

平成 22 年 6 月 11 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2009

課題番号：18540254

研究課題名（和文） 宇宙論的観測データを用いた初期宇宙の探求

研究課題名（英文） Research for the early universe using observational data

研究代表者

川崎 雅裕（KAWASAKI MASAHIRO）

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：50202031

研究成果の概要（和文）：インフレーション宇宙において超対称性理論などの素粒子の新しい理論で予言される様々な粒子や場についてそれが宇宙の熱的歴史に与える影響やインフレーション中に生成される密度揺らぎの性質(揺らぎのモード、スペクトルや統計性)を調べ、宇宙論的な観測データと比較することによって素粒子モデルやインフレーション宇宙モデルに対する制限を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We considered various particles and fields which are predicted in new models of particle physics such as supersymmetric theory and investigate their effects on thermal history of the universe and properties of density fluctuations produced during inflation. By using observational data we obtained constraints on particle physics and inflation models.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,100,000	0	1,100,000
2007 年度	900,000	270,000	1,170,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,400,000	690,000	4,090,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理（理論）

キーワード：素粒子的宇宙論、インフレーション、超対称性

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙論は観測の質と量、両面の急速な進歩によって発展し、特に、2003 年の WMAP による宇宙背景放射の観測によって、宇宙論は精密科学へと進化し新たな局面を迎えつつあった。また、WMAP が発見した宇宙背景放射の揺らぎはインフレーション宇宙の予言と矛盾しないものであり、インフレーションのように宇宙のごく初期に起きる素粒子現象の手

がかりを得ることができるようになった。したがって、宇宙論的な観測データを用いて地上の実験では直接確かめることが困難な素粒子モデルを検証することの重要性が高まった。

## 2. 研究の目的

(1) インフレーション宇宙：超対称性理論などの素粒子理論に基づいてインフレーションモデルを構築するとともに宇宙論的観測を用いてインフレーション宇宙モデルに対して制限を与える。

(2) 長寿命素粒子の宇宙論的制限：標準理論を超える素粒子理論で予言されるグラビティーノやアクシオンなど、相互作用が弱い粒子が元素合成や宇宙背景放射などに与える影響を調べることによって、その粒子の特性（寿命や質量等）、さらには、その粒子を予言しているモデルに対して制限を与える。

(3) 宇宙の物質の起源：宇宙における物質・反物質の非対称性の起源を説明するいくつかのメカニズムについてそれが現在の宇宙に残す痕跡を見いだしその観測可能性を議論する。

## 3. 研究の方法

(1) 様々なインフレーションモデルに関して、生成される密度揺らぎを解析的・数値的に評価し、観測データを再現できるかを検討する。その際に、モンテカルロを用いた統計解析法（マルコフ・チェーン・モンテカルロ法）を用いる。

(2) グラビティーノなどの不安定粒子が崩壊したときの軽元素合成に与える影響を調べるために、数値計算コード（Kawano コード）を改良し、崩壊によって生じる電磁・ハドロンシャワーの影響を取り入れて軽元素の生成量を計算する。

(3) 宇宙の物質・反物質の起源を説明するモデルではスカラー場のダイナミクスの理解が重要なポイントとなる。そのために3次元格子シミュレーションを行いスカラー場の宇宙進化を計算する。

## 4. 研究成果

(1) 超対称性（超重力）に基づくインフレーション宇宙モデルにおけるグラビティーノの非熱的生成過程を新たに見いだし、インフレーション宇宙モデルに制限が与えられることを明らかにした。

(2) 様々なインフレーションモデルに対して、観測データからどのモデルが選択されるべきかを判断する方法として Bayesian Model Selection を用いてスローロールタイプのイ

ンフレーションモデルについて解析を行いこの手法が有効であることを示した。

(3) 超対称性モデルにおいて、スカラー・タウやニュートラリーノなどの超対称性粒子がグラビティーノに崩壊する場合に崩壊によって生成された粒子が宇宙初期の元素合成に与える影響を調べ、軽元素の観測と比較することによって超対称性粒子の質量・存在量に対する制限を得た。

(4) 宇宙初期の元素合成におけるヘリウムの生成量に対する観測的制限を精密化するために、系外銀河のHII領域におけるヘリウムの存在比の再解析を星による吸収を考慮して行い、従来の解析に大きな系統誤差があることを指摘した。再解析の結果、従来よりも大きなヘリウムの存在比量が推定され、これは、宇宙背景放射の結果とも一致することが分かった。

(5) 超対称性アクシオンモデルに関して、アクシオンの超対称性パートナーであるアクシーノとスアクシオンが宇宙の熱史に与える影響を詳細に調べ、インフレーション宇宙の再加熱温度に厳しい上限がつけられることを明らかにした。

(6) 超対称性理論で宇宙の物質・反物質非対称性を説明するアフレック・ダイン・モデルでは一般に、バリオン非等曲率揺らぎが生じる。従来、アフレック・ダイン場とインフラトンとの相互作用により揺らぎが抑制されると考えられていたが、現実的なインフレーションモデルでは非等曲率揺らぎが抑制されず、観測からモデルに制限が得られることを明らかにした。

(7) 素粒子の超弦理論では比較的軽いスカラー場（モジュライ場）の存在が予言される。モジュライは宇宙初期に数多く存在し、その密度が大きいため様々な宇宙論的な問題（モジュライ問題）を引き起こす。このモジュライ問題の解決法としてとしてモジュライの質量が大きく十分早い時期に崩壊する場合が考えられるが、重いモジュライはその崩壊によって大量のエントロピーを生成し、それによって宇宙のバリオン密度が薄められてしまうという新たな問題を引き起こす可能性がある。そこで、アフレック・ダイン機構が薄められても十分なバリオン数を生成できるかを調べ、モジュライ問題の解決とバリオン数生成が両立できる場合があることを明らかにした。

(8) アフレック・ダイン・モデルにおいてアフレック・ダイン場が振動する際に生成さ

れるQボールと呼ばれる非トポロジカル・ソリトンに関し、その生成過程を3次元格子シミュレーションを用いて高精度で計算し、Qボールの分布を求めた。

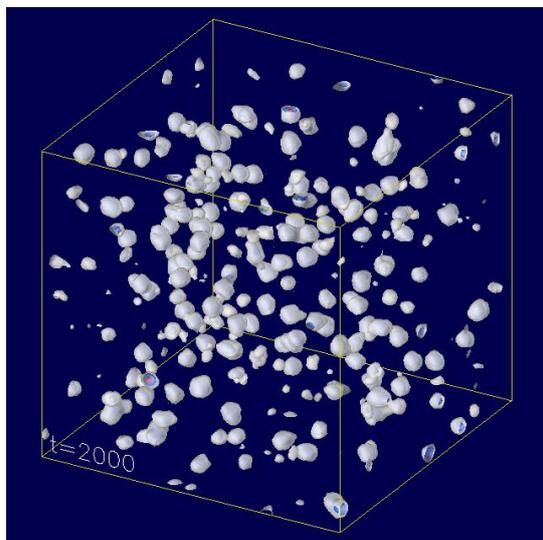


図1 Qボールのシミュレーション

(9) WMAP衛星による宇宙背景放射の温度揺らぎの観測から示唆された揺らぎの非ガウス性について、等曲率揺らぎの場合に着目して、等曲率揺らぎが通常の断熱揺らぎに対して小さい場合でも、大きな非ガウス性をもたらすことがあることを示した。また、大きな非ガウス性をもった等曲率揺らぎを生成するモデルとして、アクシオン・モデルと超対称性に基づくバリオン数生成機構であるアフレック・ダイン・モデルを考え、非ガウス性の大きさ、モデルの特徴を明らかにした。

(10) インフレーションに生成される等曲率揺らぎに関して、観測からスケール普遍性から大きくずれたスペクトラムが示唆されていたが、そのようなスペクトルを予言する理論モデルは存在していなかった。そこで、超対称性の枠組みでアクシオン・モデルを考え、比較的 naturally スケール普遍性から大きくずれたスペクトラムが生成されることを示した。

(11) PAMELA衛星によって発見された陽電子・電子宇宙線のスペクトル異常に関係して、観測された陽電子・電子フラックスを説明するモデルとして、暗黒物質を担っているTeV程度の質量を粒子の対消滅を考え、対消滅の際に放出されるニュートリノのフラックスを計算し、SuperKamiokandeでの観測可能性を調べ

た。また、宇宙初期の元素合成や宇宙背景ガンマ線に及ぼす影響を明らかにした。さらに、再結合の後に起こる対消滅の際に放出される電子による宇宙の再イオン化に与える影響を調べるために、高エネルギー電子が宇宙に放出した場合に宇宙のバックグラウンド・プラズマに与える影響を計算するコードを開発し、それを暗黒物質の対消滅に適応し、対消滅断面積に対する制限を得た。

