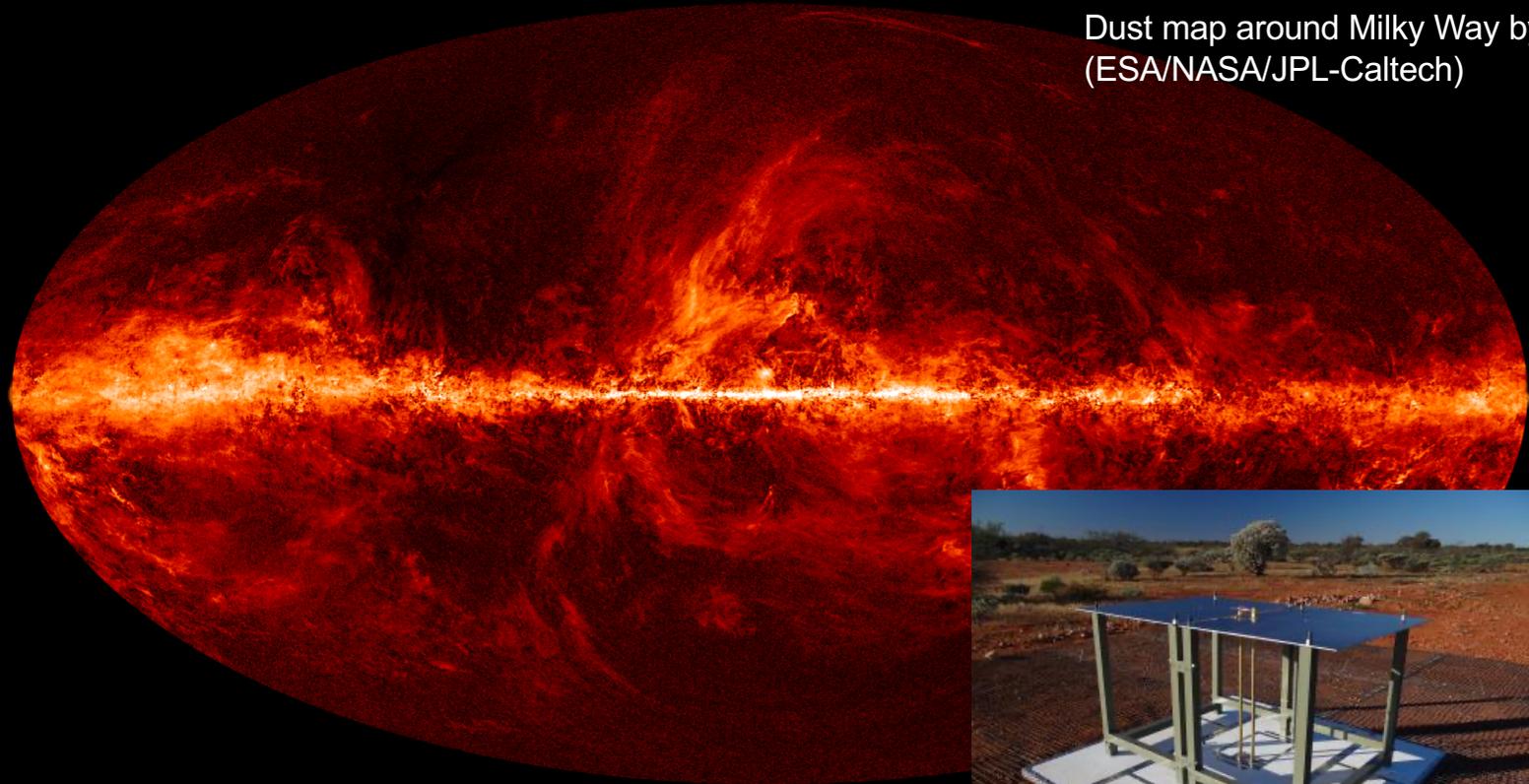


21cm線グローバルシグナル の観測による原始磁場の制限

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

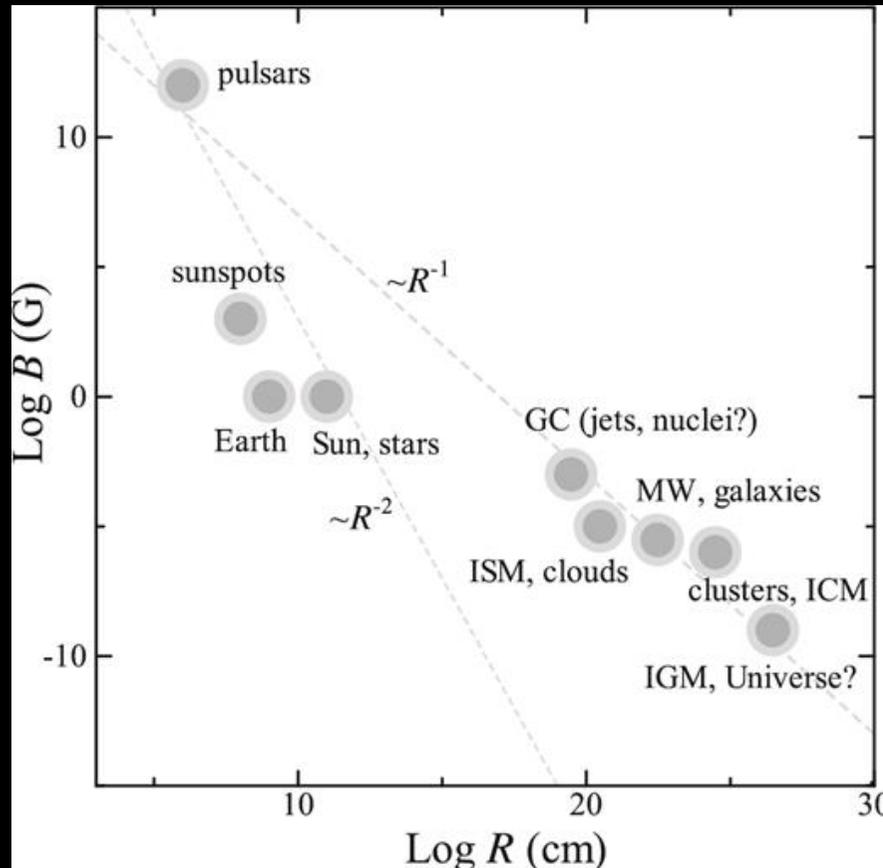


Teppei Minoda, H. Tashiro, & T. Takahashi
MNRAS, 488, 2001 (2019), arXiv:1812.00730

箕田鉄兵 (名古屋大学 D3)

Experiment to Detect the Global EoR Signature
