

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540284

研究課題名(和文) 格子QCDによる重いクォークを含むエキゾチックなハドロン原子核系の研究

研究課題名(英文) Exotic hadron-nuclear systems with heavy flavors in lattice QCD

研究代表者

佐々木 勝一 (Sasaki, Shoichi)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60332590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、実験によってその存在が明らかとなった重いクォークを含む新奇なハドロン原子核状態に対して、強い相互作用の基礎理論、量子色力学(QCD)に基づく統合的な理解を目指した研究を行なった。近年飛躍的にその精密化が進んでいる格子QCD計算において、1)ハドロンの内部構造を探索するのに適した新しい手法、ベータ・サルペータ振幅法の重いクォーク・反クォーク系への応用とその有用性を示すことに成功した。2)一般化した境界条件を用いた拡張された有限体積法による共鳴探索法を提案し、新奇なハドロンとして発見が報告されていたY(4140)共鳴に対して物理点での格子QCD数値計算によってその存在検証を行なった。

研究成果の概要(英文)：I would like to examine what is the nature of the newly discovered exotic mesons that include heavy flavors on the basis of the fundamental theory of the strong interaction, Quantum Chromodynamics (QCD). I then utilize lattice QCD simulations, which have been progressing with steadily increasing accuracy, to study 1) the structure of the traditional quarkonium states and 2) the possibility of narrow resonance formation near the threshold. In the former case, an application of the Bethe-Salpeter amplitude method for heavy quarkonium systems is successfully demonstrated. This approach can provide new and valuable informations. As for the latter case, I develop the Luscher finite size approach under the partially twisted boundary condition and then demonstrate the feasibility of a new approach to examine the existence of near-threshold and narrow resonance states through a study of the Y(4140) resonance in dynamical lattice QCD simulations at almost physical point.

研究分野：ハドロン物理

キーワード：量子色力学 格子ゲージ理論 ハドロン理論 エキゾチックハドロン チャーモニウム ボトモニウム

1. 研究開始当初の背景

ペンタクォーク： $\Theta^+(1540)$ や $\Xi^{*+}(1850)$ 以外にも 2002 年から昨年にかけて、マルチクォーク状態(テトラクォーク状態)の候補ではないかと思われる中間子がいくつも発見された。BaBar によって発見された $D_{s0}(2317)$ と $Y(4260)$ 、CLEO の $D_{s1}(2460)$ 、Belle の $X(3872)$ 、 $Z^+(4430)$ 、 $Z_b^+(10610)$ と $Z_b^+(10650)$ 、BESIII の $Z_c(3900)$ 、CDF の $Y(4140)$ などである。いずれもチャームクォークやボトムクォークを含む共鳴状態で、ある崩壊閾値のすぐ近傍に存在し、比較的崩壊幅が狭く、非相対論的クォークモデルでは存在が予測できなかった中間子状態である。

これらエキゾチックな中間子の発見に対する日本の実験グループ(Belle)の多大な貢献に反して、素粒子原子核間わず日本人の理論からの貢献は残念ながらほとんどない。格子 QCD の分野でもチャームクォークの取り扱いに関しては、現在利用可能な QCD ゲージ配位の紫外切断(格子間隔の逆数)がチャームクォークの質量と同程度の大きさになるため、チャームクォークの質量に由来した有限格子間隔による系統誤差の制御に難があり、こういったエキゾチックな中間子の研究は立ち遅れてきた。

2. 研究の目的

日本の素粒子原子核実験が世界をリードしてきている、エキゾチックなハドロン原子核系の物理に焦点を合わせ、近年飛躍的にその精密化が進んでいる格子 QCD 数値計算における計算科学技法を最大限活用することで、模型に依らない強い相互作用の第一原理計算からの「より高いレベルでの実験値との比較」あるいは「実験に先駆けた理論からの予言」を目指している。

3. 研究の方法

現在までに世界中の格子 QCD 研究グループにおいて、ストレンジクォークを含めた現実の世界により近い、3 種類の動的クォークの自由度(アップ、ダウン、ストレンジ)を厳密に取り扱った 2+1 フレーバー格子 QCD 数値計算がスタンダードとなりつつある。当然、そのような QCD ゲージ配位の生成は個人レベルでの研究では不可能であるが、現在格子 QCD 数値計算分野ではそれぞれの格子 QCD 研究グループの計算結果である QCD ゲージ配位データを国際的に共有するための活動、International Lattice Data Grid (ILDG) があり、ILDG を通して無償公開されたそれらの QCD ゲージ配位を個人レベルで利用可能である。本研究ではそれらの無償公開され 2+1 フレーバー QCD ゲージ配位を有効活用して研究を行なった。

