

機関番号：12601

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004 ～ 2009

課題番号：16081204

研究課題名（和文）アトラス検出器を用いたヒッグス粒子の発見

研究課題名（英文）Discovery of Higgs Particles by using the ATLAS Detector at LHC

研究代表者

坂本 宏 (SAKAMOTO HIROSHI)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授

研究者番号：80178574

研究成果の概要（和文）：

ジュネーブ郊外 CERN 研究所に建設された LHC 加速器による陽子陽子衝突実験アトラスにおいて標準模型で予測されながら未だ未発見のヒッグス粒子の発見を目指してきた。実験データの解析は世界ではじめて配備されたコンピューティンググリッドを用いて行われる。東京大学に導入された地域解析センターシステムを中心にグリッド上での解析環境を開発した。ヒッグス粒子の発見能力を高めるため、大量のシミュレーションデータ生成を行い、従来の 10 倍感度の高い解析方法を確立した。アトラスは現在順調にデータを取得しており、ヒッグス粒子の発見が待たれる。

研究成果の概要（英文）：

Existence of Higgs particles was predicted by the standard model but they have not yet been discovered by previous experiments. The ATLAS experiment at the LHC accelerator constructed at CERN near Geneva, is aiming the discovery. The experimental data taken by ATLAS are analyzed by using a computing grid, which is globally deployed for the first time in the world. Analysis infrastructure has been developed using the ATLAS regional analysis center system installed at the University of Tokyo. In order to improve the discovery potential of the Higgs particles, a new analysis algorithm has been established, which can find them with 10 times higher sensitivity. Now the ATLAS experiment is accumulating data intensively and the discovery is expected in near future.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004 年度	39,000,000	0	39,000,000
2005 年度	44,200,000	0	44,200,000
2006 年度	45,800,000	0	45,800,000
2007 年度	46,600,000	0	46,600,000
2008 年度	46,400,000	0	46,400,000
2009 年度	46,500,000	0	46,500,000
総計	268,500,000	0	268,500,000

研究分野：高エネルギー物理学

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：ヒッグス粒子、衝突型加速器、陽子陽子衝突、最高エネルギー、コンピューティンググリッド

1. 研究開始当初の背景

LHC (Large Hadron Collider)は世界最高エネルギーでの陽子陽子衝突実験を実現する

加速器である。LHC 建設は 1994 年に CERN 理事会で正式承認され、その重要性に鑑み、わが国(当時の文部省)は加速器建設協力を表明し、1995 年より資金と技術の両面で LHC

加速器建設協力を行ってきた。これは、他の CERN 非加盟国にさきがけての貢献であり、これを契機に、米国、ロシア、カナダ、インド、イスラエルの建設協力が続いた。LHC は、TeV 領域の物理研究を直接行うことが可能な唯一の加速器であり、2007 年の稼働を目指して準備が行われて来た。アトラス実験は、この LHC 加速器を用いて行なわれる国際共同実験であり、日本の 15 の研究機関からの研究者が参加している。

LHC は未曾有の規模の素粒子物理学実験で有り、膨大なデータが生成される。それらの処理のためにはかつてない規模の計算資源が必要となる。それらを一つの研究所が用意することは現実的でない。発展してきた広域ネットワークを用い、世界中の研究機関を接続して分散して解析するスキームが可能になりつつあった。それを支える技術がコンピューティンググリッド技術で有り、LHC はグリッドを全面的に採用した世界で最初のプロジェクトである。

2. 研究の目的

スイス・ジュネーブ郊外に位置する CERN 研究所に建設された大型ハドロン衝突器 LHC で実施される ALTAS 実験のデータ解析の枠組みを構築し、その上で、素粒子の質量の起源となるヒッグス機構により予言されるヒッグス粒子を発見することを主たる研究の目的とする。さらにヒッグス粒子の特徴や様々な素粒子との結合を調べることにより標準理論で示されるヒッグス粒子であるのか、超対称性により生ずるものであるかを見極める。このことは標準理論を超えた、より深い素粒子像を確立することにつながる。

ATLAS 実験では年間数ペタバイト(10 の 15 乗バイト)に及ぶ大量のデータが得られる。これらの情報の中から効率的かつ高い確度でヒッグス粒子の存在を判定するには、かつてない規模の計算資源が必要である。世界規模で分散した解析センターを高速国際ネットワークで接続し、グリッドミドルウェアにより機能的に一体化した仮想計算システムを構築し、その上で物理解析を行う。最新の IT 技術の導入、データ解析を効率的に進める解析フレームワークの開発、さらにその上に実装される高信頼物理再構成アルゴリズムの確立などヒッグス粒子発見に必要な体制の総合的な実現が本研究の重要な任務である。

3. 研究の方法

LHC 衝突実験開始前には、解析ソフトウェアの枠組みの整備を進め、これを用いて大量シミュレーション生成を行うとともに実験開始時に備えた予行演習を、シミュレーションデータを用いて行う。実験グループ全体と

してもコンピュータシステムのコミッショニングと位置づけ、大量生成プロジェクトを実施する。そのために使用される計算グリッドミドルウェアについてもプロダクションに必要な性能が要求される。その上で実スケールの演習が繰り返し行われる。このような状況の中で物理解析体制を強化する。

物理解析を進め大量シミュレーションを行うためには実験グループ内外で行われる物理解析準備のための打ち合わせ・ワークショップに参加する必要がある。特に解析アルゴリズムの開発は重要な課題であり、特にマンパワーの重点的配置が必要である。優れた若手研究者を短期に雇用し、開発に従事させる。実験開始が近づくと、解析を支援するツールの開発も重要になってくる。本番と同じ解析環境を整備する。その上で本研究の中心課題であるヒッグス粒子の解析手法の詳細なモードに渡る徹底的な検証を行う。これらの物理解析等は CERN 研究所を中心に行われる部分が多く、そのため場合によっては年度を越えての研究者の長期派遣が必要となる。

これらの準備を整えた上で衝突実験が開始されると直ちに実データを用いた解析を進める。最初に重要なことは検出器の理解である。実際に組み込まれた検出器は、実験当初はそれぞれ正確な配置場所や信号に対する感度、検出効率など様々な情報が確定していない。それらを実験データによって確認していく作業がまず必要である。それらを進めるにあたっては既知の物理現象を用いるのが効率的である。

広域解析網を実現する計算グリッドミドルウェアの導入に当たっては開発者との緊密な連携が必要であり、CERN 等で開催される打ち合わせ等に参加するほか、欧州や台湾の開発者を招聘し、東大に導入されている地域解析センターシステムのミドルウェアの調整を行い、より効率的にデータ解析が行える環境を整備する。また、システムの高可用性を確保するため、データグリッドシステム運用のアウトソーシングの可能性の検討を進める。

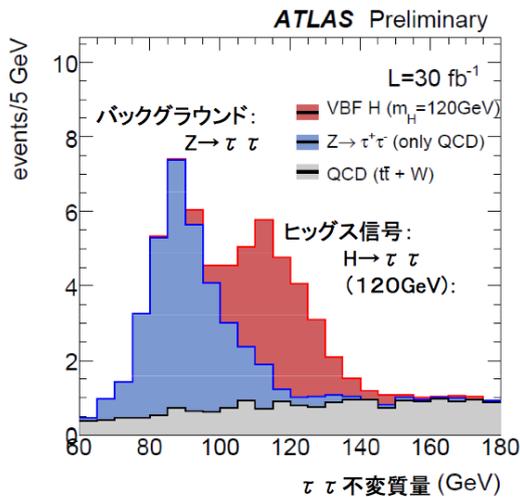
大量のファイル管理を行い、広域ネットワークに展開したシステムの監視をおこなうためのソフトウェア、効率的に大規模ソフトウェアをデバッグするための開発ツールソフトウェア等を購入し、解析環境の整備を進める。

4. 研究成果

準備段階の研究：

これまで 100fb⁻¹ の多くのデータが必要だと考えられていたヒッグス研究が、本計画研究の 2 つの大きな成果により、約 10 倍に感度が高められた。1 つは、vector boson fusion 過程 (VBF) で生成されたヒッグスボソン (H)