(EDGES, <https://www.colorado.edu/>)

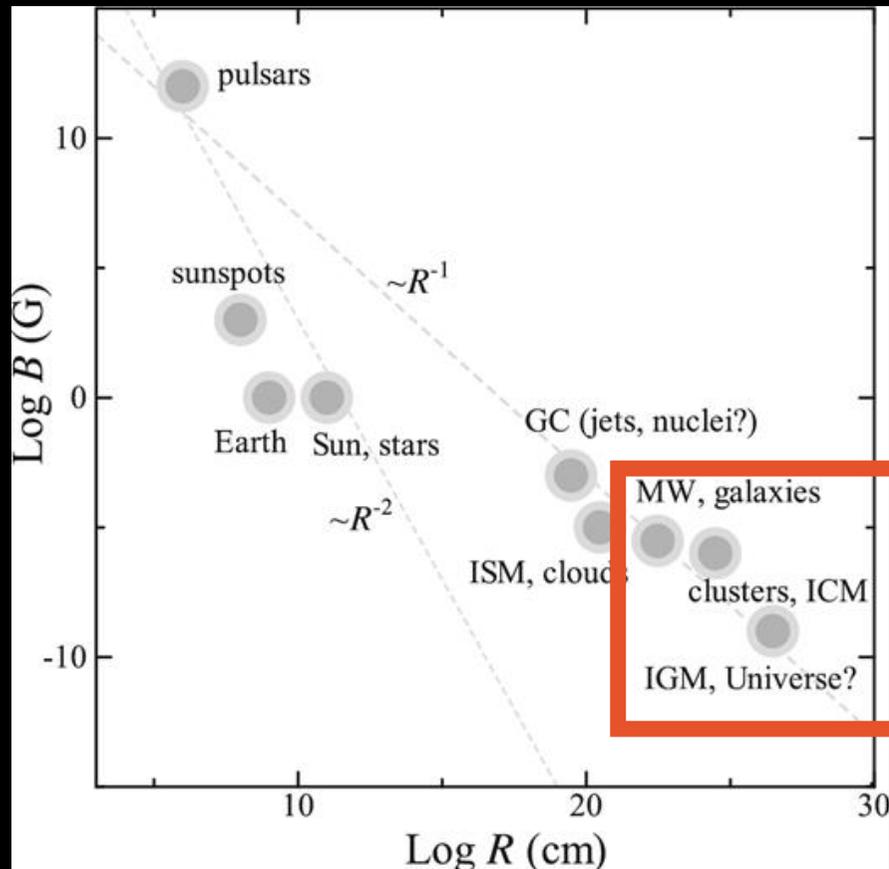
多様なスケールでの磁場



宇宙に存在する磁場の空間的
スケールとその強度

- 宇宙には様々なスケールの磁場が存在
- その起源と進化が未
説明

多様なスケールでの磁場



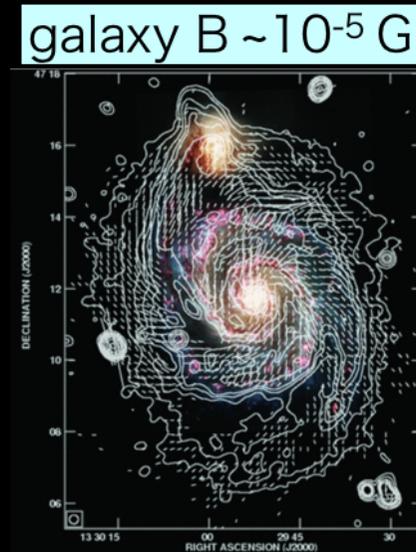
宇宙に存在する磁場の空間的
スケールとその強度

- 宇宙には様々なスケールの磁場が存在
- その起源と進化が未
解明
- とりわけ、大スケール
($\geq \text{Mpc}$)の磁場は天体
物理学と宇宙論の両
面から興味深い

