



第 16

Ц

核物

理 × 物

性セミナ

自己紹介

氏名: 山崎大

(同姓同名多数のため、論文ではDai G. Yamazaki) 学位: 理学博士(東京大学) 身分: 学習支援員/特別客員研究員 所属: 千葉工業大学/国立天文台 専門: 精密宇宙論、特に宇宙背景放射、構造形成、原初磁場

趣味:筋トレ、水泳、ジョギング、CG、ゲーム、ピアノ

暮らした所:

山口県防府市 -> 茨城県土浦市-> 北海道札幌市 -> 三重県小俣町(現伊勢市) -> 埼玉県和光市 -> 栃木県宇都宮市 -> 三重県明和町 -> 千葉県木更津市 -> 山口県防府市 -> 宮城県仙台市 -> 東京都三鷹市 -> 中華民国(台湾)台北市 ->東京都三鷹市 -> 東京都調布市 -> 千葉県千葉市

行ったことがない県(一泊以上したことがない): 新潟、石川、福井、徳島、香川、高知、宮崎



宇宙背景放射の導入と、 最新の観測結果の紹介。

宇宙論における、原初磁場を考慮した 理論研究について説明。

原初磁場を考慮した次世代の精密宇宙論がどのように展開されるか紹介する。

Yamazaki, et al. Physics Reports 517, pp. 141-167, (2012) Yamazaki, Phys. Rev. D 89, 083528(2014) [arXiv:1311.2584], Yamazaki, submitted (2014), Yamazaki, preparation (2014).



1. 研究背景

i. 宇宙背景放射とその偏光揺らぎ ii. 最近の動向

- 2. 原初磁場と宇宙背景放射
 i. 原初磁場の影響
 ii. これまでの研究
 iii. 原初磁場効果の修正
- 原初磁場を考慮した精密宇宙論
 i. 原初磁場とビッグバン元素合成
 ii. 将来の超大型観測計画SKAと原初磁場
- 4. まとめ



研究背景 i. 宇宙背景放射とその偏光揺らぎ ii. 最近の動向

- 原初磁場と宇宙背景放射
 i. 原初磁場の影響
 ii. これまでの研究
 iii. 原初磁場効果の修正
- 原初磁場を考慮した精密宇宙論

 原初磁場とビッグバン元素合成

 将来の超大型観測計画SKAと原初磁場





研究背景 i. 宇宙背景放射とその偏光揺らぎ ii. 最近の動向

原初磁場と宇宙背景放射
 i. 原初磁場の影響
 ii. これまでの研究
 iii. 原初磁場効果の修正

4. まとめ





マイクロ波 =波長 0.1mmから1m、 周波数 300MHzから3THzの電波 赤外線と電波の境界

> = 電波の中で一番波長が小さい(Micro-)な 電波(マイクロメートルという意味ではない)

言葉を分解

背景 = 一番後ろ=一番遠く

放射 =光、電磁波、輻射 Cosmic Microwave Background: CMB





電子と陽子の結合し中性な水素原子を形



宇宙背景放射の観測の歴史

1964年 アーノ・ペンジアスとロバート・W・ウィルソンが、 アンテナの雑音を徹底的に除去する研究中に偶然に発見。 1978年にノーベル物理学賞。



1992年 COBEによって1/100,000の温度揺らぎを発見

2003年 WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)が小さい角度スケールまで揺らぎ測定

2013年 PlanckがWMAPより二分の一小さい角度スケールまで揺らぎ測定 現時点では、WMAPの結果より宇宙年齢が少し若くなる可能性を示唆





満月=約31分=約0.52度



宇宙背景放射の温度揺らぎ



宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎ



〇宇宙の全方向から観測される黒体放射。温度は約2.725K
 〇宇宙がかつて高温であったことの証拠
 〇ビッグバン宇宙論やビッグバン元素合成理論の観測的証拠となる。
 〇起源:インフレーション時に存在した量子揺らぎが起源か。
 〇この温度揺らぎが、背景放射生成後の宇宙の大規模構造の種となる



何がわかったの

30

宇宙背景放射の研究による宇宙論像の精密決定

●宇宙年齢:138±2億年

●宇宙の物質・エネルギーの組成:

