

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2年 6月 4日現在

機関番号：12601
研究種目：特別推進研究
研究期間：2014～2019
課題番号：26000004
研究課題名（和文） MEG II 実験 — 究極感度ミュオン粒子稀崩壊探索で大統一理論に迫る
研究課題名（英文） MEG II Experiment - Highest Sensitivity Search for Rare Muon Decay to Explore Grand Unified Theories

研究代表者
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
交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：432,000,000 円

研究成果の概要（和文）：我々の宇宙は、138億年前にミクロの宇宙が爆発的に膨張して生まれた（ビッグバン）。本研究は、その爆発的な膨張の鍵となる大統一理論を検証しようとするものである。国際研究チームを率い、スイスにある世界最強度のミュオン粒子ビームを使って、大統一理論の証拠となるミュオン粒子の稀崩壊を探索した。その結果、その崩壊が約2兆回に1回以下でしか起こらないことがわかり、大統一理論の枠組みについて厳しい制限を与えることができた。また、さらに改良して10倍感度をあげた実験装置を実現した。これによって今後4～5年のうちに大統一理論の証拠をとらえられるとの期待が高まっている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙がどうしてビッグバンから始まったのか、その謎を解く鍵となる大統一理論を検証することは、未だ知られていない物理法則の探究と宇宙論の発展に直接つながると共に、人類を産んだ宇宙の起源に迫ることになり、その文化的意義も高いと考えられる。また、究極感度の実験を実現するために新しく開発した粒子測定技術は、暗黒物質探索などの宇宙物理研究や放射線を使ったPETなどの医療診断装置などへの応用が検討されている。

研究成果の概要（英文）： Our Universe came into existence through explosive expansion of a microscopic universe 13.8 billion years ago. This research project studied the Grand Unified Theories (GUTs) which are the key to understanding the explosive expansion. We lead an international research team to search for a muon's rare decay as evidence of the GUTs by exploiting the world's highest-intensity muon beam in Switzerland. We discovered that the decay only occurs at a rate less than one per 2 trillions, which strongly constrains the general framework of the GUTs. We also successfully realized experimental apparatus that has 10 times higher sensitivity. It is expected that 4-5 years of data taking could lead to a discovery of the decay and thus evidence of the GUTs.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ミュオン粒子、荷電レプトンフレーバー物理、大統一理論、超対称性、大強度陽子加速器、液体キセノン、国際研究者交流、ポールシェラー研究所 (PSI)

1. 研究開始当初の背景

本研究の研究者は、宇宙初期に実現していたと考えられる素粒子と力の大統一（大統一理論）を検証するため、独創的で巧みな実験装置を考案・開発して国際共同実験 MEG をスイス Paul Scherrer Institute (PSI) で2008年より実施し、標準理論では起こりえないミュオン粒子の崩壊 $\mu \rightarrow e\gamma$ （ミュオン粒子がガンマ線を放出して電子に転換する崩壊：ミュオンイーガンマ崩壊）を $O(10^{-13})$ という極微の崩壊分岐比まで探索してきた。本研究開始当初において、取得したデータの約半分まで物理解析が終了していたが、残念ながら $\mu \rightarrow e\gamma$ の発見には至らず、その結果多くの理論模型が間違っていることを示し、標準的な超対称大統一理論の枠組みに対して厳し

い制限を加えた。

一方で本研究の研究者はさらに実験感度を上げるため、MEG 実験によって培った経験を基に、測定器性能の向上を目指す研究開発を進めてきた。MEG 実験では実験感度が測定器の性能によって決まっており、バックグラウンド事象を制御するために、PSI のミュオン粒子ビームの強度を落としてデータ取得を行ってきた。もし測定器の性能を改善して世界最高のビーム強度で実験を行うことができれば、さらに桁高い実験感度 (10^{-14}) を実現できるはずである。現存の加速器施設を使った実験でこの実験感度を超えることは不可能と考えられ、これが現実に到達可能な究極の実験感度となる。本研究グループは 2 年以上にわたる開発研究によってこの究極の実験感度を可能とする測定器の改良設計を完成し、2012 年暮れに MEG 実験のアップグレード実験 MEG II の提案書を PSI に提出した。この MEG II 実験提案は 2013 年 1 月に PSI の研究委員会によって承認された。

