

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540256

研究課題名 (和文) 宇宙・重力の相転移と構造形成 —広領域宇宙物理学の開拓—

研究課題名 (英文) Phase transition in the universe - frontiers of astrophysics -

研究代表者

森川 雅博 (MORIKAWA MASAHIRO)

お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・教授

研究者番号：90192781

研究成果の概要：

本研究では、宇宙の構造形成や進化の本質を**広義の相転移現象**として系統的に捉える視点から、現在の宇宙論の基本的問題に解答を与えていくという計画であった。目標は、宇宙論という視点から広義の相転移機構と基礎法則を確立することであった。

【暗黒エネルギーと暗黒物質の凝縮宇宙モデル】我々が提唱している新しい宇宙モデルの基礎を築いた。特に今までは暗黒物質が一様に分布している場合に限って解析してきたが、非一様性モードの不安定性と凝縮体の崩壊を議論した。解析的計算でも数値計算でも、 0.003eV という特徴的なボゾン質量スケールが得られた。また、崩壊に伴う特徴的なスケールがその質量に大きく依存することなどを見出した。

【量子—古典相転移】今までに我々が解析してきた、量子測定と自発的対称性の破れの議論がかなり一般的に成立しそうだということがわかってきた。モデルをスピンの系に限定して、測定過程の相転移に着目して、量子測定の本質 (エンタングルメント、デコヒーレンス、プロコヒーレンス、対称性の自滅) を得た。もっと一般的な対称性を持つ系に対しても我々の解析の有効性が示唆された。

【自己重力系の秩序構造の普遍性】今までの我々の研究で、自己重力系に特徴的な「局所ピリアル関係」の起源を、自己臨界組織化と捕らえられることがわかりつつある。特に、再規格化することによって普遍的な速度分布関数が得られ、これを元に蒸発率が一様という基準を適用すれば局所ピリアル関係を導けることを示した。

【フェルミオン場凝縮相転移と銀河団回りの暗黒物質】

宇宙におけるフェルミオン凝縮の可能性として、A1689 銀河団の周りの暗黒物質をニュートリノ凝縮と結び付けて議論した。観測結果を再現するフェルミオン質量パラメータとして、ニュートリノ質量に近い値が得られた。このモデルでは、特に中心で密度分布がフラットになることが予言されるが、観測でもそれに近い特性があることがわかった。

【BEC 宇宙モデルの初期宇宙への応用】

BEC 宇宙モデルを初期宇宙に応用し現実性を検証した。 <http://arxiv.org/abs/0905.0173>

特にインフレーション期が自然に終了するスタグレーション期を発見した。この時期は2つの重要な要素を持つ。1つ目は、粒子生成が激しく起こり宇宙の再加熱が自然に起こることである。2つ目は、その不安定性のために、一様な BEC は崩壊し局在することである。スタグレーションはエネルギーが厳密に0で実現するので、宇宙項 Λ が漸近的に消滅する。つまり、BEC 崩壊と BEC 再凝縮が繰り返し起こり、そのつど宇宙項に相当する真空エネルギーが減少

するのである。このことは数値的にも確認された。意義と重要性：

1. 宇宙項問題の解決。過去には一様モードの範囲で純力学的にこの問題が論じられていた。我々は一様モード崩壊など相転移を通して、 $\Lambda = 0$ が実現する新しい視点を与えた。
2. 相転移が作る宇宙構造。BEC 生成/崩壊の連続が、初期から現在まで繋がっている可能性を指摘し、暗黒物質・エネルギーだけでなく加速膨張も統一するモデルを提案した。

【宇宙の暗黒物質乱流論】

宇宙の暗黒物質乱流論を発展させた。無衝突系の線形摂動が火面通過後、どのような秩序を作るかを議論し、現在観測されている宇宙の様々なスケールリング則が、初期条件でなく、構造形成過程の必然として出現するシナリオを完成させた。意義と重要性：