・ダークエネルギー(負の圧力を持ち、実質的に「反発する重力」)68.3%

・ダークマター(重力以外で相互作用しない物質) 26.8%

・バリオン (重力以外とも相互作用する物質) 4.9%



何がわ

か

う

た

 \mathcal{O}



偏光とは





E mode: 偏光の強度変化が、回転に対してパリティ変換に対して不変 B- mode: 偏光の強度変化が、回転に対してパリティ変換に対して不変で ない 偏 光

 \mathcal{O}

種

類

パリティ変換に対応する数学的概念:点対称や軸対象 E-mode: 点対称 B-mode: 点対称でない





密度場の揺らぎ





密度場と偏光





重力場が時間変化することで生じる 空間の歪みの伝播

重力波と四重極



重力波と四重極



重力波と四重極





密度揺らぎによる偏光

偏光は、密度揺らぎが変化する方向に

垂直か平行:Eモード

重力波のような×モードに対応した密度揺らぎの変化がないためBモードは生み出さない。

重力波による偏光

+モード重カ波: 偏光は重力波が伝わる方向に <u>
垂直か平行: Eモード</u>

×モード重力波: 偏光は重力波が伝わる方向に ±45度傾く: Bモード





Detection of B-mode Polarization in the Cosmic Microwave Background with Data from the South Pole Telescope: arXiv:1307.5830 <u>D. Hanson</u> et al. Phys. Rev. Lett. 111, 141301 (2013)



重カレンズによるB modeの予想マップを B-modeを抽出するためのテンプレートとして使い、 重カレンズ由来のB-modeを制限。

残念ながら検出ではない

Ħ 揺らぎの Detection of B-mode Polarization in the Cosmic Microwave Background with Data from the South Pole Telescope: arXiv:1307.5830 <u>D. Hanson</u> et al. Phys. Rev. Lett. 111, 141301 (2013)



重カレンズによるB modeの予想マップを B- modeを抽出するためのテンプレートとして使い、 重カレンズ由来のB-modeを制限。 揺らぎの

BICEP2 2014 I: Detection of B-mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2 The BICEP2 Collaboration, Phys. Rev. Lett. 112, 241101, 2014



らぎの

BICEP2 2014 I: Detection of B-mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2 The BICEP2 Collaboration, Phys. Rev. Lett. 112, 241101, 2014

Date: 06 May 2014



Planck intermediate results. XXX. The angular power spectrum of polarized dust emission at intermediate and high Galactic latitudes <u>Planck Collaboration</u>, arXiv:1409.5738

銀河のダストのデータが不十分。BICEP2の結果はダストの影響が排除しきれていない。

研究背景 i. 宇宙背景放射とその偏光揺らぎ ii. 最近の動向

- 2. 原初磁場と宇宙背景放射
 i. 原初磁場の影響
 ii. これまでの研究
 iii. 原初磁場効果の修正
- 原初磁場を考慮した精密宇宙論
 i. 宇宙背景放射からの制限
 ii. 原初磁場とビッグバン元素合成
 iii. 将来の超大型観測計画SKAと原初磁場



4. まとめ

研究背景 i. 宇宙背景放射とその偏光揺らぎ ii. 最近の動向

2. 原初磁場と宇宙背景放射 i. 原初磁場の影響 ii. これまでの研究

iii. 原初磁場効果の修正

4. まとめ





磁場研究の背景

●宇宙磁場の観測:銀河団スケール

ファラデー回転で銀河団スケールの磁場を測定

$B\sim 0.1 \mu G - 1.0 \mu G$

on Hercules, Perseus-Pisces, Abell 2255 (Clarke et al 2001; Xu et al.2006, Govoni et al 2006)







原初磁場と初期宇宙(Mack et al, 2002, Lewis 2004) 原初磁場=B₀=1 nG – 10 nG 磁場研究 **磁場がscale invariance なら** 宇宙背景放射の温度揺らぎと同等 \mathcal{O} 背景 宇宙背景放射や初期密度場から制限が可能

原初磁場は宇宙背景放射に影響を及ぼす

Review paper: Yamazaki et al., Physics Reports, 517, p. 141-167. [arXiv: 1204.3669]

過去の研究は、<mark>原初磁場</mark>のエネルギー密度 や音速に対する影響への考慮が中途半端。

原初磁場のエネルギー密度と音速に対する影響を正しく考慮して、
原初磁場の宇宙背景
放射への影響を解析してみた。

Yamazaki, Phys. Rev. D 89, 083528(2014) [arXiv:1311.2584], Yamazaki, submitted (2014), Yamazaki, preparation (2014).



