

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287053

研究課題名(和文) ミューオンg-2/EDM精密測定のための時空間較正方法の開発

研究課題名(英文) A method of spacial and time calibrations for the measurement of muon g-2/EDM

研究代表者

三部 勉 (Tsutomu, Mibe)

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・准教授

研究者番号：80536938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：ミューオンg-2/EDM精密測定のための時空間較正方法の開発を行った。遠隔校正機能付きルビジウム原子周波数標準を用いて、産総研の周波数国家標準との同期を取り、基準周波数の長期安定性を確保する試験を行った。1年以上の長期にわたる試験運用を実施した結果、十分な安定性を得られることが確かめられた。秘跡検出器の位置・姿勢変化を精度良く検知するための空間較正方法を検討した。光コムレーザーを用いた干渉計を用いて実現できるか、原理実証試験を実施した。その結果、変位測定の安定性が要求値の1μmより良いことが確かめられ、原理的に問題がないことを確かめた。

研究成果の概要(英文)：A method of spacial and time calibrations for the precise measurement of muon g-2/EDM was developed. A long-term stability of the reference frequency was realized by a GPS-aided Rb-atomic frequency standard with a synchronization to the national standard of frequency at NMIJ/AIST. Stability of the frequency was confirmed over long-term operation of more than 1 year. A new spacial alignment monitor was developed to monitor the position and orientation of the detector. A proof of principle tests were carried out with a laser interferometry constructed with an optical frequency comb. As a result of the test, the basic principle of the method was proven to work with a stability of the distance measurement better than 1 micro-meter.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：ミューオン 異常磁気能率 電気双極子能率 アラインメント

1. 研究開始当初の背景

標準理論の対称性・ゲージ構造および力の統一を自然に説明する物理法則の解明のためには TeV スケール以上に新しい物理法則・対称性が存在することが期待されている。LHC での直接探索に加えて、そのフレーバー構造・CP 非対称性などの情報を得るためには、レプトンセクターでの精密測定やレプトンフレーバーを破る稀崩壊による相補的実験が不可欠である。ミュオン $g-2$ は量子ループ効果として、超対称性粒子などの効果が顕著に表れ得ることが指摘されており、標準理論を越える物理現象を包含し得る物理量として、これまで高精度での測定がおこなわれてきた。

米国ブルックヘブン国立研究所 E821 実験では直径 14 m のミュオン蓄積リングを用いてミュオン $g-2$ を 0.5 ppm の精度で測定することに成功し、 $g-2$ が標準理論の予想から 3.4σ 大きいと報告されたため、大きな議論が巻き起こっている。E821 実験の結果は標準理論のほころびを示唆し得るものであるにもかかわらず、追試した実験はまだなく、独立な実験による検証が強く望まれている。フェルミ国立研究所では E831 実験の設備を BNL から移設し、新たに測定を行う計画が進行している。2013 夏には磁石の移設が行われ、2017 年から実験開始が予定されている。

先行実験ではパイ中間子崩壊により生じたミュオンを収束電場により磁場中に蓄積し、スピン歳差運動の測定を行った。収束電場による影響をキャンセルするため特定の運動量 (3 GeV/c) で測定を行う必要があり、このため蓄積磁石の大きさは直径 14 m であった。我々は極冷ミュオンビームを用いて収束電場を使わずにミュオンを蓄積することで、より低い運動量 (0.3 GeV/c) かつ小さい蓄積磁石 (直径 0.66 m) で全く新しい方法で $g-2$ および EDM の測定を行い、素粒子標準模型を超える物理現象の検証を行うことを目指している (引用文献①)。

実験では一様磁場中でのスピン歳差運動を測定する。求められている測定精度は $g-2$ で 0.1 ppm、EDM で $10^{-21} e \cdot \text{cm}$ である。 $g-2$ は歳差運動周期から測定するので、測定器の時間較正が重要である。また、EDM は磁場の向きに対する、歳差運動ベクトルの傾きを測るため、磁場に対する測定器の位置・傾きが重要である。

2. 研究の目的

本研究は、飛跡検出器の時間および空間的な較正 (時空間の較正) を精密に行う方法を開発することが目的である。J-PARC で超冷ミュオンビームを用いてミュオン異常磁気能率 ($g-2$) および電気双極子能率 (EDM) を精密に測定する実験を計画している。この実験では、崩壊陽電子の飛跡を測定することにより、磁場中で歳差運動するスピンの回転周波数と回転軸の方向を決

