

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25247034

研究課題名(和文) ミュー粒子稀崩壊による超対称性理論検証のための究極性能を持つ測定器の開発

研究課題名(英文) Detector Development with the ultimate performance to verify supersymmetry via rare muon decays

研究代表者

岩本 敏幸 (Iwamoto, Toshiyuki)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：20376700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,200,000円

研究成果の概要(和文)：レプトンフレーバーを破るミュー粒子崩壊探索を目的としたMEG実験は全データを用いた世界最高感度の最終結果を2016年3月に発表した。この最終感度の一桁改善を目標にMEG II実験の研究開発を推進している。特にバックグラウンド事象の削減に決定的に重要となるガンマ線検出器の飛躍的な性能改善を、新しい光センサーによる高精細シンチレーション光読み出しにより実現することを目指している。

本研究において、液体キセノン中で使用可能な大型の新しい光センサーMPPCの開発を終了し、MEG II実験に使用可能なMPPCの大量生産を成功させた。今後液体キセノンを使用する他分野の実験への本センサーの適用可能性も示した。

研究成果の概要(英文)：The MEG experiment, which searches for the lepton flavor violating muon decay,  $\mu \rightarrow e \gamma$ , presented the final result with the full data set on March 2016. Our group promotes the MEG II experiment with a goal of one order of magnitude improvement from the MEG experiment. Especially, we are aiming at the dramatical performance improvement of the gamma detector with a new photon sensor and with a high granularity scintillation light readout.

In this research, we completed the development of the new photon sensor, MPPC which can be used in the liquid xenon, and succeeded in making the large amount of the sensors for the MEG II experiment. This will open the possibility that other projects can use this photon sensors for different purposes.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ミューオン レプトンフレーバー MEG PSI SiPM MPPC 超対称性理論

### 1. 研究開始当初の背景

2012年にLHCアトラス、CMS実験からヒッグス粒子が発見された。素粒子の振る舞いを記述する標準理論の最後の未発見粒子であったが、これが理論の完成を意味するわけではなかった。暗黒物質の存在、力の大統一の可能性等の議論より、超対称性理論を含む新しい物理の存在が必要不可欠であり、その検証が素粒子物理学の最重要課題の一つとなっていた。

ニュートリノ質量をゼロにしていた標準理論では起こりえないレプトンフレーバーを破るミュー粒子崩壊  $\mu \rightarrow e \gamma$  は、ニュートリノ振動を取り入れても崩壊分岐比は、 $10^{-50}$ 以下と計算される。一方、現在注目されている超対称性理論等が存在するとこれまでの実験の崩壊分岐比の上限値のすぐ下に来ることが予想されていた。さらにニュートリノ振動混合角  $\theta_{13}$  が比較的大きいという発見により、超対称性理論と合わせてこの  $\mu \rightarrow e \gamma$  崩壊分岐比がより大きくなることが予想され、この領域の探索が脚光を浴びていた。

MEG実験では、この  $\mu \rightarrow e \gamma$  崩壊を  $5 \times 10^{-13}$  まで探索し、2013年までデータ収集を続ける一方、測定器の性能によって制限されている実験感度をさらに一桁改善するため、検出器の分解能向上を目指して開発を続けていた。

特にバックグラウンド削減に重要となるガンマ線検出器に、より小さな新しい光センサーを開発して導入することによりエネルギー、位置、時間分解能を格段に向上できる可能性が検討されていた。

### 2. 研究の目的

現在のガンマ線検出器で問題となっていたのは、ガンマ線が入射面に近いところで反応した場合直径2インチの光電子増倍管の大きさが無視できなくなり、検出光量の一様性が失われることであった。

この点を改善するため、より小型の新しい光検出器 SiPM を用いることを検討し始めた。SiPMは1光電子が見えるため較正が容易になり、磁場中での使用も問題なく、供給電圧も100V以下と高電圧を必要としないなど、多くの優れた特徴を持つ。問題点としては、市販の SiPM は基本的に真空紫外光に感度がないことがあった。

本研究グループは浜松ホトニクスと共同ですでにこのセンサー開発を行っており、液体キセノンシンチレーション光に対して高い感度を持つ新しいシリコン半導体光検出器、MPPC(浜松ホトニクスの製品名、SiPMの一種)の試作に世界で初めて成功した。本研究において大幅に性能を改善した液体キセノンガンマ線検出器の開発研究を3年間集中的に

行い、プロトタイプ製作を通して性能を実証し、一桁実験感度を改善した  $\mu \rightarrow e \gamma$  の探索を可能にする実験の実現を目指す。

