

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19740165

研究課題名（和文） 超高エネルギー陽子衝突実験によるヒッグス粒子の探索

研究課題名（英文） Search for Higgs Particle in high energy proton collision experiment

研究代表者

東城 順治 (TOJO JUNJI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：70360592

研究成果の概要（和文）：LHC 加速器と ATLAS 検出器は、重心系エネルギー 900 GeV, 2.36 TeV, 7 TeV での衝突データを取得した。本研究におけるヒッグス粒子探索のための主たるプローブである電子・光子の同定と再構成の研究を行い、国際会議にて成果報告を行った。また、研究の鍵となる内部飛跡検出器について、高品質のデータを再構成することに成功し、日本物理学会にて成果報告を行った。さらに、バックグラウンドの研究では、QCD 反応過程における光子対生成について、QCD の高次補正を導入したイベントジェネレータの開発を行い、日本物理学会にて成果報告を行った。

研究成果の概要（英文）：In LHC accelerator and ATLAS detector, we obtained the first collision data at the center of mass energy of 900 GeV, 2.36 TeV and 7 TeV. Electrons and photons are main probe to search for Higgs particle in this study. We studied reconstruction and identification of electrons and photons and report the results in an international conference. The inner detector plays a key role in this study. We successfully took high quality data, which was reported in Japanese Physical Society Meeting. As a study of background, an event generator for di-photon production in QCD with higher order correction was developed. The result was report in Japanese Physical Society Meeting.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	570,000	3,670,000

研究分野：数物系化学

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：素粒子物理

1. 研究開始当初の背景

(1) ヒッグス粒子は、素粒子標準模型において電弱ゲージ対称性の自発的破れにより

素粒子の質量を生み出すという極めて重要な役割を担う未発見の素粒子である。そのため、ヒッグス粒子の実験的研究は、素粒

子物理学の最重要課題として位置づけられており、世界中の衝突型加速器において精力的に研究が行われてきた。欧州合同原子核研究所(CERN)の LEP 加速器における電子-陽電子衝突実験による直接探索、ならびに素粒子標準模型を仮定した world data の global analysis における間接探索により、114 GeV/c² から約 200 GeV/c² の質量領域にヒッグス粒子が存在すると予想されている。

(2) 米国フェルミ国立研究所の Tevatron 加速器では、陽子-反陽子衝突実験を2009年まで継続する予定であるが、重心系エネルギーとルミノシティの性能から発見可能な質量領域に限界がある。このように、ヒッグス粒子の探索は素粒子物理学の最重要課題であるにもかかわらず、現在までに稼動している衝突型加速器から有力な結果を引き出せる可能性は低く、素粒子物理学の発展にとって非常に問題である。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、CERN の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)と ATLAS 検出器を用いた最高エネルギー陽子衝突実験により、未発見のヒッグス粒子を探索・発見し、素粒子物理学の発展に貢献することである。LHC 加速器は、2007年稼動予定の陽子衝突型加速器であり、重心系エネルギー 14 TeV・ルミノシティ 10³⁴ cm⁻²・s⁻¹ という卓越したデザイン性能を有する。ATLAS 検出器は、内部飛跡検出器・超伝導ソレノイド電磁石・電磁およびハドロンカロリメータ・ミュオン検出器・超伝導トロイド電磁石からなる陽子衝突実験用大型検出器システムであり、ヒッグス粒子の存否に対して確実に実験的結果を得ることができるかと期待されている。早期の発見を有効かつ効率的に遂行するため、これまでの研究業績・経験を生かし、ATLAS 検出器の内部飛跡検出器と電磁カロリメータにより電子と光子を検出して、それらを主たるプローブとする。電子と光子を用い、ヒッグス粒子の不変質量を再構成できる崩壊モードを重点的に探索することを提案する。

(2) 早期の発見を有効かつ効率的に遂行するため、電子・光子を主たるプローブとして、ヒッグス粒子の不変質量を再構成できる崩壊モードを重点的に探索することを提案する。ヒッグス粒子は、これまでの研究から、114 GeV/c² から約 200 GeV/c² の比較的軽い質量領域に存在すると予想されている。一方、理論的には、ユニタリティ条件の制限から、約 1 TeV/c² まで許されている。生成断面積においては、100 GeV/c² 以上の領域において、gluon fusion (GF) 過程($gg \rightarrow h$)と vector boson fusion (VBF) 過程($qq \rightarrow Hqq$)