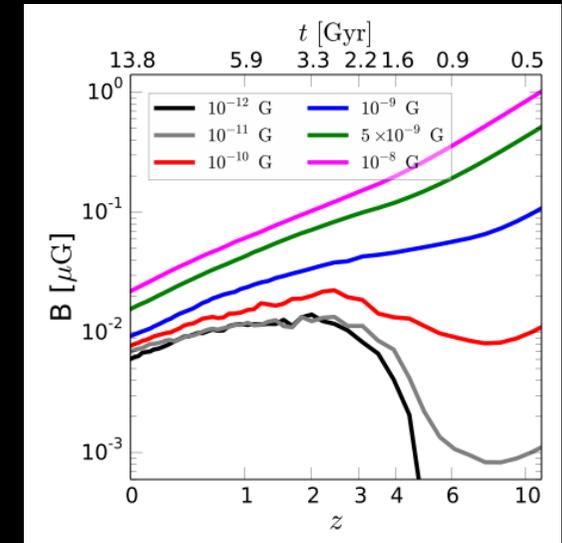
銀河・銀河団における磁場

●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

- MHDを用いた宇宙論的銀河形成シミュレーションによる研究
 - 銀河形成の初期段階に微弱な磁場 ($\geq 10^{-12}$ G あれば良さそう)
- => ダイナモ機構によって増幅・維持 (種磁場の存在が必要)

低密度領域の磁場

●観測的

- ガンマ線や宇宙線の観測(荷電粒子の運動への影響を見る)
=> ボイド領域の磁場 $\sim 10^{-15}$ - 10^{-20} G

●理論的

- 天体物理学的起源としてはビアマンバッテリー機構など
- 初期宇宙での磁場生成も有力な候補(=原始磁場)
- 生成機構の理論モデルが数多く提唱

Ando & Kusenko (1005.1924)

Vovk et al. (1112.2534), Batista et al. (1704.05869)

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

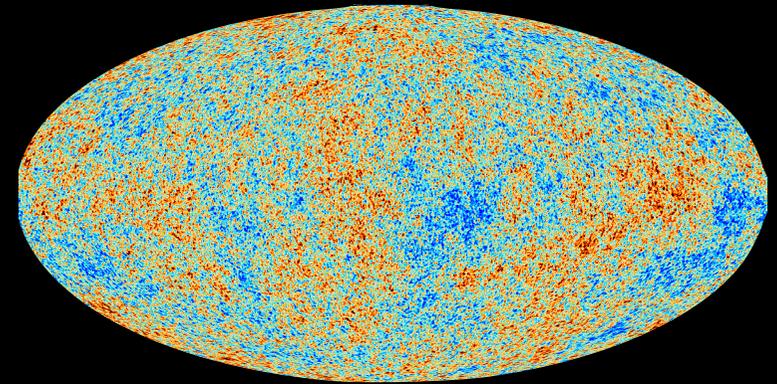
● CMBの温度揺らぎによる制限

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)

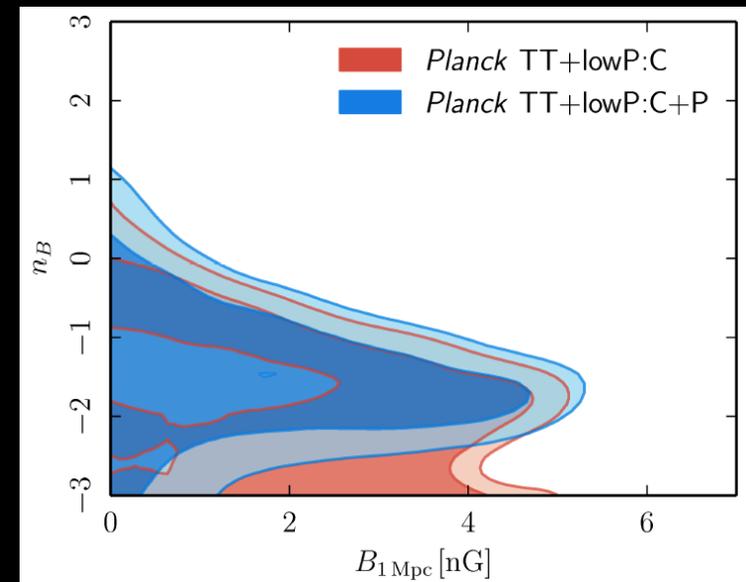
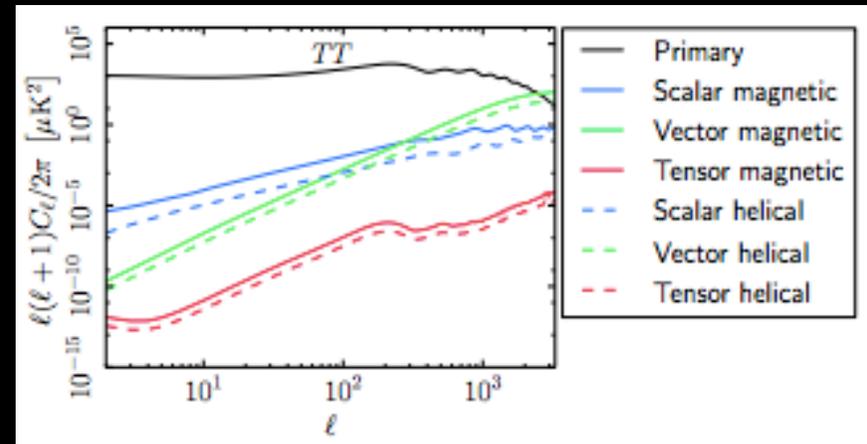
原始磁場の観測的制限

● 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



宇宙論的な磁場の歴史

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: $\leq 10^{-9}$ 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)