定する。測定感度を決めるのは、測定機器の安定性と時間・飛跡角度の絶対精度である。

3. 研究の方法

以下に述べる方法で、シリコン飛跡検出器の時間空間の較正を精密に行う方法を開発した。

(1) 時間基準の評価

必要な安定度を供する周波数標準として GPS 受信機能付きルビジウム周波数標準機を用いた。この機器は、LAN インターフェースを介して、産総研の時間周波数国家標準のデータベースにアクセスできる。産総研では、水素メーザ 4 台、セシウム原子時計 4-6 台により、時間周波数国家標準 UTC (NMIJ) を生成・公開している。全世界の一次標準から得られる UTC (協定世界時) との周波数差 1.4×10^{-14} 以内 (過去 2 年間) で一致している実績がある。産総研のデータベースには自局の周波数標準と GPS 信号との差分が記録されており、GPS 衛星と差分の情報をローカルに得ることにより共通の GPS 衛星を介して産総研の周波数標準と同期を取ることができる (コモンビュー法)。

実際に KEK にて長期稼働させたときの産総研との基準時刻の差を比較することで要求される周波数安定度が得られているか評価を行った。

(2) 位置較正方法の開発

シリコン飛跡検出器ではミュオンの崩壊で生じる陽電子の飛跡を再構成し、ミュオンの崩壊位置と角度を測定する。ミュオンが有限な EDM を持つとき、崩壊陽電子の角度分布は磁場の向きに対して上下非対称になる。非対称度は時間とともにスピン歳差運動周期で振動する。陽電子検出器の羽根が磁場の向きに対してハの字型に傾いていると、あたかも歳差運動ベクトルが磁場に対して傾いて見えてしまうため、擬似的な EDM 信号が現れてしまうことが分かっている。

EDM の統計的な測定感度は $2 \times 10^{-21} e \cdot \text{cm}$ である。羽根の傾きで生じる疑似 EDM がこれより小さくするためには傾き角度が $10 \mu\text{rad}$ 以下になる必要がある。これは、センサー面の上下で $1 \mu\text{m}$ 、羽根の上下で $4 \mu\text{m}$ 、内側と外側で $2.4 \mu\text{m}$ の位置がズレることに相当する。

羽根モジュールの組立てにおいて、羽根の内部でのシリコンセンサーの相対的な設置精度は 3 次元測定器等を用いて計測が可能と考えられる。しかし、全体の飛跡検出器として組み上げた後は、真空中かつ 3 T の磁場という特殊環境下に置かれるため、通常の方法で 3 次元位置・姿勢を測定することは困難である。そこで、羽根位置基準間の距離を監視することを考えた。原理的には 3 角錐の各頂点間の距離がわかれば、3 次元位置を再構成できる。

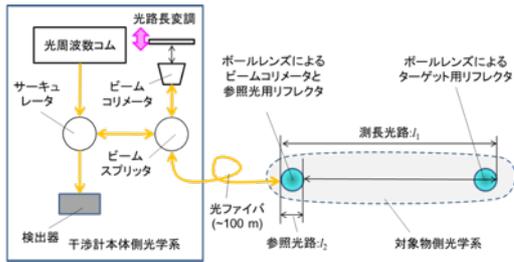


図 1 光周波数コムを用いた長さ測定

変位測定の精度 ($<1 \mu\text{m}$) はレーザー干渉計を用いれば十分達成可能と考え、これを実際にも検証する試験を行った。また、高い安定度、および多地点間の距離測定をよりシンプルに実現するため、光周波数コムを用いる(図 1)。

4. 研究成果

以下に研究成果を述べる。

(1) 時間基準の評価

本研究の時間・周波数基準の評価には、遠隔校正機能付き周波数標準 (フレックタイム社製 FT-001S、図 2) を用いた。GPS 信号を受信し、時間周波数国家標準 UTC (NMIJ) との比較を行う。KEK つくばキャンパスにおいて、GPS アンテナを設置し、本機器を稼働させた。時間同期の性能を評価するための解析ソフトウェアの開発を行った。

UTC (NMIJ) との時刻比較の結果を図 3 に示す。時刻の同期は、 10 ns (FWHM) 程度の精度で行われることが確かめられた。次に、長期間の運用試験を行った。

図 4 にアラン分散を示す。当初はファームウェアに不具合があり、長期安定性が得られなかったが、ファームウェア内での補正値の取り扱いを適切に改善することで、良好な結果を得ることができた。522 日間の測定の結果、約 2×10^{-15} の周波数安定度を得た。

