

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340047

研究課題名(和文) 格子量子色力学による核力の研究

研究課題名(英文) Research on Nuclear Force from Lattice QCD

研究代表者

青木 慎也 (AOKI SINYA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号：30192454

研究成果の概要(和文)：この研究課題で得られた主な成果は以下である。(1) 波動関数からポテンシャルを計算する方法の定式化を理論的に構築した。(2) テンソル力を計算する方法を考案し、格子 QCD の計算で実際にテンソルポテンシャルを得た。(3) 力学的寄与を含んだ格子 QCD でポテンシャルを計算した。(4) 斥力芯の起源を解析的に明らかにした。(5) ハイペロンと核子間のポテンシャルを計算した。(6) フレーバーSU(3)極限でバリオン間ポテンシャルを計算し、そのフレーバー表現依存性を明らかにした。(7) フレーバーSU(3)極限で、H-ダイバリオンの束縛状態が存在する事を示した。

研究成果の概要(英文)：Main results of this research project are as follows. (1) We have theoretically formulated a method to calculate potentials from wave functions. (2) We have proposed a method to extract the tensor force and have calculate the tensor potential in lattice QCD. (3) We have calculated nuclear potentials in full QCD simulations. (4) We have analytically investigated the origin of the repulsive core. (5) We have calculated hyperon-nucleon potentials in lattice QCD. (6) We have investigated dependences of baryon-baryon potentials on flavor representations in the flavor SU(3) symmetric limit of lattice QCD. (7) We have shown an existence of an H-dibaryon in the flavor SU(3) symmetric limit of lattice QCD.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2009年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2010年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：(A)素粒子(理論)

## 1. 研究開始当初の背景

1935年に湯川博士は、仮想的な粒子である $\pi$ 中間子を導入して、陽子と中性子を原子核内に閉じ込める力である「核力」研究の端緒を開いた。それ以来、低エネルギーでの核子-核子散乱の相互作用をより詳細に理解

しようとする多くの理論的研究が行われてきており、核子間ポテンシャルの性質が分かってくる。核子間ポテンシャルは3つの特徴的な性質を持っている。核子間の距離が2fm以上の長距離では相対的に弱い引力が見られるが、理論的には湯川博士の提唱したパイ

中間子1つの交換によるものとして説明できる。1fmから2fm程度の中間的な距離では引力がより強くなるが、これはパイ中間子2つの交換や、 $\rho$ 、 $\omega$ 、 $\sigma$ などの $\pi$ より重い中間子の交換で説明されると考えられている。1fm以下の近距離では引力とは逆に距離が小さくなるとともにどんどん強くなる斥力が現れ、斥力芯と呼ばれている。斥力芯は原子核が潰れてしまわないという原子核の安定性を説明するだけでなく、中性子星の最大質量の決定や超新星爆発を引き起こすなど重要な役割を担っている。斥力芯の起源は核子の構成要素であるクォークやグルーオンの力学的性質と密接に関係しているはずであるが、その複雑さのために、長い間、原子核物理学の最も基本的な未解決問題の1つとして残っていた。格子QCDはクォークやグルーオンの力学である強い相互作用を非摂動的に取り扱える優れた方法であるが、核力の複雑さやその定義の難しさから、今まで格子QCDで核力ポテンシャルを計算することは出来なかった。研究代表者らのグループは、パイ中間子の散乱長の新しい計算法として提唱された「波動関数による相互作用の計算」を核力に応用し、格子QCDによる核力ポテンシャルの計算を試み成功した。その結果は、遠方での $\pi$ 中間子の交換による湯川ポテンシャルを再現しただけでなく、中距離での引力や近距離での強い斥力（斥力芯）という特徴も示している。この結果は、クォークの対生成消滅を無視したクエンチ近似の計算であり、また、 $\pi$ 中間子の質量も実験値よりかなり重い場合であるが、核力ポテンシャルの定性的な性質を再現した世界初の計算である。この研究結果を基盤に、格子QCDによる核力研究を組織的かつ大規模に進めることを計画したのが本研究である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、格子量子色力学(格子QCD)の数値計算の方法を用いて、陽子や中性子等の核子間に働く力である核力を詳細に研究することである。また、核子だけでなく、 $\Lambda$ 粒子などのストレンジクォークを含んだ粒子であるハイペロンと核子、あるいは、ハイペロン同士、に働く力も同様の方法で解析し、重粒子(バリオン)間に働く力をQCDから統一的に理解することも研究網的である。より具体的な目的は以下の通りであった。(1)波動関数を使ってポテンシャルを求める方法の妥当性を理論的に確立する。波動関数からポテンシャルを求める方法はそのエネルギー依存性や演算子依存性などの不定性があるが、その問題を解決する方向性は分かっているので、本研究でその考えをさらに精密化し、ポテンシャルを不定性なしに決定する具体的方法を確立する。(2)力学的クォー

