

令和元年6月20日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K20927

研究課題名(和文)原初磁場を考慮した複合ビッグバン元素合成モデルの展開

研究課題名(英文)Development of Hybrid Big Bang Nucleosynthesis with a primordial magnetic field

研究代表者

山崎 大(Yamazaki, Dai)

茨城大学・全学教育機構・准教授

研究者番号：90531822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：(1)正しく原初磁場のエネルギー密度を考慮したモデルの導入により、銀河団より大きい角度スケールの比較的精度の高い観測データが使用可能になり、原初磁場をより強く制限できることを示した。  
(2)原初磁場のパワースペクトル指数が-1.5以下の線形摂動が優勢の領域と、-1.5以上の原初磁場のエネルギー密度が優勢の領域が等価でないことが分かった。  
(3)物理学的整合性を統計的に検証するために、一つのパラメータの組に対し、ビッグバン元素合成、宇宙背景放射および物質密度場の理論値を同時に計算し、パラメータを制限するためのプログラムコードの開発を推進した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙論及び天体物理学における磁場、ダークマターおよびビッグバン元素合成に起源をもつ軽元素の役割は多彩であり、宇宙全体の構造・天体形成・進化の研究方針を左右する重要な要素である。当研究により、原初磁場やダークマター候補のX粒子と光子冷却の理論研究を進め、ビッグバン元素合成を正しく再構築できれば、宇宙の構造や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、幅広い研究分野の発展に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：(1) Using a model with the energy density of the primordial magnetic field (PMF) correctly, we can use relatively accurate observation data of angular scale larger than the galaxy clusters, and we can constrain the PMF more strongly.

(2) We find that the region in the power spectrum index of the PMF  $n_B < -1.5$ , where is dominated by linear perturbations, and the region in  $n_B > -1.5$ , which is dominated by the PMF energy density effects are not to be equivalent.

(3) To research with physical consistency, we promoted the program code for theoretical calculation of the big bang nucleosynthesis, the cosmic microwave background and matter density fields simultaneously for one parameter set, and to constrain the parameters.

研究分野：宇宙論

キーワード：原初磁場 ビッグバン元素合成 宇宙背景放射 大規模構造形成 弱レンズ効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

銀河団スケールで数 $\mu\text{G}$  の磁場が確認され[1,2], その起源を知るために、局所的なものから大局的なものまで多くの磁場の生成や進化のモデルが提唱され、多くの研究者が宇宙の晴れ上がり以前に nG 程度の「原初磁場」が必要であることを支持するようになった。宇宙の軽元素組成の起点であるビッグバン元素合成も原初磁場のエネルギー密度の影響を受ける。また、原初磁場は、宇宙の流体運動を通して、宇宙の初期密度揺らぎに影響を与える。宇宙初期の密度揺らぎや軽元素組成は、初代天体、宇宙の再電離、銀河団・銀河・恒星、超新星爆発等、宇宙の天体や諸現象の仕組みや進化を決める重要な要素である。これらの諸現象を研究する宇宙論・宇宙物理学に重要な情報をもたらす宇宙背景放射にも、原初磁場の影響は現れる。実際、インフレーションに重要な情報をもたらすと期待されている宇宙背景放射の偏光揺らぎに対し、無視できない影響を与える。故に、原初磁場を精度よく制限し、宇宙論・宇宙物理学を正しく再構築できれば、宇宙の構造や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、幅広い研究分野の発展にも貢献できるため、我々を含めた国内外の研究者によって盛んに研究されている。

我々は、この研究背景のもと、原初磁場の宇宙論・宇宙物理学における役割を解析し、その強度と分布を観測から制限してきた。そして、原初磁場は、

- (1) 銀河団スケール以下の小角度スケールで宇宙背景放射の温度・偏光揺らぎを増幅し、偏光揺らぎの観測の矛盾を説明できる有力な候補であること、
  - (2) 銀河団スケール以下で密度揺らぎを増幅させること、
  - (3) 宇宙論的観測によるニュートリノ質量制限の上限を引き上げること、
  - (4)  $l < 1000$  の比較的大角度スケールでは、宇宙背景放射の音響振動ピークを大角度スケールへずらし、振幅を減少させること、
  - (5) ビッグバン元素合成と観測との矛盾を解消させる重要な要素であること、
- を明らかにした。

### 2. 研究の目的

宇宙論・宇宙物理学の研究に重要な情報をもたらすと期待される精密な観測計画が、次々と進展し問題提起されている。一方、物理解釈を行う理論研究も、そのような観測結果に見合った、技術的な数値精度の向上、統計的信頼性、物理的な正確性が求められている。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、影響する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。当研究では、その検証すべき対象として、原初磁場に着目し、原初磁場を考慮した、ビッグバン元素合成の理論研究を進展させる。同時に、観測結果と理論計算の統計的な比較から、原初磁場とビッグバン元素合成の研究を同時に進展させつつ、物理的正確性を持ち合わせた新しい精密宇宙論を展開することが、当研究の目的である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 複合ビッグバン元素合成モデルの構築とリチウム7問題解決策の探求