研究背景 i. 宇宙背景放射とその偏光揺らぎ ii. 最近の動向

原初磁場と宇宙背景放射 i. 原初磁場の影響 ii. これまでの研究 iii. 原初磁場効果の修正

原初磁場を考慮した精密宇宙論

 原初磁場とビッグバン元素合成

 将来の超大型観測計画SKAと原初磁場







1.ローレンツカにより、電離バリオンのベクトルが変化。 2.光子はトムソン散乱によってバリオンの影響を受けるため、 磁場は、間接的に光子のベクトル成分が変化させる。

1.原初磁場のスペクトルの数値計算

Yamazaki et al., PRD 74, 123518(2006). Yamazaki et al., PRD 78, 123001(2008).



↑努力でカバー

定量的研究に最適な数値計算コードを開発、計算機環境も自ら整備して、 ソフト、ハード両面において広範囲のパラメータサーチを可能にした。



研究背景 i. 宇宙背景放射とその偏光揺らぎ ii. 最近の動向

2. 原初磁場と宇宙背景放射

- i. 原初磁場の影響
- ii. これまでの研究

iii. 原初磁場効果の修正

原初磁場を考慮した精密宇宙論 原初磁場とビッグバン元素合成 将来の超大型観測計画SKAと原初磁場

4. まとめ



線形摂動論

[物理量] = [0次](摂動なし) + [1次](1次の摂動)

[]





線形摂動論

[物理量] = [0次](摂動なし) + [1次](1次の摂動)

∝磁場のエネルギー密度

原初磁場効果の修

原初磁場の影響:エネルギー密度 $\rho_{\rm R} = (\rho_{\gamma} + \rho_{\nu} + \rho_{\rm MF}) \propto a^{-4}, \quad \rho_{\rm M} = (\rho_{\rm CDM} + \rho_{\rm b}) \propto a^{-3}, \\ \rho_{\gamma}: \text{photon } \rho_{\nu}: \text{neutrino } \rho_{\rm CDM}: \text{cold dark matter} \\ \rho_{\rm b}: \text{baryon } \rho_{\rm MF}: \text{magnetic field} \quad a: \text{scale factor,}$

 a_{eq} : matter-radiation equality time,

$$a_{\mathrm{eq}} = \frac{\rho_{\mathrm{M}}(a=1)}{\rho_{\mathrm{R}}(a=1)}$$

原初磁場のエネルギー密度が十分 大きいと、等密度期がより遅くなる。 early ISWの効果と放射の影響によ る重カポテンシャルの崩壊の効果 が強くなり、比較的大きい角度ス ケールの振幅を大きくする。



原 初 Ê ŧ 背星泉

Au et al, 2001

1000

100

(b) Matter

100

 $\begin{bmatrix} l(l+1)C_l/2\pi \end{bmatrix}^{1/2} (\mu K)$

20

原初磁場の影響:音速

$$\left|\delta_{\gamma}^{(S)}(\eta) + \psi\right| = \left[\left(\frac{2}{3} - \frac{1}{3c_{S}^{2}}\right)\cos(kd_{S}) + \left(\frac{1}{3c_{S}^{2}} - 1\right)\right]|\psi|$$

 $\delta_{\gamma}^{(S)}$: the photon perturbation of the scalar mode η : the conformal
 ψ : the potential d_{S} : the sound horizon scale k : wavenumber
 $c_{S}^{2} = c_{\gamma b}^{2} + \frac{c_{A}^{2}}{2}$ $c_{\gamma b}^{2} = \frac{1}{3(1+R)}$ $R = \frac{3}{4}\frac{\rho_{b}}{\rho_{\gamma}}$ $c_{A}^{2} = \frac{2\rho_{MF}}{\rho_{b} + \rho_{\gamma}}$
 ρ_{γ} : photon ρ_{b} : baryon ρ_{MF} : magnetic field