ク質量の寄与を含んだ格子QCDで核力ポテンシャルを求め、力学的クォークがポテンシャルに与える影響を明らかにする。特に、クォーク質量依存性を詳細に調べ、実験で得られたポテンシャルとの定量的な比較をすることを旨とする。(3)S波スピン3重項の2核子の束縛状態として重陽子が存在するので、束縛状態がある場合の波動関数とそこから求まるポテンシャルの性質を明らかにする。

(4)S波状態から求めた中心力ポテンシャルだけでなく、P波やD波などいろいろな軌道角運動量状態に計算を拡張し、テンソル力等を求める。(5)核子間ポテンシャルだけでなく、ハイペロンと核子、ハイペロン間のポテンシャルも同じ方法を用いて計算し、その性質を明らかにする。

## 3. 研究の方法

本計画では主に格子QCDの数値シミュレーションを使って研究を進めていく。また、理論的な解析も必要に応じて行う。具体的な研究方法は以下の通りである。(1)理論的な研究方法。波動関数を用いた方法の妥当性・拡張性や核力を一般化してバリオン間に拡張した場合の相互作用の構造等を理論的な方法で研究する。また、斥力芯の起源等も理論的な方法で解析することを検討する。(2)波動関数からポテンシャルを求める方法を精密化することで研究を進める。特に力学的クォークを含んだ格子QCDのゲージ配位を用いて計算を行い、ポテンシャルのクォーク質量依存性等を評価する。(3)いろいろな量子数のポテンシャルを数値的に求める方法を検討し、その方法を用いて、テンソル力などを計算する。(4)ストレンジクォークという自由度を新たに取り入れたシミュレーションを行い、ハイペロンを含んだ相互作用の研究を行う。

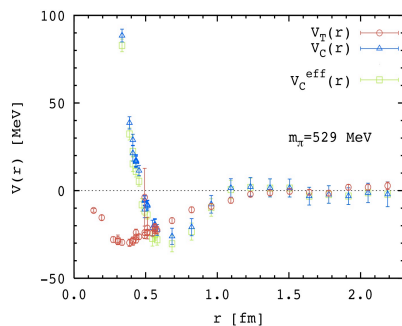
## 4. 研究成果

本研究では多くの成果が得られたが、その主なものは以下のようにまとめられる。

- ① ポテンシャル法の理論的整備:波動関数を用いて、(格子)QCDからポテンシャルを求める方法を理論的に考察し、その手順や理論的基盤、注意点などを明らかにした。これにより、この方法を用いて、ハドロン間の相互作用をQCDで計算する一般的な枠組みが理論的に完成した(原著論文6、9)。我々のこの枠組みでは、得られるポテンシャルは波動関数の持つエネルギーには依存しないが、座標に関して非局所的になるので、微分展開をしてその初項として局所ポテンシャルを求めている。この展開が機能するためには非局所性が小さいことが必要であるが、数値計算で調べてみると非局所性は非常に小さい事が分かった(原著論文1、10、15、23)。

