

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成27年 6月 1日現在

機関番号：12601

研究種目：特別推進研究

研究期間：2010～2014

課題番号：22000004

研究課題名（和文） MEG 実験 - レプトンフレーバーの破れから大統一理論へ

研究課題名（英文） MEG Experiment - From Lepton Flavor Violation toward Grand Unified Theory

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）：351,000,000円

研究成果の概要（和文）：

大統一理論など新しい物理法則の決定的証拠となるミュー粒子の崩壊 $\mu \rightarrow e\gamma$ を探索する国際共同実験 MEG を実施し、分岐比で $O(10^{-13})$ の世界最高感度を達成した。予想に反して $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊は発見されず、「標準的な」新物理のシナリオが間違っていたことを示した。また、測定器を改良してさらに一桁感度を上げる究極感度 $O(10^{-14})$ の実験 (MEG II) を提案し、スイス PSI 研究所により承認されて実現に向かうことになった。

研究成果の概要（英文）：

In the international collaborative experiment MEG, we have achieved the world's best experimental sensitivity of $O(10^{-13})$, in branching ratio, to muon's decay $\mu \rightarrow e\gamma$, which, if discovered, would be definitive evidence of New Physics Principles such as Grand Unified Theories. The decay was not found despite many theoretical predictions and the "Standard Scenarios" of New Physics have turned out to be wrong. In parallel we designed and proposed an upgraded experiment MEG II with an ultimate sensitivity of $O(10^{-14})$, another order of magnitude better than MEG, with improved detectors. MEG II reached the stage of realization with the approval by Paul Scherrer Institute (PSI).

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ミュー粒子、レプトンフレーバー、大統一理論、超対称性、液体キセノン、加速器、PSI、ニュートリノ質量

1. 研究開始当初の背景

大統一理論やニュートリノ振動の起源となる新しい物理は、クォークやニュートリノだけでなく、荷電レプトン（電子やミュー粒子）にも測定可能な大きな世代間混合（レプトンフレーバーの破れ）を引き起こすことが分かってきた。この混合により、標準理論では起こりえないミュー・イー・ガンマ崩壊 $\mu \rightarrow e\gamma$ が、現在（研究開始当初）の実験上限値 (1.2×10^{-11}) に近い分岐比で起こると予想される。もしこの崩壊反応が発見されれば、超対称大統一理論やシーソー理論など、標準理論を超える新しい物理の決定的な証拠となる。

(1) 本研究の研究者は、この標準理論では起こり得ない $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を発見するため、独創的で巧みな実験装置を新しく考案して、MEG (Mu-E-Gamma) 実験を提案した。そ

の後イタリア・スイス・ロシア・米国との国際共同研究を構築、主導して実験装置を建設、2008年度より実験を開始した。

(2) MEG 実験では実験感度が測定器の性能によって制限されており、もし測定器の性能を改善して最高ビーム強度で実験を行うことができれば、さらに一桁高い実験感度 (10^{-14}) を実現できるはずである。本研究の研究者によるこれまでの開発研究によって、測定器の性能向上に対する理解は大きく進み、実際に大強度ビームを使った実証実験を行う段階になっている。また、発見された場合に角度分布を測定するための偏極ミュー粒子を使う研究も進んでいる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、実験感度を改善しつつ

MEG 実験を継続して実施し、以前の実験の上限値を大きく超える極微の分岐比 (10^{-13}) まで $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を徹底探索して、超対称大統一理論やシーソー理論など超高エネルギーの物理に迫る。

(2) MEG 実験の実施と平行して、これまでの知見を踏まえて改良したプロトタイプ測定器を製作し、大強度ミュー粒子ビームによる実証実験を行って、更に一桁実験感度を上げた究極の $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験 (MEG II) の実現を目指す。そこで得られた知見は可能であれば即 MEG 実験への適用も検討する。

3. 研究の方法

本研究は、MEG 実験により前実験 (MEGA) の実験上限値を二桁改善する崩壊分岐比感度 10^{-13} で $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象の探索を行い、研究期間内での発見を目指すものである。さらに MEG 実験で得られた経験、資源を最大限に活かし新実験の実証試験を行い、MEG を超える究極感度 10^{-14} での $\mu \rightarrow e\gamma$ 事象探索・測定実験を立案することも目的としている。究極感度を目指す研究の成果は、可能であれば MEG 実験の感度向上に即役立つことも考える。