## 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 51 件)

1. T. Hiramatsu, M. Kawasaki, F. Takahashi, “Numerical study of Q-ball formation in gravity mediation,” JCAP 1006, 008 (2010) 査読有
2. M. Kawasaki, T. Sekiguchi, “Probing the primordial power spectra with inflationary priors,” JCAP 1002, 013 (2010) 査読有
3. T. Hiramatsu, M. Kawasaki, F. Takahashi, “Numerical study of Q-ball formation in gravity mediation,” JCAP 1006, 008 (2010) 査読有
4. K. Ichikawa, M. Kawasaki, K. Nakayama, T. Sekiguchi, T. Takahashi, “Constraining Light Gravitino Mass from Cosmic Microwave Background,” JCAP 0908, 013 (2009) 査読有
5. S. Kasuya, M. Kawasaki, “Axion isocurvature fluctuations with extremely blue spectrum,” Phys. Rev. D 80, 023516 (2009) 査読有
6. M. Kawasaki, K. Kohri, K. Nakayama, “Diffuse gamma-ray background and cosmic-ray positrons from annihilating dark matter,” Phys. Rev. D 80, 023517 (2009) 査読有
7. J. Hisano, M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, K. Nakayama, “Cosmic Rays from Dark Matter Annihilation and Big-Bang Nucleosynthesis,” Phys. Rev. D 79, 083522 (2009) 査読有
8. J. Hisano, M. Kawasaki, K. Kohri, K. Nakayama, “Positron/Gamma-Ray Signatures of Dark Matter Annihilation and Big-Bang Nucleosynthesis” Phys. Rev. D 79, 063514 (2009) 査読有
9. M. Kawasaki, K. Nakayama, F. Takahashi, “Non-Gaussianity from Baryon Asymmetry,” JCAP 0901, 002 (2009) 査

読有

10. M. Kawasaki, K. Nakayama, T. Sekiguchi, T. Suyama, F. Takahashi, “Non-Gaussianity from isocurvature perturbations,” JCAP 0811, 019 (2008) 査読有
11. S. Kasuya, M. Kawasaki and F. Takahashi, “Isocurvature fluctuations in Affleck-Dine mechanism and constraints on inflation models,” JCAP 0810, 017 (2008) 査読有
12. M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, A. Yotsuyanagi, “Big-Bang Nucleosynthesis and Gravitino,” Phys. Rev. D 78, 065011 (2008) 査読有
13. M. Kawasaki, K. Nakayama, M. Senami, “Cosmological implications of supersymmetric axion models,” JCAP 0803, 009 (2008) 査読有
14. M. Kawasaki, T. Sekiguchi, “Cosmological Constraints on Isocurvature and Tensor Perturbations,” Prog. Theor. Phys. 120, 995-1016 (2008) 査読有
15. M. Kawasaki, K. Nakayama, “Baryon asymmetry in heavy moduli scenario,” Phys. Rev. D 76, 043502 (2007) 査読有
16. M. Kawasaki, K. Kohri and T. Moroi, “Big-bang nucleosynthesis with long-lived charged slepton,” Phys. Lett. B 649, 436-439 (2007) 査読有
17. T. Kanzaki, M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, “Cosmological constraints on gravitino LSP scenario with sneutrino NLSP,” Phys. Rev. D 75, 025011 (2007) 査読有
18. M. Endo, M. Kawasaki, F. Takahashi, T. T. Yanagida, “Inflaton Decay through Supergravity Effects.” Phys. Lett. B 642, 518-524 (2006) 査読有
19. M. Kawasaki, F. Takahashi, T. T. Yanagida, “The gravitino overproduction problem in inflationary universe,” Phys. Rev. D 74, 043519 (2006) 査読有
20. M. Kawasaki, F. Takahashi, T. T. Yanagida, “Gravitino overproduction in inflaton decay,” Phys. Lett. B 638, 8-12 (2006) 査読有
21. M. Fukugita, M. Kawasaki, “Primordial Helium Abundance: A Reanalysis of the Izotov-Thuan Spectroscopic Sample,” Astrophysical Journal 646, 691-695 (2006) 査読有

[学会発表] (計 3 件)

1. Cosmological Constraints on Gravitino

and Axion in the Inflationary Universe” Hot topics in Modern Cosmology Spontaneous Workshop 2, Carese, France, 2008 年 5 月 15 日

2. M. Kawasaki, “Supersymmetry and cosmology: Inflation, gravitino and axion,” International Workshop on Grand Unified Theories (GUT07), 滋賀, 2007 年 12 月 19 日
3. M. Kawasaki “Moduli Problem, Thermal Inflation and Baryogenesis,” Finnish-Japanese Workshop on Particle Cosmology, Helsinki, Finland, 2007 年 3 月 9 日

[図書] (計 1 件)

1. 佐藤、二間瀬、川崎、佐々木、白水、横山、シリーズ現代の天文学「宇宙論 I」(日本評論社) 246 ページ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川崎 雅裕 (KAWASAKI MASAHIRO)  
東京大学・宇宙線研究所・教授  
研究者番号: 50202031

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし