

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：52301
 研究種目：若手B
 研究期間：2009 年度～2011 年度
 課題番号：21740181
 研究課題名（和文） 格子 QCD によるハドロン物理学の研究

研究課題名（英文） Lattice QCD study of hadron physics

研究代表者

高橋 徹 (TAKAHASHI TORU)

群馬工業高等専門学校・一般教科（自然科学）・講師

研究者番号：70467405

研究成果の概要（和文）：原子核・ハドロンの系を支配する強い相互作用の第一原理計算である格子量子色力学（格子 QCD）計算を用いて、ハドロンの諸性質やそれらのダイナミクスの研究を行った。その結果、物質の構造に直結するフレーバー 8 重項のメソン・バリオン結合定数の定量的評価に成功した。また、カラー SU(2) の系において、ハドロン間相互作用を詳細に研究し、数々の新しい知見を得ることに成功した。

研究成果の概要（英文）：We studied hadron systems with lattice QCD, which is one of the most reliable methods for the study of strong interactions. We determined the flavor-octet meson-baryon coupling constants for the first time. We also investigated hadron-hadron scatterings using color-SU(2) QCD and found several novel properties in hadronic interactions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：原子核・ハドロン物理学

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：原子核理論，格子 QCD，ストレンジクォーク，メソン・バリオン結合定数

1. 研究開始当初の背景

世の中の構成要素である、陽子・中性子・中間子など、強い相互作用にしたがう原子核・ハドロンの系は、より基礎的な理論、量子色力学 (QCD) によって支配されていることがわかっている。QCD は簡潔なラグランジアンで記述される SU(3) 非可換ゲージ理論であるが、そのダイナミクスは QCD の持つ強結合性により非常に複雑・多彩なものとなっている。QCD の持つ多彩な非摂動効果は、真空の双対超伝導描像などの概念を生み出

し、物性物理など他分野との関連も深く、それ自体大変興味深い対象である。しかしながら、数多くの未解決な問題を残しており、精力的に研究が進められていた。これらハドロンの系を解析するのに有効な第一原理計算として格子 QCD 計算が挙げられる。申請者は格子 QCD 計算を用いてハドロンの系の性質の研究に着手した。

2. 研究の目的

「メソン・バリオン間結合定数の研究」

バリオンは我々の世界の構成要素であり、メソンはメソン交換ポテンシャルにより、バリオン間の相互作用を担っている。メソン・バリオン結合定数の研究は、星内部の構造や、ブラックホール形成プロセスに、直接（基礎理論である）QCDから示唆を与えることができ、各種モデル計算のインプットとしても重要である。通常、モデル計算等では、フレーバーSU(3)対称性が成り立つと仮定し、結合定数間に関係式を仮定して、使用する。しかしながら、現実にはこの対称性は破れており、この関係式が成り立つかどうかは自明では無い。格子QCDを用いた研究を進めることにより、現実世界で結合定数がどのような振る舞いをしているかを、モデルに依存せず調べることができる。

「 $\Lambda(1405)$ 粒子の研究」

核子・K中間子間の引力は強いと予想されており、新たな物質の形態である、K中間子物質の予言につながった。しかしながら、K中間子と核子の相互作用を知ることは容易ではない。そこで、K中間子と核子の束縛状態と考えられている $\Lambda(1405)$ 粒子の研究することにより、K中間子・核子相互作用の性質の解明を目指した。 $\Lambda(1405)$ は単純な3つのクォークから成るバリオンではなく、K中間子と核子の分子状態（合計5つのクォークから成る）になっているとの指摘がなされており、この指摘が正しければ、 $\Lambda(1405)$ の性質を調べることで、K中間子と核子の相互作用の強さがわかり、新しい形態の物質であるK中間子物質の性質・成り立ちに重要な示唆を与えることができる。これまでの格子QCD計算を用いた $\Lambda(1405)$ の研究においては、フレーバー1重項演算子と8重項演算子を独立に解析してきた。しかしながら、現実にはフレーバーSU(3)対称性は破れており、1重項成分と8重項成分は混合する。このことを踏まえ、我々は1重項演算子と8重項演算子から相関行列を組み、対角化することにより、適切に $\Lambda(1405)$ の状態を記述し、また、その内部構造の情報を得ることを試みた。