2. 研究の目的

本研究では、MEG 実験の残り半分のデータ解析を行って世界最高感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索を続ける。並行して、プロトタイプによる実証実験を行い、測定器のアップグレードを完了させる。これによって MEG より更に桁高い実験感度を上げた究極の $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験装置 MEG II を完成して、宇宙誕生の謎を解く鍵である大統一理論の検証を目指すものである。

本研究において $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊が発見されれば、標準理論を超える大統一理論などの新しい物理の存在の決定的証拠となる。さらに今後感度を上げてその分岐比・角度分布を測定できれば、新しい物理のエネルギースケールや対称性について絞り込むことも可能である。一方、もし $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊が発見されなかった場合には、力の大統一については宇宙の始まりに対する我々の標準的な理解が大きく覆され、今後の素粒子物理研究の方向性を決定的に変えることになる。

3. 研究の方法

本研究グループは、特別推進研究「MEG 実験 - レプトンフレーバーの破れから大統一理論へ」において $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を世界最高感度で探索する MEG 実験を実施し、さらに並行して、探索感度の大幅な改善に向けた測定器の研究開発を行った。ここで得られた成果を基に、本研究では以下の 2 項目により感度を 10 倍高めた $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象探索を実現する。

(1) MEG 実験で取得した全データを解析し、世界最高感度で $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索を行う。物理解析アルゴリズムの改良および各測定器の較正精度を上げることにより、統計増加 (約 2 倍) 以上の実験感度の向上を図り、 5×10^{-13} を超える感度を達成する。

(2) MEG II 実験 (図 1) を可能にする高性能測定器の建設を行う。最初の 2 年間でプロトタイプ検出器を用いた性能実証試験を行い、その後実機建設、コミッショニングを行う。本研究グループは重点的に以下の 3 つの検出器を担当する。

- 真空紫外光対応新型シリコン光センサーを用いた高精細液体キセノンガンマ線検出器
- 高時間分解能細分化陽電子タイミングカウンター
- 探索感度のさらなる改善を図る目的で新たに導入する、背景ガンマ線同定検出器

