

平成16年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな		さとう かつひこ					
研究代表者氏名		佐藤 勝彦		所属研究機関・部局・職		東京大学・大学院理学系研究科・教授	
研究課題名	和文	宇宙初期における時空と物質の進化					
	英文	Evolution of space-time and matter in the early universe					
研究経費 16年度以降は内約額 金額単位：千円	平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計	
	14,500	13,600	13,600	10,400	12,000	64,100	
研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
佐藤 勝彦	東京大学・大学院理学系研究科・教授	宇宙物理	研究の総括・残存粒子から探る宇宙初期				
柳田 勉	東京大学・大学院理学系研究科・教授	素粒子理論	素粒子物理学に基づく初期宇宙の研究				
吉村 太彦	岡山大学・理学部・教授	素粒子物理学・宇宙論	宇宙の物質創生の基礎理論				
佐々木 節	京都大学・基礎物理学研究所・教授	宇宙論・相対論	初期宇宙の時空モデルと揺らぎの理論				
川崎 雅裕	東京大学・大学院理学系研究科・教授	宇宙論	インフレーション宇宙モデル				
須藤 靖	東京大学・大学院理学系研究科・助教授	宇宙論	銀河団の進化と宇宙論パラメータの決定				
白水 徹也	東京工業大学・大学院理工学研究科・助教授	宇宙物理学	ブレン・ワールド宇宙論				
樽家 篤史	東京大学・大学院理学系研究科・助手	観測的宇宙論	宇宙の構造形成				
長滝 重博	京都大学・基礎物理学研究所・助教授	宇宙物理学	高エネルギー天体から探る物質の進化				
当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>最近の素粒子理論の発展によって、我々の宇宙に関する理解は深まるとともに、新たな謎も生まれている。初期宇宙での急激な加速度膨張に基づくインフレーション宇宙モデルは標準ビッグバン理論の問題点を解決するモデルとして1980年代初めに本研究代表者らによって提唱されたものである。このモデルはここ数年の宇宙背景輻射の観測などによって支持され、宇宙の標準的な理論的枠組みという地位を確立しつつある。しかし、インフレーションが素粒子模型としてどう実現されるか、様々なインフレーション・モデルの中でどれが正しいのかといった基本的問題はまだ解決されていない。さらに、インフレーションが起こる前の宇宙はどうなっていたのかといった素朴な疑問に答えようとする、超弦理論等のプランク・スケールの物理を記述する理論の下で宇宙論を考察する必要がある。そのような理論は時空がもはや4次元ではなく10次元や11次元であることを予言しており、宇宙の進化とともに空間が何らかのメカニズムによって我々が通常認識できる3次元を残し、残りの次元はコンパクト化したと考えられる。このような多次元宇宙とインフレーション宇宙はどう関連しているのか、またそれを確かめる観測可能な痕跡はあるのかといった新たな謎が生まれ、世界中の宇宙論研究者がようやく最近になってこの問題に取り組み始めたというのが現状である。本研究の目的は、最近の素粒子物理学の発展や新しいアイデアを駆使して初期宇宙の進化を素粒子的宇宙論・相対論的宇宙論の立場から理論的に調べ、新しい宇宙像を構築し、また、宇宙初期に作られる密度揺らぎの進化から観測的な予言・検証を行うことである。</p>							