また、液体キセノン検出器は最近暗黒物質探索や二重ベータ崩壊探索等にも使用され、優れた成果を出してきており、PETなど医療応用に向けた開発も進み、幅広い分野での応用が期待されている。液体キセノンシンチレーション光は真空紫外光であるため、その検出は容易ではなく、様々な優れた特徴を持つ、全く新しい半導体光検出器の SiPM をこの真空紫外光検出器に最適化し、より高感度な検出器を実現すれば、世界的にも例をみない極めてユニークな成果となり、格段に使用範囲が広がる可能性がある。

### 3. 研究の方法

まずは SiPM 素子構造の改良による真空紫外光に対する光子検出効率の大幅な改善に取り組む。市販品の SiPM は、真空紫外光が入射窓及び素子内部の不感層で吸収されてしまい、有感領域まで到達しない。浜松ホトニクスと協力し、この保護膜を取り除く、不感層を薄くする、反射防止膜の最適化等の対策を施したサンプルの試作に成功していたため、このサンプルをベースに、有感面積を最大化する、ピクセルサイズの最適化等を、波形の時定数、入射光量に対する線型性などを考慮して行う。

さらに市販品の SiPM は当時最大 3mm 角程度であったが、液体キセノン検出器の入射面全てを新しい光センサーで覆うことを考えると、チャンネル数の増大を防ぐためにも 10mm 角程度にはする必要がある。一般的にはサイズの大形化に伴いノイズの増加が問題となるが、液体キセノン温度ではノイズレートは常温に比べて5桁程度軽減されるため、問題とはならない。これまでに得られた光子検出効率の良いサンプルで、大型化を図り、個々の液体キセノン中での性能評価を PSI にて行う。

SiPM のサンプルの作成に成功した場合には、それを実機に組み込むために具体的なデザインの検討を開始する。保護膜を取り除いて真空紫外光に対する感度を上げるが、シリコン表面はむき出しとなるため、真空紫外光を通す石英窓をつけて保護する。また低温動作に支障がないようシリコンと熱膨張率の近いセラミックを土台とし、SiPMのパッケージを作成する。これらの SiPM をプリント基板に一列に並べてモジュール化し、これを検出器に設置する。プリント基板はノイズ対策として多層基板を使用し、可能な限り信号線の周りはグラウンド線、グラウンド層とする。全体としてはガンマ線入射面に 4000 個の SiPM の導入を考えるため、クライオスタットから信号線を引き出すフィードスルーも高

密度化が必要であり、この多層基板を直接フランジに接着してフィードスルーを自作することを検討している。これらの試作品を通して、実機での信号、ノイズ等の評価を行う。

以上の開発を経て最適化された真空紫外光に感度の高い SiPM を、実際にプロトタイプ検出器として組み上げ、センサーの性能を大量に、総合的に評価する。

チャンネル数の増加に伴い、波形取得装置の改良も検討しており、SiPM に特化した波形取得装置の開発を行う。これまでの波形取得装置の機能に加えて、トリガー機能、電圧印加機能、波形増幅機構も統合され、ボード自体の小型化にも取り組む。

#### 4. 研究成果

まず液体キセノン中で使用可能な新しい光センサーMPPCの開発を継続し、光センサーの試作品を完成させた。真空紫外光に感度のある MPPC に対して、浜松ホトニクスが新技術を導入し、動作電圧領域の増加、アフターパルスの削減、また金属抵抗を導入することによりクエンチ抵抗の温度係数が小さくなり、低温時の抵抗値の増大が抑えられた。

有感面積の大型化にも着手し、キャパシタンスの増加からくる波形の時定数が伸びる問題が生じた。MEG II 実験ではより高レート下での実験となるため、パイルアップ事象の除去が必須となり、波形の時定数も抑えることが重要である。そこで 12mm 角の MPPC を 6mm 角の MPPC 4 つに分割し、それらの直列接続を行うことにより波形の時定数を短くすることに成功した。さらに電圧供給部分は並列接続にすることにより、電源から供給する電圧は 4 倍にする必要のない回路設計とした。これを一つのパッケージに組み込む設計を行い、6mm 角の MPPC 4 つから別々にピンを出し、プリント基板上でこの信号線は直列、電圧供給部分は並列の回路を実現した。同時に保護膜の代わりに表面に石英窓をつけ、プロトタイプ用 MPPC の製作を行った。

次にこの光センサーの常温における大量試験を行い、単光電子の分離、ダークレート、ゲイン、クロストークとアフターパルス等の測定を行い、個々の性能確認を行った。幾つかダークレートが高いものが見つかったが、ダークレートは低温時に 5 桁削減されるので大きな問題ではないが、実機製作の時点では浜松ホトニクスによってこれらの MPPC は除かれる。

読み出し回路の整備として、MPPC に特化した波形取得装置の開発に取り組み、MPPC に必要なアンプを搭載した試作ボードのテストを行い、ノイズレベルが十分小さいことを確認

した。

新しい高密度フィードスルーの開発に着手し、同軸ケーブルのように信号線がグラウンド線もしくはグラウンド層に覆われたようなデザインの基板を直接フランジに接着する斬新な方法にて大量のチャンネルを小さいスペースで低温容器から導き出すことに成功した。この結果、このフィードスルーをプロトタイプ検出器に導入し、液体キセノン温度でのセンサーの性能評価が可能となった。実際に、液体キセノン中で使用可能な新しい光センサーMPPC の液体キセノン中での大量試験を行い、実機とより近い環境における性能確認を行った。実機で使用予定のケーブル、コネクタから読み出し回路を合わせたノイズ測定等も行った。

MPPC のエネルギー分解能が、検出光子数が増えると検出光子数から決まる統計精度に従って向上することを、小型試験装置を用いて高統計領域においても確認した。また浜松ホトニクスが我々の光センサーにクロストーク抑制技術を適用することに成功したため、より分解能が向上した MPPC が完成した。この MPPC の常温、低温での動作試験を、小型試験装置を用いて行った。従来のクロストーク抑制機構のないセンサーと比較し、実際にクロストークが抑制されており、動作電圧範囲をさらに広くすることが可能であることを確認した。電圧をあげるとゲインが上がり、S/N の向上、さらにエネルギー分解能が向上することが確認できた。以上の開発により、ついに実機で使用する MPPC が完成した。

これらの基礎的なデータをもとに現実的なシミュレーションを行い、エネルギー、位置分解能の改善だけでなく、時間分解能の改善の可能性についても新たな知見を得ることができた。以上の研究により、MEG II 実験ガンマ線の性能改善を証明し、今後の様々な実験に対してもこの光センサーの適用可能性を示すことに成功した。

#### 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 3 件)

T. Iwamoto, LFV: mu-e gamma experiment, 査読有、Nuclear and Particle Physics Proceedings, 265-266, 2015, 320-322, 10.1016/j.nuclphysbps.2015.06.081

T. Iwamoto, The LXe calorimeter and the pixelated timing counter in the MEG II experiment, 査読有、JINST 9 C09037, 2014, 1-9, 10.1088/1749-0221/9/09/C09037

T. Iwamoto, X. Bai, T. Chiba, Y. Fujii,

T. Haruyama, D. Kaneko, A. Maki, S. Mihara, T. Mori, H. Natori, H. Nishiguchi, W. Ootani, R. Sawada, Y. Uchiyama, Development of PPDs to detect scintillation light from liquid xenon, 査読無, 2012 IEEE NSS Conference Record, N22-7, 2013, 1589-1594, 10.1109/NSSMIC.2012.6551379

〔学会発表〕(計 8 件)

岩本敏幸, MEG II 実験のための液体キセノンガンマ線検出器のアップグレードの現状、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 25 日、大阪市立大学(大阪府・大阪市)

Toshiyuki Iwamoto, Flavour experiment session summary, 25<sup>th</sup> International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos, 2015 年 6 月 12 日、Heidelberg (Germany)

Toshiyuki Iwamoto, SiPM Development for MEG II Liquid Xenon Calorimeter, IEEE NSS 2014 WS2- Workshop on large area, low background, VUV sensitive photo detectors and associated electronics, 2014 年 11 月 14 日、Seattle (USA)

Toshiyuki Iwamoto, Development of Large Area UV-Sensitive MPPCs to Detect Scintillation Light from Liquid Xenon, IEEE Nuclear Science and Medical Imaging Conference, 2014 年 11 月 10 日、Seattle (USA)

岩本敏幸, MEG II 実験の現状とその展望、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 18 日、佐賀大学(佐賀県・佐賀市)

Toshiyuki Iwamoto, The LXe calorimeter and the pixelated timing counter in the MEG II experiment, Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR14), 2014 年 2 月 28 日、Novosibirsk (Russia)

岩本敏幸, MEG 実験 2013 とアップグレード計画の現状、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 23 日、高知大学(高知県・高知市)

Toshiyuki Iwamoto, Liquid Xenon Gamma-ray Detector for the MEG Experiment: The status and the upgrade plan, Advances in Neutrino Technology 2013 (ANT 2013), 2013 年 5 月 10 日、California (USA)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：

種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩本 敏幸 (IWAMOTO, Toshiyuki)  
東京大学・素粒子物理国際研究センター・  
助教  
研究者番号：20376700

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

森 俊則 (MORI, Toshinori)  
東京大学・素粒子物理国際研究センター・  
教授  
研究者番号：90220011

大谷 航 (OOTANI, Wataru)  
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：30311335

澤田 龍 (SAWADA, Ryu)  
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：00541947

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