

J-PARC ミューオン g-2/EDM 実験のための垂直ビームキッカー装置の概念設計 とテストベンチ作業準備

CONCEPTUAL DESIGN OF VERTICAL BEAM KICKER AND PREPARATIONS FOR TEST BENCH WORK FOR THE MUON G-2/EDM EXPERIMENT AT J-PARC

平山穂香^{#, A)}, 飯沼裕美^{A)}, 阿部充志^{B)}, 高柳智弘^{C)}

Honoka Hirayama^{#, A)}, Hiromi Iinuma^{A)}, Mitsushi Abe^{B)}, Tomohiro Takayanagi^{C)}

^{A)} Ibaraki University

^{B)} KEK

^{C)} JAEA

Abstract

To research new physics beyond the Standard Model, the experiment for very precise measurements of muon spin precession (E34) is planned at J-PARC. One of the keys to succeeding in this experiment is a technology to lead beams to the center plane of the storage magnetic field precisely, and this performance is directly connected with systematic errors of the final result of the experiment. We cannot control beams by any electric fields in the storage magnet, so we should make the magnetic field depending on time by sending big pulse electric currents through the air-core coil, and control beam tracks by the magnetic field. In this paper, we will introduce the outline of the vertical beam kicker installed inside the storage magnet, and report results of consideration of the conceptual design to be able to do the experiment. Moreover, we will experimentally make air-core coils and connect it with the test bench of the device to send big pulse electric currents and evaluate space and time distribution of the magnetic field to satisfy designs. This result of elementary researches will be reflected in detail designs of real devices.

1. はじめに

ミューオンの異常磁気モーメント(g-2)は標準模型の理論値と実験値との間にずれがある数少ない物理量のひとつである。過去の実験によると、ミューオンの g-2 は標準模型の予言値より 3σ ほど大きい値を示した[1]。しかし、この値では本当に予言値からずれているかどうかは判断できないので、より精度の高い実験をして確かめる必要がある。合わせて、ミューオンの電気双極子モーメント(EDM)の測定も行う。ミューオンに EDM があるなら、時間反転対称性が破れていることになる。これはすなわち CP 対称性の破れを発見したことに同じになり、現在の宇宙が反物質より圧倒的に物質優勢になった理由がより明らかになる可能性がある。以上のことを調べるべく、J-PARC での高精度のミューオン g-2/EDM 実験の計画が進んでいる。

ミューオン g-2/EDM 実験では、ミューオンを運動量 300[MeV/c]になるまで加速し、その状態のミューオンを半径 33[cm]ほどの医療用 MRI 磁石から応用した 3[T]のソレノイド型磁石に斜め上から入射させる(Fig. 1)。入射したミューオンは磁石内をらせん運動する。このとき、ミューオンがコイルの反対側から抜け出してしまうように、適切な垂直方向のパルスキック磁場をかけて 2次元平面内にミューオンの運動を収めるようにする。これに用いられるのが垂直ビームキッカー装置である。垂直ビームキッカー装置は時間応答の良い径方向のパルス磁場を

与える必要がある。さらに、MRI 磁場中に置くので、空芯コイルでなければならない。

本論文では、磁場中でのミューオンのふるまいやどのようなキック磁場を与えれば良いのかなどをシミュレーションした結果を述べ、これらをふまえてどのような垂直ビームキッカー装置を設計すればよいのかを考える。この研究は g-2 の測定精度と EDM の感度に直結するため、ミューオン g-2/EDM 実験の要となる技術開発である。

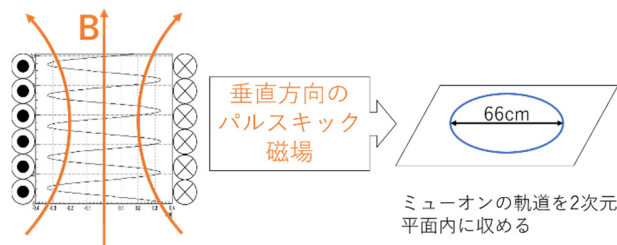


Figure 1: The Role of the Vertical Beam Kicker.

