

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13481

研究課題名（和文）次世代電子陽子コライダーにおけるヒッグス粒子の研究

研究課題名（英文）Higgs studies at future electron-proton colliders

研究代表者

久世 正弘（Kuze, Masahiro）

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：00225153

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：将来の電子陽子衝突型加速器（コライダー）におけるヒッグス粒子に関する物理研究の可能性を検討した。CERNの陽子陽子衝突装置LHC（大型ハドロンコライダー）の陽子ビーム（7TeV）に新しく付設する加速器（低電力消費型のERL）の60GeVの電子ビームを衝突させるLHeCにおいて、ヒッグスとbクォークの結合定数を1%以下の精度で測定できることがわかった。またヒッグスが見えない新粒子へ崩壊する分岐比（消失モード）も5%の上限値まで感度があることがわかった（いずれも統計誤差のみ）。これらは高輝度LHCでの精度と肩を並べるか上回る精度であり、LHCとの同時実験によって物理の相補性が増すことが示された。

研究成果の概要（英文）：Higgs physics potential was evaluated for the future electron-proton colliders. By colliding one of the 7 TeV proton beams of the LHC (Large Hadron Collider) at CERN with an 60 GeV electron beam of a new power-saving Energy Recovery Linac, a new ep collision experiment can be performed (called LHeC). It was found that Higgs to b-quark coupling can be measured to better than 1%. Concerning a Higgs to invisibles decay, an upper limit of 5% branching ratio can be derived. Both results take only the statistical errors into account. These values are as good as, or even better than, the sensitivity at the high-luminosity LHC. By concurrently running both pp and ep experiments, a complementarity can be achieved and physics potential can be enhanced.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験 加速器 ヒッグス粒子 電子陽子衝突 陽子構造 LHeC LHC FCC

1. 研究開始当初の背景

陽子陽子衝突型加速器 LHC において 2012 年、ヒッグス粒子が発見された。ヒッグスの性質の詳細な研究は素粒子標準模型、およびそれを超える物理の研究において最も重要なテーマである。LHC は 2026 年より高輝度アップグレード (HL-LHC) を行いさらに高統計でヒッグスの研究を進める予定であるが、ハドロン衝突におけるバックグラウンド (特に高輝度下での同一ビームバンチ内の複数の反応 = パイルアップ) 環境が熾烈なため、全てのモードで高精度な測定をすることは難しい。電子陽子衝突型加速器ではそれをクリーンな環境で行うことができるが、ILC はまだ建設が決まっておらず、2026 年までに実験開始できる可能性は薄い。

これらの状況に対し、電子陽子衝突型加速器はパイルアップの無い環境で十分な数のヒッグス粒子を生成できる能力を持ち、LHC の陽子ビームの一つを用いることで建設コストも ILC のような高額にはならない (電子側の加速器としてエネルギー回収型ライナック ERL が研究されている)。HL-LHC と同時期に電子陽子衝突実験を CERN で行う LHeC 計画が提唱されており、ヒッグスの研究以外にも陽子構造関数の超精密測定、QCD の精密な検証など数多くの研究プログラムの可能性が考えられる。LHeC は 2012 年に CDR (概念設計書) が出版され、CERN のリサーチディレクターの下、いくつかの物理研究ワーキンググループ (WG) が組織された (研究代表者は、そのうちヒッグス WG のコンピナー)。

2. 研究の目的

本研究は、将来の電子陽子衝突型加速器におけるヒッグス粒子の精密測定のうち、HL-LHC ではハドロンバックグラウンドのため困難があるとされている b クォークとの結合定数 (Hbb 結合) およびヒッグス粒子が消失粒子に崩壊する分岐比の測定の 2 つのモードに目的を絞るとともに、WG に参加している海外の諸機関の研究者と様々な研究テーマについて議論して TDR (技術設計書) 完成へ向けた成果を生み出すことを目指す。

ベースラインである、7TeV の LHC ビームと 60GeV の ERL 電子ビームの衝突 LHeC (ep 重心系エネルギー 1.3TeV) に加え、さらなる将来計画である 50TeV 陽子ビーム (欧州の将来計画の一つ FCC=Future Circular Collider) と 60GeV の電子ビームの衝突計画 FCC-eh (重心系エネルギー 3.5TeV) についても研究対象とする。どちらの加速器も 10^{34} オーダーの루미ノシティを達成できるデザインで、1 年に 100fb^{-1} のデータを収集できる。

