

平成21年 5月 18日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2005～2008

課題番号：17540276

研究課題名（和文） 初期天体形成と背景放射

研究課題名（英文） Formation of Primordial Stellar Objects and Background Radiation

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

研究成果の概要：宇宙最初期の天体形成についての詳細な情報を、ビッグバンの化石である宇宙マイクロ波背景放射と中性水素ガスが放射する波長 21cm の電波を観測することによって得ることができることを示した。また、銀河間のガスのイオン化の過程について、星・銀河の形成に伴う場合、クエーサーによって引き起こされる場合の両者について詳細に検討を行った。さらに宇宙初期磁場の存在により、構造の形成が促進されることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,000,000	0	1,000,000
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,400,000	450,000	3,850,000

研究分野：宇宙論

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：宇宙物理、宇宙論、宇宙マイクロ波背景放射、構造形成、天体形成

1. 研究開始当初の背景

初期宇宙での天体形成過程は、理論的にも観測的にもまだまだ理解が進んでいなかった。この最初期天体形成は、直接観測が困難なことからダークエージと呼ばれる時代の一番最後、ないしはダークエージの直後に属している。

初期天体形成に伴って、大量の紫外線が放射されたと考えられる。この紫外線によって、ダークエージの当初、中性であった銀河間ガスは、イオン化される。このイオン化が確かに生じたことは、少し時代が下がってのことが、クエーサーの吸収線の観測から明らか

になっている。

一方で、このイオン化を引き起こしたのがいったい何であったのかもまだ解明されていなかった。通常は、星・銀河と考えるのであるが、クエーサー、さらには、ある種の素粒子の崩壊による可能性なども取りざたされていた。

詳細なイオン化の進行過程を観測できれば、イオン化を引き起こしたものの正体も明らかにできるものと期待される。

観測量としては、宇宙マイクロ波背景放射が銀河間ガスのイオン化過程の検証に使えるモノと考えられていた。イオン化されたガス

によって、宇宙マイクロ波背景放射が散乱される。この効果を、温度揺らぎや偏光成分の中に見つければ、銀河間ガスのイオン化の過程、さらには、初期天体形成過程も明らかにできるものと期待される。実際に、WMAP 衛星によって、温度揺らぎや偏光から、この時期についての示唆が得られるに至っていた。

さらに、中性水素の放射する波長 21cm の電波 (21cm 線) が赤方偏移したものが、観測量として、大変有望であることが明らかになってきていた。初期天体形成に伴うイオン化が進行する前は、中性水素が銀河間ガスの大半を占めており、それが 21cm 線を放射する。イオン化が進行するにつれて、放射強度が減少していく。細かく波長を変えて観測することで、イオン化の過程を明らかにできると考えられるようになっていたのである。しかし、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎ、偏光、そして 21cm 線といった観測量によって、具体的に天体形成過程の何が明らかにされるのかは、まだまだ検討段階であった。

2. 研究の目的

- (1) 宇宙最初期の天体形成に関する最も現実的な理論モデルを構築すること。
- (2) 宇宙マイクロ波背景放射や、21cm 線といった、背景放射という観測量を用いて、初期天体の形成過程を明らかにすること。
- (3) 通常の星・銀河以外が、宇宙の再加熱過程を引き起こした可能性を検証すること。また、星・銀河との再加熱過程の違いを明らかにし、将来の観測によって、モデルの検定が可能かどうか調べること。

3. 研究の方法

- (1) 天体形成に関して、可能な限り現実的な理論モデルとして、準解析的銀河形成モデルを用いる。星から生まれた星から生まれた紫外線がどれだけ銀河間ガスまで抜け出せるかを表すエスケープ・フラクションや、どれだけガスが集団化しているのかを表すクランピング・ファクター、さらに銀河の内部で、ダスト (塵) によって減光される割合の未知パラメータを、最新の観測結果や数値シミュレーションを参考にして決定していく。例えば現在最も重要な観測事実の一つである、WMAP衛星による温度揺らぎと偏光成分の測定を用いる。
- (2) 得られたモデルをもとに、温度揺らぎの計算を行う。イオン化した領域が周囲の構造がつくる重力によって運動するために宇宙マイクロ波背景放射を引きずり、ドップラー効果が生じるものである。この二次的な温度揺らぎを精密に評価する。また、宇宙マイクロ波背景放射の偏光成分についても計算を行う。
- (3) 通常の星・銀河以外に、銀河間ガスをイ

