

課題名(タイトル):

QCD 第一原理計算に基づくハドロン間力と有限密度 QCD 物質の研究

利用者氏名:

○土井琢身(1,2,3)、伊藤悦子(1)、村上耕太郎(1)、杉浦拓也(1)、Liang ZHANG(1)、Lingxiao WANG(1)

理研における所属研究室名:

(1)数理創造プログラム

(2)仁科加速器科学研究センター 少数多体系物理研究室

(3) 情報統合本部 基礎物理系データ共有開発ユニット

1. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

この世界にはどのような物質が存在しているのか。物質は超高密度などの極限状態でどのような存在形態を取るのか。これら物理学の根本的謎を解明する上での最重要課題の一つが、物質を構成する主要要素であるハドロンの中に働く力・ハドロン間力の決定である。

ハドロンは、クォークと呼ばれる素粒子(およびその相互作用を媒介する素粒子であるグルーオン)からなる複合粒子であり、3つのクォークから構成されるバリオン、クォーク・反クォークの2つから構成されるメソンがある。クォーク・グルーオンの力学は、素粒子の基本理論である量子色力学(QCD)によって支配されており、ハドロン単体の性質については QCD からの直接理解が進んでいる。しかしハドロン間力に関しては、散乱実験による解析は進められてきたものの、QCD からの理論的導出はなされておらず、また実験が困難なハドロン間力については大きな不定性がある状況にあった。

これに対して我々は、HAL QCD 法という独自の理論定式化を産み出し、QCD の第一原理計算である格子 QCD シミュレーションにより様々なハドロン間力を QCD から直接決定するという、新たな研究分野そのものを創造した。得られたハドロン間力は、素粒子物理と原子核・ハドロン物理の間のミッシングリンクを繋ぐものであり、その学術的価値は極めて高い。さらに、これまで未知であったハドロン間力は、中性子星の内部や連星中性子星合体・重元素合成など、宇宙における超高密度核物質の性質(状態方程式)の解明に必要不可欠であり、その決定は宇宙天文学へのミッシングリンクを繋ぐものともなる。

我々は理研スパコンの利用により、様々なハドロン間力の研究を進めてきており、中でも重要な成果が、世界初となる物理点近傍におけるバリオン間力の決定である。これ

により、 $\Omega\Omega$ 、 $\Omega_{ccc}\Omega_{ccc}$ 、 $N\Omega$ などのダイバリオン状態の存在の予言、 Ξ ハイパー原子核(Ξ テトラバリオンや($\Xi N\alpha\alpha$)原子核)の予言、さらに原子核衝突時バリオン間相関の予言などを行った。これらの結果は、J-PARC におけるハイパー核実験、理研-BNL RHIC や CERN LHC など原子核衝突実験におけるバリオン間相関の観測、連星中性子星合体に伴う重力波観測(LIGO/Virgo/KAGRA 等)、宇宙ステーション上の X 線望遠鏡による中性子星観測(NICER)、理研 RIBF 実験における元素起源の研究など、国内外の大規模実験・観測にも大きなインパクトを与えており、中でも $N\Xi$ バリオン相関については我々の予言の正しさが LHC ALICE Collaboration によって実験的に確認された。

一方で、前述の「中性子星の内部」の物理に焦点をあてると、そこでは高密度の QCD 物質の世界になっていると考えられている。しかしながら、低温高密度 QCD の第一原理計算は符号問題と呼ばれる深刻な計算困難があり、なかなか理解が進んでいないのが現状である。

2022 度からは、理研スパコンを用いて QCD のカラーの自由度を一つ縮減した2カラーQCD というトイモデルで有限密度中の物理を理解する研究に着手した。2カラーQCDは低密度系では現実の QCD とほぼ同じ性質を持つ一方、高密度にしても符号問題が生じず、従来と同じ方法でモンテカルロ計算ができることが知られている。このモンテカルロ計算で生成した配位を用いて、我々がこれまで開発してきた HAL QCD 法を有限密度中へ拡張する。これにより、長年の問題である低温高密度における QCD 物質の現象への知見を得るのが目的である。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究では、(1) ラショナルハイブリッドモンテカルロ(RHMC)アルゴリズムを使って、QCD 配位の生成を行う。