原初磁場、光子冷却、および X 粒子を考慮したビッグバン元素合成コードを新たに開発し、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7問題の解決策を追求する。

#### (2) 宇宙背景放射と初期密度場の観測との比較による複合ビッグバン元素合成モデルの検証

最新の宇宙論的観測を、原初磁場、副次成分および前景成分を同時に考慮した宇宙論理論モデルと比較し、現実的な原初磁場と宇宙論パラメータを制限する。

#### (3) 宇宙論的観測と統計的手法を使った原初磁場と複合ビッグバン元素合成モデルの同時制限

ビッグバン元素合成と宇宙の晴れ上がりにわたって通用する、原初磁場、X 粒子および光子冷却を考慮した普遍的な宇宙論モデルを追求することを目指す。

### 4. 研究成果

#### 2016 年度

原初磁場と X 粒子および光子冷却の効果を同時にビッグバン元素合成に考慮すればリチウム7問題を矛盾なしに解決できる複合ビッグバン元素合成モデルが可能となる。

ヘリウム量や相対論的粒子エネルギー密度(光子、ニュートリノ、暗黒輻射等のエネルギー密度の合計。また粒子ではないが磁場のエネルギー密度も含まれる)は、宇宙の晴れ上がり前後の宇宙流体の音響振動に影響を与える。原初磁場も電磁流体の効果を通して、宇宙流体の音速を押し上げ、ポテンシャルの時間進化を鈍化させる。原初磁場のエネルギー密度を含む相対論的粒子エネルギー密度は、ビッグバン元素合成を決める要素の一つであり、ヘリウム量はビッグバン元素合成モデルに依存する。故に、宇宙の晴れ上がり時代の情報を内包する、宇宙背景放射や物質密度場の観測結果から制限した、原初磁場、相対論的エネルギー密度、およびヘリウム量と、複合ビッグバン元素合成モデルから算出される対応するパラメータを比較することで、多角的に理論モデルを検証できる。これらを考慮して、物理的正確性の高い結果を得るために、原初磁場のエネルギー密度を考慮した理論モデルがどの程度、他の宇宙論パラメータ制限に影響するか調べた。特に、物質密度場とそれをソースとする weak lensing effect に対する原初磁場の影響を調査した。原初磁場のエネルギー密度を考慮していない従来の理論モデルを使って原初磁場の影響を制限するには、銀河団スケール以下の角度スケール以下で高精度の

観測データが必要になる。現在においてそのスケールに必要な精度は得られていない。一方、正しく原初磁場のエネルギー密度を考慮したモデルは、銀河団より大きい角度スケールで影響が大きく、比較的精度の高い観測データを使用できることを示した。

## 2017 年度

ヘリウム量や相対論的粒子エネルギー密度(光子, ニュートリノ, 暗黒輻射等のエネルギー密度の合計, また粒子ではないが磁場のエネルギー密度も含まれる)は, それまで電離した粒子(電子や陽子)と相互作用していた光子が直進できるようになる時代(宇宙の晴れ上がり)前後の宇宙流体の音響振動に影響を与える。原初磁場も電磁流体の効果を通して, 宇宙流体の平均的な音速を押し上げ, ポテンシャルの時間進化を鈍化させる。また, 原初磁場のエネルギー密度を含む相対論的粒子エネルギー密度はビッグバン元素合成を決める要素の一つであり, ヘリウム量はビッグバン元素合成モデルに依存する。故に, 宇宙の晴れ上がり時代の情報を内包する宇宙背景放射や物質密度場の観測結果から制限した, 原初磁場, 相対論的エネルギー密度, およびヘリウム量と, ビッグバン元素合成理論から導かれる同パラメータの制限結果を比較することで, 複合ビッグバン元素合成モデルを別の角度から検証できる。上記を考慮して我々の先行研究で構築した原初磁場のスペクトルを数値計算するコードを改良し, 宇宙背景放射および物質密度場を数値的に計算するコードに組み込んだ。この数値計算コードから導出した結果と対応する宇宙背景放射および物質密度場の観測を比較することで原初磁場のエネルギー密度を考慮した理論モデルがどの程度, 他の宇宙論パラメータ制限に影響するか調べ, その重要性を議論した。その過程で, 原初磁場のパワースペクトル指数が $-1.5$ 以下の線形摂動が優勢の領域と,  $-1.5$ 以上の原初磁場のエネルギー密度が優勢かつパワースペクトル指数と原初磁場の振幅が完全に縮退する領域が等価でないことが分かり, 領域ごとの詳しい解析とそれによるパラメータ制限方法の考察を行った。

## 2018 年度

従来の研究では, 標準宇宙論モデル用いて理論計算した宇宙背景放射や物質密度場と観測値を比較して, 宇宙論パラメータを制限してきた。そして, 新しいビッグバン元素合成モデルを検証する際, その制限値を標準として, 整合性を検証してきた。これらの宇宙の晴れ上がり時代の標準モデルと, 検証すべき新しいビッグバン元素合成の基本物理モデルとの間に全く相関がなければ, 宇宙論パラメータを制限できることになる。さらに, どちらかに物理学的もしくは統計学的優位性があり, その制限値を基準としても問題ないなら, 従来研究の方法でも正しく物理学の整合性を検証することが可能である。ただし, 宇宙の諸現象が完全に独立であるという保証はどこにもなく, 基準をどちらにするかが自明でない。よって, 条件を絞らない限り, 現実的な理論検証とは言い難い。相対論的粒子エネルギー密度の一部が制限すべきフリーパラメータであり, そのパラメータにヘリウム量が依存する。また, 原初磁場は我々の先行研究によって, 宇宙背景放射や物質密度場に影響を与えることがわかっている。故に, 宇宙の晴れ上がり時代の物理モデルと, 検証すべき新しいビッグバン元素合成の物理モデルには相関がある。上記を考慮して, 無理なく物理学の整合性を統計的に検証するために, 一つのパラメータの組に対し, ビッグバン元素合成, 宇宙背景放射および物質密度場の理論値を同時に計算し, それぞれの観測と比較して得た尤度を合算して, パラメータを制限するためのプログラムコードの開発を進めた。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

1. Impact of a primordial magnetic field on cosmic microwave background B modes with weak lensing, [D. G. Yamazaki](#), Phys. Rev. D 97, 103525, 05/2018, 査読付き, 10.1103/PhysRevD.97.103525.
2. Cosmic magnetism in centimeter- and meter-wavelength radio astronomy, T. Akahori, H. Nakanishi, Y. Sofue, Y. Fujita, K. Ichiki, S. Ideguchi, O. Kameya, T. Kudoh, Y. Kudoh, M. Machida, Y. Miyashita, H. Ohno, T. Ozawa, K. Takahashi, M. Takizawa, [D. G. Yamazaki](#), PASJ, 70, R2, 01/2018, 査読付き, 10.1093/pasj/psx123.
3. The new hybrid BBN model with the photon cooling, X particle, and the primordial magnetic field, [D. G. Yamazaki](#), M. Kusakabe, T. Kajino, G. J. Mathews, and M. K. Cheoun, Int. J. Mod. Phys, 26, 1741006, 08/2017, 査読付き, 10.7566/JPSCP.14.020104.
4. The New BBN Model with the Photon Cooling, X Particle, and the Primordial Magnetic Field, [D. G. Yamazaki](#), M. Kusakabe, T. Kajino, G. J. Mathews, and M. K. Cheoun,

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 宇宙論的観測による原初磁場制限の現状

[山崎 大](#), 第7回観測的宇宙論ワークショップ, 口頭発表, 山口大学, 2018年11月

2. 原初磁場の制限における問題点

[山崎 大](#), 日本天文学会2018年春季年会, 口頭発表, 兵庫県立大学, 2018年9月

3. CMB weak lensing with the primordial magnetic field

[Dai. G. Yamazaki](#), IAU Focus Meeting FM8: New Insights in Extragalactic Magnetic Fields, Austria Center Vienna, Austria, 2018/08

4. CMB weak lensing with a primordial magnetic field,

[Dai. G. Yamazaki](#), International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics 2017, Kyoto, Japan, 2017/12

5. CMB B mode による原初磁場の制限について

[山崎 大](#), 日本天文学会2017年秋季年会, 口頭発表, 北海道大学, 2017年9月

6. 宇宙膨張に対する原初磁場の影響を考慮した宇宙背景放射と物質密度進化

[山崎 大](#), 新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか? - 徹底的究明と将来への挑戦-」シンポジウム, ポスター, 高エネルギー加速器研究機構, 2017年3月

7. Weak lensing effect と CMB 偏光揺らぎに対する原初磁場の影響

[山崎 大](#), 日本天文学会2017年春季年会, 口頭発表, 九州大学, 2017年3月

8. The new BBN model with the photon cooling, X particle, and the primordial magnetic field, [Dai. G. Yamazaki](#), 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV, Niigata, Japan, 2016/06

〔その他〕

ホームページ等

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

6 . 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名：梶野 敏貴

ローマ字氏名：Kajino, Toshitaka

研究協力者氏名：日下部 元彦

ローマ字氏名：Kusakabe, Motohiko

研究協力者氏名：Mathews, Grant. J.

ローマ字氏名：Mathews, Grant. J.

研究協力者氏名：Cheoun, Myung-Ki

ローマ字氏名：Cheoun, Myung-Ki

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。