

令和元年5月22日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14267

研究課題名(和文) ミュー粒子稀崩壊探索実験のさらなる高輝度化に向けたソフトウェアトリガーの開発

研究課題名(英文) Development of software trigger for higher intensity rare muon decay experiment

研究代表者

内山 雄祐 (Uchiyama, Yusuke)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任助教

研究者番号：90580241

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：世界最大強度のミュー粒子ビームを用いたレプトンフレーバーを破るミュー粒子稀崩壊探索実験MEG IIにおいて課題となっている効率よいデータ削減に、ハードウェア・ソフトウェアの両観点から取り組んだ。240 MB/sで取得される大量のデータをリアルタイムで解析することで、信号事象を取りこぼすことなく30 MB/sまで削減する手法とシステムを構築した。MEG II実験の開始に先立ちデータ収集に関し準備をすすめ、目標とする実験感度(崩壊分岐比 6×10^{-14} 乗)の達成をより確実のものとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分岐比 10^{-13} 乗以下のレプトンフレーバーを破るミュー粒子稀崩壊探索は素粒子のフレーバー研究の最重要課題の一つである。実験開始に先立ってデータの取り扱いを確立したことで、目標とする実験感度の達成をより確実のものとした本研究は、国際共同実験MEG IIの成功、ひいては物理学の進展に大きく寄与したといえる。本研究によりMEG II実験に必要なストレージコストを1～2千万円程度削減できた。増大するデータ量の取り扱いは分野全体の課題であり、本研究で確立したシステムと、開発した高計数率下の事象再構成法はMEG IIのみならず他の中小規模強度フロンティア素粒子実験に生かすことができる。

研究成果の概要(英文)：We worked on an outstanding issue in the MEG II experiment from both hardware and software points of view. The MEG II experiment will search for the lepton-flavor-violating rare muon decay, μ to e gamma decay, using the world's most intense muon beam. In the experiment, the treatment of the huge amount of data is one of the challenging points. In this study, we built a system to reduce the data size from 240 MB/s to 30 MB/s without losing the signal efficiency, leading to more robust achievement of the target sensitivity.

研究分野：素粒子実験

キーワード：データ収集システム トリガー ミュー粒子稀崩壊探索 大強度加速器実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

標準理論を超えた新しい物理を明らかにすることが現代素粒子物理学の最重要課題である。実験による新物理探索はエネルギーおよび強度フロンティアに大きく分けられるが、どちらにおいてもビーム強度の向上と検出器の細分化が進み、膨大になったデータ量の取り扱いが共通の課題となっている。研究代表者はこれまで東京大学が主導する強度フロンティア実験である MEG (Mu-to-E-Gamma) に参加し、ミュー粒子の稀崩壊事象を通して超対称大統一理論に代表される新物理を探索してきた。先行実験の上限値を約 30 倍上回る感度での $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索に成功したが、発見には至っていない[1]。そこで、研究代表者らが中心となって、感度をさらに 10 倍向上させる実験 (MEG II) を提案・開発してきた[2]。これにより $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ を分岐比 6×10^{-14} まで探索する計画である。研究開始当初は検出器の開発が終了し、実験開始に向け各測定器の建設が進められていた。

また、最近の研究によりミュー粒子の生成ターゲットの物質・形状の最適化により、既存のビームラインでミュー粒子生成率を 30%–60% 向上可能であることが報告された[3]。MEG II の実験期間内に、より強いビームが得られることが現実味を帯びてきた。増強されたビームを利用し、より高い感度で探索を目指すには、実験側もより高い計数率への対応が必須である。

2. 研究の目的

MEG II 実験においてもデータ量の増大が問題であり、データ量の取り扱いが実験感度を制限する可能性がある。そこで本研究は、MEG II 実験におけるソフトウェアトリガーを開発・導入することにより、以下の 2 点を達成することを目的とする。

- (1) データ収集効率を高め、安定したデータ収集を保障することにより実験感度を最大化する。
- (2) 期待される ~50% のビーム増強 (2 倍強のデータレート) にデータ収集が対応可能であることを示し、MEG II のさらなる高輝度化の準備を進める。

