

機関番号：53801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740149

研究課題名（和文） 格子 QCD と有効場を用いた重いクォークの物理

研究課題名（英文） Heavy quark physics from lattice QCD and effective field theories

研究代表者

駒 佳明 (KOMA YOSHIAKI)

沼津工業高等専門学校・教養科・講師

研究者番号：00334748

研究成果の概要（和文）： 重いクォークと反クォーク間の束縛状態であるクォークoniumの諸性質を明らかにすることを目的として、量子色力学（QCD）の有効場の理論である pNRQCD (potential non-relativistic QCD) と格子 QCD 数値シミュレーションを用いて、クエンチ近似の範囲内で非摂動的に重いクォークと反クォーク間のポテンシャル、特にクォーク質量の逆数の展開で与えられる相対論的補正項を 2 次のオーダーまで調べた。

研究成果の概要（英文）： In order to clarify various properties of heavy quarkonia, we compute the inter-quark potential by using lattice QCD simulations within the quenched approximation, which contains relativistic corrections up to the second order of  $1/m$  expansion in the effective field theory for heavy quarkonium called potential nonrelativistic QCD.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：ハドロン物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：量子色力学，格子 QCD シミュレーション，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 BES @ IHEP (中国), CLEO @ Cornell, E835/CDF/D0 @ Fermilab, BaBar @ SLAC (アメリカ), Belle @ KEK (日本), H1/ZEUS @ DESY, PANDA @ GSI (ドイツ), LHC @ CERN (スイス) において重いクォーク (主に c, b クォーク) に関わる多くの実験が進行または計画中であった。そして、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った。

(2) 現在でもその状況は変わらないが、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よくとられている。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onium (J/ψメソンやΥ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から間もなかったこともあり、格子 QCD シミュレーションを用いた非摂動的な計算はほとんどされていなかった。

## 2. 研究の目的

(1) 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onium を量子力学的方法で系統的に調べることができる。

(2) そこで、我々はクエンチの範囲内であるが、それまでに開発に成功していたカラー場の相関関数の精密計算を応用し、大規模・系統的な格子 QCD シミュレーションを行いクォーク間ポテンシャルに対する  $0(1/m)$  の補正項、 $0(1/m^2)$  のスピン依存補正項、 $0(1/m^3)$  の運動量依存補正項を、近距離から長距離にわたって精密に決定することを試みた。

(3) スピン依存補正項については過去にいくつかの結果が示されていたが、本研究ではこれらの結果を大幅に改善する計算結果を得ることを目指して研究を行った。

## 3. 研究の方法

pNRQCD によると相対論的補正項のスペクトル表示はカラー場の強さを静的なクォーク-反クォークの状態ではさんだ行列要素と対応するエネルギーギャップによって表すことができる。これらは原理的にはクォーク-反クォーク上で定義されるカラー場の強さの相関関数から抽出することができる。図1に一例として  $0(1/m)$  補正項の決定に必要な Wilson ループ上のカラー場の強さの相関関数を図示する。このような相関関数を、マルチレベル法と呼ばれる新しいシミュレーションアルゴリズムを駆使して精密に計算し、さらに遷移行列理論から解析的に導かれる表式を用いて相対論的補正項を計算した。種々の相対論的補正項は、カラー電場やカラー磁場の様々な組み合わせにより与えることができる。

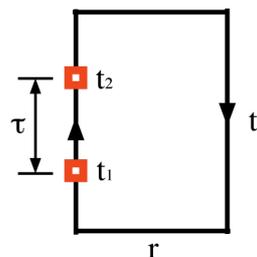


図1:  $r \times t$  の Wilson ループにカラー場を時間距離  $\tau$  だけ離れた相関関数

## 4. 研究成果

クォーク間ポテンシャルに対する  $0(1/m)$  の補正項、 $0(1/m^2)$  のスピン依存補正項、 $0(1/m^3)$  の運動量依存補正項について、クエンチ近似の範囲内ではあるが、 $0.25 \sim 1.2$  fm (1 fm は  $10^{-15}$  m) までの精密結果を得た。

以下では、特に  $0(1/m)$  補正項と  $0(1/m^2)$  のスピン依存補正項についての結果をまとめる。これらの成果により、2008~2010 年度の間国際会議や国内研究会での招待講演を5回行った。また、スピン依存補正項の精密計算により第5回素粒子メダル奨励賞(素粒子論グループ)を受賞した。

今後の展望としては、これらの研究を拡張して動的クォークの寄与を取り入れた格子 QCD シミュレーションを行い、その効果を調べることを考えている。

### (1) $0(1/m)$ 補正項

図2に結果を示す。この補正項は、これまで現象論的には考慮されてこなかった補正項である。pNRQCD により初めてその存在が示され、我々が世界で初めて非摂動的な精密計算を行った。最近ようやくその効果について、現象論的な研究が行われはじめた。近距離では摂動的 QCD の結果と合致している。一方、摂動的 QCD では計算できない中・長距離では対数関数的な振る舞いをするのがみとれる。

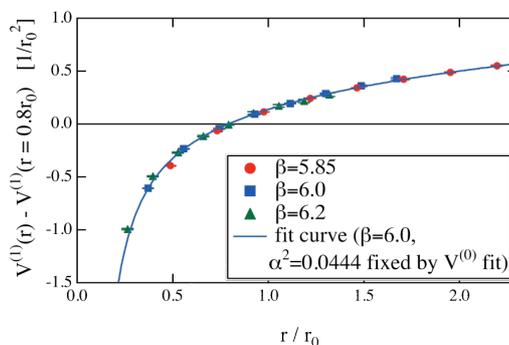


図2:  $0(1/m)$  の補正項 ( $r_0$  は約 0.5 fm)

(2)  $0(1/m^2)$ のスピンの依存補正項

図3にEichten-Feinbergにより定義された補正項,  $v_1', v_2', v_3, v_4$ の結果を示す。 $v_1'$ と $v_2'$ はスピン軌道に関する補正項であり, クォー

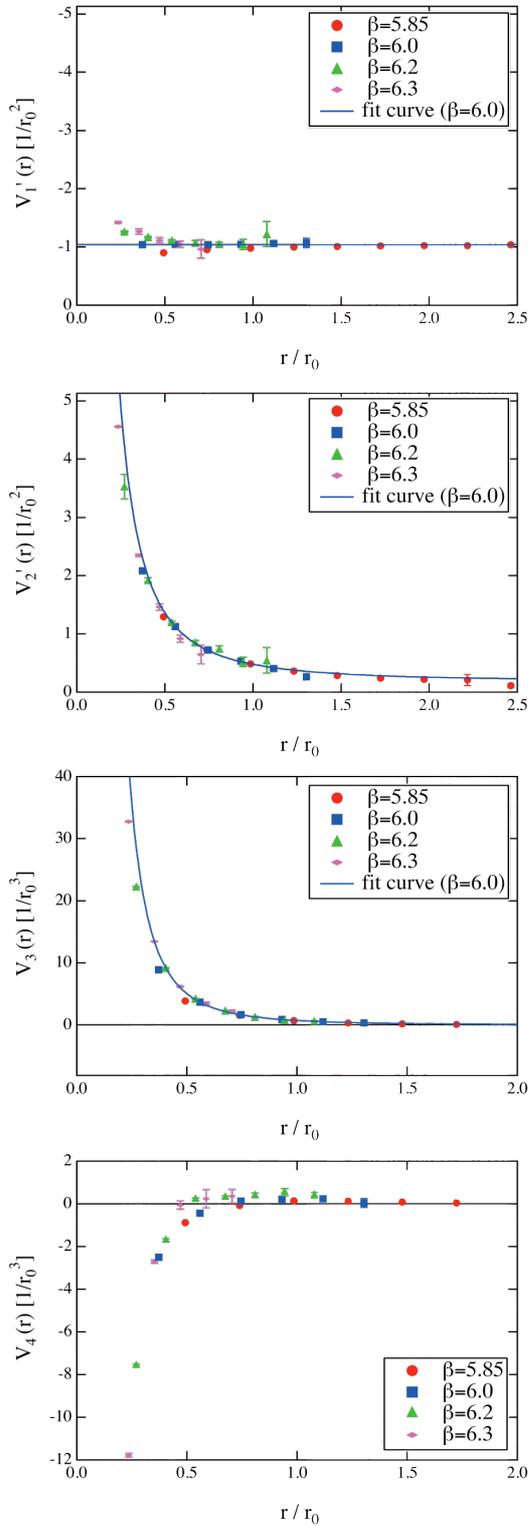


図3:  $0(1/m^2)$ のスピンの依存補正項, 上から順に  $v_1', v_2', v_3, v_4$

クォーラムスペクトルの微細構造と関係している。プライム'は距離  $r$  に関する1階微分を意味する。これらは Gromes の関係式により静的ポテンシャルと関係しており, 非摂動的に解明すべき補正項であることがわかってきたが, 近距離から長距離まで非常に精密な結果を得ることができた。様々な格子間隔でこの Gromes の関係式を検証し, 連続極限で成立することを確かめた(図4)。 $v_3$ と $v_4$ はスピン-スピン相互作用に関わる補正項で, スペクトルの超微細構造と関係している。

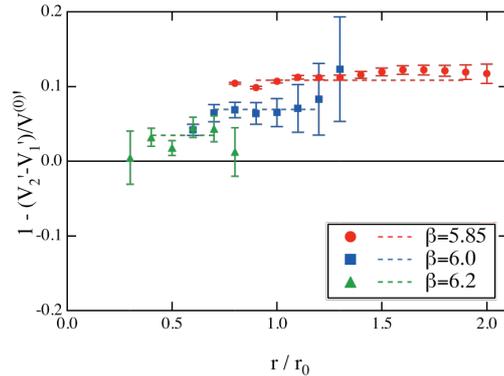


図4: Gromes の関係式  $v_0' = v_2' - v_1'$  からのずれを距離の関数として表示,  $\beta$  が大きくなるにつれて連続極限に近づく。

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 7 件)

- ① Y. Koma, M. Koma, Heavy quark potentials derived from lattice QCD, AIP Conference Proceedings 1322 (2010) 298--306 (査読無ただし招待講演)
- ② Y. Koma, M. Koma, Heavy quark potential in lattice QCD, Prog. Theor. Phys. Suppl. 186 (2010) 205—210 (査読有)
- ③ Y. Koma, M. Koma, Scaling study of the relativistic corrections to the static potential, Proc. Sci. LAT2009 (2009) 122-(1--8) (査読有)
- ④ K. Ishiguro, M. Hasegawa, Y. Koma, T. Sekido, T. Suzuki, Gauge invariance of the color confinement mechanism due to the Abelian dual Meissner effect, Proc. Sci.

LAT2009 (2009) 238-(1--8) (査読有)

⑤ T. Suzuki, M. Hasegawa, K. Ishiguro, Y. Koma, T. Sekido, Gauge invariance of color confinement due to the dual Meissner effect caused by Abelian monopoles, Phys. Rev. D80 (2009) 054504-(1--11) (査読有)

⑥ M. Koma, Y. Koma, H. Wittig, Determination of the relativistic corrections to the static inter-quark potential from lattice QCD, Proc. Sci. Confinement8 (2008) 105-(1--5) (査読有)

⑦ T. Suzuki, K. Ishiguro, Y. Koma, T. Sekido, Gauge-independent Abelian mechanism of color confinement in gluodynamics, Phys. Rev. D77 (2008) 034502-(1--5) (査読有)

[学会発表] (計 12 件)

① Y. Koma, M. Koma, Lattice QCD study of the heavy quark potential, Japanese-German Seminar 2010 (Lattice QCD confronts experiments), Mishima, Japan, 4-6 Nov 2010

② Y. Koma, M. Koma, Heavy quark potentials derived from lattice QCD, International Workshop on Chiral symmetry in hadrons and nuclei (Chiral10), Valencia, Spain, 21-24 June 2010 (招待講演)

③ Y. Koma, M. Koma, Heavy quark potential in lattice QCD, New Frontiers in QCD 2010 (Exotic Hadron Systems and Dense Matter), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Feb 4-5, 2010 (招待講演)

④ Y. Koma, Nonperturbative determination of heavy quark potential in pNRQCD HEAVY QUARK PHYSICS IN QCD, KEK, Tsukuba, Japan, Sept 7-8, 2009 (招待講演)

⑤ Y. Koma, Scaling study of the relativistic corrections to the static potential, XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2009), Beijing University, Beijing, China, 25-31 July 2009

⑥ 駒美保, 駒佳明, 重いクォーク間の運動量に依存するポテンシャル, 日本物理学会, 第 64 回年次大会, 立教大学, 池袋, 2009. 3. 29, 日本物理学会講演概要集 64(1-1), 53

⑦ 駒佳明, 重いクォーク間ポテンシャルの

現象論的意義とその精密化, 特定領域「ストレンジネスで探るクォーク多体系」研究会 (2009. 2. 27-28 KKR熱海) (招待講演)

⑧ 駒佳明, SX で探る重いクォークの物理, 平成 20 年度スーパーコンピュータシンポジウム, 大阪大学サイバーメディアセンター, 2008. 10. 24 (招待講演)

⑨ 駒美保, 駒佳明, 重いクォーク間のスピンに依存するポテンシャル, 日本物理学会, 2008 年秋季大会, 山形大学, 山形, 2008. 9. 22 日本物理学会講演概要集 63(2-1), 42

⑩ M. Koma, Y. Koma, H. Wittig, Determination of the relativistic corrections to the static inter-quark potential from lattice QCD, Quark Confinement and the Hadron Spectrum VIII, Universitaet Mainz, Mainz, Germany, 1-6 Sept 2008

⑪ Y. Koma, M. Koma, Relativistic corrections to the heavy quark potential from lattice QCD II, Challenge to New Exotic Hadrons, RCNP, Osaka University, 2008. 7. 30-31

⑫ M. Koma, Y. Koma, Relativistic corrections to the heavy quark potential from lattice QCD I, Challenge to New Exotic Hadrons, RCNP, Osaka University, 2008. 7. 30-31

## 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・講師  
研究者番号：00334748

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：