が優勢である。特に VBF 過程は、前方高横運動量ジェット tagging と中心ラビディティ領域でのジェットを veto することにより、バックグラウンドを抑制することができるため、早期発見のために重要な過程である。崩壊分岐比においては、比較的軽い質量領域では、光子対($\gamma\gamma$)への崩壊が実験的な不変質量分解能が優れているため、崩壊分岐比は $(1-2) \times 10^{-3}$ と小さいが有効的な崩壊モードである。一方、重い質量領域では、W ボソン対への崩壊(WW)が広範な領域で最大の崩壊分岐比を持ち(約 170 GeV/c² ではほぼ 100% である)、不変質量を再構成するために一つの W ボソンはレプトン対に、別の W ボソンは2つのジェットに崩壊するモード($WW \rightarrow lvqq$)が有効的である。本研究では、上述のヒッグス粒子の生成過程・崩壊モードにおける特徴と電子・光子を主たるプローブとして活用することを考慮し、VBF 過程における光子対崩壊モード($H \rightarrow \gamma\gamma$)と電子・2つのジェットを終状態とする W ボソン対崩壊モード($H \rightarrow WW \rightarrow e\nu qq$)について重点的に探索を行い、ヒッグス粒子が存在しうる全質量領域における早期発見と質量の決定を行う。

(3) LHC 加速器と ATLAS 検出器は、2007年に重心系エネルギー 900 GeV (LHC加速器への入射エネルギーでの衝突)でのコミッションを行い、2008年からは重心系エネルギー 14 TeV の物理実験を開始する予定である。2007年から2008年初期の実験データを用いてATLAS検出器の電子・光子に対する性能評価を行い、2008年から2009年に蓄積する予定である約 10 fb⁻¹ の実験データを用いて、5- σ の significance でヒッグス粒子を発見することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 電子・光子の検出に主要な役割を果たすのは、ATLAS 検出器の内部飛跡検出器と電磁カロリメータである。内部飛跡検出器と電磁カロリメータは、それぞれバレル部とエンドキャップ部から構成されている。内部飛跡検出器は、ビーム衝突点から、シリコンピクセル検出器・シリコンストリップ検出器・遷移放射検出器の順に配置しており、外側の超伝導ソレノイド電磁石により 2 T のソレノイド磁場を発生させることができる。電磁カロリメータは、アコーディオン形状の鉛電極と液体アルゴンを用いたサンプリング型カロリメータである。また、電磁カロリメータより内側の物質によるエネルギー損失を補正するため、presampler を配置している。LHC 加速器での陽子衝突実験における高粒子多重度環境下で動作させるため、各検出器が高度にセグメント化されていることである。シリコンピクセル検出は、バレル部最内層をビーム軸か

ら 4 cm に配置しており、 $50\ \mu\text{m}$ ($x\phi$ 方向) \times $400\ \mu\text{m}$ (z 方向) のピクセルピッチを有する。また、電磁カロリメータは深さ方向で3層にセグメント化されており、バレル部最内層は擬ラピディティ方向に 0.003 のストリップピッチを有する。このように大規模かつ複雑な検出器システムとそれにより取得する実験データを理解するためには、検出器の製作・オペレーション・性能評価を行うグループと議論することが重要である。