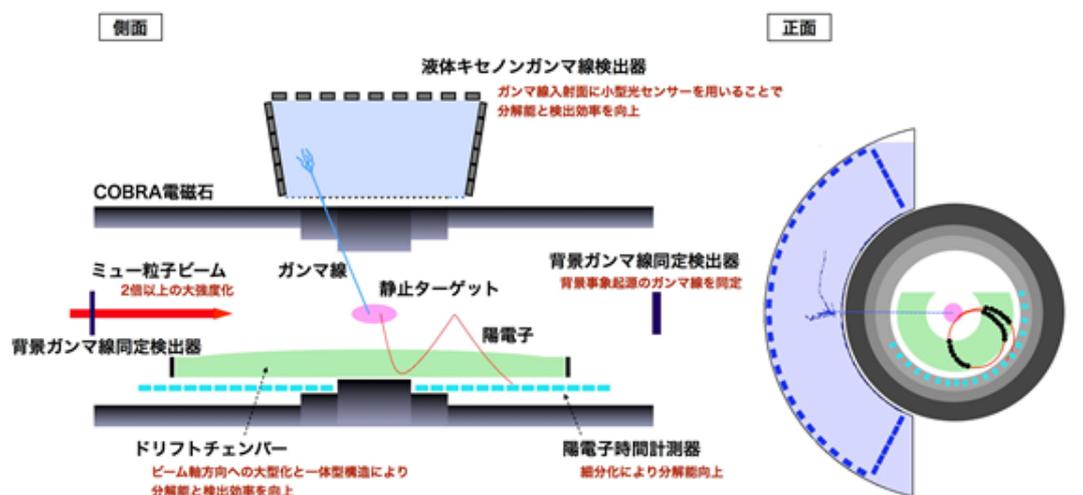


図 1 MEG II 実験概略図と実験感度向上ポイント

これら測定器の性能を大幅に改善することによりバックグラウンド事象を制御する。ミュー粒子ビーム・陽電子飛跡検出器・データ取得用電子回路を担当する海外の共同研究グループと協力し、MEG II 実験を主導して進める。これによって、PSI の世界最強度のミュー粒子ビームを使い尽くし、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を探索する究極の実験感度 6×10^{-14} を実現する。

4. 研究成果

(1) MEG 実験の全データを用いた $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索の実施

特別推進研究「MEG 実験 - レプトンフレーバーの破れから大統一理論へ」により実施した MEG 実験は 2013 年 8 月末にすべてのデータ取得を終了した。2013 年に 2009-2011 年に取得したデータ(全データの約半分に相当する)を用いた探索解析の結果を公表したが、本研究課題では、2012-2013 年に取得した新しいデータを加えることでデータ統計量を倍増するとともに、解析手法に幾つかの改善を加えることでさらに探索感度を高めた $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索を実施した。

解析手法の主な改善点は、陽電子飛行中消滅(AIF)起源のバックグラウンドガンマ線を同定する新しい解析の導入、陽電子複数ターン事象解析の改良、ミュー粒子停止ターゲットの位置形状補正精度の向上などであり、倍増したデータ量と合わせて世界最高の崩壊分岐比感度を達成した。図 2 は MEG 実験全データを解析した結果得られた事象分布である。 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象が存在すれば図中青枠内に集中するはずであるが、バックグラウンド以上の統計的に有意な超過は見られなかった。これにより $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊に対して、 4.2×10^{-13} という崩壊分岐比上限値の世界記録を達成した。これは前実験(MEGA 実験)の上限値を約 30 倍更新するものであり、主要な新しい物理モデルに対して

極めて厳しい制限を与えた。これにより、MEG 実験の全データを用いて世界最高感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索を行うという本研究の第一の目的を完遂した。

この解析結果は 2016 年 3 月に研究代表者の森が MEG 国際コラボレーションを代表して国際会議(La Thuile 2016)で発表すると同時に、東京大学においてプレスリリースを行い公表した。その後 MEG 実験の最終結果として論文にまとめられ、著名国際論文雑誌に投稿、掲載された(Eur. Phys. J. C(2016)76: 434)。

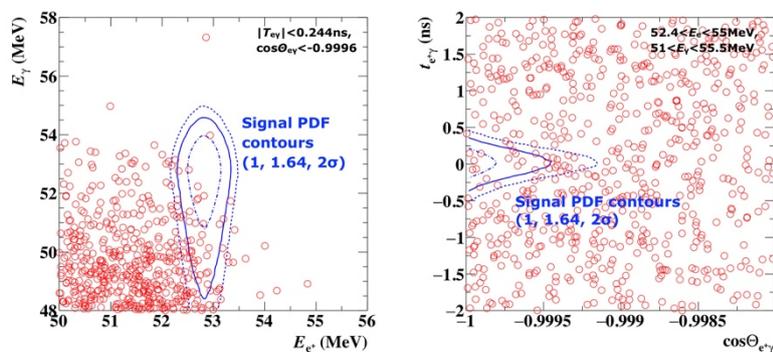


図 2 MEG 実験で取得した全データの $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索解析結果。
 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象が存在すれば青枠内に集中して現れる。