- ② テンソルポテンシャルの計算: これまでは中心力ポテンシャルのみを計算していたが、微分展開の初項には、テンソルポテンシャルも存在する。波動関数からテンソルポテンシャルを導く方法を提案し、実際の格子 QCD 計算でテンソルポテンシャルを求めた。図 1 にあるように中心力ポテンシャル (青三角) とは異なり、テンソルポテンシャル (赤丸) には斥力芯が存在しなかった (原著論文 6. 2 1)。また、緑四角はテンソルポテンシャルが無いと思って求めた有効中心力ポテンシャルである。

図 1 : テンソルポテンシャル

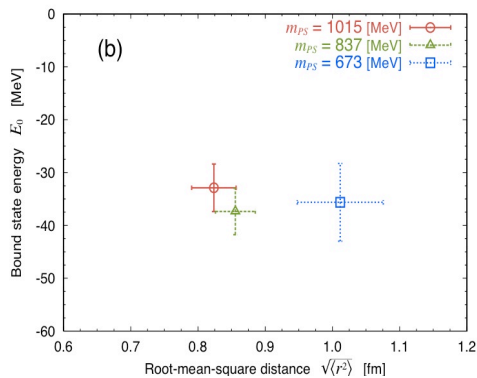


- ③ 力学的クォークの寄与を含んだポテンシャル: 今までの計算はクエンチ近似であったが、本研究では、力学的クォークの寄与を含んだ 2+1 フレーバー格子 QCD で生成されたゲージ配位を使って核力ポテンシャルを計算した。クエンチ近似の結果と比べると、引力も斥力芯も大きくなるという結果が得られた (原著論文 2 1)。
- ④ 斥力芯の起源の解析的考察: 演算子積展開、繰り込み群、摂動展開という解析的方法を用いて、ポテンシャルの近距離での振る舞いを示した。2 フレーバーの場合は、中心力に斥力芯が存在し、一方、テンソル力には斥力芯が存在しない、ということが示された (原著論文 5、1 6)。また、3 フレーバーの場合は、斥力芯ではなく、引力芯のあるチャンネルが存在する事も分かった (原著論文 3)。
- ⑤ ハイペロン-核子間ポテンシャル: ストレンジクォークを含むバリオンをハイペロンと呼ぶが、本研究では、ハイペロンと核子の間の相互作用をポテンシャルにより調べた。まず、ストレンジクォークを 2 つ含む  $\Xi$  粒子と核子間のポテンシャルをクエンチ近似で計算した。中遠距離での引力と斥力芯という構造は核子間ポテンシャルとほとんど変わら

ないが、核力ポテンシャルと比べて、スピン依存性が大きく質量依存性が小さいという結果を得た (原著論文 7)。次に、ストレンジクォークを 1 つ含む  $\Lambda$  粒子と核子間のポテンシャルをクエンチ QCD と 2+1 フレーバー QCD の両方の場合に計算した。やはり、中遠距離での引力と斥力芯という構造を持つポテンシャルが得られた。クエンチと 2+1 フレーバーを比べると、後者の方が引力も斥力も大きくなったが、どちらの場合も低エネルギーでは、全体で引力になった (原著論文 2 2)。