(2) LHC 加速器と ATLAS 検出器は、重心系エネルギー 900 GeV での初めてのコミッションを行う。そのコミッション前に、モンテカルロ・シミュレーションによる電子・光子の検出性能評価とそれらをプローブとしたヒッグス粒子探索の準備研究を行い、コミッション時に取得する実験データを用いた検出器の性能評価を重点的に行う。電子・光子の検出性能評価として、特に電磁カロリメータより内側の領域での物質質量を実験的に測定する手法の開発を行う。ATLAS 検出器のこの領域における物質質量はバレル部で $1.3 - 3.0 X_0$ (放射長)、エンドキャップ部で $1.0 - 3.0 X_0$ であり、電子・光子の粒子同定・運動量測定・エネルギー測定に敏感であるため、正確に評価を行うことが重要である。高統計が期待される低エネルギー光子の電子対への conversion を用い、物質質量の分布を測定する手法を開発する。さらに、得られる統計量を駆使して、inclusive の電子・光子の同定効率の研究と電磁カロリメータの較正を行い、2008年から開始する重心系エネルギー 14 TeV での衝突実験の準備とする。併行して、ヒッグス粒子探索のため、光子対崩壊モードと W ボソン対崩壊モードについての準備研究を行う。上記の物質質量測定手法を適用した電子・光子同定の効率、両崩壊モードにおけるヒッグス粒子の不変質量の再構成、主に量子色力学(QCD)反応過程に起因するバックグラウンド事象の影響、を中心的に行う。

(3) ヒッグス粒子探索のため、ヒッグス粒子の生成過程のうち、バックグラウンドを抑制することができる VBF 過程を利用することができる。そのため、VBF 過程の特徴である前方高横運動量ジェットの tagging 性能評価を行う。また、着目するヒッグス粒子の崩壊モードの研究のため、上述の電子・光子の検出性能に加え、素粒子標準模型における反応過程を利用した研究手法の開発を行う必要がある。光子対崩壊モード($H \rightarrow \gamma\gamma$)の探索のため、ジェット事象を用いた電子・光子同定手法におけるジェットの rejection 性能の研究を行う。また、光子対崩壊モードの探索で重要となる、電磁カロリメータの第1層と第2層のセグメントを利用し

た光子の入射方向測定性能の研究を行う。一方、 W ボソン対崩壊モード($H \rightarrow WW \rightarrow e\nu qq$)の探索のため、 W ボソンのレプトン崩壊モード($W \rightarrow e\nu$)を用いた missing E_T の性能とジェットへの崩壊モード($W \rightarrow qq$)を用いた W ボソンの不変質量再構成性能の研究を行う。

(4) ヒッグス粒子の生成断面積が小さいため、バックグラウンド事象の評価を精密化することが発見の鍵である。バックグラウンド事象の寄与を評価するための実験データ(コントロールサンプル)は、光子対崩壊モードにおいては多重ジェット事象($njet$)・光子と多重ジェットを含む事象($\gamma + njet$, $\gamma\gamma + njet$)、 W ボソン対崩壊モードにおいてはトップ・クォーク対生成・ W ボソンと多重ジェットを含む事象($W + njet$, $WW + njet$)が重要である。可能な限りモンテカルロ・シミュレーションに頼ることなく、実験データからバックグラウンド事象の寄与を評価する。

4. 研究成果

(1) モンテカルロ・シミュレーションによる電子・光子の検出性能評価を重点的に行った。特に、実験開始時から高統計が期待される低エネルギー光子を用いた性能評価を行った。低エネルギー光子は主に中性パイ中間子の崩壊により生成されるため、中性パイ中間子の不変質量を再構成することにより光子を選別し、検出器の光子に対する応答を調べることができる。この手法を用い、電磁カロリメータにおけるエネルギー・クラスター検出のためのアルゴリズムの最適化を行った。光子の電子対への conversion を用いた検出器内物質質量の分布測定については、内部飛跡検出器における飛跡を再構成するアルゴリズムが最適化されておらず、課題と残っている。新規にエネルギー較正用のモンテカルロ・シミュレーション・サンプルを生成し、実験初期段階での較正用初期値の精度を向上させた。また、飛跡再構成の性能は、内部飛跡検出器の物質質量に大きく左右されるため、精度の良い検出器のジオメトリーを用いてモンテカルロ・シミュレーション・サンプルを生成し、飛跡再構成の効率を向上させた。これらにより、電子・光子の同定と再構成の効率が向上した。得られた結果は国際会議にて成果報告を行った。

(2) ヒッグス粒子探索の研究については、実験初期に得られる量子色力学(QCD)反応過程に起因するバックグラウンドの研究を重点的に行った。特に光子を週状態を含む過程について、モンテカルロ・シミュレーションによる研究を行った。我々のデータ解析手法では、さまざまな実験・検出器条件を考慮してモンテカルロ・シミュレーションを行い、実デー

