

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14298

研究課題名（和文）高精度多体計算による高密度核物質・中性子星物質の理論研究

研究課題名（英文）Theoretical study of dense nuclear and neutron-star matter with the precise many-body calculations

研究代表者

宮津 剛志 (Miyatsu, Tsuyoshi)

東京理科大学・理工学部物理学科・助教

研究者番号：00779209

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、高精度多体計算による相対論的核物質模型をさまざまな物理現象に適応し、「地上実験」から得られる一様核物質や有限原子核の結果と「天体観測」から得られる中性子星の特性を考慮した上で、両者を統一的に理解することである。原子核多体計算の精度を向上させることで、対称エネルギーなどの核物質の性質を精度良く決定できると同時に、中性子星の最大質量や半径、重力波データを用いた中性子星の潮波変形などを統一的に説明することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核物質の性質に関する研究や中性子星の特性に関する研究は古くから行われているが、両者を統一的に扱い理解することは理論物理学の悲願である。本研究では、相対論の枠組みの中で多体計算の精度を向上したことにより、両者の統一的な説明が可能となった。さらに、天体観測から得られる情報は、核物質の性質を決定するに当たり非常に重要であることと、多体計算精度の更なる向上が将来的に不可欠であることを示した。

研究成果の概要（英文）：Using the relativistic nuclear theory based on high-accuracy many-body calculations, the main purpose in the present study is to understand theoretically physical phenomena concerning respect nuclear terrestrial experiments and astrophysical observations. It is found that nuclear matter properties including symmetry energy and slope parameter are determined well using the many-body calculations. It is also possible to explain not only the maximum mass and typical radius of neutron stars but also the tidal deformabilities with the unified nuclear equation of state.

研究分野：原子核物理（理論）

キーワード：核物質状態方程式 対称エネルギー（非）対称核物質 中性子星 理論核物理

### 1. 研究開始当初の背景

通常核子密度における核物質や有限原子核の物性に関する理論研究は、現在に至るまで活発に行われており、実験からも検証されている。一方、中性子星物質の性質に関する理論研究は、依然として、天体観測の結果を十分に説明するには至っていない。現在、地上実験の結果を十分に説明する理論研究であればあるほど、天体観測との隔たりが大きくなる状況である。特に2010年以降の大質量中性子星の発見は、地上実験の結果を考慮した理論研究では説明が困難であり、地上実験と天体観測の乖離を決定的なものとした (P. Demorest et al, Nature 467, 1081, 2010, J. Antoniadis et al, Science 340, 6131, 2013)。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、高精度多体計算による相対論的核物質模型をさまざまな物理現象に適用し、「地上実験」から得られる一様核物質や有限原子核の結果と「天体観測」から得られる中性子星の特性を考慮した上で、両者を統一的に理解することである。

### 3. 研究の方法

広範囲な核子密度領域でのさまざまな物理現象を網羅する核物質状態方程式作成のために、「地上実験」と「天体観測」に関連する研究に分けて計画を遂行する。

#### [1] 「地上実験」に関連する研究：

申請者がこれまでに構築した「相対論的核物質模型」を、「地上実験」から示唆されるさまざまな物理現象に適用し、本模型の有用性を検証するとともに校正を行う。さらに、理論的に考えられる新たな自由度 (ハイペロン、クォーク物質など) を取り入れた計算を行い、それらが存在する可能性を検証し、その影響を明らかにする。

#### [2] 「天体観測」に関連する研究：

[1] で校正された核物質模型を高密度領域に拡張し、「天体観測」の結果を検証する。さらに、[1] を満足する理論計算から観測結果への制限を試みるとともに、この結果を [1] へ還元し「地上実験」に関わる物理現象や実験結果の再検証を行う。

なお、両者は密接に関連するので、同時並行して研究を進める。

### 4. 研究成果

本研究の重要な成果を2点以下に紹介する。

#### (1) 相対論的ハートレー・フォック計算による核物質の対称エネルギーに関する研究

この研究では、Hugenholtz-Van Hove 理論に基づいて核子の自己エネルギーをローレンツ普遍な形で分解し、核物質の対称エネルギーとそのスローパラメータの高密度領域における振る舞いを調査した。一般的に広く用いられている相対論的平均場 (relativistic Hartree, RH) 計算と多体計算の精度を向上した相対論的ハートレー・フォック (relativistic Hartree-Fock, RHF) 計算を用いて、核物質の性質を計算し、フォック項の影響を検証した。

図1に示す通り、核子の飽和密度の2倍程度以上の高密度状態では、フォック項が核物質の対称エネルギー ( $E_{\text{sym}}$ ) を抑制することが明らかとなった。これは、対称エネルギーのポテンシャル項が高密度状態で飽和することに起因している (同図下段)。

このことから、高精度多体計算は、中性子星内部を想定した高密度非対称核物質の性質解明に非常に重要であることが示唆され、ハイペロンやクォーク物質までを考慮に入れた高精度多体計算による中性子星状態方程式の必要性を示すこととなった。

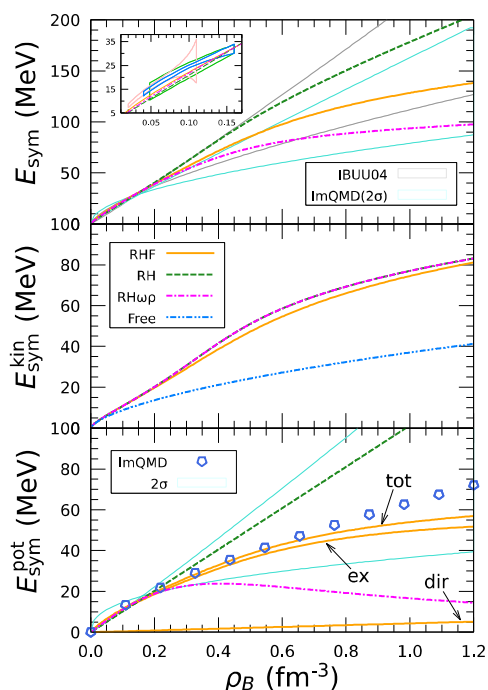


図1 核物質対称エネルギーの密度依存性。上段は対称エネルギーを表し、中段(下段)はその運動量項 (ポテンシャル項) を表す。

(2) 「地上実験」と「天体観測」の結果から制限する核物質の飽和特性

この研究では、相対論的平均場模型を用いて核物質状態方程式を構築し、様々な実験と観測結果を参照することで、核物質の飽和特性に制限を与えた。

「地上実験」の結果として、対称核物質中における核子のポテンシャルのエネルギー依存性や重イオン散乱(HIC)の結果から示唆される対称エネルギーのデータなど考えた。さらに、対称核物質中における核子の有効質量( $M_N^*$ )を制限するために、第一原理に基づく理論計算(DBHF)の結果をも考慮した。

さらに、「天体観測」の結果として、近年報告された大質量中性子星の質量(PSR J0348+0432, MSP J0740+6620)とともに、重力波(GW170817)の測定から計算される中性子星の潮汐パラメータを考慮に入れた。

図2に示すように、核物質の非圧縮率( $K_0$ )や対称エネルギーのスロープパラメータ( $L$ )などの核物質の飽和特性は、中性子星の潮汐パラメータ( $\Lambda$ )に非常に敏感であることが分かった。一方、 $\Lambda$ の観測結果から核物質の飽和特性を制限できることもこの研究の重要な成果である(図3)。さらに、高次の核物質の飽和特性(核物質の3次の非圧縮率( $J_3$ )と対称エネルギーの曲率パラメータ( $K_{\text{sym}}$ ))に関する制限を課すことにも成功した。

本研究を通して、相対論的平均場模型を通常の原子核密度付近の物理現象に応用するだけでなく、高密度状態における天体現象に適応したことで、「地上実験」と「天体観測」を統一的に理解することが可能となった。さらに、多体計算の精度を向上した相対論的ハートレー・フォック計算では、核物質の性質を詳細に説明することが可能であり、その必要性や有用性を示すこととなった。

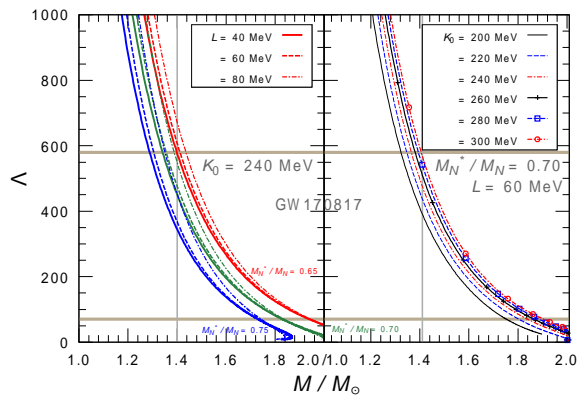


図2 中性子星の質量( $M$ )と潮汐変化パラメータ( $\Lambda$ )の関係

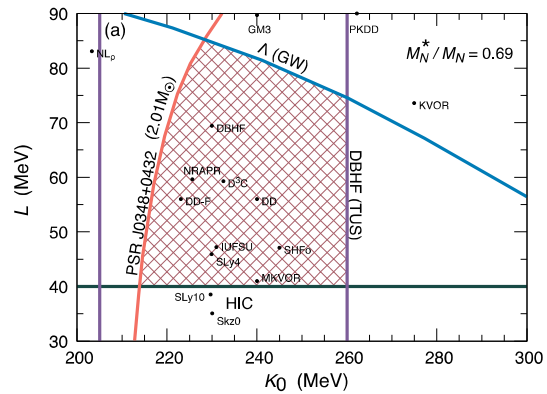


図3 核物質の非圧縮率( $K_0$ )と対称エネルギーのスロープパラメータ( $L$ )の関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Miyatsu Tsuyoshi, Cheoun Myung-Ki, Ishizuka Chikako, Kim K.S., Maruyama Tomoyuki, Saito Koichi	4. 巻 803
2. 論文標題 Decomposition of nuclear symmetry energy based on Lorentz-covariant nucleon self-energies in relativistic Hartree-Fock approximation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135282 ~ 135282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135282	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 Choi Soonchul, Miyatsu Tsuyoshi, Cheoun Myung-Ki, Saito Koichi	4. 巻 31
2. 論文標題 Constraints on the Nuclear Saturation Properties Using Experimental Data and Astrophysical Observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.31.011058	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 Miyatsu Tsuyoshi, Saito Koichi	4. 巻 26
2. 論文標題 Equation of State for Neutron Stars in the Quark-Meson Coupling Model with the Cloudy Bag	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 24021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.024021	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 Tsuyoshi Miyatsu, Myung-Ki Cheoun, Koichi Saito	4. 巻 17
2. 論文標題 Properties of Neutron Stars with Hyperons and Quarks Using Relativistic Hartree-Fock Approximation and MIT Bag Model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 102004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.17.102004	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 [ 全著者名 ] Tsuyoshi Miyatsu, Takahide Kambe, Koichi Saito	4. 巻 INPC2016
2. 論文標題 Equation of state for hybrid stars with strangeness	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceeding of science	6. 最初と最後の頁 135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.281.0135	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 Miyatsu Tsuyoshi, Cheoun Myung-Ki, Ishizuka Chikako, Kim K. S., Maruyama Tomoyuki, Saito Koichi	4. 巻 32
2. 論文標題 The Role of Fock Terms on Nuclear Symmetry Energy and its Slope Parameter in a Relativistic Framework	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 10072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.32.010072	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 Choi Soonchul, Miyatsu Tsuyoshi, Cheoun Myung-Ki, Saito Koichi	4. 巻 31
2. 論文標題 Constraints on the Nuclear Saturation Properties Using Experimental Data and Astrophysical Observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.31.011058	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 Choi Soonchul, Miyatsu Tsuyoshi, Cheoun Myung-Ki, Saito Koichi	4. 巻 909
2. 論文標題 Constraints on Nuclear Saturation Properties from Terrestrial Experiments and Astrophysical Observations of Neutron Stars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 156 ~ 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe3fe	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

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 伊藤遼吾, 金子祐也, 宮津剛志, 齋藤晃一
2. 発表標題 対称エネルギーE <sub>sym</sub> におけるクォーク構造の影響
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮津剛志, Soonchul Choi, Myung Ki Cheoun, 齋藤晃一
2. 発表標題 地上実験と天体観測の情報から核物質の性質はどのくらい制限されるのか?
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsuyoshi Miyatsu
2. 発表標題 Fock contribution to nuclear symmetry energy and its slope parameter based on Lorentz-covariant decomposition of nucleon self-energies
3. 学会等名 9th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Miyatsu, Myung-Ki Cheoun, Chikako Ishizuka, K. S. Kim, Tomoyuki Maruyama, Koichi Saito
2. 発表標題 Effect of Fock terms on nuclear symmetry energy based on Lorentz-covariant decomposition of nucleon self-energies
3. 学会等名 The 27th International Nuclear Physics Conference (INPC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Choi Soonchul、Miyatsu Tsuyoshi、Cheoun Myung-Ki、Saito Koichi
2. 発表標題 Constraints on the Nuclear Saturation Properties using Experimental Data and Astrophysical Observations
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Miyatsu, Myung-Ki Cheoun, Chikako Ishizuka, Kyungsik Kim, Tomoyuki Maruyama, Koichi Saito
2. 発表標題 The role of Fock terms on nuclear symmetry energy in a relativistic framework
3. 学会等名 8th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsuyoshi Miyatsu, Koichi Saito
2. 発表標題 Quark-meson coupling model with the cloudy bag and its application to nuclear and neutron-star properties
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsuyoshi Miyatsu, Koichi Saito
2. 発表標題 Equation of state for neutron stars in the quark-meson coupling model with the cloudy bag
3. 学会等名 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Miyatsu, K. Saito, Myung-Ki Cheoun, C. Ishizuka, K. Kim, T. Maruyama
2. 発表標題 The role of Fock terms on nuclear symmetry energy and its slope parameter in a relativistic framework
3. 学会等名 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsuyoshi Miyatsu, Myung-Ki Cheoun, Chikako Ishizuka, Kyungsik Kim, Tomoyuki Maruyama, Koichi Saito
2. 発表標題 Density and momentum dependence of nuclear symmetry energy in the relativistic Hartree-Fock approximation
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮津剛志, Myung-Ki Cheoun, 石塚知香子, Kyungsik Kim, 丸山智幸, 齋藤晃一
2. 発表標題 相対論的枠組みにおける核物質計算とFock項の効果
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮津剛志, Myung-Ki Cheoun, 石塚知香子, Kyungsik Kim, 丸山智幸, 齋藤晃一
2. 発表標題 相対論的Hartree-Fock計算による対称エネルギーの密度と運動量依存性
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 伊藤遼吾, 金子祐也, 宮津剛志, 齋藤晃一
2. 発表標題 対称エネルギーにおける中間子混合とクォークの影響
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤遼吾, 宮津剛志, 齋藤晃一
2. 発表標題 Modified quark-meson coupling 模型による非対称核物質についての考察
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮津剛志, Soonchul Choi, Myung-Ki Cheoun, 齋藤晃一
2. 発表標題 地上実験と天体観測の結果から考える核物質状態方程式の制限
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap <a href="https://researchmap.jp/tsuyoshi.miyatsu">https://researchmap.jp/tsuyoshi.miyatsu</a> Researchgate <a href="https://www.researchgate.net/profile/Tsuyoshi_Miyatsu">https://www.researchgate.net/profile/Tsuyoshi_Miyatsu</a>
---

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
韓国	Soongsil University	Korea Aerospace University	Institute for Basic Science	