(2) 探索感度を大幅に改善した MEG II 実験の実現

MEG II 実験の目標探索感度を達成するために大幅に性能を改善した検出器の建設を行った。

最も重要なガンマ線測定性能改善のため、液体キセノン検出器のガンマ線入射面の光電子増倍管 216 本をコンパクトな新型シリコン光センサー(SiPM) 4092 個で置き換えた(図 3)。この光センサーは 12mm 角で薄型・コンパクトであり、この置き換えにより高精細なシンチレーション光読み出しが可能となり、特にガンマ線のエネルギーおよび入射位置についての測定性能が大幅に改善する。通常シリコン光センサーは液体キセノンの出す真空紫外領域にあるシンチレーション光に感度がないため、浜松ホトニクスと共同で真空紫外光に感度がある世界初のシリコン光センサー「VUV-MPPC」を開発した。この VUV-MPPC は、暗黒物質探索実験や二重ベータ崩壊探索実験など他の研究プロジェクトへの採用が検討されるなど、今後関連分野の進展に大きく寄与することが期待される。VUV-MPPC を搭載した液体キセノンガンマ線検出器の建設は完了し、

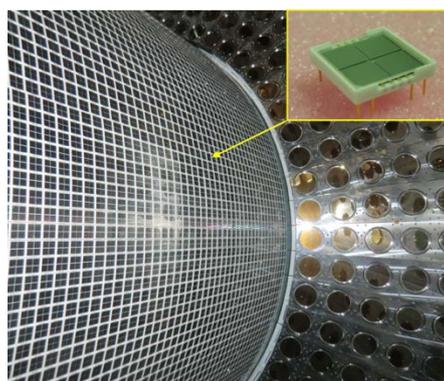


図 3 MEG II 実験液体キセノンガンマ線検出器。ガンマ線入射面が 4092 個の新型光センサー VUV-MPPC(右上挿入写真)で敷き詰められている

検出器の較正作業、長期安定性試験、ガンマ線測定性能評価作業が行われた。陽電子の時間を測定するタイミングカウンターについては、薄型のプラスチックシンチレータに計 12 個の光センサーを取りつけたカウンターを上流下流それぞれ 256 個ずつ配置した検出器を開発した(図 4)。信号陽電子が平均 9 個のカウンターを通過するよう設計されており、複数カウンターによるヒット時間の測定により、MEG 実験で 75ps であった時間分解能が 30ps 程度

まで改善した。さらに検出器の細分化により、高いビーム強度でも背景陽電子の偶発的な重なりの影響を低く抑えることができる。陽電子タイミングカウンターも建設を終えて、目標とする 30ps 台の時間分解能を確認し、実験開始に向けた準備を完了した。

本研究課題では、MEG II 実験探索感度のさらなる向上のために MEG 実験にはなかった新しいタイプの測定器の開発にも取り組んだ。背景事象の原因となる背景ガンマ線の主な源の 1 つは、ミュー粒子の輻射崩壊で放出されるガンマ線である。MEG II 実験では、この輻射崩壊にともなって放出されるエネルギーの低い陽電子を検出する背景ガンマ線同定検出器 (RDC) を導入し、背景ガンマ線を同定・削減する。プラスチックシンチレータ検出器と LYSO シンチレータ検出器で構成される下流側 RDC を完成させて、MEG II 実験で想定されているビーム強度での動作を実証した。

以上のように、**本研究で取り組んだ MEG II 実験用測定器は完成し、ほぼ計画通りの性能を持っていることを実証した。**一方、イタリアの共同研究グループが担当する陽電子飛跡検出器については、完成後にドリフトチェンバーのワイヤーが切断する問題が発生し、原因究明と解決に時間を要したため、予定より完成が遅れた。またスイス共同研究グループが担当するデータ取得用電子回路については、予

期せぬノイズ問題の対処に時間を要したため、全チャンネルの量産スケジュールが遅れた。そのため完成した測定器のコミッショニングは、限られたチャンネル数のプロトタイプ電子回路を使用して問題なく実施した。MEG II 実験の全測定器の PSI ビームエリアへの設置は完了しており (図 5)、データ取得用電子回路も今年度全数完成する。今後 MEG II 実験全システムを使用した予備実験 (エンジニアリングラン) を開始し、準備が整い次第本格的な物理データ取得を開始していく。

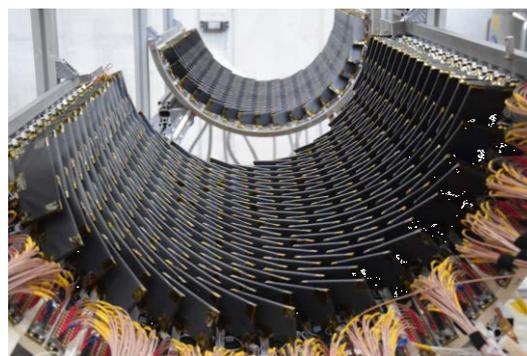


図 4 MEG II 実験高時間分解能細分化陽電子タイミングカウンター

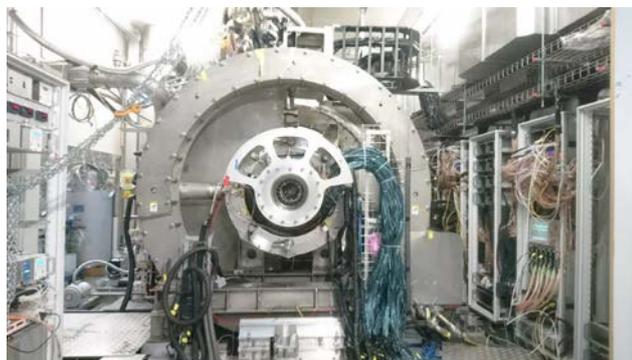


図 5 PSI ビームエリアに設置された MEG II 実験装置

5. 主な発表論文等

(雑誌論文の著者リストは慣習によりアルファベット順 (15 を除く))

[雑誌論文] (計 54 件)

- [査読有] G. Boca, P.W. Cattaneo, M. De Gerone, M. Francesconi, L. Galli, F. Gatti, J. Koga, M. Nakao, M. Nishimura, W. Ootani, M. Rossella, Y. Uchiyama, M. Usami, K. Yanai, K. Yoshida “The laser-based time calibration system for the MEG II pixelated Timing Counter”, Nucl. Instr. Meth. A 947 (2019) 162672, DOI: 10.1016/j.nima.2019.162672
- [査読有] K. Ieki, T. Iwamoto, D. Kaneko, S. Kobayashi, N. Matsuzawa, T. Mori, S. Ogawa, R. Onda, W. Ootani, R. Sawada, K. Sato, R. Yamada, “Large-area MPPC with enhanced VUV sensitivity for liquid xenon scintillation detector”, Nucl. Instrum. Methods A, 925(2019), pp148-155, DOI: 10.1016/j.nima.2019.02.010
- [査読有] 森 俊則, “ゲージ相互作用からヒッグス粒子を超えて”, 日本物理学会誌 2019 年第 74 巻第 6 号 356-357, <https://www.jps.or.jp/members/books/files/gakkaishi/74-06.pdf>
- [査読有] Angela Papa, Francesco Renga, Yusuke Uchiyama, “Hunting The Muon’s Forbidden Decay”, CERN Courier May/June 2019 45-47, <https://cerncourier.com/a/hunting-the-muons-forbidden-decay/>
- [査読有] The MEG Collaboration, A. M. Baldini, S. Mihara(44 番目), Toshinori Mori(46 番目), W. Ootani(56 番目), 他 80 人, “The design of the MEG II experiment”, Eur. Phys. J. C(2018) 78:380 1-60, doi: 10.1140/epjc/s10052-018-5845-6
- [査読有] 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”, 高エネルギーニュース 37 巻 1 号(2018)1-10,

- <http://www.jahep.org/hepnews/2018/18-1-1-MEG-II.pdf>
7. [査読有] 岩本 敏幸, “いよいよ始まる MEG II 実験”, 会誌めそん 47 巻春号(2018)4-10, <http://jmeson.org/2018/03/15/post-204/>
 8. [査読有] 森 俊則, “MEG 実験の最新状況”, 高エネルギーニュース 36 巻 3 号(2017)127-136, <http://www.jahep.org/hepnews/2017/17-3-3-MEG.pdf>
 9. [査読有] The MEG Collaboration, A. M. Baldini, S. Mihara(44 番目), Toshinori Mori(46 番目), W. Ootani(56 番目), 他 80 人, “Search for the lepton flavour violating decay $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ with the full dataset of the MEG experiment”, *Eur. Phys. J. C*(2016) 76:434 1-30, doi:10.1140/epjc/s10052-016-4271-x
 10. [査読有] W. Ootani, “An Experimental Review of Charged Lepton Flavor Violation in Muon Channel”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol.85, No. 9, 2016, Article ID: 091002, doi:10.7566/JPSJ.85.091002
 11. [査読有] P. W. Cattaneo, M. De Gerone, F. Gatti, M. Nishimura, W. Ootani, M. Rossella, S. Shirabe, Y. Uchiyama, “Time resolution of time-of-flight detector based on multiple scintillation counters readout by SiPMs”, *Nucl. Instrum. Methods A* 828 (2016) 191-200, doi:10.1016/j.nima.2016.05.038
 12. [査読有] The MEG Collaboration, A. M. Baldini, S. Mihara(38 番目), Toshinori Mori(40 番目), W. Ootani(47 番目), 他 66 人, “Muon polarization in the MEG experiment: predictions and measurements”, *Euro. Phys. J. C* 76:223(2016)1-12, DOI:10.1140/epjc/s10052-016-4047-3
 13. [査読有] The MEG Collaboration, A. M. Baldini, S. Mihara(38 番目), Toshinori Mori(40 番目), W. Ootani(47 番目), 他 66 人, “Measurement of the radiative decay of polarized muons in the MEG experiment”, *Euro. Phys. J. C* 76 (2016) 108, 1-8, DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-3947-6
 14. [査読有] 三原 智, “荷電レプトンで探る新物理”, 日本物理学会誌 70 巻(2015)740-741, <https://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2015/10/70-10trends.pdf>
 15. [査読有] W. Ootani, K. Ieki, T. Iwamoto, D. Kaneko, T. Mori, S. Nakaura, M. Nishimura, S. Ogawa, R. Sawada, N. Shibata, Y. Uchiyama, K. Yoshida, K. Sato, R. Yamada, “Development of deep-UV sensitive MPPC for liquid xenon scintillation detector”, *Nucl. Instr. Meth. A* 787 (2015) 220-223, DOI: 10.1109/TNS.2014.2347576
 16. [査読有] Paolo W. Cattaneo, Matteo De Gerone, Flavio Gatti, Miki Nishimura, Wataru Ootani, Massimo Rossella, and Yusuke Uchiyama, “Development of High Precision Timing Counter Based on Plastic Scintillator with SiPM Readout”, *IEEE Tran. Nucl. Sci.* 22, 402 (2014) 2657-2666, DOI: 10.1109/TNS.2014.2347576
 17. [査読有] Toshinori Mori, W. Ootani, “Flavour violating muon decays”, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 79 (2014) 57-94, DOI: 10.1016/j.pnnp.2014.09.001

[学会発表] (計 193 件)

1. Wataru Ootani, “Photon Detectors”, *Excellence in Detector and Instrumentation Technologies (EDIT-2020)*, 2020
2. Satoshi Mihara, “Investigation of the last Flavour Violation in Particle Physics”, *APPC2019*, 2019
3. Satoshi Mihara, “MEG II Status and Plan”, *The 21st International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFACT2019)*, 2019
4. Toshinori Mori, “Search for Rare Muon Decays”, *International workshop Physics of muonium and related topics*, 2018
5. Toshiyuki Iwamoto, “MEG final results and progress towards MEG II”, *The 15th International Workshop on Tau Lepton Physics*, 2018
6. Satoshi Mihara, “cLFV/g-2/EDM Experiment”, *ICHEP 2018*, 2018
7. Wataru Ootani, “Review of Readout Technics for Cryogenic Experiments”, *International Conference on the Advancement of Silicon Photomultipliers*, 2018
8. Yusuke Uchiyama, “Large Scale Characterization of SiPMs in the MEG II Experiment”, *International Conference on the Advancement of Silicon Photomultipliers*, 2018
9. Wataru Ootani, “Dipole Moments and Lepton Flavour Violation”, *ICFA Seminar*, 2017
10. Toshiyuki Iwamoto, “DC muon beam relate physics and experiments”, *The 19th International Workshop on Neutrinos from Accelerators*, 2017
11. Yusuke Uchiyama, “Scintillation detectors in MEG”, *The Fall 2017 CALICE collaboration meeting*, 2017
12. Kei Ieki, “Search of cLFV processes with muons and others”, *Eighteenth Lomonosov conference on elementary particle physics*, 2017

13. Kei Ieki, “MEG II LXe detector with VUV-sensitive SiPM”, International Conference on Science, Application, and Technology of Xenon Radiation Detectors, 2017
14. Ryu Sawada, “Charged lepton: results and future prospects”, ICHEP 2016
15. Wataru Ootani, “Review of experimental cLFV searches”, The XXVII International Conference on Neutrino Physics Astrophysics, 2016
16. Hajime Nishiguchi, “Summary of muon LFV search; MEG final result, and experimental prospects for MEG-II and COMET/mu2e”, Baryogenesis, 2016
17. Toshinori Mori, “Final Results of the MEG Experiment”, La Thuile 2016 - Les Rencontres de Physique de la Vallée d’Aoste, 2016
18. Wataru Ootani, “SiPM: Status and Perspectives”, RD51 Academia-Industry Matching Event, Special Workshop on Photon Detection with MPGDs, 2015
19. Satoshi Mihara, “MEG/MEG-II/mu \rightarrow eee”, Flavor physics & CP violation, 2015
20. Toshinori Mori, “MEG II & Mu3e - Search for cLFV Muon Decays at PSI”, Flavors of New Physics, 2015
21. Toshinori Mori, “Charged Lepton Flavor Violation and Dipole Moments”, The 11th ICFA Seminar on Future Perspectives in High-Energy Physics, 2014
22. Toshiyuki Iwamoto, “LFV: mu-e gamma experiment”, Neutrino Oscillation Workshop, 2014
23. Yusuke Uchiyama, “Muon LFV”, The 8th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle, 2014
24. Hajime Nishiguchi, “Results from MEG”, Interplay of Particle and Astroparticle Physics, 2014
25. Ryu Sawada, “Latest result and future prospect of MEG”, The 22nd International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions, 2014

〔図書〕 (計 1 件)

1. 中島林彦、齋藤直人、森俊則、日経サイエンス 2014 年 4 月号 48-55 ページ、ミュー粒子に表れた矛盾

〔その他〕

報道関係

“ミューイーガンマ崩壊発見されず、大統一理論のモデル見直しへ—東大など”

日本経済新聞 2016 年 3 月 14 日

(電子版 https://www.nikkei.com/article/DGXLASGG11H1V_T10C16A3TJM000/)

ホームページ等

MEG 国際共同実験 日本グループ <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/meg/>

MEG Home Page <http://meg.icepp.s.u-tokyo.ac.jp>

総研大ミューオン LFV グループ

http://kek.soken.ac.jp/pn/experiment/ex_research/research07/

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：大谷 航

ローマ字氏名：(OOTANI, wataru)

所属研究機関名：東京大学

部局名：素粒子物理国際研究センター

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)： 30311335

研究分担者氏名：三原 智

ローマ字氏名：(MIHARA, satoshi)

所属研究機関名：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

部局名：素粒子原子核研究所

職名：教授

研究者番号 (8 桁)： 80292837

※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。