1. 非線形領域で作られる構造の普遍性のみならず、その簡便な解析方法を与えた。
2. 個別に初期条件依存して議論されている様々なスケールリングの統一的な理解が可能になった。これには磁場や角運動量分布の普遍性も含まれる。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2006 年度 | 2,000,000 | 0 | 2,000,000 |
| 2007 年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2008 年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 420,000 | 3,820,000 |

研究分野：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

キーワード：ダークエネルギー、ボーズアインシュタイン凝縮、インフレーション、宇宙項問題、ダークマター、乱流、自己重力系、スケールリング

1. 研究開始当初の背景

(準備状況)

宇宙・重力の相転移の系統的な記述のために、申請者は今まで以下のように準備して来た。これらを拡充してさらに発展させたい。

(1) 量子揺らぎの古典化過程を記述する一般化された有効作用の方法を構築した。

(2) 相転移現象としてのインフレーション。秩序変数発展の運動方程式を有効作用から導く方法を提唱した。中性子星をスケールアップした凝縮構造で、A1689 などの銀河団中心の大きな密度集中を説明するモデルの提唱。

(3) 暗黒物質・暗黒エネルギーをボーズ凝縮体として統一するモデルの提唱。

(4) 時空の祖視化を繰り込み群で記述する方法を提出した。

(5) 重力系を非相加統計力学で記述するボイド確率の方法を構成した。

2. 研究の目的

宇宙は、 10^{-34} cm の初期宇宙から 10^{28} cm のホライズンまで 60 桁以上にわたって広がりを持ち、天体や物質は多様な存在形態や進化を示す。この宇宙の構造や進化は、現在までに一応形式的には、かなり理解されてきている。暗黒物質や暗黒エネルギーを仮定した標

準宇宙モデルのパラメーターは WMAP・超新星光度はじめ多くの観測から整合的に特定できている。しかしこれらの成功は主に揺らぎの線形領域に限られ、非線形性が顕著になる実際の構造形成の解明には程遠い。さらに宇宙パラメーターが前面に出てきて、マイクロ物理からのバックアップが少ないので、この標準モデルそのものからの更なる発展は期待できない。何らかの物理的視点からの系統的な研究が必要であると考えられる。

本研究では、これら宇宙の構造形成や進化の本質を**広義の相転移現象**として系統的に捉える視点から、現在の宇宙論の基本的問題に解答を与えていきたい。以下具体的に（科研費交付期間内に達成できであろう研究の）目的をまとめるが、相転移という視点で一貫している。目標は、宇宙論という視点から広義の相転移機構と基礎法則を確立することである。

- (1) 究極の**構造発生機構**としての宇宙論
- (2) 初期宇宙の**インフレーション**は典型的な相転移過程と捉えられる。
- (3) **構造の安定性**を保証する視点から天体の構造を考える。
- (4) 宇宙を構成する物質を系統的に考察する。**暗黒物質・暗黒エネルギー**と呼ばれるように、宇宙を構成する 96%以上の物質が何かを我々は知らない。それらは通常、無衝突ガスや真空エネルギーとして想定されるが、本研究では相転移の視点から、量子力学的に凝縮した相にある可能性を追究する。**ボーズアインシュタイン凝縮**の視点から整合的なモデルを構成する。目標は、凝縮体の不安定性から、ブラックホールの質量分布関数を求めることである。
- (5) **時空の祖視化**とアインシュタイン方程式。重力は幾何学として普遍化されるが、我々の観測するものはマイクロな幾何をそ

のままには反映しない。マイクロなものを均してマクロなレベルに繰り込むという祖視化が必要であり、実際の観測でも必ずこの過程を前提にしている。本研究では**時空の繰り込み群**の方法を構成したい。目標は有効アインシュタイン方程式を書いて、有効理論として出現する宇宙項の確認である。

