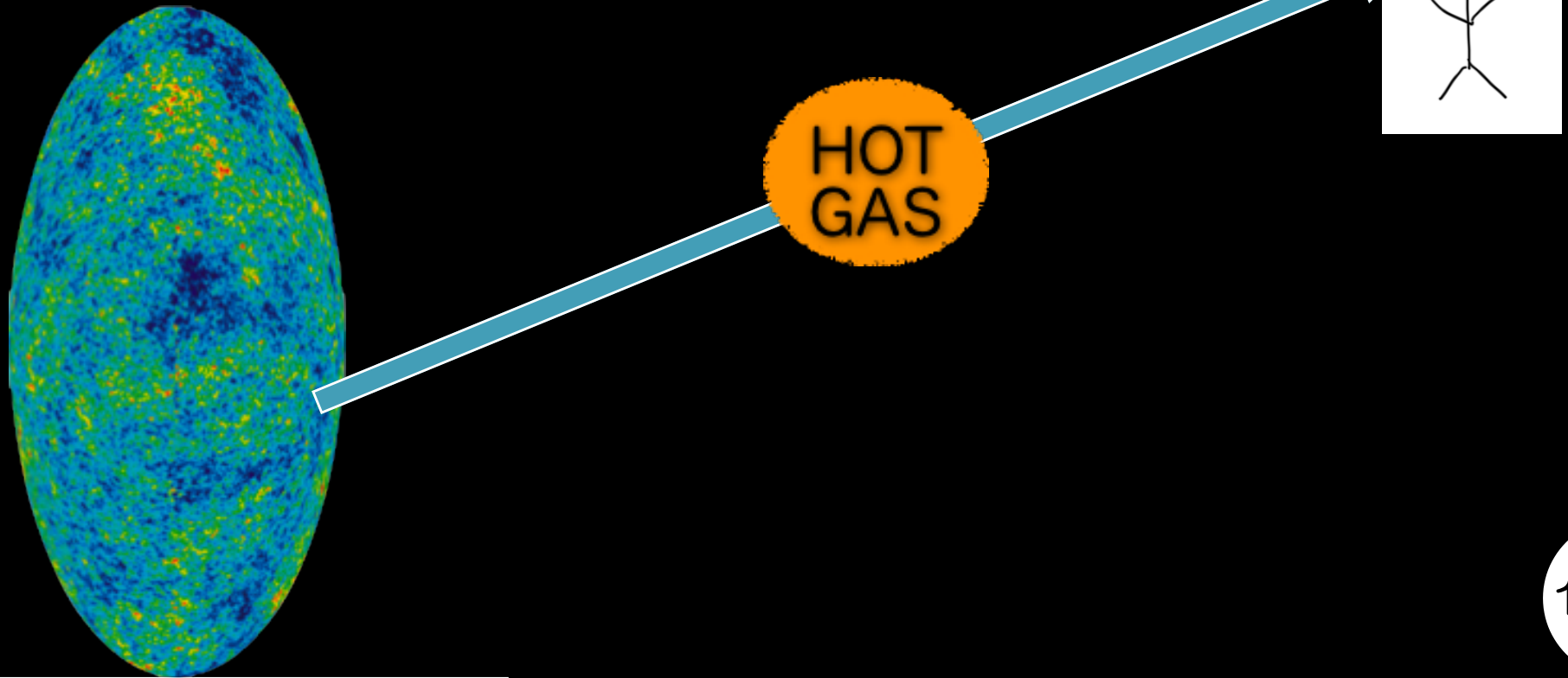
原始磁場によって生じる 熱的SZ効果

箕田鉄兵、長谷川賢二、田代寛之
市來淨與、杉山直（名古屋大学 C研）

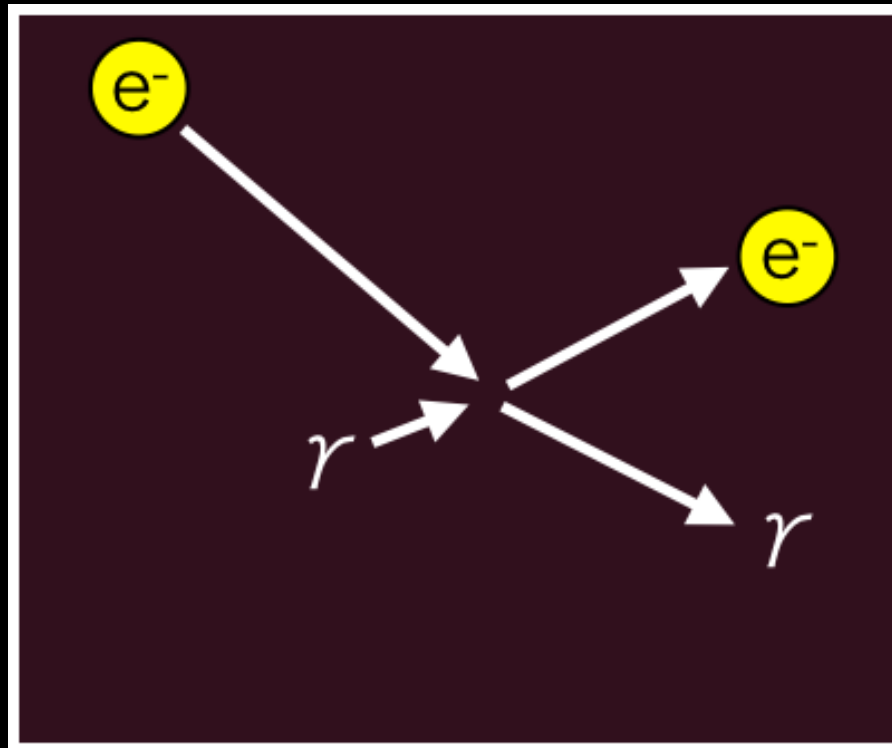
arXiv:1705.10054, Phys. Rev. D, 96, 123525 (2017)