2. 一様磁場中におけるミューオンのスピン歳差運動

一様磁場中にミューオンを入射したときのスピン歳差運動を 4 次のルンゲクッタ法で解析した。具体的には、y 軸正方向に 3[T]の一様な磁場をかけ、運動量 300[MeV/c]の正の電荷をもったミューオンを入射させたときのことを考えた。磁場(y 軸)に対して垂直に入射させると、ミューオンは xz 平面上で半径約 33.4[cm]の円軌道を動き、その周期は約 7.41[nsec]である。また、実際に実

[#] 16s2033y@vc.ibaraki.ac.jp

験で行われるように y 方向にも速度成分をもたせると、ミューオンはらせん運動をする。

スピンの運動は T-BMT 方程式 Eq. (1)に基づいて解析した[2]。

$$\frac{ds}{dt} = \Omega \times s \quad (1)$$

$$\Omega = -\frac{e}{2m} \left\{ \left(g - 2 + \frac{2}{\gamma} \right) B - \frac{(g-2)\gamma}{\gamma+1} \boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\beta} \cdot B) - \left(g - 2 + \frac{2}{\gamma+1} \right) (\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{E}) \right\} \quad (2)$$

ただし、e は素電荷、m はミューオンの静止質量、g は g 因子、 γ はローレンツ因子である。いま、電場 \mathbf{E} はかけないので、 $\mathbf{E}=0$ である。磁場 \mathbf{B} は y 成分のみもち、ミューオンは xz 平面上を運動しているとするので、速度 $\boldsymbol{\beta}$ は x,z 成分のみもつ。したがって、Eq. (2) のスピンの角運動量 Ω は次のようになる。

$$\Omega = -\frac{e}{2m} \left(g - 2 + \frac{2}{\gamma} \right) B e_y \quad (3)$$

ただし、 e_y は y 方向の単位ベクトルである。Eq. (3) を Eq. (1) に代入して成分ごとに書くと次のようになる。

$$\frac{ds_x}{dt} = \Omega s_z \quad (4)$$

$$\frac{ds_y}{dt} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{ds_z}{dt} = -\Omega s_x \quad (6)$$

$$\Omega = -\frac{e}{2m} \left(g - 2 + \frac{2}{\gamma} \right) B \quad (7)$$

これらを用いて解析すると、スピンは xz 平面上を回転し、その周期は約 7.39[nsec] であるとわかった(Fig. 2)。

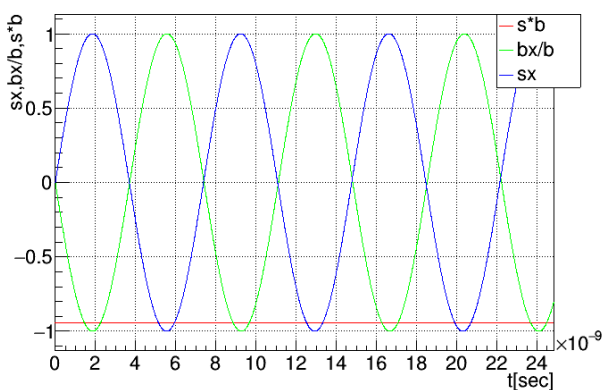


Figure 2: Periods of Spin Precession (red) and Circular Motion (green) and Spin Motion (blue).

さらに、スピンベクトルとベータの内積 Eq. (8) からスピン歳差運動の周期を求めると、約 2.11[μsec] であることがわかった。

$$\mathbf{s} \cdot \boldsymbol{\beta} = \cos(\omega t) \quad (8)$$

$$\omega = \frac{q}{m} \frac{g-2}{2} B \quad (9)$$

以上の場合において、ルンゲクッタ法で用いられる積分の刻み幅 dt がどのように解析値の精度に寄与するかを調べた。時間 t=0~10[μsec] を様々な dt で刻み、t=0 のときの速度 v_0 と t=10[μsec] のときの速度 v_{last} の相対誤差で比べた(Fig. 3)。

