

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740180

研究課題名(和文)高運動量 μ 粒子で捉える新しい素粒子現象

研究課題名(英文)Search for the new physics by probing high momentum muons

研究代表者

戸本 誠 (Tomoto, Makoto)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80432235

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：世界最高エネルギー加速器実験であるLHC-ATLAS実験において、陽子陽子衝突から放出される μ 粒子に着目、集中した新物理の探索を展開した。本研究の成果を以下に記述する。

- (1) μ 粒子検出器の設置位置を測定し、設計位置と比べ最大で約5cmずれてることを確認した。この補正量を μ 粒子トリガー論理回路の中に組み入れ、トリガー回路が計算する運動量の分解能を向上させることに成功した。
- (2) 素粒子標準模型の最小限の拡張によって実現される最小余剰次元モデルによる新粒子の探索を行った。広い運動量領域の μ 粒子をプローブにして探索を行い、700GeV以下の余剰次元粒子の探索に感度のある解析結果を出した。

研究成果の概要(英文)：The search for the new physics by probing high momentum muons from proton-proton collision is performed at the LHC-ATLAS experiment which is the highest energy frontier experiment in the world. The achievements of this research are described below.

- (1) The installed position of the muon trigger detectors was measured. We figured out that some muon trigger detectors were shifted 5 cm in maximum from the designed position. Our measurement was taken into account in the muon momentum calculation of the muon trigger hardware logic. As a result the resolution of the momentum in the muon trigger was improved.
- (2) We looked for the new particles predicted by the minimal universal extra dimension model (mUED), which is the minimal extension of the standard model of the particle physics. The muons with greater than 6GeV momentum were used as a probe of the mUED particles' decay and we excluded the lightest mUED particle mass lighter than 700GeV.

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：素粒子実験 LHC加速器 アトラス実験 μ 粒子 余剰次元

1. 研究開始当初の背景

2010年3月30日からLHC-ATLAS実験は世界最高衝突エネルギーである陽子陽子衝突を開始した。ヒッグス粒子は100GeV付近、超対称性や余剰次元に代表される「新しい物理」は、TeVエネルギー領域に確実に存在するはずで、LHC実験の研究により将来50年の新しい素粒子研究様式が確定すると言っても過言ではない。

ヒッグス粒子、超対称性粒子、余剰次元粒子、その他、質量の重い新しい素粒子発見には、 μ 粒子によるトリガーが鍵を握る。安定で透過能力の高い μ 粒子は、直径25メートル、幅45メートルの円筒形巨大検出器(図1)の最外層に位置する μ 粒子検出器にまで到達し、検出器にその痕跡を残す。その特徴を活かせば、誤認識率を低く抑えつつ、ある運動量閾値以上の μ 粒子を含む事象を高い効率で選択する単純なトリガー系を構築することができる。さらには、比較的バックグラウンドの少ない環境下で、 μ 粒子の運動量分布、不変質量分布などから、既知の素粒子現象の精密測定や、ヒッグス粒子や新しい素粒子の探索が可能となる。

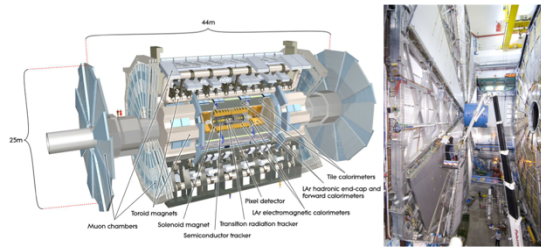


図1: LHC-ATLAS 検出器(左図), MDT 検出器(写真内左側), TGC 検出器(写真内右側)

2. 研究の目的

本研究は、多種多様な研究が進められているLHC-ATLAS実験の中で、 μ 粒子に着目、集中した研究を実施する。 μ 粒子検出器の応答を良く理解し、その知見を活かし、ヒッグス粒子や新しい素粒子の探索に貢献、挑戦する。以下の2項目が具体的な研究の目的となる。

(1) μ 粒子トリガー検出器の検出効率と運動量分解の性能を決める上で重要な要素となる μ 粒子トリガー検出器の設置位置を測定する。陽子陽子衝突点より10メートルほど離れた位置のエンドキャップ部に設置されている μ 粒子トリガー検出器(Thin Gap Chamber; TGC 検出器)の設置位置測定を行う。その観点から、 μ 粒子をプローブとした新しい素粒子物理の探索研究に貢献する。

(2) μ 粒をプローブとして、最小余剰次元モデルが示唆する新しい素粒子(以下、余剰次元粒子)の探索を行う。特に、6GeV以上の μ 粒子をプローブとして、重い余剰次元粒子

