

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月10日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540299

研究課題名（和文） 高輝度陽子・陽子衝突実験におけるミュオン・トリガーの研究

研究課題名（英文） An study on muon trigger at proton colliders with high luminosity

研究代表者

藏重 久弥 (KURASHIGE HISAYA)

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：20205181

研究成果の概要（和文）：

7TeVでのLHC衝突実験のデータから、エンドキャップ部でのミュオン・トリガーについて、トロイド磁石近傍から発生した荷電粒子に起因するフェイク・トリガーが大部分を占めており、スモール・ウィールの検出器で、衝突点からトラックが来ていることを要求することが重要であることを示した。また、このトリガーを実現するための、トリガー・プロセッサの基本設計を行なった。

研究成果の概要（英文）：

Based on analysis of 7TeV collision data at LHC, it is found that most of muon trigger in the endcap region are fake due to charged tracks produced near the troidal magnet. So, it is very important to prove that tracks are really come from the interaction point by requesting hits in the small wheel detectors. In addition, we have made basic design of trigger processors to provide trigger performance required.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2010年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2011年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）、陽子陽子衝突実験

1. 研究開始当初の背景

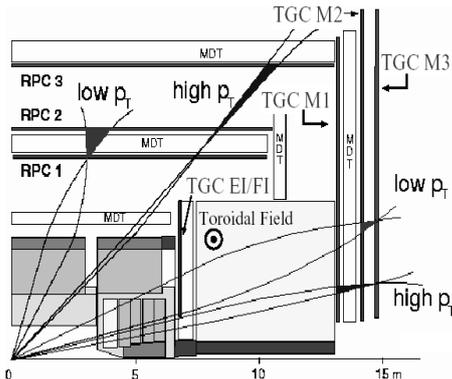
欧州素粒子物理学研究所（CERN）における陽子・陽子衝突型加速器・大型ハドロンコライダー（LHC）は重心系エネルギー14 TeVの唯一のエネルギーフロンティアである。LHCでは、ヒッグス粒子や超対称性粒子等の発見が期待されており、標準模型を超える新しい物理の寄与を探索できる。

TeV領域の物理のさらなる発展のため、このLHC実験のアップグレードとして2014～2016

年頃にルミノシティを10倍の $10^{35}/\text{cm}^2/\text{sec}$ に増強するHLLHCが検討されている。高輝度陽子・陽子衝突実験においては効率的なイベント・トリガーが必須であり、ヒッグス粒子・超対称性粒子の崩壊過程から生成されるミュオンを用いたトリガーは、バックグラウンドが少ないクリーンな信号であるため、重要度が増すと考えられた。

アトラス測定器は、空芯トロイド磁石を備えたミュオン・スペクトロメータをもち、

バレル部分に Resistive Plate Chamber (RPC)、エンドキャップ部分に Thin Gap Chamber (TGC) をトリガー・チェンバーとして、それぞれ 3 ステーション備えている。トリガー・チェンバーは、反応時間が短くバンチ識別が可能であり、ストリップ、ワイヤーによって η , ϕ 座標を cm の精度で測定する。レベル 1・ミュオン・トリガーでは、ヒット情報のコインシデンスを用いて、 η - z 、 ϕ - z 両平面上でトラック・ファインディングすることで、衝突点からのミュオンに対して大まかな Pt 測定を行い、2.5 μ 秒以内にトリガー信号を発行している。(下図)



しかし、現在のレベル 1・エンドキャップ・ミュオン・トリガー・システムでは、 $P_t > 20 \text{ GeV}/c$ のトリガーレートは $10^{35}/\text{cm}^2/\text{sec}$ では約 200kHz にも達すると予想され、データ収集の設計限界である 100kHz を超える。また、特にフォワード部分においては、トラック・レートが最大で $1 \text{ KHz}/\text{cm}^2$ を越えることが予想され、チェンバーの検出効率の低下や、ヒット占有率が高くなりすぎるため、検出器の置換の必要性が議論されている。

2. 研究の目的

LHC アップグレードにおけるアトラス実験でのエンドキャップ・ミュオン・システムについて、

- ・ 検出器及び読みだし回路
 - ・ ミュオン・トリガーのアルゴリズム及びこれを実現するトリガー回路の方式
- についての研究を進めることを目的として、以下のように進めていく。