タを理解する方向が強力である。しかし、光子を終状態に含む過程では、量子色力学における NLO 補正を導入したイベントジェネレータは存在しない。そこで、QCD 反応過程における光子対生成について、QCD の高次補正を導入したイベントジェネレータを実データ解析に用いるべく、その開発を行った。クォーク・グルーオンから光子への **Fragmentation** 等、まだ課題は残されているが、今後も開発を続け、実データの解析に使用できるレベルまで引き上げる予定である。得られた結果は、日本物理学会にて成果報告を行った。

(3)LHC 加速器と ATLAS 検出器は、加速器マグネットの不具合等により予定は遅れたが、2009 年秋から衝突実験を開始し、重心系エネルギー 900 GeV, 2.36 TeV, 7 TeV での衝突データを取得した。本研究におけるヒッグス粒子探索のための主たるプローブである電子・光子の同定と再構成の研究を、取得した実データを用いて重点的に行った。積分ルミノシティが低いこともあり、中性パイ中間子の 2 光子崩壊の再構成とモンテカルロ・シミュレーション・サンプルを用いて、電磁カロリメータのエネルギー較正を行った。これらの研究の成果として、900 GeV における、荷電粒子多重度に関する論文を出版した。7 TeV での衝突データを高統計で蓄積し、データ解析を継続する予定である。

(4)内部飛跡検出器については、シリコンストリップ検出器のオペレーションを CERN 現地で行い、安定にデータを取得できる状態にした。特に、定常的なオペレーションで重要となる、検出器の較正を行った。性能評価の指標として、高ノイズのチャンネルは、全 6.3M チャンネルのうち、わずか 150 (0.0024%) 程度である。また、チャンネルあたりのノイズ占有率は、 5×10^{-5} という高品質の性能を発揮した。データを取得した後、ATLAS 検出器で記録した事象を再構成し、データ解析を行う。高品質の飛跡を再構成するためには、検出器の性能をモニターすることが重要である。そこで、データ取得後、かつ、事象再構成前に、生データをプロセスし、高ノイズチャンネル・ノイズ占有率・高電圧トリップ・不感チャンネル・検出効率等の情報をデータベース上で利用できるようにするためのシステムの開発を行った。通常生データでは、事象あたりのデータサイズが大きく、事象数も多いために、このようなシステムで処理を行うことは困難である。ATLAS 検出器のデータ全体ではなく、シリコンストリップ検出器のデータのみをサンプリングし、生データに書きこむ手法を取った。そのデータを処理するために特化したプログラムの開発を行っ

た。再構成プログラムは、そのデータベースを参照し、高ノイズチャンネルをマスクする等の処理を行うことにより、高品質の飛跡を再構成することができる。そのシステムならびにそれで得られた結果については、日本物理学会にて成果報告を行った。

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 3 件)

- ①The ATLAS Collaboration, G. Ada *et al.*, Charged-particle multiplicities in pp interactions at $\sqrt{s} = 900$ GeV measured with the ATLAS detector at the LHC, 査読有、Phys. Lett. B668, 2010, 21 - 42
- ②The ATLAS Collaboration, G. Ada *et al.*, Expected Performance of the ATLAS Detector - Detector, Trigger and Physics, 査読無、hep-ex.0901.0521, 2009, 1 - 1852
- ③The ATLAS Collaboration, G. Ada *et al.*, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, 査読有、JINST 3, 2008, S08003

[学会発表] (計 3 件)

- ①廣瀬穰, 花垣和則, 東城順治 他、ATLAS **SemiConductor Tracker** の Beam Data を用いた解析、日本物理学会 第 65 回年次大会、2010 年 3 月 23 日、岡山大学 (岡山県)
- ②栗原良将, 尾高茂, 東城順治、LHC 実験解析のための QCD 高次補正を含む 2 光子生成 イベントジェネレータ II、日本物理学会 第 65 回年次大会、2010 年 3 月 20 日、岡山大学 (岡山県)
- ③J. Tojo, Reconstructions of Electrons and Photons in the ATLAS Detector, The 10th ICATPP Conference on Astroparticle, Particle, Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications, 2008 年 10 月 8 日、コモ (イタリア)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東城 順治 (TOJO JUNJI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号：70360592