

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：32620

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400255

研究課題名(和文) ILCにおけるトップ・クォーク質量と湯川結合定数の測定

研究課題名(英文) Top quark mass and Yukawa coupling determinations at ILC

研究代表者

清 裕一郎 (Kiyo, Yuichiro)

順天堂大学・医学部・准教授

研究者番号：60571338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ILCにおけるトップ・クォーク質量と湯川結合定数の測定のために、 $s=340\text{GeV}$ 付近のトップ・クォーク対生成断面積を非相対論的なQCDの枠組みで計算した。QCDに関してはNNNLOの高次補正を取り込み、その他の電弱補正の主要な効果は全て取り込み、現象論的な解析に使えるような信頼性の高い生成断面積を系統的に計算するためのC++コードqqbar_thresholdを開発した。

ILCにおけるトップ・クォーク質量の理論的な測定限界について調べ、その精度は30MeV程度であることを示した。また生成断面積の湯川結合定数やトップ・クォーク崩壊幅に対する感度を調べて、その測定精度について検討した。

研究成果の概要(英文)：We computed top quark threshold cross section near 340GeV beam energy at future ILC aiming precision top mass and Yukawa coupling measurements. We made a C++ computer program, qqbar_threshold, which computes the threshold cross section in the framework of non-relativistic QCD. The code includes NNNLO QCD corrections as well as dominant electroweak corrections so that reliable theory prediction is available for phenomenology analysis.

We investigated limit of theoretical error on the top mass determination in threshold scan, and showed the accuracy is about 30 MeV. We studied the sensitivity of the threshold cross section on top quark width, Yukawa coupling and other parameters.

研究分野：QCD有効理論、トップ・クォーク質量

キーワード：QCD トップ・クォーク質量 ILC トップ・クォーク湯川結合定数 非相対論的QCD 有効理論 クォークonium

1. 研究開始当初の背景

(1) トップ・クォーク質量と湯川結合定数: トップ・クォーク質量 m_t の値は 170 GeV 付近にあることが知られており、標準理論の持つ対称性の破れのスケール ($v=246\text{GeV}$) と非常に近い値を持っている。これは、トップ・クォークが質量生成を担うヒッグス粒子と強く結合していることを意味しており、電弱対称性の破れのメカニズムにおいてトップ・クォークが何か重要な役割を果たしているのではないかと期待されている。標準理論では、トップクォーク質量は、ヒッグスの真空期待値 v とトップ・クォークの湯川結合定数 y_t に関係付いており $m_t=y_t v/\sqrt{2}$ の関係式が成立する。トップ・クォーク質量と湯川結合定数を精密に測定して、この関係式を検証することは標準理論のテストとしてだけではなく、標準理論を超える新しい物理の探索においても重要であると考えられている。

また電弱対称性の破れを導くヒッグス・ポテンシャルの安定性を調べてみると、トップ・クォーク質量の値によって真空の安定性の様子が大きく変わってしまうことが知られている。よって、将来トップ・クォーク質量が精密に測定されることによって、現在の標準理論がどの程度高エネルギーのスケールまで成立しているのかという知見が得られる。

(2) ILC(リニア・コライダー)実験: ハドロン・コライダー実験においても、トップ・クォーク質量の測定に関しては様々な手法が提案されてきたが、強い相互作用の特性からくるカラー閉じ込めやハドロン化の影響によって、理論的にも実験的にも様々な困難が生じることが知られていた。従って、クォーク質量の精密測定は、QCD の不定性が小さい e^+e^- 衝突を用いたレプトン・コライダーによる ILC 実験が最適であると考えられている。特にトップ・クォークと反トップ・クォークが対生成する $\sqrt{s}=350\text{GeV}$ の閾値付近の断面積を測定する threshold scan によってトップ・クォーク質量を決定する手法は理論的にもよく研究されており、実験的にもクリーンであると考えられている。Threshold scan における QCD の高次補正も精力的に研究されており、QCD の Next-to-Next-to-Leading Order(NNLO)の生成断面積が知られていた。次の高次補正 Next-to-Next-to-Next-to-Leading-Order (NNNLO) についても、殆どのマッピング係数は計算されていたが、それらを統合して生成断面積を計算する作業が残されていた。

