

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)、Yan LYU(1)、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)

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 ストレンジネス核物理研究室

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？そして超高密度などの極限状態で物質はどのような性質を示すのか？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、 $\Xi N\alpha\alpha$ 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。さらに $N\Phi$ 相互作用について初めての現実的格子QCD第一原理計算を行い、 $J=3/2$ チャンネルにおいて粒子間の距離によらず引力が存在することを示すと共に、長距離領域において2パイオン交換が支配的であることを示した。

一方で、前述の「中性子星の内部」の物理に焦点をあけると、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。

本年度からは、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は小密度系では現実の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法を有限密度系へ拡張する。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、ハドロンの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 法によるハドロ人間ポテンシャルを導出する。

前述のように、一般的な $SU(N_c)$ 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 $SU(N_c=2)$ 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。

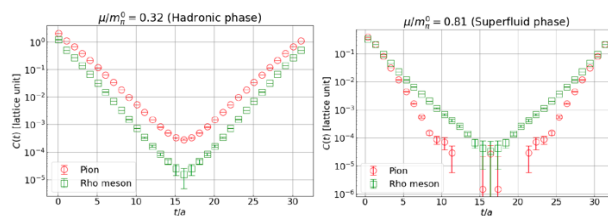
具体的な計算量としては、格子サイズを 32^4 でゲージ配位を生成し、低温($T \sim 0.20T_c$)で物理量の密度依存性を調べている。詳細な密度依存性を調べるため、クォーク化学ポテンシャルで 16 点のデータポイントで配位を生成している。本年度中に、目標の統計数(200 配位)の約 1/3 から 1/2 の計算を終えた。

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た。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。

3. 結果

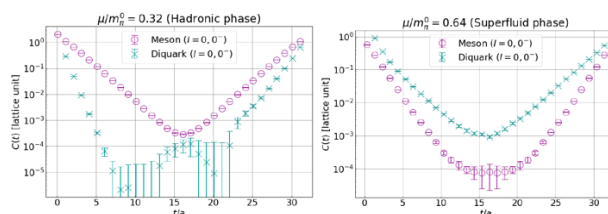
低密度領域のハドロン相と、高密度領域の超流動相の何点かの密度領域でハドロンの2点関数を計算した結果は以下ようになった。

まず、パイオン(擬スカラーメソン, 赤)とローメソン(ベクトルメソン, 緑)の相関関数は下図になる。



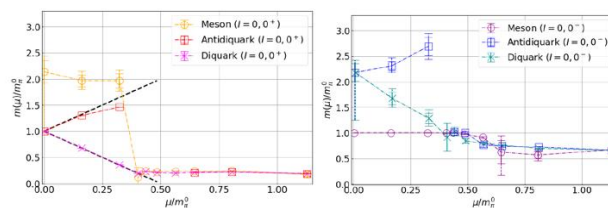
ハドロン相(左図)では、よく知られているようにパイオンがローメソンより軽い。しかし、超流動相(右図)ではローメソンの方が軽く、パイオンはノイジーになっているのがわかる。これはパイオンが他の状態より重くなり、おそらく崩壊モードが開いていることを示唆している。

同様に、バリオンについても調べると、下図のようになった。ここでは、アイソスカラー・擬スカラーのチャンネルを示している。



ハドロン相(左図)では、メソンの方がバリオン(ダイクォーク)より軽いが、超流動相(右図)では逆にバリオンの方がメソンより軽くなることを示している。

これらをまとめて下図の結果を得た。超流動相では、アイソスカラー、スカラーダイクォークが最も軽くなることが示されている。これはバリオン $U(1)$ 対称性が破れたことによる NG モードではないかと考えられる。



4. まとめ

今年度は、有限密度領域におけるハドロ人間力の第一原理計算による決定という研究課題に着手した。具体的には QCD の Toy 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 点関数の測定を行なった。2 点関数の測定からは、ハドロンの質量スペクトルの密度依存性が得られ、高密度での超流動相ではもはやパイオンが最も軽いハドロンではなく、2 カラーの場合はスカラーダイクォークが最も軽いとの示唆を得た。

さらに、4 点関数の計算も現在進めており、HAL QCD 法を用いてハドロ人間ポテンシャルの密度依存性について、

結果をまとめている。

5. 今後の計画・展望

今後は、まずここまでの質量スペクトルの密度依存性の結果をまとめる。また、すでにある程度結果を得ている、低密度のハドロン相での HAL QCD 法の結果の計算結果をまとめ、世界で初めて有限化学ポテンシャル領域でのハドロン間力についての計算法の提案を行う。

また、同時進行で配位生成を進め、より詳細な密度依存性を精査する予定である。さらに、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しその物性を解き明かすのが最終目標である。

2022年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

(1)

Probing hadron mass spectrum in dense two-color QCD with linear sigma model

Daiki Suenaga, Kotaro Murakami, Etsuko Itou, and Kei Iida

arXiv:2211.01789

PRD に受理

(2)

Kei Iida and Etsuko Itou:

Velocity of sound beyond the high-density relativistic limit from lattice simulation of dense two-color QCD

arXiv: 2207.01253

Progress of Theoretical and Experimental Physics 2022, 111B01 (2022).

(3)

“Attractive $N-\phi$ interaction and two-pion tail from lattice QCD near physical point”

Y. Lyu, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, J. Meng, K. Sasaki and T. Sugiura

Phys. Rev. D 106, 074507 (2022), arXiv:2205.10544 [hep-lat].

(4)

“Optimized Two-Baryon Operators in Lattice QCD”

Y. Lyu, H. Tong, T. Sugiura, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, J. Meng and T. Miyamoto

arXiv: 2201.02782 [hep-lat],

Phys. Rev. D 105, 074512 (2022).

(preprint 版は報告済み)

【会議の予稿集】

(1)

Measurement of hadron masses in 2-color finite density QCD

Kotaro Murakami, Daiki Suenaga, Kei Iida, and Etsuko Itou

arXiv:2211.13472

PoS LATTICE2022 (2023) 154

(2)

Bump of sound velocity in dense 2-color QCD

Etsuko Itou and Kei Iida

arXiv:2210.14385

PoS LATTICE2022 (2023) 151

(3)

“Finite volume analysis on systematics of the derivative expansion in HAL QCD method”

T. Doi, Y. Lyu, H. Tong, T. Sugiura, S. Aoki, T. Hatsuda, J. Meng and T. Miyamoto

arXiv:2112.04997 [hep-lat],
PoS LATTICE2021, 564 (2022).
(preprint 版は報告済み)

(4)

“Most charming dibaryon near unitarity”

Y. Lyu, H. Tong, T. Sugiura, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, J. Meng and T. Miyamoto
arXiv:2112.01682 [hep-lat],
PoS LATTICE2021, 606 (2022).
(preprint 版は報告済み)

(5)

“Emergence of the rho resonance from the HAL QCD potential”

Y. Akahoshi, S. Aoki and T. Doi
arXiv:2111.15138 [hep-lat],
PoS LATTICE2021, 625 (2022).
(preprint 版は報告済み)

(6)

“Nuclear force with LapH smearing”

T. Sugiura, Y. Akahoshi, T. Aoyama, T. M. Doi and T. Doi
arXiv:2202.12532 [hep-lat],
PoS LATTICE2021, 565 (2022).
(preprint 版は報告済み)

(7)

“Investigations of decuplet baryons from meson-baryon interactions in the HAL QCD method”

K. Murakami, Y. Akahoshi, S. Aoki and K. Sasaki
arXiv:2111.15563 [hep-lat]
PoS LATTICE2021, 345 (2022).
(preprint 版は報告済み)

(8)

“HAL QCD potentials with non-zero total momentum and an application to the $I=2$ $\pi\pi$ scattering”

S. Aoki and Y. Akahoshi
arXiv:2112.00929 [hep-lat],
PoS LATTICE2021, 546 (2022).
(preprint 版は報告済み)

【口頭発表】

(1) 東京大学福嶋研究室セミナーで講演(伊藤)

2022年度 利用報告書

タイトル “Sound velocity beyond the High-Density Relativistic Limit from Lattice Simulation of Dense Two-Color QCD”

2022年10月28日 東京大学(本郷キャンパス)

(2) KEK 理論センターセミナーで講演(伊藤)

タイトル “Sound velocity beyond the High-Density Relativistic Limit from Lattice Simulation of Dense Two-Color QCD”

2022年10月11日 オンライン

(3) 基研研究会「熱場の量子論とその応用」で口頭発表(伊藤)

タイトル「有限密度2カラーQCD 第一原理計算による音速のピークについて」

2022年9月22日 京都大学 基礎物理学研究所

(4) 日本物理学会 2022年秋季大会で口頭発表(伊藤)

タイトル「有限密度2カラーQCDの第一原理計算で見る音速のピーク」

2022年9月8日 オンライン

(5) 日本物理学会 2022年秋季大会で口頭発表(村上)

タイトル「有限密度2カラーQCDのハドロン質量の測定」

2022年9月8日 岡山理科大(岡山キャンパス)

(6) The 9th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP2022) で招待講演(伊藤)

タイトル “Sound velocity beyond the High-Density Relativistic Limit from Lattice Simulation of Dense Two-Color QCD”

2022年9月6日 オンライン

(7) The 39th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) で口頭発表(村上)

タイトル “Measurement of hadron masses in 2-color finite density QCD”

2022年8月11日 Hoersaalzentrum Poppelsdorf (Bonn, Germany)

(8) The 39th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) で口頭発表(伊藤)

タイトル “Bump of sound velocity in dense 2-color QCD”

2022年8月11日 Hoersaalzentrum Poppelsdorf (Bonn, Germany)

(9) “ $p\Omega$ and $\Lambda \Xi$: experimental and theoretical overview”

T. Doi and G. Mantzaridis

Invited Talk given at workshop on Femtoscopy in high-energy collisions at ALICE (FemTUM 2022), Munich, Germany / online, Aug. 31 – Sep. 2, 2022.

(10) “Nuclear Physics from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15)”, Seoul, Korea / online, Aug. 21–26, 2022.

(11) “Lattice QCD study of hadron interactions with strangeness”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

2022 年度 利用報告書

Invited Talk given at “14th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2022)”, Prague, Czech / online, Jun. 27 – Jul. 1, 2022.