- ⑥ フレーバー SU(3) 極限でのポテンシャル: ストレンジクォークの寄与をより見やすくするために、アップ、ダウンクォークとストレンジクォークの質量が等しいというフレーバー SU(3) の極限でバリオン間のポテンシャルを計算した。この場合は、バリオン間ポテンシャルには SU(3) の 27 重項、2 つの 8 重項、10 重項、反 10 重項、1 重項の 6 つの異なるチャンネルが存在する。チャンネルによって斥力や引力の大きさに違いが出たが、特に 1 重項は斥力がなく引力のみで、かつ近距離では引力が大きくなる引力芯を持つという特徴的な振る舞いを示した (原著論文 4)。
- ⑦ フレーバー SU(3) 極限での H ダイバリオン: ⑥ で述べたようにフレーバー SU(3) 極限での 1 重項ポテンシャルは引力のみなので、束縛状態を作る可能性がある。このチャンネルの束縛状態は H ダイバリオンと呼ばれ、以前からクォーク模型によりその存在が予言されたが、実験的にも、格子 QCD 計算でも H ダイバリオンは見つかっていなかった。本研究では、SU(3) 極限での格子 QCD 計算をさらに進めて H ダイバリオン存在の可能性を探った。まず、体積を変えた計算を行った結果、1 辺が 3 fm あれば、1 重項ポテンシャルに対する有限サイズ効果がほとんどないことが分かった。そのポテンシャルを用いて無限体積でのシュレディンガー方程式を解いた結果、ただ 1 つの束縛状態、H ダイバリオンが存在する事が分かった。その束縛エネルギーは  $-30 \sim -40$  MeV であり、調べた範囲ではクォーク質量依存性は小さかった。 (原著論文 2)。
- 図 2 は、縦軸に計算された H ダイバリオンの束縛エネルギー (MeV 単位)、横軸には 2 つのバリオン間の平均距離 (fm 単位) を書いたものである。色の違いは擬スカラー中間子の質量の違いに対応している。フレーバー SU(3) 極限の計算ではあるが H ダイバリオンの存在を

図 2 : H ダイバリオンの束縛エネルギー



曖昧さ無く示したのは世界で初めてである。今後、フレーバーSU(3)対称性が破れた現実世界でのHダイバリオンの性質を調べることにより、実験によるHダイバリオンの発見に繋がるかもしれない。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 23 件)

### A. 原著論文 (査読有)

1. K. Murano, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Nucleon-Nucleon Potential and its Non-locality in Lattice QCD, to appear in Prog. Theoretical. Phys. 125.
2. T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, Takumi Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki (HAL QCD Collaboration), Bound H-dibaryon in Flavor r SU(3) Limit of Lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 106(2011) 162002.
3. S. Aoki, J. Balog, P. Weisz, Operator product expansion and the short distance behavior of 3-flavor baryon potentials, JHEP09(2010)083.
4. T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki (HAL QCD collaboration), Baryon-Baryon Interactions in the Flavor SU(3) Limit from Full QCD Simulations on the Lattice, Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 592.
5. S. Aoki, J. Balog, P. Weisz, Application of the operator product expansion to the short distance behavior of nuclear potentials, JHEP 05 (2010) 008.
6. S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched

Lattice QCD Simulations, Prog. Theor. Phys. 123 (2010) 89-128 (arXiv:0909.5585).

7. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Hyperon-nucleon force from lattice QCD, Physics Letters B673 (2009) 136-141.

8. S. Aoki, J. Balog and P. Weisz, Bethe-Salpeter wave functions in integrable models, Progress of Theoretical Physics 121 (2009) 1003-1034.

9. S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, The Nuclear Force from Monte Carlo Simulations of Lattice Quantum Chromodynamics, Comput. Sci. Disc. 1 (2008) 015009.

### B. 会議録

10. K. Murano, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Non-locality of the nucleon-nucleon potential from Lattice QCD, PoS (Lattice2010) 150.

11. S. Aoki, Recent progress on nuclear potentials from lattice QCD, PoS(ICHEP2010) 362.

12. S. Aoki (for HAL QCD Collaboration), Baryon-Baryon interactions from lattice QCD, Chinese Physics C 34 No.9 (2010) 1236-1240.

13. S. Aoki (for HAL QCD Collaboration), Baryon Interactions from Lattice QCD, AIP Conference Proceedings Vol. 1235 (2010), 16-22.

14. S. Aoki, Lattice QCD and Nuclear Physics, LES HOUCHES SUMMER SCHOOL: SESSION 93: MODERN PERSPECTIVES IN LATTICE QCD: QUANTUM FIELD THEORY AND HIGH PERFORMANCE COMPUTING, 3-28 Aug 2009, Les Houches, France.

