

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：53801  
研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2012～2014  
課題番号：24740176  
研究課題名(和文)非相対論的QCDに基づくクォーコニウムの研究  
  
研究課題名(英文)Research on quarkonium using nonrelativistic QCD  
  
研究代表者  
駒 佳明(Koma, Yoshiaki)  
  
沼津工業高等専門学校・教養科・准教授  
  
研究者番号：00334748  
  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：格子QCDシミュレーションにより非摂動的に計算したクォーク-反クォーク間ポテンシャルとその相対論的補正項を、有効場の理論である非相対論的QCD(pNRQCD)のインプットとして用いると、重いクォークからなるクォーコニウムを諸性質を定量的に調べることができる。我々はクエンチ近似の数値結果をpNRQCDにインプットしたときのクォーコニウムの質量スペクトルを計算を行い、また、より現実的なインプットを動的なクォークが入った場合の格子QCDシミュレーションから得るために必要なノイズ遮減法の開発研究を行った。この研究過程で得た方法の応用として3クォーク間ポテンシャルも精密計算できることを示した。

研究成果の概要(英文)：An effective theory of QCD called potential-nonrelativistic QCD (pNRQCD) enables us to investigate various properties of heavy quarkonium by inserting nonperturbative QCD inputs, such as the quark-antiquark potential and its relativistic corrections, computed by lattice QCD simulations. We investigate the mass spectra of quarkonium in pNRQCD using the lattice QCD inputs within the quenched approximation, and develop numerical methods toward accurate determination of the potential including the effect of dynamical quarks. We demonstrate that one of the methods we have found is applicable to compute the three-quark potential accurately.

研究分野：数物系科学

キーワード：素粒子論 ハドロン物理学 クォーコニウム クォーク間ポテンシャル

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子物理学において標準模型の検証、および標準模型を超える物理の探索に向けて、世界各地で重いクォーク (主にチャームとボトムクォーク) に関わる多くの実験が進行している。これらの実験から有為な情報を得るために、重いクォークの物理に対する量子色力学 (QCD) の非摂動的な寄与も含めた精密計算による予測が必要不可欠である。

(2) この目的のため、格子 QCD 数値シミュレーションと QCD から Wilson 流の繰り込み群に基づいて導かれる有効場の理論の両方を活用するという方法がある。クォークと反クォークの 2 体系に着目し、特に一つのクォークのみが重い質量を持つ場合 (D メソンや B メソンなど) を考えるのが HQET (heavy quark effective theory) であり、二つとも重い場合であるクォークコニウム ( $J/\psi$  メソンや  $\Upsilon$  メソンなど) を対象にするのが pNRQCD (potential non-relativistic QCD) である。HQET は例えば B メソン混合などから CP の破れに関係する量を計算できる点で多くの研究者の注目を集めている。一方、pNRQCD は NRQCD (non-relativistic QCD) の改良として提唱されているが、その有効利用のためには、pNRQCD のインプット変数を格子 QCD シミュレーションなどの非摂動的な方法で決定する必要がある。pNRQCD において必要な非摂動的因子、特にクォーク質量を  $m$  として  $1/m$  展開で分類される相対論的補正項を含むクォーク間ポテンシャルが分かれば、様々な量子数を持つクォークコニウムを量子力学的方法で系統的に調べることができる (図 1 に比較対象となる実験データの例を示す)。

(3) 我々はこれまでに、pNRQCD のインプットとなるクォーク間ポテンシャルの相対論的補正項を格子 QCD シミュレーションを用いて決定する研究を行っており、動的なクォークの効果を見捨てるクエンチ近似の範囲内ではこれらを非常に高い精度で決定することができた。しかし、インプットをより現実的にするために、

動的な軽いクォークの寄与が入ったシミュレーションを行い、クエンチ近似をしない場合の結果を得ることが必要である。

(4) 我々が、クォーク間ポテンシャルとその非相対論的補正項の研究を開始した 2005 年頃と比較し、近年では計算機の高速度化と低価格化が進んでいる。同時に、数値シミュレーションのアルゴリズムの進歩と International Lattice Data Grid (ILGD) に代表される共同利用環境の整備が急速に進行したので、大きな計算リソースをもたない、比較的小さな研究組織でも動的クォークの入ったシミュレーションを行うことが可能になってきている。

これらの背景をふまえ、動的な軽いクォークの寄与が入った格子 QCD シミュレーションを用いて、pNRQCD の非摂動的因子を決定するという目的で、本研究課題に取り組んだ。