熱的SZ効果(スニヤエフ・ゼルド ビッチ効果)とは

CMBの光子が高温ガスを通過することで
光子のスペクトルが歪む効果。

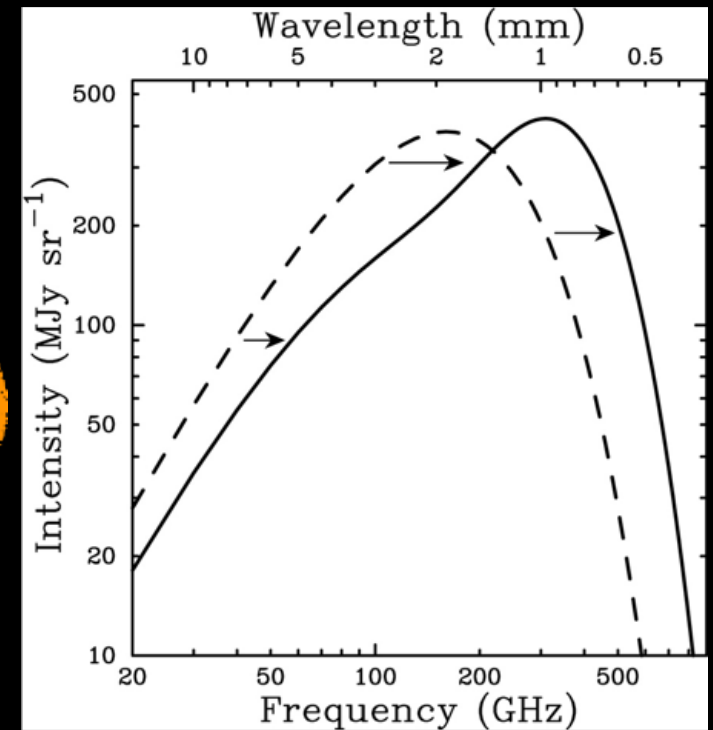


熱的SZ効果(スニヤエフ・ゼルド ビッチ効果)とは



逆コンプトン散乱の模式図

HOT
GAS



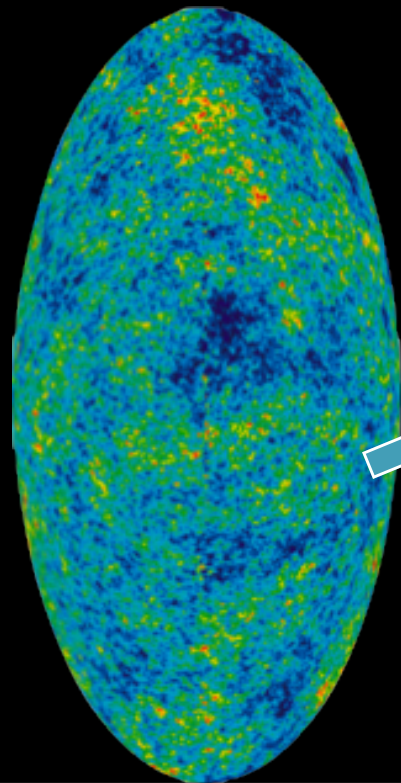
CMBのスペクトルが
黒体放射からずれる

熱的SZ効果(スニヤエフ・ゼルド ビッチ効果)とは

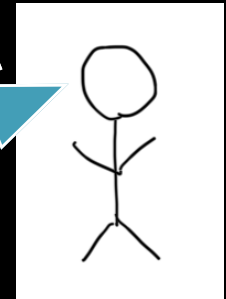
CMBの光子が高温ガスを通過することで
光子のスペクトルが歪む効果。

視線方向ベクトル $\hat{n}$

距離 l



HOT
GAS



y-パラメータ (SZ効果の大きさを表す)