- (6) **非相加的多体系**としての重力系。宇宙の構造を決める最も重要な力は重力だが、これは通常の統計力学の原理である相加性を持たない。しかし、明快な相加性を持たない系は重力系のほかにいくらかもあり、自己重力系の研究が新しい統計力学を切り開いていくと考えられる。同時に、自己重力系は究極の平衡状態を持たず、本質的に**非平衡の統計力学**で記述されなければならない。目標は、Tsallis 分布や安定分布を導く熱力学的な規定条件（有限性、保存則など）を突き止めることである。
- (7) **自己重力系**の普遍的記述。孤立した自己重力系は非常に速い緩和と定常状態の非常にゆっくりした進化があるために、系の特徴的な時間の分離が原理的には明確で、その統計力学的記述が基本的なところで可能である。例えば、温度—エネルギー関係から通常の統計力学系と比較してみると、ビリアル平衡にある自己重力系は、準平衡状態にあつて**ゆっくりと相転移を進めている過程**に対応する。この進化の力学を構築する。目標は、エントロピー一定常流の存在が保障する構造の普遍性を確立することである。

3. 研究の方法

まず、統一的な視点を探りつつ、解決できる個々の問題をできるだけ整理しておきた

い。以降は、得られた結果を統合しつつ、宇宙・重力の相転移の普遍的特性、特に物性論における一般の相転移との差異を明確にしたい。

まず、暗黒物質と暗黒エネルギーを統一的に記述できる宇宙モデルを発展させる。先に申請者によって提唱されているボーズアインシュタイン凝縮宇宙モデルによると、宇宙の暗黒エネルギーはこの凝縮体に同定される。その有効場としての記述はスカラー場とほとんど同じだが、ゆっくりと徐々に凝縮するというソース項が本質的な役割を果たす。

さらに、ボーズ凝縮体はその不安定性（弱い引力相互作用）から、ある限界密度を超えると自ら重力崩壊してブラックホールになると思われる。

また、このような凝縮構造はインフレーションに至る以前に特徴的な振る舞いをする事がわかっている。実際これがどのようなダイナミクスを示すかに関して：

凝縮構造はボゾンに限らない。暗黒物質としてのフェルミオン凝縮体が、銀河団中心部で卓越する可能性がある。

4. 研究成果

【暗黒エネルギーと暗黒物質の凝縮宇宙モデル】我々が提唱している新しい宇宙モデルの基礎を築いた。特に今までは暗黒物質が一樣に分布している場合に限って解析してきたが、**非一樣性モードの不安定性と凝縮体の崩壊**を議論した。解析的計算でも数値計算でも、 0.003eV という特徴的なボゾン質量スケールが得られた。また、**崩壊に伴う特徴的なスケール**がその質量に大きく依存すること

などを見出した。

【量子—古典相転移】今までに我々が解析してきた、**量子測定と自発的対称性の破れ**の議論がかなり一般的に成立しそうだということがわかってきた。モデルをスピンの系に限定して、測定過程の相転移に着目して、**量子測定**の4要素（エンタングルメント、デコヒーレンス、プロコヒーレンス、対称性の自滅）を得た。もっと一般的な対称性を持つ系に対しても我々の解析の有効性が示唆された。

【自己重力系の秩序構造の普遍性】今までの我々の研究で、自己重力系に特徴的な「局所ビリアル関係」の起源を、**自己臨界組織化と**捕らえられることがわかりつつある。特に、再規格化することによって普遍的な速度分布関数が得られ、これを元に**蒸発率が一樣**という基準を適用すれば局所ビリアル関係を導けることを示した。

【フェルミオン場凝縮相転移と銀河団回りの暗黒物質】宇宙におけるフェルミオン凝縮の可能性として、**A1689 銀河団の周りの暗黒物質をニュートリノ凝縮と結び付けて**議論した。観測結果を再現するフェルミオン質量パラメータとして、ニュートリノ質量に近い値が得られた。このモデルでは、特に中心で密度分布がフラットになることが予言されるが、観測でもそれに近い特性があることがわかった。

■BEC 宇宙モデルを初期宇宙に応用し現実性を検証した。

<http://arxiv.org/abs/0905.0173>

特にインフレーション期が自然に終了するスタグフレーション期を発見した。この時期は2つの重要な要素を持つ。1つ目は、粒

子生成が激しく起こり宇宙の再加熱が自然に起こることである。2つ目は、その不安定性のために、一様なBECは崩壊し局在することである。スタグフレーションはエネルギーが厳密に0で実現するので、宇宙項 Λ が漸近的に消滅する。つまり、BEC崩壊とBEC再凝縮が繰り返し起こり、そのつど宇宙項に相当する真空エネルギーが減少するのである。このことは数値的にも確認された。

