

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400281

研究課題名(和文) 格子QCDを用いた中性子星におけるハイペロン超流動の研究

研究課題名(英文) Study of Hyperon Superfluidity in Neutron Stars using Lattice QCD

研究代表者

井上 貴史 (INOUE, Takashi)

日本大学・生物資源科学部・教授

研究者番号：80407353

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は中性子星の核でハイペロンの超流動が実現しているかを理論的に探る研究である。ハイペロン間の相互作用は実験的に未知なので、基礎理論に基づいて決定して応用する。ハイペロン超流動を考える上で欠かせない量にハイペロンの1粒子ポテンシャルがある。研究期間に、格子QCD数値計算によるハイペロン相互作用の導出と、それを量子多体理論に応用したハイペロン1粒子ポテンシャルの計算まで完了した。得られたハイペロン1粒子ポテンシャルの深さは、ハイパー核の実験データと定性的によく一致している。これは、基礎理論からハイパー核物理を説明した歴史上初めての成功であり、高く評価されている。

研究成果の概要(英文)：Purpose of this research is revealing whether hyperon superfluidity is realized in the core of neutron stars. Since hyperon interactions are experimentally unknown, first we determine them based on the fundamental theory QCD, and then apply them. In order to study hyperon superfluidity, hyperon single-particle potential is an indispensable quantity. Within this budget period, I could derive hyperon interaction by doing lattice QCD numerical calculation, and could compute hyperon single-particle potential applying obtained interactions to the Brueckner-Hartree-Fock quantum many-body theory. Depth of the obtained hyperon single-particle potentials qualitatively agree well with the hypernuclear experimental data. This is the first ever success of explaining hypernuclear physics from the fundamental theory QCD, and it is highly appreciated.

研究分野：ハドロン物理理論

キーワード：ハイペロン 超流動 中性子星 量子色力学 格子場の理論

1. 研究開始当初の背景

中性子星は超新星爆発によって生じるコンパクトな天体である。太陽と同程度の質量を持ちながら半径は 10 km 程度しかない。その内部は大雑把に、殻(クラスト)と呼ばれる外側の部分は原子核と電子からなり、核(コア)と呼ばれる内部は原子核が融けたような物質からなると考えられているが、詳細は謎に包まれている。特に、コアは密度が 1 cm^3 あたり 1 兆 kg にも達する極限的な環境であるため、どのような物質が存在しているのか不明である。研究開始当初は、中性子からなる物質に、ストレンジネスを持つバリオンであるハイペロンが混在している可能性が高いと考えられていた。

2010 年には質量が太陽の 2 倍を超える中性子星が発見され、中性子星内部に対するこれまでの定説は大きく塗り替えられようとしていた。また、カシオペア A と呼ばれる比較的地球に近い超新星爆発残骸で観測された、中性子星表面温度の経年変化も、中性子星の内部がこれまで考えられていたよりも複雑な事を示唆していた。そして、その有力候補の 1 つがハイペロン超流動の発現であった。世界中で重力波望遠鏡の建設が進んでおり、それらが稼働を始めると、2 つの中性子星の合体から放射される重力波が検出され、中性子星内部の理解が大きく進むと期待されていた。

一方の原子核物理学では、強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)からスタートして原子核を研究する道が開けたばかりであった。これによって、原子核物理学は大きく前進すると期待されていた。特に、理化学研究所の京コンピュータが本格稼働すると、現実的な格子 QCD 数値計算が可能になり、加速器を用いた実験では得難い情報が続々と明らかになると期待されていた。

2. 研究の目的

フェルミ多体系では密度と引力相互作用の強さに応じて超流動が発現する事が知られている。中性子星の内部では表面からの深さに応じて広い範囲の密度が実現しているため、中性子星の内部にも様々な超流動が発現していると予想される。中性子星の核にハイペロンが混在している場合は、ハイペロンの超流動も発現する可能性がある。超流動の存在は、ニュートリノ生成反応を通して、中性子星の冷却速度を大きく左右する。従って、中性子星の進化と内部構造を解明するには、超流動の有無を確定する事は不可欠である。本研究の目的は、「中性子星の核は中性子物質にハイペロンが混在した一様物質である」との研究開始当初の標準的な描像に基づき、「中性子星の核でハイペロンの超流動が存在しているか否か」を理論的に明らかにする事であった。