宇宙論的な磁場の歴史

低赤方偏移では多くの観測がある

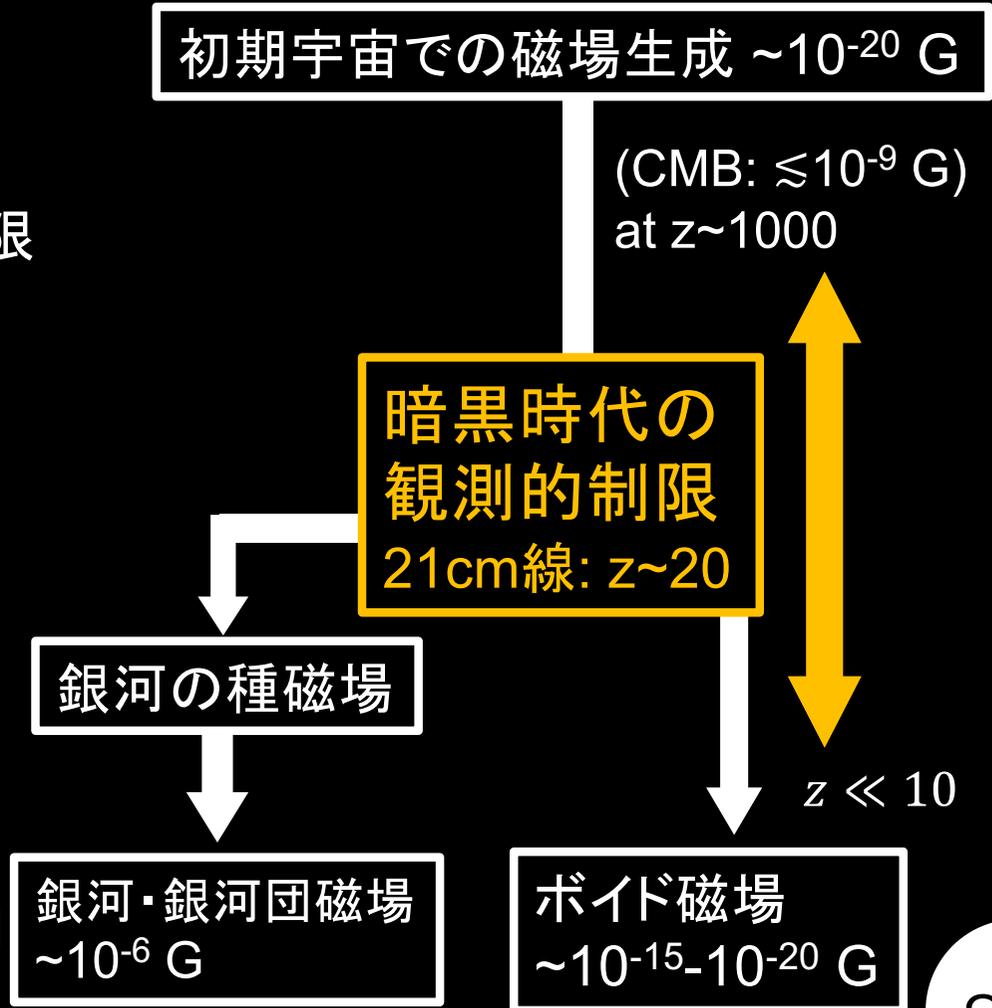
高赤方偏移の宇宙磁場に観測的制限を与えることで、

- ✓ 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線の観測による磁場の制限」
について議論

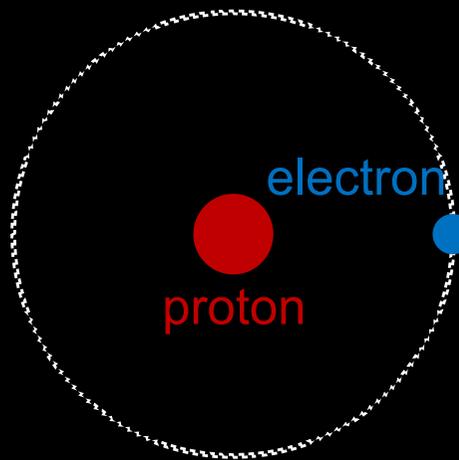


宇宙論的な磁場の時間進化。
(理論的な検証が必要)

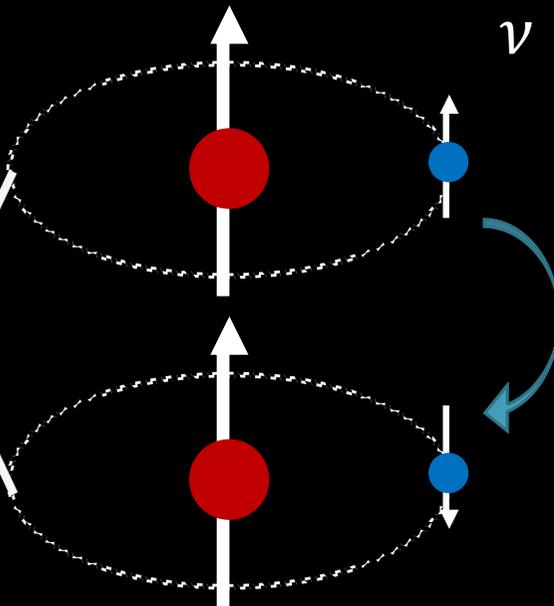
21-cm線について

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

中性水素原子
1s 軌道 (n=1, l=0)