原初磁場は、強結合した光子-バ リオン流体の音速を増加させる。 奇数番目と偶数番目のピークの 高低差を小さくし、ピークの位置 を大きい角度スケールにシフト させる。

原

場と字

背景放

time

見た目はバリオン密度の減少と似た振る舞い。



1stピークと2ndピークの高低差は、音響振動において音速が増加した効果が支配的になり、減少幅が大きい。

ある程度小さい角度スケールでは、ピークの位置のシフトが見えている。 定量的には同じエネルギーの場合、比較的小さいスケールの影響は比 較的小さい。 結果と議論

CDMやバリオンとの相関

バリオンやダークマターと強く相関する可能性。 宇宙背景放射から磁場を制限する際、他の宇宙論 パラメータをフリーにする必要がある。

原初磁場のエネルギー密度を正しく考慮した場合は、 matter power spectrumの振幅を下げる。

Weak lensing effect の効果を減少させる。

3

2

原 かと 溝 造成

Ħ 揺らぎと 原初磁場のエネルギー密度を正しく考慮 OCMBの温度揺らぎの1st peak付近を減少させる。 Oエネルギー密度の効果は1st peak 付近に、 摂動磁場の影響は、比較的小さい角度スケールで強 くなる。

〇パラメータ依存

n_B < -2.0 では、摂動磁場の影響が先に現れる。 従来の方法で十分

 $n_{\rm B} > -2.0$ では、エネルギー密度の影響が無視できなくなる。 正しく原初磁場の効果を考慮するべき

Oバリオンやダークマターと強く相関する可能性。 CMBから磁場を制限する際、他の宇宙論パラメー タをフリーにする必要がある。

Matter power spectrum を減少させる。 Weak lensing 効果を減少させる。 Weak lensing を起源とするBB modeが小さくなる。

研究背景 i. 宇宙背景放射とその偏光揺らぎ ii. 最近の動向

原初磁場と宇宙背景放射
 i. 原初磁場の影響
 ii. これまでの研究
 iii. 原初磁場効果の修正

5. 原初磁場を考慮した精密宇宙論
 i. 原初磁場とビッグバン元素合成
 ii. 将来の超大型観測計画SKAと原初磁場

4. まとめ

研究背景 i. 宇宙背景放射とその偏光揺らぎ ii. 最近の動向

原初磁場と宇宙背景放射
 i. 原初磁場の影響
 ii. これまでの研究
 iii. 原初磁場効果の修正

5. 原初磁場を考慮した精密宇宙論
 i. 原初磁場とビッグバン元素合成
 ii. 将来の超大型観測計画SKAと原初磁場

1.研究背景と先行研究

●光子冷却

Kusakabe et.al., Phys.Lett. B718 (2013) 704-708

ビッグバン元素合成終了後に光子冷却 第一候補:axionへのエネルギー変移? ここでは、axion にとらわれず、

ter ビッグバン元素合成終了以降に急激に光子 が冷却したと仮定する。

(平衡状態に落ち着くための十分な時間があると仮定して、冷却は十分早期に終了するものとする)

⁷Liの量を減らすが十分ではない。 重水素を過剰生産。

1.研究背景と先行研究

<mark>重水素は、光分解反応優勢なら減少。</mark>⁴Heの光分解が優勢である場合は増加 ⁶Liは, secondary processes により増加。Pによる破壊の効果は小さい。

Model		SBBN	γ -cooling	X particle	B field
$\eta \ (\times 10^{10})$		6.19 ± 0.14	$4.57 \pm 0.10^{\ a}$ 6.19 ± 0.14		
Nuclide	Observation				
$Y_{\rm p}~(^{4}{\rm He})$	$0.2345 - 0.2777^{b}$	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
$\mathrm{D/H}~(imes 10^5)$	2.37 – 2.85	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
$^{3}\mathrm{He/H}~(imes 10^{5})$	$0\!\!-\!\!3.1$	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
$^{7}{ m Li/H}~(imes 10^{10})$	$1.06{-}2.35~^c$	-	?	-	-