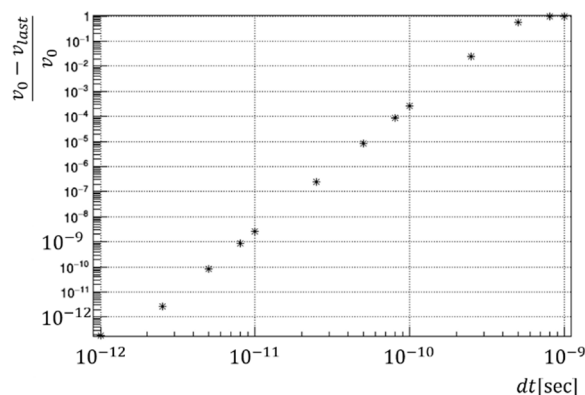


Figure 3: Precision Change of Runge-Kutta Method by dt in Static M-field.

グラフのとおり、精度は刻み幅 dt を小さくすればするほど良くなっていく。この論文では、10[μsec] の間の積分による発散を 10^{-8} 程度に抑えられる $dt=1 \times 10^{-11}$ [sec] で計算した。

3. ソレノイド磁石内でのミューオンの運動

ソレノイド磁石内の構造を Fig 4 に示す。メインとなるソレノイドコイル、後述する弱収束磁場を作るためのコイルの高さ方向の情報がわかるようになっている。図のグラフの部分は径方向の磁場分布を示しており、右側のグラフで弱収束磁場のより詳しい分布がわかるようになっている。

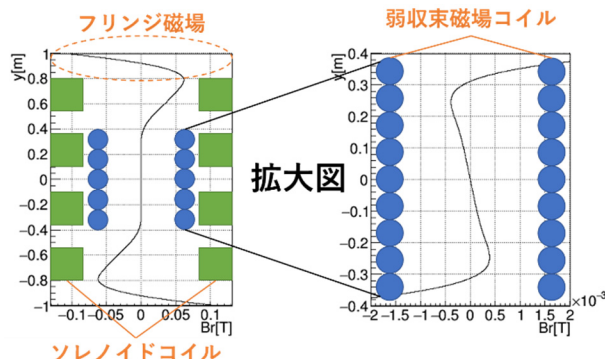


Figure 4: Structure of the Solenoid Coil.

3.1 フリンジ磁場中でのミューオンの運動

ミューオンをソレノイド磁石に入射する際は、メインコイル外側に発生するフリンジ磁場を利用する。フリンジ磁場はミューオンの入射角方向に対して鉛直方向に減速する向きの力を与える。これにより、蓄積領域でのミューオンの運動を制御する。

3.2 弱収束磁場中でのミューオンの運動

3[T]の一樣磁場に、位置に依存する弱収束磁場を加える。弱収束磁場はミューオンが垂直(y 軸)方向に単振動するようなポテンシャルを与える。これはのちに垂直ビームキッカー磁場を与えたときにミューオンの運動を2次元平面内に収めやすくする効果がある。具体的な弱収束磁場の関数を以下に示す[3]。

$$B_r(y) = -n \frac{B_0}{r_0} y \quad (10)$$

$$B_y(y, r) = B_0 \left\{ 1 - n \frac{r - r_0}{r_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{r_0} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

n が弱収束磁場の強さを決めるパラメータである。弱収束磁場の径方向の分布と運動量 300[MeV/c]のミューオンを入射したときの軌跡を下図に示す。

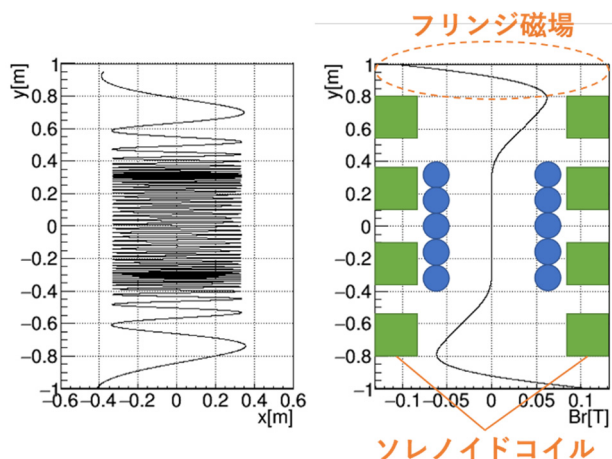


Figure 5: Muon's Track (left) and Radial M-field Distribution at $r=0.334$ [m] (right).