3. 研究の方法

ビームレートの増倍と検出器の細分化により MEG II 実験では前身の MEG 実験と比較してデータレートが 2.4 倍 (240 MB/s) に増大すると見積もられる。ハードウェアトリガーおよび波形データ圧縮という従来の手法を改善することでデータレートを 3 分の 1 から 5 分の 1 程度に削減する。これだけでは削減率が不十分であり、また見積もりの不定性もあるため、ソフトウェアトリガーの導入によりさらに半分以下に削減する。

陽電子の飛跡情報は信号事象の選別に有効であるが、検出器の応答が遅いことと、飛跡再構成に複雑な計算が必要であるためにハードウェアトリガーでは利用できない。FPGA ベースのリアルタイム解析では不可能であるが、コンピュータを使用すれば可能となる。近年のコンピュータではデータ転送・ディスク I/O の高速化が進み一時的にデータをコンピュータ上にバッファできる。また、複数の CPU を使用することで容易に並列化ができる。このことを利用しコンピュータ上でのリアルタイム解析による高精度事象選別を実現する。

(1) ソフトウェアトリガーシステムハードウェアの構築と試験

PSI 研究所 MEG II 実験エリアのオンライン計算機システムを用い整備・試験を進める。生データの転送速度を重点的に試験し、その後、並列解析の準備・試験をおこなう。解析や記録を自動化するシステムを構築し、データベースや連携プログラムを開発する。

2017 年、2018 年と MEG II 実験のビームと検出器を用いた試験実験が実施されるのに合わせてこれらのシステムを試験する。

(2) オンライン解析アルゴリズムの開発

頑強性と高速性をもつオンライン解析アルゴリズムをオフライン用アルゴリズムをベースに開発する。

4. 研究成果

解析・ストレージシステムを構築し、その上にジョブ管理システムやデータベースなど基本となるシステムを立ち上げ、自動データバックアップ・解析環境を整えた。2017 年 9 月から 12 月にかけて MEG II 試験ランを実施し、自動データ転送システムを開発・試験した。300 MB/s

の安定転送を実現した。2018年にはDAQ・解析システムでボトルネックとなっている個所を同定し改善に取り組んだ。当初はノード・ストレージ間のネットワークは10 Gbpsのイーサネットをボンディングして用いる予定であったが、より高い信頼性と低いレイテンシーを確保するInfiniBand規格の100 Gbpsのネットワークに改良した。これによりMEG II実験での運用に耐えうるシステムを実現した。

オンラインにおけるデータ削減には実際の実験環境におけるノイズレベルと各チャンネルでのヒットレートを理解したうえでの対策が重要になる。本研究において各検出器の実データを始めて取得することに成功した。電磁カロリメータにおいてノイズが期待していたより大きいことが判明したが、データ収集回路の設計を見直すことでノイズ削減に成功した。また、高時間分解能の達成に重要な電子回路の各チャンネル間の同期精度も、目標時間分解能達成には不十分であることが判明した。この精度を向上させるためにソフトウェアによる同期手法を確立し（精度20 ps）、かつそれをオンラインでおこなうことでデータ量を抑えることに成功した。

試験ランで取得したデータとシミュレーションをもとに再構成アルゴリズムと較正手法の研究を進めた。特に、陽電子の飛跡再構成効率が研究着手時点では目標を達成していなかったため集中的に取り組んだ。飛跡検出器の建設の都合により、もともとの設計（10層）から設計変更（9層）されたことを受け、より再構成効率の達成条件が厳しくなった。

図1に本研究で開発した飛跡再構成の様子を示す。陽電子は飛跡を検出するドリフトチェンバーと、その後時間を計測するシンチレーション検出器によって測定される。ドリフトチェンバーはビームラインにより近い位置に置かれるため、最大2 MHzという高いヒットレートになるうえ、時間応答が遅い（数百 ns）ため多数の粒子の軌跡が重なって観測される（図1の緑の点が一事象中に観測されるドリフトチェンバーヒット）。そこで、素早い時間応答(<100 ps)を持った細分化されたシンチレーションカウンターのヒット情報（図中の黄色がヒットのあったカウンター）を組み合わせて解析することで、陽電子の再構成精度と効率を改善した。本研究により、10%以上の効率改善に成功した。

