

令和 4 年 5 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01211

研究課題名（和文）中性子星現象論に基づく新しい極限物質探究

研究課題名（英文）Extreme matter studies based on neutron star phenomenologies

研究代表者

福島 健二（FUKUSHIMA, KENJI）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授

研究者番号：60456754

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000 円

研究成果の概要（和文）：中性子星の深部で実現している超高密度物質の性質を解明することが目標である。本研究では状態方程式と呼ばれる密度と圧力の関係式に着目し、次の3つの切り口からアプローチを試みた。（1）観測データから確率的に処理された状態方程式の再構成。（2）第一原理理論による微視的な計算の遂行および理論計算の不定性の改良。（3）なるべくフィットパラメータの入らない信頼度の高い模型の提唱。本研究では、これら3つのそれぞれに対して、（1）深層機械学習による回帰解析の新しいテクニックの開発。（2）自己エネルギーを含めた再和法による不定性の抑制。（3）ハドロン共鳴模型の高密度領域への拡張。という成果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子星は宇宙最大の高密度物質を実現しており、超高強度の磁場を有するユニークな環境になっている。そのような特殊な物質の性質は、物理学の特殊な問題設定ではなく、広く一般の興味を喚起する対象である。中性子星研究は今日の物性理論における場の量子論の応用の先鞭をつけた課題でもあり、学際的にも大きな意義を持っている。とりわけ近年の重力波観測によって連星系の精密なデータが得られるようになってきており、将来的にマルチメッセンジャー天文学が発展するうえで、中性子星物質研究は喫緊の重要テーマとなっている。本研究で得られた成果は、今後長期的に継続するインパクトを持っており、さらなる発展性の期待できるものである。

研究成果の概要（英文）：The objective of the project is to quantify the properties of extreme dense matter realized in deep cores of the neutron stars. In particular we focused on a relation between the (energy/rest-mass) density and the pressure, called the equation of state (EOS), and adopted the following three approaches: (1) Reconstruction of the EOS from probabilistic process of observational data. (2) Improvements of theoretical uncertainties based on the first-principles microscopic calculations. (3) Proposal of novel model descriptions with least number of fitting parameters.

In this project we have achieved the following: (1) Development of new approach using the machine learning inference. (2) Reduction of uncertainty by resummation method including the self-energy insertions. (3) Extension of the hadron resonance gas model toward high baryon density regions.

研究分野：原子核理論

キーワード：中性子星 状態方程式 機械学習 量子色力学 クォーク物質

1. 研究開始当初の背景

中性子星は重力によって自己束縛系をなしており、内部からの圧力によって支えられている。構造を理論的に解析するためには、圧力と密度との関係すなわち「状態方程式」が必要となる。換言すれば、状態方程式が与えられると、中性子星の半径と質量の関係および潮汐変形度の関係も一意に決定することができる。従来は、様々な理論模型を仮定して、対応する状態方程式を算出し、それより導かれる半径と質量を観測データと見比べることによって、理論模型の妥当性をチェックしていた。しかしこのようなアプローチでは必然的に模型に強く依存した結論しか出すことができない。そこで最近のトレンドとして、観測データを確率的に処理して、尤もらしい状態方程式を推定する、という模型に依存しない解析が主流となってきている。

研究開始当初は、観測データを扱う手法として、ベイズ統計解析が提唱されていた。そこで、本研究では、ベイズ統計解析とは独立に観測データを扱う新機軸として、深層機械学習を用いた手法の開発を目指すことにした。同時に、信頼度の高い理論計算を組み合わせたり、また理論計算の信頼度を向上させることによって、状態方程式の不定性をなるべく狭めることも重要な課題として挙げられる。また、たとえ尤もらしい状態方程式が精度良く決定できたとしても、物理の中身が分からなければ、例えば「ハイペロン・パズル」に対して全く無力である。つまり、どのような物理的自由度が圧力に寄与しているのか分からなければ、ストレンジネスを持つ粒子、特にハイペロンがどの程度存在していて、どうして圧力がソフト化せずに重い中性子星を支えられるのか、理解できたことにはならない。従って、観測データの解析と相補的な情報を取り出すためには、微視的な計算が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究課題で最終的に目指すゴールは以下の3つである。

(1) 深層機械学習によって観測データから回帰される状態方程式を推定する。特に理論計算の困難な、原子核物質とクォーク物質のはざまにあたる中間的な密度領域での状態方程式を同定することが目標である。従来法であるベイズ統計解析と結果を比較し、またカイラル有効理論・摂動 QCD による理論計算との整合性もチェックする。

(2) 摂動 QCD は高次で対数項が出てくるためエネルギースケールに関する対称性 (共形対称性) が破れてしまう。弱結合展開であっても、このような対数項が大きな補正を与えてしまう危険性があるため、一般に繰り込み群を用いて対数項の再和を実行しなければならない。これは摂動 QCD では普遍的な計算手法であり、結果としてスケールに依存した結合定数に置き換わることがよく知られている。しかし再和するとき、どの部分まで定数項を含めて再和するか、という不定性が残ってしまう。高エネルギー散乱過程のような繰り込み条件が明確な場合には不定性を除去できるが、高密度物質の場合には運動学的にスケールを決める方法がないため、原理的に除くことのできない不定性となっている。高密度摂動 QCD ではこの繰り込み群スケール依存性が非常に大きく、したがって大きな不定性があるために物理量への予言能力が低いことが長年の問題だった。この問題を解消すべく、繰り込み群による再和だけでなく、自己エネルギーも再和に含めることで摂動展開の性質を改善することを目指す。

(3) 物理的自由度を詳細に検討するためには、最終的には模型計算を避けて通ることはできない。なるべく模型の不定性を除去するためには、高温 QCD で成功している模型を高密度側へと拡張することで、モンテカルロ法による第一原理計算可能な高温 QCD からの制約も取り入れられるようにすることが望ましい。そのような勝手なフィットパラメータを含まない、予言能力のある模型を提唱することも、本課題のゴールである。

3. 研究の方法

目的で述べた3つのゴールのそれぞれに対応して、具体的な研究方法を述べる。

(1) 深層機械学習の応用は、単純に教師あり学習のアルゴリズムに乗せるだけでは不十分である。なぜならば物理学で扱うデータは常に観測誤差を含んでおり、インプットにもアウトプットにも誤差の情報が取り入れることで信頼度を評価しなければならないからである。そこで我々は教師あり学習の訓練データを生成するとき、訓練データの複製に物理的な誤差に対応するラ

ランダムな揺らぎを入れることによって、誤差程度に揺らいだデータでも同じ正解ラベルに対応するのだということを学習モデルに教えることにした。また、アウトプットの信頼性の評価としては、独立な訓練データにより独立な学習モデルを数多く生成し、それらのアウトプットの揺らぎによって信頼幅を見積もるという手法を提案した。

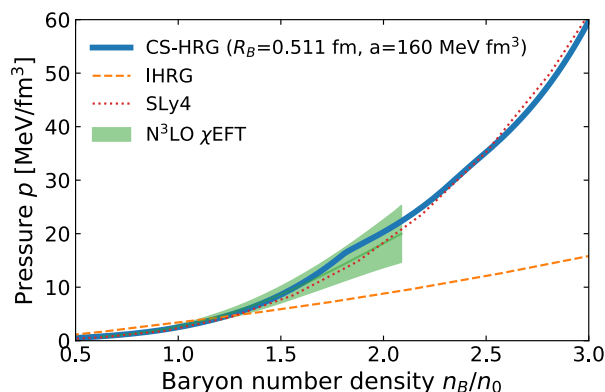
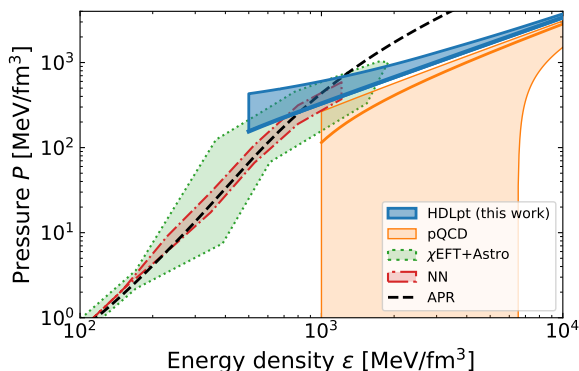
(2) 高温摂動 QCD では自己エネルギーを再和する系統的な方法が確立しており、Hard Thermal Loop (HTL)再和法と呼ばれている。高密度における HTL は、Hard Dense Loop (HDL)とも呼ばれているのだが、この計算の中性子星物質への応用は驚くほど少ない。そこで我々は HDL にクォーク質量の効果を取り込んで従来の結果を改善し、中性子星の状態方程式を計算することにした。これまではクォーク質量がゼロだったために積分を簡単に実行できた部分もあったのだが、有限のクォーク質量の場合には極やブランチカットの構造が複雑になる。

(3) 高温 QCD では Hadron Resonance Gas (HRG)模型と呼ばれる現象論的な模型が大きな成功を収めている。これは観測で知られている粒子 (安定・不安定な粒子全てを含む) の理想気体として熱力学関数が計算できる、とする簡単な模型である。粒子間の相互作用を無視しているが、メソンの相互作用が弱いことから、高温低密度では正当化可能である。しかし低温高密度ではメソンではなくバリオンが主な物理的自由度となり、バリオン間には強い相互作用がはたらくため、HRG をそのまま適用することはできない。HRG にバリオン間相互作用を入れる処方箋としては、排除体積効果が知られているが、これは状態方程式が急速に硬くなってしまいうため、因果律を破ってしまう。そこで斥力的な排除体積効果だけでなく、バリオン間の引力的な相互作用を入れることも極めて重要となる。

4. 研究成果

右図が主要な研究成果をまとめたプロットである。横軸がエネルギー密度、縦軸が圧力を表しており、この平面上的曲線が状態方程式に対応する。低 (エネルギー) 密度側から伸びる赤い領域 (NN とラベルされた領域) が深層機械学習による結果であり、幅は方法で説明した通り、我々の提案する手法によって見積もった信頼幅である。緑色の大きな幅はカイラル有効理論による計算結果を示したものであり、観測データの深層機械学習による解析結果は、理論の予言とコンシステントになっていることが見て取れる。また、黒い破線は原子核理論の微視的な計算で得られる状態方程式 (APR 状態方程式) を表しており、深層機械学習の結果は原子核理論の微視的な計算とも綺麗に整合している。

右図の高密度側は、摂動 QCD の結果を表している。pQCD とラベルされた広い領域が、従来の摂動 QCD の結果であり、繰り込み群スケール依存性が極めて大きく、予言能力に乏しいことが一目瞭然である。HDLpt (this work) とラベルされた青い領域が、自己エネルギーの再和を施した後の結果であり、不定性が驚くほど圧縮されているさまを見て取れる。この結果で最も興味深い点は、深層機械学習の状態方程式が、pQCD あるいは HDLpt の結果と滑らかにつながっているように見えるところである。近年の理論的な考察から、原子核物質とクォーク物質は、不連続的な相転移をすることなく、滑らかにつながっているのではないかとこの予測が立てられている。我々の結果はこのような「クロスオーバー」転移でクォーク物質が実現するというシナリオに現実味を与えている。