が $\tau\tau$ に崩壊する過程の研究を世界に先駆けて行い、高い発見能力を有することを示した。この研究で、 τ から出てくるニュートリノを全体の m_{ET} (縦方向質量欠損) 測定から分解能 9% で再構成することに成功し、下図に示すように二つの τ から H の質量を再構成し、バックグラウンド ($Z \rightarrow \tau\tau$) と分離可能なことを示した。また VBF に特有の二つの前後方放出される高い PT をもつジェットを用いて S/N を向上させた。この二つのジェットを積極的に捕らえバックグラウンドを落とすことで $H \rightarrow \gamma\gamma$ の発見能力も高くなることを示した。



実験データを用いた研究

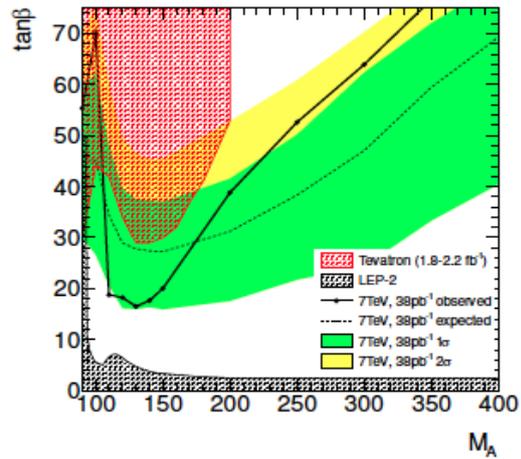
2010 年に取得された実験データを用いて本格的なヒッグス探索が行われた。まだデータが必要なミノシティーの 30 分の 1 程度の為発見には至っていないが新しい制限が多く得られた。その一部をまとめる。

- (1) 超対称性 MSSM モデルでのヒッグス粒子の制限:

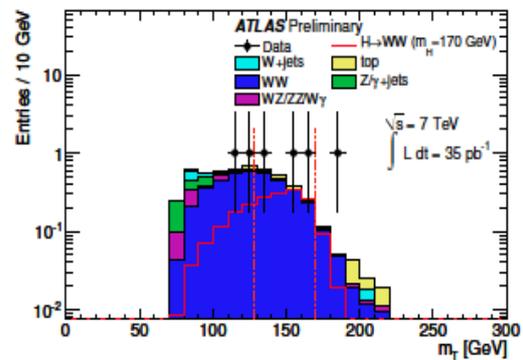
MSSM では、3つのヒッグス $H/A/h$ が $\tau\tau$ に崩壊できる。そのうち、 H/A は、 $\tan\beta$ が大きくなると崩壊分岐比大きくなり、2010 年のデータでも発見が期待されていたが、残念ながら発見には至っていない。次図に、 A の質量と $\tan\beta$ 平面で棄却された領域を示す。 A 質量 400GeV 付近まで新たに棄却された。

- (2) Higgs \rightarrow WW 探索:

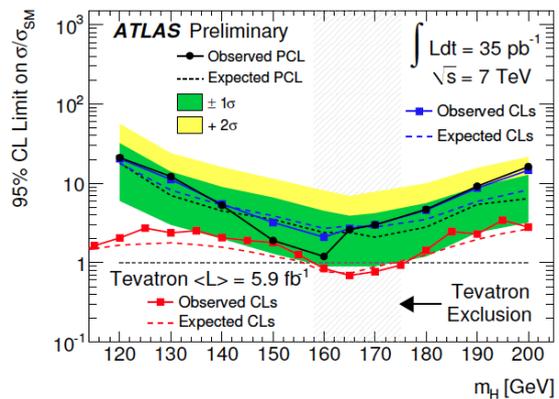
Higgs mass が 130GeV より重い場合 $H \rightarrow WW$ が主要な発見モードであり高い感度が期待されている。二つの W が共にレプトンに崩壊した場合はクリーンな信号になる。



