

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540281

研究課題名(和文)LHC時代における重いクォークの精密物理

研究課題名(英文)Precision physics of heavy quarks in the LHC era

研究代表者

隅野 行成 (Sumino, Yukinari)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80260412

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：LHC実験で粒子の性質を精密測定するためのweight function法を提唱した。特徴は、(1)粒子の崩壊先に含まれるレプトンのエネルギー分布だけを用い、hadronizationモデルやジェットに関する不定性などの影響が少ない、(2)理想的には粒子の速度分布に依存しないため、パートン分布関数やinitial-state radiationの不定性の影響が小さい。まずヒッグス粒子の質量決定への応用可能性を示した。現在、トップクォークの質量決定法を開発している。

また、高次輻射補正計算のためのアルゴリズムを開発した。これを用いて重いクォークoniumのスペクトルに対する3次補正計算を完成させた。

研究成果の概要(英文)：We proposed the "weight function method" developed for precise measurements of particle's properties at LHC experiments. The advantages are as follows: (1)Only the energy distribution of a lepton included in the decay products is used, hence dependence on uncertainties of hadronization models and initial-state radiations is low; (2)Ideally the method is independent of particle's velocity distribution, hence effects of uncertainties in parton distribution functions and initial-state radiation are low. We first showed applicability of the method to the Higgs mass determination. Now we are developing method for reconstructing the top quark mass.

We also developed algorithms for computing higher-order radiative corrections. As an application, we completed computation of the next-to-next-to-next-to-leading order corrections to the heavy quarkonium spectrum.

研究分野：数物系科学

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：LHC heavy quark top quark spectroscopy

1. 研究開始当初の背景

かねてより私は重いクォーク (b, c, t) の質量の精密決定に関する理論研究を行ってきた。実際、当時の Particle Data Group (PDG) による mb, mc の決定には、私の研究結果が採用されている。また、将来のリニアコライダー (ILC) における mt の精密決定に関しても私は多くの研究を行ってきた。

重いクォークの質量を精密決定することの主な物理的意義は以下の通りである。例えば、b, c, t の質量を、(分岐比や断面積から測定される) ヒッグス粒子とこれらのクォークとの湯川結合と比較することによって、標準模型のクォーク質量生成機構が正しいかを検証する。また標準模型を超える物理の検証において、トップの質量がしばしば重要な役割を果たす。例えば最小超対称標準模型 (MSSM) においては、ヒッグス質量 mH は他のパラメーターで表される重要な予言値であるが、mt の 4 乗に比例する 1 ループ補正は大きく、かつ mt の値に強く依存する。仮に mt が 1 GeV 変化すると mH の予言値は 1 GeV 程度変化する。一方、LHC 及び ILC における mH の測定精度はそれぞれ 0.1-0.2 GeV 及び 0.05 GeV 程度であるから、mt を 0.1 GeV 以下の精度で知ることは MSSM の予言の検証において重要である。その他でも重いクォークの質量は、種々の現象論的解析の重要なインプット・パラメーターとなっている。例えば、現在の b クォークの MSbar 質量の精度は、b と tau 粒子の質量比を予言する超対称 SU(5) 大統一模型への強い制限を与えている。LHCb/Super-B factory 実験においても、色々な物理量を理論的に予言する際のインプットとして mb が重要である。(e.g. b クォークの崩壊幅は mb^5 に比例するので、mb の値に強く依存する。)

当時は Tevatron で mt が約 1 GeV の精度で測定されているが、そこで測定された質量が理論的にどのようなパラメーターを表しているのかは明確ではない。(事実クォーク質量の中で唯一 mt だけが PDG に MSbar 質量が記載されていなかった。) LHC 実験において色々な mt の測定法が考案されているが、その全てにおいて 1 GeV 以上の理論的不定性が見込まれている。その主な理由は、全ての方法においてカラーをもったクォークの質量を運動学的に測定しようとしていることにある。一方 ILC 実験では、ttbar の threshold 領域においてトップの MSbar 質量は 0.1 GeV 以下の精度で決定できることが分かっている。カラー単重項である 1S-ttbar 共鳴状態の質量と、トップの MSbar 質量との関係が理論的に高精度で計算できているからであり、その計算において私は重要な貢献をしてきた。(特に、重いクォークコニウムのスペクトルに対する輻射補正計算に絡んで、QCD ポテンシャルの 3 ループ補正計算を完成させた。)