2. 研究の目的

上で述べたように、トップ・クォーク質量と湯川結合定数の測定は、素粒子の標準理論を超える新しい物理を探る上で重要であり、その具体的な実現方法として、本研究では

International Linear Collider(ILC)におけるトップ・クォーク対生成の閾値付近の threshold scan を中心課題として研究する。

より具体的には、これまで知られている NNLO の理論計算の次の次数である NNNLO の理論計算を行う。これによって、理論計算の精度を向上させ、実験の測定精度の限界に近づけることを可能とする。トップ・クォーク質量や湯川結合定数が標準理論の予言値とずれている場合には、その微小なずれの効果を分別するために実験精度の向上だけではなく、理論計算の精度も限界まで高めておく事が必要となる。研究の推進を確実なものとするために、以下のような細分化された目的をたてた。

(1)QCD の NNNLO の高次補正を取り込んだ生成断面積の計算を可能にするコンピューター・プログラムを開発し、トップ・クォーク対の生成断面積の計算を高速化する。開発したコンピューター・プログラムは一般に公開し、シミュレーション・スタディーを行う他の研究者に利用してもらう。このことによって、ILC 実験を計画している実験家や測定装置の開発を行なっている研究者との連携を図り、理論物理と実験物理の分野を繋ぐ新たな共同研究を推進し ILC プロジェクトに貢献する。

(2)標準理論によれば、トップ・クォークの崩壊幅は $\Gamma_t=1.3\text{GeV}$ 程度である。このような大きな崩壊幅を持ったトップ・クォークを取り扱うためには不安定粒子に対する有効理論(unstable particle effective field theory)を使う必要がある。この有効理論を用いて、threshold scan における QCD 補正と電弱補正を系統的に取り扱うための手法を研究する。

(3)閾値付近の threshold scan から標準理論のパラメーターがどの程度の精度で測定可能となるのか研究する。調べるパラメーターとしては、トップ質量 m_t 、崩壊幅 Γ_t 、QCD 結合定数 α_s 、湯川結合定数 y_t を考え、生成断面積測定がそれらパラメーターにどの程の感度を持つのか数値解析を行う。

(4)本研究の中心課題は、ILC におけるトップ・クォークの物理であるが、得られた知見を有効活用する目的で、既に実験データが存在する物理量に適用して手法の正当性や有効性を検証する。具体的には、ボトム・クォークやチャーム・クォークに関する物理量に非相対論的 QCD を適用してボトムやチャーム・クォーク質量の決定を行う。

3. 研究の方法

(1) トップ・クォーク対生成断面積を非相対論的な QCD(Nonrelativistic QCD; NRQCD)有効理論を使い計算する。NRQCD のパラメータを決めるマッチングを NNNLO のオーダーで行い、既に知られているマッチング係数とこれまで知られていない新しいマッチング係数を得る。このマッチングの計算では伝統的な摂動論的な s 展開と閾値付近でのトップ・クォークの速度 v が小さいために v/c 展開が使える(c は光速)。

(2) 生成断面積の計算には、 s に関する摂動展開では計算できない物理量として、トップ・クォーク対の束縛状態を記述する波動関数やグリーン関数の計算が必要となる。これらについては、NRQCD を使って、問題を場の理論的な計算から量子力学系の問題まで単純化することができる。量子力学系では、波動関数やグリーン関数といった物理量は比較的簡単に計算ができる。但し、NRQCD から導かれた量子力学の計算では、通常の量子力学系では計算不可能な特異性の高いポテンシャルが現れるので、それらの繰り込みに関しては、やはり場の理論としての NRQCD 有効理論の理解が必須である。