と軽い余剰次元の質量差が小さなモデルに対しても感度のある研究を展開する。

3. 研究の方法

LHC-ATLAS 実験は、2011年に重心系エネルギー7TeVの陽子陽子衝突データを 5fb^{-1} 、2012年に重心系エネルギー8TeVの陽子陽子衝突データを 20fb^{-1} 蓄積した。これらのデータを用いて、 μ 粒子トリガー検出器の設置位置測定と余剰次元粒子探索を行う。

(1) μ 粒子トリガー検出器の設置位置測定: 陽子陽子衝突によって生成された μ 粒子を用いる。 $100\mu\text{m}$ の位置決定精度を有するドリフトチューブ検出器(MDT)によって再構成された μ 粒子飛跡を用いて、 μ 粒子がTGC検出器上のどこを通過したかを予測する。その予測値と実際の μ 粒子トリガー検出器のヒット情報との差は、検出器の設置位置の設計値からずれに起因する。TGC検出器は約1488枚の畳一畳ほどの大きさの検出器を放射状に並べて直径20メートル程の大型円盤を6枚構成する。円筒型検出器の両エンドキャップに大型円盤を3枚ずつ設置する。1488枚全ての検出器にたいして設置位置を測定する。この手法でミリメートル程度の精度でTGC検出器の設置位置を測定する。さらに、この設置位置測定結果を μ 粒子トリガー回路の運動量測定論理回路に組み込み、運動量測定精度の向上を図る。

(2) 余剰次元粒子探索:

図2が示す崩壊のように重い余剰次元粒子(図2では $Q^{(1)}$ 、 $Z^{(1)}$ 、 $l^{(1)}$ の順で軽くなる)が安定で軽い余剰次元粒子(図2では $\gamma^{(1)}$)に崩壊する時に放出する μ 粒子(図2の l)をプローブとして余剰次元粒子の探索を行う。この時、 μ 粒子の運動量は、重い余剰次元粒子と軽い余剰次元粒子の質量差に依存するため、可能な限り低い運動量まで μ 粒子を検出することで探索領域を広げること可能となる。例えば、図2では、 $Z^{(1)}$ と $l^{(1)}$ の質量差や $l^{(1)}$ と $\gamma^{(1)}$ の質量差が小さい程、放出される l の運動量は小さくなる。本研究では、運動量閾値を6GeVまで下げる。具体的な信号事象の事象選別は、6GeV以上の運動量を有する μ 粒子が2本以上、運動量高運動量ジェットが2本以上、大きな欠損エネルギー(この欠損エネルギーは、暗黒物質の候補でもある $\gamma^{(1)}$ が検出器に反応せずに通過したことを考慮した事象選別である)を有する事象を選択する。主な

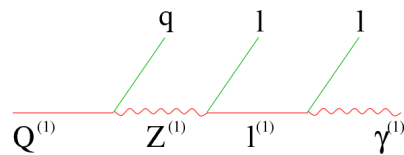


図2: 余剰次元粒子の崩壊の例

背景事象となるトップクォーク対事象や W + ジェット事象を積極的に選別したデータを詳細に調査し、信号事象の事象選別後に残存する背景事象数を実データにより導出する。

4. 研究成果

(1) μ 粒子トリガー検出器の設置位置測定：2011年初期に取得した 13pb^{-1} のデータを用いて、TGC 検出器の設置位置を測定し、設計値と比べて最大で 5cm 程度の位置のずれがある事が分かった。

この設置位置の測定結果と TGC 検出器によって測定された運動量の測定精度との間の相関を調査し、運動量の測定精度は、3 枚の円盤の相対的な位置のずれが重要となることがわかった。運動量は、片側のエンドキャップ部にある 3 枚の円盤のヒット点で結んだ線分がどれほど陽子陽子衝突点の方向を指しているかによって判断されるためである。図 3 は、1 枚目の円盤と 3 枚目の円盤が設計値と比べ相対的にどれほどずれているかを測定した結果である。縦軸と横軸は TGC 検出器の位置を示し、色の濃さは動径方向の相対的なずれをチャンネルの大きさの単位（1 チャンネルの幅は 1 cm 程度）で示す。設計値と比べ、最大で 2 チャンネル分のずれがあることを明らかにした。

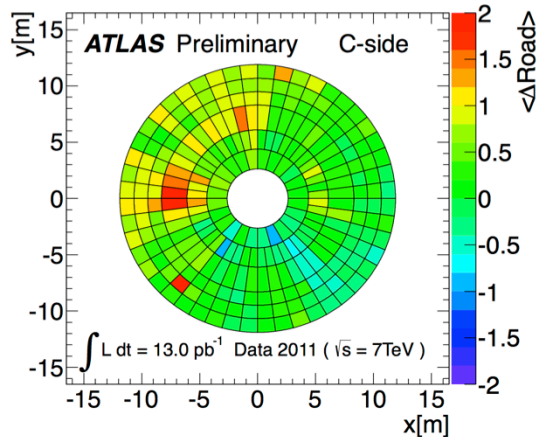


図 3：片側のエンドキャップの TGC 円盤 1 と TGC 円盤 3 の間の相対的な設置位置のずれ。

設置位置測定の結果をトリガー回路が運動量を決定する際の論理演算の中に組み入れ、運動量分解能が向上していることを確認した。特に、図 3 の赤色で示される領域 ($x=-5\text{m}$ から -10m , $y=\pm 2\text{m}$ 程度の領域) に入射した μ 粒子の運動量分解能が向上していることがわかった。これは、2011 年のデータ収集は 10GeV の運動量閾値、反応頻度が増加した 2012 年のデータ収集時でも 15GeV の運動量閾値という比較的低い運動量閾値で μ 粒子トリガー稼働させることができた要因のひとつとしてあげられる。

本研究は、ミリメートルの分解能で TGC 検出器の設置位置を測定できることを立証しただけでなく、その情報を積極的にトリガ

ー論理回路に組み込み、トリガー計算による運動量の分解能を向上させたことが成果である。こうした努力によって、より良好な条件で検出器を稼働させ続けることが可能になり、2012 年のヒッグス粒子の発見にも大きく貢献できた (図 4)。さらに、高運動量 μ 粒子に崩壊する新粒子 (Z' , W' など) 探索の研究では、TeV 領域にまで探索感を広げる事ができた。2015 年には重心系エネルギー 13TeV のデータ収集を開始し、さらにその後は陽子陽子衝突頻度の増強計画に伴うトリガーのアップグレードが計画されている。こうしたアップグレード計画は、高分解能 μ 粒子トリガー回路が必要不可欠となり、益々、設置位置の理解が重要となる。それに向けた基礎的研究を提供した点においても、本研究は評価できる。

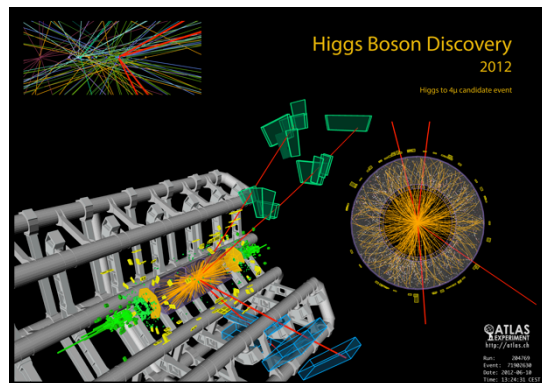


図 4：ヒッグス粒子が 4 本の μ 粒子に崩壊した事象の候補。図の赤線が μ 粒子を示しており、4 本のうち 2 本の μ 粒子が TGC 検出器によって捕らえられていることがわかる。

(2) 余剰次元粒子探索：

プレリミナリーな結果ではあるが、LHC-ATLAS 実験が 2012 年中に収集した重心系エネルギー 8TeV 、 20fb^{-1} のデータによる初めての始めて結果を発表した。従来の解析では、事象中に 20GeV 以上の運動量を持つ μ 粒子が存在することを要求していたが、本解析では運動量が 6GeV から 20GeV の μ 粒子に対して余剰次元粒子の探索に感度のある μ 粒子同定の条件を設定し、その同定条件における検出効率と誤識別率を測定した。以上の事象選別の最適化を実施した後に、信号事象選別のデータ数を導出し、信号事象選別に残存すると予想される背景事象と誤差の範囲で一致することを示した。図 5 は、95%信頼度における最小余剰次元モデルの排除領域を図示したものである (赤実線は実測上限値、黒点線は予想上限値を示す。赤点線と黄色帯で囲まれた領域は、それぞれ実測および予想の上限値に対する標準偏差の領域を表す)。横軸の $1/R(\text{GeV})$ は、最も軽い余剰次元粒子 $\gamma^{(1)}$ の質量に相当するパラメータで、縦軸の ΔR は、重い余剰次元粒子と軽い余剰次元粒子との質量差に関連のあるパラメータ (理論の定義により 1 以上、かつ、理論が適応範囲とし

て約 50 以下のパラメータ)で、小さい値ほど質量差が小さくなる。例えば、 $1/R=900\text{GeV}$ 、 $\Delta R=10$ の場合、 $\gamma^{(1)}$ の質量が 900GeV で、 $Q^{(1)}$ と $\gamma^{(1)}$ の質量差が 100GeV 程度、 $Z^{(1)}$ と $\gamma^{(1)}$ の質量差は 50GeV 程度、 $\ell^{(1)}$ と $\gamma^{(1)}$ の質量差は 10GeV 程度ある。

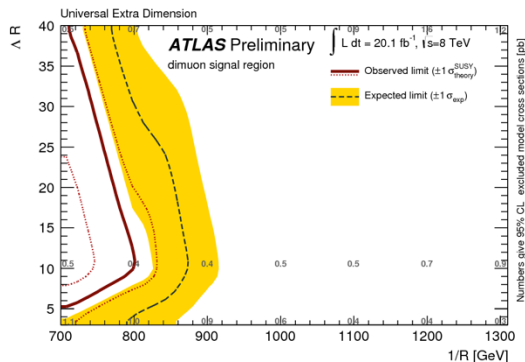


図 5: 2 本の μ 粒子に崩壊する余剰次元粒子の探索結果。横軸が余剰次元粒子の質量、縦軸が 2 つの余剰次元粒子の質量差に相当する余剰次元モデルのパラメータに相当する。黒点線は 95 信頼度における予測上限値(黄色の帯は 1σ に相当)、赤実線は 95% 信頼度における実測上限値(赤点線が 1σ に相当)。赤実線の左内側の理論パラメータを 95% 信頼度で排除したことになる。

現在の陽子陽子衝突エネルギーおよび統計数では残念ながら余剰次元粒子の発見にまで至らなかったが、検出可能な μ 粒子の運動量領域を 6GeV にまで引き下げるなどの工夫を行い、LHC-ATLAS 実験が比較的探索を不得意とする領域にまで探索領域を拡大したことが本研究の成果である。その結果、 $\Delta R \sim 10$ において、質量 800GeV 以下の余剰次元粒子の存在を棄却し、ほとんどの ΔR の領域において質量 700GeV 以下の余剰次元粒子の存在を棄却することに成功した。さらに事象選別を最適化し、低運動量 μ 粒子の感度を向上させた解析が最終段階で、近日中に学術論文としてまとめられる。

本研究は、実験的に困難な低運動量領域の μ 粒子にまで探索感度を広げて新物理探索を実施した所に意義がある。今回は、最小余剰次元モデルのパラメータ領域の棄却に特化した解析を行ったが、本解析手法は別の余剰次元モデルや超対称性粒子の探索に対しても適応可能である。今後の LHC-ATLAS 実験では、加速器エネルギーと陽子衝突頻度の増強により、さらに探索領域は広がるが、実験手法の向上によるアプローチによって、新物理の探索領域を広げることも不可欠である。本研究はその基礎研究となりうる。

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 2 件)

- ① M. Tomoto et. al., ATLAS Collaboration,

Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, Phys. Lett. B 716 (2012) 1–29, 査読有

DOI:10.1016/j.bbr.2011.03.031

- ② M. Tomoto et. al., ATLAS Collaboration, Studies of the performance of the ATLAS detector using cosmic-ray muons, Eur. Phys. J. C 71 (2011) 1593, 査読有
DOI:10.1140/epjc/s10052-011-1593-6

[学会発表] (計 8 件)

- ① Ljiljana Morvaj, Inclusive search for squarks and gluinos with the ATLAS detector, 19th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (招待講演), 2013 年 11 月 20 日, 台湾、台北
- ② 戸本誠, Measurements of the Higgs boson properties with the ATLAS detector, New Trends in High-Energy Physics (招待講演), 2013 年 9 月 22 日 ~ 2013 年 9 月 29 日, ウクライナ
- ③ 戸本誠, LHC 8TeV 実験の成果, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (招待講演), 2013 年 9 月 21 日, 高知大学
- ④ Ljiljana Morvaj, 戸本誠, Search for Minimal Universal Extra Dimension in 8TeV proton-proton collision in the ATLAS detector, 口頭発表, 2013 年 9 月 21 日, 高知大学
- ⑤ Ljiljana Morvaj, Search for supersymmetry with a compressed mass spectrum in events involving soft-lepton, jets and missing transverse momentum at 8TeV with the ATLAS detector, ポスター発表, The 2013 European Physical Society Conference on High Energy Physics, 2013 年 7 月 17 日, スtockホルム
- ⑥ 山内克哉, 戸本誠, ATLAS 実験におけるトリガー性能向上のためのミュオン検出器の精密アライメント, 口頭発表, 日本物理学会, 2013 年 3 月 29 日, 広島大学
- ⑦ 山内克弥, 戸本誠, ATLAS 実験におけるトリガー性能向上のためのミュオン検出器の設置位置測定, 口頭発表, 日本物理学会, 2012 年 9 月 14 日, 京都産業大学
- ⑧ 山内克弥, 戸本誠, 実データに基づいた ATLAS レベル 1 ミュオントリガーシステムのトリガー効率評価, 口頭発表, 日本物理学会, 2012 年 3 月 26 日, 関西学院大学

〔図書〕（計1件）

- ① 戸本誠 他, 丸善出版, ヒッグス粒子の見
つけ方～質量の起源を追う～, 2012, 136

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戸本 誠 (TOMOTO, Makoto)

名古屋大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：80432235