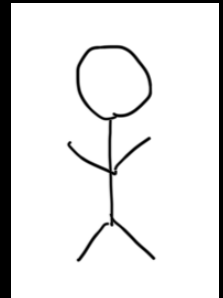
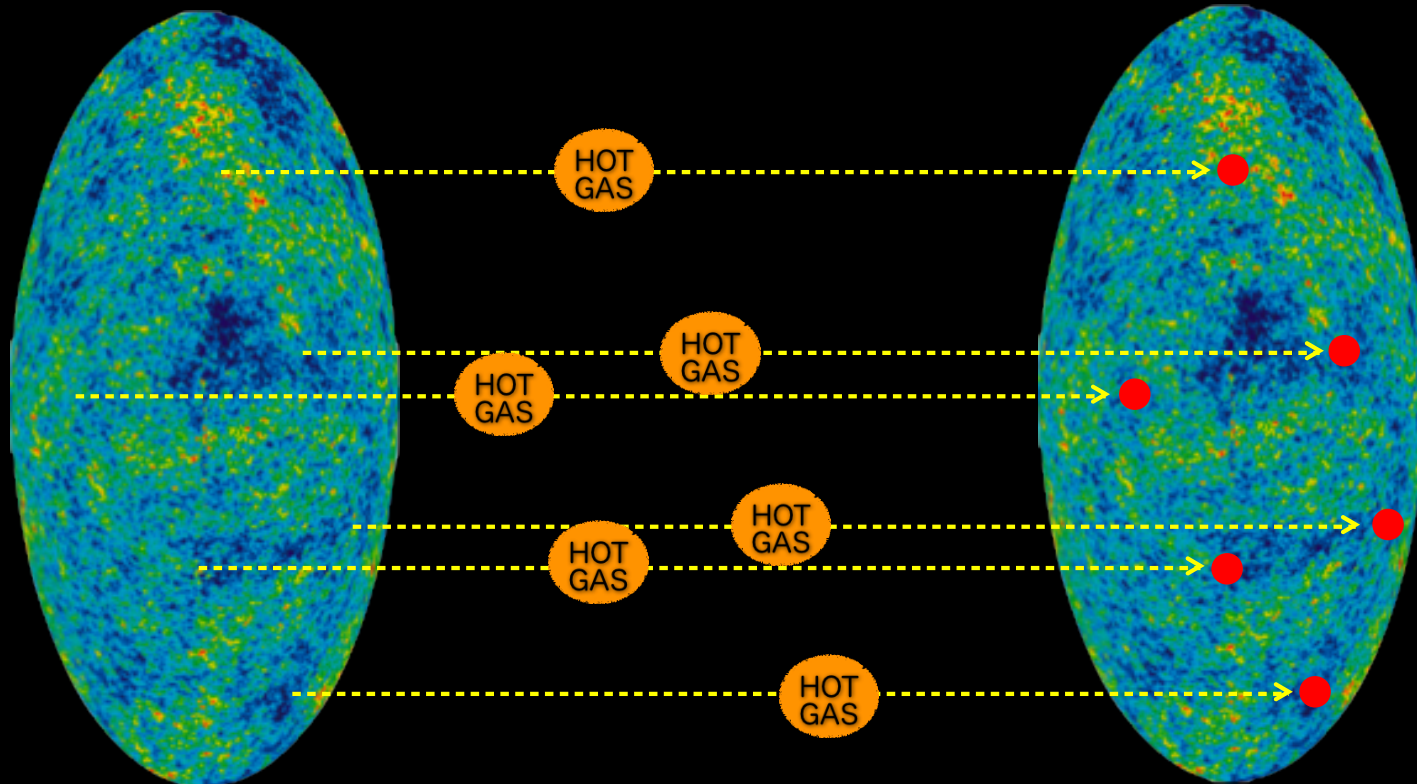
$$y(\hat{n}, l) \equiv \frac{k_B \sigma_T}{m_e c^2} \int_0^l \underbrace{n_e(\hat{n}, l')}_{\text{Density}} \underbrace{T_e(\hat{n}, l')}_{\text{Temperature}} dl'$$