3. 研究の方法

研究はモンテカルロシミュレーションを基本とする。まず、ep 衝突からのヒッグス生成および崩壊は MadGraph を用いてファインマン図形を自動作成し、事象生成を行う。消失モードに関しては、標準模型で許されている $H \rightarrow ZZ^* 4$ モードをシミュレートする (分岐比約 10^{-3})。ep におけるヒッグス生成には WW 融合による CC (荷電カレント) 生成 (電子がニュートリノになる) と ZZ 融合による NC (中性カレント) 生成 (終状態に電子がある) があるが、Hbb モードに関しては、断面積が大きい (LHeC で約 0.1pb) CC 生成をターゲットとする。これは終状態ニュートリノによる消失エネルギーを要求することで断面積が大きいバックグラウンドである NC マルチジェット生成を落とせる利点も持つ。消失モードに関しては、CC 生成を要求してしまうと終状態にジェット 1 本のみのトポロジーとなってしまう、標準模型の CC 深非弾性散乱 (DIS) と区別が困難になるため、NC 生成で電子も要求することとする。

MadGraph で事象生成をした後、パートン (クォークやグルーオン) からハドロンへのハドロナイズは Pythia を用いてシミュレートする。Pythia はハドロン衝突実験でも広く使われているプログラムであるが、この WG で ep 衝突にカスタマイズされたものを用いている。

最後に測定器シミュレーションを行うが、Geant4 を用いるフルシミュレーターはまだ開発されていないため、パラメトライズシミュレーターである Delphes を用いている。ここでは LHeC の測定器 WG からフィードバックを得て、トラッキング・カロリメータ・ b ジェットタギングなどの性能パラメータ (分解能他) を LHeC 用にカスタマイズして走らせている。

ヒッグス生成の信号に対して、標準模型からのバックグラウンド過程も考えられるものを生成してシミュレートする。それぞれの過程は次項の研究成果の中で示す。このようにして信号とバックグラウンドを用意し、運動学的変数でカットをかけて行って有意なシグナルを残す解析を行う (カットベース解析)。解析の結果、信号の断面積の測定誤差が得られ、結合定数の誤差はその半分となる (断面積が結合定数の 2 乗に比例するため)。消失モードに対しては、分岐比の 95% 上限値の指標としてバックグラウンドの誤差の 2 値から導かれる値を用いた。

古典的なカットベースの解析手法に加え、多変数解析 (MVA) の手法も試した。MVA は CERN の ROOT ワークベンチに含まれている TMVA パッケージの一つである BDT (Boosted

Decision Tree)を用いた。用いる変数としては基本的にカットベース解析に用いている変数と同じものとした。各々の変数で単純なカットをするのではなく多変数の相関を用いるため、性能の向上が期待できる。

4. 研究成果

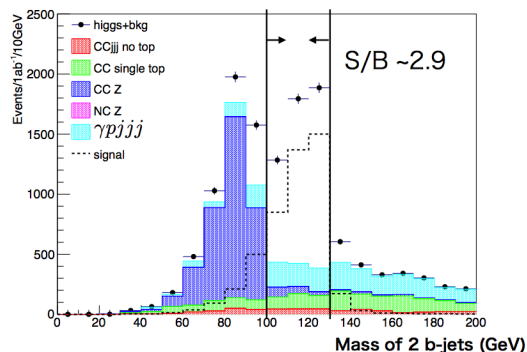
想定されるデータ量としては、いずれのモードも 1000fb^{-1} を用いている。これは 10 年分の実験データを想定している。また、CC 生成に関しては電子の偏極を -80% と仮定し、無偏極に比べて断面積を 1.8 倍多く稼いでいる。

(1) Hbb 結合定数測定

バックグラウンドの標準模型過程としては、CC 過程でのトップクォーク生成 (single top)、Z 生成および共鳴のないジェット生成からの b クォーク (誤ってタグされた c クォークおよび軽いクォーク・グルーオンを含む) を考えた、さらに NC 過程として Z 共鳴および光生成 (photo-production) によるマルチジェット生成をシミュレートした。光生成とはほぼ散乱角がゼロの電子散乱から出る実光子と陽子の反応で、ゼロ角度電子を 90% の割合で検出し排除できると仮定した。NC 反応はカロリメータの分解能から来る偽の消失エネルギーがあった場合信号領域に入る。シングルトップ生成はジェットの不变質量を計算し、トップおよび W の領域に入らないようなカットを考案した。