⁶Li/ 個々のモデルでは7Li 問題解決は難しい X粒子 + 光子冷却 + 原初磁場でBBNを計算し観測と比較。 光子冷却の効果のもと: barion to photon = 4.57X10⁻¹⁰ Likelihood analysis によって下記のパラメータを制限

3.結果:パラメータ制限

4.まとめ

•原初磁場+X粒子+光子冷却を考慮した理論計算と観 測の比較により、X粒子と原初磁場のパラメータを制 $4.06 < \log_{10}(\tau_X[\text{sec}]) < 6.10 (2\sigma, 95\% \text{ C.L.})$ $B = 1.89 a^{-2} \mu \text{G}$ (the best fit), $-9.70 < \log_{10}(\zeta_X[\text{GeV}]) < -6.23 (2\sigma, 95\% \text{ C.L.})$ $< 3.05 a^{-2} \mu \text{G} (2\sigma, 95\% \text{ C.L.})$

●7Liの観測と矛盾のないモデルであること確認。

TABLE I: Agreement with observed light element abundances for the five models considered here.

Model		SBBN	γ -cooling	X particle	B field	$\gamma ext{-cooling} + X ext{ particle} \ + B ext{ field}$
$\eta~(\times 10^{10})$		6.19 ± 0.14	$4.57 \pm 0.10^{\ a}$	6.19 ± 0.14		$4.57 \pm 0.10^{\ a}$
Nuclide	Observation					
$Y_{\rm p}~(^{4}{\rm He})$	$0.2345 - 0.2777^{b}$	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
$\mathrm{D/H}~(imes 10^5)$	2.37 – 2.85	\checkmark	_	\checkmark	\checkmark	\checkmark
$^{3}\mathrm{He}/\mathrm{H}~(\times 10^{5})$	$0\!-\!3.1$	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
$^{7}{ m Li/H}~(imes 10^{10})$	$1.06{-}2.35~^c$	_	?	-	-	\checkmark
$^{6}{ m Li/H}~(imes 10^{12})$	$0–9.5$ d	\checkmark	\checkmark	$\checkmark({\rm high})$	\checkmark	\checkmark (high)

 $a_{m} = (9/2)3/4_{m}$ [7.91]

Square Kilometre Array (SKA)

観測装置を数百の基地局に分けて数千kmの範囲に配置 視野:200平方度(満月は0.2平方度)、 空間分解能:0.1秒角、波長域:センチ波・メートル波 銀河、銀河団間の宇宙磁場:SKAが解明を目指す主要な研究テーマ SKAが観測できる波長帯は、磁場の測定につながる ファラデー回転観測に有効。

SKAに向けた宇宙磁場と銀河の相関の調査と宇宙磁場生成・進化の制限 共同研究者(敬称略):赤堀卓也(シドニー大学),市來浄與(名古屋大学)、高橋慶太郎(熊本大学)

SKAによるファラデー回転の観測に先立ち、 偏光源と我々の間の宇宙空間にある磁場と銀河の個数 分布の相関を、ファラデー回転のカタログ(NVSS)[7]と、 銀河分布のカタログ(SDSS DR9)[6]を使い調査。銀河や 銀河間の磁場の分布、生成、および時間進化を考察

磁場の有無は、恒星の形成や進化、そして超新星爆発等に影響を与える。 これらの天体や現象は、宇宙の化学進化と強く結びついている。 天体形成から我々の身の回りを形作る元素組成の決定にいたるまで、 幅広い研究分野に一石を投じる。

この手法をSKAが将来もたらす結果に応用すれば、 宇宙磁場研究の飛躍的発展に貢献できる。

●宇宙背景放射、特に、偏光揺らぎは、 原初磁場なしでは語れない。

●ビッグバン元素合成や大規模構造形成の 精密な研究には原初磁場を考慮すべき。

●次世代超大型観測計画SKAが成功すれば、 原初磁場の進化の過程や、初期天体形成に 対する影響を解明できる。

Yamazaki, et al. Physics Reports 517, pp. 141-167, (2012) Yamazaki, Phys. Rev. D 89, 083528(2014) [arXiv:1311.2584], Yamazaki, submitted (2014), Yamazaki, preparation (2014).