これらの結果に基づき、時間基準は g-2/EDM 実験で必要な安定性を有すると結論された。

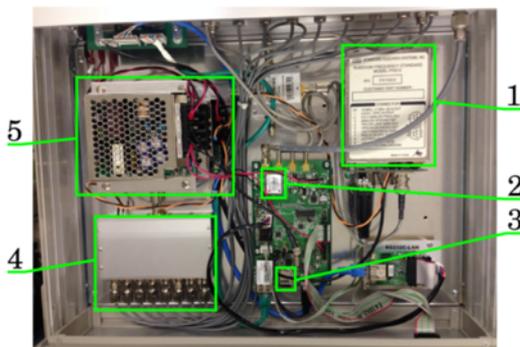


図 2 遠隔校正機能付き周波数標準 (FT-001S)。(1) ルビジウム周波数標準、(2) GPS 受信回路、(3) データ保管メモリ、(4) 信号分配回路、(5) 電源回路

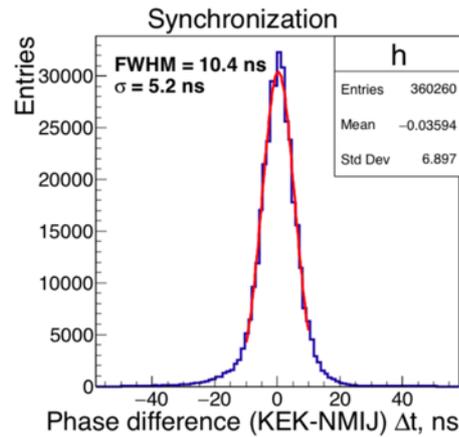


図 3 UTC(NMIJ) との時刻比較の結果

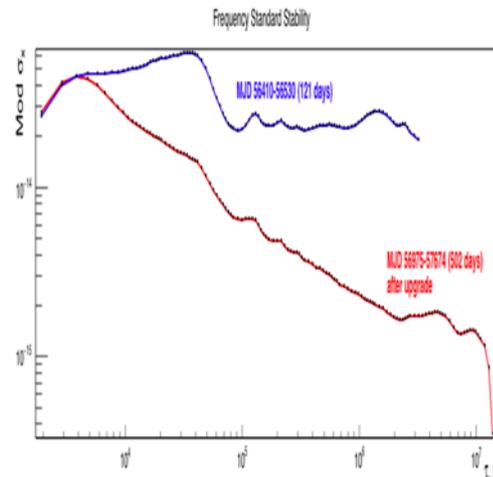


図 4 アラン分散 (青: ファームウェア改善前、赤: ファームウェア改善後)

(2) 位置較正方法の開発

光コムパルスレーザー (ネオアーク社) を用いて干渉計を構築し、原理実証を行った。光コムパルスレーザーから発信する光を分離し、一方を移動ステージ上に乗せたミラーで反射させ、他方を被測長パスにとり、これらの干渉をフォトダイオードの強度で測定した。移動ステージ上のミラーを既知の一定速度で移動させることにより、その光路差から、被測長パスの長さを測定するのが原理である (引用文献②)。

図 5 に測定セットアップを示す。原理実証を行うため、市販のレーザー干渉測長装置を用いた測定との比較を行った。図 6 に示すような干渉縞が高い S/N で観測され、それぞれの干渉構造 (フリンジ) のピーク間隔を測定し、比較を行った。

測定のばらつきを評価するため、60 回連続して同じ測定を繰り返した結果、測定値のばらつきは $0.32(4) \mu\text{m}$ (RMS) であった。また、測定距離を $50 \mu\text{m}$ にわたって変化させたときの、測定値の比較を図 7 に示す。おおむね、 $1 \mu\text{m}$ 以内のばらつきで変位が測定できていることが確かめられた。これらの結果を持って、この方法が要求される安定度を有するこ

とが結論できた。

本研究では、計画通りに(1)、(2)に示した原理実証を終えることができた。この次の課題としては、この一般的な原理を応用し、g-2/EDM実験の環境に即した、実用的な測長網を構築し、3次元座標の再構成を行うことである。

