

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21111005

研究課題名(和文)宇宙マイクロ波背景放射と前景放射の高精度成分分離スキームの構築

研究課題名(英文)Development of high accuracy component separation scheme between cosmic microwave background radiation and foreground emissions

研究代表者

服部 誠(Hattori, Makoto)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90281964

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 65,400,000円、(間接経費) 19,620,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ波偏光観測データから宇宙マイクロ波背景放射と銀河系内星間物質からのマイクロ波放射の分離を高精度で行う成分分離スキームの完成を目指して活動した。分離スキームとして、階層ベイズ法を応用した独自のスキームの開発した。銀河系内星間物質からのマイクロ波域での偏光放射の物理的理解の深化に繋がる研究も遂行した。その一つが、日本の赤外線観測衛星「あかり」が取得した遠赤外線全天探査データからの遠赤外線宇宙地図の作成である。衛星が取得した一次データを処理し全天地図を作成する作業に、当科研費で購入した高速クラスター計算機を活用することで作業効率を飛躍的に向上させ研究期間内に完成させることが出来た。

研究成果の概要(英文)：We have devoted our research activities to developing high accuracy component separation scheme which is able to separate cosmic microwave background radiation signal and foreground emission components signals originated from interstellar matter in our Galaxy from observed polarization data in microwave bands. We have completed a new original component separation scheme based on hierarchical Bayesian methods. We have also performed studies which lead to deepening of our physical understandings of polarization microwave emission from the Galactic interstellar matter. One of these is all sky far infrared diffuse light map making from the all sky survey data obtained by the Japanese infrared satellite "AKARI". The PC cluster machine bought by this financial support has played crucial role to complete the first version of the "AKARI" far infrared all sky maps within the research period of this budget.

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：宇宙マイクロ波背景放射 成分分離 遠赤外線天文学 宇宙塵 銀河磁場 磁気流体数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

本新学術領域研究の主たる研究テーマは、インフレーション期の重力の量子揺らぎによって生成された原始重力波の存在を、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の特殊な偏光パターンの検出により観測的に証明し、インフレーション理論が正し事の動かぬ証拠を掴むことであった。このシグナルの検出にとって最大の障壁は、マイクロ波偏光観測データに紛れ込む天体起源の偏光放射成分=前景放射成分の強度が、予想されるCMB偏光シグナル強度を上回っていることであった。特にシンクロトロン放射及びダスト熱放射といった銀河系内星間物質からのマイクロ波偏光放射が全天に渡って無視できない強度で存在しており、これらの成分を如何に精度良くCMB成分と分離できるかが、インフレーション理論の動かぬ証拠をCMB偏光観測で掴む事ができるかどうかの成否を握っていた。

2. 研究の目的

本研究の当初目的は、マイクロ波偏光観測データから前景放射成分とCMB成分を分離する高精度成分分離スキームを開発し、CMB偏光観測による原始重力波の検出限界を、これまでの手法と比べて二桁以上改善することであった。CMB業界でよく使われる用語を用いるなら、原始重力波の振幅の二乗平均と、構造形成の種となるスカラーモードの振幅の二乗平均との比 r (スカラー・テンソル比) で検出限界をこれまでの $r=10^{-2}$ から $r=10^{-4}$ まで押し下げることが目的であった。

3. 研究の方法

本研究の研究開発は以下の二つの柱の元に展開した。一つは、銀河系内星間物質からのマイクロ波偏光放射源の物理的理解の深化を目的とした研究。もう一つは、この結果を積極的に取り入れる事で分離精度向上が達成できる成分分離スキームの開発である。成分分離スキームは、階層ベイズ法を応用した独自のスキームを開発した。前者の研究は以下の三つの研究を実施した。一つ目は、日本の赤外線観測衛星「あかり」が取得した遠赤外線全天探査データからの遠赤外線宇宙地図の作成である。他の二つは、銀河系内星間物質からのマイクロ波偏光放射分布の根幹を担う銀河系磁場の研究である。その内の一つは、数値磁気流体数値シミュレーションと得られた結果の観測量との比較による銀河系磁場の大局構造の形成・進化過程研究である。もう一つは、銀河磁場に蓄えられているエネルギーの約50%を占める、乱流磁場の起源の可能性の一つとして星間プラズマ中に温度揺らぎが存在したときに出現するプラズマ運動論的不安定性を種とした乱流磁場の生成過程の研究である。

