

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540246

研究課題名（和文） QCD 高次輻射補正とクォーク質量の精密決定

研究課題名（英文） QCD higher-order radiative corrections and precision determinations of quark masses

研究代表者

隅野 行成 (SUMINO YUKINARI)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：80260412

研究成果の概要（和文）：クォークとは原子核内部に存在する素粒子である。本研究では、クォークとその反粒子により構成される物理系を精密に記述するために必要な理論計算を行なった。特に、10 年来所望されていたクォーク間力の計算を完成させた。その結果は多くの応用が期待され、既にクォークの質量やその他の物理定数を精密に決定するのに貢献し始めている。また、現在稼働中の LHC 実験においてトップクォークの質量を精密決定するために必要な理論的な枠組みを構築した。

研究成果の概要（英文）：Quarks are elementary particles which reside in atomic nuclei. In this research project, we performed precise theoretical computations for explaining the nature of the physical systems composed by a quark and its anti-particle. In particular, we completed computation of the interquark force which has been demanded for more than a decade. The result has a lot of applications and has already been applied to preliminary determinations of quark masses and other physical parameters. Furthermore, we constructed a theoretical framework which is necessary for determining the top quark mass accurately at the current LHC experiment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

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：素粒子論、QCD、クォーク質量、物理定数

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、程なく開始する LHC 実験に伴って、標準模型を超える素粒子理論の発見・構築は、より現実的、精力的に追究されると期待されていた。(LHC 実験は現在稼働中で、正にその追究の最中である。)

クォークの  $\overline{MS}$  質量の決定精度を上げることは、その中で重要な役割を果たす。例え

ば、 $b$  クォークの  $\overline{MS}$  質量の精度は、 $b$  と  $\tau$  粒子の質量比を预言する超対称 SU(5) 大統一模型への強い制限を与えている。LHC 実験で標準模型を超える物理の兆候が現れたときに、高精度の  $b$ ,  $c$ ,  $t$  クォークの質量の値は、重要な手がかり、または制限を与えると考えられる。

またこれらの質量は、種々の現象論的解析

の重要なインプット・パラメーターにもなっている。例えば B ファクトリー実験における物理では、いろいろな物理量を理論的に予言する際のインプットとして  $m_b$  が重要である。(e.g. b クォークの崩壊幅は  $m_b^5$  に比例するので、 $m_b$  の値に強く依存する。)

Bottomonium の 1S 状態の質量 (実験値) を理論計算と比較して b クォークの MSbar 質量を決定する方法は、現在、最も精度よく  $m_b$  を決定している方法である。1998 年頃、renormalon 相殺の発見という理論的 breakthrough によって、摂動 QCD に基づく非相対論的な束縛状態の理論による高精度の予言が可能となった。これを受けて私は 2001~2002 年に、charmonium、bottomonium 系のスペクトルを計算し、それを用いて b, c クォークの MSbar 質量を高精度で決定した。(それぞれ 40MeV、100MeV の精度で決定した。) また t クォークの質量は、将来のリニアコライダー実験で、threshold 付近でのトップ対生成断面積の値から 1S 状態の ttbar 共鳴状態の質量を測定することによって、高精度で決定できる。この事は 1994 年頃、私と共同研究者が初めて定量的に示したことで、以来私は、将来のコライダー実験における t クォークの質量の測定 (及び、その他の物理量) について精力的に研究してきた。

当時及び現在まで、上記の方法で b クォークの MSbar 質量が決定されていて、不定性は上述と同程度から、保守的な見積もりでも 100MeV 程度である。c クォークの質量に関しては、現状では他の方法の方がやや精度が高い。一方、将来リニアコライダーにおける t クォークの質量の測定精度は約 40MeV である。

研究開始当初、クォークコニウム 1S 状態の質量を用いて  $m_b, m_c, m_t$  を決定する方法の精度を次の段階へ上げることを阻んでいた最大の要因は、QCD ポテンシャルの 3 ループ計算が完成していないことであった。これが計算されれば、クォークコニウムスペクトルの  $O(\alpha_s^5 m)$  補正が完成する。同じオーダーの他の補正は既に計算されており、特に (重要かつ難度の高い)  $\beta_0^3$  に比例する部分は、以前私と共同研究者が最初に計算したものであった。

私は本研究開始の前の 2 年間、その準備として QCD ポテンシャルの 3 ループ輻射補正の計算に取り組んできた。(現代の標準的な計算手順に習い) まずループ積分を少数のマスター積分へ帰着した後、各マスター積分を解析的に計算するという 2 段階の計算を行っていた。まず私は 2 ループ輻射補正の結果を再現した。CPU 時間にして約 10 時間の計算で、結果が再現されることを見た。2 ループ計算で用いた独自のアルゴリズムをベースに更に改善して、約千倍高速化して 3 ループ計算に適用し、CPU 時間にして約 3 ヶ

月で計算の第 1 段階を終えた。即ち、約 2 万個のループ積分を 29 個のマスター積分に帰着した。ここまでの段階で (アルゴリズムの高速化という意味で) 大きな進展があったと考えられる。

また私は共同研究者と共に、LHC 実験においてトップクォークによる QCD 束縛状態の共鳴ピークが存在することを理論的に初めて突き止めた。従来は、陽子中のパートン分布関数と initial state radiation の影響で、共鳴ピークはなめされて消えてしまうということが言われてきたが、パートン分布関数と ISR の影響を取り入れてもきちんとピークが残ることを示した。これによって、初めてカラー単重項の観測量をもちいてトップクォークの質量を測定する可能性が開けた。その方法を用いれば、原理的には LHC 実験でも非常に高精度でトップクォークの質量を測定できる可能性がある。その方法を考案し、実験的に十分な測定ができるかどうかを検討していた。

## 2. 研究の目的

標準模型を超える物理を探究する手がかりを与えること、及び、種々の現象論的解析の重要なインプット・パラメーターを与えることを目的に、以下の研究を行なった。即ち、ボトム及びチャームクォークの MSbar 質量の決定精度を上げる。また将来トップクォーク質量の測定精度を上げるために必要な理論的な予言を行なう。そのために QCD ポテンシャルに対する 3 ループ輻射補正の計算を完成させる。

詳細には、次の 4 つの課題について研究を行なった：

- (1) QCD ポテンシャルの 3 ループ輻射補正計算を完成させる。そのために必要なマスター積分の解析的な評価のアルゴリズムを構築し、計算を実行する。
- (2) 上記結果を用いて、bottomonium、charm onium の 1 S 状態の質量と  $O(\alpha_s^5 m)$  までの理論予言から、ボトム、チャームクォークの MSbar 質量、及びその他の物理定数を高精度で決定する。
- (3) 将来の実験におけるトップクォーク対生成の threshold 領域での断面積を計算して、トップクォーク質量の測定精度を改めて見積もる。また LHC 実験におけるトップクォーク質量の測定方法を研究する。
- (4) 標準模型を超えた理論的な枠組みの中で、レプトンの質量の起源を明らかにする。

## 3. 研究の方法

研究課題の (1) については、まずは準備段階で得ていた、約 2 万個のループ積分を 29

個のマスター積分に帰着するという第一段階の計算について、完全に独立なプログラムを作成し検算を行なった。ダイアグラム生成から簡約化に至るまで、細かいステップ毎に独立なプログラムを作って検算を行なった。簡約化アルゴリズムの高速化の基本的なアイデアは、準備段階と同じで、例えば、まず次元Dに数値を代入しておいて最適な簡約化の経路を定めておき、その後で改めてDを残したまま最適経路を使って簡約化した。

計算の第二段階のマスター積分の評価においては、static charge 特有の Feynman parameter の取り方が存在して、その場合に領域分割法による特異点解消が大幅に簡略化されることを見出した。また Mellin-Barnes 積分表示を用いて虚軸上の積分路で数値積分する方法も、特定のマスター積分については非常に有力であることを見出した。この二つの方法の組み合わせで、29個のマスター積分を数値的に評価することに成功した。数値積分の精度は  $10^{-5}$  以下であった。

得られたマスター積分の値から、QCDポテンシャルに対する3ループの輻射補正が決定される。この最終段階においても、いくつかのnon-trivialな検算を実行した。まずQCDポテンシャル自身は繰り込みを受けないので、gauge couplingの繰り込みだけで全てのUV発散が取り除かれなければならない。3ループのgauge couplingの繰り込み定数は既に知られているので、比較が出来る。これとほぼ等価なことではあるが、UV発散に伴うlogの係数は全てbeta関数から決まっているので、分かっている。またIR発散に伴うlogの係数も、potential-NRQCD有効理論により予言されている。これらが全て正しく再現されるかどうか非自明な検算となった。

課題(2)については、まず3ループQCDポテンシャルとlattice計算結果を比較して、非摂動効果の大きさを評価する。現在までの計算結果から、非摂動効果がかなり小さいことが示唆されている。OPEを用いて、多重極展開で系統的に非摂動効果をparametrizeして、順次非摂動効果を定める。次にこれをクォークコニウム束縛状態に適用する。ポテンシャルに対する非摂動効果をどのようにクォークコニウム・エネルギーレベルに対する非摂動効果に翻訳するかは、新しい理論的な取り扱いの開発が必要である。素朴には、QCDポテンシャルに対する非摂動効果をポテンシャルに含めた場合と、純粋に摂動的なポテンシャルの場合のそれぞれにおいて、シュレディンガー方程式を数値的に解き、スペクトルのずれから非摂動効果を評価するという方法があり得るが、理論的な整合性を詳しく調べる必要がある。基底状態のみではなく、励起状態のエネルギーレベルも求め、実験値

との比較から、独立に非摂動効果の大きさを見積もることができるので、整合性を確認できる。また各高次補正項の寄与の大きさを明らかにして、摂動展開の収束性を確認し、理論的な枠組みとの矛盾がないことを示す必要がある。これらの整合性を確認したうえで、スペクトルの摂動的な予言値と実験値の比較から、ボトムクォーク及びチャームクォークのMSbar質量を高精度で決定する。

課題(3)については、ハドロン・コライダー実験においてトップthreshold領域でのttbar共鳴状態の効果を含むイベントジェネレーターを初めて制作し、それを一般に公開した。QCD補正は高エネルギー領域とthreshold領域それぞれにおいて独立に知られていたが、両者を補間する理論的枠組みを開発し、これを組み込んだモンテカルロ・イベント生成を実現した。これによって、LHC実験においてttbar threshold領域も含めて詳細なトップ・クォークの生成断面積、及び分布を計算できるようにした。

また、課題(4)においては、クォークと対を成すレプトンの質量に対する輻射補正の構造の研究を行なった。その中から、小出質量公式を保つための対称性を見出した。実際、 $U(3) \times O(3)$ のfamilyゲージ対称性があると、小出質量公式がUVスケールで安定化することを見出した。レプトン質量に対する輻射補正の定性的な理解には、課題(1)~(3)で得られたクォークの質量に対する輻射補正の知識を多分に応用した。例えば、クォークコニウム中でのrenormalon相殺においては、クォークと反クォークのカラー電荷の積の値が重要な役割をするが、その場合と符号を反転させて、小出公式へのQED補正の相殺に応用した。

#### 4. 研究成果

本研究の第一義的な成果は、10年来所望されていたQCDポテンシャルの3ループ輻射補正計算を完成させたことである[課題(1)]。この計算結果の応用は多岐にわたり、クォーク間力の理解、クォークコニウムの様々な性質の高精度の予言、特にb, c, tクォークの質量、及び $\alpha_s(M_Z)$ の精密決定に貢献すると期待される。論文はPhysical Review Lettersに即時掲載され、更にPhys. Rev. Lett.掲載論文の中でも特にSpotlighting Exceptional Researchに選ばれ、特別記事で紹介された。

重要な応用として、最初に計算した基本表現に対する3ループQCDポテンシャルの計算を一般化して、一般の表現に対するQCDポテンシャルを計算した。この結果、3ループにおいて初めてカシミヤスケール則の破れを見出した。その効果の大きさは現在の格子計算結果と矛盾なく、かつ将来的には非摂動的な数値計算でも検出され得るこ

とを予言した。この性質はストリング・ブレーキング現象との関わりが深い。

課題(2)については、本研究成果である QCD ポテンシャルの 3 ループ輻射補正計算の結果を用いて、既に他の研究グループが、クエンチ近似の場合の  $\alpha_s$  及び  $m_b$  については、最初の preliminary な決定を行なった。私は「3. 研究の方法」で述べたように、より洗練された方法を用いて、より信頼度の高いこれらの物理パラメーターの決定を行なっている。

研究課題(3)については、 $t\bar{t}$  共鳴状態の効果を含めたハドロン・コライダー用のモンテカルロ・イベント・ジェネレーターを用いて、LHC 実験において  $t\bar{t}$  共鳴状態生成の影響で、トップの運動量分布が特に threshold 近傍で有意に変形されることが確かめられた。これは現在進行中の LHC 実験におけるトップ・クォークの諸性質の解析に重要な影響を与えると考えられる。現在は、このイベント・ジェネレーターを用いて、LHC 実験においてトップクォークの  $M_{S\bar{t}}$  質量を決定する方法を開発している段階である。

研究課題(4)においては、レプトンの質量の起源として family ゲージ対称性を提唱した。1983年に小出氏が経験的に発見した小出質量公式は、現在の実験精度 ( $7 \times 10^{-6}$ ) でも成り立っている。一方で(私がモデルを提唱する以前には)、この質量公式を必要な精度で予言する素粒子モデルは存在しなかった。それは、この公式を予言するモデルの構築には大きな困難が伴うため、その最大の困難は、QED 補正 (0.1%) がこの質量関係式を実験精度に比べて大きく破るということである。最近私はこの最大の困難を解決するメカニズムを発見した。またそれ以外のいくつかの困難も解決するレプトンセクターのモデルを構築した。標準模型を超える理論的枠組みの中で、QED 輻射補正を family ゲージ相互作用による輻射補正で相殺するメカニズム、及び、小出質量公式を満たすスペクトルに対応するスカラー場の真空期待値を、理論の持つ family ゲージ対称性と無矛盾に生成するメカニズムを提唱した。この研究は、フェルミオンの質量スペクトルの起源は 1000 TeV スケールにある family ゲージ対称性に起因するということを示唆しており、新しい素粒子理論の将来像の可能性を指し示している。

#### 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 7 件)

- ① N. Brambilla 他 66 名 (Y. Sumino 63 番目) Heavy quarkonium: progress, puzzles, and opportunities European Physics Journal 査読有 C71 2011 1534-1~1534-181
- ② C. Anzai, Y. Kiyo, Y. Sumino Violation of Casimir Scaling for Static QCD Potential at Three-loop Order Nuclear Physics 査読有 B838 2010 28~46
- ③ H. Yokoya, Y. Sumino Bound-state effects on kinematical distributions of top quarks at hadron colliders Journal of High Energy Physics 査読有 1009 2010 034-1~034-41
- ④ C. Anzai, Y. Kiyo, Y. Sumino Static QCD potential at three-loop order Physical Review Letters 査読有 104 2010 112003-1~112003-4
- ⑤ Y. Koide, Y. Sumino, M. Yamanaka Tests of a Family Gauge Symmetry Model at  $10^3$  TeV Scale Physics Letters 査読有 B695 2010 279~284
- ⑥ Y. Sumino Family Gauge Symmetry as an Origin of Koide's Mass Formula and Charged Lepton Spectrum Journal of High Energy Physics 査読有 0905 2009 075-1, 075-43
- ⑦ Y. Sumino Family Gauge Symmetry and Koide's Mass Formula Physics Letters 査読有 B671 2009 477~480

[学会発表] (計 3 件)

- ① Y. Sumino Static QCD Potential at 3-loop Order EuroFlavour 2010 2010. 9. 10 Max Planck Inst., Germany
- ② Y. Sumino 3-Loop QCD Potential: Computation and Applications Quarkonium Workshop 2010 2010. 5. 18 Fermilab, USA
- ③ Y. Sumino Effective Field Theories for Quarkonia Heavy Quark Physics in QCD 2009. 9. 4 KEK

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

隅野 行成 (SUMINO YUKINARI)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：80260412

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：