ただし、現在利用可能な QCD ゲージ配位の格子間隔の逆数(紫外切断)はチャームクォークの質量と同程度の大きさになるため、重いクォーク(チャームとボトム)に対して

は、相対論的重いクォーク有効作用(RHQ)のアプローチを考える。RHQ は有限格子間隔による系統誤差をうまくコントロールすることを目的として新しく提唱された「非相対論的」重いクォーク有効作用の方法の一つで、「非相対論的」重いクォーク有効作用と違って、決定すべきパラメータが多い反面、連続極限の取り方における理論的困難が回避できることが知られている。

4. 研究成果

(1) 重いクォークコニウムの構造理解とクォーク間相互作用の研究:

これまでクォーク間ポテンシャルとしては、Wilson ループを使った、つまりクォーク質量無限大の極限においてはこれまでよく研究されてきた。クォーク質量が有限な効果については、摂動論的にクォーク質量の逆数を展開パラメーターとしてその効果が見積もられてきたが、実際にそのような展開はチャームクォークの質量近傍では破綻していると考えられるため、チャームクォークの従うクォーク間ポテンシャルが完全に理解されているとは言い難い状況であった。

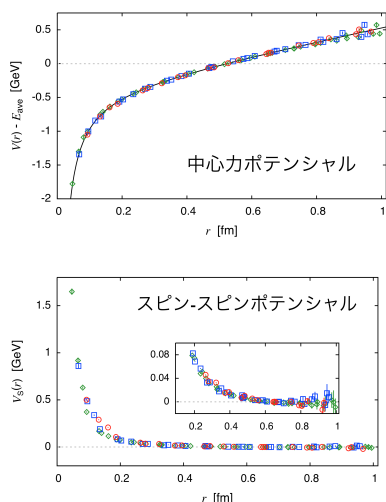
①クォーク間ポテンシャルの新しい計算方法:

本研究において、格子 QCD による核力ポテンシャルの導出で成功した:二体ハドロン間の Bethe-Salpeter 振幅からハドロン間ポテンシャルを導出する定式化をクォーク-反クォーク系(=クォークコニウム)に応用することで、有限クォーク質量においてクォーク間ポテンシャルが計算できる新しい方法の提言を行なった。この方法において特筆すべき点は、格子 QCD の第一原理計算によってクォークコニウムを構成するクォークの「運動学的な質量」をスピン状態の異なるクォークコニウム波動関数の遠方での漸近的な振る舞いの差から決定できる点である。Bethe-Salpeter 振幅法の枠内で定義されるクォークの質量を使うことで、初めてクォークコニウム波動関数が従うべきシュレーディンガー方程式が意味を持ち、その方程式を逆解きすることでクォーク間相互作用をポテンシャルとして決定できる。

②クォーク質量の無限大の極限の確認:

クォークコニウムの Bethe-Salpeter 振幅から導出できたクォーク間ポテンシャルが、クォーク質量無限大において Wilson ループの結果と自然に繋がることは自明なことではない。このクォーク質量無限大の極限をきちんと確認するために、RHQ のアプローチを駆使して、チャームクォークからボトムクォークよりもやや重い領域までの広範な有限クォーク質量のデータを系統的に解析してなめらかに Wilson ループの結果

と繋がることをクエンチ近似の格子 QCD 数値計算によって示すことに成功した。スピンに依存しない中心力ポテンシャルだけでなくスピンに依存するスピン-スピン相互作用に対応するスピンに依存するポテンシャルに対しても、クォーク質量が無限大の極限において、Wilson ループを利用して得られる静的なクォーク間ポテンシャルへの相対論的な補正項と一致することが示せた。



③離散化誤差、有限体積効果：

格子 QCD の Bethe-Salpeter 振幅法を用いた有限クォーク質量でのクォーク間ポテンシャルの導出方法について、格子間隔をゼロとなる連続極限に対する離散化誤差や、格子体積が有限なことから生じる有限体積効果に伴う誤差などの系統誤差に関して、新しい方法の信頼性を高める研究として詳細に調べた。まず、この新しい方法で定義されたクォークの質量に対しても、きちんと連続極限が存在し、それが現象論的なクォークポテンシャルモデルなどで採用されているモデルパラメータのクォーク質量の値に定量的に近い値になっていることを確認することができた。このことはクォークポテンシャルモデルに必要な全ての情報を格子 QCD の第一原理計算によって完全に決定する事が可能となったことを意味している。

④クォークポテンシャルモデルの精密化：

クエンチ近似を越えて、PACS-CS 共同研究グループによって一般公開されている 2+1 フレーバーの現実的な QCD ゲージ配位 (π 中間子が 156 MeV に相当) を活用して、物理点での格子 QCD 数値計算によりチャームoniumにおけるクォークポテンシャルモデルの精密化も試みた。新しい方法ではスピン-スピン相互作用も精度よく計算することができ、スピン-スピン以外の LS やテンソル相互作用項なども含めたスピン依存の相互作用の導出も格子 QCD 計算により可能となった。このことから、QCD の第一原理計算によりチャームoniumにおけるクォークポテンシャルモデルの精密化の道が拓いた

といえる。これらの新しい研究成果は、今後の重いクォークを含むエキゾチック中間子の研究において重要な役割を担うと期待できる。

⑤クォーク間ポテンシャルのエネルギー依存性：

格子 QCD 計算による励起状態も含めた質量スペクトル測定において 2 点関数の計算時によく使われる転送行列対角化法を Bethe-Salpeter 振幅に対応するクォーク-クォーク波動関数を計算するために必要な 4 点関数の計算にも適用した。それによって、S 波の動径励起状態 ($\eta_c(2S)$, $\psi(2S)$) である動径方向にノードを持つ 2S 状態の波動関数の計算も可能となった。その波動関数の情報から、Bethe-Salpeter 振幅法によって計算されたクォーク間ポテンシャルのエネルギー依存性が極めて小さいことを明らかにした。

これらの研究成果を総合すると、クォーク・反クォーク束縛状態内の価クォーク空間分布を反映した Bethe-Salpeter 振幅を QCD の第一原理計算によって求めれば、それを固有状態を持つ量子力学系のハミルトニアンを決定することも可能であることが具体的に示され、さらにその有効性も様々な角度で検証できた。今後、Bethe-Salpeter 振幅法をチャームクォーク+ストレンジ反クォーク系に適用することで、これまでクォークポテンシャル画像では理解する事が難しいとされてきた $D_{s0}(2317)$ や $D_{s1}(2460)$ など新たな D_s 中間子に対して、その内部構造の理解も進むものと考えている。

(2) 物理点格子 QCD 計算による重いクォークを含むエキゾチック粒子の探索：

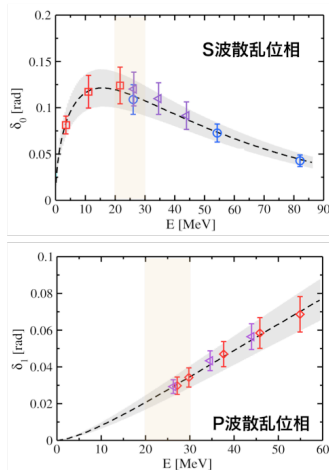
本研究では、2009 年 3 月にフェルミ国立加速器研究所において、 J/ψ 中間子と Φ 中間子の閾値近傍で発見された非常に幅の狭い $Y(4140)$ 粒子について格子 QCD 数値計算を用いてその構造理解のための研究を行なった。

特に、 J/ψ 中間子と Φ 中間子による閾値は、他のハドロン二体の閾値から比較的孤立しており、 $Y(4140)$ 粒子を J/ψ 中間子と Φ 中間子の散乱における共鳴状態として同定することが、他のエキゾチック粒子に比べて容易である。もちろん現実の実験で J/ψ 中間子と Φ 中間子の低エネルギー弾性散乱をさせることは不可能であるので、格子 QCD により J/ψ 中間子と Φ 中間子の S 波散乱、P 波散乱の散乱位相などの低エネルギーの相互作用を数値解析し、 $Y(4140)$ の $J/\psi(cc\bar{b})$ 中間子と $\Phi(ss\bar{b})$ 中間子の 2 つの異なるフレーバーのクォークoniumの共鳴状態の生成可能性を探った。

そのために、ほぼ物理点 (π 中間子が 156 MeV 相当) に対応する 2+1 フレーバーの

PACS-CS ゲージ配位を利用したフル格子 QCD 数値計算において、 J/ψ 中間子と Φ 中間子の閾値近傍における S 波と P 波散乱位相の計算を行なった。

$Y(4140)$ は閾値近傍であること、その崩壊幅が非常に狭いことから、従来のフーリエモードを利用した運動量の解析方法では $Y(4140)$ の探索は不可能(一辺が L とした L の 3 乗となる有限な体積中の運動量は $2\pi/L$ を最小単位とした不連続な値しかとれない)であったが、本研究では一般化した境界条件(ツイストされた境界条件)に着目し、閾値近傍でほぼ連続的に S 波と P 波の散乱位相の運動量依存性を調べることに成功した。



格子 QCD による第一原理計算としては、S 波、P 波とも散乱位相には J/ψ 中間子と Φ 中間子の共鳴状態の形成のシグナル(散乱位相は 90 度を越える)は確認できず、 $Y(4140)$ の存在可能性に疑問を呈する結果となった。ただし、このツイストされた境界条件を使うというアイデアは、他の閾値近傍の新奇なハドロン共鳴にも適用できるものであり、今後他のハドロン-ハドロンチャンネルを研究対象とすることで、格子 QCD の第一原理計算によるエキゾチック中間子の探索研究が可能となった。

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. T. Kawanai and S. Sasaki, "Heavy quarkonium potential from Bethe-Salpeter wave function on the lattice", *Physical Review D* **89**, 54507 (2014), 査読有り
- ②. S. Ozaki and S. Sasaki, "Lüscher's finite size method with twisted boundary conditions: an application to $J/\psi - \phi$ system to search for narrow resonance", *Physical Review D* **87**, 14506 (2013), 査読有り
- ③. S. Ozaki and S. Sasaki, "Lattice study

of $J/\psi - \phi$ scattering at low energies to search for narrow resonance", *Proceedings of Science, LATTICE2012* 160 (2012), 査読なし

- ④. T. Kawanai and S. Sasaki, "Charmonium potential from full lattice QCD", *Physical Review D* **85**, 91530 (2012), 査読有り
- ⑤. T. Kawanai and S. Sasaki, "Interquark potential with finite quark mass from lattice QCD", *Physical Review Letter* **107**, 91601 (2011), 査読有り

[学会発表] (計 10 件)

- ①. 佐々木勝一, 「格子 QCD 計算によるハイペロン β 崩壊の第二種形状因子の評価」、日本物理学会第 70 回年次会、平成 27 年 3 月 21-24 日、東京都、早稲田大学早稲田キャンパス
- ②. S. Sasaki, "Hyperon beta decays from 2+1 flavor dynamical DWF lattice QCD", 国際会議 CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (招待講演)、平成 27 年 3 月 12-13 日、茨城県つくば市、筑波大学計算科学研究センター
- ③. S. Sasaki, "Heavy quarkonium potential from Bethe-Salpeter wave function on the lattice", YITP 国際プログラム: Hadron and Hadron Interactions in QCD 2015 (招待講演)、平成 27 年 2 月 15 日-3 月 21 日、京都市、京都大学基礎物理学研究所
- ④. S. Sasaki, "Heavy quarkonium potential from lattice QCD", 第 4 回日米物理学会合同核物理分科会(招待講演)、平成 26 年 10 月 7-11 日、米国ハワイ州、ハワイ島
- ⑤. S. Sasaki, "Heavy quarkonium potential from lattice QCD", 国際会議 Hadron physics symposium (招待講演)、平成 26 年 4 月 17-19 日、愛媛県名古屋市、名古屋大学
- ⑥. S. Sasaki, "Status of semileptonic hyperon decays from lattice QCD using 2+1 flavor domain wall fermions", 国際会議 「LATTICE 2013」、平成 25 年 7 月 29 日-8 月 3 日、ドイツ・マインツ市、Gutenberg University
- ⑦. S. Sasaki, "Heavy quarkonium potential from lattice QCD", 国際会議 「Heavy Quark Hadrons at J-PARC 2012」(招待講演)、平成 24 年 6 月 22 日、東京都、東京工業大学
- ⑧. 河内太一、佐々木勝一, 「格子 QCD に基づくスピンに依存する重クォーク間ポテンシャルの研究」、日本物理学会第 67 回年次会、平成 24 年 3 月 24 日、兵庫県西宮市、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス
- ⑨. 佐々木勝一, 「格子 QCD によるクォーク

間ポテンシャルの精密化」、「素核宇融合による計算物理学の進展」研究会（招待講演）、平成 23 年 12 月 3-5 日、三重県志摩市、合歓の郷

- ⑩. 佐々木勝一、「重いクォークを含むエキゾチックなハドロン・原子核の探索に向けて」、新学術領域「素核宇融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会（招待講演）、平成 23 年 6 月 23-24 日、兵庫県神戸市、理化学研究所計算科学研究機構

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 勝一 (SASAKI SHOICHI)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：60332590

(2) 研究分担者

該当者なし

(3) 連携研究者

該当者なし