(2) ゲージ固定をして、ハドロン2点関数を測定する。

(3) ハドロンの4点関数を測定し、(2)と組み合わせることで HAL QCD 法によるハドロン間ポテンシャルを導出する。

前述のように、一般的な $SU(N_c)$ ゲージ理論では、有限密度下で計算を行うと作用が複素数になる「符号問題」と、高密度領域で仮想粒子の対生成・対消滅が生じて「シミュレーションが不安定になる問題」があり、理解があまり進んでいない。そこで我々は、有限密度系でも符号問題を生じない2フレーバー $SU(2)$ ゲージ理論を考え、さらに、作用に粒子・反粒子の対称性を破る「ダイクォーク源」を加えることで不安定性問題を回避する事にした。この方法の実践は日本初である。

具体的な計算量としては、格子サイズを 32^4 でゲージ配位を生成し、低温($T \sim 0.20T_c$)で物理量の密度依存性を調べている。詳細な密度依存性を調べるため、クォーク化学ポテンシャルで 16 点のデータポイントで配位を生成している。2023 年度までに、目標の統計数(100-400 配位)の配位生成の計算を終えた。

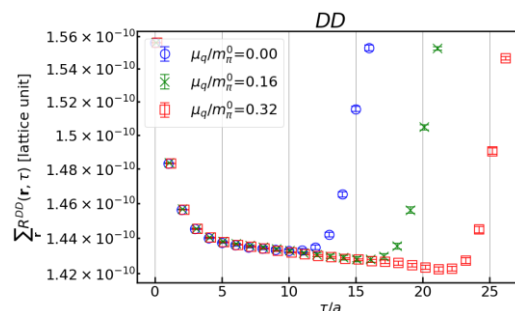
今年度は、(2)の相関関数の計算を行い、Wall source および、化学ポテンシャル効果を入れた Wilson Dirac 演算子を用いて計算を行った。2点関数に関しては、メソンとバリオン(ダイクォーク)それぞれの、スカラー・ベクトル・擬スカラー・擬ベクトルの各チャンネルおよびアイソスカラー・アイソベクトルの各チャンネルについて調べ、密度による質量スペクトルの変化を調べた。4点関数を必要とする HAL QCD ポテンシャルの導出では、まずは化学ポテンシャルがゼロに近いハドロン相で、パイオン(擬スカラーメソン)・スカラーダイクォーク・反スカラーダイクォークそれぞれの2体系について計算した。

特に昨年度から、超流動相へ相転移する臨界点より小さい低密度領域で、相互作用ポテンシャルや散乱のパラメータである位相シフトがどのように化学ポテンシャルに依存するかを調べ、成果をまとめて出版した(論文(1))。

3. 結果

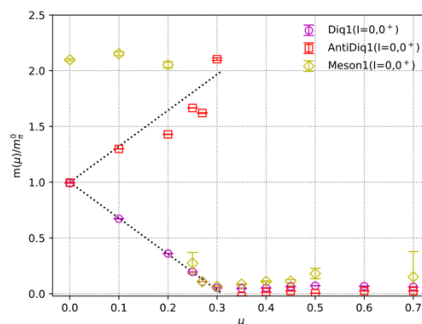
得られた2点相関関数から、メソンであるパイオンの場合には化学ポテンシャルに依存せず、バリオンであるダイクォークの場合には明白な化学ポテンシャルに依存する振る舞いが見られた。同様に、4点相関関数について同様の結果が得られたが、それらの比を取った R 相関関数はどちらの場合も化学ポテンシャル依存性が見られなかった。これは、この R 相関関数から直接得られる相互作用ポテンシャルや散乱のパラメータである位相シフトは化学ポテンシャル

に依存しないことを意味する。



これに加え、化学ポテンシャルを入れて虚時間方向に関する時間反転対称性を破ると、同方向の有限体積効果(上図の上昇する振る舞いに相当)が抑えられ、よりもっともらしい解析ができることがわかった。

また、ここまでは超流動相転移より低密度領域の研究だったが、今年度は、さらに高密度の超流動相でのハドロン質量を精密に決定するための計算も行った。



まず、ダイクォーク源の係数が異なる2点相関関数を計算し、ハドロン質量について係数へのゼロ外挿を行った。上図は、ゼロ外挿を行った、スカラーチャンネルのメソン(黄色)・ダイクォーク(紫)・反ダイクォーク(赤)の質量の密度依存性の初期成果である。さらに、昨年度まで行っていなかった、非連結ダイアグラムの計算を HOKUSAI で実行し、現在データをまとめている。

4. まとめ

今年度は、昨年度から行っていた「有限密度領域におけるハドロン間力の第一原理計算による決定」について成果を論文として出版させるに至った。具体的には QCD のトイ模型である格子2カラーQCD の低温有限密度領域での配位生成と、様々なハドロンの2点関数・4点関数の測定を行い、HAL QCD 法を用いてハドロン相におけるハドロン間ポテンシャルの密度依存性について結果を得た。有限密度領域での HAL QCD 法の応用は世界で初めてのことである。

さらに、密度の高い領域でのハドロン質量に向けて、これまであまり考えられていなかった、ダイクォーク源の係数の

ゼロ外挿および非連結ダイアグラムの計算を実行し、これも含めた成果を現在まとめている。

5. 今後の計画・展望

今後は、高密度でのハドロン質量の決定をまず行う。さらに、そこで生じる「超流動相での HAL QCD 法」を構成し、中性子星内部のような超流動的な QCD 物質のハドロン間力の第一原理計算法を確立するのが最終目標である。

また、今年度から HPCI の研究課題として、同じく HOKUSAIを用いて、3カラーアイソスピン化学ポテンシャル系の計算も始めている。このモデルも2カラーと同じく符号問題を避けて高密度領域の第一原理計算を行うことができる。来年度は、2カラーと同じく3カラーについても低密度のハドロン相で同様の解析を行い、特に軽いハドロンのシグナル・ノイズ比の改善に役立てる研究も進める。

2024 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

(1)

K. Iida, E. Itou, K. Murakami, "Chemical potential (in)dependence of hadron scatterings in the hadronic phase of QCD-like theories and its applications", JHEP 02 (2024) 152 (preprint 版(arXiv:2309.08143)は報告済み)

【口頭発表】

(1)

Lattice results for the speed of sound in dense QCD-like theories

Etsuko Itou

Condensed Matter Physics of QCD 2024, YITP, Kyoto University 2024 年 3 月 19 日

(2)

Phase and equation of state of finite density QC2D at lower temperature

Etsuko Itou

The 41th International Conference on Lattice field theory (LATTICE 2024), University of Liverpool, UK 2024 年 8 月 1 日

(3)

Hadronic properties in two-color QCD at nonzero chemical potential from lattice simulations

Kotaro Murakami

Universality of Strongly Correlated Few-body and Many-body Quantum Systems, TOKYO ELECTRON House of Creativity, Tohoku University 2024 年 9 月 3 日 (招待講演).

(4)

より低温における2カラーQCD 相図と 状態方程式の決定

伊藤 悦子

日本物理学会 第 79 回年次大会(2024 年), 北海道大学 2024 年 9 月 17 日

(5)

Lattice results for the speed of sound in dense QCD-like theories

Etsuko Itou

Compact Stars in the QCD Phase diagram (CSQCD2024), YITP, Kyoto University 2024 年 10 月 7 日 (招待講演)