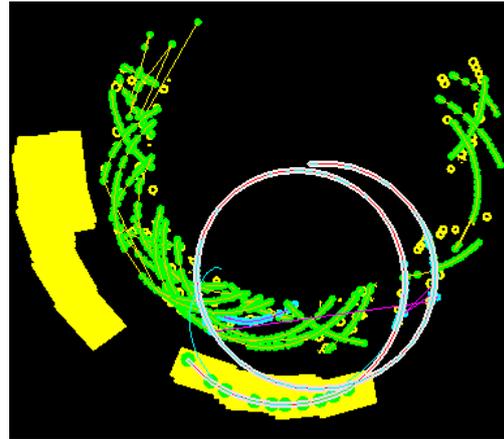


図 1 陽電子再構成の様子。

コンテナ技術をDAQ・解析フレームワークに導入し、拡張性・移植性・保守性を高めることに成功した。

共同研究者により進められているデータ収集回路の開発が遅れたため、当初計画していたMEG II実験の開始は本研究課題終了後になった。今後、本研究で開発したシステムを本実験に適用していく。Isidoriらは分岐比 10^{-13} 以下の $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索はフレーバー物理の最重要課題であると指摘している[4]。実験開始に先立ってデータの取り扱いを確立したことで、目標とする実験感度（崩壊分岐比 6×10^{-14} ）の達成をより確実のものとした本研究は、実験の成功、ひいては物理学の進展に大きく寄与したといえる。

本研究によりMEG II実験に必要なストレージ容量を約2 PB削減できたことになる。これは1～2千万円程度のコスト削減に相当する。増大するデータ量の取り扱いは分野全体の課題である。本研究で確立したシステムと、開発した高計数率下の事象再構成法はMEG IIのみならず他の中小規模強度フロンティア素粒子実験に生かすことができる。

<引用文献>

- [1] A. M. Baldini et al. (MEG Collaboration), Eur. Phys. J. C 76 (2016) 434.
- [2] Y. Uchiyama, PoS (EPS-HEP 2013) 380.
- [3] F. Berg et al., Phys. Rev. Accel. Beams 19 (2016) 024701.
- [4] R. Aleksan et al., CERN-ESG-005, (2013).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① P.W. Cattaneo, G. Boca, M. De Gerone, F. Gatti, M. Nakao, M. Nishimura, W. Ootani, M. Rossella, Y. Uchiyama, M. Usami, Design and test of the calibration system of the MEGII Pixelated Timing Counter, Nucl. Instrum. Methods A (in press), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.129>. (査読有)
- ② P.W. Cattaneo, Y. Uchiyama, et al., Development and commissioning of the 30 ps time resolution MEG II pixelated timing detector, Nucl. Instrum. Methods A (in press), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.055>. (査読有)
- ③ 家城佳, 内山雄祐, MEG II 実験 一分岐比 10^{-14} 台での $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索一, 高エネルギーニュートリノ **37** (2018) 1-10, <http://www.jahep.org/hepnews/2018/18-1-1-MEG-II.pdf>. (査読無)
- ④ A.M. Baldini, Y. Uchiyama et al. (MEG II Collaboration), The design of the MEG II experiment, Eur. Phys. J. C **78** (2018) 380, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5845-6> (査読有)

[学会発表] (計 9 件)

- ① Y. Uchiyama, MEG II offline computing, Global Developments of Researches in Lepton Flavor Physics with Muons, 2019.
- ② M. Nishimura, Full system of positron timing counter having time resolution under 40 psec with fast plastic scintillator readout by SiPMs, The 15th Vienna Conference on Instrumentation, 2019.
- ③ 宇佐見正志, MEG II 実験陽電子スペクトロメータにおける検出効率改善のための再構成アルゴリズムの研究, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018.
- ④ Y. Uchiyama, Large scale characterization of SiPMs in the MEG II experiment, Int. Conf. on Advancement of Silicon Photomultipliers, 2018.
- ⑤ 内山雄祐, $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験 MEG II 2018 年度の展望, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018.
- ⑥ Y. Uchiyama, MEG II offline and analysis resources, PSI User's Meeting BV49, 2018.

[その他]

ホームページ等

MEG 実験ホームページ <http://meg.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 宇佐見正志

ローマ字氏名 : USAMI, Masashi

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。