次に我々は相互作用を取り入れ、拡張された HRG を使って、状態方程式を構成することに取り組んだ。左図がその結果である。排除体積効果の強さは、バリオンの相互作用半径で決まっており、引力相互作用に対応する模型パラメータはフィットしなければならないが、その他には模型の不定性は一切含まれていない。物理的意味の明確なたった 2 つのパラメータだけで、状態方程式を既知の制約とコンシステントに決めることができるばかりでなく、ストレンジネスを定量化したり、有限温度補正を計算することも不定性なく可能である。可搬性の高い模型の提案ができたことは意義深い。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Chen Shi、Fukushima Kenji、Qiu Zebin	4. 巻 105
2. 論文標題 Skyrmions in a magnetic field and $\langle \text{mml:math xmlns:mml="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="inline"} \rangle \langle \text{mml:msup} \langle \text{mml:mi} \rangle \langle \text{/mml:mi} \rangle \langle \text{mml:mn} \rangle 0 \langle \text{/mml:mn} \rangle \langle \text{/mml:msup} \rangle \langle \text{/mml:math} \rangle$ domain wall formation in dense nuclear matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 L011502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.105.L011502	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 Fujimoto Yuki、Fukushima Kenji	4. 巻 105
2. 論文標題 Equation of state of cold and dense QCD matter in resummed perturbation theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 14025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.105.014025	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 Fujimoto Yuki、Fukushima Kenji、Murase Koichi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Extensive studies of the neutron star equation of state from the deep learning inference with the observational data augmentation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 273
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP03(2021)273	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 Fukushima Kenji、Kojo Toru、Weise Wolfram	4. 巻 102
2. 論文標題 Hard-core deconfinement and soft-surface delocalization from nuclear to quark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 96017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.102.096017	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 Fujimoto Yuki、Fukushima Kenji、Murase Koichi	4. 巻 101
2. 論文標題 Mapping neutron star data to the equation of state using the deep neural network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 54016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.054016	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 Fukushima Kenji、Hidaka Yoshimasa	4. 巻 2020
2. 論文標題 Resummation for the field-theoretical derivation of the negative magnetoresistance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2020)162	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 Fukushima Kenji、Imaki Shota、Qiu Zebin	4. 巻 100
2. 論文標題 Anomalous Casimir effect in axion electrodynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 45013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.045013	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 Fukushima Kenji、Shimazaki Takuya	4. 巻 415
2. 論文標題 Lefschetz-thimble inspired analysis of the Dykhne-Davis-Pechukas method and an application for the Schwinger Mechanism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 168111 ~ 168111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2020.168111	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 Fujimoto Yuki、Fukushima Kenji、Weise Wolfram	4. 巻 101
2. 論文標題 Continuity from neutron matter to two-flavor quark matter with S01 and P23 superfluidity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 94009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.094009	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 Fukushima Kenji、Imaki Shota	4. 巻 97
2. 論文標題 Anomaly inflow on QCD axial domain-walls and vortices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.114003	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 Alford Mark G.、Baym Gordon、Fukushima Kenji、Hatsuda Tetsuo、Tachibana Motoi	4. 巻 99
2. 論文標題 Continuity of vortices from the hadronic to the color-flavor locked phase in dense matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 36004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.036004	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 Benic Sanjin、Fukushima Kenji、Garcia-Montero Oscar、Venugopalan Raju	4. 巻 791
2. 論文標題 Constraining unintegrated gluon distributions from inclusive photon production in proton-proton collisions at the LHC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 11 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.02.007	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 Copinger Patrick、Fukushima Kenji、Pu Shi	4. 巻 121
2. 論文標題 Axial Ward Identity and the Schwinger Mechanism: Applications to the Real-Time Chiral Magnetic Effect and Condensates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 261602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.261602	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 Fukushima Kenji、Pu Shi、Qiu Zebin	4. 巻 99
2. 論文標題 Eddy magnetization from the chiral Barnett effect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 32105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.99.032105	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 Fukushima Kenji	4. 巻 107
2. 論文標題 Extreme matter in electromagnetic fields and rotation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 167 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnpnp.2019.04.001	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8件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Magnetic Fields and Thermal QCD
3. 学会等名 Polarisation measurements in ee, ep, pp and heavy-ion collisions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Rotating Relativistic Matter and Angular Momenta
3. 学会等名 XXXII International Workshop on High Energy Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Quark Matter under Rotation
3. 学会等名 Theory of Hadronic Matter under Extreme Conditions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Continuity from nuclear matter to two-flavor quark matter with 1S0 and 3P2 superfluid
3. 学会等名 Quo vadis QCD theory: heavy-ion collision perspectives and beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Hadronic EoS at Finite Baryon Density
3. 学会等名 Workshop on the QCD Phase Structure at High Baryon Density Region (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 New View of Melting Nuclear Matter into Quark Matter
3. 学会等名 XIII Quark Confinement and the Hadron Spectrum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Chiral Physics with Optical Chirality
3. 学会等名 Quantum Anomalies and Chiral Magnetic Phenomena (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Schwinger Formula and the Axial Ward Identity
3. 学会等名 Quantum Chromodynamics and Its Symmetries (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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	日高 義将 (HIDAKA YOSHIMASA) (00425604)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・教授 (82118)	

6. 研究組織（つづき）

	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	飯田 圭 (IIDA KEI) (90432814)	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授 (16401)	

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