4. 研究成果

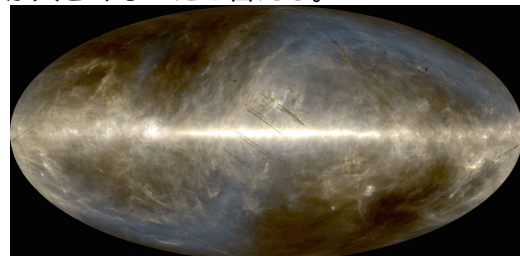
階層ベイズ法を応用した独自の成分部 r にスキームを開発した。開発したスキームをテスト問題に適用し、当初目的通り、原始重力波の強度が $r=10^{-4}$ であったとしても検出可能であることを示す事ができた。この成果は現在投稿論文としてまとめているところである。我々が開発したスキームの特徴を以下にまとめる。この方法では、データのモデルフィッティングに用いるフィッティングパラメータとは別に、採用したモデルパラメータのピクセル毎の分布の制約の掛け方を変える事で、その善し悪しを統計的に判定し、より精度良く成分分離を行うことができる。この事を我々が実際に行った以下の具体例を挙げて説明する。開発したスキームの試験の為に以下の方法で前景放射とCMB成分が重なりあったシミュレーションマップを作成した。銀河系内のシンクロトロン放射及びダスト放射のマイクロ波域でのスペクトルを周波数のべき乗に比例するとした。冪指数は、空の方向毎に異なるとし、これまでのCMB観測の結果を参考に強度分布及び冪指数の分布を持たせた。これにCMB偏光シグナルを重ねあわせた。この時、原始重力波の強度は $r=10^{-4}$ とした。その他の宇宙論パラメータは現時点でのスタンダードな値を採用した。この様にして得たマップに本新学術領域研究の最終目標の一つであるCMB偏光観測専用観測衛星 LiteBIRD で想定される装置雑音を足す。この様にして得たシミュレーションマップに対して我々が開発した成分分離スキームを適用する。この時、シンクロトロン放射とダスト放射のスペクトルは空の各方向で単一の冪指数のべき乗型であるとし、冪指数は、ある標準偏差を持った正規分布をしているという事前確率分布を仮定する。この標準偏差の値をシンクロトロン放射、ダスト放射それぞれについて独立に様々な値を選んだ場合について、パラメータの分布がベイズ統計に従っているとモンテカルロシミュレーションを行って成分分離を実施する。ここで各試行で設定した冪指数の分布の標準偏差をハイパーパラメータと呼ぶ。各ハイパーパラメータ毎に周辺尤度と呼ばれる統計量を計算する。周辺尤度の絶対値が最小になるハイパーパラメータが最適な解を表す。この様にフィッティングパラメータの事前分布としてどのようなものを選ぶのが最適化をハイパーパラメータ毎の周辺尤度を比較することで客観的に評価できることが、階層ベイズ法の眼目である。実際に上記のシミュレーションマップに対して適用して結果は以下のものであった。周辺尤度の絶対値が最小になったのは、ハイパーパラメータである前景放射成分の冪指数分布の標準偏差が、シミュレーションマップを作成するとき仮

定した値とほぼ一致するときであった。この時、前景放射の強度分布、冪指数分布および CMB 偏光分布は全天に渡って、インプットモデルと非常に一致をみた。得られた結果の CMB 偏光マップから原始重力波起源の偏光成分を統計的に有意に検出できた。即ちこの例題では、LiteBIRD が設計雑音レベルを達成できるなら、得られたデータに我々が開発した成分分離スキームを適用することでこれまでより原始重力波の検出限界を二桁向上することができることを示す事が出来た。分離の結果は、前景放射のスペクトル指数の事前分布の与え方に敏感に依存しており、採用したハイパーパラメータが最適値から大きくズレると分離精度が極端に悪くなり、原始重力波起源の CMB 偏光シグナルの検出が困難となる。我々の方法では、どのハイパーパラメータの選択が最適かを周辺尤度という客観的統計量で評価できる。しかし、我々以外の方法では、どのような事前分布の選択が最適かを客観的に評価する統計的指標が無い同様の事を行う事は出来ない。数10年前の統計の教科書では、フィッティングは虚心坦懐に行うことが基本姿勢であり、満遍なく可能なパラメータ領域を走査してベストな解を求めると書かれている。一方、階層ベイズ法は、CMB 偏光観測データ成分分離の世界においても、無闇やたらにパラメータ領域を走査するのではなく、寧ろ物理的に最適な偏見に基づいた事前分布の縛りの元フィッティングを行う方が正解に導く近道であり、どれが最適な偏見かを評価する客観的指標を与える方法でありえることを示す事ができた。ここまでの成果を現在投稿論文としてまとめている。ここまでは、比較的単純な前景放射モデルを想定して来たが、より複雑なモデルが現実的であったとしても、事前分布をハイパーパラメータ化し、周辺尤度を用いて客観的ジャッジを下す事で最適な事前分布を選択することができ、高精度成分分離が実施可能な拡張性の高い手法であると考えている。

