

プロジェクト名(タイトル):

格子量子色力学を用いたハドロン間力の決定

利用者氏名:

○土井琢身(1,2)、伊藤悦子(1)、権業慎也(1)、Hui TONG(1)、井上貴史(1)、石井理修(1)、佐々木健志(1)、村上耕太郎(1)、青木慎也(1)、杉浦拓也(1)、初田哲男(1)、土居孝寛(1)、池田陽一(1)、Liang ZHANG(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

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。物質は宇宙の歴史の中でどのように進化してきたのか。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。しかも、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)の解明にも必要不可欠であり、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。

昨年度からは、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(Nc)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 SU(2) 2フレーバー理論を考え、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。

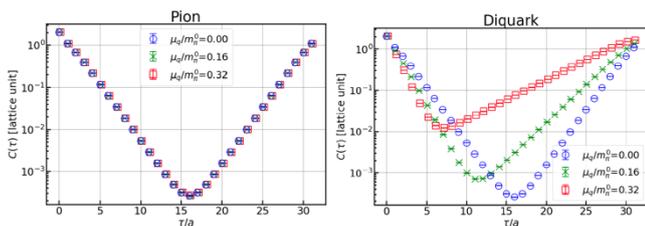
具体的な計算量としては、格子サイズを 32^4 でゲージ配位を生成し、低温($T \sim 0.20T_c$)で物理量の密度依存性を調べている。詳細な密度依存性を調べるため、クォーク化学ポテンシャルで 16 点のデータポイントで配位を生成している。今年度は、まず、目標の統計数(200 配位)の配位生成の計算を終えた。

また、(2)の相関関数の計算では、Wall source を用いて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る。4点関数の計算を必要とする HAL QCD ポテンシャルの計算では、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。

特に今年度は、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た(論文投稿中, arXiv:2309.08143)。

3. 結果

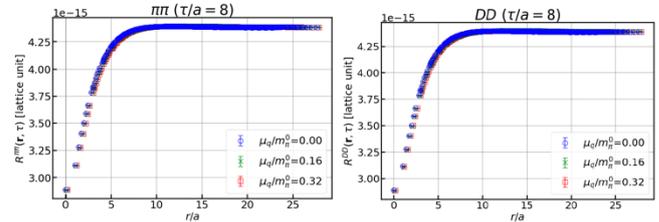
まず2点相関関数の密度依存性は下図になった。ここで、左はパイオン(擬スカラーメソン)、右図はスカラーダイクォークである。



メソンであるパイオン(左図)は、小さな化学ポテンシャルを入れても、相関関数は化学ポテンシャルに依存しない。しかし、バリオンであるダイクォーク(右図)は明らかな化学ポテ

ンシャル依存性がある。

同様に、4点相関関数についても調べると、同じような結果が得られるが、それらの比を取った R 相関関数は下図のように、どちらの場合も化学ポテンシャル依存性が見られない。



つまり、ここ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。一方で、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、遠いところまでデータ点を取れてよりもっともらしい解析ができることがわかった。

4. まとめ

今年度は、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という研究課題で初めての結果を得た。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(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。

5. 今後の計画・展望

今後は、高密度で出現する超流動相での HAL QCD 法の計算法を構成し、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、3カラーの場合にもアイソスピン化学ポテンシャルを導入することで、符号問題を避けて同じような計算をすることができる。今年度と同じく低密度のハドロン相で同様の解析を行う、特に軽いハドロン(シグナル・ノイズ比)の改善に役立てる事ができるというアイデアを得た。今後は3カラーの場合の有限アイソスピン化学ポテンシャル系の研究も開始する。

2023 年度 利用研究成果リスト

【会議の予稿集】

(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", arXiv:2309.08143 (JHEP に投稿中)

(2)
Kotaro Murakami, Daiki Suenaga, Kei Iida, Etsuko Itou, "Measurement of hadron masses in 2-color finite density QCD", PoS LATTICE2022 (2023) 154, 2023 年 4 月 6 日
(preprint 版は報告済み)

(3)
Etsuko Itou, Kei Iida, "Bump of sound velocity in dense 2-color QCD"
PoS LATTICE2022 (2023) 151, 2023 年 4 月 6 日
(preprint 版は報告済み)

【口頭発表】

(1)
Etsuko Itou, "Velocity of Sound beyond the High-Density Relativistic Limit from Lattice Simulation of Dense Two-Color QCD", Quark Confinement 2023, University of Minnesota 2023 年 5 月 3 日(招待講演)

(2)
Etsuko Itou, "Speed of Sound beyond the High-Density Relativistic Limit in Dense Two-Color QCD - Lattice Simulation Results -", 19th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2023), University of Coimbra, Portugal. 2023 年 7 月 28 日

(3)
Kotaro Murakami, "Hadron scatterings in small chemical potential," 19th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2023), University of Coimbra, Portugal, 2023 年 7 月 28 日.

(4)
Etsuko Itou, "New configuration generation set of the HAL QCD collaboration", The 40th International Conference on Lattice field theory (LATTICE 2023), Fermi Lab, USA. 2023 年 8 月 1 日

(5)
Etsuko Itou, "Speed of sound exceeding the conformal bound in dense 2-color QCD"
The 40th International Conference on Lattice field theory (LATTICE 2023), Fermi Lab, USA. 2023 年 8 月 4 日 (招待講演)

(6)
伊藤 悦子, "有限密度 QCD 型理論の コンフォーマルバウンドの破れ"

2023 年度 利用報告書

基研研究会 素粒子物理学の進展2023, YITP Kyoto University 2023 年 8 月 29 日

(7)

伊藤 悦子, “格子シミュレーションによる QCD 型理論の超流動相での音速”

～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ 2023, 京都大学 理学研究科セミナーハウス 2023 年 9 月 7 日

(8)

村上 耕太郎, 飯田 圭, 伊藤 悦子, “ハドロン相での有限化学ポテンシャル下におけるハドロン散乱”

日本物理学会 第 78 回年次大会(2023 年) 東北大学青葉山キャンパス 2023 年 9 月 16 日

(9)

村上 耕太郎, “格子計算による有限密度 2 カラー QCD におけるハドロン有効質量の研究”

ELPH 研究会 C035「実験、反応・構造計算、格子 QCD で解き明かすハドロン分光」, 東北大学電子光理学研究センター
2023 年 11 月 9 日(招待講演)