

宇宙初期における時空と物質の進化

Evolution of matter and spacetime in the early universe

佐藤 勝彦 (Sato, Katsuhiko)

東京大学・大学院理学系研究科・教授



研究の概要

宇宙初期のパラダイムとなっているインフレーションモデル、また超ひも理論から示唆される多次元宇宙論を発展させた。またこれらが現在の宇宙に対してどのような観測的予言を与えるか、さらに観測によってその予言を検証することでモデルにいかなる制限が導かれるかを考察し、初期宇宙の理論モデルを構築に大きく寄与した。

研究分野：数物系科学

研究費の分科・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：素粒子物理、宇宙線、宇宙物理、相対論・重力波

1. 研究開始当初の背景・動機

1980年代初めに本研究代表者等によって提唱されたインフレーション宇宙モデルは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、素粒子模型としてどう実現されるかという基本的問題はまだ解決されていない。超ひも理論から示唆される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問題が生じている。

2. 研究の目的

このような背景の下、本研究の目的は最近の素粒子物理の発展や新しいアイデアに応じ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。多次元宇宙の進化とブレーン・ワールド、インフレーション宇宙モデルと物質・反物質の非対称性の起源、残存粒子から探る宇宙初期、観測による初期宇宙モデルの検証などの項目に重点を置いて研究を発展させ、それらを総合して新たな宇宙像を構築することを目指す。

3. 研究の方法

新たな素粒子モデルに基づく解析研究や並列計算機によるシミュレーションなど理論的研究によって上記の課題に取り組む。

4. 研究の主な成果

1) 弦理論など高次元時空理論に基づくインフレーション宇宙では、曲率揺らぎに観測可能なレベルの非ガウス性を生成するモデルが多数存在する。これらのモデルを検証するため、超ハッブルスケールでの非線形曲率揺らぎを一般的に取り扱うことができる非線形 δN 形式を提唱し定式化した。初期宇宙モデルと観測量を関連付ける強力な理論であり、今や世界中の当該分野の大多数の研究者が使用する非常に強力な道具になっている。

2) 「漸近的に平坦で回転のないブラックホール解は高次元シュバルツシルト解のみに限られる」という「唯一性定理」の証明に成功した。4次元時空ではブラックホールの形は2次元球面であるという **Hawking** の定理があったが、高次元では存在しない。しかし、静的な場合に限ると形が高次元球面になることが分かった。この定理後、研究対象は静的時空から定常時空に移行し、現在新しい解の発見競争ならびに定常時空の唯一性定理の新しい定式化といったような新たな研究の潮流へとつながっている。

3) 最も有力なバリオン数生成の機構と考えられている **Leptogenesis** においてニュートリノ振動現象に現れる **CP** の破れの符号と宇宙のバリオン数を関係させるモデルを提唱した。

4) ビッグバン元素合成においてグラビティーノ崩壊など、クォーク・グルーオンからのハドロン化、ハドロンシャワー過程、核子と

軽元素の比熱的反応過程等を詳細に評価し、元素合成からのハドロン放出崩壊に対する制限を求めることに成功した。これはインフレーション宇宙モデル構築に重要な手がかりを与えるとともに、宇宙の物質・反物質の起源を説明するバリオン数生成機構に対しても重要な示唆・制限を与えた。

5) プレーン宇宙モデルにおける始原的ブラックホールの蒸発によって光子や陽子やその反粒子である反陽子が放出される。これにより形成される背景ガンマ線、X線放射、また反陽子の量が現在の観測上限値を超えないこと等の条件から、ブラックホールの量や、バルク空間の曲率等に制限が付けられることがわかった。さらにインフレーションによって生成される揺らぎのスペクトラムについて制限が付けられることをしめした。

6) 数値シミュレーションを用いて銀河団重力ポテンシャルの3軸不等モデルを経験的に構築することができた。これにより非球対称性の効果を初めて定量的に取り扱うことが可能となり標準的な冷たい暗黒物質モデルでは説明できないとされていた重力レンズ銀河アークの存在確率が3~10倍増加し、観測と一致することが示された。さらに銀河団内での温度プロファイルの存在と、密度・温度の対数正規分布モデルを組み合わせることで、従来X線分光から推定されていた銀河団温度が15パーセント程度系統的に過小評価されていたことを発見し、それがスニャーエフ・ゼルドビッチ効果から推定されるハッブル定数が同程度過小評価されてきた物理的原因であることを突き止めた。

7) 宇宙の大規模構造の非ガウス性を定量的に表す解析的モデルを構築し、非ガウス性を特徴づける分布として経験的に使われてきた対数正規分布の物理的な理解を与えることにも成功した。一方、スローンデジタルスカイサーベイによる銀河分布のデータを用い、非ガウス性を特徴づける様々な統計指標を用い、銀河を色・形態に応じて分類し、その分類ごとに統計量を評価した結果、非ガウス性の発達具合が銀河の分類ごとに異なることをつきとめた。このように銀河進化による非ガウス性の影響を分離する礎が与えられ、密度ゆらぎの初期条件を探る基盤を作ることができた。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

本研究開始時においては、高次元宇宙論は観測とは関係ない純理論的な可能性と考えられていた。しかし、数年間にわたって世界

をリードしてきた本研究の成果をもとに、観測データを用いてその可能性を検証できるモデルとなった。さらに本研究の成果は、すばる望遠鏡に広視野撮像装置ハイパーシューブリームカムを建設し、重力レンズ、銀河団観測、を組み合わせる宇宙の暗黒エネルギーの性質を決定するという研究拠点形成プログラム「暗黒エネルギー研究国際ネットワーク」(コーディネーター: 須藤靖) などへと発展している。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

1) Inflationary fluctuation in the R-S cosmology: limits on blue spectra, Y. Sendouda, S. Nagataki, **K. Sato** Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 06 巻, 003 (26 頁) (2006).

2) Big-bang nucleosynthesis and hadronic decay of long-lived massive particles M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, Physical Review D, 71 巻, 083502 (47 頁) (2005).

3) A general proof of the conservation of the curvature perturbation D. H. Lyth, K. A. Malik, M. Sasaki Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 05 巻, 004 (19 頁) (2005).

4) Low energy effective theory for two branes system, T. Shiromizu, K. Koyama Physical Review D, 67 巻, 084022 (4 頁) (2003).

5) Non-Gaussian tails of cosmological density distribution function from dark halo approach A. Taruya, T. Hamana, I. Kayo, Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, 339 巻, 495--504 (2003).

6) Uniqueness and non-uniqueness of the static black holes in higher dimensions G. W. Gibbons, D. Ida, T. Shiromizu Physical Review Letters, 89 巻, 041101(4 頁) (2002).

7) Triaxial Modeling of Halo Density Profiles with High-resolution N-body Simulations Y.P. Jing, Y. Suto The Astrophysical Journal, 574 巻, 538--553 (2002).

8) Cosmological sign of neutrino CP violation. P.H. Frampton, S.L. Glashow, T. T. Yanagida Physics Letters B, 548 巻, 119--121 (2002).