超微細構造



$$\Delta E = 5.9 \times 10^{-6} \text{ eV},$$
$$\nu \approx 1.4 \text{ GHz}, \lambda \approx 21 \text{ cm}$$

21-cm線

スピン温度 $T_{\text{spin}} (\neq T_{\text{K}})$

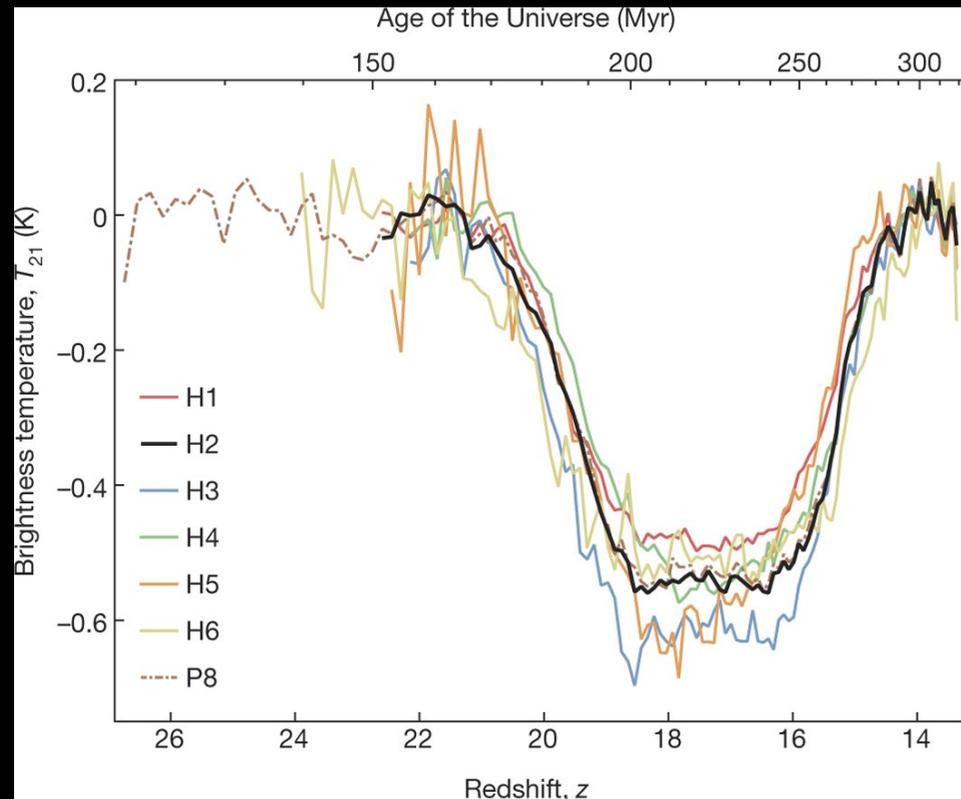
$$\frac{n_1}{n_0} = 3 \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_{\text{B}} T_{\text{spin}}}\right)$$

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

$$\delta T_b \cong 27 x_{\text{HI}} \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_{\text{spin}}} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} \quad [\text{mK}]$$



Experiment to Detect the Global EoR Signature
(EDGES, <https://www.colorado.edu/>)

報告された21-cm線グローバルシグナル
Bowman et al., 2018 (Nature, 555, 67)

21cm線グローバルシグナル

観測量

$$\delta T_b \cong 27 x_{\text{HI}} \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_{\text{spin}}} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} \quad [\text{mK}]$$

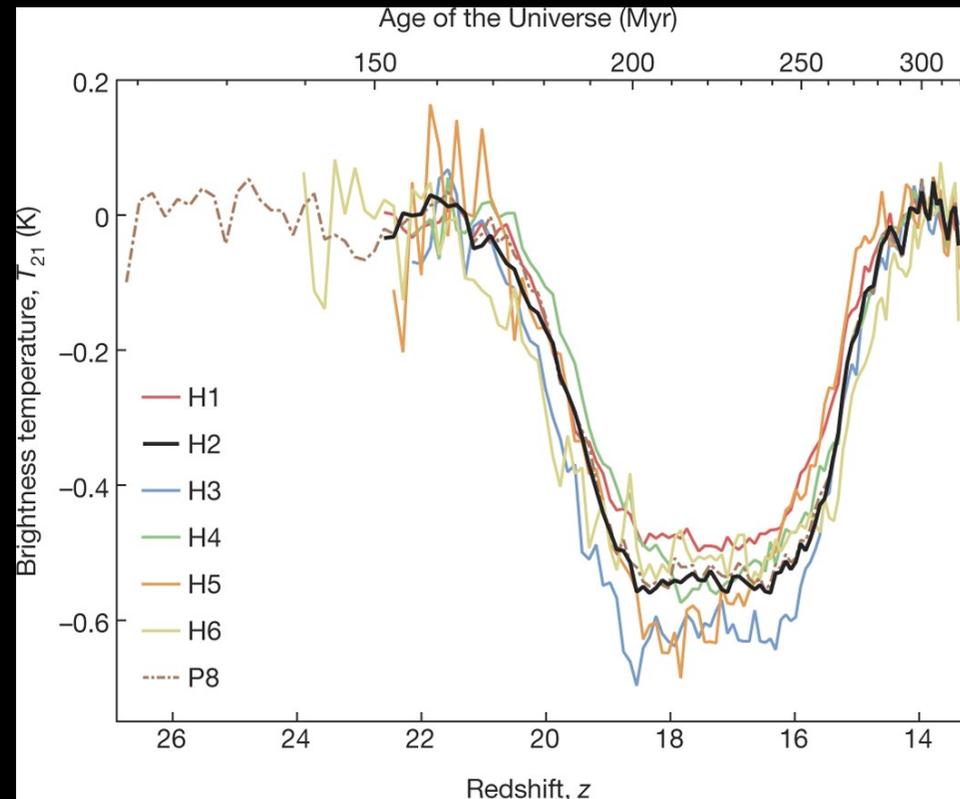
大雑把に言うと

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

のとき輝線

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

のとき吸収線



報告された21-cm線グローバルシグナル
Bowman et al., 2018 (Nature, 555, 67)