(3) マッチングと非相対論的な有効理論に基づく量子力学系の計算が完了すれば、それらを組み合わせて現象論的な数値解析を行う必要がある。これらの計算に関しては、我々の先行研究において、数式処理ソフト *Mathematica* を使ったコンピューター・プログラムが存在するが、数値計算の実行時間が非常に長く、現実的なシミュレーション・スタディーには適さない。よって、新たに、高速で数値計算が可能なプログラミング言語 C++ を使ったコンピューター・プログラム qqbar_threshold の開発を行う。プログラムは一般公開し、メンテナンスを行うことを想定して、機能やライブラリーの拡張性を持たせて製作する。

(4) qqbar_threshold を使って、トップ・クォーク生成断面積が様々なパラメータに対してどの様な感度を持っているのか数値解析を行う。特に、ヒッグス粒子との結合を決める湯川結合定数 y_t に対する感度は重要なので詳細に調べる。

(5) ボトム・クォークやチャーム・クォークは非摂動論的な QCD のスケール q_{CD} と比較すると重いクォークと考えることができるので、トップ・クォークの物理研究で得られた知見を応用できる。本研究で得られた NRQCD ラグランジアンや NNNLO グリーン関数の計算を使ってボトムニウムやチャームニウムのエネルギーを計算すれば、ボトム・クォークやチャーム・クォークの質量決定の精度を上げることができることを示す。

4. 研究成果

(1) トップ・クォーク対生成断面積：計算に必要なマッチング係数の計算では、共同研究をしていたグループ内で全ての計算が完了し QCD の NNNLO の生成断面積を計算することができた。また、非相対論的なグリーン関数の計算もマッチング係数と同じスキームで NNNLO まで実行した。これらの結果を統合して NRQCD のフレーム・ワークで閾値付近の生成断面積が NNNLO の精度で得られ(図 1)、これまでに知られていた NNLO の理論計算の精度を大きく改善することができた。NNNLO の断面積のピークの位置はエネルギーにして 100MeV の精度で決まっており、断面積の大きさの持つ誤差は 5%程度まで抑えられた。

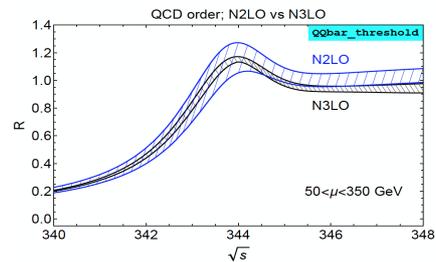


図 1 : NNNLO 生成断面積

(2) 崩壊幅 Γ_t に対する感度：トップ・クォークの崩壊幅を 100MeV 程度変化させた場合、その影響は生成断面積の持つ不定性よりも大きな効果として測定可能であり(図 2) threshold scan によってトップ・クォークの崩壊幅を 100MeV のオーダーで決定できることを示すことができた。

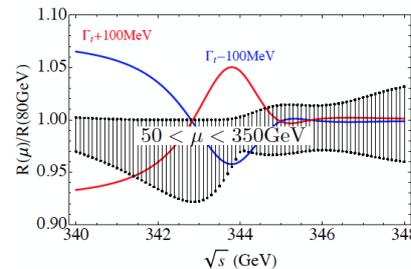


図 2 : Γ_t の変化と断面積の不定性

(3) ヒッグス・ボゾンの効果：ヒッグス粒子とトップ・クォークの相互作用は湯川結合定数 y_t で決まっていることから、この効果は湯川定数の測定感度を決定する。断面積に対するヒッグス粒子の効果は断面積のピーク付近で 8%程度まで大きくなるが(図 3) トップ・クォークの閾値を超えた高エネルギー領域では 5%程度に落ち着くことが分かった。閾値より下ではその効果は小さく 1%程度である。よって、ヒッグス粒子の効果は断面積のピークの高さに大きく

現れることが分かった。Threshold scan によって測定した生成断面積からヒッグスの効果を引き出す際には、この情報を使ったフィッティングをすることが必要となるだろう。

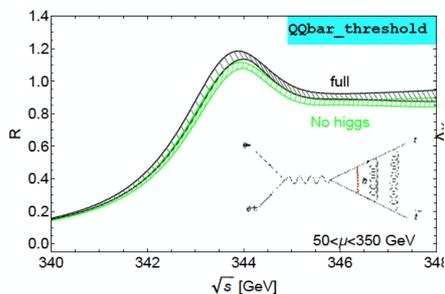


図 3：断面積に関するヒッグス粒子の効果

(4) qqbar_treshold(C++ code) : 閾値付近の生成断面積に関するプロットは C++ プログラムである qqbar_threshold で計算した。今後 ILC プロジェクトを推進する他の研究者によって、より現実的なシミュレーション・スタディーが行われる際に有効活用されることを期待して、hepforge webpage において qqbar_threshold を一般公開した。また、qqbar_threshold は QCD 補正だけではなく、現在知られている電弱相互作用の全ての計算結果が移植されている。図 4 において、QCD だけではなく、Z, W ボゾンやヒッグス・ボゾンの効果含む標準理論の生成断面積を示した。QCD 以外の効果は割と小さいが、精密測定のためにはこれらの効果を全て含むシミュレーション・スタディーが必要となる。

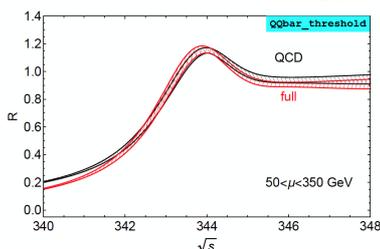


図 4：標準理論 (QCD+EW) の量子補正と断面積

(5) トップ質量のスキーム依存性 : threshold scan におけるトップ・クォーク質量測定の理論的な限界をリノーマロン解析により調べ、将来の ILC 実験におけるトップ・クォーク質量の測定は 30MeV が現段階での限界精度であることを示した。特に \overline{MS} 質量を使った理論計算が高精度の質量決定に有効であることを示した。また、現在知られている QCD 結合定数の精度 (1%程度) は ILC 実験におけるトップ・クォーク質量の測定精度とマッチしていないために、threshold scan で得たトップ・クォーク質量を他の物理量へと変換する際に、QCD 結合定数の誤差が伝搬して大きな不定性が入ってくることを指摘した。

(6) ボトム・クォーク、チャーム・クォークの質量決定：トップ・クォークの物理で得ら

れた知見、特に NRQCD ラグランジアンのマッチング係数と、ultra-soft なグルオンの量子補正に関する繰り込み処方を用いて、他の重いクォークの作る束縛状態のエネルギーを NNNLO で量子数 (n, l, m, s) に関しては任意としたエネルギー・レベルの解析的な表式を得た。現象論的な解析として、ボトムonium とチャームonium のエネルギーからボトム・クォーク \overline{MS} 質量とチャーム・クォーク \overline{MS} 質量を高精度で決定した (図 5)。

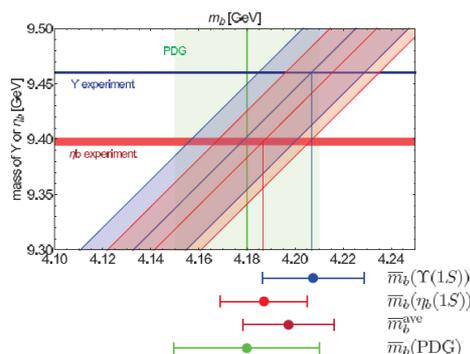


図 5：ボトム・クォーク質量の値と誤差

将来の ILC 実験におけるトップ・クォーク質量の測定結果をインプットとして他の物理量を評価する際には、ラグランジアン・パラメーターとして明確な定義を持つ \overline{MS} 質量を経由することが自然であるが、本研究を推進してゆく過程で得た知見として、現在の QCD 結合定数 α_s の精度は ILC 実験で得られるトップ・クォーク質量の精度よりも遥かに悪いということが、重要な問題として残された。そのため、将来の ILC 実験に向けてできるだけ早い時期に解決しておくべき理論的な研究テーマとして、「QCD 結合定数の高精度決定」に関する共同研究をスタートさせている。本研究で達成した課題や将来に残された問題等を継続的に研究し、将来の ILC プロジェクト推進のために役立てたい。

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)

M. Beneke, Y. Kiyo, A. Maier, J. Piclum, “Near-threshold production of heavy quarks with `QQbar_threshold`”, Computer Physics Communications **209**, 2016, 96-115, 査読有

DOI: 10.1016/j.cpc.2016.07.026

Y. Kiyo, G. Mishima, Y. Sumino, “On enhanced corrections from quasi-degenerate states to heavy

quarkonium observables”, Physics Letter **B761**, 2016, 184-189, 査読有
DOI: 10.1016/j.physletb.2016.08.026

Y. Kiyo, G. Mishima, Y.Sumino, “Determination of m_c and m_b from quarkonium 1S energy levels in perturbative QCD”, Physics Letters **B752**, 2016, 122-127, 査読有,
DOI: 10.1016/j.physletb.2015.11.040

G. Moortgat-Pick(ed), Y. Kiyo et al. , “Physics at e^+e^- linear collider”, The European Physical Journal **C75**, no.8, 2015, 371, 査読有
DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3511-9

Y. Kiyo, G. Mishima, Y.Sumino, “Strong IR cancellation in heavy quarkonium and precise top mass determination”, Journal of High Energy Physics **1511**, 2015, 84, 査読有 , DOI: 10.1007/JHEP11(2015)084

M. Beneke, Y. Kiyo, P. Marquard, A. Penin, J. Piclum, M. Steinhauser, “Next-to-next-to-next-to-leading order QCD prediction for the top anti-top S-wave pair production cross section near e^+e^- annihilation”, Physical Review Letters **115**, 2015, 192001, 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.192001

Y. Kiyo, Y. Sumino, “Full formula for heavy quarkonium energy levels at next-to-next-to-next-to-leading order”, Nuclear Physics **B 889**, 2014, 156-191, 査読有,
DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2014.10.010

[学会発表](計6件)

清 裕一郎, “ トップクォーク質量と ILC ”, 日本物理学会第 73 回年次大会素粒子論・素粒子実験合同シンポジウム「新物理学探索における ILC の意義」(招待講演), 2018 年 3 月 23 日, 東京理科大学, 野田キャンパス

高浦大雅, 隅野行成, 金児隆, 清裕一郎, “ QCD ポテンシャルを用いた α_s 決定 ”, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 23 日, 東京理科大学, 野田キャンパス

Y.Kiyo, “ Computation of top quark

threshold production ”, Workshop on Top Physics at LC 2016, July 6-8, 2016, KEK, 高エネルギー研究所(つくば市)

Y. Kiyo, “ Top mass determination - precision limit- ”, Workshop on top physics at LC 2015, 30June-3 July, 2015, IFIC-Valencia-Spain (スペイン)

清 裕一郎, “ 閾値付近のトップ生成 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ ”, ILC 夏合宿 2015, 2015 年 7 月 20 日, 群馬県伊香保温泉

Y. Kiyo, “ Quarkonium energy levels at NNNLO in perturbative QCD ”, Quarkonium Workshop 2014, 10-14 Nov. 2014, CERN (スイス)

[その他]

QQbar_threshold (hep-forge web page):
(C++コードのホームページ)

<https://qqbarthreshold.hepforge.org>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

清 裕一郎(Yuichiro Kiyo)

順天堂大学・医学部・准教授

研究者番号: 60571338