

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740179

研究課題名(和文)宇宙磁場の起源に関する理論的・観測的研究

研究課題名(英文)Theoretical and observational study on the origin of cosmic magnetic fields

研究代表者

高橋 慶太郎 (Takahashi, Keitaro)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：80547547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：銀河間空間の磁場として存在していると予測される原始磁場の理論的・観測的研究を行った。理論的には原始ゆらぎのベクトルモードから生成される原始磁場の大きさ・スペクトルを導出し、マイクロ波宇宙背景放射の観測から制限をした。また、TeVガンマ線を放射する活動銀河核Mrk501, Mrk421のTeV領域とGeV領域の観測データを用い、TeVガンマ線から誘起される遅延2次ガンマ線に対する制限をつけた。その結果、銀河間空間の磁場に対して10の-20乗ガウスという下限をつけることに成功した。また、将来の広帯域電波観測をもちいた磁場観測法であるファラデートモグラフィの基本的なアルゴリズムの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：I have done theoretical and observational studies on intergalactic magnetic fields as primordial magnetic fields. I derived a theoretical prediction on primordial magnetic fields generated from primordial vector mode and a constraint on it was put from the observational data of cosmic microwave background. Lower bounds on magnetic fields, 10 to -20th Gauss, were obtained from constraints on the secondary delayed GeV gamma-rays from active galactic nuclei Mrk 501 and Mrk 421. Finally, I have developed an algorithm for Faraday tomography, which is possible for future wideband radio telescope and enable us to reconstruct the distribution of magnetic fields and polarization emissivity along the line of sight.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：磁場 マイクロ波背景放射 活動銀河核 ガンマ線

1. 研究開始当初の背景

銀河や銀河団など宇宙のあらゆる天体はそれ固有の磁場を持っていることが知られている。しかしその起源が何であるかは大きな謎であった。銀河においては銀河の形成初期に微弱な磁場が存在すればダイナモ機構により増幅され、今日観測されるような大きさの磁場に成長することが知られている。しかし銀河形成時の微弱な磁場がどこから来るのかが解明されていない。

一方初期宇宙の様々な現象、例えばインフレーションや宇宙の再結合以前のプラズマの運動、再電離などで微弱な磁場が宇宙全体に生成されると提唱されている。このような原始磁場はやがて銀河形成に取り込まれ、銀河の種磁場になったと考えられる。一方ボイド空間のような天体活動が極度に抑制されている空間においては原始磁場はそのまま銀河間磁場として保存されていると考えられている。したがって銀河間空間の磁場を観測できれば原始磁場を観測でき、宇宙磁場の起源に迫ることができる。

しかし原始磁場は非常に弱いため、これまでの磁場観測法では観測は到底不可能であった。そこで微弱な磁場を観測する新たな方法が求められていた。

2. 研究の目的

原始磁場もしくは微弱な銀河間磁場を観測する手法を開発し、実際の観測データに適用することによって磁場を観測または制限を与え、理論的な予言と照らし合わせて宇宙磁場の起源を探る。

3. 研究の方法

原始磁場・銀河間磁場を観測する方法として以下の2つの方法を考える。

マイクロ波宇宙背景放射(1,3,5,7,8,9)

原始磁場が存在するとローレンツ力や磁気圧によって宇宙の晴れ上がり以前のプラズマの運動に影響を及ぼし、その結果観測されるマイクロ波宇宙背景放射の温度ゆらぎや偏光ゆらぎが影響を受ける。特にインフレーション起源の通常密度ゆらぎであれば、Bモード偏光や温度ゆらぎのバイスペクトルはゼロになるが、原始磁場の存在によってこれらが生成される。これを利用することによって原始磁場の大きさやスペクトルに効率的に制限を加えることができると期待される。

高エネルギー天体からの2次遅延ガンマ線(2,4)

ガンマ線バーストやブレーザーなどTeV以

上のエネルギーのガンマ線を放射する高エネルギー天体を考える。TeVガンマ線は宇宙空間で赤外線光子と衝突して電子・陽電子のペアを生成する。このペアはマイクロ波背景放射の光子を逆コンプトン散乱してGeV程度のエネルギーを持ったガンマ線に変える。この2次的なGeVガンマ線を地球で観測することを考える。

