

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287055

研究課題名(和文)ソレノイド型蓄積磁石への3次元らせん軌道によるビーム入射の実証試験

研究課題名(英文)Test experiment for the 3-D spiral beam injection into a solenoidal magnet

研究代表者

飯沼 裕美 (Inuma, Hiromi)

茨城大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60446515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：ミュオンの異常磁気双極子(g-2)と電気双極子(EDM)の精密測定により新物理の存否をさぐる。過去30年近く踏襲された実験の系統誤差要因を根本から解決すべく、我々は新しい実験を推進している。新実験の要はサブppmで調整された磁場強度3Tの蓄積リングに運動量300MeV/cのビームを入射し、半径33cmの蓄積リング内にビームを制御する手法の確立である。本申請研究では、新規考案したソレノイド型蓄積磁石への3次元的なビーム入射手法を実証するテストビームラインの建設および検証実験を行った。ビームの水平・垂直方向の運動の制御するX-Y結合の調整により、小型蓄積リング内でのビーム制御技術を実証できた。

研究成果の概要(英文)：The precise measurements of muon anomalous magnetic moment (g-2) and electric dipole moment(EDM) investigate the existence of new physics. In order to fundamentally solve the systematic error factors of experiments that have been followed for nearly the past 30 years, we are promoting new experiment. One of major essences of the new experiment is the establishment of a method to control the beam into the compact storage ring with a radius of 33 cm. We inject a beam of momentum of 300 MeV / c into the storage ring of magnetic field strength 3 T adjusted by sub ppm. In this research project, we conducted a test beam line construction and a verification experiment demonstrating a three dimensional beam injection method to a newly invented solenoid type accumulating magnet. By adjusting the X - Y coupling that controls the horizontal and vertical motion of the beam, we can demonstrate the beam control technique in the small storage ring.

研究分野：素粒子実験、ビームライン設計、電磁石設計

キーワード：3次元らせん軌道入射 ミューオン 異常磁気モーメント(g-2) 電気双極子(EDM) 超伝導ソレノイド磁石

1. 研究開始当初の背景

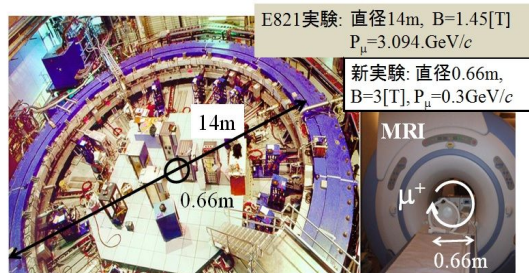
ミュオン $g-2$ の実験値は、標準理論からの予言と3標準偏差以上の相違があり、新物理の存否の議論の決定打となる物理量のひとつである。ミュオンなどの素粒子が有限の値の EDM を持つことを実験的に直接証明することは、時間反転対称性の破れ (T の破れ) を直接測定することになる。ニュートリノ振動実験の最新の結果からレプトンセクターの CP の破れの効果に関する報告がなされているが、CP が破れていれば、T も破れているはずであり、レプトンセクターの T の破れの効果を実験的にも検出する意義がある。

2. 研究の目的

我々は、過去30年近く踏襲された実験の系統誤差要因を根本から解決する新しい手法を考案し、大強度陽子加速器 (J-PARC) の大強度ミュオンビームを用いたミュオン $g-2$ の超精密測定実験を推進している。新しい実験計画では、ミュオンの電気双極子モーメント (EDM) の測定感度を従来実験より100倍向上することを目指している。これを実現すべく、医療用 MRI 技術を応用し、磁場の空間分布がサブ ppm に調整された、3T の蓄積磁石へ運動量 $300\text{MeV}/c$ のミュオンビームを蓄積し、ミュオンのスピン歳差運動の超精密測定を行う。

3. 研究の方法

ミュオンスピン歳差運動のスペクトル周波数の測定実験は米国 BNL の E821 実験などで 0.5ppm 程度での測定が行われている。この実験は運動量 $3.1\text{GeV}/c$ (ローレンツ因子 $\gamma=29.3$) のミュオンビームを蓄積し、スピン歳差運動から磁気モーメントと電気モーメントの精密測定の世界最高記録 [文献 1, 2] を出している。下図左に示す軌道直径 14m のリングは12分割された超電導磁石とビーム収束用の電気4極から成る。