21cm線グローバルシグナル

観測量

$$\delta T_b \cong 27 x_{\text{HI}} \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_{\text{spin}}} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} \quad [\text{mK}]$$

大雑把に言うと

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

のとき輝線

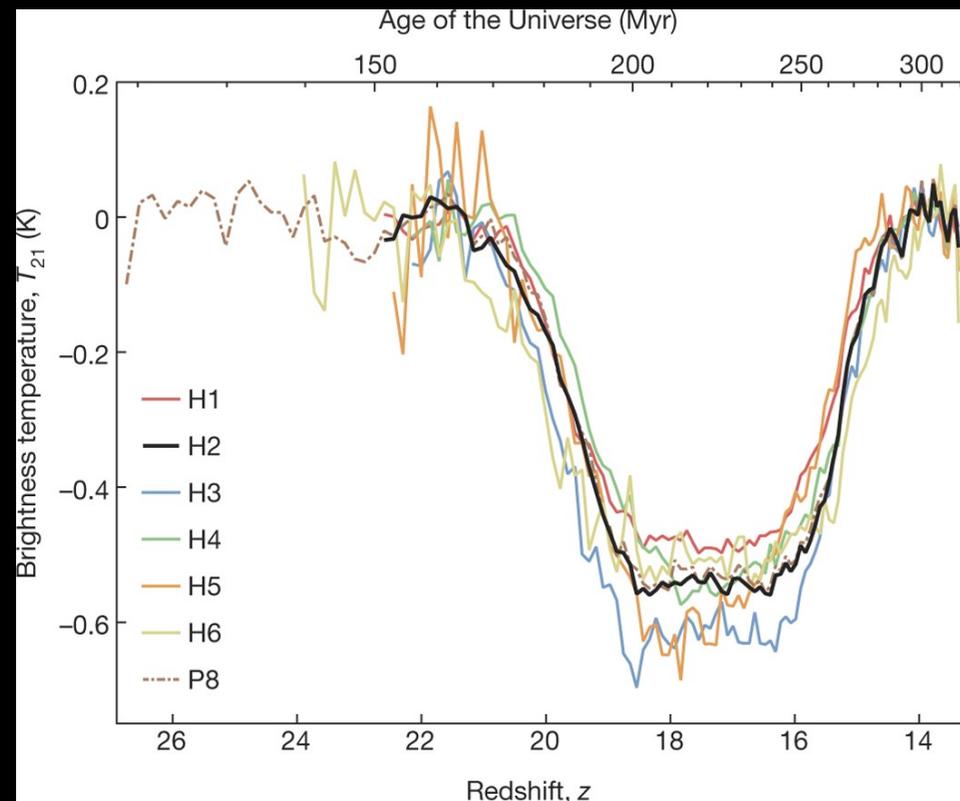
$$T_K \leq T_{\text{spin}} \leq T_\gamma$$