ハイペロン・ハイペロン相互作用は、それを引

き出す事のできる実験データがほとんど存在しないため、全くと言って良いほど定まっていない。わずかに存在するダブル Λ ハイペロン核の束縛エネルギーの情報から、間接的に推測されているのみである。そのため、研究開始当初は、ハイペロン超流動の理論的研究には大きな不確定性が存在した。そこで本研究では、強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)からハイペロン・ハイペロン相互作用を決定した上で、ハイペロン超流動を調べる事にした。つまり、実験で未確定のハイペロン・ハイペロン相互作用の QCD からの決定も、本研究課題の重要な目的の 1 つである。

3. 研究の方法

非可換ゲージ場の理論である量子色力学(QCD)は、その非摂動的な性格から解析的に解く事はできない。本研究では格子 QCD を用いる。格子 QCD は、格子の上にクォークとグルーオンの場の理論である QCD を実現したもので、QCD を数値的に解く事を可能にする。課題実施者は、課題開始以前にも格子 QCD を用いてバリオン間相互作用の研究をしていた。今回はその経験を活かして、現実的なクォーク質量の設定においてハイペロン間相互作用を決定し、ハイペロン超流動の研究に用いる。

量子色力学からバリオン間相互作用を導出する方法の概略は次のとおりである。まず、格子 QCD 上でバリオン 2 体系の(虚)時間発展を数値計算し、バリオン 2 体系の波動関数を得る。得られた波動関数にはバリオン間相互作用を反映した観測可能量が含まれている。続いて、その観測可能量を再現する様に、相互作用の“ポテンシャル”を決定する。この方法は、申請者が属する HAL QCD Collaboration によって構築され、既に多くの成果を上げている。

第 1 ステップのバリオン 2 体系の格子 QCD 数値計算は、計算量が莫大なので、大型計算機、主に京コンピュータを用いて実施した。また、このステップの作業は研究協力者に協力して貰った。一般に、格子 QCD の数値計算にはゲージ配位セットが必要である。京コンピュータではクォークの質量が現実世界の値となる点、いわゆる「物理点」でのゲージ配位生成が行われていた。本研究では、その生成されたばかりのゲージ配位セットを用いた。これによって、現実世界の中性子星の内部について研究する事が可能になった。

第 2 ステップの相互作用ポテンシャルの導出には、HAL QCD Collaboration が開発した強力な手法を用いる。この手法では、虚時間変数での微分を活用する事によって、エネルギー固有状態を分離せずに相互作用を引き出す事ができる。ハイペロン相互作用はチャンネルの結合を反映してチャンネル空間の行列になる。そのため、データ解析は核力の

場合に比べて複雑である。このステップも計算量とデータ量は膨大だが、補助金を用いて手元の環境を整備する事で実施できた。

最後に、得られたハイペロン間相互作用を BCS 理論に応用し、ハイペロン超流動の存在を調べる。具体的には、ギャップ方程式を解いてハイペロン対に有限のギャップが生じるか調べる。ギャップ方程式は対相関関数 $\Delta(k)$ に対する非線形な方程式であり、相互作用の強さと密度に依って、非自明な解として有限な $\Delta(k)$ を持つ。フェルミ面での有限な対相関 $\Delta(k_F)$ すなわちギャップは、超流動の存在を意味する。ギャップが生じる条件(密度)とそのギャップの大きさが判れば、中性子星においてハイペロン超流動が発現するか否かを判定する事ができる。

4. 研究成果

まず初めに、ストレンジネス $S = -2$ を持つハイペロン Ξ^0 の超流動を調べた。その理由は、 Ξ^0 - Ξ^0 1S_0 系はチャンネルの結合がなく単純であり、かつ、ストレンジネスが大きいために格子 QCD 数値計算のデータが綺麗だからである。導出した相互作用ポテンシャルを BCS 理論に応用してギャップ方程式を解いた。得られた Ξ^0 ハイペロンの対相関ギャップ $\Delta(k_F)$ の密度依存性を図 1 に示す。

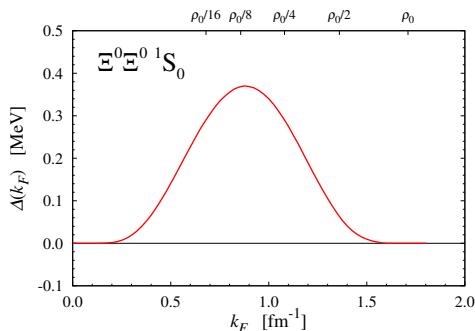


図 1 : Ξ^0 ハイペロンの対相関ギャップ

図 1 から、標準核密度 $\rho_0 = 0.17$ [fm^{-3}] の $1/8$ を中心とした密度において、有限のギャップが生じる事が判る。ギャップの大きさは最大で 0.4 MeV であり、この大きさは中性子星内部の典型的な温度である 10 keV より十分大きいので、超流動が発現する事を意味している。次の問題は、 Ξ^0 の密度 $\rho_0/8$ が中性子星の中で実現するかどうかである。

ハイペロンは中性子よりも質量が数百 MeV も大きく、物質中に出現するとエネルギー的に不利である。しかし、高密度中性子物質の中では、フェルミ統計性から中性子の化学ポテンシャルは大きくなっており、中性子を増やすよりもハイペロンを追加した方が有利になる可能性がある。その時に、中性子物質の中にハイペロンが出現する。従って、物質中にハイペロンが出現しているか、どれくらい混在しているかは、ハイペロンの化学ポテンシャルを調べなければ判らない。粒子の化学ポテンシ

ルはその粒子の 1 粒子ポテンシャルから決まるので、ハイペロンの 1 粒子ポテンシャルを調べる事にした。格子 QCD から導出したハイペロン相互作用を Brueckner-Hartree-Fock (BHF) 理論に応用した。図 2 に標準核密度の対称核物質においてハイペロンが受ける 1 粒子ポテンシャル $U_Y(k)$ を示す。

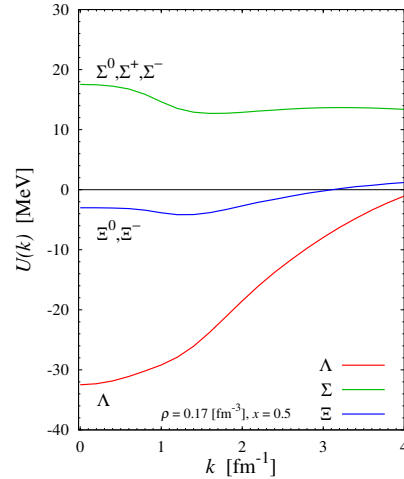


図 2 : ハイペロンの 1 粒子ポテンシャル

この計算結果は、ハイパー核の実験データから引き出された結果と定性的に良く一致している。この成功は、強い相互作用の基礎理論である QCD からハイパー核の実験データを再現した世界で初めての快挙であり、学会で高く評価されている。現在、この成果を論文にまとめている。

これらの 1 粒子ポテンシャルから、核物質中のハイペロンの化学ポテンシャルが計算できる。それを中性子の化学ポテンシャルと比較する事で、ハイペロンが自然に(エネルギー的に有利に)出現するか否かが判定できる。図 2 の結果は標準核密度で計算したものであるが、中性子星内部のハイペロン混在度を調べるには、高密度物質でのハイペロン 1 粒子ポテンシャルが必要である。高密度においては、低密度では無視できた高角運動量部分波の相互作用が無視できなくなる。ハイペロン相互作用の高角運動量部分波は、格子 QCD を用いた導出が現在計画中であり、現時点では利用できない。従って、高密度物質中のハイペロン混在度の定量的な予測も現時点ではできない。中性子星の内部におけるハイペロン混在度の問題は興味深い重要な課題である。本研究課題の成果を踏まえて、この問題の研究を今後も継続していく。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 20 件)

- ① C. McIlroy, C. Barbieri, T. Inoue, T. Doi, and T. Hatsuda, “Doubly magic nuclei from lattice QCD forces at $M_{PS}=469$ MeV/ c^2 ”, Phys. Rev. C **97**, 021303(R), (2018), DOI: 10.1103/PhysRevC.97.021303, 査読有

- ③ T. Iritani, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD Coll.], “Are two nucleons bound in lattice QCD for heavy quark masses? Consistency check with Lüscher’s finite volume formula”, *Phys. Rev. D* **96**, 034521 (2017), DOI:10.1103/PhysRevD.96.034521, 査読有
- ④ A. Dote, T. Inoue, T. Myo, “Fully coupled-channel complex scaling method for the K-pp system”, *Phys. Rev. C* **95**, 062201(R), (2017), DOI:10.1103/PhysRevC.95.062201, 査読有
- ⑤ Y. Ikeda, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, K. Murano, K. Sasaki [HAL QCD Coll.], “Fate of the Tetraquark Candidate $Z_c(3900)$ from Lattice QCD”, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 242001, (2016), DOI:10.1103/PhysRevLett.117.242001, 査読有
- ⑥ T. Iritani, T. Doi, S. Aoki, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD Coll.], “Mirage in temporal correlation functions for baryon-baryon interactions in lattice QCD”, *JHEP* 2016:101, (2016), DOI:10.1007/JHEP10(2016)101, 査読有
- ⑦ K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano [HAL QCD Coll.], “Coupled channel approach to strangeness $S=-2$ baryon-bayron interactions in Lattice QCD”, *Prog. Theo. Expe. Phys.* **2015**, 113B01, (2015), DOI:10.1093/ptep/ptv144, 査読有
- ⑧ M. Yamada, K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura [HAL QCD Coll.], “Omega-Omega interaction from 2+1 flavor lattice QCD”, *Prog. Theo. Expe. Phys.* **2015**, 071B01, (2015), DOI:10.1093/ptep/ptv091, 査読有
- ⑨ A. Dote, T. Inoue, T. Myo, “Application of a coupled-channel Complex Scaling Method with Feshbach projection to the K-pp system”, *Prog. Theo. Expe. Phys.* **2015**, 043D02, (2015), DOI:10.1093/ptep/ptv039, 査読有
- ⑩ T. Inoue, S. Aoki, B. Charron, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD Coll.], “Medium-heavy nuclei from nucleon nucleon interactions in lattice QCD”, *Phys. Rev. C* **91**, 0011001(R), (2015), DOI:10.1103/PhysRevC.91.011001, 査読有
- ⑪ F. Etminana, H. Nemura, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, K. Sasaki [HAL QCD Coll.], “Spin-2 N-Omega Di-baryon from Lattice QCD”, *Nucl. Phys. A* **928**, 89-98, (2014), DOI:10.1016/j.nuclphysa.2014.05.014, 査読有
- ⑫ K. Murano, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, H. Nemura, K. Sasaki, [HAL QCD Coll.], “Spin-Orbit Force from Lattice QCD”, *Phys. Lett. B* **735** 19-24, (2014), DOI:10.1016/j.physletb.2014.05.061, 査読有
- [プロシーディングス]
- ⑬ A. Dote, T. Inoue, T. Myo “Double-Pole Structure on a Prototype of Kaonic Nuclei K-pp”, *JPS Conf. Proc.* **17**, 082006 (2017), DOI:10.7566/JPSCP.17.082006, 査読無
- ⑭ T. Inoue for [HAL QCD Coll.], “Hyperon single-particle potentials from QCD on lattice”, *PoS INPC 2016* 277 (2017), <https://pos.sissa.it/281/277/>, 査読有
- ⑮ A. Dote, T. Inoue, T. Myo, “Hyperon Resonance $\Lambda(1405)$ and the K-pp Three-Body Resonance”, *JPS Conf. Proc.* **10**, 022013 (2016), DOI:10.7566/JPSCP.10.022013, 査読無
- ⑯ T. Inoue for [HAL QCD Coll.], “Nuclear physics from QCD on lattice”, *PoS Chiral Dynamics 2015*, 20 (2016), <https://pos.sissa.it/253/020/>, 査読有
- ⑰ A. Dote, T. Inoue, T. Myo, “Theoretical Study of a Prototype System of Kaonic Nuclei K-pp”, *JPS Conf. Proc.* **8**, 021011, (2015), DOI:10.7566/JPSCP.8.021011, 査読無
- ⑱ A. Dote, T. Inoue, T. Myo, “Investigation of $K\bar{b}ar$ NN resonances with a coupled-channel Complex Scaling Method + Feshbach projection”, *Hyperfine Interactions* **234** 1, 1-7, (2015), DOI:10.1007/s10751-015-1152-x, 査読無

- ⑱ T. Inoue for [HAL QCD Coll.], “Medium-heavy Nuclei from Lattice Quantum Chromodynamics”, DESY-PROC 2014-04, 95-98, (2015), DOI:10.3204/DESY-PROC-2014-04/218, 査読無
- ⑲ A. Dote, T. Inoue, T. Myo, “Essential K^- cluster K -pp studied with a coupled-channel Complex Scaling Method + Feshbach method”, J. Phys. Conf. Ser. **569** 012084, (2015), DOI:10.1088/1742-6596/569/1/012084, 査読有
- ⑳ T. Inoue for [HAL QCD Coll.], “Equation of State of Nucleon Matters from Lattice QCD Simulations”, PoS **Lattice 2013**, 229 (2014), <https://pos.sissa.it/187/229/>, 査読有

[学会発表](計 19 件)

[国際会議]

- ① T. Inoue, “Hyperons in infinite nuclear matter based on the hyperon-baryon interactions from the HALQCD method”, 2nd EMMI Workshop on anti-matter, hypermatter and exotica production at the LHC, 2017/11/09, University of Turin, Torino, Italy
- ② T. Inoue, “Strange nuclear physics from QCD on lattice”, International Workshop on Quantum Many-Body Problems in Particle, Nuclear, and Atomic Physics, 2017/03/08, Duy Tan University, Danang, Vietnam
- ③ T. Inoue, “Hyperon single-particle potentials from QCD on lattice”, The 26th International Nuclear Physics Conference (INPC2016), 2016/09/15, Adelaide, Australia
- ④ T. Inoue, “Atomic nucleus from QCD on lattice” The 11th European Research Conference on Electromagnetic Interactions with Nucleons and Nuclei (EINN), 2015/11/06, Paphos, Cyprus
- ⑤ T. Inoue, “Studies on nuclei starting from quantum chromodynamics”, YIPQS Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International workshop, Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP 2015), 2015/10/08, Kyoto, Japan
- ⑥ T. Inoue, “Nuclear Physics from QCD on lattice”, The 8th International workshop on

Chiral Dynamics 2015, 2015/06/30, Pisa, Italy

- ⑦ T. Inoue, “Medium-heavy nuclei from lattice quantum chromodynamics” 20th Particles & Nuclei International Conference (PANIC 2014), 2014/08/28, University Hamburg, Hamburg, Germany

[日本物理学会]

- ⑧ 井上貴史 for HAL QCD Coll., 「物理点格子 QCD による近似的な核力とその応用」日本物理学会第 7 3 回年次大会, 2018/03/23, 東京理科大学
- ⑨ 井上貴史 for HAL QCD Coll., 「物理点格子 QCD によるハイペロン混合物質」日本物理学会 2 0 1 7 年秋季大会, 2017/09/12, 宇都宮大学
- ⑩ 井上貴史 for HAL QCD Coll., 「物理点格子 QCD によるハイペロン化学ポテンシャル」, 日本物理学会第 7 2 回年次大会, 2017/03/18, 大阪大学
- ⑪ 井上貴史 for HAL QCD Coll., 「物理点格子 QCD によるハイペロン一体ポテンシャル」, 日本物理学会 2 0 1 6 年秋季大会, 2016/09/22, 宮崎大学
- ⑫ 井上貴史 for HAL QCD Coll., 「物理点格子 QCD によるバリオン対相関ギャップ」, 日本物理学会 第 7 1 回年次大会, 2016/03/19, 東北学院大学
- ⑬ 井上貴史 for HAL QCD Coll., 「格子 QCD における中重核の質量と構造」, 日本物理学会 2 0 1 5 年秋季大会, 2015/09/25, 大阪市大

[ワークショップ・研究会]

- ⑭ 井上貴史, 「格子 QCD 計算を用いた核物質中のハイペロンの研究」, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム, 2017/12/28, 筑波大学東京キャンパス
- ⑮ 井上貴史, 「格子 QCD バリオン間相互作用の特徴」, 軽井沢研究会「原子核多体問題の進展と展望」, 2017/06/11, 軽井沢
- ⑯ 井上貴史, 「格子 QCD を用いた核物質中のハイペロンの研究」, 基研研究会「核力に基づく核構造・核反応物理の展開」, 2017/03/28, 京都大学基礎物理学研究所
- ⑰ 井上貴史, 「中性子星と格子 QCD」, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム, 2016/03/31, ワテラスコモンホール

⑱ 井上貴史, 「格子 QCD における中重核」, 研究会「QCD を基礎とする核子多体系物理の理解」, 2014/12/20, 大阪大学核物理研究センター

⑲ 井上貴史, 「格子 QCD によるハイペロン力の研究 -現状と展望」, Hadron Spectroscopy Cafe, 2014/11/28, 東京工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 貴史 (INOUE, Takashi)
日本大学・生物資源科学部・教授
研究者番号 : 80407353

(2) 研究協力者

佐々木 健志 (SASAKI, Kenji)