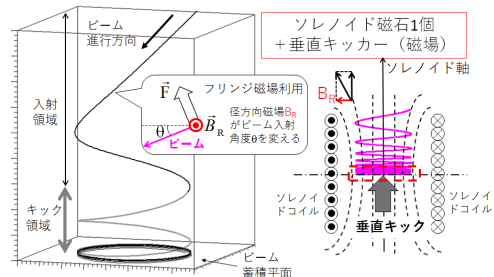


我々の実験は、E821 実験とは独立した手法を取る。図右に示すように、蓄積リングを大幅に小さくし、単ユニットのソレノイド型超電導磁石の磁場精度サブ ppm の環境下にミュオンビームを蓄積し、スピンの歳差運動の超精密測定を行う計画である。E821 実験とは全く独立な手法、独立な系統誤差をもつ実験系で、過去の実験結果と比較することは意義が

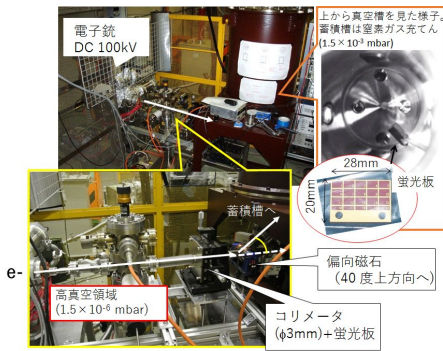
ある。新しい手法による実験を実現するために、ビームの横方向運動量分布を非常に小さい (冷却) 真つすぐなビームを、医療用 MRI サイズの蓄積リングに入射する必要がある。ビーム制御に、一切の電場を用いない点が過去の E821 実験とは大きく違う特徴であり、EDM 測定の感度向上の要である。

4. 研究成果

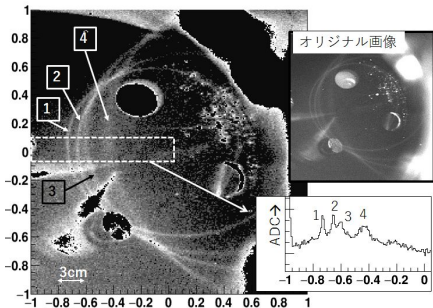
単ユニットの医療用 MRI サイズの蓄積磁石に、加速ビームを蓄積できるのか？



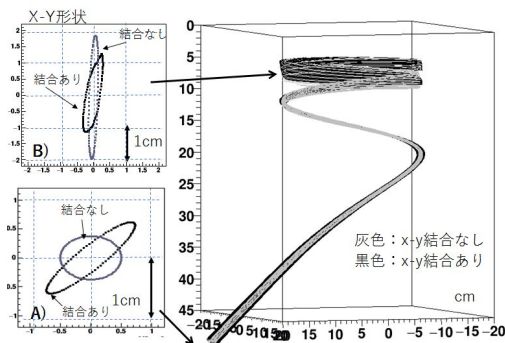
我々は上図に示すようなソレノイド磁石への3次元螺旋軌道入射方式を考案した [研究業績 3]。本研究では、原理実証実験を進め、技術の実用化を行った。上図に示すように、[入射領域] のソレノイド磁石フリンジ部に入射角 θ を持ったビームを入射し、フリンジ磁場 (径方向磁場 B_r) により入射角を減少させながら蓄積領域まで誘導する。[キック領域] では、磁石中心平面付近で $\theta \rightarrow 0$ するために、軸対称な径方向パルス磁場 (垂直キック) を、例えば、30 周回の間 (200nsec 程度) かけて与える。[ビーム蓄積平面] の上下 5cm 程度の蓄積領域内には弱収束静磁場が付加されており、蓄積平面上にビームを保持する。垂直キックと、弱収束静磁場のバランス調整により、蓄積軌道平面の時間変動が十分小さくなるよう最適化すれば、入射ビームは、3次元的な動きから、ほぼ平面上の蓄積軌道上に保持できる。更に、設計軌道の周りに有限の位相空間を持ったビームを、ソレノイド磁石のような軸対称磁場に入射するには、適切な $x-y$ 結合を与える必要がある。ここで $x-y$ 結合は、ビーム進行方向を z 方向に取るビーム座標系に於いて、水平 (x) 方向と、垂直 (y) 方向の位相空間の相関の強さの指標である。通常のビーム制御は強収束で、ノーマル 4 極磁石を用いて収束・発散を繰り返すため、 $x-y$ 結合を小さくするのが定石である。本研究では敢えて大きい $x-y$ 結合をビームに与えてビーム制御する点で独自性がある。更に、入射・蓄積に係るビーム制御に一切に電場を用いず、単ユニット蓄積磁石の内部で制御が完結するので、外乱要因になりうる外部装置を排除できる点も独自性・創造性がある。本研究で用いたテストビームラインを次ページ図に示す。