15. K. Murano, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Energy dependence of nucleon-nucleon potentials in lattice QCD, PoS LATTICE2009 (2009)126.

16. S. Aoki, J. Balog and P. Weisz, The repulsive core of the NN potential and the operator product expansion, PoS(LAT2009)132.

17. S. Aoki, From Quarks to Nuclei: Challenges of Lattice QCD, Nucl. Phys. B(Proc. Suppl.)195 (2009) 281-287.

18. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Lattice QCD simulation of hyperon-nucleon potential, Mod. Phys. Lett. A23:2285-2288, 2008.

19. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Lattice QCD calculation of nuclear forces, Mod. Phys. Lett. A23:2281-2284, 2008.

20. T. Hatsuda, S. Aoki, N. Ishii, H. Nemura, From lattice QCD to nuclear force, Mod. Phys. Lett. A23:2265-2272, 2008.

21. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, for PACS-CS Collaboration, Nuclear forces from quenched and  $N_f=2+1$  full QCD using the PACS-CS gauge configurations, PoS LAT2008 (2008) 155.
22. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, for PACS-CS Collaboration, Lambda-nucleon force from lattice QCD, PoS LAT2008 (2008) 156.
23. S. Aoki, J. Balog, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, P. Weisz, Energy dependence of nucleon-nucleon potentials, PoS LAT2008 (2008) 152.

[学会発表] (計 11 件)

1. S. AOKI, Energy dependence of nucleon-nucleon potentials, The XXVIth International Symposium on Lattice Field Theory (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008).
2. S. Aoki, Fundamental challenge of QCD, 47. Internationale Universit aetswochen fuer Theoretical Physik Schladming, Stria, Austria, 28 February - 7 March, 2009.
3. S. Aoki, Baryon interaction from Lattice QCD, The miniworkshop `Light Quark Masses and Hadron Physics (From quarks to life), Universidad Complutense de Madrid, Spain, 2-5 June, 2009.
4. S. Aoki, Nuclear Forces from Lattice QCD KITPC Program "Lattice Quantum Chromodynamics", KITPC@CAS, Beijing, China, July 6-25, 2009.
5. S. Aoki, Repulsive core of the NN potential and operator product expansion, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory, Peking University, Beijing, China, July 25-31, 2009.
6. S. Aoki, Baryon-Baryon-Interaction from Lattice QCD, The 5-th International Conference on Quark and Nuclear Physics, Beijing, September 21-26, 2009.
7. S. Aoki, Baryon Interactions from Lattice QCD, The 7-th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, November 9-13, 2009.
8. S. Aoki, The repulsive core of the nucleon-nucleon potentials and the operator product expansion, 2009 Taipei Workshop on Lattice QCD, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, December 13-15 2009.
9. S. Aoki, A challenge in lattice QCD, Conference on Computational Physics 2009, Kaohsiung, Taiwan, December 15-19, 2009.
10. S. Aoki, Hadron-Hadron Interactions

from lattice QCD, Elba XI Workshop `Electron-Nucleus Scattering XI, Elba, Italy, June 21-25, 2010.

11. S. Aoki, Recent progress on nuclear potentials from lattice QCD, 35th International Conference on High Energy Physics (ICHEP), July 22-28, 2010, Paris, France.

[その他]

受賞

1. 青木慎也「格子 QCD の相構造の解明とクォークと核力の研究」第 25 回 井上學術賞 (2009 年 2 月 4 日).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青木 慎也 (AOKI SINYA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号：30192455

### (2) 研究分担者

石井 理修 (ISHII NORIYOSHI)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：40360490

(H20年度、H21-H22 連携研究者)

### (3) 連携研究者

初田 哲男 (HATSUDA TETSUO)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号：20192700

根村 英克 (NEMURA HIDEKATSU)

独立行政法人理化学研究所・岩崎先端中間子

研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：80391738