これらの研究目的を達成するために研究代表者 (森) の統括のもと以下のような方法で研究を進める。

まず **MEG 実験で崩壊分岐比感度 10^{-13} に到達し $\mu \rightarrow e\gamma$ 事象の発見を目指す** (大谷)。研究期間の最初の 2 年間のデータを加えて 10^{-13} 台の感度に到達した。平成 25 年度までデータ取得を継続し、さらに統計精度を向上する。研究期間後半の 2 年間で取得したデータを詳細に解析し、この感度での探索実験の最終結果を導き出す。本研究課題開始後、各年度で物理データ収集を継続して行いつつ解析アルゴリズムの改良にも取り組み、順調に実験感度を向上させている。

さらに **MEG 実験を発展させた究極感度 10^{-14} での $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象探索・測定実験を設計、実証試験を行う** (三原)。研究期間の最初の 3 年間で究極感度実験の設計、測定器の基礎研究を行い、それをもとにした実験計画が既に PSI に承認された。実験開始に向けた準備が順調に進められている。

4. 研究成果

MEG 実験は平成 20 年に本格的な物理データ取得を開始して以来、毎年測定器の性能を改善しつつデータ統計量を順調に増やし (図 1)、着実に探索感度を上げながら $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象の早期発見を目指している。今のところ $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象の発見には至っていないが、

以前の実験より約 20 倍厳しい崩壊分岐比上限値まで $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の探索を行い、標準理論を超える新物理に対して非常に厳しい制限を与えている (雑誌論文 1)。

並行して MEG 実験で得られた知見と経験を元に究極感度の探索実験を実現すべく高性能測定器の研究開発を順調に進めており、既に**実験計画の立案を終え PSI に実験提案書を提出、高く評価され承認されるに至った**。

(1) MEG 実験による $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象探索

本研究課題の第一の目的である MEG 実験による $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象の探索は、実験遂行中にいくつかの問題が生じたものの素早く解決し、測定器の性能向上、解析手法の改善などに取り組みつつ順調にデータを取得 (図 1)、着実に探索感度を上げながら探索を行った。

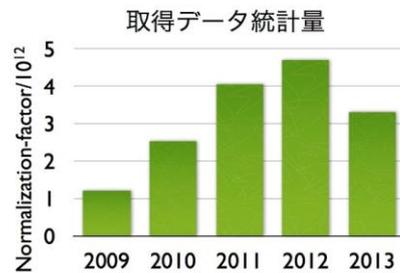


図 1 MEG 実験取得データ量の推移

データ取得と並行して測定器校正の改善、解析手法の改良、系統誤差の理解と低減に取り組みつつ $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索解析を行い、迅速に結果を公表するように努めた。平成 23 年には 21、22 年に取得したデータを合わせた解析結果を公表した。残念ながら $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象は発見されなかったが、**これまでの分岐比上限値記録を 5 倍改善する 2.4×10^{-12} という上限値の世界記録を打ち立てた** (雑誌論文 4)。

その後もさらなる解析手法の改善に取り組み、平成 24 年度には平成 21-23 年に取得したすべてのデータを用いた解析結果を発表した。 $\mu \rightarrow e\gamma$ 事象の発見には至らなかった。

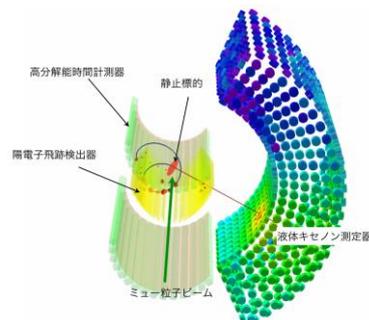


図 2 実際に観測された $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の候補事象

たが、崩壊分岐比についてこれまでで最も厳しい 5.7×10^{-13} という上限値を与えた (図 2、雑誌論文 1)。前実験と比べると 20 倍という非常に厳しい制限である。MEG 実験のこれまでの結果により **超対称大統一理論** といった標準理論を越える新物理の有望理論は非常に厳しい制限を受けることとなった (図 3)。