- (1) LHC アップグレード実験において、ミュオンのトラック・レートやバックグラウンド等、ミュオン測定器の置かれる環境を、シミュレーションや低いルミノシティでの実データをもちいてスタディする。
- (2) 高輝度環境下においても、高横運動量をもつミュオン・トラックに対して検出効率を確保するとともに、バックグラウンド・ミュオンやアクシデンタル・ヒ

ットからのトリガーへの寄与を強力に抑制する為のミュオン・トリガーのアルゴリズムを検討・開発する。

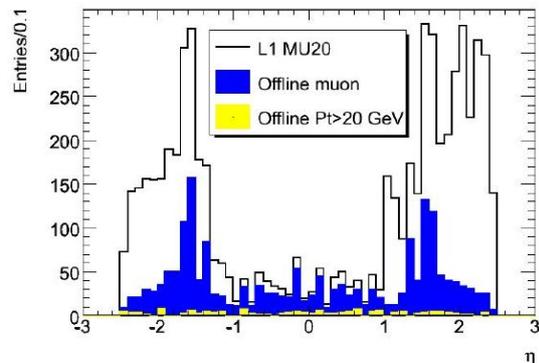
- (3) 高計数率環境下で動作するミュオン検出器の候補を、読みだし回路も含めて検討する。
- (4) 本研究で検討・開発したエンドキャップ・ミュオン・トリガー・システムが、上記の物理解析からの要求を満たすかどうか評価を行う

3. 研究の方法

- (1) 2009 年から 7TeV での衝突実験において実際のバックグラウンド状況を検討することで、高輝度実験でミュオン測定器の置かれる環境を研究する。
- (2) 20GeV/c 以上の高い横運動量をもつミュオンに限定して、トリガーのアルゴリズムを研究・開発する。高い検出効率を確保するとともに、バックグラウンドからのトリガーへの寄与を強力に抑制することが重要な鍵となる。
- (3) トリガーのアルゴリズムを実現するトリガー回路の方式について研究をすすめる。トリガー・プロセッサのプロトタイプ製作には FPGA を用いることとし、FPGA を搭載したテスト用トリガー・モジュールの設計・製作を行う。

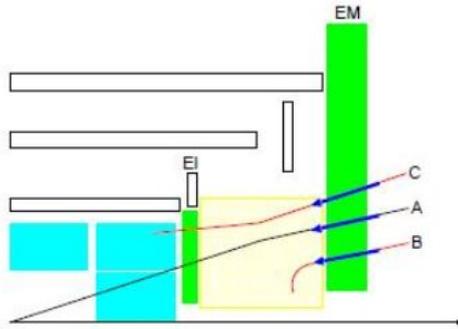
4. 研究成果

- (1) LHC は 2010 年 3 月より 7TeV での衝突実験が開始された。データを解析して、 $P_t > 20 \text{ GeV}$ という条件のレベル 1・ミュオン・トリガーされたイベントの η 分布 (ミュオンがあると判断された位置) である。(下図: 白抜きヒストグラム) このうち、青色部分が衝突点から来ているミュオンが再構成できたイベントであり、黄色部分が実際に $P_t > 20 \text{ GeV}$ のミュオンが存在するイベントである。



エンドキャップ部でのミュオン・トリガーについて、実データと事前のモンテカルロ・シミュレーションを比較した結果

- ①チェンバーのヒット・レートは予想通り
 - ②衝突点からの低横運動量ミューオンの寄与は予想より少なく 1/3 程度である。これは、モンテカルロで低い横運動領域での K, π の生成断面積の見積もりの誤差によるものである
 - ③エンドキャップ・トロイド磁石近傍から発生した荷電粒子（主に陽子）に起因するフェイク・トリガーが大部分を占めている（下図のトラック B, C）
- という事が判った。



(2) フェイク・トリガーを抑制し、トリガーレートをデータ収集の要求以下におさめるためには、トロイド磁石直前のスモール・ウィールに位置分解能及び角度分解能に優れた検出器を設置して、衝突点からトラックが来ていることを要求することが重要であることを示した。

シミュレーションの結果、R-z 平面内で、スモール・ウィールにおいて、衝突点と検出位置を結んだ直線とトラックの方向との間の角度は、 $P_t > 20\text{GeV}$ のミューオンに対しては 10mrad 以下であるので、スモール・ウィールでの角度分解能は 1mrad 程度であることが要求される。

R 方向の位置分解能としては、レベル 1・トリガーとしては数 cm で十分であるが、最終的に十分な精度でミューオンの運動量を測定するためには 100ミクロン 以下の分解能が要求される。