ミューオンは xz 平面上で半径約 33.4[cm]の円軌道を描き、 y 軸方向にベータatron振動をする。ベータatron振動の周期は n に依存するので、この周期とともに測りたいスピン歳差運動の周期の値と近くならないように n を設定しなければならない。ベータatron振動の周期 v_n とそのスピン歳差運動の周期 $v_\mu = 2.11$ [μsec] との比を表にまとめた(Table 1)。表から、 n を 10^{-4} のオーダーにすれば十分であることがわかる。

Table 1: Comparison of v_n And v_μ

n	v_n [s]	v_n/v_μ
1.3×10^{-5}	2.03×10^{-6}	0.962
1.7×10^{-5}	1.83×10^{-6}	0.867
3.3×10^{-5}	1.32×10^{-6}	0.626
6.5×10^{-5}	9.46×10^{-7}	0.448
9.9×10^{-5}	7.75×10^{-7}	0.367
1.3×10^{-4}	6.73×10^{-7}	0.319
1.7×10^{-4}	6.02×10^{-7}	0.285

3.3 垂直ビームキッカー

ソレノイド磁石内に入射させたミューオンを3次元らせん運動から xz 平面上の運動にするためにキック磁場をかける。Fig. 6とFig. 7に黒線でキック磁場をかけなかったときのミューオンの軌跡、赤線でキック磁場をかけたときのミューオンの軌跡を示す。これらより、例えば、Eq. (12)に示すような適切な時間変動するキック磁場をかければ、ミューオンを平面内にとどめることができることがわかる。

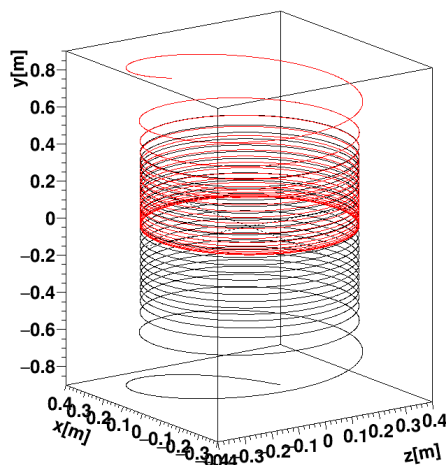


Figure 6: Muon's Tracks.

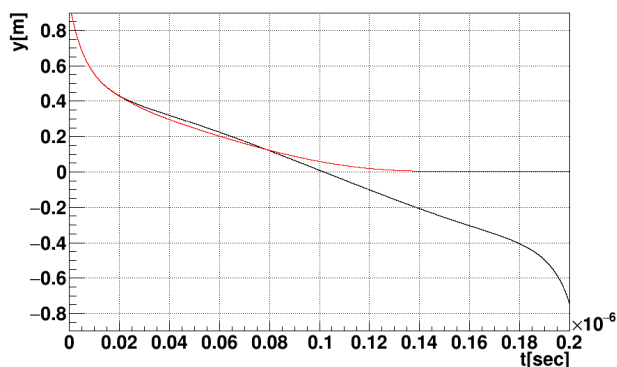


Figure 7: Change of Vertical Motion to Time.

$$B_r(t, y) = B_r(y) \sin\left(\frac{t - t_0}{T_k} 2\pi\right) \quad (12)$$

Eq. (11)の $B_r(t, y)$ の時間変動を Fig. 8 に、 $B_r(y)$ の空間分布を Fig. 9 の右側に示す。また、Fig. 9 の左側にキッカーコイルの形状、ミューオンの軌跡との位置関係を示す。