下図は 2010 年のデータで得られた結果である。二つのレプトンと m_{ET} から MT



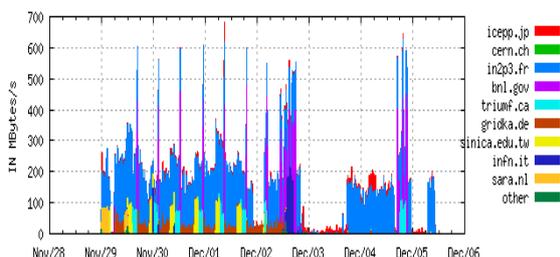
を構成している。またデータの統計が不足しているが、実験データは標準モデル WW バックグラウンドと無矛盾な分布であり、これから標準モデルヒッグスに制限が与えられた (下図)



縦軸は、95%CL で排除された断面積を標準モデルヒッグスの生成断面積で割ったもので、1 以下の領域が棄却になる。 $H \rightarrow WW$ が質量 160GeV のヒッグスが棄却され、赤線で示すテバトロンの結果とほぼ同様の感度が得られた。2011、2012 年両年で観測されるデータでヒッグス質量の全領域 (115-200GeV) で 3σ の確度での発見が可能になる。

ATLAS 実験のための分散解析網

上述のものも含め、ATLAS の物理解析を行うための分散解析網の構築が続けられてきた。LHC の 4 つの実験が共同して、Worldwide LHC Computing Grid(略称 WLCG)と呼ばれる世界規模の分散解析網を配備し、このグリッド上で解析が行われている。国立情報学研究所が運用する SINET 国際接続を利用し、地球の裏側からも大量のデータが東京に送られてきている。下図はデータ転送の様子を示したものであるが、青色のグラフが示すように、定常的に 200MB/s 以上の転送量で欧州からデータが送られてきている。このように世界中の研究者がそれぞれの研究機関にしながら解析が行える環境が整っている。



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 15 件)

[1] Study of black holes with the ATLAS detector at the LHC

J. Tanaka, T. Yamamura, S. Asai, J. Kanzaki
European Physical Journal C, 査読有り, 41 (2005) 19-33

[2] LHC 計画：最高エネルギーのビームで最極微の世界を探る

近藤 敬比古, 小林 富雄
日本物理学会誌, 査読有り, 62 (2007) 907-915

[3] ヒッグス粒子と新粒子をとらえる

浅井 祥仁,
日本物理学会誌, 査読有り, 62 (2007) 922-929

[4] LHC が開拓した技術---データ処理とソフトウェア

坂本 宏, 尼子 勝哉,
日本物理学会誌, 査読有り, 62 (2007) 942-948

[5] Data grid deployment for high energy physics in Japan

H. Sakamoto,
Computer Physics Communications, 査読有り, 177 (2007) 239-242.

[6] The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider

G. Aad et al., (The ATLAS Collaboration)
2926 人, H. Sakamoto(2248 番目), S. Asai(83 番目), T. Kobayashi(1356 番目), T. Mashimo(1694

番目), I. Ueda(2646 番目), N. Kanaya(1260 番目)
Journal of Instrumentation, 査読有り, 3 (2008) S08003.

[7] Test of Anomaly Mediation at the LHC

S. Asai, T. Moroi, T.T. Yanagida
Physics Letters, 査読有り, B664 (2008) 185-189

[8] The ATLAS Level-1 Trigger: Status of the System and First Results from Cosmic-Ray Data

G. Aielli et al., 171 人, H. Sakamoto(133 番目), T. Kobayashi(83 番目), N. Kanaya(77 番目)
Nucl. Instr. Meth., 査読有り, A581 (2007) 476-481

[9] Measuring lifetimes of long-lived charged massive particles stopped in LHC detector

S. Asai, K. Hamaguchi, S. Shirai,
Physical Review Letters, 査読有り, 103 (2009) 141803

[10] Study of the ATLAS MDT spectrometer using high energy CERN combined test beam data.

C. Adorisio et al. 197 人, H. Sakamoto(152 番目)
Nucl.Instrum.Meth., 査読有り, A598 (2009) 400-415.

[11] Commissioning of the ATLAS Muon Spectrometer with cosmic rays

The ATLAS Collaboration, G. Aad et al. 2592 人, H. Sakamoto (1975 番目), T. Kobayashi (1181 番目), T. Mashimo (1486 番目), S. Asai (91 番目), I. Ueda (2339 番目), N. Kanaya (1093 番目)

The European Physical Journal C - Particles and Fields Volume 70, Number 3 (2010) 875-916

[12] Search for New Particles in Two-Jet Final States in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector at the LHC

G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration), 3172 人, H. Sakamoto (2425 番目), T. Kobayashi (1441 番目), T. Mashimo (1815 番目), S. Asai (105 番目), I. Ueda (2864 番目), N. Kanaya (1340 番目)

Phys. Rev. Lett. 査読有り, 105 (2010) 161801.

[13] Measurement of the $W \rightarrow \ell\nu$ and $Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell$ production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ with the ATLAS detector

The ATLAS Collaboration, G. Aad, et al. 3179 人, H. Sakamoto (2434 番目), T. Kobayashi (1442 番目), T. Mashimo (1819 番目), S. Asai (106 番目), I. Ueda (2872 番目), N. Kanaya (1342 番目)
Journal of High Energy Physics, 査読有り, Volume 2010, Number 12 (2010) 1-65

[14] Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s}=7\text{ TeV}$ with the ATLAS detector

G. Aad et al. (ATLAS Collaboration) 3077 人, H. Sakamoto (2363 番目), T. Kobayashi (1406 番目),

T. Mashimo (1773 番目), S. Asai (102 番目), I. Ueda (2783 番目), N. Kanaya (1308 番目)
Physical Review D 83 (2011) 052005

[15] Measurement of the production cross section for W-bosons in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ with the ATLAS detector

G. Aad et al. (ATLAS Collaboration) 3049 人, H. Sakamoto (2330 番目), T. Kobayashi (1392 番目), T. Mashimo (1351 番目), S. Asai (109 番目), I. Ueda (2747 番目), N. Kanaya (1294 番目)
Physics Letters B Volume 698, Issue 5, 25 April 2011, Pages 325-345

[学会発表] (計 7 件)

[1] ATLAS コンピューティングとグリッド
上田郁夫

日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 24 日近畿大学

[2] Status and Outlook of LHC

T. Kobayashi,

International Workshop on the Interconnection between Particle Physics and Cosmology, PPC2007, 15. May, 2007, TAMU, Texas, USA

[3] Missing ET Performance and Impact on SUSY Physics

N. Kanaya,

SUSY 2010's, 21. June 2007, Sapporo

[4] The commissioning status and results of ATLAS level1 endcap muon trigger system

Y. Okumura,

Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, 15. Sep., 2008, Naxos, Greece

[5] ATLAS Higgs Sensitivity for 1/fb of Data at the LHC running at 7 TeV

T. Masubuchi,

The 35th International Conference on High Energy Physics, 23. July 2010, Paris

[6] Searches with isolated leptons, missing transverse energy, and in multi-lepton final states

Y. Kataoka,

18th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY10), 23. Aug. 2010, Bonn

[7] Early b physics at ATLAS

S. Oda, The Hadron Collider Physics Symposium 2010, 23. Aug. 2010, Toronto

[図書] (計 1 件)

[1] Expected Performance of the ATLAS Experiment – Detector, Trigger and Physics,

The ATLAS Collaboration (G. Aad et al.), CERN (ISBN:978-92-9083-325-1), 2009, 1828 pages.

[その他]

ホームページ等

<http://atlas.kek.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 宏 (SAKAMOTO HIROSHI)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授

研究者番号: 80178574

(2) 研究分担者

小林 富雄 (KOBAYASHI TOMIO)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授

研究者番号: 50126059

真下 哲郎 (MASHIMO TETSURO)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・准教授

研究者番号: 60181640

浅井 祥仁 (ASAI SHOJI)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号: 60282505

上田 郁夫 (UEDA IKUO)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号: 70292836

金谷 奈央子 (KANAYA NAOKO)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号: 80418780

(3) 連携研究者

吉田 肇 (YOSHIDA HAJIME)

鳴門教育大学・学校教育学部・教授

研究者番号: 10101775

田中 覚 (TANAKA SATOSHI)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号: 60251980