ここでもし電子・陽電子が伝搬する領域に磁場が存在すると経路が曲げられるため、2次ガンマ線の到着時刻が磁場が存在しない場合に比べて遅くなる。また、磁場が存在すると2次ガンマ線のフラックスは遅延時間のタイムスケールで薄められて小さくなる。このような2次ガンマ線を観測または制限することによって電子・陽電子が伝搬する領域の磁場の情報をえることができる。

また、最初のTeVガンマ線の平均自由行程は20Mpcほどであり、高エネルギー天体のホスト銀河・銀河団を脱出するのに十分である。また電子・陽電子の逆コンプトン散乱による冷却時間は十分に短い。そのため、電子・陽電子が逆コンプトン散乱を起こすような領域は典型的にはボイド空間となる。したがってこの方法により、ボイド空間の磁場に関する情報を得ることができるのである。

4. 研究成果

マイクロ波宇宙背景放射(1,3,5,7,8,9)

発表論文(1,5)において、原始磁場のスペクトルとして対数正規分布を仮定し、そのスケールや強さに対して観測データから制限を加えた。観測データとしてはWMAPの全天観測やQUADなどの小スケール観測を用いた。その結果、原始磁場への制限をそのスケールの関数として図1のように得た。

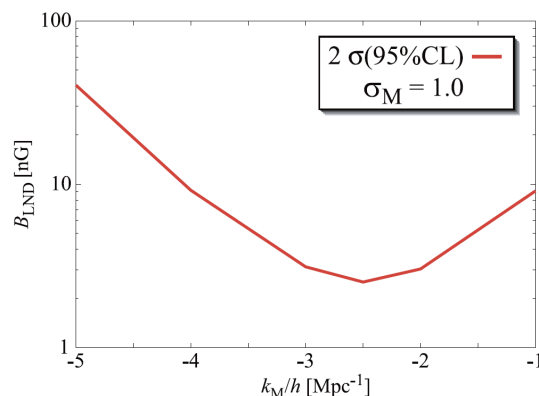


図1：マイクロ波宇宙背景放射の観測データから得られた対数正規分布のスペクトルを持つ原始磁場への制限(5)。横軸は磁場のスケール、縦軸はそのスケールにおける磁場の強さに対する上限。

発表論文(7,8,9)において、原始磁場が存在するときの、マイクロ波宇宙背景放射の温度ゆらぎのバイスペクトルを計算する手法を開発した。

発表論文(3)において、原始ゆらぎにベクトルモードが存在する状況を考えた。まず現在の観測データからの原始ベクトルモードの大きさとべきへの制限を計算した(図2参照)。その制限を用いて、ベクトルモードから生成される原始磁場への上限を計算した。この上限はだいたい $10^{(-22)}$ Gauss 程度であった。

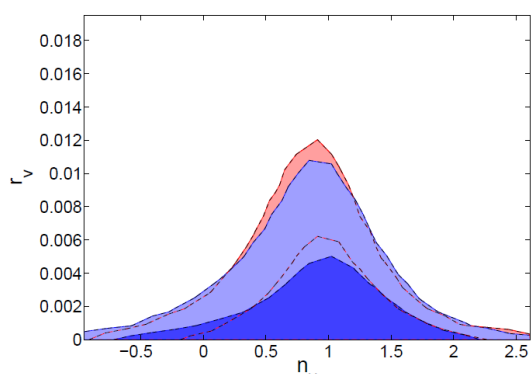


図2 : マイクロ波宇宙背景放射の観測データから、原始ベクトルモードの大きさ(縦軸)とべき(横軸)への制限(3)。

高エネルギー天体からの2次遅延ガンマ線(2,4)

まず発表論文(4)においてブレーザー Mrk501 の観測データに2次ガンマ線が存在するかどうかの解析を行った。Mrk501 と我々の銀河系の間には広大なポイドが存在し、このポイドの磁場の情報が得られる(図3)。