私は、上記の ILC における mt の測定法が、

LHC 実験においても適用できる可能性があることを明らかにした。即ち、(Tevatron とは異なり) LHC 実験では ttbar invariant-mass 分布中に 1S ピークが ----- パarton 分布関数、及び initial-state radiation の効果を含めてもスミアされずに ----- 現れることを示した。その 1S ピークの位置は、ILC 実験におけるピークの位置とほとんど変わらないことも示した。更に、ttbar 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 (MC) event generator を開発し、一般にも公開して、LHC 実験において ttbar threshold 領域も含めて詳細な ttbar 生成断面積・分布を計算できるようにした。

2. 研究の目的

(1) 上記のそれまでの研究を元に LHC 実験におけるトップクォーク質量の高精度決定のための新しい方法を開発する。b-jet 方向から一定角度方向へ放出された荷電レプトンのエネルギーが、ttbar の重心系・1S ピーク近傍でエネルギーが確定して、ttbar 共鳴状態の質量によって決まることを利用する。ttbar のレプトン+4-jet 崩壊モードの kinematics の測定を組み合わせ、トップの質量の測定精度を、MC シミュレーション解析を使って明らかにする。また、この解析に必要な理論計算を行なう。

(2) 最近完成させた、QCD ポテンシャルの 3 ループ補正の計算結果を用いて、bottomonium, charmonium の 1S 状態の質量と $O(\alpha_s^5)$ までの理論予言から、b, c の MSbar 質量を高精度で決定する。また、これらクォークコニウムの様々な物理量を計算し、理論的な整合性を高める。

(3) 近い将来、軽いダイナミカル・クォークを含む格子 QCD による、精度のよい QCD ポテンシャルの計算が可能になると期待される。3 ループ補正を含めた QCD ポテンシャルの摂動計算との比較から、 $\alpha_s(M_Z)$ を高精度で決定する。

3. 研究の方法

以下の方法を組み合わせ研究を行なう。

(1) Mathematica 代数計算ソフトウェアとマルチ・コア計算機を組み合わせ、高次特異点解消を伴う解析計算。

(2) 大容量を備えた計算機によるモンテカルロ・シミュレーション解析。具体的には、汎用ソフトウェア MadGraph/MadEvent, Pythia, PGS を用いる。

(3) ファインマン・ダイアグラムに基づくレプトンエネルギー分布などの解析計算。

(4) 思考実験。

(5) 実験家との LHC 実験におけるトップクォーク質量測定に関する情報交換。

4. 研究成果

(1) LHC 実験で粒子の諸性質を高精度で測定するための新しい方法(weight function 法)を考案し、提唱した。そして、ヒッグス粒子の質量の測定にこの方法が応用できることを示した。

LHC 実験は陽子陽子衝突型実験であるために、粒子の諸性質を高精度で測定するには困難がある。主にその要因は 1 素粒子レベルでの始状態の衝突の重心系が分からない。またパートン分布関数の不定性が大きい。

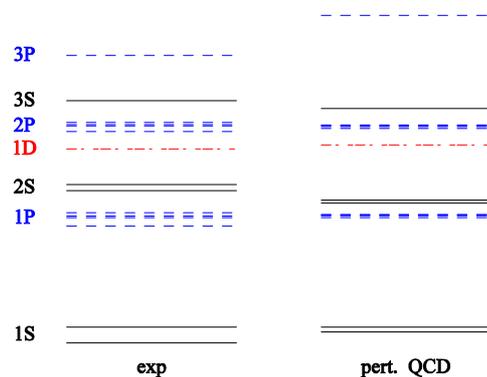
2 終状態にジェットが含まれる場合、そのエネルギー運動量を精度良く測定することが難しい。3 しばしば終状態には直接測定不能な運動量欠損が含まれ、その間接的な再構成を精度良く行うことは難しい、などである。そこで本研究では、終状態に含まれるレプトンのエネルギー分布のみから、親粒子の速度に依らずに親粒子の性質を測定する新しい方法を開発した。それは次の特徴を持つ：(a) レプトンエネルギー分布だけを用いる。ジェットの情報を使わないので、hadronization モデルへの依存性や、ジェット再構成に関する不定性などの影響が(ほとんど)ない、(b) 理想的には親粒子の速度分布に依存しないため、パートン分布関数(PDF)や initial-state radiation の不定性の影響が小さく抑えられる。即ち、理想的極限で hadronization や PDF などのモデルの介在無しに、実験値と摂動 QCD の計算結果の直接比較から親粒子の性質を測定することができる方法となっている。そしてモンテカルロシミュレーション解析によって、ヒッグス粒子の質量測定にこの方法を応用でき、5 ~ 7 % 程度の測定誤差で質量を決定できると推定されることを示した。特に、系統誤差を小さく抑えることが可能であることを示した。

(2) 上記の weight function 法を改善して、ヒッグス粒子の WW 崩壊モードを用いてレプトンエネルギー分布を使う方法によって、ヒッグス質量の再構成のシミュレーション解析を行なった。既にこの方法では jet エネルギースケールの不定性や、パートン分布関数に起因する不定性を小さく抑えられる事を示していたが、当該年度のヒッグス粒子(と思われる粒子)の発見を受けて、現実的なヒッグス質量(約 125GeV)の場合に、Gluon-Fusion 及び Vector-Boson-Fusion 生成過程を使ったシミュレーション解析によって、期待通り系統誤差を小さく抑えられることを確かめた。一方、統計誤差が 15% 程度と大きく、そちらが支配的であることが分かった。これは現実のヒッグス質量に大きく依存しており、もしもヒッグス粒子の質量が 150 GeV であったならば 2% の統計誤差となっていた。(ヒッグス粒子発見前はその可能性は十分にあったので、その意味では少なからず不運であった。)

(3) LHC におけるトップクォーク質量の精密測定のための新しい方法の開発を進めている。その原理的基盤は、上で開発した weight function 法である。(トップがスピンを持っているにも関わらずこの方法が使えることは、QCD のパリティ不変性を使って示せる。)最近、主要なイベントセレクションカットの影響を含めたシミュレーション解析を行ない、系統誤差を小さく抑えつつ、100 fb⁻¹での統計誤差が約 0.5 GeV との推定値を得た。この結果、実用化に向けて大きく前進したと考えている。特に、カットの中で最も影響が大きいものはレプトン PT カットであるが、レプトン PT 分布を精度よく摂動計算できるため、カットの効果の信頼性の高い評価が可能であることが分かった。

(4) クォークoniumの物理に必要な高次輻射補正の解析的計算法を開発した。これまで評価が困難であった複雑なループ積分を、まず多重和に変換したのちに、差分方程式を逐次的に解くことによって解析的に評価する新しい方法を開発した。同時に、この計算法を実装した強力かつ汎用性の高いソフトウェア「和」を開発・リリースした。この研究は、数学における「多重ゼータ値とその一般化」の理論との深い関わりがあり、この分野の発展にも貢献した。例えば、それまで知られていなかった一般化された多重ゼータ値間の新しい関係を得ることができた。

(5) 上記の多重和の解析的評価法を用いて、一般の重いクォークoniumのスペクトルに対する 3 次補正 [$O(\alpha_s^5 m)$ 及び $O(\alpha_s^5 \log \alpha_s m)$ 補正] を初めて完成させた。これを用いて NNNLO 補正を含むボトムoniumスペクトルの理論予想を初めて行なった。NNLO までの予想と比較して、くりこみスケールの変化に対してより安定な予想を与えることが分かった。また予想値を実験値と比較して、理論誤差の範囲内で両者がよく一致していることを確かめた(下図)。近い将来、チャームクォーク及びボトムクォークの MSbar 質量の精密決定に応用する予定である。



摂動 QCD による NNNLO ボトムoniumスペクトルの予想と実験値の比較。

(6)QCD ポテンシャルを用いた α_s の高精度決定の研究について、日本の格子 QCD 計算グループと連携して進めていくことを確認した。現在は、現実的なクォーク質量を含めた格子 QCD 計算の進展を待っている段階である。

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 “Perturbative heavy quarkonium spectrum at next-to-next-to-next-to-leading order,” Y. Kiyo, Y. Sumino, Phys.Lett. B730 (2014) p.76-80, 査読有.
DOI: 10.1016/j.physletb.2014.01.030

2 “Estimate of 4-loop Pole-MSbar Mass Relation from Static QCD Potential,” Y. Sumino, Phys.Lett. B728 (2014) p.73-76, 査読有.
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.11.022

3 “Algorithms to Evaluate Multiple Sums for Loop Computations,” C. Anzai, Y. Sumino, J. Math. Phys., 54, p.033514-1 - p.033514-22 (2013), 査読有.
DOI: 10.1063/1.4795288

4 “Measurement of physical parameters with a weight function method and its application to the Higgs boson mass reconstruction,” S. Kawabata, Y. Shimizu, Y. Sumino, H. Yokoya, JHEP, 1308, p.129 - 159 (2013), 査読有.
DOI: 10.1007/JHEP08(2013)129

5 “Top quark precision physics at the International Linear Collider,” D. Asner, A. Hoang, Y. Kiyo, R. Poschl, Y. Sumino, M. Vos, Prepared for a book on ILC, a shortened version from TDR for the ILC (arXiv:1307.8265[hep-ex]), p.1 - 17 (2013), 査読無.
<http://arxiv.org/pdf/1307.8265.pdf>

6 “Boost-invariant Leptonic Observables and Reconstruction of Parent Particle Mass,” S. Kawabata, Y. Shimizu, Y. Sumino, H. Yokoya, Phys. Lett. B710, p.658-664 (2012), 査読有.
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.03.050

7 “Measuring the top Yukawa coupling at the ILC at $s = 500$ GeV,” R. Yonamine, K. Ikematsu, T. Tanabe, K. Fujii, Y. Kiyo, Y. Sumino, H. Yokoya, Phys. Rev. D84, p.014033-1 - p.014033-9 (2011), 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.014033

〔学会発表〕(計 4 件)

1 RIMS 研究集会「多重ゼータ値の諸相」招待講演 “Singularities and Multiple Zeta Values in Feynman Loop Integrals,” Y. Sumino, (2013.7.23 京都数理解析研究所).

2 日本物理学会第 68 回年次大会シンポジウム招待講演 “摂動 QCD によるクォーク・反クォーク対系の理解の進展” Y. Sumino, (2013.3.28 広島大学).

3 Invited talk at Modern Trends in Quantum Chromodynamics, “Boost Invariant Leptonic Observables and Reconstruction of Parent Particle Mass,” Y. Sumino, (DESY Zeuthen, Germany, 2011.10.5).

4 「LHC が切り拓くテラスケール物理」研究会 講演 “Boost Invariant Leptonic Observables and Reconstruction of Parent Particle Mass,” Y. Sumino, (2011.8.22 東京大学).

〔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〕

集中講義、於ドイツ・カールスルーエ大学 “Understanding Interquark Force and Quark Masses in Perturbative QCD,” 隅野行成, 2013.11.27-12.5.

集中講義、於京都大学「摂動 QCD に基づくクォーク間力とクォーク質量の理解」, 隅野行成, 2013.7.8-10.

集中講義、於立教大学 “Understanding Heavy Quark-AntiQuark System by Perturbative

QCD, ” 隅野行成, 2012.11.29-30.

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・准教授

研究者番号：80260412