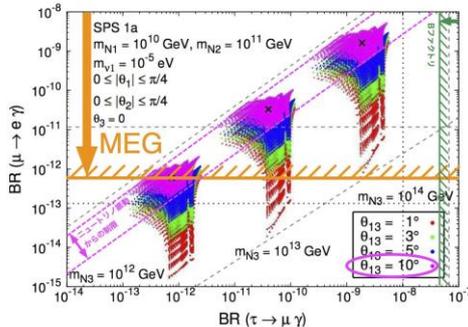


図 3 超対称大統一理論に対する MEG 実験結果による制限の例。S. Antusch *et al.*, JHEP11 (2006) 090 より引用した理論予想図に MEG 実験による制限を追記

CERN の LHC 実験でも新物理の兆候は見つかっていないが、LHC 実験は $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を引き起こすようなカラー荷を持たない新粒子にそれほど感度がないため、**MEG 実験と LHC 実験は新物理探索に関して相補的である**。また新物理の数少ない兆候の一つと考えられているミュオン異常磁気能率測定値の標準理論予想値からのズレは、類似のプロセスによって引き起こされる $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊も大きな確率で起こりうることを示唆する。また最近測定された第 3 のニュートリノ混合角も大きな $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊確率を示唆している (図 3)。**現在の MEG 実験の探索感度で $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊がいつ見つかったもおかしくない状況**であり、発見への期待が高まっている。

平成 25 年 8 月には MEG 実験としてのすべてのデータ取得を終了した。現在解析アルゴリズムの改善を行いながら、全取得データを用いた物理解析を進めている。主要なバックグラウンドの一つである陽電子飛行中消滅 (AIF) 起源のガンマ線を同定する新しい解析を導入することで従来の解析に比べ約 5% 探索感度を向上させることに成功、最終的に崩壊分岐比感度は 5×10^{-13} に到達する見込みである。

(2) 究極感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験に向けた研究開発

MEG 実験で得られた知見と経験を元に究極感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験を設計、提案することが本研究課題の第二の目的である。実験実現に向けた高性能測定器の研究開発は順調に進み、**現 MEG 実験より一桁感度の高**

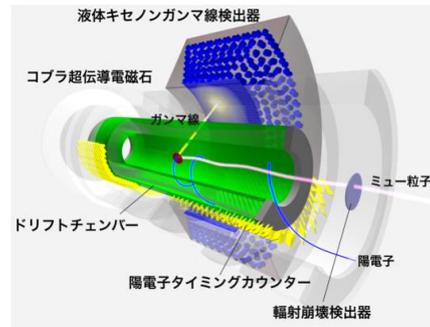


図 4 MEG II 実験測定器の概観

い 10^{-14} 台の崩壊分岐比感度を持った実験 (MEG II 実験) の設計が完了している。それに基づいた実験提案書を PSI に提出、高く評価され承認されるに至っている。究極探索実験 MEG II の概要は次の通りである (図 4)。

- 高強度ミュオン粒子ビーム (MEG 実験の二倍) と薄肉ターゲット
- 高精細シンチレーション読み出しの液体キセノン γ 線検出器
- 細分化された高時間分解能陽電子タイミングカウンター
- 高検出効率、高分解能の陽電子飛跡検出器

現在の液体キセノン検出器の分解能は敷き詰められた PMT 間の不感領域による非一様なシンチレーション読み出しが原因で制限されてしまっている。新実験では、 γ 線入射面の PMT をよりコンパクトな MPPC などの新しい高感度光センサーに置き換えることでこの弱点を克服、エネルギー分解能、位置分解能を大幅に改善する。開発の要である光センサーについては浜松ホトニクスと共同で**液体キセノンシンチレーション光 (真空紫外光) に感度がある MPPC を開発**、既に光子検出効率 (PDE) 15% 以上、内部ゲイン 10^6 以上と **PMT に匹敵する性能を持った 12 mm 角 MPPC の開発に成功**している (図 5)。これは単一光子計数可能な世界最大の真空紫外光対応半導体光検出器である。近年液体キセノン検出器は素粒子原子核実験、医療用検出器などさまざまな分野での利用が進んで

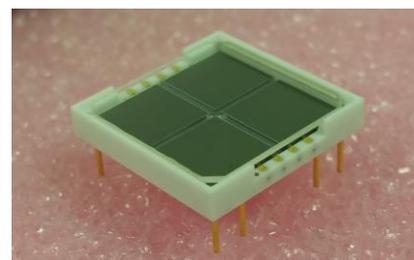


図 5 MEG II 実験液体キセノン検出器用に開発された新型光センサー VUV-MPPC (センサーサイズ 12 mm 角)

おり、真空紫外光に感度がある MPPC の開発は当該分野において非常に大きなインパクトを持っている。

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、数百個の MPPC 読み出し小型シンチレーターカウンターから構成される細分化型タイミングカウンターの開発を行っている。細分化されているため高計数率耐性に優れ、複数カウンターで陽電子の時間測定を行うことで 30–35 ps (rms) という究極の時間分解能が実現可能であることがわかった。これは現検出器の時間分解能を二倍以上改善するものである。十個程度のカウンターで構成されるプロトタイプ検出器を製作、ビーム試験により **30 ps 程度の時間分解能を達成し検出器性能を実証**した。

陽電子飛跡検出器についてはイタリアの共同研究グループが中心となって立体交差ワイヤー配置の高検出効率、高分解能のドリフトチェンバーの開発を進めている。また探索実験の感度を制限する重要な背景事象としてミュー粒子の輻射崩壊に伴う高エネルギー γ 線があるが、この γ 線に付随する低運動量の陽電子を捉える検出器を開発中であり、これを用いてさらに背景事象の低減を図ることも計画している。

このように **PSI で承認された実験計画を元に着実に測定器開発が進んでおり、順調に行けば平成 27 年に測定器コミショニング、平成 28 年には実験を開始する予定**である。

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 1~4 の著者リストは共同研究グループの慣習によりアルファベット順)

[雑誌論文] (計 3 1 件)

1. T. Haruyama (23 番目), T. Iwamoto (27 番目), S. Mihara (37 番目), T. Mori (39 番目), H. Nishiguchi (44 番目), W. Ootani (46 番目), R. Sawada (55 番目), Y. Uchiyama (61 番目), 61 名省略, New constraint on the existence of the $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ decay, Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 201801 1–5, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevLett.110.201801
2. T. Haruyama (29 番目), T. Iwamoto (33 番目), S. Mihara (43 番目), T. Mori (45 番目), H. Nishiguchi (51 番目), W. Ootani (53 番目), R. Sawada (65 番目), Y. Uchiyama (72 番目), 72 名省略, The MEG detector for $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ decay search, Eur. Phys. J. C. **73**-2365 (2013) 1–59, 査読有, DOI:10.1140/epjc/s10052-013-2365-2
3. T. Haruyama (26 番目), T. Iwamoto (29 番

目), S. Mihara (36 番目), T. Mori (38 番目), H. Nishiguchi (42 番目), W. Ootani (44 番目), R. Sawada (53 番目), Y. Uchiyama (58 番目), 56 名省略, Calibration and monitoring of the MEG experiment by a proton beam from a Cockcroft-Walton accelerator, Nucl. Instr. Meth. A **641** (2011) 19–32, 査読有, DOI:10.1016/j.nima.2011.03.048

4. T. Haruyama (24 番目), T. Iwamoto (28 番目), S. Mihara (35 番目), T. Mori (37 番目), H. Nishiguchi (41 番目), W. Ootani (43 番目), R. Sawada (52 番目), Y. Uchiyama (58 番目), 58 名省略, New Limit on the Lepton-Flavor-Violating Decay $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 171801, 1–5, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevLett.107.171801
5. 澤田 龍, 岩本 敏幸, MEG 実験 2009 年ランにおける $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索, 高エネルギーニュース 29 巻 3 号 (2010) 133–141, 査読有, <http://www.jahep.org/hepnews/2010/10/CMEG-03.pdf>

[学会発表] (計 8 9 件)

1. Satoshi Mihara, Charged Lepton Physics, XXVI International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, 2013 年 6 月 28 日, San Francisco (USA)
2. Ryu Sawada, MEG: Status and Upgrades, 1st Conference on Charged Lepton Flavour Violation, 2013 年 5 月 7 日, Lecce (Italy)
3. Wataru Ootani, New results from the MEG experiment at PSI, XLVIIIth Rencontres de Moriond, Electroweak Interactions and Unified Theories, 2013 年 3 月 2 日, La Thuile (Italy)
4. Toshinori Mori, A New Result of $\mu \rightarrow e \gamma$ Search by MEG, Les Rencontres de Physique de la Valee d' Aoste, 2013 年 2 月 24 日, La Thuile (Italy)
5. Elisabetta Baracchini, MEG: Status and Prospects, International Workshop on Neutrino Factories, Super Beams and Beta Beams, 2012 年 7 月 24 日, Williamsburg (USA)
6. 大谷 航, MEG 実験アップグレード検出器における光センサーの役割, 第 4 回次世代光センサーに関するワークショップ・EASIROC 研究会, 2012 年 12 月 25 日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
7. 内山 雄祐, 荷電レプトンフレーバー非保存探索による LHC 時代の素粒子物理シン

- ポジウム:DC ミューオンビームによる
cLFV 探索、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島大学(広島県・東広島市)
8. 岩本 敏幸、MEG 将来計画、日本物理学会秋季大会、2012 年 9 月 14 日、京都産業大学(京都府・京都市)
 9. Toshinori Mori, Charged lepton flavour and dipole moments, International Europhysics Conference on High-Energy Physics (EPS-HEP2011), 2011 年 7 月 27 日, Grenoble (France)
 10. Satoshi Mihara, Prospects for CLFV Experiments, XIII-th Workshop on Neutrino Factories, Superbeams and Beta-beams (NuFact11), 2011 年 8 月 5 日, Geneva (Switzerland)
 11. Yusuke Uchiyama, Search for $\mu \rightarrow e\gamma$ decay MEG latest result, New trends in high energy physics, 2011 年 9 月 4 日, Alushta (Ukraine)
 12. Wataru Ootani, Results from MEG, Rencontres de Moriond ElectroWeak 2012, 2012 年 3 月 4 日 La Thuile (Italy)
 13. Satoshi Mihara, Rencontres de Moriond ElectroWeak 2012, International Workshop on Grand Unified Theories, 2012 年 3 月 15 日, Kyoto (Japan)
 14. Toshiyuki Iwamoto, Latest results from the MEG experiment, American Physical Society April Meeting 2012, 2012 年 3 月 31 日, Atlanta (USA)
 15. 西村 康宏, A Search for the Decay $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ Using a High-Resolution Liquid Xenon Gamma-Ray Detector, 日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学(兵庫県・西宮市)
 16. 内山 雄祐, Analysis of the First MEG Physics Data to Search for the Decay $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$, 日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学(青森県・弘前市)
 17. 大谷 航、荷電レプトンフレーバーの破れの探索、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学(青森県・弘前市)
 18. 岩本 敏幸、Performance of the MEG detector, 日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学(青森県・弘前市)
 19. 澤田 龍、Recent result from the MEG experiment, 日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学(青森県・弘前市)
 20. Hiroaki Natori, Lepton Flavor Violation search with $\mu \rightarrow e \gamma$ decay: the MEG experiment, The IX International

- Conference on Hyperons, Charm and Beauty Hadrons (BEACH 2010), 2010 年 6 月 25 日, Perugia (Italy)
21. Yusuke Uchiyama, Search for lepton flavor violating muon decay: Latest result from MEG, The Xth international conference on Heavy Quarks & Leptons, 2010 年 10 月 14 日, Rome (Italy)
 22. Toshinori Mori, Updated result of the $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ search in the MEG experiment, Rencontres de Moriond EW 2011, 2011 年 3 月 19 日, La Thuile (Italy)
 23. 大谷 航、液体希ガスシンチレーション光検出のための MPPC について、第 3 回次世代光センサーに関するワークショップ、2010 年 12 月 18 日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)
 24. 大谷 航、MEG 実験の現状と展望、基研研究会 素粒子物理学の進展 2011、2011 年 3 月 10 日、京都大学(京都府・京都市)
 25. 岩本 敏幸、MEG 実験の最新結果、日本物理学会 秋季大会、2010 年 9 月 11 日、九州工業大学(福岡県・北九州市)

〔図書〕(計 1 件)

1. 森 俊則 他、朝倉書店、素粒子物理学ハンドブック、2010 年、688

〔その他〕

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>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

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

三原 智 (MIHARA SATOSHI)

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・教授

研究者番号：80292837

(3) 連携研究者

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

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・
特任研究員
研究者番号：90580241

西口 創 (NISHIGUCHI HAJIME)
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・助教
研究者番号：10534810

春山 富義 (HARUYAMA TOMIYOSHI)
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・名誉教授
研究者番号：90181031