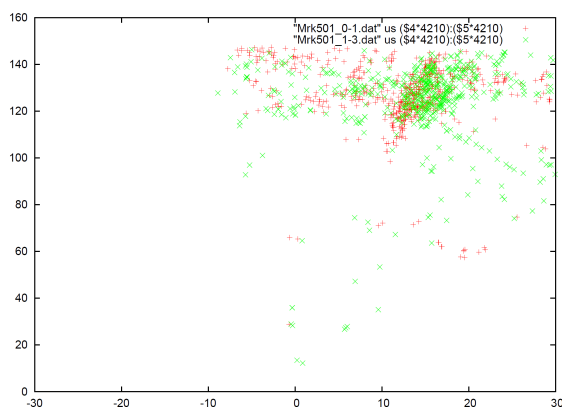


図3 : (0,140) あたりに位置する Mrk501 と (0,0) に位置する銀河系付近の銀河の地図。Mrk501 と銀河系の間には広大なポイドが存在する。数字の単位は Mpc である。

Mrk501 の観測データと2次ガンマ線の予言値の比較が図4である。観測データは Fermi による GeV 領域のガンマ線のフラックスであり、予言値はポイドに存在する磁場の強さを様々に変化させた時のフラックスである。ここで TeV 領域のガンマ線のデータとしてチェレンコフ望遠鏡 VERITAS のデータを用いている。

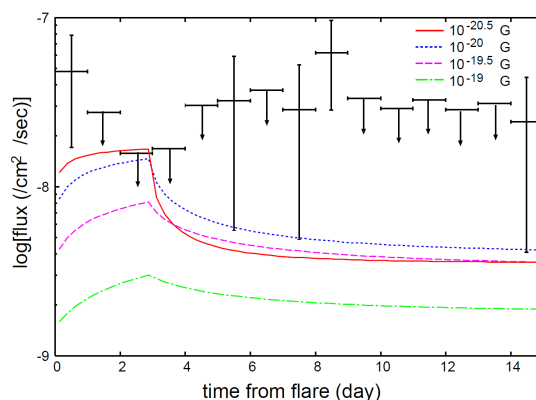


図4 : Fermi による GeV 領域の光度曲線の観測データ(誤差棒付きの黒い点)と理論計算による2次ガンマ線の予言値。横軸は Mrk501 のフレアからの時間、縦軸はフラックスである。

図4により、磁場が弱すぎると Fermi によるフラックスの上限を超えてしまうことがわかる。つまりポイドの磁場に対して下限が与えられることになる。これは磁場が弱いと2次ガンマ線が遅延することなく集中して地球に到達してフラックスが上がってしまうことに寄るものである。この観測データにより得られる下限の値は $10^{(-20.5)}$ ガウス程度である。

次に発表論文(2)において、ブレーザー Mrk421 の観測データを解析した。Mrk421 と我々の銀河系の間にも広大なポイドが存在する(図5)。

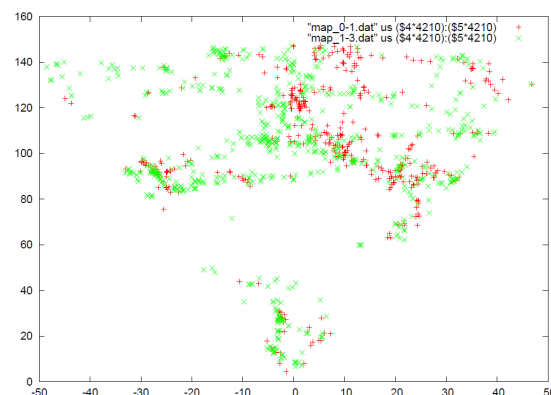


図5 : Mrk421 に関する図3と同様の図。

Mrk421 においては ARGO-YBJ による 8 5 0 日間にもわたる TeV ガンマ線の連続観測データが得られた。この期間に多数のフレアが起こっており、Fermi による GeV ガンマ線のデータと合わせて Mrk501 と同様の解析が大量のデータを用いて行うことができる点がこの研究の特徴である (図 6)。

