

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和2（2020）年度 中間評価用〕

平成30年度採択分
令和2年3月31日現在

クォークから中性子星へ：QCDの挑戦

From Quarks to Neutron Stars: Challenges in QCD

課題番号：18H05236

初田 哲男（HATSUDA, TETSUO）

理化学研究所・数理創造プログラム・プログラムディレクター



研究の概要（4行以内）

中性子星内部における高密度バリオン物質の標準状態方程式を、格子上の量子色力学(QCD)に基づくバリオン間相互作用の第一原理計算と精密量子多体計算を組み合わせることで構築し、クォークから中性子星をQCDで繋ぐ。

研究分野：素粒子・原子核・宇宙物理学（理論）

キーワード：中性子星、格子量子色力学、バリオン間相互作用、高密度状態方程式

1. 研究開始当初の背景

「高密度バリオン物質と中性子星の構造解明」は、21世紀の原子核物理学における最重要課題の一つであり、素粒子・宇宙の基本問題とも密接に関係している。核子同士に働く二体核力や三体核力は、短距離で強い斥力となることで実在する中性子星がブラックホールに重力崩壊することを防ぐと考えられているが、そのような短距離力の記述はこれまで現象論に留まっていた。高密度の中性子星中心部に出現すると予想されるハイペロンについても、その相互作用は現象論に留まっていた。これらの問題を解決するため、基礎理論であるQCD（量子色力学）に基づいてバリオン間相互作用を導出する本格的な研究が、本研究代表者らのHAL QCD共同研究グループで開始されている。観測面では、中性子星合体からの重力波観測（GW170817）、X線観測による中性子星半径の測定が近年報告されており、基礎理論の進展と新たな観測がタイミングよく交差しつつある。

2. 研究の目的

中性子星の質量・半径・潮汐変形などを中性子星の内部構造の情報に結びつけるには、高密度バリオン物質の状態方程式を微視的に導出する必要がある。本基盤研究では、核子やハイペロンの相互作用に関する格子QCD計算を推進し、それをもとにゼロ温度および有限温度の状態方程式の構築を行う。得られた状態方程式は、数値テーブル化し公開することで、連星中性子星の合体事象の解析への応用を促す。さらに超高密度でのクォーク相を

現象論的に考慮した数値テーブルを公開し、クォーク物質が重力波形に及ぼす影響の研究を促進する。

3. 研究の方法

2020年度までは主として京コンピュータで生成された大規模格子QCD配位の数値解析、2021年度以降は主として富岳コンピュータを用いた大規模格子QCD計算とその数値解析を行い、バリオン間相互作用の導出を行う。高密度状態方程式の構築についてはハイペロンの結合チャンネルを考慮したクラスター変分法の定式化、現象論的バリオン間力や格子QCDバリオン間力を用いた高密度状態方程式の構築、クォーク物質の混在を考慮した超高密度状態方程式の構築を行う。

4. これまでの成果

京コンピュータで生成した物理点近傍($m_\pi=146\text{MeV}$)の(2+1)-flavorゲージ配位を用いたバリオン間相互作用の解析を行った。 $S=-2$ に関する主要結果は、(i) $\Lambda\Lambda$ 相互作用は低エネルギーで弱い引力を持つこと、(ii) T (アイソスピン)1重項の $N\Xi$ 相互作用は低エネルギーで強い引力を持つこと、(iii) 両チャンネルの結合は短距離でのみ働くこと、とまとめられる(図1)[1]。 $S=-3$ については、 $\text{spin}=2$ の $N\Omega$ 状態に約2MeVの弱い束縛状態が存在する可能性を示した[5]。これらの結果は、HAL QCD法の理論基盤の確立[4]と相俟ってQCDの第一原理計算から $S=-2, -3$ のハイペロン相互作用の正体を世界で初めて明らかにしたという意義を持つ。

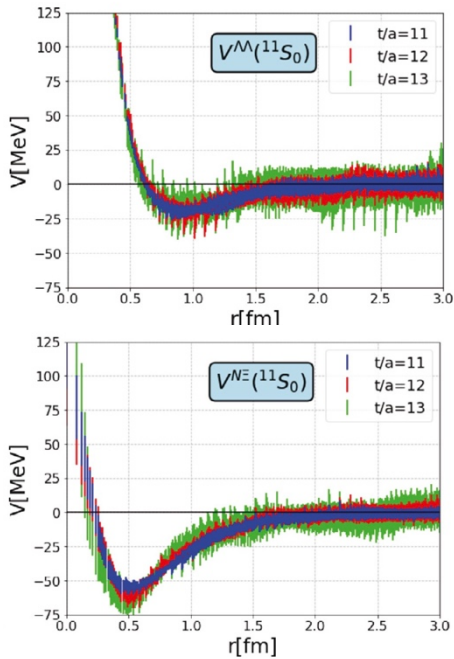


図1:アイソスピン・スピン1重項のs波ポテンシャル。
(上) $\Lambda\Lambda$ (下) $N\Xi$ 。対角成分のみ表示。

[1]の結果を用いて、 Ξ ハイパー核の厳密計算を行い、 $NNN\Xi$ の4体系に浅い束縛状態(約0.36MeVの結合エネルギー)が出現することを明らかにした[2]。また、論文[1]の結果は、 $\Lambda\Lambda$ 閾値以下のHダイバリオン存在を否定するものであり、30年以上にわたるHダイバリオン問題に終止符を打った。さらに、[1][5]の結果を検証すべく、ppおよびpA衝突におけるバリオン対運動量相関の測定がLHC-ALICE検出器を用いて行われている。

クォーク物質が中性子星の性質(半径、質量、潮汐変形率)に与える効果を考察した。クォーク物質がカラー超伝導かつ強相関するような硬い状態方程式の場合には、ハドロン相との滑らかなクロスオーバーが可能となり、最大質量が太陽質量の2倍程度で、半径が11.5km程度の比較的小さな半径を持ち、重力波観測波形とも矛盾しない潮汐変形率を持つ中性子星が実現可能であることを示した[3]。さらに、この状態方程式の数値テーブルをCompOSEデータベースに登録し[6]、数値相対論や中性子星構造計算に供した。

5. 今後の計画

2020年度

- 京コンピュータで生成したゲージ配位を用いた $S=-1$ のバリオン間相互作用を集中的に解析し、 ΛN および ΣN の結合チャンネルハイペロンポテンシャルを導く。
- 格子データから角運動量成分を正確に抜き出すためのMisner法を、上記 $S=-1$ のバリオン間相互作用に適用する。
- 高精度計算のためのLapHアルゴリズムのベンチマークテストをs/p/d波で行う。
- 結合チャンネルクラスター変分法の理論

を完成させ、ハイペロンポテンシャルを用いたテスト計算を行う。

- 格子QCDポテンシャルとブルックナー理論を用いて、高密度媒質中での Λ および Σ の1粒子ポテンシャルを導出する。
- ハドロン-クォーククロスオーバー型状態方程式を有限温度に拡張し、数値テーブルをCompOSEに登録する。

2021-2022年度

2021年に稼働を予定している富岳コンピュータを用いた物理点(パイオン質量135MeV)かつ大体積でのゲージ配位生成を行い、前年度までの理論的準備をもとに、主として $S=0, -1, S=-2$ のバリオン二体系について、s/p/d波の格子QCDポテンシャルを求める。バリオン三体相互作用については、中性子星の内部構造に関して特に重要となる、 $NNN, \Lambda NN, \Sigma NN$ のチャンネルに焦点をあてた計算を行う。結合チャンネルクラスター変分法を用いて、これらのバリオン間相互作用をインプットにした一様バリオン物質の状態方程式を構築する。さらにThomas-Fermi計算により一様相の状態方程式を低密度非一様相へと拡張すると同時に、クロスオーバー接続法により一様相の状態方程式を高密度クォーク相へと拡張する。これにより、広範囲の密度、温度、粒子混在度に対する熱力学量を完備した数値テーブルを完成させ、国内外の研究者に向けた公開を行う。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, K. Murano, T. Miyamoto, [HAL QCD Collaboration], Nucl. Phys. **A98**, 121737 (2020).
- E. Hiyama, K. Sasaki, T. Miyamoto, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Yamamoto and T. A. Rijken, Phys. Rev. Lett. **124**, 092501 (2020).
- G. Baym, S. Furusawa, T. Hatsuda, T. Kojo & H. Togashi, The Astro. Journal **885**, 42 (2019).
- T. Iritani, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, H. Nemura, & K. Sasaki, [HAL QCD Collaboration], JHEP **1903**, 007 (2019).
- T. Iritani, S. Aoki, T. Doi, F. Etminan, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, T. Miyamoto, K. Sasaki, [HAL QCD Collaboration], Phys. Lett. **B 792**, 284-289 (2019).
- QHC19(Quark-Hadron Crossover 2019) <https://compose.obspm.fr/eos/140/>
- ホームページ等 <https://ithems.riken.jp/>