ところが最終年度末である平成26年3月中旬に米国の地上 CMB 偏光観測実験である BICEP2 が原始重力波起源の CMB 偏光シグナルの世界初検出を報告し、状況が大きく変化した(詳細は以下のニュースレター増刊号を参照 <http://www.astr.tohoku.ac.jp/~hken/us.tohoku.abc/newsletter/newsletter.html>)。他の実験装置の観測による追試が必要な段階であるが、世界初検出はこのチームにより成し遂げられてしまった公算が高い。また、検出されたシグナルの強度は、 $r=0.2$ と想定よりかなり強く、 $r=10^{-4}$ レベルの非常に弱いシグナルの検出を目指した成分分離スキームの開発意義が問われる事となっている。原始重力波起源の CMB 偏光シグナル

測定は、初検出から詳細な空間周波数スペクトル測定による、インフレーション期の物理現象の観測的探求に興味シフトした。初検出を目指す研究においては、大きな角度スケールでの測定に興味の中心があった。しかし、空間周波数スペクトルの詳細測定に興味移った今は、大きな角度スケールから小さな角度スケールまでの広いレンジでの CMB 偏光測定が要求されている。BICEP2 が測定を行った角度スケールは、原始重力波起源の CMB 偏光シグナルの強度が最大になるところであり、角度スケールを上げて行くとシグナル強度はほぼ単調に小さくなって行く。CMB 偏光シグナルの空間周波数スペクトルの測定からインフレーション期の物理現象の有意な情報を引き出すには、広い空間スケールでの原始重力波起源の CMB 偏光シグナルの測定が必要であり、 $r=10^{-4}$ とした時の CMB 偏光シグナル強度の最大値を測定するのと同程度の弱いシグナルを検出しなければならない。つまり、今後も本研究で開発目標とした非常に弱いシグナルの精密測定が必要とされるのである。BICEP2 後の CMB 偏光観測新時代の展開に向けたスキームの開発を本研究の延長上で着手したところである。

分離精度向上を目的として銀河系内星間物質及び銀河磁場の理解の深化に繋がる研究も遂行した。その一つが、日本の赤外線観測衛星「あかり」が取得した遠赤外線全天探査データからの遠赤外線宇宙地図の作成である。衛星が取得した4つの遠赤外線バンドの一次データを処理し全天地図を作成する作業に、当科研費で購入した高速クラスター計算機の使用することで、作業効率を飛躍的に向上させ、何とか研究期間内の「あかり」遠赤外線宇宙地図の公開にこぎつけることができた。この地図を元に本研究課題の主たる研究テーマの一つであった銀河系内ダスト熱放射宇宙地図の作成を現在進めている。この地図は、これまで公開されてきた銀河系ダスト熱放射宇宙地図より角度分解能が10倍優れている。BICEP2 の発見によりより小さいスケールでの原始重力波起源の CMB 偏光シグナル測定が要求されるようになった今、まさにこの地図の CMB 偏光観測にとっての意義が大きくなったと言える。



上図は、本研究で得た4つのバンドの遠赤外線全天地図の内、2つのバンドを用いて作成したカラーマップである。この成果を発表する投稿論文を現在準備中である。

銀河磁場の大局構造の研究は、主に数値磁気流体数値シミュレーションを軸に展開してきた。研究遂行する中でこれまで広く用いられて来た計算スキームは、銀河磁場の大局構造の研究には適さず、人為的な構造が支配的に現れてしまうことが明らかになった。その為、シミュレーションスキームを抜本的に改善する必要に迫られ、最新の手法を取り入れ独自のシミュレーションスキームに基づいた計算コードを開発した。研究期間内に計算コードの開発とテストがほぼ完了し、現在このコードを用いた銀河磁場の形成、進化過程の研究を遂行中である。

