



Phys. Rev. D, <u>96</u>, 123525 arXív:1705.10054

原始磁場が生成する 宇宙マイクロ波背景放射 の温度ゆらぎ

<u>箕田鉄兵</u>、長谷川賢二、田代寛之、 市來淨與、杉山直(名古屋大学 理学研究科)



1. イントロ

・原始磁場について + 観測的制限

#### 2. <u>研究目的・内容</u>

- ・原始磁場を考慮した構造形成理論
- スニヤエフ・ゼルドビッチ効果
- 3. <u>計算手法</u>
- 4. <u>計算結果</u>
  - ・密度・温度の宇宙論的進化
  - CMBの温度ゆらぎの予言

1/32

# 宇宙における磁場の存在



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



2/32

# 宇宙における磁場の存在









#### CMB(宇宙マイクロ波背景放射) による原始磁場の制限



## 原始磁場の観測的制限

#### 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)







8/32

▶宇宙年齢

credit: Planck



~38万年





9/32

·宇宙年齢







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

10/32

ior

双極性散逸の概念図



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

### <u> 双極性散逸とは?</u>

<u>中性粒子</u> 流体の運動のみ <u>荷電粒子</u> 流体の運動+磁場の影響

> 相対速度が発生



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

### <u> 双極性散逸とは?</u>

<u>中性粒子</u> 流体の運動のみ <u>荷電粒子</u> 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



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



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



## スニヤエフ・ゼルドビッチ効果



# スニヤエフ・ゼルドビッチ効果





17/32

が決定



### 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



(Jedamzik+, 1998, PRD, 57)

18/32



19/32

### 計算手法

#### ①非一様な磁場の三次元分布を数値的に配置





#### 密度の進化について:バリオン流体の基礎方程式

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_{\rm b}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{\rm b} \mathbf{u}_{\rm b}) = 0 & \overline{\mathrm{d}} \mathbf{u}_{\rm b} \mathrm{d} \mathbf{u}_{\rm b} \\ \frac{\partial \mathbf{u}_{\rm b}}{\partial t} + (\mathbf{u}_{\rm b} \cdot \nabla) \mathbf{u}_{\rm b} = -\frac{\nabla p}{\rho_{\rm b}} + \frac{(\nabla \times \mathbf{B}_{0}) \times \mathbf{B}_{0}}{4\pi \rho_{\rm b}} - \nabla \Phi \\ \overline{\mathrm{ED}} & \overline{\mathrm{ED}} \end{cases}$$

密度場の背景からのズレを定義  $\rho_{\rm b} = \bar{\rho}_{\rm b}(1+\delta_{\rm b})$ 摂動の2次以上を無視 (密度ゆらぎは小さい, $\delta_{\rm b} \ll 1$ )  $\ddot{\delta}_{\rm b} + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{\delta}_{\rm b} - 4\pi G[\bar{\rho}_{\rm c}\delta_{\rm c} + \bar{\rho}_{\rm b}\delta_{\rm b}] = \frac{\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}_0) \times \mathbf{B}_0}{4\pi \bar{\rho}_{\rm b,0} a^3}$ 

21/32

## 計算手法



### 計算手法

### ③ y-パラメータからCMBの温度ゆらぎを計算する







ローレンツカ [x10<sup>5</sup> nG<sup>2</sup> Mpc<sup>-2</sup>] z=10.471285 ガスの数密度 [ cm<sup>-3</sup>] z=10.471285 ガス温度 [x10<sup>4</sup>K] z=10.471285







25/32



3

2

1

0

x [Mpc]



















- ・磁場の起源の候補として**原始磁場**に着目した
- B1Mpc~0.5 nGの原始磁場が<u>暗黒時代</u>の構造形成に
   与える影響を調べた
- ・バリオンガスの<u>密度と温度</u>を矛盾なく計算して, <u>反相関関係</u>が生じることを示した
- ・観測量として、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果によるCMBの温度揺らぎを計算した







~3億年

宇宙年齡

4/32










目的:原始磁場が暗黒時代のガスの進化および CMBの温度ゆらぎに与える影響を考察

#### [計算の方針]

①原始磁場の非一様性を考慮

② ガスの温度進化と密度進化を計算

③ ガスとの散乱によりつくられる

CMBの温度ゆらぎを計算

### 磁場を考慮した構造形成

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

双極性散逸による加熱率  $\Gamma = \frac{|(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}|^2}{16\pi^2 \xi \rho_{\rm b}^2} \frac{(1-x_{\rm i})}{x_{\rm i}}$ *ρ*<sub>b</sub>: バリオン質量密度  $x_{i}: 水素原子の電離度$ 衝突率 $\xi = \frac{\langle w \sigma_{
m in} 
angle}{m_{
m i} + m_{
m n}}$  $\simeq 3.5 \times 10^{13} \ [\text{cm}^3/\text{g/s}]$ (Draine+, 1983, ApJ, 270)



10/20

## 磁場を考慮した構造形成

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

$$\frac{dT_{gas}}{dt} = -2H(t)T_{gas} = rallele terms for the second state of the secon$$

11/20













### 磁場を考慮した構造形成

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



12/20

# スニヤエフ・ゼルドビッチ効果



# スニヤエフ・ゼルドビッチ効果



#### 本研究で使用した原始磁場のモデル一覧

原始磁場のモデル	$B_n$ [nG]	$n_B$	$\lambda_c \; [\rm kpc]$	計算領域の一辺 [Mpc]	最小格子長 [kpc]
1	0.5	2.0	318	2.0	31.25
2	0.5	1.0	263	1.0	15.625
3	0.5	0.0	201	1.0	15.625
4	0.5	-1.0	135	1.0	15.625
5	0.1	2.0	200	1.0	15.625
6	0.1	1.0	154	1.0	15.625
7	0.1	0.0	106	1.0	15.625
8	0.1	-1.0	60.3	0.5	7.8125
9	0.05	2.0	165	1.0	15.625
10	0.05	1.0	122	1.0	15.625
11	0.05	0.0	80.1	0.5	7.8125
12	0.05	-1.0	42.6	0.25	3.90625
13	0.01	2.0	104	0.5	7.8125
14	0.01	1.0	71.3	0.5	7.8125
15	0.01	0.0	42.1	0.25	3.90625
16	0.01	-1.0	19.1	0.25	3.90625

### 計算手法



### 衝突による冷却率の係数

熱的制動放射  

$$\begin{aligned}
& G = 1.42 \times 10^{-27} T_{\text{gas}}^{0.5} \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Psi = 7.5 \times 10^{-19} \left( 1 + T_5^{0.5} \right)^{-1} \exp \left( -\frac{1.18}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 6.50 \times 10^{-27} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{T_3(1+T_6)} \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 8.62 \\
& \zeta = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.58}{T_5} \right) \quad [\text{erg cm}^3 \text{ s}^{-1}] \\
& \Pi = 1.27 \times 10^{-21} \frac{T_{\text{gas}}^{0.5}}{1+T_5^{0.5}} \exp \left( -\frac{1.57}{T_5} \right)$$

(Fukugita & Kawasaki, 1994, MNRAS, 269)



$$\begin{aligned} \frac{dx_{i}}{dt} &= \begin{bmatrix} -\alpha_{e}n_{b}x_{i}^{2} + \beta_{e}(1-x_{i})\exp\left(-\frac{E_{12}}{k_{B}T_{\gamma}}\right) \end{bmatrix} D + \gamma_{e}n_{b}(1-x_{i})x_{i} \\ & \text{ 衝突電離} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TMBによる光電離} \\ \alpha_{e} &= 1.14 \times 10^{-13} \times \frac{4.309 \ T_{4}^{-0.6166}}{1+0.6703 \ T_{4}^{0.5300}} \ [\text{cm}^{3} \ \text{s}^{-1}] \\ \beta_{e} &= \alpha_{e} \left(\frac{2\pi m_{e}k_{B}T_{\gamma}}{h_{\text{Pl}}^{2}}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{E_{2s}}{k_{B}T_{\gamma}}\right) \ [\text{s}^{-1}] \\ \gamma_{e} &= 0.291 \times 10^{-7} \times U^{0.39} \frac{\exp(-U)}{0.232 + U} \ [\text{cm}^{3}\text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

### スニヤエフ・ゼルドビッチ効果











#### 本研究 (Minoda et al., 2017, PRD, 96)



### 領域ごとの物理量の違い



コンプトン散乱のyパラメータ
$$y(\hat{n},l) \equiv rac{k_{\rm B}\sigma_{\rm T}}{m_{\rm e}c^2} \int_0^l n_{\rm e}(\hat{n},l') T_{\rm e}(\hat{n},l') \ dl'$$

原始磁場によるSZ効果は 低密度領域の寄与が重要!



#### 本研究で使用した原始磁場のモデル一覧

原始磁場のモデル	$B_n$ [nG]	$n_B$	$\lambda_c \; [\mathrm{kpc}]$	計算領域の一辺 [Mpc]	最小格子長 [kpc]
1	0.5	2.0	318	2.0	31.25
2	0.5	1.0	263	1.0	15.625
3	0.5	0.0	201	1.0	15.625
4	0.5	-1.0	135	1.0	15.625
5	0.1	2.0	200	1.0	15.625
6	0.1	1.0	154	1.0	15.625
7	0.1	0.0	106	1.0	15.625
8	0.1	-1.0	60.3	0.5	7.8125
9	0.05	2.0	165	1.0	15.625
10	0.05	1.0	122	1.0	15.625
11	0.05	0.0	80.1	0.5	7.8125
12	0.05	-1.0	42.6	0.25	3.90625
13	0.01	2.0	104	0.5	7.8125
14	0.01	1.0	71.3	0.5	7.8125
15	0.01	0.0	42.1	0.25	3.90625
16	0.01	-1.0	19.1	0.25	3.90625











#### Physical Principle of Cosmology, Peebles, 1993

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{x}{1+x} \frac{8\sigma_t a T^4}{3m_e c} (T - T_e), \qquad (6.134)$$

Where x is the fractional ionization (eq. [6.94]). The factor x/(1+x) takes account of the fact that when a hydrogen atom is ionized it produces two particles to share the thermal energy. The electrons exchange energy with the CBR; collisions among the particles keeps them all at the same temperature.

#### 宇宙マイクロ波背景放射



初期宇宙では,陽子・電子・光子は 一成分流体としてふるまう(=バリオン光子流体)

#### 宇宙マイクロ波背景放射 雷-オン光子流 コン散乱 ソン散乱 (e<sup>-</sup> nn M $\mathcal{N}\mathcal{V}$ 光子 $\sim$ 初期宇宙では、陽子・電子・光子は 一成分流体としてふるまう(=バリオン光子流体)

#### 宇宙の晴れ上がり

н

オン光子流体



### 宇宙の晴れ上がり



### 宇宙の晴れ上がり

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)





~38万年

▶宇宙年齢







#### 宇宙における磁場の起源

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











# 

