

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03951

研究課題名（和文）現実的な相互作用を反映した色分子動力学によるクォーク=ハドロン相転移の解明

研究課題名（英文）Elucidation of Quark-Hadron Phase Transition by Color Molecular Dynamics Reflecting Realistic Interactions

研究代表者

安武 伸俊（Yasutake, Nobutoshi）

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：10532393

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：高密度状態方程式を得るため、現状の天文観測や原子核実験において得られていた高密度状態における制限を満たす、クォーク間相互作用に関する結合定数や有効距離に関わるパラメータの最適化を行なった。我々のこの手法では分子動力学計算を繰り返し行う必要があるため、計算コストが膨大になるという難点があった。この困難のため予定していた研究期間を1年延長することにはなったが、現状の天文観測や原子核実験による高密度状態における制限をすべて満たす高密度状態方程式を得ることができた。現状の枠組みでは、ハドロン相はクロスオーバーを経てクォーク相へと遷移していく結果を得ている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではクォークの「色」の自由度の時間発展を含む分子動力学、すなわち「色分子動力学」によって、クォーク=ハドロン相転移を数値的に再現し、明らかにすることを目的としていた。宇宙において高密度のクォーク=ハドロン相転移が現れる可能性高いのは、中性子星合体やブラックホール形成である。符号問題が解けない現状において、重力波やニュートリノ観測としていかに相転移の影響が現れるか検証することで逆に相転移の特徴に迫るといった目的感に立った我々の研究は、次世代の高エネルギー天文学において中心的な役割を担うものと期待されるものである。

研究成果の概要（英文）： We optimized the parameters related to the coupling constants and effective ranges of the interactions between quarks to satisfy the constraints at high densities obtained from current astronomical observations and nuclear experiments to derive the equation of state for high-density matter. Our approach necessitated repeated molecular dynamics calculations, which resulted in significant computational costs. Due to this challenge, we had to extend the planned research period by one year. Nonetheless, we succeeded in deriving an equation of state for high-density matter that satisfies all constraints imposed by current astronomical observations and nuclear experiments. Within the current framework, our results indicate that the hadron phase transitions into the quark phase through a crossover.

研究分野：天体核物理

キーワード：中性子星 分子動力学 ハドロン

## 1. 研究開始当初の背景

レフシェッツシンプル法、経路積分最適化法、複素ランジュバン法、あるいはテンソルネットワークを用いた理論構築など、「符号問題」という原理的困難を解決することで、この相転移を明らかしようとする研究は現在盛んに行われているが、今のところ現実を再現するような成果は出せていないと言ってよいだろう。一方で、宇宙において高密度のクォーク=ハドロン相転移が現れる可能性高いのは、中性子星合体やブラックホール形成であるため、相転移の影響が重力波やニュートリノ観測としていかに現れるか検証し、翻ってクォーク=ハドロン相転移の理解を深めることが求められている。特に、最近の観測結果からは、中性子星の質量-半径関係が明らかになりつつあり、これらのデータは中性子星内部の物質状態の理解に重要な手がかりを提供している。例えば、NICER (Neutron Star Interior Composition Explorer) による観測や重力波観測が中性子星の内部構造についての貴重な情報をもたらしている。

色分子動力学 (CMD) シミュレーションは、この問題に対する有力な手法の一つであり、中性子星内部のクォーク=ハドロン相転移を調べるために用いられた。これまでクォーク=ハドロン相転移を考えるためには、現象論的なクォークモデルを別に用意する必要があった。本研究は、このような先行研究から一線を描き、全てをクォークモデルのみで記述しようとするものである。

## 2. 研究の目的

本研究の主な目的は、中性子星内部における物質の振る舞いを詳細に理解することである。特に、高密度環境下でのハドロン物質からクォーク物質への転移を解明し、現在の観測制約に基づいてクォーク物質の出現の有無を調査することを目指している。

具体的には、色分子動力学を用いてクォークの動きをシミュレートし、ハドロン相とクォーク相の間のクロスオーバーを解析することで、中性子星の状態方程式を導出する。そして、この状態方程式を用いて質量-半径関係を求め、観測データと比較することにより、モデルの妥当性を確認する。また、得られた結果を基に中性子星内部の構造を推定し、クォーク物質の出現条件を明らかにすることを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究では、色分子動力学計算によって、クォークの模型の枠組みでハドロン相とクォーク相の間の遷移現象を調べた。色分子動力学とはクォークの位置、運動量、色座標の時間発展を数値的に解く手法である。適切なクォーク間相互作用を考慮することで低密度ではクォークがバリオンにクラスタ化し、高密度ではクォーク物質に変わる過程を自然に再現することができる。

色分子動力学において最も重要なものは、相互作用ポテンシャルである。本研究で採用したものは、色の閉じ込めポテンシャル、摂動的グルーオン交換ポテンシャル、メソン交換ポテンシャルである。これらクォーク間相互作用が、核密度における飽和特性などと一致するように最適化する。他の分子動力学との大きく異なるのは、距離に比例して大きくなるという性質を持つ色の閉じ込めポテンシャルが存在する点である。この相互作用が存在するため、他の分子動力学で用いられていた粗視化の方法が使えない。よって計算量は粒子数の2乗で増えていくことになるため、GPUなどを用いた並列計算処理が必須となる。本研究においては、本科研費で購入したGPU計算機を用いて計算コードを並列化し、本計算は日本原子力研究開発機構の高速計算機を用いた。

さらに運動エネルギーについては相対論的なものを考慮し、クォークの多体効果に対応した非線形クォーク間相互作用を新たに導入している。

上述の手法にもとづき、さまざまな初期条件およびパラメータ設定で数値シミュレーションを実施する。シミュレーション結果を解析し、得られた状態方程式を用いて中性子星の質量-半径関係を計算し、観測データと比較する。これらを繰り返し行うことにより、各クォーク間相互作用を最適化していった。

## 4 . 研究成果

天文観測や原子核実験からの様々な制約のもと、中性子星のコアにおいてはクォーク物質が出現することがわかった。特に、質量-半径関係が重力波観測、NICER、中性子星の「二倍の太陽質量観測」のデータと整合している。これにより、クォーク物質が中性子星のコアに存在する可能性が高いことが示された。また、クロスオーバーによりハドロン相からクォーク相への遷移が起きることが確認された(図1)。一方で、非線形クォーク間相互作用を導入しなければ、天文観測データとうまく再現することができないことも明らかになった。このことは、中性子星中心部などの高密度領域においては、多体効果が重要であることが示唆する。

本研究によって色分子動力学を用いたアプローチが中性子星内部の物質の振る舞いを理解する上で有効であることが示された。特に、観測データとの整合性が確認されたことで、クォーク物質の出現の可能性が高まった。基礎物理学の観点からこの意義は大きい。また、代表者は最終的に得られた状態方程式を簡単な関数として論文で公表[1]しているため、今後は中性子星の進化計算などの天文分野における理論研究にも使われていくであろう。

本研究成果は、中性子星内部の物質の状態方程式を理解するための重要な一歩であると言える。今後の課題として、また、我々の理論モデルの改良も重要である。特に、色磁気相互作用の導入や、相対論的相互作用、グルーオン相互作用などが今後の検討課題である。一方で現在のNICER や重力波観測のデータは貴重であるが、まだ十分とは言えずクォーク物質の出現を確定するには至っていない。今後、さらなる高精度な観測による結果を期待したい。

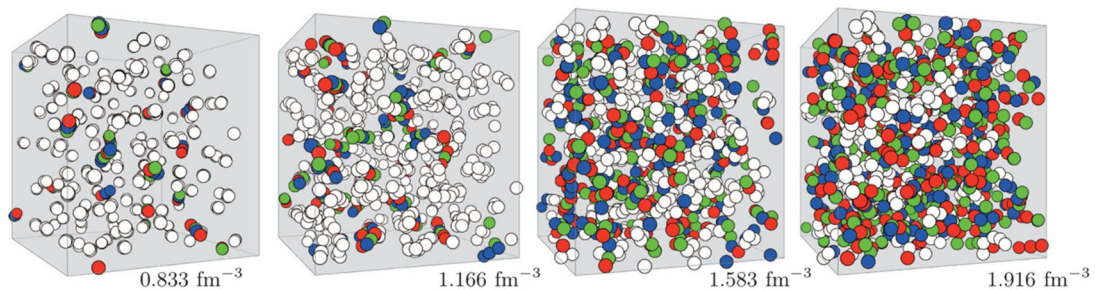


図1: 核密度ごとにおけるクォーク物質の出現。右下はバリオン数密度。白色は、クォーク3つが閉じ込められたバリオン状態を意味する。その他の色は、色の閉じ込めが解けたクォーク状態。色は計算結果による最適化によって得られた値である。

## 参考文献

- [1] “Crossover equation of state based on color-molecular-dynamics”, Nobutoshi Yasutake and Toshiki Maruyama, PHYSICAL REVIEW D 109, 043056 (2024)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Cheng-Jun Xia, Toshiki Maruyama, Nobutoshi Yasutake, Toshitaka Tatsumi, Ying-Xun Zhang	4. 巻 839, 10, 137769
2. 論文標題 Elastic properties of nuclear pasta in a fully three-dimensional geometry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Lett. B	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2023.137769	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Misa Ogata, Hirotada Okawa, Kotaro Fujisawa, Nobutoshi Yasutake, Yu Yamamoto, Shoichi Yamada	4. 巻 521
2. 論文標題 A Lagrangian construction of rotating star models	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2561-2576
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stad647	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hirotada Okawa, Kotaro Fujisawa, Yu Yamamoto, Ryosuke Hirai, Nobutoshi Yasutake, Hiroki Nagakura, Shoichi Yamada	4. 巻 183
2. 論文標題 The W4 method: A new multi-dimensional root-finding scheme for nonlinear systems of equations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Numerical Mathematics	6. 最初と最後の頁 157-172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apnum.2022.08.019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hirotada Okawa, Kotaro Fujisawa, Nobutoshi Yasutake, Misa Ogata, Yu Yamamoto, Shoichi Yamada	4. 巻 520
2. 論文標題 A novel Lagrangian formulation to construct relativistic rotating stars: towards its application to their evolution calculations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 24-43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stad075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Y. Yamamoto, N. Yasutake, Th.A. Rijken	4. 巻 105
2. 論文標題 Quark-quark interaction and quark matter in neutron stars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C.	6. 最初と最後の頁 pp.015804-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.105.015804	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Enoto, N.Yasutake	4. 巻 76巻10号
2. 論文標題 宇宙観測で見てきた中性子星の状態方程式	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 pp.637-645
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.76.10_637	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cheng-Jun Xia, Toshiki Maruyama, Nobutoshi Yasutake, Toshitaka Tatsumi, and Ying-Xun Zhang	4. 巻 103
2. 論文標題 Nuclear pasta structures and symmetry energy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 pp.055812-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.055812	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Cheng-Jun Xia, Toshiki Maruyama, Nobutoshi Yasutake, Toshitaka Tatsumi, Hong Shen, and Hajime Togashi	4. 巻 102
2. 論文標題 Systematic study on the quark-hadron mixed phase in compact stars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.023031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nobutoshi Yasutake and Toshiki Maruyama	4. 巻 109
2. 論文標題 Crossover equation of state based on color-molecular-dynamics	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 pp.043056-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.109.043056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 安武伸俊
2. 発表標題 核物質状態方程式と中性子星の構造進化
3. 学会等名 低エネルギー核物理と高エネルギー天文学で読み解く中性子星 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安武伸俊
2. 発表標題 色分子動力学による中性子星状態方程式とこれから
3. 学会等名 中性子星・超新星におけるニュートリノ・原子核物理 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安武伸俊
2. 発表標題 実験・観測にもとづく中性子星状態体方程式の現状と理論的検討の余地について
3. 学会等名 日本物理学会春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobutoshi Yasutake
2. 発表標題 Equation of State from Color-Molecular Dynamics
3. 学会等名 Probe into core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signals (SNeGWv2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobutoshi Yasutake
2. 発表標題 Equation of State by Color molecular dynamics
3. 学会等名 Joint THEIA-STRONG2020 and JAEA/Mainz REIMEI Web-Seminar 2021/2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安武伸俊、向原悠太、丸山 敏毅、初田哲男
2. 発表標題 クォークスピン相互作用を考慮に入れた色分子動力学によるクォーク多体
3. 学会等名 日本物理学会秋季分科会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobutoshi Yasutake
2. 発表標題 格子QCD計算による相互作用を反映した色分子動力学による少数バリオン系
3. 学会等名 日本物理学会秋期年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobutoshi Yasutake
2. 発表標題 Equation of State from Color-Molecular-Dynamics: QCD as N-body simulations
3. 学会等名 Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, Forth Annual Area Symposium( ( 国際学会 ) )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobutoshi Yasutake
2. 発表標題 From Few-body to Many-body systems in Color-Molecular-Dynamics
3. 学会等名 日本物理学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiki Maruyama and Nobutoshi Yasutake
2. 発表標題 Molecular Dynamics for Spin Systems
3. 学会等名 Quarks and Compact Stars 2023 ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobutoshi Yasutake and Toshiki Maruyama
2. 発表標題 Equation of State Based on Color-Molecular-Dynamics
3. 学会等名 Quarks and Compact Stars 2023 ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 安武伸俊
2. 発表標題 高密度天体とプラズマ-----究極物質を求めて-----
3. 学会等名 放電学会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	丸山 敏毅  (Maruyama Toshiki)  (50354882)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹   (82110)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------