

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：12611

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540291

研究課題名(和文)凝縮系宇宙物理学の試み

研究課題名(英文)quantum condensation for 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙のいろいろな構造に関わる「凝縮系」の範疇を広げていく方向に研究がシフトしていった。

(1) 地磁気のマクロ結合スピンモデル：地磁気の反転履歴に関して、マクロスピンの同期により、観測と整合する長時間相関や反転履歴を導くことができた。(2) 密度揺らぎ生成と量子論基礎：初期宇宙の密度揺らぎと実験室の量子測定との物理が同根であることを見出した。(3) 変光星の同期モデル：恒星の脈動を記述する簡明なモデルを作った。(4) 量子論のミクロ・マクロ対応：量子・古典対応を量子トンネル時間の差異に求めた。(5) 宇宙項微調整問題：真空エネルギーの自己臨界組織化を議論した。

研究成果の概要(英文)：The original research proposal on BEC cosmology has been extended to much wider physics.

(1) coupled macro spin model for geomagnetic dynamics: Synchronization of the macro spins naturally yield geomagnetic reversal history.(2) origin of density fluctuations and the basics of quantum mechanics: We found that both of them have the common clue: causal dynamics during measurement.(3) Synchronization model for variable stars: We constructed a simple model for the pulsation of stars.(4) micro-macro correspondence in quantum theory: They are distinguished only by the tunneling time. (5) cosmological constant fine-tuning problem: We found the self organized criticality in the vacuum energy.

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：宇宙物理

キーワード：凝縮体 地磁気 密度揺らぎ 量子論基礎 変光星 量子古典対応 宇宙項

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙のすべての構造は一般相対論と量子論で規定される。暗黒物質・暗黒エネルギー、普遍的なインフレーション/宇宙項問題などの大局的な問題、普遍的な銀河中心巨大ブラックホールや付随するジェットなどの局所的な問題は、より密接に基礎物理学に結びついていると考えられる。これらの問題を個々に議論するので無く、基礎物理の視点から統一的に解決する方法を見出す。標準宇宙モデルの論理的簡潔さは尊重し、それと相補的に、応用物理ではなく基礎物理としての宇宙物理学、さらには基礎物理に還元できる宇宙物理学を目指す。粒子ではなく凝縮系という相に基礎を置く研究なので、凝縮系宇宙物理学の試みと題した。

## 2. 研究の目的

大局、局所、中間の各領域に分けて、期間内に解かれるべき凝縮系宇宙物理学の課題を列挙する。凝縮系宇宙物理学という枠組みが主眼なので、一見ばらばらに見えても一貫したアプローチに基づいている。

### (1) 大局構造

- 暗黒エネルギーと暗黒物質の相互移行を明確にする。暗黒エネルギーは、ボゾン場のスーパー成分に対応し、暗黒物質はノーマル成分に対応する、という一元論が凝縮系宇宙モデルである。これらの2成分の相互移行(凝縮過程・蒸発過程)が宇宙のダイナミクスを決めるので、これを記述する基礎方程式を確立する。現在、有効作用の方法を元に秩序変数のランジュバン方程式から議論を進めているが、近似が荒く、もっと信頼性のある理論形式を考える必要がある。量子ボルツマン方程式の方法も視野に入れている。
- 暗黒物質/エネルギーの不安定性と崩壊を解明する。現在ボゾン間には引力の相互作用を導入している。引力は高温超伝導の議論でもそうだがかなり普遍的に出てくる。この引力相互作用と重力の相乗効果によって、一様分布する暗黒エネルギーは臨界密度を超えると一気に不安定になり、崩壊する。この過程を数値計算する。この崩壊は非常に速く、数値的に難しい。このために、精巧なプログラムと計算機が必要になる。これによって宇宙項の散逸的減少を解明する。これはいわゆる宇宙項問題の最終的な解決になる。

### (2) 局所構造

- 暗黒エネルギーの崩壊からできる局所構造を明らかにする。特にブラックホールになる割合と局在暗黒物質になる割合を見積もる。うまくいけば、銀河中心にあるブラックホールのスケールリングを導きたい。
- 回転を考慮して暗黒エネルギー崩壊を議論し、ジェット構造を導きたい。また、実験室

のポーズ凝縮とのアナロジーから、凝縮体の振動を通して、ジェットのノット構造を出してみたい。

### (3) 中間領域

- 銀河スケールではさまざまなスケールリングが観測される。これを暗黒物質の乱流として、あるいは暗黒エネルギー(ポーズ凝縮体)の渦糸構造から議論する。

## 3. 研究の方法

### (1) 大局構造

- 凝縮体を最も一般に記述するのは、ギンツブルグランダウの方法を一般化した有効作用の方法であろう(初めての提案は M. Morikawa, Phys. Rev. D33, 3607 (1986))。これは系統的繰り込み操作により、相互作用の形から秩序変数のランジュバン力学を作る。今回はこれを一般化して凝縮のダイナミクスに応用する理論を作る。
- 凝縮体の崩壊のダイナミクスを解明する。相対論的な数値計算を行い(巨大)ブラックホール形成までを追う。何桁にもわたる崩壊のために、効率と精度の良いプログラムが必要。
- インフレーションの明確な終了を保障するスタグフレーションの普遍性を議論する。これにより、どんなポテンシャルに対しても有効なインフレーションが実現する。
- エネルギーが厳密に零で起こるスタグフレーション期の一様凝縮体の不安定性から、宇宙項が零に向かって散逸的に収束する機構を完全に解明する。同時に、宇宙加速がかつて何度もあった可能性も探る。

### (2) 局所構造

- ブラックホール+暗黒物質系のダイナミクス。崩壊から、それぞれの比率がどうなるかを数値的に確かめる。スケールリング則が見出されるかもしれない。
- 重力だけでなく引力を持つボゾンなので、角運動量を考慮すると、強いジェットが噴出する可能性がある。そのガンマ因子は非常に大きくなる可能性がある。これを求める。
- 宇宙磁場が関与すると凝縮体の渦糸構造に面白い様相が出現する。凝縮体物理学との関連で可能な構造が宇宙に実現しているかどうか確認していく。

### (3) 中間領域

- 中間領域は、大局・局所領域と異なり、非常に複雑な系である。にもかかわらず、凝縮系宇宙物理学にとってその本領を発揮する重要な部分である。申請者は、基礎課程を解明してそれを積み上げる、という要素還元主義を捨てる。そしてその構造を支える基本機構をまず特定し、それに基づいて系の機能を議論する。
- その代表的な基本機構として、暗黒物質の(広い意味の)乱流がある。自己重力暗黒物

質系の運動方程式をフーリエ変換したものは、スモールコフスキーの合体成長方程式と同形になる。これに着目して、1次元系での解析は成功している。3次元系でどのようなスケールや相関が出てくるのかを議論したい。特に、スケール・速度分散・相関関数・M/L比・磁場などのスケールをきちんと導きたい。

#### 4. 研究成果

宇宙物理学の諸基本問題を「凝縮」により統一的に議論する研究を始めた。電力事情などもあり、数値計算用計算機の導入を先延ばししているうちに、宇宙のいろいろな構造に関わる「凝縮系」の範疇を広げていく方向に研究がシフトしていった。

これらは、「凝縮」に関わる、より根源的な分野なので、そちらの開拓を優先した。今までかかわったことのない分野なので、研究が軌道に乗るまでに時間がかかってしまったが、いくつかの重要な提案ができたと考える。これらはさらに発展させる方向で継続研究し、同時に、当初の計画通りの方向も継続的に研究していく予定である。

##### (1) 地磁気のマクロ結合スピンモデル

「凝縮」には、多数自由度が共同する「同期」という視点が本質的である。暗黒物質やインフレーション、ブラックホールなど、宇宙物理になじみの問題だけでなく、地磁気の反転現象や準周期的な太陽の活動なども、ダイナモ要素の同期を通して、広義の「凝縮」現象ととらえられることを確認し、「大極的結合スピンモデル」を提案した。

地磁気の反転履歴に関して：マクロスピンの同期により、観測と整合する長時間相関や反転履歴を導くことができた。今まで高性能大型スーパーコンピュータでMHDを解く手法でも得られなかったいくつかの観測事実を、パソコンで実行できる簡単なモデルから導出できることを示せたのは大きな意義がある。このモデルは、惑星磁場や星の磁場の起源とも密接に関連し、当初の目標である「複数の問題に関わる本質となる物理を探り出すこと」に成功している。

太陽の準周期的な磁極反転に関して：地磁気に対するモデルのパラメータを変えるだけで、太陽磁場の準周期的反転を記述できることを確認した。また太陽活動の長期相関に現れる1/f的なスペクトルを観測データから見出した。そしてその特性を、上記モデルから導くことに成功した。