その結果、下図のような信号とバックグラウンドの分離が得られる結果を得た。これはカットベースの解析結果である。カロリメータの分解能で Z bb と H bb の分離がきれいにできている。ヒッグスの質量領域にある主たるバックグラウンドはシングルトップおよび光生成になっている。この結果から、LHeC での Hbb 結合定数の測定精度は約 1% で行えることがわかった。さらに、BDT を用いることで約 0.7% まで改善できることがわかっていてる。

さらに、エネルギーの高い FCC の陽子ビームを用いた場合、断面積は 5 倍以上増え、カットベースでも 0.6% の誤差で測定できることがわかった。これらの数字は統計誤差のみを考慮しており、系統誤差は考慮していない。



(2) ヒッグスの消失崩壊モードの探索

バックグラウンドの標準模型過程としては W の崩壊からのニュートリノによる消失エネルギー (CC および NC の W 生成) ならびに Z 崩壊からの消失エネルギーの寄与を考えた (NC による Z 生成)。さらに、シングルトップ、NC マルチジェットおよび光生成による W 生成もシミュレートしたが、これらの寄与は小さいことがわかった。

カットベース解析の結果、標準模型バックグラウンドが約 2000 イベント残り、これから 2 レベルでの分岐比の上限として約 6% が得られた。現在の LHC からの上限は約 30% である (ATLAS/2015)。BDT を用いると約 5% と若干の改善を見ることができた。

さらにエネルギーを上げた FCC のセットアップでは 2% 程度まで感度を上げられることがわかった (BDT 解析)。その中間のプロジェククトとして、現在の LHC リングで陽子ビームエネルギーを 2 倍 (14TeV) にした Double-LHC と電子の衝突を考えた場合、約 3% の感度となった。

このように、新しい電子陽子コライダーによってヒッグスの精密測定に大きな飛躍が期待できることがわかった。WG では隔週のテレビ会議を開催し、日本以外に英国リバプール大学、南アフリカ Wits 大学、トルコのアンカラ大学、ドイツ DESY、中国の大連理工大学、北京大学、浙江大学など国際的な枠組で理論家も含め議論した。これら共同研究者からは、Hcc 結合定数、H 4b (は新粒子)、HH 生成 (FCC-eh での研究) などの研究結果が発表された。研究成果は以下にある本課題からの発表に加え、共同研究者からも多くの国際会議で報告がなされている。

5. 主な発表文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

(1) Energy-frontier lepton-hadron collisions at CERN: the LHeC and the FCC-eh, Masahiro Kuze, Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser., 46 (2018) 1860081, 査読無, オープンアクセス.
doi:10.1142/S2010194518600819

〔学会発表〕(計 5 件)

(1) 関根達彦, 将来の電子陽子加速器 LHeC における BDT を用いた H bb 結合定数測定, 日本物理学会第 73 回年会 (2018).
(2) Masahiro Kuze, Energy-frontier lepton-hadron collisions at CERN: the LHeC and the FCC-eh, The 21st Particles and Nuclei International Conference (2017).
(3) Masahiro Tanaka, SM Higgs at the LHeC, 25th International Workshop on Deep Inelastic Scattering and Related Topics (2017).
(4) Masahiro Tanaka, SM Higgs measurements

at FCC-ep, 1st FCC Physics Workshop(2017).
(5) 河口怜志, 電子陽子コライダーLHeC におけるヒッグス粒子消失崩壊モード測定の研究, 日本物理学会秋季大会 (2016).
(5) Masahiro Tanaka, Updates on H bb studies, LHeC Workshop (2015).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

LHeC ホームページ <http://cern.ch/lhec/>

2015年度東京工業大学物理学科学士論文
河口怜志 電子陽子コライダーLHeC における
ヒッグス粒子消失崩壊モード測定の研究.

6. 研究組織

(1)研究代表者

久世 正弘 (KUZE, Masahiro)
東京工業大学・理学院・教授
研究者番号: 00225153

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者

田中 雅大 (TANAKA, Masahiro)
河口 怜志 (KAWAGUCHI, Satoshi)
関根 達侑 (SEKINE, Tatsuyuki)