原始磁場とSZ効果

原始磁場があると、熱いガスの塊をたくさん作る
> 観測されるCMBの温度揺らぎに影響？

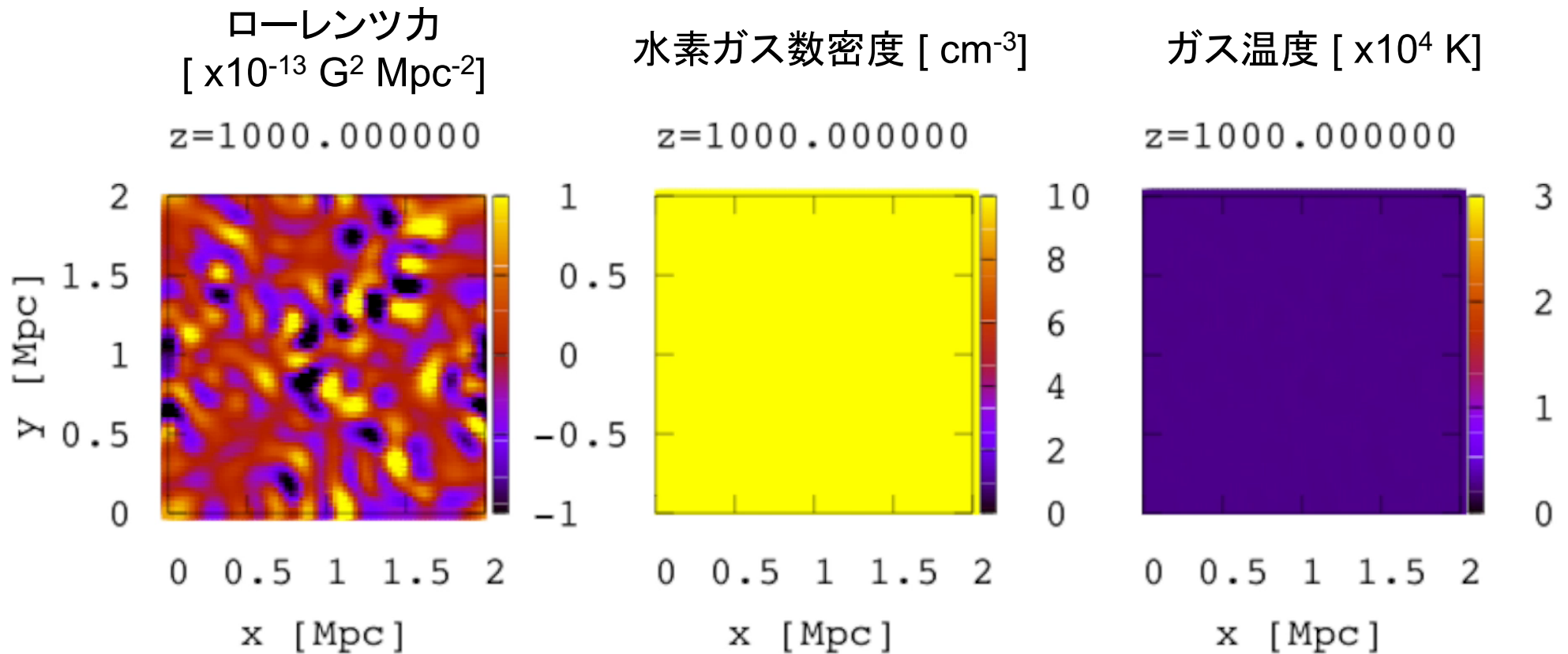
元のCMB温度ゆらぎ

観測されるCMB温度ゆらぎ

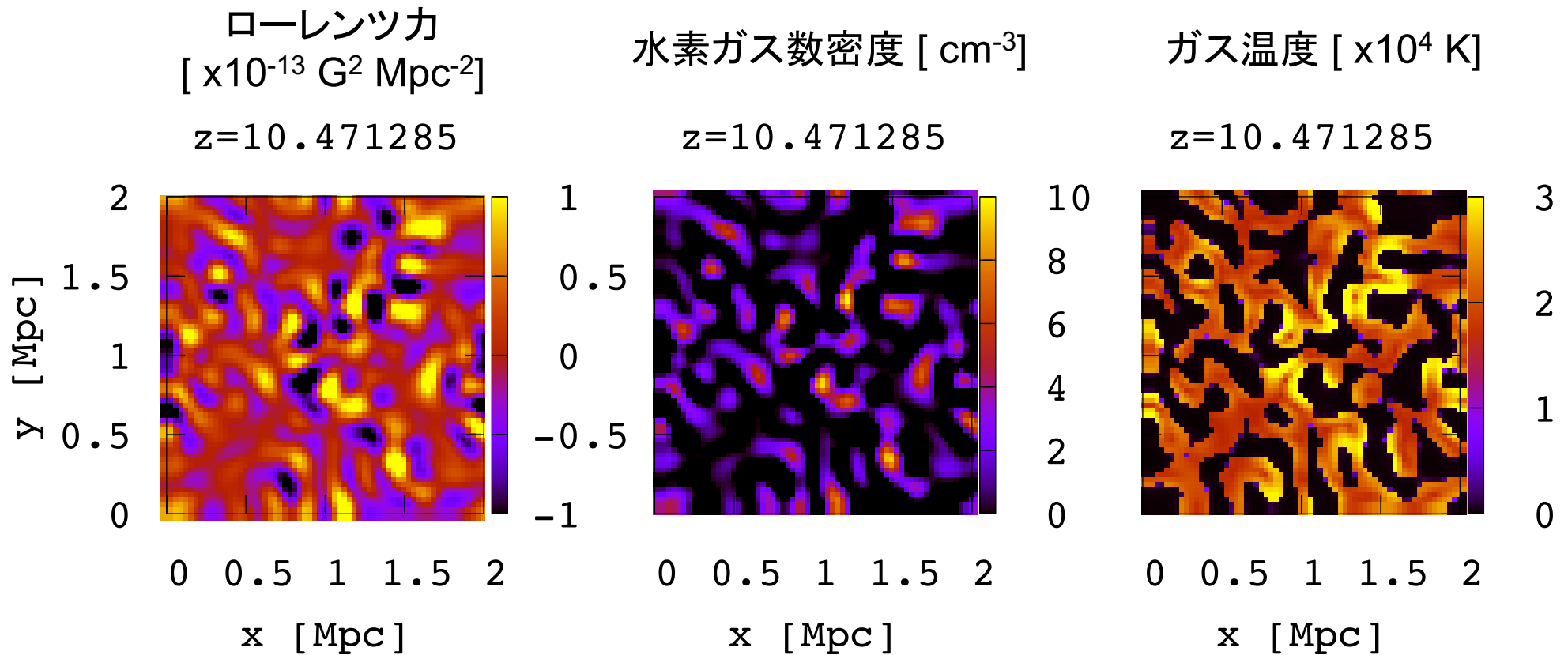


SZ効果により温度揺らぎが作られる？ > 本研究で計算

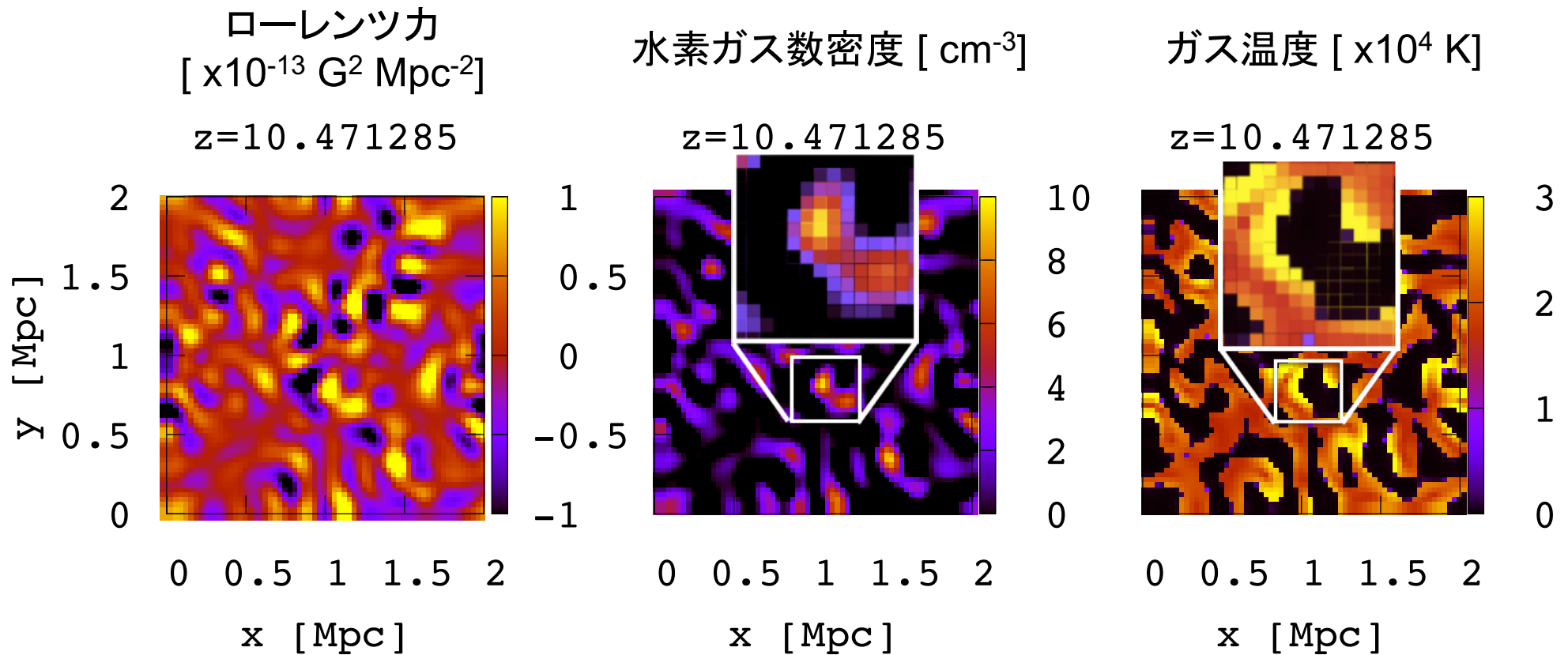
