

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871055

研究課題名(和文)原初磁場を考慮した宇宙論・宇宙物理学の展開

研究課題名(英文)Development of Cosmology and Astrophysics with a primordial magnetic field

研究代表者

山崎 大(Yamazaki, Dai)

茨城大学・大学教育センター・准教授

研究者番号：90531822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：原初磁場を正しく考慮した場合、宇宙膨張の速度と宇宙初期の音速を増加させることが分かった。この結果をもとに、研究を進め、原初磁場は、(1)観測量と矛盾がないリチウムを生成できるビッグバン元素合成を可能にすること、(2)宇宙背景放射温度揺らぎの最初のピークの位置を大きいスケールの方へずらし、振幅も小さくすること、(3)物質揺らぎの比較的小さいスケールの振幅を減少させること、(4)弱レンズ効果 由来の宇宙背景放射偏光揺らぎの振幅を減少させること、(5)宇宙論パラメータ、特に暗黒物質とバリオン密度の決定に無視できない影響を与えること、を解明した。

研究成果の概要(英文)：We study effects of a primordial magnetic field (PMF) on the cosmology, and make clear that a PMF enhances the cosmic expansion rate and the sound speed of the cosmic fluid. We, also illustrate that, (1) the big bang nucleosynthesis (BBN) with a primordial magnetic field (PMF) can deduce the lithium abundance consisted with the observations, (2) the first peak is temperature fluctuations of the cosmic microwave background (CMB) is shifted to larger scale and its amplitude is suppressed by the PMF, (3) the amplitude of the matter power spectrum (MPS) on smaller scales is suppressed by a PMF, (4) the amplitude of the polarization anisotropies of the CMB from the weak lensing effects is suppressed by a PMF, (5) a PMF affect the constraint of the cosmological parameters, specifically the dark matter and baryon density.

研究分野：宇宙論・宇宙物理学

キーワード：宇宙背景放射 ビッグバン元素合成 磁場

1. 研究開始当初の背景

数マイクロガウスの磁場が観測により銀河団スケールで確認されており、多くの研究者がその起源を探求するために、局所的なものから大局的なものまで多くの磁場生成モデルを提唱してきた。その中でもっとも支持されているシナリオの一つは、初期宇宙において生成された数ナノガウス程度*1の磁場が、電離バリオンに凍結して等方収縮することで約2桁増幅され、現在の数マイクロガウス程度*1の銀河団磁場の起源になったという説である。この背景のもと、私を含む国内外の多くの研究者が、原初磁場の宇宙論における役割を研究している[1-3]。その結果、原初磁場が宇宙論だけでなく天文・天体物理学の主要な分野で重要な役割を担っていることが分かってきた。

我々は、従来の誤差の大きい解析近似で行われていた原初磁場スペクトルの算出方法を改め、数値計算を採用することにより、原初磁場の宇宙背景放射や大規模構造形成に与える影響を精度よく解明してきた。同時に、原初磁場の強度を観測から制限し、原初磁場を考慮したニュートリノの質量を宇宙論的観測から制限した。その結果、原初磁場は、

(1) 銀河団スケールと同等かそれ以下のスケールをピークとして宇宙背景放射の温度・偏光揺らぎを増幅させ、特に、偏光揺らぎでは、観測の矛盾を説明できる有力な候補である[3-7]、

(2) 銀河団スケール以下で物質密度場揺らぎを増幅させる[8]、

(3) 宇宙論的観測からのニュートリノの質量制限の上限を引き上げる効果がある[9]、

ことについて解明した。

また、原初磁場を考慮したビッグバン元素合成についても研究を行い、原初磁場を制限した。従来の研究では、原初磁場を最も強く制限できるのはヘリウム4-水素比であったが、我々の最近の観測による軽元素の制限とバリオン-光子比を採用することにより、重水素-水素比の方がより強く原初磁場を制限できることを突き止めた[10]。同時に power law でスペクトルを与えた原初磁場のパラメータについて考察し、現在観測されている銀河団磁場の強度と矛盾しないパラメータ範囲を絞り込んだ[10]。

2. 研究の目的

最近の宇宙論的観測の精度は著しく向上し、従来の理論手法では説明できない結果も少なからず公表されている。このような観測と理論モデルを比較・検証する際には、技術的な数値精度の向上、統計的信頼性はもちろんのこと、物理的な正確性も求められている。物理的正確性を向上させ、信頼性の高い理論モデルを構築するには、可能性のある物理現象を一つ一つ慎重に検証する必要がある。その検証すべき重要な対象の一つとして原初磁場があり、国内外の研究者に注目されている。そこで、原初磁場を考慮した、ビッグバン元素合成、宇宙背景放射、初期密度場進化の理論研究を進展させ、観測結果と理論計算との比較により、原初磁場の現実的なパラメータ範囲を絞りつつ、原初磁場を考慮した精密宇