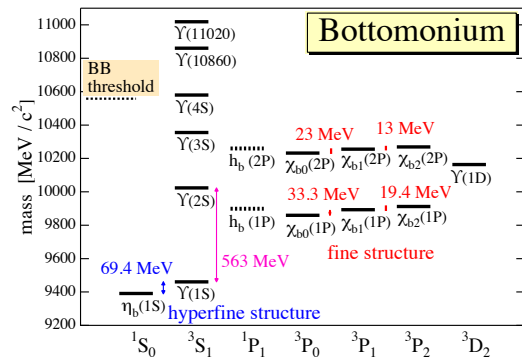


図 1: ボトムクォークとその反クォークからなるクォークコニウムの様々な量子状態に対する質量スペクトルの実験データ

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、動的な軽いクォークの寄与が入った格子 QCD シミュレーションを行って pNRQCD の非摂動的因子を決定し、重いクォーク系の解析に応用できるようにすることである。この目的を達成するために解決すべき問題は以下のようなものである。

(1) 計算で得られたクォーク間ポテンシャルとその相対論的補正項から、クォークコニウムスペクトル等の物理量を計算する手法を確立すること。

(2) クエンチ近似で適用可能なマルチレベルアルゴリズムに代わるノイズ削減法を開発すること。そのために、マルチレベルアルゴリズムが機能する仕組みを詳細に調べる。

(3) 動的な軽いクォークの寄与が入った格子QCDのゲージ配位から相関関数を計算し、相対論的補正項を決定すること。

### 3. 研究の方法

本研究課題で具体的に実施した研究の内容・方法は次のようなものである。

(1) 格子QCDから求めた相対論的補正項とpNRQCDの理論的導出を洗い直した上で、pNRQCDを用いてクォークonium質量スペクトルを計算した。

(2) 動的な軽いクォークを含む系の計算に適用し得るノイズ削減法を確立するため、クォーク-反クォーク間ポテンシャルに対するグルーオンのカラー中間状態の役割をマルチレベルアルゴリズムを応用して調べた。カラー一重項状態が特に重要な寄与を与えるだろうという当初の予想に反し、グルーオンの中間状態はすべて同じ寄与を与えること、つまりどのカラー中間状態に着目してもゲージ不変なポテンシャルが抽出できることを発見した。さらに、ある条件を満たせば、多数のゲージ配位の平均を取らなくても、1つのゲージ配位からポテンシャルを計算できることがわかった。このように予想外の結果が得られたため、計算の範囲を広げて重いバリオン系にも適用できる3クォーク系のポテンシャルも同じ手法で調べ、同様の結果を確認した。これを応用して様々なクォーク配位に対する3クォーク間ポテンシャルの計算も行った。

(3) 大規模数値計算のために、メンテナンスが用意で発展的、またプラットフォームになるべく依存せず、スーパーコンピュータ(SX8,SX9,SX-ACE)と研究室のマルチコアパソコン上で使用可能な計算コード群を開発し

た。計算高速化のためにOpenMPを用いた並列化計算を実装した。計算コードのテストには、複数の商用コンパイラを用いた。さらに、将来的な計算高速化のために、グラフィックカードによるOpenACCを用いた超並列計算のについて検討した。

(4) マルチレベルアルゴリズムではない従来の計算方法を用いた場合の、相対論的補正項の相関関数の計算精度を確認するため、Japan Lattice Data Grid (JLDG)で公開されている動的な軽いクォークの寄与を含むゲージ配位を用いた計算コードを開発して計算を開始した。

### 4. 研究成果

#### (1) 主な成果

① クエンチ近似の格子QCDシミュレーションで得られたクォーク間ポテンシャルをもとに、クォークoniumの質量スペクトルの計算を行った。1/m展開の1次の寄与や2次のスピンのテンソル項の寄与が質量スペクトルの再現に重要な役割を果たすことを示した。スピンの寄与に関しての定量的な振る舞いは実験値をほぼ再現していることを確認した。本研究成果は、5. [雑誌論文]の③, ④, ⑤, および 5. [学会発表]の④, ⑥, ⑬, ⑭で発表した(図2に成果の一例を示す)。