オン化する可能性を理論的に検証する。具体的には、ミニクエーサーからの X 線放射によるイオン化、原初ブラックホールの蒸発などが考えられる。さらには宇宙初期磁場による構造形成の加速も、銀河間物質のイオン化の過程にどのような影響を及ぼすか調べる。

4. 研究成果

- (1) 活動銀河核からの紫外光放射により、銀河間物質の温度や圧力、イオン化率などの物理状態がどのように変化していくのか、また、特に He のイオン化がどのように空間的に進行するのかについて、解析的モデルをたてて、計算を行った。このような活動銀河核は、宇宙が誕生して数億年の時代に最初に形成されたであろうブラックホールにガスが降着することで生まれたと考えられ、そこからの紫外線放射は銀河間物質のイオン化に大きな役割を果たすことが期待される。
- (2) 初期天体形成に非常に大きな影響を及ぼすと考えられる宇宙磁場がどのように形成され、そして発展していったのかについて、いくつかの仮説をたて計算を行った。まず、宇宙磁場が宇宙が誕生した直後に生成された場合について、磁場が膨張宇宙の中でどのように発展していったのかを、数値計算に基づく非線形過程を考慮して詳細に計算し、磁場の存在が宇宙マイクロ波背景放射やその偏光成分に及ぼす影響を調べた。続いて、宇宙磁場が密度ゆらぎの二次成分によって生成される可能性を見つけ、具体的な数値計算を実行した。その結果、ごく弱い磁場ではあるが、確かに密度ゆらぎによって、銀河や銀河団に対応するような大きなスケールの磁場が生まれることを示した。これまで考えられてきた様々な磁場の生成メカニズムに比べて、宇宙に実際存在している大規模構造を生み出した密度のゆらぎによって、きわめて自然に磁場が生成される、ということがこの新しい機構のユニークな点である。
- (3) 準解析的銀河形成モデルを用いて、宇宙の初期天体形成過程の研究と、その宇宙マイクロ波背景放射に及ぼす影響を調べた。最新の WMAP 衛星の結果は、これまで考えられていたよりも、初期天体形成が遅くなるというものであった。その結果と、冷たいダークマターモデルを含む銀河形成モデルからの理論的帰結を比べると非常によい一致を示すことがわかった。また最新の銀河形成モデルを用いたことで、最も現実的と思われる再加熱過程を得ることに成功した。さらに、その得られた結果から次世代宇宙マイクロ波背景放射探査衛星である PLANCK での観測の予想を得た。
- (4) オランダが主導する 21cm 吸収線の新しい観測計画 LOFAR プロジェクトと関係して、ミニクエーサーと呼ばれるクエーサーに

比べれば小さなブラックホール天体の形成過程、そこからの紫外線放射、さらにはイオン化した領域の成長を見積もった。イオン化した領域の成長は、逆に見れば中性領域が浸食されていく過程に他ならない。以上のことから、現在非常に期待されている、中性水素の量に対する初期宇宙における観測量である21 cm吸収線への影響を解析した。ここでは、とりわけ、中性水素ガスの熱化の過程について詳しく調べた。具体的には、熱化の過程に関する単純な解析的モデルを提唱し、そのモデルを放射輸送を含む数値計算の結果と比較しその有用性について示すことに成功した。

(5) 2009年5月に打ち上げられたPLANCK衛星によって、最初期の星形成のよって起きる宇宙再加熱過程についてどのような知見が得られるのか、銀河形成の理論モデルを用いて解析を行った。その結果、期待される宇宙マイクロ波背景放射の温度分布マップを作成した。このマップの統計的性質、特に揺らぎのガウス分布からのずれ、いわゆる非ガウス性について解析した。この結果は2007年12月14日から15日かけてパリ南大学天体物理学研究所で行われたPLANCK Working Group5研究会で報告した。