ミュオンの代わりに電子銃からの100keV 程度の電子ビームを、中心磁場100 Gaussのソレノイド磁石へ入射し、軌道直径22cmの3次元螺旋軌道を制御する実証実験を進めている。蓄積リングはJ-PARC g-2/EDM 実験のオリジナルサイズから1/3スケールダウンしている。下図の写真は、DC電子ビームが蓄積槽内で4周ほど螺旋軌道した画像である。



軌跡を可視化するため、蓄積槽に封入した窒素が電子軌道に沿って電離発光する様子を、真空槽上部に設置した高感度カメラで撮影した。オリジナル画像の各ピクセルの輝度情報を加工し、4周回分の軌跡を明瞭にしており、図中に番号1~4で示す。右下の1次元ヒストグラムは、画像の白い点線で囲った部分の輝度情報であり1~4周目に対応するピーク形状が見られる。また、4周目は1周目に比べて軌跡が広がっている様子も定性的に分かる。蓄積槽内部の蛍光板に映る像からも、ビーム断面が広がる様子を確認している。これは、ビームのx-y結合がマッチしていないために起こる問題で、この問題の定量的な解決手法の決定が本研究の第一目的であった。下図に2通りのx-y断面形状のビームの入射計算例を示す。



A)の入射点で、x-y結合のないビームと、x-y結合を与えたビームを入射する。B)の地点で、x-y結合がないビームはy方向サイズが4倍大きくなるが、適切なx-y結合を与えた場合はy方向サイズの変化は小さい。適切なX-Y結合を与えるために、回転4極磁石をビームラインに配置し、最適解を得るための実験を引き続き行っている。

<引用文献> [1]PRD 73 072003 (2006), [2] PRD 80, 052008, (2009)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

M. Abe, Y. Murata, H. Iinuma, T. Ogitsu, N. Saito, K. Sasaki, T. Mibe, H. Nakayama, "Magnetic design and method of a superconducting magnet for muon g-2/EDM precise measurements in a cylindrical volume with homogeneous magnetic field", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A 890, 51-63 査読有 [10.1016/j.nima.2018.01.026](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.026)

H. Iinuma, H. Nakayama, Katsunobu Oide, Ken-ichi Sasaki, Naohito Saito, Tsutomu Mibe and Mitsushi Abe, "Three dimensional spiral injection scheme for the g-2/EDM experiment at J-PARC", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 832, 51-62 査読有 [10.1016/j.nima.2016.05.126](https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.126)

S. Bae, H. Choi, S. Choi, Y. Fukao, K. Futatsukawa, K. Hasegawa, T. Iijima, H. Iinuma, K. Ishida, N. Kawamura, B. Kim, R. Kitamura, H. S. Ko, Y. Kondo, S. Li, T. Mibe, Y. Miyake, T. Morishita, Y. Nakazawa, M. Otani, G. P. Razuvaev, N. Saito, K. Shimomura, Y. Sue, E. Won, and T. Yamazaki, "First muon acceleration using a radio-frequency accelerator" Physical Review Accelerators and Beams APS Physics 21/ 050101, 査読 [10.1103/PhysRevAccelBeams.21.050101](https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.050101)

[学会発表](計 4件)

第14回日本加速器科学会, 2017年, "Development of three-dimensional spiral injection by using electron beam for muon g-2/EDM experiment" 第14回日本加速器科学会, 2017年, "Development for beam control procedure for all-in-one injection and storage ring magnets"

The international workshop on future potential of high intensity accelerator for particle and nuclear physics (HINT2016), "Prospect for

new muon g-2/EDM experiments”
SAT テクノロジー ショーケース
“J-PARC のミュオン g-2/EDM 実験の
ための 3 次元らせん軌道ビーム入射手法
の開発とテスト実験の現状報告”
[http://www.science-academy.jp/showcas
e/14/pdf/T-006_showcase2015.pdf](http://www.science-academy.jp/showcase/14/pdf/T-006_showcase2015.pdf)

〔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

- 1) <http://g-2.kek.jp/portal/index.html>
- 2) [https://info.ibaraki.ac.jp/Profiles/
102/0010143/profile.html](https://info.ibaraki.ac.jp/Profiles/102/0010143/profile.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯沼 裕美 (Inuma, Hiromi)
茨城大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：60446515

(2) 研究分担者

大澤 哲 (Oosawa, Satoshi)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構・加速器研究施設・特別教授
研究者番号：00150011

中山久義 (Nakayama, Hisayoshi)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構・加速器研究施設・名誉教授
研究者番号：20011728

佐々木憲一 (Sasaki, Ken'ichi)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構・超伝導低温工学センター・准教
授
研究者番号：70322831

深尾祥紀 (Fukao, Yoshinori)
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：80443018

三部勉 (Mibe, Tsutomu)
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

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()