宙論・宇宙物理学を展開することが、当研究の目的となる。

*1 磁場は、スケールファクター a ($a=1$ が現在を示す)の a^2 に反比例する。ここでは $a=1$ での値を表記

3. 研究の方法

(1) 宇宙背景放射と初期密度場における原初磁場の影響の研究

今まで見落とされていた原初磁場のエネルギー密度と宇宙論的流体の音速をあげる効果が、宇宙背景放射および matter power spectrum に及ぼす影響を数値的に解析した。

(2) 原初磁場、光子冷却、および X 粒子を考慮した複合ビッグバン元素合成理論モデルの発展とリチウム問題解決策の探求

原初磁場、光子冷却、および X 粒子を考慮した複合ビッグバン元素合成理論を進展させ、観測と理論計算の比較からパラメータを制限しつつ、リチウム問題の解決策を追求した。

(3) 原初磁場のパラメータと宇宙論パラメータの関係の複合的考察

宇宙背景放射、matter power spectrum、ビッグバン元素合成の観測量と理論予想を比較することで、原初磁場の三つのパラメータ、振幅、空間分布の様子を示す power law index、および原初磁場のエネルギー密度の制限について考察し、同時に他の宇宙論パラメータとの相関についても調べた。

4. 研究成果

(1) 原初磁場の宇宙背景放射温度揺らぎへの影響を修正

宇宙背景放射温度揺らぎの最初のピークと位置と振幅から、光子とバリオンが一流体とみなせる時代の音速やポテンシャルの変化の情報を引き出すことができる。原初磁場があると流体の音速が増加し、ポテンシャルの時間進化にも影響を与えるため、宇宙背景放射の最初のピーク付近の観測データからは、磁場の情報も引き出せるはずである。当研究では、この今まで見落とされていた原初磁場が宇宙背景放射に及ぼす影響を初めて解析した。その結果、原初磁場を正しく考慮した場合、宇宙背景放射温度揺らぎの最初のピークの位置を大きいスケールの方へずらし、かつ、振幅を小さくすることがわかった。さらに、宇宙背景放射と理論計算との比較から、原初磁場の生成過程の情報を取り出すことや、原初磁場の非線形領域の時間進化モデルの検証が可能であることを示した[11]。

(2) 複合ビッグバン元素合成理論モデルの発展とリチウム7問題解決策の探求、および、ダークマターと原初磁場の制限

宇宙に存在する元素は、ビッグバン元素合成によりそのほとんどが合成された。ビッグバン元素合成で決まった軽元素組成は、宇宙の再電離、恒星進化や超新星爆発、それらに影響を受ける宇宙の化学進化を決める重要な要素である。ダークマター探査は、素粒子論や宇宙・天体物理において重要なテ

ーマの一つである。そのダークマター候補の一つである X 粒子、光子冷却 および原初磁場を組み合わせることにより、観測されるリチウムが理論予想より不足している問題(リチウム問題)を解決できる可能性を示した。さらに、当研究では、光子の冷却率を理論で予想されている値に固定して、原初磁場のエネルギー密度、X 粒子の質量係数と寿命を、それぞれ、 $B < 3.05 \mu\text{G}$ (95% C.L.), $-9.70 < \log(\xi_X[\text{GeV}]) < -6.23$ (95% C.L.), $4.06 < \log(\tau_X[\text{s}]) < 6.10$ (95% C.L.)、と制限した [12]。

(3) 原初磁場の matter power spectrum への影響を修正

matter power spectrum は、宇宙の初期物質密度場の空間分布を示し、これを調べることで、宇宙の構造進化を知るうえで重要な情報をえることができる。従来の研究では、原初磁場の matter power spectrum にたいする影響は、比較的小さいスケールの振幅を少し大きくするだけであった。我々は、原初磁場が宇宙膨張率と宇宙流体の音速を押し上げることを正しく考慮して、原初磁場の matter power spectrum に対する影響を再調査した結果、matter power spectrum のピークは、比較的大きいスケールへずれ、ピークより小さいスケールの振幅を大きく押し下げたことを解明した [13]。

(4) 原初磁場を正しく考慮した weak lensing effect 由来の宇宙背景放射偏光揺らぎ

Weak lensing effect は、matter power spectrum に依存する。(3)で述べたように原初磁場は、matter power spectrum のピークを、比較的大きいスケールへずらし、ピークより小さいスケールの振幅を大きく押し下げたことを解明した。この結果を応用し、間接的に Weak lensing effect は、原初磁場により小さくなり、weak lensing effect に由来する比較的小さい角度スケールの宇宙背景放射偏光揺らぎの振幅も小さくすることを示した [14]。

(5) 原初磁場のパラメータと宇宙論パラメータの関係の複合的考察

宇宙背景放射、matter power spectrum、ビッグバン元素合成の観測量と理論予想を比較することで、原初磁場の三つのパラメータ、振幅、空間分布の様子を示す power law index、および原初磁場のエネルギー密度の制限について考察した。同時に他の宇宙論パラメータとの相関についても調べた。その結果、宇宙背景放射と matter power spectrum の観測量と理論値の比較から、原初磁場のエネルギー密度は、バリオン密度や暗黒物質密度と相関する可能性が分かった [11, 13]。また、バリオン-光子比と相関する可能性から、ニュートリノのパラメータ(種族数と平均質量)とも相関する可能性を示した [15]。

[1] Grasso & Rubinstein, Phys.Rept.348,163-266 (2001).
[2] Kandus, Kunze, & Tsagas, Phys.Rept. 505, 1 (2011).
[3] Yamazaki, et al., Phys.Rept. 517. 41 (2012).
[4] Yamazaki, et al., PRD.77, 043005 (2008).

[5] Yamazaki, et al., ApJ. 646, 719 (2006).
[6] Yamazaki, Ichiki, & Kajino, ApJL, 625, L1 (2005).
[7] Yamazaki, et al. PRD. 81, 023008 (2010).
[8] Yamazaki, et al, PRD, 74, 123518 (2006).
[9] Yamazaki, et al., PRD.81, 103519 (2010).
[10] Yamazaki & Kusakabe, PRD. 86, 123006 (2012).
[11] Yamazaki, PRD. 89, 083528 (2014).
[12] Yamazaki, et al., PRD. 90, 023001 (2014).
[13] Yamazaki, PRD. 93, 043004 (2016).
[14] Yamazaki, The B mode with a primordial magnetic field, B mode from Space, Univ. of Tokyo, Kashiwa, Japan, poster, (2015)
[15] 山崎 大, 複合ビッグバン元素合成モデルの検証, 第28回理論懇シンポジウム, 大阪大学, 豊中市, poster, (2015)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

{ 雑誌論文 } (計 7 件)

Dai G. Yamazaki, Evolution of the cosmic matter density field with a primordial magnetic field, Physical Review D, 査読有, 93, 043004, 2016, pp. 1-8

Dai G. Yamazaki, Motohiko Kusakabe, Toshitaka Kajino, Grant. J. Mathews, Myung-Ki Cheoun, Cosmological solutions to the lithium problem: Big-bang nucleosynthesis with photon cooling, X-particle decay and a primordial magnetic field, Physical Review D, 査読有, 90, 023001, 2014, pp. 1-9

Dai G. Yamazaki, CMB with the background primordial magnetic field, Physical Review D, 査読有, 89, 083528, 2014, pp.1-10.

Dai G. Yamazaki, Kiyotomo Ichiki, Keitaro Takahashi, Constraints on the multi-lognormal magnetic fields from the observations of the cosmic microwave background and the matter power spectrum, Physical Review D, 査読有, **88**, **103011**, **2013**, pp.1-7.

{ 学会発表 } (計 16 件)

山崎 大, 『複合ビッグバン元素合成モデルの検証』, 2015, 12. 23-25, 第28回理論懇シンポジウム, 大阪大学 (大阪府・豊中市)

Dai. G. Yamazaki, "The B mode with a primordial magnetic field", B mode from Space, 2015. 12. 10-16, Univ. of Tokyo (Kashiwa, Chiba, Japan)

{ その他 }
ホームページ等

<http://th.nao.ac.jp/MEMBER/yamazaki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 大 (Yamazaki, Dai)
茨城大学・大学教育センター・准教授
研究者番号：90531822

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

市来 淨與 (Ichiki, Kiyotomo)
名古屋大学・大学院理学研究科 宇宙論研究室・講師
研究者番号：10534480

高橋 慶太郎 (Takahashi, Keitarou)
熊本大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号：80547547

日下部 元彦 (Kusakabe, Motohiko)
Center for Astrophysics, Department of Physics, University of Notre Dame, Postdoctoral Research Fellow
研究者番号：なし

梶野 敏貴 (Kajino, Toshitaka)
国立天文台・理論研究部・准教授
研究者番号：20169444

Mathews, Grant. J.
Center for Astrophysics, Department of Physics, University of Notre Dame, Professor
研究者番号：なし

Cheoun, Myung-Ki
Department of Physics, Soongsil University, Professor
研究者番号：なし