(6) 宇宙初期に生成される可能性のある、初期ブラックホール天体について、その蒸発が宇宙背景放射や宇宙再加熱などに与える影響について詳細に調べた。ブラックホールが蒸発する際に、光子を大量に放出する。この光子が背景放射に影響を与えるのである。詳細な理論的な予想をたて、実際の背景放射の観測と比較することで、宇宙初期に生み出されたブラックホールの数や密度揺らぎのパワースペクトルについて、これまでにない厳しい制限を課すことに成功した。

(7) 宇宙初期磁場の構造形成に対する影響などについても、その生成の物理過程を調べるとともに、継続して検討を行った。

さらに、構造形成によって生成される宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎ成分と、重力レンズ効果の相関について研究を進めた。両者の相関を取ることで、構造の形成の様子やダークエネルギーに対する制限がつけられる可能性があることを見つけたのである。

(8) 最初期の星形成によって起きる宇宙再加熱過程について、特に、銀河内ガスの電離状態がどのように進化していくのかについて、放射輸送方程式を解くことで、数値的に調べる研究を推進した。具体的には、中性水素のガスに囲まれた初期星が、紫外線を放射し、周囲のガスをイオン化していく過程と、引き続いて、星の寿命が尽きた後、水素原子が電子と再結合することによって、ガス雲が再び中性化していく過程を数値シミュレーションを用いて調べた。さらに、ガス雲に含まれる

中性水素が放出する波長21 cmの電波の強度を見積もり、将来の観測の予測を立てた。これは、LOFARや、将来の国際共同プロジェクトSKAなどで重点的に観測される予定になっている。

(9) 構造形成に伴う熱的な過程についても研究を進めた。具体的には、銀河群が形成される際に、銀河間ガスが高温にイオン化される過程を調べ、そこで生じる高エネルギー電子によって、宇宙マイクロ波背景放射が叩かれることで生じる温度揺らぎ、いわゆるスニャエフ・ゼルドヴィッチ効果についてその大きさを推定し、また、合わせて宇宙マイクロ波背景放射に生じるBモードと呼ばれるパターンの偏光成分の観測予測値を求めた。このBモードは、銀河間磁場の強度によってその生成量が変わるために、磁場のよい指標となりうる。これらの観測量は、今年打ち上げ予定のプランク衛星や、地上観測、さらには将来の偏光をターゲットにした衛星計画によって、測定される可能性がある。

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12件)

- ① Midori Tokutani, Naoki Yoshida, Peng S. Oh, Naoshi Sugiyama, “The 21-cm signature of early relic HII regions”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有り, 395, 2009, 777-780
- ② Hiroyuki Tashiro, Joseph Silk, Mathieu Langer, Naoshi Sugiyama, “The Sunyaev-Zel’dovich effect and Faraday rotation contributions of galaxy groups to the CMB angular power spectrum”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有り, 392, 2009, 1421-1428
- ③ Atsushi J. Nishizawa, Eiichiro Komatsu, Naoki Yoshida, Ryuichi Takahashi, Naoshi Sugiyama, “Cosmic Microwave Background-Weak Lensing Correlations: Analytical and Numerical Study of Nonlinearity and Implications for Dark Energy”, Astrophysical Journal Letters, 査読有り, 676, 2008, L93-L96
- ④ Hiroyuki Tashiro, Naoshi Sugiyama, “Constraints on primordial black holes by distortions of the cosmic microwave background”, Physical Review D, 査読有り, 78, 2008, 023004
- ⑤ K. Hamada, S. Horata, Naoshi Sugiyama, T. Yukawa, “Analyzing