② クォーク-反クォーク間ポテンシャルに対するグルーオンのカラー中間状態を、マルチレベルアルゴリズムを用いて調べたところ、グルーオンの中間状態の成分はポテンシャルに均等に寄与していることを確認した。90年代より、クォークの閉じ込めに対してグルーオンの対角成分が主要な寄与を与えている(アーベリアンドミナンス)とする研究があるが、ゲージ固定をしないシミュレーションではその限りでないことを明らかにした。本研究成果は5. [雑誌論文]の②と5. [学会発表]の⑦, ⑧で発表した(図3に成果の一例を示す)。

③ 上記②の結果に付随して、マルチレベルア

ルゴリズムで用いるパラメータの条件が揃えば多数のゲージ配位の平均を取らなくても、1つのゲージ配位からポテンシャルを計算できることを示した。

④ 上記②,③の結果が、バリオン系に対応する3クォーク間ポテンシャルにも適用できることを確認し、様々な3クォーク配位に対するポテンシャルの精密計算を行った。本研究成果は5. [雑誌論文] の①と5. [学会発表] の②, ⑤で発表した。

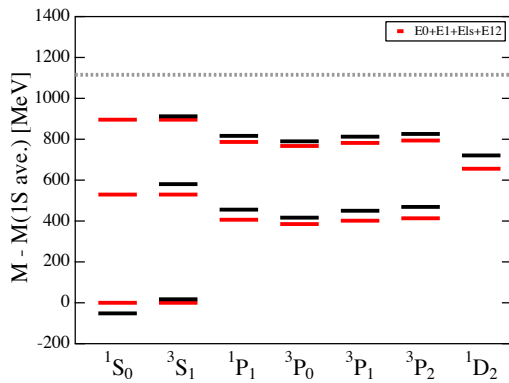


図2: ボトムニウムの様々な量子状態に対する質量スペクトルの計算値 (赤線) と実験データ (黒線)

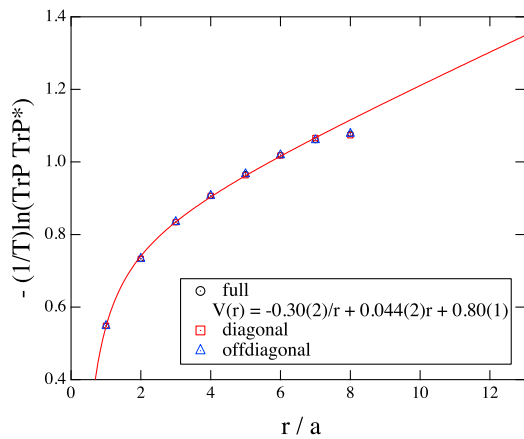


図3: クォーク-反クォーク間ポテンシャルをグルーオンの対角成分および非対角成分から計算したものとゲージ不変なポテンシャルとの比較

## (2) 成果の国内外での位置付けとインパクト

① 成果の①は、以前より行っている、格子QCDシミュレーションによる相対論的補正項決定という一連の研究のまとめにあたる。クエ

ンチ近似の範囲内とはいえ、従前の研究に比べ、系統誤差と統計誤差ともに大幅に改善されているので、pNRQCDの理論的研究を行っているグループから依然強い関心を寄せられている他、日本物理学会からも執筆依頼を受け、学会誌にこれらの内容について解説した(5. [雑誌論文] の⑤)。成果の②③からは、マルチレベルアルゴリズムが働くメカニズムだけでなくQCDにおけるカラーの閉じ込め機構に対する知見も得られた。さらに成果の④に示す3クォーク間ポテンシャルの効率よい計算に発展していった。3クォーク間ポテンシャルの決定については、まだ分野として解決していない課題が残されており、オーストラリア等に研究を続けているグループがいるため、今後も関心を集めるものと期待される。

## (3) 今後の展望

本研究を通して、前項に挙げたような様々な成果が得られたが、本研究課題の目的である動的な軽いクォークが入った場合の相対論的ポテンシャルの決定を成功させるためには、コード開発、理論的検討、シミュレーション実行のすべてにわたってさらに時間が必要である。また、前項にあげた成果から、3クォーク間ポテンシャルの決定やプロファイルの測定、クォークの閉じ込め機構とグルーオン自由度の関係等、新たな研究の着想が得られた。

本研究課題により整備した環境を利用して、更なる研究成果をあげていきたい。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (5件)

① Y. Koma, M. Koma, The static three-quark potential from the Polyakov loop correlation function, LATTICE 2014, Columbia Univ., New York, 23 - 28 June 2014, Proc. Sci. LAT2014 (2014) 352-(1-7) (査読有)

<http://pos.sissa.it/archive/conferences>

/214/352/LATTICE2014\_352.pdf

② Y. Koma, M. Koma, The static potential from the selected intermediate states of gluons, LATTICE 2013, Universitaet Mainz, Mainz, Germany, 29 July - 3 Aug 2013, Proc. Sci. LAT2013 (2013) 469-(1-7) (査読有)

[http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/469/LATTICE2013\\_469.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/469/LATTICE2013_469.pdf)

③ Y. Koma, M. Koma, Heavy quark potential and quarkonium spectrum with nonperturbative pNRQCD, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), Fukuoka, Japan, 20-25 Aug 2012, Few-Body Systems, Volume 54, Issue 7-10 (2013) 1027-1031 (査読有)

DOI:10.1007/s00601-012-0542-8

④ Y. Koma, M. Koma, Heavy quarkonium spectroscopy in pNRQCD with lattice QCD input, LATTICE 2012, Cairns, Australia, 24-30 June 2012, Proc. Sci. LAT2012 (2012) 140-(1-7) (査読有)

[http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/140/Lattice2012\\_140.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/140/Lattice2012_140.pdf)

⑤ 駒佳明, 駒美保, 重いクォーク物理の進展 — QCD と量子力学系ポテンシャルの対応 —, 日本物理学会誌 vol. 67 No. 5 (2012) 325-332 (解説記事, 査読有)

<http://ci.nii.ac.jp/vol.issue>

[/nels/AN00196952/ISS0000480247\\_ja.html](http://nels/AN00196952/ISS0000480247_ja.html)

〔学会発表〕 (13 件)

① 駒美保, 駒佳明, 双対ギンツブルグ-ランダウ理論に基づく 3 クォーク間ポテンシャルの解析, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 東京都, 2015 年 3 月 21-24 日

② 駒佳明, 駒美保, 格子 QCD に基づく 3 クォーク間ポテンシャルの解析, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 東京都, 2015 年 3 月 21-24 日

③ Y. Koma, M. Koma, The static three-quark potential from the Polyakov loop cor-

relation function, LATTICE 2014, Columbia Univ., New York, USA, 23-28 June 2014

④ 駒美保, 駒佳明, 格子 QCD で決定したクォーク間ポテンシャルによるクォークコニウムスペクトル, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月 27-30 日

⑤ 駒佳明, 駒美保, 格子 QCD によるポリヤコフ相関関数を用いた 3 クォーク間ポテンシャルの計算, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 神奈川県, 2014 年 3 月 27-30 日

⑥ M. Koma, Y. Koma, Heavy quarkonium spectrum in nonperturbative pNRQCD (招待講演), Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers, German-Japanese Seminar 2013, Regensburg, Germany, 6-8 Nov 2013

⑦ Y. Koma, M. Koma, Anatomy of the heavy quark potential with the multilevel algorithm (招待講演), Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers, German-Japanese Seminar 2013, Regensburg, Germany, 6-8 Nov 2013

⑧ Y. Koma, M. Koma, Lattice QCD study of the heavy quark potential with the multilevel algorithm (招待講演), ミニ滞在型研究検討会「チャームバリオンの構造と生成」J-PARC, 東海村, 茨城県, 2013 年 9 月 11 日

⑨ Y. Koma, M. Koma, The static potential from the selected intermediate states of gluons (Poster), LATTICE 2013, Universitaet Mainz, Mainz, Germany, 29 July - 3 Aug 2013

⑩ Y. Koma, M. Koma, Heavy quark potential and quarkonium spectrum with nonperturbative pNRQCD (招待講演), The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), Fukuoka, Japan, 20-25 Aug 2012

⑪ Y. Koma, M. Koma, NRQCD and pNRQCD for heavy quarkonium (招待講演), 新

学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会, 名古屋大学, 愛知県, 2012年7月12-13日

⑫ Y. Koma, M. Koma, Heavy quarkonium spectroscopy in pNRQCD with lattice QCD input, LATTICE 2012, Cairns, Australia, 24-30 June 2012

⑬ Y. Koma, M. Koma, pNRQCD with lattice QCD input (招待講演), Heavy Quark

Hadrons at J-PARC 2012, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 22 June 2012

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

駒 佳明 (KOMA, Yoshiaki)

沼津工業高等専門学校・教養科・准教授

研究者番号 : 00334748