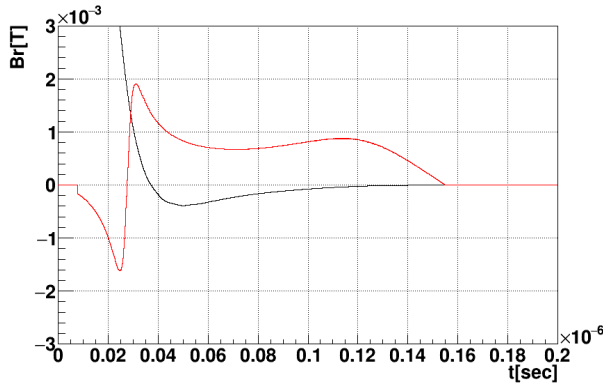


Figure 8: The Weak Focus M-field (black) and the Vertical Kick M-field (red).

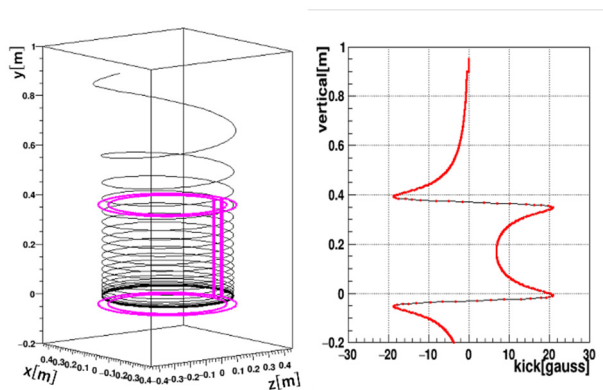


Figure 9: The Kicker Coil (left) and the Kick M-field (right).

3.4 キッカーテストベンチの準備

以上のシミュレーションをもとにして、キッカーテストベンチでの作業の準備を進めている。キッカーコイルに流す電流は 225[A/coil]、キック時間は $T_k/2 \sim 200$ [nsec]程度の半サイン形状、電源電圧は 10~20[kV]を想定した回路設計に着手したところである。また、キッカーコイルは 3[T]の強磁場かつ真空中に設置するので、以下の項目を検討中である。

- 回路全体のインダクタンス計算精度向上、およびインダクタンスを許容値以内に抑えるためのコイル構造・導体形状の検討。
- 3[T]の強磁場かつ高真空内に配置する高電圧導体どうしの接続・絶縁手法の開発。

Figure 10 に示す実寸サイズのコイルテストベンチで実際の運用に係る問題点の洗い出しに取り組んでいく。

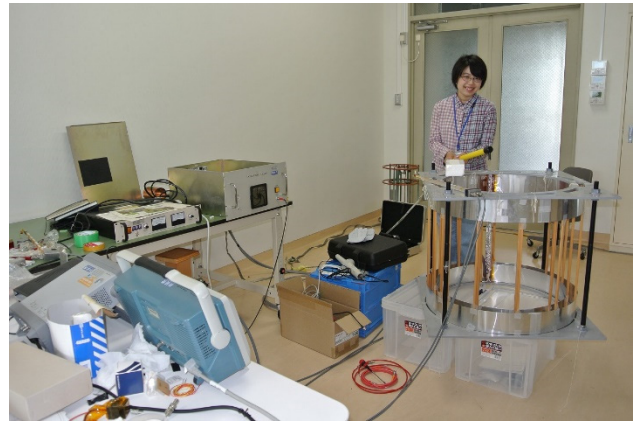


Figure 10: Test Bench Work.

4. まとめ

本論文では、g-2/EDM 実験の計画に基づいて、一様磁場や弱収束磁場、キック磁場をかけたときのミューオンの運動やスピン歳差運動を 4 次のルンゲクッタ法を用いて解析した。また、そのルンゲクッタ法の精度を調べた。次に、実際に実験で用いられるソレノイド磁石内の磁場分布やその中のミューオンの運動を解析した。今後はシミュレーション結果をもとに実験作業を行っていく予定である。

参考文献

- [1] G.W.Bennett *et al.*, Phys. Rev. D 73, 072003 (2006).
- [2] J.D.ジャクソン(2003)『電磁気学(下)』西田稔訳,吉岡書店.
- [3] https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEOM/WEOM07.pdf