

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287057

研究課題名(和文)宇宙磁場の生成と構造形成に及ぼす影響

研究課題名(英文)Generation of Cosmic Magnetic Fields and Their Influence on Structure Formation

研究代表者

杉山 直 (SUGIYAMA, Naoshi)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70222057

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙磁場の起源と構造形成に及ぼす影響を調べた。具体的な成果としては、(1)磁場を生成するベクトル成分が生じる可能性として、Einstein-aether重力理論を考えた場合、位相欠陥であるグローバル・テクスチャーや宇宙紐の場合について各々、生成される磁場を予測し、観測からモデルパラメータに対して得られる制限を明らかにした。(2)密度揺らぎの2次摂動が磁場を生成することから、その膨張宇宙での時間発展をすべての項を取り入れて計算することに初めて成功し、宇宙磁場の種となり得ることを明らかにした。(3)活動銀河核からの放射によって磁場が作られる可能性に着目し、生成される磁場の現実的な見積もりを与えた。

研究成果の概要(英文)：We investigate the origin of cosmic magnetic fields and their influence on structure formation in the universe. What we have done are, (1) Evaluate magnetic fields generated from the vector mode perturbations and constrain models from observations. We especially focus on Einstein-aether theory, which is one of modified gravity theories, and topological defects such as global texture and cosmic string. (2) First time thoroughly calculate magnetic field generation due to second order perturbations and find resultant magnetic fields can be a seed of cosmic magnetic fields. (3) Evaluate cosmic magnetic fields generated by radiation emitted from active galactic nuclei's in the early universe.

研究分野：宇宙論

キーワード：宇宙論 宇宙磁場 宇宙大規模構造 構造形成 最初期星形成

1. 研究開始当初の背景

宇宙には、様々なスケールの磁場が存在している。長年それらの磁場の起源は謎にまつまされてきた。現在では、わずかな種となる磁場があれば、恒星などでは、その内部でダイナモ過程が生じて、観測されるような大きな磁場を生み出すことはわかってきている。

しかし、種磁場の起源や、銀河スケール以上の磁場については、その生成機構は未だわかっていない。例えば銀河団には、大きさがマイクロガウス程度で、相関長が数百 kpc 程度の磁場が存在していることが、背景にある電波源からの偏光された電波のファラデー回転によって確認されている。このような巨大な範囲に広がっている比較的強い磁場が、果たしてどうやって生成されたのかはわかっていない。

また近年、遠方の線が我々まで伝播してくる間に、銀河間の磁場によって広がる効果（線が背景放射の光子と相互作用し荷電粒子を生み、それが磁場によって曲げられ、広がる）がフェルミ衛星によって捕らえられたと主張する研究があり、それに基づくと宇宙全体に存在する銀河間磁場の強さは 10^{-15} ガウス程度であるという。

銀河以上のスケールでの磁場をここでは、宇宙磁場と呼ぶこととする。宇宙磁場の起源とその発展、そしてその影響を見積もることは、宇宙研究の重要課題の一つである。

2. 研究の目的

宇宙磁場の起源と、その存在が宇宙論に及ぼす影響について検討を行なう。まず、磁場の起源については、近年、我々が考案した密度揺らぎの発展に伴って磁場が生成されるという機構について、詳細な理論的検討を加える。完全な定式化を与え、膨張宇宙での発展を数値的に解き、予想される磁場の強度や相関長などから、磁場生成モデルの検定を行なう。さらに、インフレーションや相転移などに伴う種磁場生成についても、総括的に再検討を行なう。一方で、初期宇宙での磁場の存在は宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎや偏光、さらに宇宙の構造形成に大きな影響を及ぼす。最新の宇宙論観測結果を、理論計算・数値シミュレーションと比較して、宇宙磁場とその生成過程に対する新たな知見を得ることを目指す。

3. 研究の方法

密度揺らぎからの磁場の生成機構について、まず、2次揺らぎまでの摂動を完全に取り入れた定式化を行なう。その上で、具体的に得られる、2次摂動まで考慮した膨張宇宙でのポルツマン方程式、流体方程式を数値的に解き、得られる磁場のスペクトルを求める。

観測量との比較のため、銀河団や大規模構造といった構造の形成や分布が宇宙磁場によってどのような影響を受けるかを明らかにする。今後期待される具体的な観測量とし

ては、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎと偏光、銀河団でのスニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果、中性水素の出す赤方偏移した 21cm 線放射、重力レンズ効果、銀河の質量関数、ヴォイドの数などである。

4. 研究成果

(1) 磁場を生成する揺らぎの成分であるベクトルモードに注目して、研究を進めた。とくに、宇宙膨張の加速を説明するために、ダークエネルギー 代わりに近年しばしば導入される修正重力理論において、ベクトルモードがどのように生成され、磁場形成へとつながるかについて、検討を行なった。具体的には、Einstein-aether 重力理論において、aether がベクトルモードのソースとなることに着目し、まず、ベクトルモードの揺らぎを精密に計算した。その結果得られた宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎと B モード偏光について WMAP の観測と比較し、aether 場に対する制限を得る事に成功した。さらに、期待される磁場のパワースペクトルを計算し、特徴的なピークが 3000 万年光年スケールに現れることを見出し、そこでの磁場が最大で 10^{-22} G となることを明らかにした。これは非常に小さい値だが、その後のダイナモ過程などを考慮すれば、現在の銀河磁場の「種」となるには十分な大きさの可能性がある。

続いて、ベクトルモードについて、最新の宇宙マイクロ波背景放射の偏光の B モード(パリティが奇の成分)の観測を用いて制限する研究を行った。B モードは、初期揺らぎ起源のものが、観測的に見つかったという報告があり大いに注目を集めたところであった。B モードに関しては、重力波成分に対する制限・測定も得られることから、将来における重力波直接観測の予測も行った。

次に、初期宇宙に生み出される位相欠陥から生成されるベクトルモードを見積もり、そこからの磁場生成を詳細に検討した。まず、グローバル・テクスチャーと呼ばれる位相欠陥について、非線形モデルを用いて解析を行い、磁場強度のスケール依存性を得た。次に、コズミック・ストリングについても、同様の解析を進め、磁場強度のスケール依存性を求めた。そこでは、主に、ストリングが集まってネットワークを作る場合について検討を行った。その結果、これら位相欠陥が生み出す磁場が、現在観測されている磁場のシードとなり得ることを示した。

最後に、密度揺らぎの 2 次摂動から磁場が生成されるという、我々の提案したシナリオに基づいて 2 次摂動を全ての項をきちんと入れて解くことを実行した。このことによって初めて、磁場の完全な評価を行うことができた。そこでは、2 次の項同士の間の一部打ち消し合う効果が生じており、これまで考えられていたよりも生成される磁場が小スケールでは小さくなるという意外な結果を得た。具体的に得られた磁場の強度は、銀河程度のスケ

ールで、 5×10^{-24} ガウスという値であった。なお、この研究の過程において、ガスやニュートリノ流体の非等方圧力の 2 次揺らぎが、ベクトルモードとは別な重力波モードを生成することに注目し、先の B モード偏光の観測結果と比較を行う研究もまとめた。

(2) 観測的に銀河間空間、とくにヴォイドと呼ばれる銀河の少ない領域での磁場の強度に制限をつける研究を行った。具体的には、Mrk421 というブレーザー(活動銀河核)から出される TeV と GeV のガンマ線に着目した。Mrk421 から我々までの間に、エネルギーの高い TeV ガンマ線は赤外線背景放射と相互作用を起こし、電子・陽電子対を生む可能性がある。電子・陽電子が宇宙マイクロ波背景放射の光子にエネルギーを与える事で、GeV ガンマ線となって我々まで伝播する。もし磁場があると、電子・陽電子の経路を曲げ、GeV ガンマ線到着に時間の遅れを生じる。GeV ガンマ線そのものが FERMI ガンマ線衛星に見られない事から、少なくとも $10^{-20.5}$ ガウス以上の磁場があり、到着遅れを生じさせていると推論できる。

(3) 初期磁場が存在する場合に、宇宙での構造形成にどのような影響がでるのかについて研究を行った。まず宇宙での晴れ上がり以降、最初期星形成の時期までの間に磁場が存在していれば、これまで我々が調べて来たようなローレンツ力による密度揺らぎの増幅が構造形成の時期を早める効果以外に、磁場エネルギー散逸による、宇宙の熱史の改変が生じる可能性がある。エネルギー散逸による影響を将来の赤方偏移された中性水素の 21cm 線の観測で受かるかどうかを調べた結果、影響は非常に小さいスケールでのみ現れ、磁場の効果は、これまでのローレンツ力によるものが支配的であることがわかった。次に、磁場が存在している場合の電離したガス雲の重力収縮について、数値シミュレーションと解析的取扱いの両者によって詳しく調べる研究を行った。その結果、磁場によるガス雲収縮の阻害効果が、特に高赤方偏移で顕著であることを示し、ハローの存在量についての予想を求めることに成功した。

(4) 最初期の星形成に伴う、宇宙再加熱の時期での磁場形成について、詳細な検討を行った。これは、名古屋 2 名、パリ南大学 2 名で行なってきた国際共同研究である。ここで考えるのは、初期宇宙に最初に形成された活動銀河核などから、紫外線が放射され、周囲の銀河間空間のガスをイオン化するという状況である。もし、この周囲のガスが非一様に分布していると、そこで電荷の分離が生じる。この分離によって、電場を作り、そこから磁場を生成する、というシナリオである。このシナリオ自身は、個別の天体に付随した磁場を生み出すに過ぎないが、標準宇宙論の

構造形成理論に基づいて、活動銀河核の数密度の時間進化を理論的に評価することで、宇宙全体に生じる磁場の強度を見積もることが可能となる。その結果、最初期星形成の頃に、少なくとも、 10^{-18} ガウスの磁場が作られることを確認した。この結果は、ガンマ線伝播から最近つけられた、銀河間空間の磁場の最低強度、 10^{-19} ガウスと良い一致を示しており、興味深い。

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 15 件)

Shohei Saga, Maresuke Shiraishi, Kiyotomo Ichiki, Naoshi Sugiyama, "Generation of magnetic fields in Einstein-aether gravity", Physical Review D87, id.104025 (2013) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.87.104025

Keitaro Takahashi, Masaki Mori, Kiyotomo Ichiki, Susumu Inoue, Hajime Takami, "Lower Bounds on Magnetic Fields in Intergalactic Voids from Long-term GeV-TeV Light Curves of the Blazar Mrk 421", Astrophys. Journal Letters, 771, L42-L47 (2013) 査読有, DOI: 10.1088/2041-8205/771/2/L42

Maresuke Shiraishi, Shuichiro Yokoyama, Kiyotomo Ichiki, Takahiko Matsubara, "Scale-dependent bias due to primordial vector fields", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 432, 2331-2338 (2013) 査読有, DOI: 0.1093/mnras/stt594

Dai 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 D88, id. 103011 (2013) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.88.103011

Hiroyuki Tashiro, Naoshi Sugiyama, "The effect of primordial black holes on 21-cm fluctuations", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 435, 3001-3008 (2013) 査読有, DOI: 10.1093/mnras/stt1493

Maresuke Shiraishi, Hiroyuki Tashiro, Kiyotomo Ichiki, "21 cm fluctuations from primordial magnetic fields", Physical Review D89, 103522 (2014) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.89.103522

Y. Shibusawa, K. Ichiki, K. Kadota, "The influence of primordial magnetic

fields on the spherical collapse model in cosmology”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 8, 17 (2014) 査読有, DOI: 10.1088/1475-7516/2014/08/017
Sachiko Kuroyanagi, Shinji Tsujikawa, Takeshi Chiba, Naoshi Sugiyama, “Implications of the B-mode polarization measurement for direct detection of inflationary gravitational waves”, *Physical Review D*90, 63513 (2014) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.90.063513
Shohei Saga, Maresuke Shiraishi, Kiyotomo Ichiki, “Constraining primordial vector mode from B-mode polarization”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 10, 4 (2014) 査読有, DOI: 10.1088/1475-7516/2014/10/004
Shohei Saga, Kiyotomo Ichiki, Naoshi Sugiyama, “Impact of anisotropic stress of free-streaming particles on gravitational waves induced by cosmological density perturbations”, *Physical Review D*91, 24030 (2015) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.024030
Shohei Saga, Kiyotomo Ichiki, Keitaro Takahashi, Naoshi Sugiyama, “Magnetic field spectrum at cosmological recombination revisited”, *Physical Review D*91, id.123510 (2015) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.123510
Kouichiro Horiguchi, Kiyotomo Ichiki, Toyokazu Sekiguchi, Naoshi Sugiyama, “Primordial magnetic fields from self-ordering scalar fields”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 4, id.007 (2015) 査読有, DOI: 10.1088/1475-7516/2015/04/007
Kouichiro Horiguchi, Kiyotomo Ichiki, Naoshi Sugiyama, “Primordial magnetic fields from the string network”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2016, id083E02 (15pp) (2016) 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptw108
A Daisuke Yamauchi, Kiyotomo Ichiki, Kazunori Kohri, Toshiya Namikawa, Yoshihiko Oyama, Toyokazu Sekiguchi, Hayato Shimabukuro, Keitaro Takahashi, Tomo Takahashi, Shuichiro Yokoyama, Kohji Yoshikawa, “Cosmology with the Square Kilometer Array by SKA-Japan”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id.R2 (19pp) (2016) 査読有, DOI:

10.1093/pasj/psw098

Junpei Ooba, Kiyotomo Ichiki, Takeshi Chiba, Naoshi Sugiyama, “Planck constraints on scalar-tensor cosmology and the variation of the gravitational constant”, *Physical Review D*93, 122002 (7pp) (2016) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.93.122002

[学会発表](計18件)

杉山直, “Why are we studying CMB?”, International Conference on Cosmic Microwave Background (招待講演), 2013年06月10日-2013年06月14日, 沖縄科学技術大学院大学

杉山直, “Epoch of Reionization”, 宇宙電波懇談会2013「SKA計画」(招待講演), 2013年12月18日-2013年12月19日, 国立天文台三鷹キャンパス

杉山直, 「赤方偏移した21cm線観測と宇宙論」, 理論天文学懇談会シンポジウム(招待講演), 2013年12月25日-2013年12月27日, 東京大学柏キャンパス図書館

市来淨與, “A close look into CMB anisotropies”, APC-YITP collaboration: Mini-Workshop on Gravitation and Cosmology(招待講演), 2014年02月06日-2014年02月07日, 京都大学基礎物理学研究所

市来淨與, “Primordial Magnetic Fields and 21 cm Signal”, SKA Science Workshop in East Asia 2013(招待講演), 2013年06月05日-2013年06月07日, 名古屋大学

杉山直, “Why is the BICEP2 result so important for Cosmology?”,

杉山直, “ ”, the BICEP2 Symposium(招待講演), 2014年05月04日-2014年05月04日, 台湾、台北、台湾国立大学

杉山直, “Cosmological Magnetic Fields”, MIAPP workshop “Cosmology after PLANCK”(招待講演), 2014年08月25日-2014年09月19日, MIAPP, Garching, Germany

杉山直, “Microwave Background: Missing Link between Inflation and Cosmic Dawn”, Dawn of New Cosmology(招待講演),

市来淨與, “ ”, 2014年12月08日-2014年12月12日, 台湾、台北、中央研究所

市来淨與, 「CMB観測の現状と展望」, 第2回松江現象論研究会(招待講演), 2014年11月28日-2014年11月30日, 島根県松江市

杉山直, “SKA-JP: Science Goal and ...”, 日本天文学会秋季年会・特別セッション(招待講演), 2015年09月11日-2015年09月11日, 甲南大学

市來淨與, 「CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD
による B-mode 偏光の検出に向けて」,
セミナー型 ALMA ワークショップ「磁場
は星形成過程のどの進化段階を律速し
ているのか?」(招待講演), 2016 年 03
月 30 日~ 2016 年 03 月 31 日, 国立天文
台三鷹

市來淨與, 「前景放射除去への挑戦」,
日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年
03 月 19 日-2016 年 03 月 22 日, 東北学
院大学

市來淨與, 「長波長電波による宇宙論」,
初代星・初代銀河研究会 2015(招待講
演), 2015 年 11 月 30 日-2015 年 12 月
02 日, 草津セミナーハウス

杉山直, “Small Scale Density
Perturbations”, MIAPP (Munich
Institute for Astro- and Particle
Physics) workshop “Cosmic
Reionization”(招待講演)(国際学会),
2016 年 04 月 04 日-2016 年 04 月 29 日,
<MIAPP, Garching, Germany

市來淨與, 「宇宙初期密度揺らぎの再構
築による精密宇宙論の展開」, SpM 第 4
回領域会議, 2016 年 06 月 01 日-2016
年 06 月 03 日, 東京大学本郷キャンパス

市來淨與, “Internal Template”,
B-mode from space 2017 workshop(招待
講演)(国際学会), 2017 年 01 月 23 日
-2017 年 01 月 26 日, McGill University,
Canada

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山直 (SUGIYAMA, Naoshi)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 70222057

(2) 研究分担者

市來淨與 (ICHIKI, Kiyotomo)
名古屋大学・基礎理論研究センター・講師
研究者番号: 10534480