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

- (i) ブレーン・ワールド宇宙論においてその初期において生成される始源的ブラックホールの形成及びその蒸発に伴う宇宙論的效果について研究を進めた。その結果初期段階で生成されるブラックホールは5次元のブラックホールとして生成され蒸発し、それをガンマ線宇宙背景放射の観測と比較することにより、その量やブレーンの厚さについて制限を付けられることが明らかになった。
- (ii) 超新星からのニュートリノ放出時のニュートリノ振動について解析し、宇宙初期の超新星起源背景ニュートリノの観測可能性が振動の効果により大きく高まることを示した。
- (iii) ブレーン世界シナリオに基づき、余剰次元中に住む重力的スカラー場によるブレーン・インフレーションを考え、その宇宙論的密度揺らぎを解析した。その結果、低エネルギーブレーンでは、標準的4次元理論と全く同じ観測的予言を与えることが分かった。
- (iv) WMAPによって得られた宇宙背景放射の観測から、密度揺らぎのスペクトルは非常に大きなスケールにおいて通常より振幅が小さく、また、スペクトル指数のスケール依存性が示唆されている。これを超重重力理論の枠組みでダブル・インフレーションを起こすモデルを用いて説明した。
- (v) 超対称性理論の枠組みでバリオン生成機構であるアフleck・ダイン・メカニズムに伴って作られるQボールの宇宙論的進化を有限温度の効果を取り入れて解析した。
- (vi) ブレーン・ワールド宇宙の観測的実験的検証を念頭に置いた基礎研究を行った。高次元時空の宇宙背景放射の揺らぎへの効果の評価に必要な短波長モードを落とした有効理論の導出の定式化を行った。また、高次元ブラックホールの実験検証を睨み、高次元時空の漸近構造の解析を行ってきた。
- (vii) 重力進化に伴って現われる宇宙大規模構造の非ガウスの性質に着目し、質量密度ゆらぎの対数正規性と、自己重力天体の密度構造との関わりを調べた。こうした自己重力天体の長時間進化を、N体シミュレーションを用いて調べることで、巾分布で近似される準平衡状態の存在とその性質を明らかにした。
- (viii) 中性子星は超高エネルギー宇宙線を含めた、高エネルギー粒子の起源天体として期待されている。パルサー風に陽子が含まれている場合、パルサー風と超新星残骸の相互作用により生じる衝撃波の散逸によってランダム運動している陽子同士が衝突すれば多量のパイオンを生成し、結果として多量のニュートリノ及びガンマ線を放出するのではないかという予想のもとに計算を進め、そのフラックスの評価を行った。
- (ix) 宇宙の大構造のトポロジーの定量化とその進化について、特に非ガウス性という観点から、SDS S銀河サンプルを用いて、観測データ、線形理論、シミュレーションの予言との比較を行った。また、これと並行してその目的のための新たな統計指標の開発を行い、ミンコフスキー汎関数の応用と、フーリエ空間における密度ゆらぎの位相和という手法を見出した。

特記事項（これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。）

- (i) 我々の超新星起源宇宙背景ニュートリノの理論的研究と並行してスーパーカミオカンデグループは観測的上限の解析を新たな手法で進め、従来の値よりはるかに小さな値を得た。我々はこのデータをも参考とし、さらにニュートリノの逆質量階層モデルやニュートリノが磁気モーメントを持っている場合についても研究を進め、観測上限値の1/3にも達することを示した。このことはスーパーカミオカンデグループにさらにバックグラウンドを下げる動機を与えた。近い将来、観測によってニュートリノモデルに制限が得られる可能性が大きくなった。
- (ii) 従来の高次元時空モデルでは余剰次元の大きさが最大0.1mmという実験的制限があるが、5次元Einstein Gauss-Bonnet理論に基づくと、この制限が大幅に緩められ10kmにもなり得ることが分かった。この理論に基づく宇宙論的・宇宙物理学的予言や実験・観測による検証可能性の研究は緊急の課題である。
- (iii) 超対称性理論とインフレーション宇宙モデルに基づくアフレック・ダイン・メカニズムは宇宙のバリオン数を説明する有力なモデルであるが、これにQボールと呼ばれるソリトンの生成が重要な役割を果たすことが分かり、従来のアフレック・ダインのシナリオが大きく変更されるとともに、Qボールによって宇宙のバリオン数とダークマターの密度の間に関係が付けられるという非常に興味深い可能性が出てきた。
- (iv) これまで定式化したブレーンワールドモデルの方法をもとに、素粒子論に基づいたより現実的な理論に応用を試みた。そこでは、ブレーンは張力と電荷を持ったDブレーンである。驚くべきことに、そのブレーン上の有効理論から、宇宙項と重力の結合定数との間に比例関係があることがわかった。すなわち、現在宇宙項が存在することと重力理論が正常であることが深く関係している結果を得た。
- (v) パルサー風中の相対論的陽子同士の衝突を考えた研究は過去になく、全く新しい高エネルギーニュートリノの生成メカニズムを提案できた。従来、高エネルギーニュートリノのソースについては銀河外の天体が多く言われていたが、銀河内にもこのような天体があり、中性子星が確かに宇宙線の生成場であることを、ニュートリノ天文学によって検証できることが示せた。
- (vi) 宇宙の大構造の非ガウス性を特徴付ける統計量はすでいくつか提案されているが、位相相関を直接取り扱ったものは従来まったく知られておらず、位相和を用いる手法は全く新しい観点である。

