

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540358

研究課題名(和文)LHC ATLAS実験における新粒子探索用ミュオントリガーの開発

研究課題名(英文)Development of the muon trigger for new particle searches at LHC ATLAS Experiment

研究代表者

長野 邦浩(NAGANO, Kunihiro)

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・准教授

研究者番号：90391705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：世界最高エネルギーでの陽子・陽子衝突実験ATLASにおいて、ミュオン検出器を用いたオンライン事象選択(トリガー)を開発した。短い計算時間で運動量分解能とトリガー効率を高めることに成功した。開発したトリガーアルゴリズムを実際にオンラインへ導入し、2012年運転でデータ取得を行った。取得されたデータの解析から、ヒッグス粒子の発見などの大きな成果が得られている。

また、ミュオン検出器のみを用いることで従来のトリガーでは効率が低い特定の新粒子探索にも感度を高めた。さらにトリガー頻度を下げるときの開発研究を行い、再構成手法を改善して運動量分解能やバックグラウンド排除を高めることに成功した。

研究成果の概要(英文)：An algorithm for the online event selection (trigger) for muons was developed in the ATLAS experiment at the LHC, the highest energy proton-proton collider. The momentum resolution and the trigger efficiency were improved, while the processing time was kept fast. This algorithm was used in the ATLAS data taking in the year 2012. Many physics results, including the discovery of the Higgs boson, have been achieved by using these data triggered by the muon trigger that includes this new algorithm. In addition, to enhance the sensitivity for instance to the R-parity violating supersymmetry search, a muon trigger only with the muon detector information was exploited. In order to reduce the high rate of this trigger in particular in the endcap region of the detector, a new reconstruction method of muon segment and also a new momentum reconstruction method using new detectors were developed. A higher rejection on backgrounds and an improved momentum resolution were achieved.

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：トリガー LHC 新粒子探索 高エネルギー ATLAS

### 1. 研究開始当初の背景

欧州合同原子核研究機関(CERN)において建設を進めてきた、世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器(LHC)は、2010年3月に重心系エネルギー 7 TeV での本格的実験をいよいよ開始した。LHC の大きな目的は、素粒子の標準模型が予言する唯一未発見の粒子であるヒッグス粒子の探索と、標準模型を超える高いエネルギースケールでの物理原理を調べるための新粒子の発見である。

### 2. 研究の目的

本研究は、世界最高エネルギーでの陽子・陽子衝突におけるオンライン事象選択(トリガー)を開発するものである。LHC 加速器 ATLAS 実験において、ミュオントリガーを改良してヒッグス粒子探索などへの感度を上げ、また同時に、現在のトリガーではあまり感度の高くない、R-パリティを保存しない超対称性模型での新粒子などの特定のチャンネルへの感度も上げ、LHC における新粒子発見可能性をより高めることを目的とする。

### 3. 研究の方法

ATLAS 実験ミュオントリガーでは、検出器の外側に位置するミュオン検出器で測定されたミュオン候補と、内部飛跡検出器で検出された飛跡を対応させて再構成することで運動量分解能を高め、トリガー頻度を抑えている。

① LHC 加速器の輝度を上げていくに伴い、1 事象中に同時に起こる衝突数(パイルアップ)が増え、2012 年運転は平均 25 個、2015 年からの第二期運転では平均 50 個にまで増えると予想されている。内部飛跡検出器ではパイルアップによる飛跡が沢山作られるので、対応させる際の組み合わせを間違えないように、ミュオン検出器での測定の精度を高める事がますます重要になる。

② 最も軽い超対称性粒子が R-パリティを保存せずミュオンへ崩壊するような場合、陽子・陽子衝突点から比較的離れた場所でミュオンが生成される。このような場合、内部飛跡検出器では正しい飛跡と認識されにくく、内部飛跡検出器と対応を取る通常のミュオントリガーでは効率が下がってしまう。したがって、こういった特徴をもつ新粒子の探索への感度を高めるためには、ミュオン検出器のみを用いるトリガーが必須である。

これらの理由から、本研究では、ミュオン検出器を用いるトリガーを開発することで、LHC における新粒子発見可能性をより高める事を目指した。中でも、第 2 段トリガーは 5-10ms といったきわめて短い計算時間

内で、事象選別するに必要な運動量分解能をもった再構成を行わなくてはならない難関であり、その出来不出来がミュオントリガー全体の性能を左右する。そのため、本研究ではこの第 2 段ミュオン検出器トリガーを開発した。

開発にあたっては ATLAS 実験で実際に取得した実データを用いて評価、最適化などを行った。

### 4. 研究成果

(1) ATLAS 実験トリガー系のうち、第 2 段においてミュオン検出器だけを用いるトリガーアルゴリズム(ソフトウェアプログラム)を新規に開発した。現行のソフトウェア構造では拡張が容易ではないため、一から書き直す事を選択した。ソースコードは C++ 言語で合計約 7000 行になった。また、運動量測定の際に用いる変換関数のパラメトリゼーションを改良し、運動量分解能の大きな向上を得た。さらに、検出器の読み出しに問題があった場合でもパターン認識の条件を緩めるなどしてミュオン再構成できるよう改良も加え、効率を上げた。この新トリガーアルゴリズムを ATLAS 実験オンライン環境へ導入して 2012 年の LHC 運転にて実際にオンラインで稼働させた。導入した改良箇所は全て予定通り機能し、ATLAS 実験ミュオントリガーの効率を高める事に成功した。図 1 に、2012 年 LHC 運転における ATLAS 実験ミュオントリガー効率を示す。

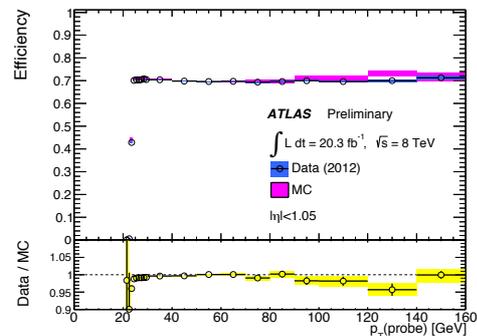


図1 2012年LHC運転におけるATLAS実験ミュオントリガー効率(バレル部)。下図はデータでの実測とシミュレーションとの比率。

広い運動量領域で高い効率でトリガーできている事がわかる。また、シミュレーションとの一致も良く、トリガー性能が良く理解できていることを示している。図2にはトリガー効率を各段階で分けて示した。第2段トリガーで効率を失うことなく、初段トリガーより厳しくカット出来ている事がわかる。

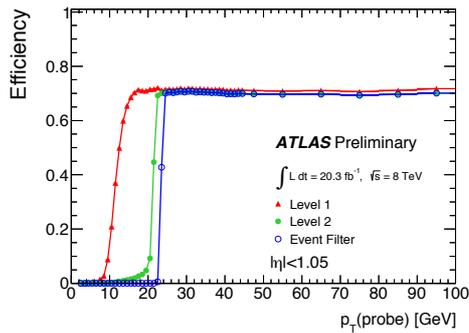


図2 2012年LHC運転におけるATLAS実験ミューオントリガー効率(バレル部)。トリガーの各段階に分けて示す。

ATLAS 実験では 2011 年と 2012 年データの解析から、ヒッグス粒子をついに発見した(参考文献[1])。この発見において、ヒッグス粒子が2つのZ粒子や2つのW粒子へ崩壊するモードの探索で、このミューオントリガーを用いて取得されたデータを用いてデータ解析がなされた。ATLAS 実験と CMS 実験におけるヒッグス粒子の発見は 2013 年ノーベル物理学賞(アンブレタール氏、ヒッグス氏)受賞の決め手となった。

また、開発したトリガーアルゴリズムを用いて、R-パリティを保存しない超対称性粒子などの新粒子探索のためにミューオン検出器のみを用いるトリガーを 2012 年運転で導入してデータを取得した。データ解析は現在進行中である。しかし、検出器のエンドキャップ領域ではトリガー頻度が高すぎてこのトリガーは使えなかった。これを改良してさらに感度を高めるため、以下の(2)、(3)の開発研究を行った。

(2) 検出器のエンドキャップ領域では崩壊二次粒子やカロリメータ内での反応による粒子などといったバックグラウンドが非常に多いことを解析により突き止めた。それらのバックグラウンドを排除するために最内層のミューオン検出器における飛跡情報が有効であることが分かったので、最内層における飛跡セグメントの再構成を改良した。まず、残留放射線などによるバックグラウンドからのヒットを時間情報からカットした。次に、飛跡パターン認識に用いるドリフトチューブの選択範囲を最適化し、また、測定された時間から位置座標への変換の際の二択の不定性を解く論理を改良した。これにより最内層での飛跡パターンの誤認識を 40%も減少させる事が出来た。図3に再構成された飛跡セグメントの角度分解能を改良前と後で示す。誤認識(分布の裾のように広がる部分)が改良後で大幅に減っているのがわかる。