計算結果



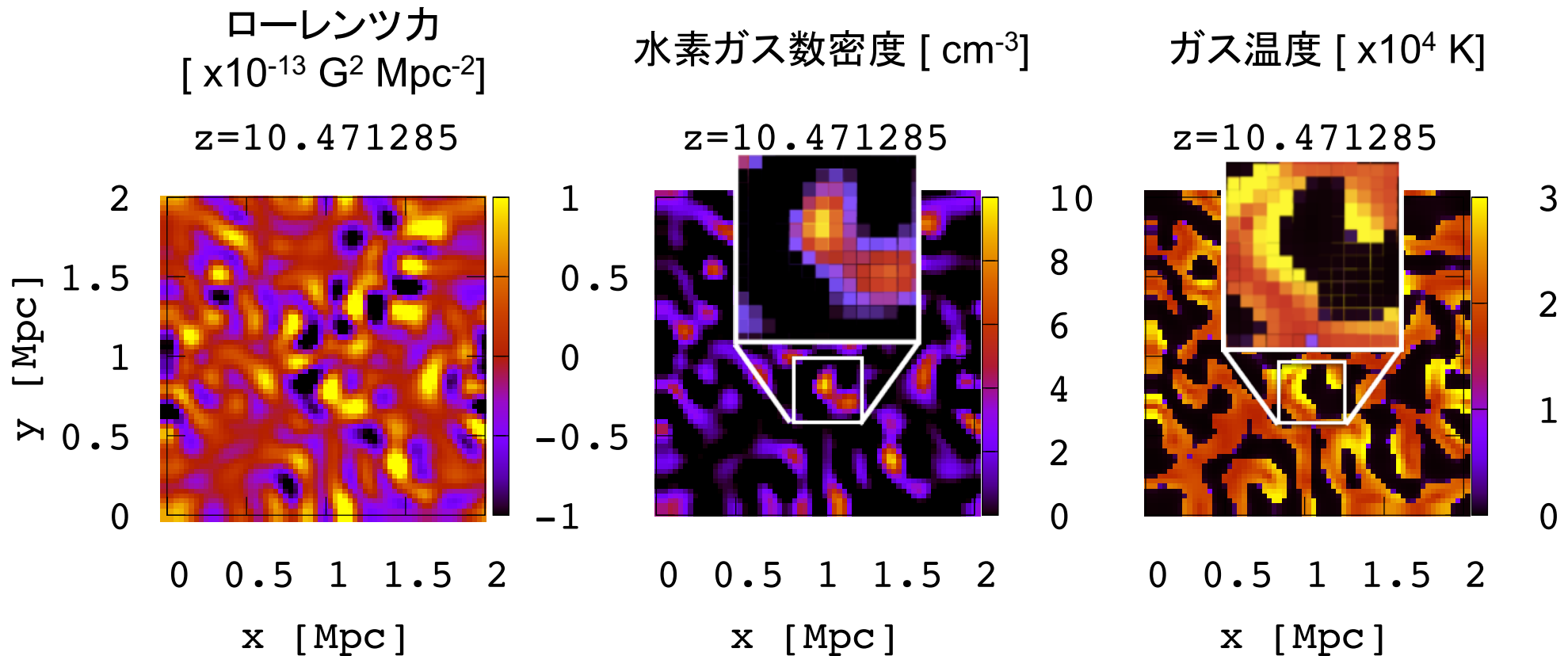
計算結果



計算結果



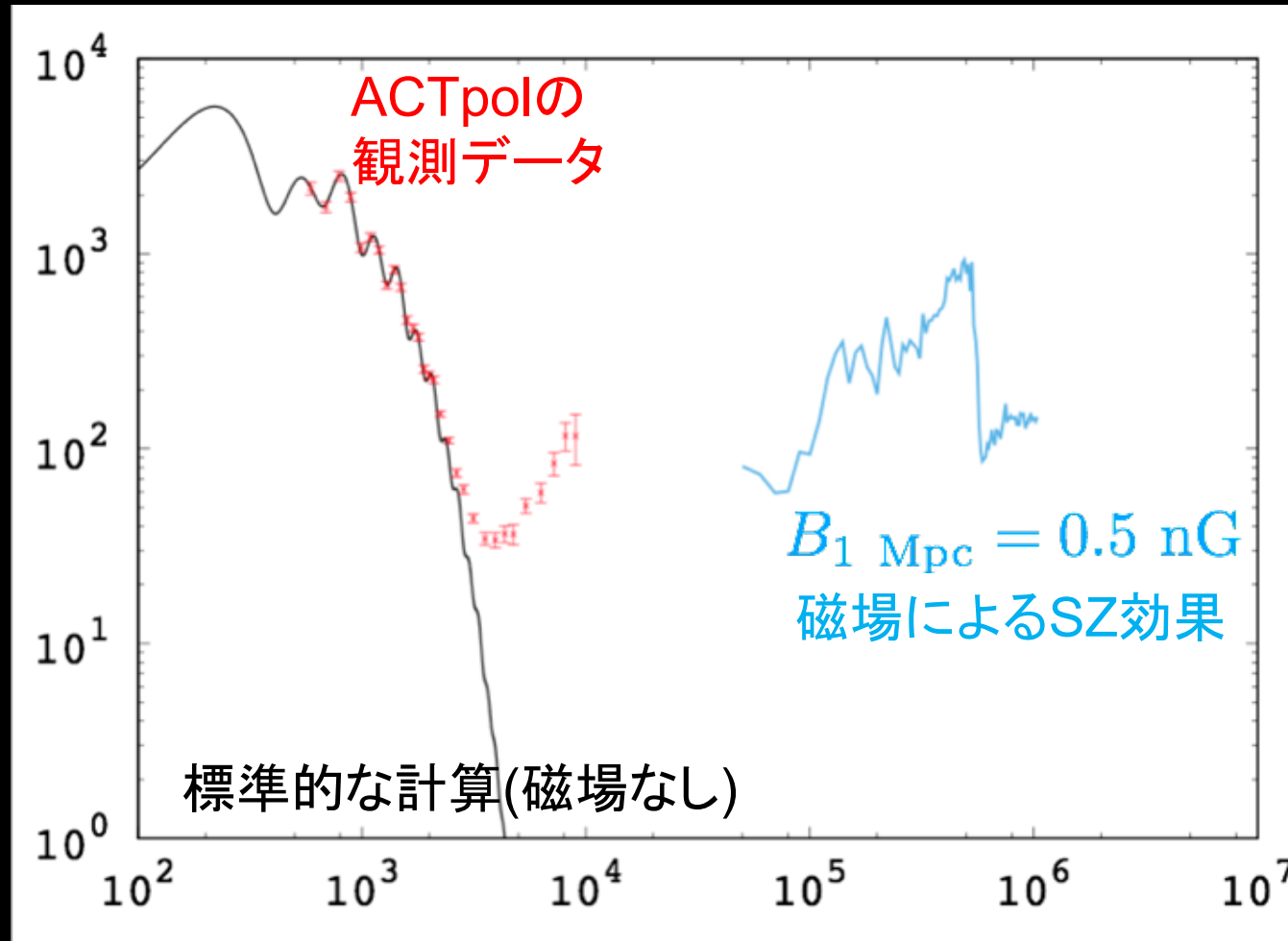
計算結果



- ◆ガスの密度と温度に反相関
- ◆構造のスケールがおおよそ $\sim 100 \text{ kpc}$

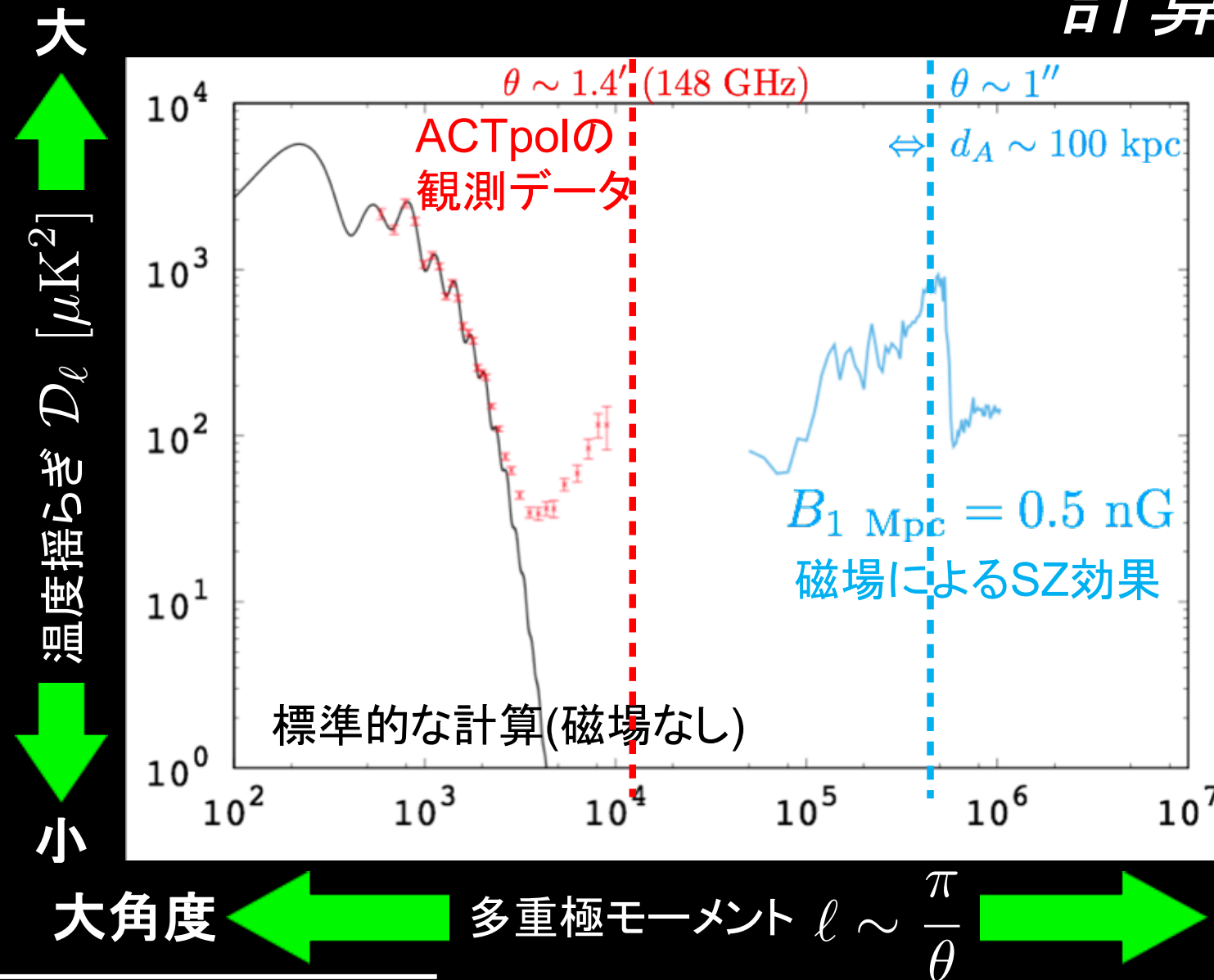
計算結果

大
↑
温度揺らぎ D_ℓ [μK^2]
↓