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。)

- 1) Yuuiti Sendouda, Shigehiro Nagataki and Katsuhiko Sato: "Constraints on Mass of Primordial Black Holes and Braneworld Parameters from High-Energy Diffuse Photon Background", Phys.Rev. D68, 103510 (2003)
- 2) Sin'ichiro Ando, Katsuhiko Sato: "Supernova relic neutrinos and observational implications for neutrino oscillation", Phys. Lett. B 559, 113-119(2003)
- 3) M. Fujii, M. Ibe and T. Yanagida: "UPPER BOUND ON GLUINO MASS FROM THERMAL LEPTOGENESIS", Phys.Lett., B579, 6-12 (2004)
- 4) M. Fujii, M. Ibe (Tokyo U.), T. Yanagida: "THERMAL LEPTOGENESIS AND GAUGE MEDIATION", Phys.Rev., D69, 015006 (2004)
- 5) Masato Minamitsuji, Yoshiaki Himemoto and Misao Sasaki: "Geometry and cosmological perturbations in the bulk inflaton model", Physical Review D, vol.68, 024016 (2003)
- 6) Nathalie Deruelle and Misao Sasaki: "Newton's law on an Einstein 'Gauss-Bonnet' brane," Progress of Theoretical Physics, vol. 110, 441-456 (2003)
- 7) S. Kasuya, M. Kawasaki, F. Takahashi: "Affleck-Dine mechanism with negative thermal logarithmic potential", Physical Review D68 023501-1--15 (2003)
- 8) M. Kawasaki, M. Yamaguchi, J. Yokoyama: "Inflation with a running spectral index in supergravity", Physical Review D68 023508-1--10 (2003).
- 9) Tetsuya Shiromizu, Kazuya Koyama, Sumitada Onda, Takashi Torii: "CAN WE LIVE ON A D-BRANE? EFFECTIVE THEORY ON A SELFGRAVITATING D-BRANE", Physical Review D68, 063506(2003)
- 10) Tetsuya Shiromizu, Kazuya Koyama: "LOW-ENERGY EFFECTIVE THEORY FOR TWO BRANE SYSTEMS: COVARIANT CURVATURE FORMULATION", Physical Review D67, 084022(2003)
- 11) Atsushi Taruya, Takashi Hamana and Issha Kayo: "Non-Gaussian Tails of Cosmological Density Distribution Function from Dark Halo Approach", Monthly Notices of Royal Astronomical Society, vol.339, 495-504 (2003)
- 12) Atsushi Taruya and Masa-aki Sakagami: "Long-term Evolution of Stellar Self-Gravitating System away from Thermal Equilibrium : connection with non-extensive statistics", Physical Review Letters, vol.90, 181101 (2003)
- 13) Shigehiro Nagataki: "High-Energy Neutrinos Produced by Interactions of Relativistic Protons in Shocked Pulsar Winds", The Astrophysical Journal, Vol. 600, 883-904 (2004)
- 14) Shigehiro Nagataki, Akira Mizuta, Shoichi Yamada, Hideaki Takabe, Katsuhiko Sato: "Explosive Nucleosynthesis Associated with Formation of Jet-induced Gamma-Ray Bursts in Massive Stars", The Astrophysical Journal, Vol. 596 401-413 (2003)
- 15) Chiaki Hikage, Takahiko Matsubara and Yasushi Suto: "The Distribution function of the Phase sum as a Signature of Phase Correlations Induced by Nonlinear Gravitational Clustering", The Astrophysical Journal, vol. 600, 553-563 (2004)
- 16) Chiaki Hikage, Jens Schmalzing, Thomas Buchert, Yasushi Suto, Issha Kayo, Atsushi Taruya, Michael S. Vogeley, Fiona Hoyle, J. Richard Gott III, and J. Brinkmann: "Minkowski Functionals of SDSS galaxies I: Analysis of Excursion Sets", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 55, 911-931 (2003)