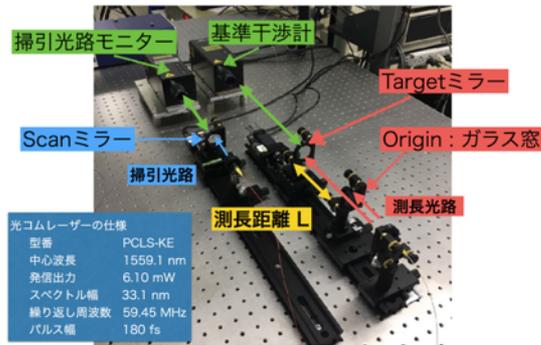


図 5 光コム干渉計の原理実証セットアップ

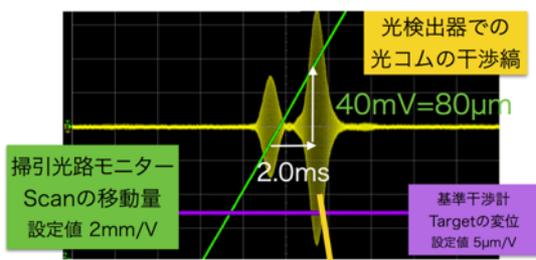


図 6 観測された干渉縞

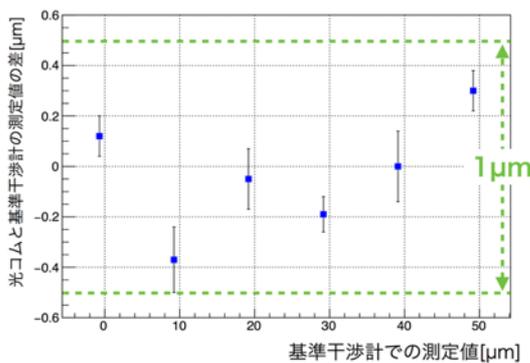


図 7 測定距離のばらつき

<引用文献>

- ① J-PARC muon g-2/EDM 実験, <http://g-2.kek.jp>
- ② W. Sudatham, et. Al, Prec. Eng. 43, 486-492 (2016).

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)

- ① 三部 勉, "J-PARC における g-2/EDM の精密測定", 原子核研究, 査読有, 61号, pp. 99-111 (2017).
- ② 三部 勉, "ミュオン g-2/EDM 実験", めそん, 査読有, 45号, pp. 50-56 (2017).
- ③ Shoichiro Nishimura, Hirokazu Ikeda, Masahiro Ikeno, Takashi Kohriki, Shinji Koura, Tsutomu Mibe, Naohito Saito, Osamu Sasaki, Shohei Shirabe, Manobu Tanaka, Junji Tojo, Kazuki Ueno, Tomohisa Uchida, and Tamaki Yoshioka, "Design of the Positron Tracking Detector for the Muon g-2/EDM Experiment at J-PARC", JPS Conf. Proc., 査読有, Vol. 8, 025015 (2015) (6 pages).

[学会発表] (計 17 件)

- ① 安田 浩昌, 久米 達哉, 齊藤 直人, 佐藤 優太郎, 西村 昇一郎, 高増 潔, 三部 勉, Wiroj SUDATHAM, "J-PARC におけるミュオン g-2/EDM 精密測定に向けた検出器アライメントモニターの開発-光コムレーザーを用いた絶対測長干渉計の性能評価", 第18回高エネ研メカワークショップ, KEK つくばキャンパス (茨城県つくば市), 2017年4月14日.
- ② 安田 浩昌, 久米 達哉, 齊藤 直人, 佐藤 優太郎, 西村 昇一郎, 高増 潔, 三部 勉, Wiroj SUDATHAM, "J-PARC におけるミュオン g-2 /EDM 精密測定に向けた検出器アライメントモニターの開発", 日本物理学会第72回年次大会 (2017年), 大阪大豊中キャンパス (大阪府豊中市), 2017年3月17-20日.
- ③ 安田 浩昌, "The development of alignment monitor for J-PARC muon g-2/EDM experiment", HINT2016, J-PARC (茨城県東海村), 2016年12月5-8日.
- ④ 三部 勉, "g-2/EDM overview", Workshop "towards high precision muon g-2/EDM measurement at J-PARC", J-PARC (茨城県東海村), 2016年11月28-29日.
- ⑤ T. Kume, T. Mibe, S. Nishimura, Y. Satoh, and H. Yasuda, "Precise alignment monitor by using optical frequency comb for the muon g-2/EDM experiment at J-PARC," p10, IWAA2016, ESRF, Grenoble (France), Oct. 3-7, (2016).
- ⑥ 三部 勉, "Measurement of muon g-2/EDM with ultra-cold muon beam at J-PARC", The 22nd International Spin Symposium, アーバナシヤンパーン (米

- 国), 2016年9月25-30日.
- ⑦ 三部 勉, “極冷ミュオンビームを用いたミュオン $g-2/EDM$ 精密測定”, 素粒子物理学の進展 2016, 京都大学(京都府京都市), 2016年9月5-7日.
- ⑧ 三部 勉, “冷ミュオンビームによるミュオン $g-2/EDM$ の精密測定”, 超低速ミュオンが拓く科学シンポジウム, 東京大学(東京都文京区), 2016年8月26-28日.
- ⑨ 西村 昇一郎, 久米 達哉, 池田 博一, 池野 正弘, 上野 一樹, 内田 智久, 川越 清以, 高力 孝, 齊藤 直人, 佐々木 修, 庄子 正剛, 調 翔平, 末原 大幹, 田中 真伸, 東城 順治, 長澤 翼, 真玉 将豊, 三部 勉, 村上 武, 吉岡 瑞樹, “J-PARC ミュオン $g-2/EDM$ 精密測定実験:陽電子秘跡検出器の構造設計”, 日本物理学会年会, 東北学院大学(宮城県仙台市), 2016年3月19-22日.
- ⑩ 三部 勉, “New measurement of muon $g-2/EDM$ with ultra-cold muon beam”, Interplay between LHC and Flavor Physics, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2016年3月14日.
- ⑪ 三部 勉, “Measurement of muon $g-2/EDM$ with ultra-cold muon beam at J-PARC”, 12th International Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP), 金沢歌劇座(石川県金沢市), 2016年3月6-11日.
- ⑫ 三部 勉, “Measurement of muon $g-2/EDM$ with ultra-cold muon beam”, Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2015), 理化学研究所(埼玉県和光市), 2015年11月30-12月1日.
- ⑬ 西村 昇一郎, 久米 達哉, 池田 博一, 池野 正弘, 上野 一樹, 内田 智久, 川越 清以, 高力 孝, 齊藤 直人, 佐々木 修, 庄子 正剛, 調 翔平, 末原 大幹, 田中 真伸, 東城 順治, 長澤 翼, 真玉 将豊, 三部 勉, 村上 武, 吉岡 瑞樹, “J-PARC ミュオン $g-2/EDM$ 精密測定実験:陽電子秘跡検出器の研究開発”, Flavor Physics Workshop 2015, KKR 沼津保養所(静岡県沼津市), 2015年10月6-9日.
- ⑭ 三部 勉, “Measurement of muon $g-2/EDM$ with ultra-cold muon beam”, The 10th Circum-Pan-Pacific Spin Symposium on High Energy Spin Physics, 中央研究院(台湾), 2015年10月5-8日.
- ⑮ 西村 昇一郎, 久米 達哉, 池田 博一, 池野 正弘, 上野 一樹, 内田 智久, 川越 清以, 高力 孝, 齊藤 直人, 佐々木 修, 庄子 正剛, 調 翔平, 末原 大幹, 田中 真伸, 東城 順治, 長澤 翼, 真玉 将豊, 三部 勉, 村上 武, 吉岡 瑞樹, “J-PARC muon $g-2/EDM$ 精密測定実験:陽電子飛跡検出器アラインメント方法の開発”, 日本物理学会年会, 早稲田大学(東京都新宿区), 2015年3月21-24日.

⑯ 三部 勉, “ $g-2/EDM$ 実験で用いる計測システムの開発”, 計測システム研究会, J-PARC(茨城県東海村), 2014年11月21日.

⑰ 三部 勉, “Search for muon EDM with ultra-cold muon beam at J-PARC”, 日本物理学会(日米合同原子核分科会), ハワイ島(米国), 2014年9月7-11日

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

$g-2/EDM$ 実験ホームページ

<https://g-2.kek.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三部 勉 (MIBE Tsutomu)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号: 80536938

(2) 研究分担者

齊藤 直人 (SAITO Naohito)

高エネルギー加速器研究機構・J-PARC センター・センター長

研究者番号: 20321763

(3) 連携研究者

(3) 研究協力者

久米 達哉 (KUME Tatsuya)

高エネルギー加速器研究機構・機械工学センター・講師

研究者番号: 40353362

西村 昇一郎 (NISHIMURA)

東京大学・理学研究科物理学専攻・大学院生

安田 浩昌 (YASUDA Hiromasa)

東京大学・理学研究科物理学専攻・大学院生