銀河磁場に蓄えられているエネルギーの約50%は乱流磁場として蓄えられている。そこで乱流磁場の起源の可能性の一つとして星間プラズマ中に温度揺らぎが存在したときに出現するプラズマ運動論的不安定性を種とした乱流磁場の生成過程について研究した。生成される乱流磁場の強度は、銀河乱流磁場の起源と十分なりうる事を示した。観測的検証法の一つとして、このようにして生成された乱流磁場中を相対論的電子が運動することで生成されるマイクロ波放射過程を調べた。その結果、通常のシンクロトロン放射にプラスしてジッター放射と呼ばれる新しい放射が出現することを示し、その放射スペクトルの解析モデルを世界で初めて導出した。この結果を銀河系に適用することで、銀河中心部に発見されその起源が未だ謎のマイクロ波ヘイズ放射のスペクトルを見事に説明しうる事を示した。この成果は、投稿論文してほぼまとめあげ投稿直前まで準備が整っている。

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 22 件)

Doi, Y., Komugi, S., Kawada, M., Tanaka, S., Arimatsu, K., Ikeda, N., Kato, D., Kitamura, Y., Nakagawa, T., Ootsubo, T., Morishima, T., Hattori, M., Tanaka, M., White, G. J., Exaluzze, M., Shibai, H., AKARI Far-infrared all-sky survey maps, Publications of the Korean Astronomical Society, 27 巻, 2012, 111-116 (査読有り)

〔学会発表〕(計 50 件)

Morishima, T., Hattori, M., Chinone, Y., Development of component separation scheme based on hierarchical Bayes method, 2013年11月27日, MPA Garching (独)【招待講演】

服部誠, 宇宙背景放射(CMB)のサイエンスとPLANCKへの期待, 日本物理学会シンポジウム「Physics beyond the Standard Model Exploring Early Universe and Physics

beyond the Standard Model with CMB Observations」, 2011年9月18日, 弘前大学【基調講演】

Hattori, M., Bolometric Interferometer, The 10th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, 2009年11月16日無錫(中国)【招待講演】

〔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

<http://www.astr.tohoku.ac.jp/~hken/MosiTen>

<http://www.astr.tohoku.ac.jp/~hken/us.tohoku.abc>

アウトリーチ活動

主に高校生へのアウトリーチを目的に2011年度、2012年度“ひらめきときめきサイエンス”の企画として高校生の天文学者体験合宿講座“もしも君が杜の都で天文学者になったら。。。”(略称もし天)の第一回と第二回を研究代表者の服部が主催した。研究分担者の大坪もこの企画の運営に積極的に貢献した。2013年度は、服部、大坪は支援者として“もし天”の運営に携わった。ここまで東北を中心に全国から延べ39名の受講生を集め活動を展開してきた。本科学研究費のアウトリーチ活動の一環として立ち上げた事業であったが、仙台の新しい文化活動として東北の高校生を中心に根付きつつある。2014年度の開催も決まっており、準備を進めている。

高校への出前授業を毎年一回は行うことを心がけ以下のように実施してきた。2009年度宮城県立角田高校、2010年度東北大学理学部オープンキャンパス体験授業、2011年度岩手県立盛岡第三高校、2013年

度宮城県立仙台第一高校及び秋田県立秋田北高校。

本新学術領域の到達目標の一つである日本独自の宇宙マイクロ波背景放射偏光観測専用観測衛星 LiteBIRD 計画への天文学会会員からの幅広い理解を得る事を目的として2013年度天文学会秋季年会にてCMB 特別セッションを企画、主催した。延べ100名近い参加者を得て、天文学会会員に本新学術領域の活動内容とその意義を広める契機の一つとしての役割を果たした。

東北大学天文学教室の若手研究者の育成を目的とした頭脳循環プログラムを2011年度から2013年度の3年間代表者として実施した。研究課題の一つとして、本科研費の研究目標の一つである「あかり」遠赤外線宇宙地図の作成を取り上げ、研究分担者の大坪をこの分野で先駆的研究を行った実績のある Finkbeiner 氏の元に長期派遣した。この活動の様子は、上記ホームページの内二つ目にアップしたニュースレター第1号、5号、まとめ号、増刊号に詳しく紹介してある。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

服部 誠 (HATTORI, Makoto)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：90281964

(2) 研究分担者

大坪 貴文 (OOTSUBO, Takafumi)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：50377925

(3) 連携研究者

土井 靖生 (DOI, Yasuo)
東京大学・総合文化研究科・助教
研究者番号：70292844

松元 亮治 (MATSUMOTO, Ryouji)
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：00209660

田村 元秀 (TAMURA, Motohide)
国立天文台・光学赤外研究部・准教授
研究者番号：00260018

井上 開輝 (INOUE, Kaiki)
近畿大学・理工学部・准教授
研究者番号：70388495