のとき吸収線

本研究では

z~17 の暗黒時代の

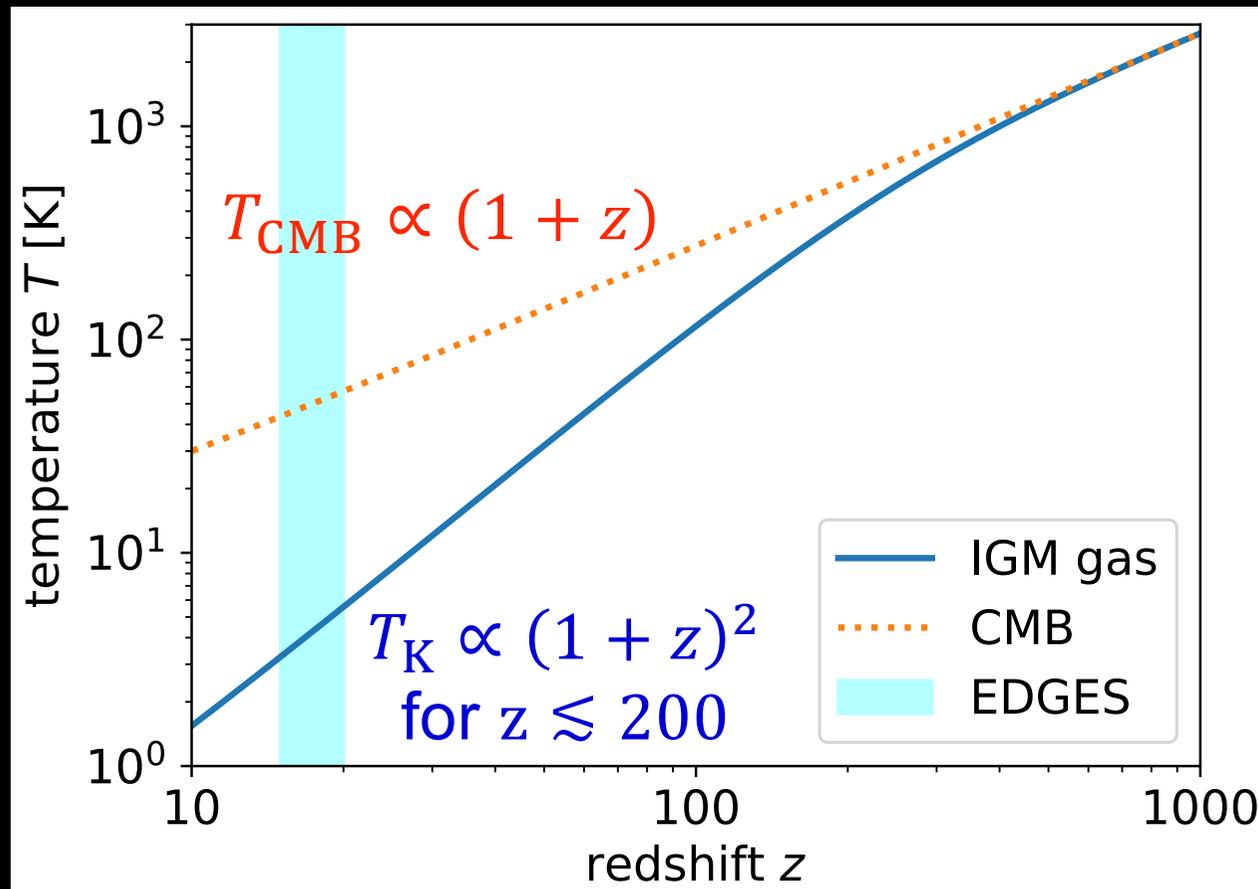
吸収線に着目！



報告された21-cm線グローバルシグナル
Bowman et al., 2018 (Nature, 555, 67)