「ハドロン間相互作用の研究」

中・遠距離におけるバリオン間相互作用は湯川秀樹の提唱した中間子交換ポテンシャルでよく記述されるが、近距離領域のダイナミクスは未知の領域であった。特に、この領域においては、クォーク・グルーオンの自由度が重要になると考えられ、QCDの観点からの研究が望まれた。近年、石井らのグループのより、格子上のBethe-Salpeter amplitudeからハドロン間ポテンシャルを逆算する方法が提唱され、実際に、近距離領域での斥力心を再現した。そこで、この手法を、より簡単なダイナミクスのカラーSU(2)の系に対し

て、格子QCD計算を用いて、ハドロン間相互作用の解明を試みた。

3. 研究の方法

強い相互作用の第一原理計算である格子QCD計算を用いて、各種演算子の真空期待値を計算することにより、ハドロンダイナミクスを解明する。

4. 研究成果

「メソン・バリオン間結合定数の研究」

星内部の構造やブラックホール形成プロセスで重要な役割を果たす、ストレンジクォークを含む8重項メソン-8重項バリオン間の結合定数を2フレーバー格子QCDを用いて、評価した。具体的なチャンネルは、 $\pi NN, \pi\Sigma\Sigma, \pi\Lambda\Sigma, K\Lambda N, K\Sigma N$ である。その結果、これら結合定数間におけるフレーバーSU(3)関係式の破れは、クォーク質量によらず非常に小さいことがわかり、フレーバーSU(3)対称性の破れは、主に、 $\alpha = F/F+D$ 比のみに現れることを初めてつきとめた。この結果は、現象論的モデルへのインプットとして有用であると考えられる。この結果はPhysical Review D誌に掲載された。

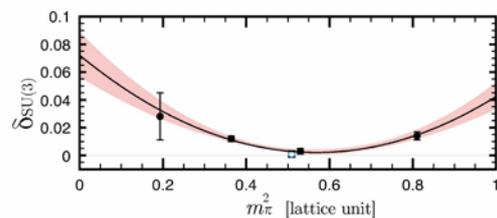


図: 格子QCDを用いて獲られたSU(3)関係式の破れの大きさ。横軸は π 中間子質量の二乗 (u, d クォークの質量に比例)。左端が現実の世界に対応する。現実世界においては、フレーバーSU(3)対称性は破れているにもかかわらず、メソン・バリオン結合定数におけるSU(3)対称性の破れは小さいことがわかった。

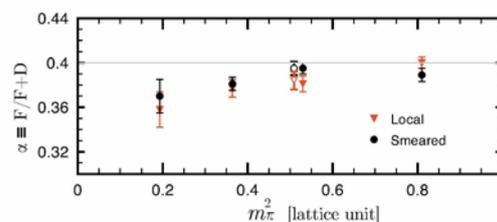
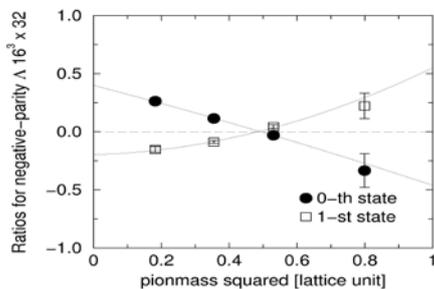


図: SU(3)対称性を特徴付けるパラメータである $\alpha = F/(F+D)$ 。SU(3)対称性の破れを大きくして、現実世界に近づけていくに従って、 α そのものは減少していくことがわかる。