■宇宙の暗黒物質乱流論を発展させた。無衝突系の線形摂動が火面通過後、どのような秩序を作るかを議論し、現在観測されている宇宙の様々なスケーリング則が、初期条件でなく、構造形成過程の必然として出現するシナリオを完成させた。

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 10件)

① O. Iguchi, Y. Sota, A. Nakamichi, M. Morikawa Local virial relation for self-gravitating system Phys. Rev. E 73 2006 04611

② T. Fukuyama, M. Morikawa The relativistic Gross-Pitaevskii Equation and cosmological Bose Einstein Condensation ― Quantum Structure in the universe ― Prog. Theor. Phys. 115 2006 1047-1068

③ Masahiro Morikawa and Akika Nakamichi Quantum measurement driven by spontaneous symmetry breaking Prog. Theor. Phys. 116 2006 679-698:

④ Tadashi Nakajima & Masahiro Morikawa

An Interpretation of Flat Density Cores of Clusters of Galaxies by Degeneracy Pressure of Fermionic Dark Matter: A Case Study of A1689 The Astrophysical Journal 有 655 2007 135-143

⑤ Akika Nakamichi, Takayuki Tatekawa, and Masahiro Morikawa

Statistical mechanics of SDSS galaxy distribution and cosmological N-body simulations AIP Conf. Proc. 無 965 2007 267-272

⑥ Masahiro Morikawa

Dynamics of Collision-less Self-gravitating Systems and Dark Turbulence AIP Conf. Proc. 無 970 2008 269-287

⑦ Yasuhide Sota, Osamu Iguchi, Tohru Tashiro, and Masahiro Morikawa

Self-organized relaxation in a collisionless gravitating system Phys. Rev. E 有 77 2008 051117-051125

⑧ Masahiro morikawa

Dynamics of Collision-less Self-gravitating Systems and Dark Turbulence AIP Conf. Proc. 無 970 2008 269-287

⑨ Takeshi Fukuyama, Masahiro Morikawa and Takayuki Tatekawa

Cosmic structures via Bose-Einstein condensation and its collapse JCAP 有 06 2008 1-033

⑩ Akika Nakamichi and Masahiro Morikawa

Cosmic dark turbulence Astronomy &
Astrophysics 有 印刷中 2009

〔学会発表〕計 (7) 件

【日本物理学会】

①28pTK-1 2622 自己重力および長距離
相互作用系での準平衡状態

井口修, 曾田康秀, 田代徹, 森川雅博
お茶大理 領域 11

②24aZW-6 2401 暗黒乱流－無衝突自己
重力系のスケーリング

中道晶香, 森川雅博A ぐんま天文台,
お茶大理 A 宇宙線・宇宙物理領域

③21aTJ-10 297 自己重力系における自
己組織化臨界現象

曾田康秀, 井口修, 田代徹, 森川雅博
お茶大理 領域 11

④19aWB-8 2162 自己重力多体系で見
出される局所ビリアル平衡

井口修, 曾田康秀, 田代徹, 森川雅博
お茶大理 領域 11

⑤22pSG-13 1487 SDSS DR4 の銀河分布
と宇宙論的 N 体シミュレーションを表す統
計力学

中道晶香, 立川崇之 A, 森川雅博B ぐんま天
文台, 工学院大 CPD セ A, お茶大理 B
宇宙線・宇宙物理領域

⑥23pSG-1 999 宇宙の凝縮相の可能性

森川雅博, 福山武志 A, 立川崇之 B お茶大,
立命館大 A, 工学院大 B 宇宙線・宇宙物
理領域

【日本天文学会】

中道晶香

暗黒乱流 ～自己重力系が示すスケーリン
グ～

天文学会 2009/3/25 大阪府堺市 (大阪府立
大)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森川雅博 (MORIKAWA MASAHIRO)

お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学
研究科・教授

研究者番号: 90192781

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし