

3次元らせんビーム入射の実証実験における 輸送ライン四極電磁石の回転角制御

CONTROL OF ROTATION ANGLES OF TRANSPORT LINE QUADRUPOLE MAGNETS IN A DEMONSTRATION EXPERIMENT OF THREE-DIMENSIONAL SPIRAL BEAM INJECTION

平山穂香^{#, A)}, 飯沼裕美^{A)}, Muhammad Abdul Rehman^{B)}, 大澤哲^{B)}, 染谷宏彦^{B)}, 中山久義^{B)}, 古川和朗^{B)},
三部勉^{B)}

Honoka Hirayama^{#, A)}, Hiromi Iinuma^{A)}, Muhammad Abdul Rehman^{B)}, Satoshi Ohsawa^{B)}, Hirohiko Someya^{B)},
Hisayoshi Nakayama^{B)}, Kazuro Furuikawa^{B)}, Tsutomu Mibe^{B)}

^{A)} Ibaraki University

^{B)} KEK

Abstract

Preparations for the Muon g-2/EDM experiment, which will make ultra-precise measurements of Muon's anomalous magnetic moment (g-2) and electric dipole moment (EDM), are underway at J-PARC. In this experiment, muon beams are injected and stored in a solenoidal magnet with a diameter of 66 cm, which is based on a medical MRI magnet, and the spin precession is measured. Precise adjustment of the rotation angle and current value of the rotating quadrupole magnets in the beam transport line is essential to properly control the horizontal and vertical correlation (X-Y coupling) in the beam phase space required for three-dimensional spiral injection. In this presentation, we report on the design and fabrication of a remote machine controller to precisely adjust the rotation angle to ensure the reproducibility of experiments. In addition, we will discuss the specifications for the control of the rotation mechanism of the rotating quadrupole magnets in the transport line for the production experiments at J-PARC.

1. はじめに

J-PARC で muon の異常磁気モーメント (g-2) と電気双極子モーメント (EDM) を超精密測定する、muon g-2/EDM 実験の計画が進んでいる。Muon の g-2 は標準模型から計算される理論値と実験値 (米国 E821, E989) との間に 4.2σ の差異があり、新物理の兆候として期待されている物理量である (Fig. 1) [1]。また muon の EDM は、標準模型では時間反転対称性とパリティ対称性から存在を許されていない。もし muon の EDM の有限値が測定されれば、時間反転対称性の破れの初めての実験的証拠となる。J-PARC muon g-2/EDM 実験では、これら 2 つの物理量の精密測定を目指している。

Muon の g-2 と EDM はスピン歳差運動 $\vec{\omega}$ を測定することで求められる。 $\vec{\omega}$ は次の式で求められ、 a_μ が g-2 を、 η が EDM を表している。

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left\{ a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} - \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right\}$$

先の実験 E821 と E989 では、第 2 項を消去することができる魔法運動量 $\gamma = 29.4$ で muon を制御し、さらに $\eta = 0$ とした。このとき、 $\vec{\omega}$ の式は次のとおりになる。

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} a_\mu \vec{B}$$

これに対して g-2/EDM 実験では、電場 $\vec{E} = 0$ で実験することで \vec{E} の項を消去する。このとき、 $\vec{\omega}$ の式は次のとおりになる。

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left\{ a_\mu \vec{B} - \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right\}$$

ここで、 a_μ の項は磁場 \vec{B} と平行、 η の項は \vec{B} と直交していることがわかる。すなわち、g-2 と EDM は直交しており、 \vec{B} に対する $\vec{\omega}$ の傾きを測定することで g-2 と EDM を分離することができる。E821 実験から EDM の上限値は $1.8 \times 10^{-19} \text{ e cm}$ であると求められたことを考慮すると、 \vec{B} に対する $\vec{\omega}$ の傾きは 1 mrad 程度である。

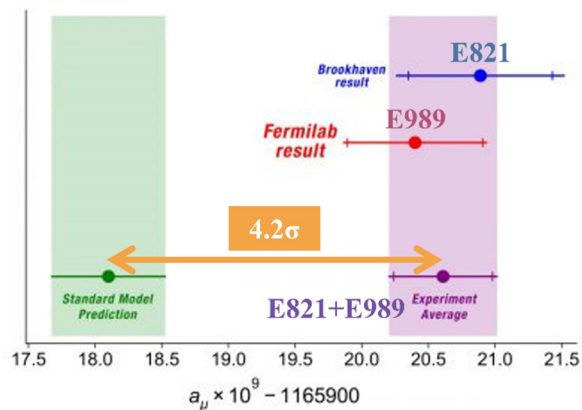


Figure 1: Difference between theoretical and experimental values of muon g-2.

[#] 20nm031t@vc.ibaraki.ac.jp

E821, E989 と g-2/EDM 実験のその他の主な違いを Table 1 にまとめた。

Table 1: Comparison of Experiment Specifications

Experiment	E821, E989	g-2/EDM
Storage ring diameter	14 m	0.66 m
Storage magnetic field	1.45 T	3.0 T
Muon momentum	3.09 GeV/c	300 MeV/c
Cyclotron period	149 nsec	7.4 nsec
Beam focus	Quadrupole electric field	Weak focus magnetic field

E821, E989 ではビームを直径 14 m の蓄積リングに入射させたのち、ビームが入射器にぶつからないように、ビームが 1 周してくる前にキック磁場を与えて軌道をずらしていた。しかし、g-2/EDM 実験では医療用 MRI 磁石を応用した直径 0.66 m のソレノイド型磁石にビームを入射・蓄積させるため、サイクロトロン周期が 7.4 nsec と短く、先の実験と同じキックは技術的に不可能である。

そこで、3 次元らせんビーム入射という方法をとる[2]。これは、ソレノイド型蓄積磁石に、ソレノイドコイルを避けるように斜め上からビームを入射させるというものである。その後、ソレノイド軸方向にキックする磁場を与え、ビームの軌道を 2 次元平面上の円軌道にする (Fig. 2)。こうすることでキック磁場をビームが 20~30 周している間に与えればよいことになり、現実的なものとなる。こうして蓄積された muon の崩壊陽電子の時間スペクトルを測定する。Muon は崩壊時にスピン歳差運動ベクトルの方向に陽電子を放出する性質があるからである。蓄積領域には弱収束磁場が与えられており、崩壊陽電子の時間スペクトルを測定している間、ビームを蓄積領域に保持することができる。

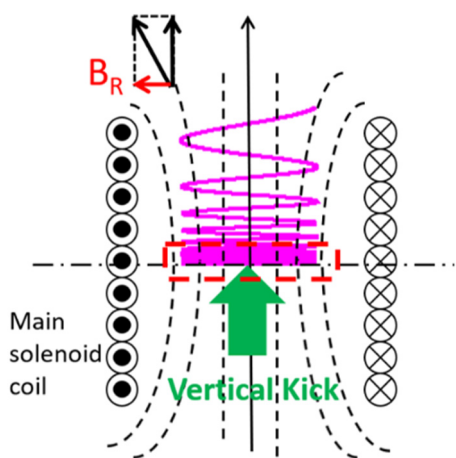


Figure 2: Three-dimensional spiral injection and kick in the solenoid axial direction.

2. X-Y 結合と回転四極電磁石

蓄積磁石のソレノイド磁場によってビームの径方向成

分は収束するが、ソレノイド軸方向は磁場の影響を受けることなく徐々に広がっていく (Fig. 3)。ビームがソレノイド軸方向に広がるとキックしても蓄積できない muon が増えてしまい、測定効率が悪くなる。この広がりを防ぐために、ビームの x 方向と y 方向の運動に相関をもたせる必要がある。これを X-Y 結合と呼ぶ[3]。なお、ビームの座標の定義は Fig. 4 に示すとおりである。

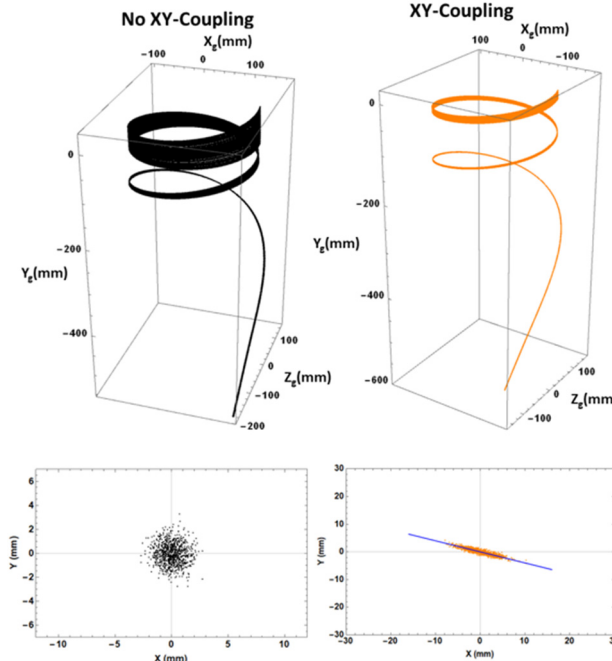


Figure 3: The beam without X-Y coupling is spread in the storage magnet in the direction of the solenoid axis (left). Giving the beam X-Y coupling reduces its spread (right).

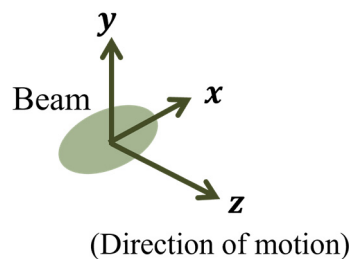


Figure 4: Definition of beam coordinates.

X-Y 結合をビームに与えるためには、ビーム輸送ラインに設置されている四極電磁石を回転させ、k 値を調節する必要がある。X-Y 結合と入射の関係を調べるために、KEK にある 3 次元らせん入射実証実験用のテストビームラインで実験した。テストビームラインでは電子ビームを使用し、輸送ラインに設置されている 3 個の回転四極電磁石で X-Y 結合を与え、ソレノイド型蓄積磁石に 3 次元らせん入射させた。また、蓄積磁石に入射させずに、直線ビームライン終端に設置されている金属板にビームを当てることで、ビームの断面の撮影もした。これで X-Y 結合と蓄積磁石内でのふるまいの関係がわかる。

蓄積磁石内でビームのソレノイド軸方向の広がりが十分小さくなる、すなわち最適な X-Y 結合を与えることができる四極電磁石の k 値と回転角の組み合わせを 2 通り見つけた。この組み合わせをそれぞれ Best 1、Best 2 とし、Table 2 と Table 3 にまとめた。ただし、正の k 値は水平方向収束、負は垂直方向収束をビームに与えるときのものである。回転角はビームの進行方向と同じ方向を向いたときに、右回りを正、左回りを負とした。また、それぞれの蓄積磁石内でのらせん軌道とビーム断面の画像を Fig. 5 と Fig. 6 に示す。これらから、Best 1 と Best 2 では Q1~3 に設定した k 値と回転角の組み合わせは異なるが、らせん軌道とビーム断面は似たものになっていることがわかる。同じ条件で転送行列からシミュレーションしたビーム位相空間の結果を Fig. 7 に示す。黒点がビーム分布の初期値で、赤点が金属板の位置でのビーム分布を表している。金属板でのビーム位相空間も Best 1 と Best 2 では似ていることがわかる。

Table 2: K-value and Rotation Angle of Quadrupole Magnets in Best 1

Quadrupole magnet	Q1	Q2	Q3
k-value (/m ²)	-21.0	-67.1	21.0
Rotation angle (degree)	0.0	15.0	-45.0

Table 3: K-value and Rotation Angle of Quadrupole Magnets in Best 2

Quadrupole magnet	Q1	Q2	Q3
k-value (/m ²)	24.9	-69.0	0.864
Rotation angle (degree)	-20.0	25.0	-45.0

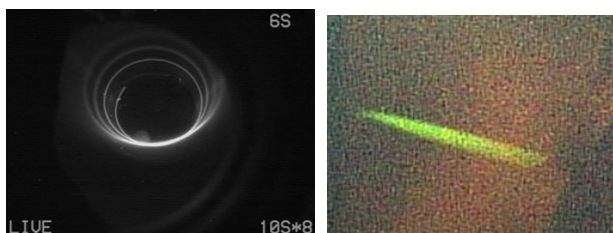


Figure 5: Spiral orbit (left) and beam cross section (right) of Best 1.

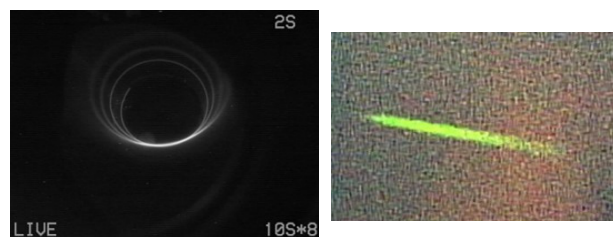


Figure 6: Spiral orbit (left) and beam cross section (right) of Best 2.

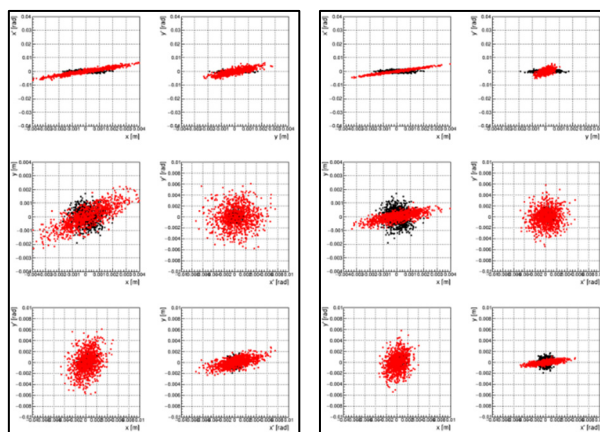


Figure 7: Beam phase spaces of Best 1 (left) and Best 2 (right).

Best 1 と Best 2 の X-Y 結合から、回転四極電磁石に求められる k 値と回転角の精度について調べた。 k 値と回転角を Table 2 と Table 3 で示した値から動かし、Fig. 7 の上段 $x - x'$ 分布と $y - y'$ 分布における金属板でのビーム分布 (赤点) の傾きが $\pm 5\%$ 内に入る範囲を、シミュレーションで求めた。その結果、 k 値は $1.92/\text{m}^2$ 、回転角は 0.5 度の精度が必要であるとわかった。 k 値は四極電磁石に与える電流で調節しているので、電流に直すと 0.02 A の精度が必要である。

3. 転送行列と OPERA

g-2/EDM 実験の輸送ラインの設計では、まず、回転四極電磁石に与える k 値や回転角の仕様を転送行列で計算して決める。次に、決定したパラメータをもとに OPERA-3D で回転四極電磁石を設計する。このとき、転送行列で計算したビーム位相空間と OPERA-3D で計算したビーム位相空間の結果が同じである必要がある。

そこで、次の方法で転送行列によるビーム位相空間と OPERA によるビーム位相空間を比較した。

- 自由空間に実証実験で使用している四極電磁石を 1 個置いた系を仮定する (Fig. 8)。
- 始点でのビーム分布をガウス分布で 1000 本作成する。
- 転送行列で終点でのビーム分布を計算する。
- OPERA-3D で同様の系を作成し、同じ始点でのビーム分布を用いてビームの軌道を計算する。
- 転送行列と OPERA でそれぞれ得た終点でのビーム分布を比較する。

結果は Fig. 9 に示しており、左側が転送行列で求めたビーム位相空間、右側が OPERA のビーム軌道計算によるビーム位相空間である。黒い点が始点でのビーム、赤い点が終点でのビームを表す。比較すべきは終点でのビーム分布を表す赤い点であり、どちらもほぼ同じ分布を示している。OPERA でのビーム分布の方が転送行列のものに比べてやや収束がきつくなかかっているように見える。詳細は現在調査中である。

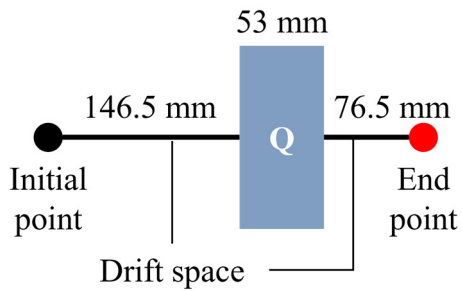


Figure 8: Assumed drift spaces and a quadrupole magnet.

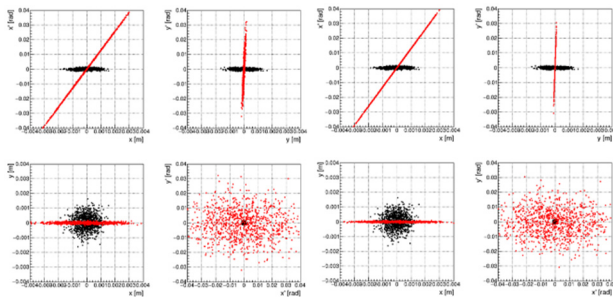


Figure 9: Beam phase space calculated by the transfer matrix (left) and OPERA (right).

4. まとめと今後

J-PARC で muon の $g-2$ と EDM を超精密測定する、muon $g-2$ /EDM 実験の計画が進んでいる。本実験では、医療用 MRI 磁石を応用した直径 0.66 m の小型ソレノイド型磁石に muon ビームを 3 次元らせん入射させ、蓄積し、muon のスピン歳差運動の時間スペクトルを測定する。3 次元らせん入射とソレノイド型磁石内でのビーム蓄積を成功させるためには、ビームに適切な X-Y 結合を与えることが重要である。X-Y 結合はビーム輸送ラインに設置された回転四極電磁石の k 値と回転角で調整することができる。3 次元らせん入射実証実験のテストビームラインの回転四極電磁石で k 値、すなわち電流と回転角に要求される精度を調べたところ、電流は 0.02 A、回転角は 0.5 度の精度が必要であるとわかった。また、 $g-2$ /EDM 実験の輸送ライン設計のために、転送行列と OPERA のそれぞれで計算されたビーム位相空間の差異を調べる必要があった。その結果、定性的にはおおむね一致していると言えるが、詳細は検討中である。

今後は回転四極電磁石の回転機構を作成する。現在、実証実験の回転四極電磁石は人間の手で角度を測りながら回転させている。しかし先に述べたとおり、回転角には 0.5 度の精度が要求され、人間の手ではこの精度を達成できない。よって、機械制御による回転機構を作成し、実験の再現性を高める。加えて、電流と回転角を共に遠隔制御する仕組みを搭載することで、ビーム運転中でも様々な X-Y 結合を試すことができるようにする。また、ビームの中心と四極電磁石の中心を合わせるために、水平・垂直方向に移動できるようにする。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19H00673, 26287055 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] B. Abi *et al.*, “Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm”, Phys. Rev. Lett. 126, 141801, 7 April 2021; <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.126.141801>
- [2] M. Abe *et al.*, PTEP, Volume 2019, Issue 5, May 2019, 053C02; <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz030>
- [3] H. Iinuma *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A832, 2016, pp. 51-62.