- WMAP Observations by Quantum Gravity”, Progress of Theoretical Physics, 査読有り, 119, 2008, 253-262
- ⑥ S. Zaroubi, R.M. Thomas, Naoshi Sugiyama, J. Silk, “Heating of the intergalactic medium by primordial miniquasars”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有り, 375, 2007, 1269-1279
- ⑦ Hiroyuki Tashiro, Naoshi Sugiyama, “Probing primordial magnetic fields with the 21-cm fluctuations”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有り, 372, 2006, 1060-1068
- ⑧ A.J. Benson, Naoshi Sugiyama, A. Nusser, C.G. Lacey, “The epoch of reionization”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有り, 369, 2006, 1055-1080
- ⑨ Hiroyuki Tashiro, Naoshi Sugiyama, “Early reionization with primordial magnetic fields”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有り, 368, 2006, 965-970
- ⑩ K. Ichiki, K. Takahashi, H. Ohno, H. Hanayama, Naoshi Sugiyama, “Cosmological Magnetic Field: A Fossil of Density Perturbations in the Early Universe”, Science, 査読有り, 311, 2006, 827-829
- ⑪ H. Tashiro, Naoshi Sugiyama, R. Banerjee, “Nonlinear evolution of cosmic fields and cosmic microwave background anisotropies”, Physical Review D, 査読有り, 83, 2006, 023002
- ⑫ L. Gleser, A. Nusser, A.J. Benson, H. Ohno, Naoshi Sugiyama, “Patchy HeII reionization and the physical state of the intergalactic medium”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有り, 361, 2005, 1399-1414

[学会発表] (計 8件)

- ① Naoshi Sugiyama, “The Cosmic Microwave Background and Planck”, Taller Altas Energias 2008, 2008年9月1日-12日, スペイン・マドリード, マドリード自治大学
- ② Naoshi Sugiyama, “Cosmological Magnetic Fields”, 2008年1月27日-2月2日, ASPEN Winter Meeting on Cosmic Microwave, 米国コロラド州アスペン
- ③ Naoshi Sugiyama, “Patchy Reionization”, 2007年12月14日-15日,

PLANCK Satellite Working Group 5 Meeting, フランス・オルセー, パリ南大
学

- ④ Naoshi Sugiyama, “Anisotropies of Cosmic Microwave Background and Its Polarization”, International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics 2007, 2007年9月11日-15日, 仙台市・仙台市民会館
- ⑤ Naoshi Sugiyama, “Cosmological Magnetic Fields”, Finnish-Japanese Workshop on Particle Cosmology, 2007年3月8日-9日, フィンランド・ヘルシンキ, ヘルシンキ大学
- ⑥ Naoshi Sugiyama, “ALMA and Sunyaev-Zeldovich Effect”, ALMA Science Workshop, 2006年11月17日, スペイン・マドリード
- ⑦ Naoshi Sugiyama, “Cosmic Magnetic Fields”, International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics, 2006年11月15日, 台湾・台北, 台湾国立大学
- ⑧ Naoshi Sugiyama, “Constraining the EoR with High resolution CMB Data”, Reionizing the Universe, 2005年6月27日-7月1日, オランダ・フロンインゲン, フロンインゲン大学カプテイン研究所

[図書] (計 2件)

- ① 杉山直他, 日本評論社, 現代の天文学宇宙論 II, 2007年, 177-234 ページ
- ② 杉山直他, 日本放送出版協会, 物質環境科学 II 宇宙・自然システムと人類, 2008年, 25-56 ページ

[その他]

特に関連するアウトリーチ活動として、

- ① 第6回自然科学研究機構シンポジウム「宇宙究極の謎：暗黒物質、暗黒エネルギー暗黒時代」、講演題目「宇宙の3つの暗黒問題」、2008年9月23日、東京国際フォーラム、東京
- ② 日本天文学会一般講演会、講演題目「宇宙の始まりを見る」、2008年9月14日、岡山理科大学、岡山
- などがある (年間平均 20 回)。
ホームページは
<http://aserv.a.phys.nagoya-u.ac.jp/~naoshi/>

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

なし

(3) 連携研究者

Adi Nusser

Technion-Israel Institute of Technology
(イスラエル)・Physics Department・教授

Andrew Benson

California Institute of Technology(米
国)・Department of Astronomy・主任研究
員

Cedric Lacey

Durham University (英国)・Department of
Physics・研究員