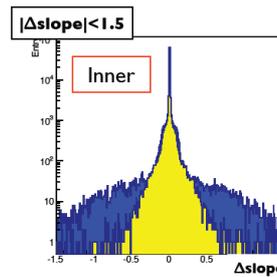


図3 エンドキャップ部最内層における再構成された飛跡の角度分解能。青色が改良前、黄色が改良後。

(3) ミューオン検出器だけを用いる新粒子探索用トリガーで高くなってしまいうトリガー頻度を下げるために、2012年運転から導入された検出器を用いたトリガー論理の開発を行った。この検出器は、エンドキャップとバレルの両方のトロイド磁石による磁場が合わさって複雑になっている幾何学的領域をカバーしている。この領域で高いトリガー頻度の原因である、悪い運動量分解能を向上させるための手法を開発した。具体的には、新検出器内で飛跡セグメント再構成し、既存の検出器で再構成された飛跡セグメントと合わせて飛跡の回転半径を幾何学的に求めて運動量を再構成した。その結果、運動量はおおむね倍程度向上した。図4にある特定の検出器位置における運動量分解能を示した。既存の再構成手法(検出条件によって2種類の手法が可能)と比べて運動量分解能が大幅に向上したのがわかる。

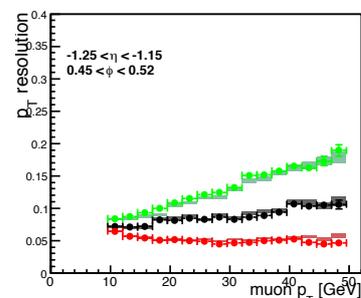


図4 横運動量分解能を横運動量の関数として示す。緑色と黒色がこれまでの再構成方法、赤色が新しく開発した再構成方法。

(4) 新粒子探索が進むにつれ、縮退した超対称性シナリオなど、崩壊時に低い横運動量を持つミューオンを放出する新粒子の探索の重要性が増してきた(参考文献[2])。これまで低い横運動量領域ではミューオントリガーの性能を精密には検証できていなかった。そこで、検証用の特別な新しいトリガーを開発して 2012 年運転に導入して、そのトリガーで得られたデータを元に効率と分解能を精査した。その際、non-prompt ミューオ

ンからの寄与の補正、バックグラウンドの除去と補正、トリガーとオフラインとの対応づけの改良、などの解析手法の大幅な開発が必要であった。測定された効率はおおむねシミュレーションと良く一致しており理解されていたが、一部、検出器境界領域や構造が複雑な場所など特定の領域での非効率などさらに改善すべき箇所も判明した(2015年運転へ向けて現在修正中)。図5に低い運動量領域で測定された効率を示す。

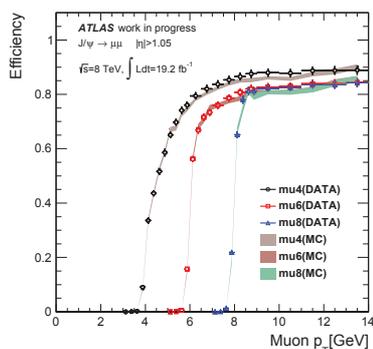


図5 低い運動量領域におけるミュオントリガー効率を示す。

(5) 本研究にて3名が修士号を取得した。

参考文献

[1] [Phys. Lett. B 716 \(2012\) 1-29](#)  
 [2] L. J. Hall, D. Pinner and J. T. Ruderman, [JHEP04\(2012\)131](#)

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0件)

[学会発表] (計7件)

① 樋口浩太

「LHC ATLAS 実験における新しいチェンバーを用いたエンドキャップミュオントリガーの改良法の研究」  
 日本物理学会第69回年次大会  
 2014年3月27-30日 東海大学

② 陳叶

「LHC ATLAS 実験におけるハイレベルミュオントリガー飛跡再構成の改良」  
 日本物理学会第69回年次大会  
 2014年3月27-30日 東海大学

③ 小林大

「LHC-ATLAS 実験における低運動量のミュオンに対するトリガー効率の精密測定」  
 日本物理学会第69回年次大会  
 2014年3月27-30日 東海大学

④ 二ノ宮陽一

「ATLAS 実験における  $Z \rightarrow \mu\mu$  事象を用いたミュオントリガー効率の測定」  
 日本物理学会第69回年次大会  
 2014年3月27-30日 東海大学

⑤ 長野邦浩

“Algorithms, performance and development of the ATLAS High-level trigger”  
 20<sup>th</sup> International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP)  
 2013年10月14-18日 アムステルダム (オランダ)

⑥ 樋口浩太

「LHC ATLAS 実験における新しいチェンバーを用いたミュオンの  $p_T$  再構成の改良法の研究」  
 日本物理学会第68回年次大会  
 2013年3月26-29日 広島大学

⑦ 北村拓己

「ATLAS 実験におけるレベル2ミュオントリガー飛跡パターン認識法の改良」  
 日本物理学会 2012 秋季大会  
 2012年9月11-14日 京都産業大学

[図書] (計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

長野 邦浩 (NAGANO, Kunihiro)  
 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：90391705

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

山崎 祐司 (YAMAZAKI, Yuji)  
 神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00311126