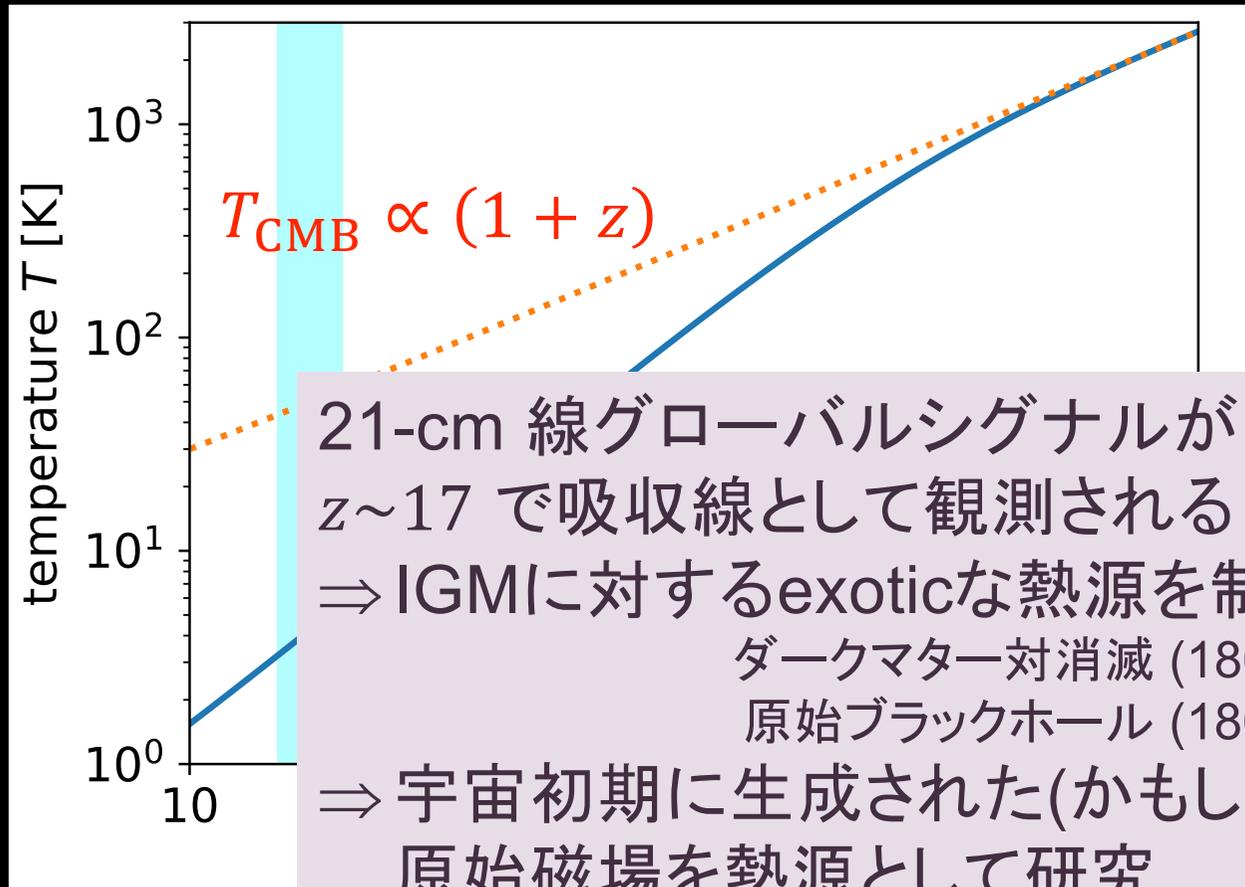
暗黒時代の*thermal history*

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

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

↓
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

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

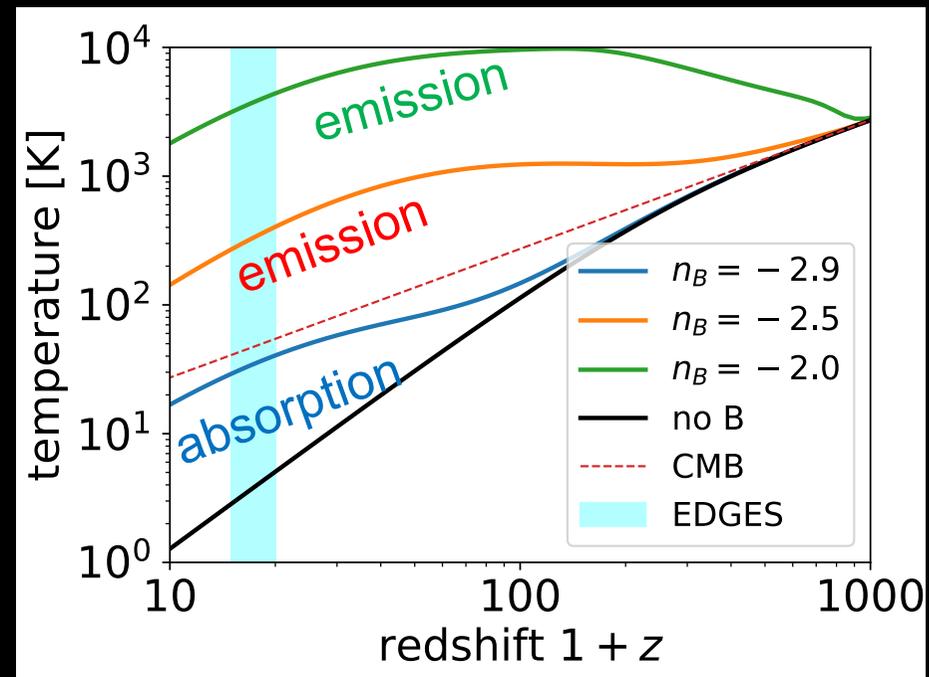
Compton散乱による効果

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)



($B_{1\text{Mpc}} = 0.1 \text{ nG}$)

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

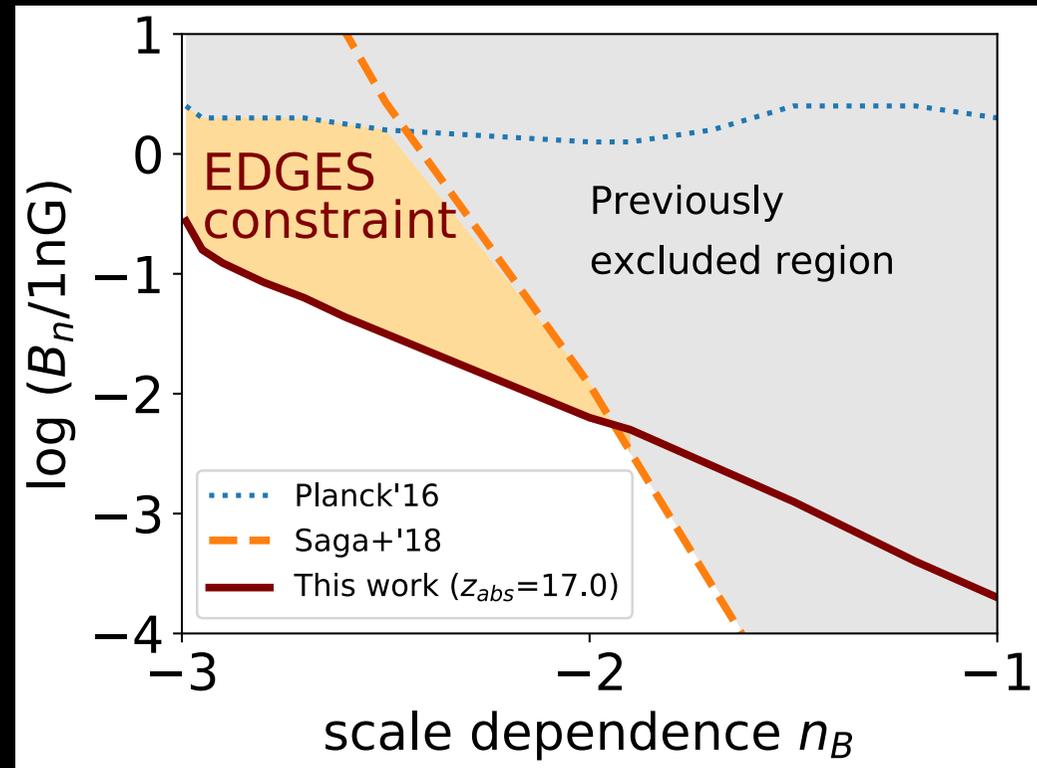
$$T_K < T_{\text{CMB}} \quad (\text{for } z \sim 17)$$

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 暗黒時代の磁場に制限を与えた
 $B_{1 \text{ Mpc}} \leq 0.1 \text{ nG}$ という制限を得た
(特に $n_B < -2$ に対してはこれまでで最も強い制限)