また、レベル 1・トリガーを発行するために、バンチ衝突間隔である 25ns 以下の時間分解能が要求される。

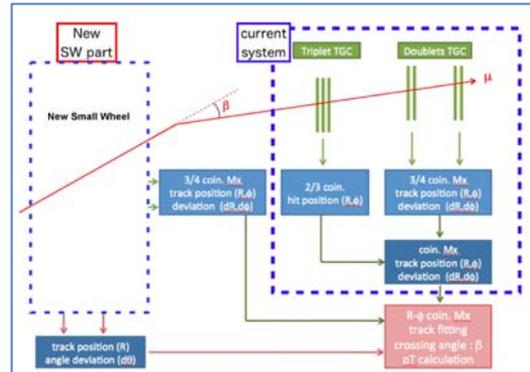
(3) 計数率の高いスモール・ウィールにおいて上記の要求を満たす検出器としては、

- ①径を小さくしたドリフトチューブ
 - ②マイクロ・パターン・ガス・チェンバー
- 等が考えられ、それぞれについてのデータ読み出し及びトリガー手法について考察した。
- ①のドリフト・チューブを使った場合でも、レベル 1 トリガーとして十分な角度分解能が出せることを示されている[論文①]が、 Φ 方向の位置測定ができないこととバンチ識

別が難しいため、従来の TGC のような補助的なトリガー・チェンバーが必要である。

②のマイクロ・パターン・ガス・チェンバーでは、角度分解能、位置分解能とも十分に要求を満たせるが、バンチ識別が難しいことと、取り扱うチャンネル数が膨大になることが問題となる。

(4) ドリフトチューブ、マイクロ・パターン・ガス・チェンバーどちらを使った場合でも、レベル 1・エンドキャップ・ミューオン・トリガーは、下図のような構成となる。

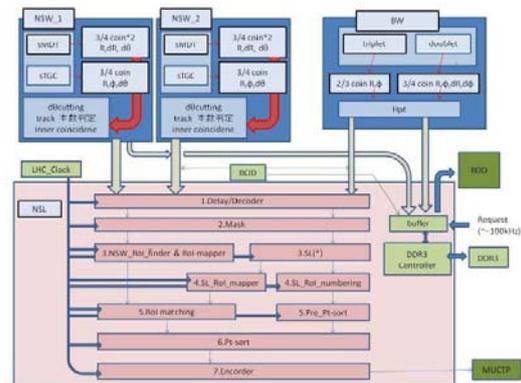


新しいトリガープロセッサ（ピンクで図示）へ

- ①スモール・ウィールでの角度測定によって、衝突点からきていることが判明したトラックについて、その R 座標
 - ②スモール・ウィールでバンチ識別の結果と、その Φ 座標
 - ③ビッグ・ウィールを用いた従来のトリガー結果 (P_t , 位置)
- が入力として与えられる。

この新しいトリガー・プロセッサのプロトタイプの基本設計を行ない(下図)、十分な処理能力が得られることが判った。

その際に、FPGA を搭載したテスト用モジュールを製作し、様々な configuration での動作テストを行った。また、光通信や高速シリアル通信の性能の確認の為の通信テストを行った。



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1件)

- ① O. Sasaki, Y. Suzuki, K. Nagano, M. Ishino, M. Ikeno, K. Bendtz, T. Domaе, H. Sakamoto, T. Kawamoto, C. Fukunaga, H. Shichi, M. Tomoto, Y. Sugaya, K. Tokunaga, H. Kurashige, “Design studies of the ATLAS muon level-1 trigger based on the MDT detector for the LHC upgrade.”, 査読有, JINST 5 C12021, 2010.

〔学会発表〕(計1件)

- ① 徳永香, 早川俊, 西山知徳, 吹田航一, 谷和俊, 藏重久弥, 川越清以, 山崎祐司, 坂本宏, 佐々木修, 石野雅也, 他 ATLAS 日本 TGC グループ, “LHC アップグレードに向けた ATLAS ミューオントリガー回路の開発”, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 14 日, 九州工業大学

〔その他〕

特に無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藏重 久弥 (KURASHIGE HISAYA)

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：20205181

(2) 研究協力者

佐々木 修 (SASAKI OSAMU)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：30178636

徳永 香 (TOKUNAGA KAORU)

神戸大学・理学研究科・博士前期課程

小西 拓也 (KONISHI TAKUYA)

神戸大学・理学研究科・博士前期課程