上記の簡明なマクロ結合スピンモデルはオリジナルであり、地球物理と太陽物理に、磁場を介して統一的な視点を与える大きな意義があると考えられる。

##### (2) 密度揺らぎ生成と量子論基礎

初期宇宙インフレーション時期に場が凝縮して空間的パターンを作る密度揺らぎの発生現象において、量子場の凝縮がやはり本質的であることを確認した。そして、根本の問題は実験室の量子測定の実験と同根であることを見出した。これらの解決のために、EPR測定の実験室の物理的測定器を用いた記述を試み、これと同様に、初期宇宙密度揺らぎの自発的生成を論じた。この過程で、ベル不等式が破れて量子力学の結果を忠実に再現することも確認した。

一方、実際の揺らぎの生成では、そのパワースペクトルのスケール不変性は普遍的性質であるが、その振幅は、インフレーション機構や再加熱の相互作用に大きく依存することを見出した。実際に色々なモデルを比べてみると、その振幅は敏感に変化することがわかった。これにより、古典化する揺らぎの振幅は、インフレーションの良いモデルの選別基準になりうると思われる。宇宙論の教科書にある安易な導出に、量子論基礎に関わる本質的な要素を付加した意義は大きい。

特に、宇宙物理と実験室物理に全く共通の物理が現れる点で意義が大きいと思う。

##### (3) 変光星の同期モデル

星の活動性に関する凝集・同期モデルを発展させた。HMFモデルを一般化したスピン結合モデルを更に発展させた。今まで我々が考案したこのモデルは、地磁気反転履歴や惑星、衛星、太陽までの間欠的あるいは準周期的活動性を記述してきた。このモデルを更に一般化して「恒星の脈動」までを記述することに成功した。セファイド型とミラ型のそれぞれに、 $\kappa$ 機構と対流機構を表現する簡単なモデルを導入し、それらの結合として、星全体の活動性のダイナミクスを追った。規則的な脈動から不規則な変光を示すものまで、星の密度を重要パラメータとして系統的に再現することができた。

また、2次元に拡張したモデルを解析した結果、中間結合領域で1/fのべき的スペクトルが得られ、ミラ型変光星の一部に普遍的に見られるスペクトルを再現している。このような長時間相関は太陽活動にもみられ、天体の活動性の普遍的な一面だと考えられる。

特に、セファイド型とミラ型の変光星を、統一的な物理で記述できる点で重要だと考える。さらに磁場との結合も考えていけば、このモデルは天体の活動性を記述する基本モデルとして飛躍的に発展すると考える。

##### (4) 量子論のマイクロ・マクロ対応

量子力学における測定過程に対して物理的な記述を与えるモデルを提案した。標準的な量子論では、測定過程は物理的な過程ではなく単に要請として導入されている。しかしそれでは初期宇宙などの自律的な物理過程を満足に追うことができない。そこで、量子論における測定装置の物理が重要になる。

上述のマクロ結合スピンモデルを研究するうち、その平均場と個別スピンの相互作用が、量子力学の測定にも本質的であるとの着想を得た。実際そのモデルを量子化する方法で(QMRモデル)、物理的な測定装置を構成できることを示した。

通常の量子測定理論では、基本的に線形代数の議論であり、重ねあわせから逃れることはできない。測定の本質はこの重ねあわせの排除である。QMRモデルは、測定系と被測定系のトンネル時間の分離から、この重ねあわせを逃れる時間スケール(つまり測定時間)を導出した。これがマイクロ・マクロ、あるいは量子量・古典量の区別である。QMRモデルにおいてはそれらが共存して相互作用する。

さらに、パラメータの調整(キャリブレーション)を必要とするが、ボルンの確率規則を近似的に導出することができる。これにより、標準理論に付随する厄介な射影公準を廃して、自律的な測定過程を因果的に記述することができるようになった。

現在、弱測定や量子ゼノー測定、連続測定に応用した計算を進行している。これらを間接測定でなく、直接測定において自律的に記述できる方法は、このQMRモデルしかない。

なお、本研究では、標準的な量子論に完全に準拠して議論を進めているが、量子論の構造を非線形に変更する議論も多く存在する。それらと本研究を比較して、数学的な構造が非常に似ていることを見出した。つまり、測定に本質的な非線形性を、量子論の基本方程式に由来させるか、マクロな測定装置に由来させるかの違いである。もちろん後者では非線形性は多体相互作用を通じて有効的に出現する。

量子論の適用範囲を変える可能性を持った測定モデルとして、発展研究させる意義があると考え。ちなみに量子論の非直観的な様相はすべてこのマイクロ・マクロの共存と結合にあり、上記のように測定の物理過程を考えると、因果的な量子力学の時間発展が自然に理解できる。

## (5) 宇宙項微調整問題

凝縮インフレーションモデルを発展させた。エネルギーの最低値を微調整しなければならぬ既存のインフレーションモデルを超えて、もっと一般にポテンシャルの負領域を許すモデルを考案した。この場合、ある時刻でインフレーションが急に終了し、いったん宇宙膨張は完全に止まる(スタグフレーション)。

このエネルギー零のとき、ちょうど凝縮場が不安定になり、局所的に崩壊する。従って、宇宙項の零への微調整が、因果的・自律的に行われることになる。

さらに、この機構は、たいていのインフレーションポテンシャルで、エネルギー負領域が少しでもある時に実現する普遍的な様相であることも分かった。

スタグフレーション時期の詳細な動力学を考察した。特に、インフレーション後の粒子生成(再加熱)も考慮して線形計算に基づく崩壊スケールを計算した。この発展として、非線形の不安定性を考える球対称モデルでBEC崩壊を計算しつつある。

このように、系全体が持つ大きな不安定性が、その時点において、系の特徴を自律的に決めていくダイナミクスは、物性論に広く表れる自己臨界組織化の一例であり、宇宙においてもそのような一般原理が有る可能性を示唆する本研究は意義があると思う。

なお、クォーク・ハドロン転移など、初期宇宙のいくつかの場面で登場する1次相転移が起きる毎に、上記不安定性が働き局所構造を作るとするなら、原初ブラックホールも、もし存在するなら、同様の機構でできた可能性があり、そのダイナミクスも継続して研究中である。

## 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 6 件)

①

Masahiro Morikawa and Akika Nakamichi  
Physics of quantum measurement and its interdisciplinary applications  
査読無  
EPJ Web of Conferences  
Vol. 71 2014 9pages  
<http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20147100093>

②

Akika Nakamichi and Masahiro Morikawa  
Fate of inflation and the natural reduction of vacuum energy  
査読無  
EPJ Web of Conferences vol. 71 2014 6pages  
<http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20147100097>

③

N. Mori, D. Schmitt, J. Wicht, A. Ferriz-Mas, H. Mouri, A. Nakamichi, and M. Morikawa  
Domino model for geomagnetic field

reversals

査読有

Phys. Rev. E 87, 012108-012119 (2013)

④

Takahashi, S.; Morikawa, M.

Synchronization Model for Pulsating Variables

査読無

ASP Conference Series; Progress in Physics of the Sun and Stars

Vol. 479 2013 p.567-571

⑤

Nakanichi, A.; Mouri, H.; Schmitt, D.;

Ferriz-Mas, A.; Wicht, J.; Morikawa, M.

Coupled spin models for magnetic variation of planets and stars, 査読有,

MNRAS vol.423 p.2997N 2012

⑥

M. Morikawa, Quantum and Classical

Fluctuations in the Inflationary Universe

査読無

Proceedings of the 47th Rencontres de Moriond on Cosmology, 2012

[学会発表] (計 6 件)

① 森川雅博

量子測定過程の集団力学—物理的な量子測定装置の構成—

日本物理学会

2014年03月27日～2014年03月27日

東海大学

② 高橋沙綾、森川雅博 脈動変光星の同期モデル

日本物理学会秋季大会 2012年09月18日～2012年09月21日

横浜国立大学

③ 中道晶香、森川雅博

負のポテンシャル宇宙項微調整問題

日本物理学会 2012年 秋季大会

2012年09月11日～2012年09月14日

京都産業大学

④ 森川雅博

初期宇宙密度揺らぎ生成と量子測定論

日本物理学会 2012年 秋季大会

2012年09月11日～2012年09月14日

京都産業大学

⑤ 森川雅博 初期宇宙揺動と量子測定

日本天文学会 2012年3月22日 京都

龍谷大学

⑥ 森川雅博 宇宙の特異な量子揺らぎ

日本物理学会 2011年9月23日 富山

富山大学

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

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

無