「 $\Lambda(1405)$ 粒子の研究」

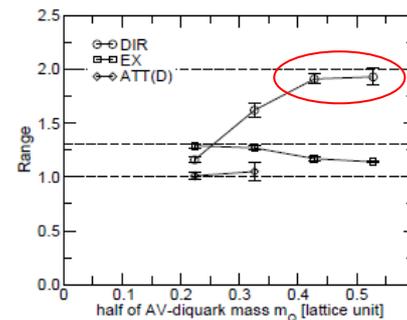
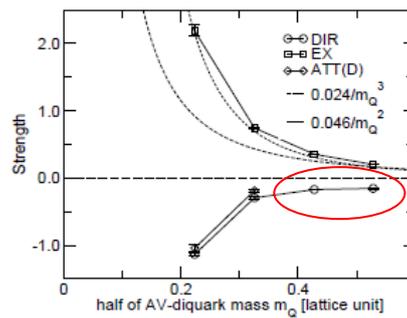
1重項演算子と8重項演算子から組んだ相関行列を対角化し、 $(S, J, P) = (-1, 1/2, -)$ のチャンネルの基底状態・第一励起状態を求めた。その結果、このチャンネルにおける基底状態は、フレーバー1重項成分が支配的であることがわかった。第一励起状態は、その逆に、8重項成分が支配的であることもわかった。この結果とSU(3)のClebsch-Gordan係数を用いることにより、これらの状態におけるメソン・バリオン成分の評価を試みた。それにより、どのような種類のメソン・バリオン分子状態とのオーバーラップが強いかを、直接QCDから評価した。この研究は現在継続中である。



図：基底（第一励起）状態における、8重項（1重項）成分の混合率。図の中央付近のSU(3)対称性が良い仮想的状況では、ゼロとなっている。現実世界に対応する左端では、混合率は、0.4以下であり、基底（第一励起）状態は、1重項（8重項）成分が支配的であることがわかる。

「ハドロン間相互作用の研究」

カラーSU(2)の系において、スカラーダイクォーク同士の散乱を調べ、それらの間のポテンシャルをBethe-Salpeter amplitudeから算出した。スカラーダイクォークは現実世界における核子に対応する。その結果、ダイクォーク間相互作用には（中間子交換以外に）、遠距離領域でのユニバーサルな引力、近距離領域での斥力が存在することを突き止めた。特に、このユニバーサルな引力は、クォーク質量などに全く依存しない純粋にグルーオンの相互作用と考えられる。また、近距離領域の斥力の振る舞いは、パウリ排除律とカラー磁気相互作用が起源とするシナリオと矛盾しないことを突き止めた。



図：格子QCD計算で得られた、各チャンネルにおける相互作用の強さと相互作用レンジを示す。横軸はクォーク質量。クォーク質量が重い領域で、強さ・レンジとも一定値に漸近してゆき、ユニバーサルな引力の存在を示唆している。

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 5 件）

1. 【査読有り】

Pseudoscalar-meson--octet-baryon coupling constants in two-flavor lattice QCD,
Güray Erkol, Makoto Oka, Toru T. Takahashi,
Physical Review D79 (2009) 74509;
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.79.074509>

2. 【査読有り】

Low-lying Lambda Baryons with spin 1/2 in Two-flavor Lattice QCD,
Toru T. Takahashi, Makoto Oka,
Physical Review D81 (2010) 34505;
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.81.034505>

3. 【査読有り】
Axial Charges of Octet Baryons in Two-flavor Lattice QCD,
Güray Erkol, Makoto Oka, Toru T. Takahashi,
Physics Letters B686 (2010) 36;
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2010.02.016>
4. 【査読有り】
Hadron-hadron interaction from SU(2) lattice QCD,
Toru T. Takahashi and Yoshiko Kanada-En'yo,
Physical Review D82 (2010) 094506;
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.82.094506>
5. 【査読有り】
Chaotic behavior in classical Yang-Mills dynamics,
Teiji Kunihiro, Berndt Muller, Akira Ohnishi, Andreas Schafer, Toru T. Takahashi, Arata Yamamoto,
Physical Review D82 (2010) 114015;
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.82.114015>

他 国際会議紀要 9 件

〔学会発表〕 (計 3 件)

1. SU(2) 格子 QCD によるハドロン相互作用の研究, 延与佳子・高橋 徹, 日本物理学会 第 65 回年次大会
2. 格子 QCD を用いたハドロン間相互作用の研究, 高橋 徹・延与佳子, 日本物理学会分科会, 2010 年 9 月 11 日
3. Hadron interactions from SU(2) lattice QCD, T. T. Takahashi and Y. Kanada-En'yo, 3rd International Conference on Hadron Physics (TROIA'11), 2011/8/23, Canakkale, Turkey

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :

権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
高橋 徹 (TAKAHASHI TORU)
群馬工業高等専門学校 一般教科 (自然)
講師
研究者番号 : 70467405

(2) 研究分担者
()

研究者番号 :

(3) 連携研究者
()

研究者番号 :