小



大角度 ← 多重極モーメント $\ell \sim \frac{\pi}{\theta}$ → 小角度

計算結果



まとめ III

- ✓ 原始磁場によって生じるSZ効果の見積もりをおこなった。
- ✓ 磁場の揺らぎを考慮してガスの密度、温度の揺らぎを計算した。
- ✓ ガス密度、温度、電離度の進化を同時に矛盾なく解いた。
- ✓ 原始磁場によって生じるCMBの温度揺らぎは、小スケール $l \sim 10^6$ (およそ1秒角) でピークを持つことがわかった。

TAKE-HOME MESSAGE

- ✓ 宇宙初期で磁場を作る理論的方法は様々
- ✓ 大規模構造の磁場の観測とのつながりが見えてきた
(SKAのFaraday tomographyなどの今後の発展も期待)
- ✓ 大目標は磁場の起源、時間進化シナリオの解明
- ✓ そのためには、原始磁場の観測的制限が非常に重要！

双極性散逸

双極性散逸による加熱率

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

ρ_b : バリオン質量密度

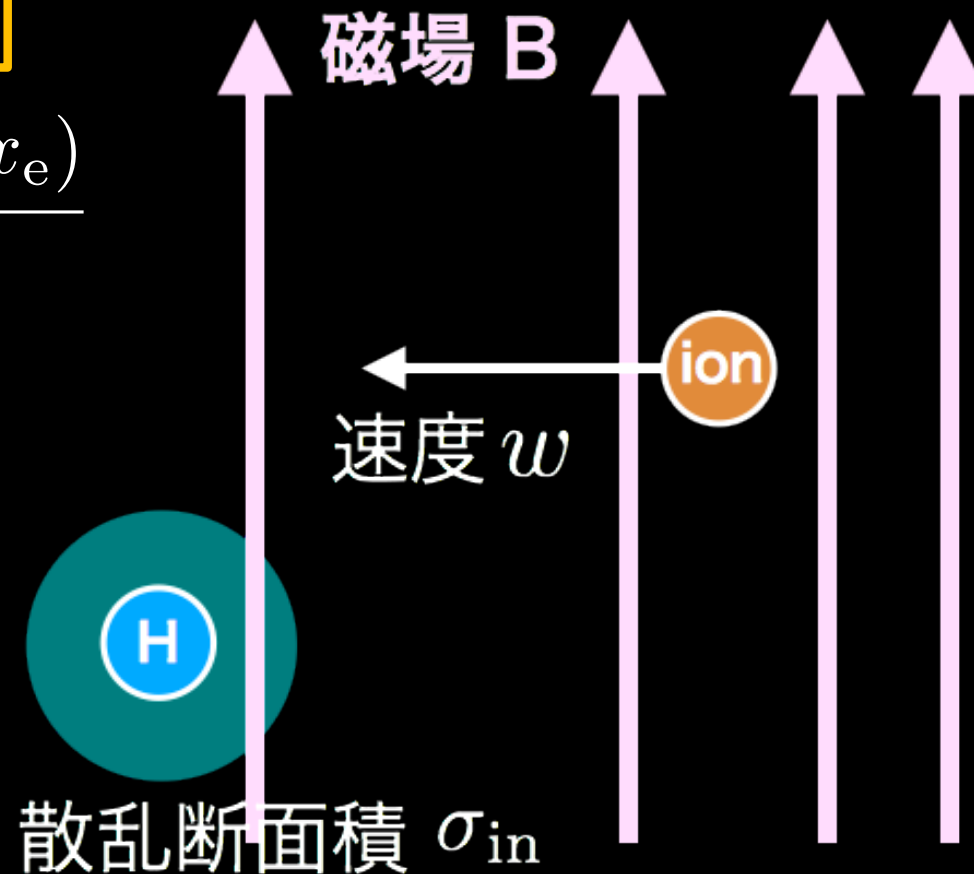
x_e : 水素原子の電離度

衝突率

$$\xi = \frac{\langle w \sigma_{\text{in}} \rangle}{m_e + m_n}$$

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

(Draine+, 1983, ApJ, 270)



双極性散逸の概念図