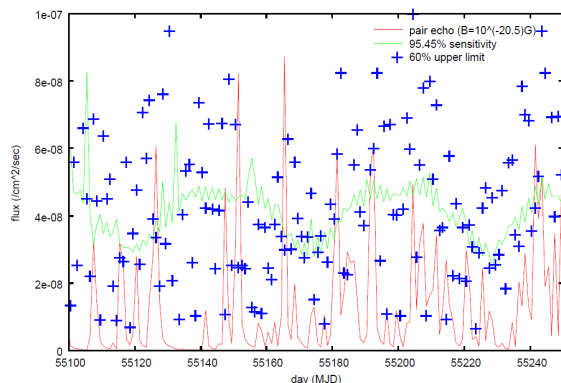


図 6 : Mrk421 の GeV 領域の光度曲線。Fermi によるフラックスの上限が青い点、理論的な予言フラックスが線である。

各フレアからのボイド磁場への制限を逆正規法と呼ばれる方法によって $10^{(-20.5)}$ ガウスという下限の統計的有意さが飛躍的に高まり、4シグマ程度となった。

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 18 件)

1, “Constraints on the multi-lognormal magnetic fields from the observations of the cosmic microwave background and the matter power spectrum”

D. G. Yamazaki, K. Ichiki and K. Takahashi,

Phys. Rev. D 88 (2013) 103011

査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.88.103011

2, “Lower Bounds on Magnetic Fields in Intergalactic Voids from Long-Term GeV-TeV Light Curves of the Blazar Mrk 421”

K. Takahashi, M. Mori, K. Ichiki, S. Inoue and H. Takami,

Astrophys. J. 771 (2013) L42

査読有

DOI: 10.1088/2041-8205/771/2/L42

3, “Constraint on the primordial vector mode and its magnetic field generation

from seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations”

K. Ichiki, K. Takahashi and N. Sugiyama,

Phys. Rev. D 85 (2012) 043009

査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.85.043009

4, “Lower Bounds on Intergalactic Magnetic Fields from Simultaneously Observed GeV-TeV Light Curves of the Blazar Mrk 501”

K. Takahashi, M. Mori, K. Ichiki and S. Inoue,

Astrophys. J. 744 (2012) L7

査読有

DOI: 10.1088/2041-8205/744/1/L7

5, “Effects of Primordial Magnetic Field with Log-normal Distribution on Cosmic Microwave Background”

D. G. Yamazaki, K. Ichiki and K. Takahashi,

Phys. Rev. D 84 (2011) 123006

査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.84.123006

6, “Primordial magnetic fields generated by the non-adiabatic fluctuations at pre-recombination era”

S. Maeda, K. Takahashi and K. Ichiki,

JCAP 1111:045 (2011)

査読有

DOI: 10.1088/1475-7516/2011/11/045

7, “Cosmic microwave background bispectrum of tensor passive modes induced from primordial magnetic fields”

M. Shiraishi, D. Nitta, S. Yokoyama, K. Ichiki and K. Takahashi,

Phys. Rev. D 83 (2011) 123003

査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.83.123003

8, “Computation approach for CMB bispectrum from primordial magnetic fields”

M. Shiraishi, D. Nitta, S. Yokoyama, K. Ichiki and K. Takahashi,

Phys. Rev. D 83 (2011) 123523

査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.83.123523

9, “CMB Bispectrum from Primordial Scalar, Vector and Tensor non-Gaussianities”

M. Shiraishi, D. Nitta, S. Yokoyama, K. Ichiki and K. Takahashi,

Prog. Theor. Phys. 125 (2011) 795-813

査読有

<http://ptp.oxfordjournals.org/content/125/4/795>

〔学会発表〕(計 1件)

1, “ Probing Intergalactic Magnetic Fields
with Square Kilometre Array ”

K. Takahashi

Multi-Messenger Approaches to Cosmic Rays:
Origins and Space frontiers @ IAP, Paris, France

2013年11月28日

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 慶太郎 (TAKAHASHI, Keitaro)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 80547547

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: