

J-PARC E34 muon $g - 2$ / EDM 実験: 低レートミュオンバンチ縦方向構造測定装置の開発

J-PARC E34 EXPERIMENT: DEVELOPMENT OF THE GOOD TIME RESOLUTION MONITOR TO MEASURE THE LONGITUDINAL STRUCTURE OF LOW-RATE MUON BUNCH

須江祐貴^{*A)}、大谷将士^{B)}、北村遼^{C)}、近藤恭弘^{D)}、中沢雄河^{E)}、飯嶋徹^{A)}、
飯沼裕美^{E)}、河村成肇^{B)}、齊藤直人^{B)}、三部勉^{B)}、山崎高幸^{B)}、居波賢二^{A)}

Yuki Sue^{*A)}, Masashio Otani^{B)}, Ryo Kitamura^{C)}, Yasuhiro Kondo^{D)}, Yuga Nakazawa^{E)}, Toru Iijima^{A)},
Hiromi Iinuma^{E)}, Naritoshi Kawamura^{B)}, Naohito Saito^{B)}, Tsutomu Mibe^{B)}, Takayuki Yamazaki^{B)}, Kenji Inami^{A)}

^{A)}Nagoya University

^{B)}KEK

^{C)}University of Tokyo

^{D)}JAEA

^{E)}Ibaraki University

Abstract

We aim at high-precision measurement of the muon anomalous magnetic moment $g - 2$ at J-PARC E34 $g - 2$ / EDM experiment. In this experiment, by reaccelerating the ultracold muon to 212 MeV, a muon beam with low emittance is realized and major systematic errors in the previous BNL experiment can be reduced. We succeeded in demonstrating muon acceleration using an RFQ for the first time and measuring the transverse beam profile in 2017. On the other hand, the measurement of the longitudinal structure becomes necessary to avoid a substantial emittance growth. It is required to measure the longitudinal bunch size with a precision of a few degrees that corresponds to several tens of picosecond. In the commissioning stage, it is necessary to detect single muon because of the low beam intensity. For that purpose, we develop high time resolution measurement system using an MCP detector that is capable of detecting 1 muon. It employs a CFD circuit suppressing deterioration of time resolution depending on signal charge amount. This report shows the development and preparation status of these measurement systems for beam test scheduled in November

1. 背景

ミュオンの基本的な物理量である異常磁気能率 $g - 2$ は新物理に対して高い感度を持つ。現在の実験的な測定値は BNL で行われた E821 実験のみにより 0.5 ppm [1] の精度で決定されており、標準理論の予測に対し 3.7σ [2] の乖離が確認されている。現在準備中の J-PARC E34 muon $g - 2$ / EDM 実験 [3] では、先行実験やその後継実験である Fermilab F989 実験 [4] とは異なる実験セットアップにより主要な系統誤差を抑え $g - 2$ を 0.1 ppm の精度での高精度測定を目指す。J-PARC H-line で行われるこの E34 実験では MLF ミュオンターゲットから供給される表面ミュオンビームをミュオニウムの生成とレーザー乖離により 25meV まで減速させた偏極ミュオンを用いる。静電加速で引き出されたミュオンは 4 種類の線形加速器を用いて 212 MeV まで速やかに再加速されたのちに 3T の一様磁場内にあるミュオンの貯蔵領域に入射される。実験的要請により線形加速では $1.5\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ の低エミッタンスのミュオンビームを生成することが必要となる。

ミュオン線形加速の実証試験として 2017 年 10 月に RFQ を用いた初のミュオン高周波加速に成

功 [5] し、2017 年 12 月には蛍光面付き Micro Channel Plate (MCP) の CCD カメラを用いたビームプロファイルモニター [6] による横方向のビームプロファイル測定 [7] を行った。先に述べた E34 実験のエミッタンスの要求値を実現するためには加速中のエミッタンスの成長を抑えるべく各加速器間で適切にマッチングを取らねばならず、そのためにはいまだ測定されていないビームの縦方向構造測定を確立する必要がある。

E34 実験ではミュオンビームが低デューティのためバンチを集団としてとらえる Current Transformer を用いた縦方向のビームモニターは使用が難しい。また、実証試験では RFQ 出力が低エネルギーなためエミッタンスが大きく 1 m 程度の粒子移送でも横方向の広がりが発展してしまい、ストリークカメラのように進行方向に垂直な方向に電場を掃引して位置情報からバンチ構造を測定する手法も困難となる。そこで、MCP と Constant Fraction Discriminator (CFD) 回路を用いた 1 ミュオン毎の高時間分解能測定によるバンチ構造ビームモニターの開発を行っている。開発した装置は 2018 年 11 月のビームテストにて RFQ で加速された 89 keV のミュオンバンチを用いて試験を行い、バンチ構造測定を実証する。

本稿の構成として、2 章でモニターの実証試験セットアップとそのシミュレーション、モニターへの要

* ysue@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

求について述べ、3章で本装置の構成について述べる。4章で読み出し系の時間分解能と装置校正用テストベンチについて説明し、5章で本稿まとめ今後の展開について述べる。

2. 実証試験

バンチ構造測定の実証試験は E34 実験とは異なり J-PARC MLF 試験ミューオンビームラインで行い、ミューオニウム生成とレーザー乖離による冷却ではなくアルミ薄膜のターゲットにミューオンビームを照射して負ミューオニウム ($\mu^+e^-e^-$) を生成することで減速を行う。実証試験のセットアップを Fig. 1 に示した。負ミューオニウムは Soa レンズ [8] を用いて 5.6 keV まで静電加速され RFQ へ入射される。過去の測定結果から負ミューオニウムの時間構造は入射ミューオンのそれと同じであることが分かっており、RFQ には半値幅 120 ns 程度の時間幅を持ったバンチが入射される。入射されたバンチは RFQ の動作周波数 324 MHz により 3.09 ns 周期にバンチングされ、89 keV のエネルギーのバンチとして出力される。その後 2 台の四重極電磁石による横方向収束とバンチャーを用いた縦収束、偏向電磁石による運動量選択を行い MCP 表面でミューオンの飛行時間の測定を行う。モニターとバンチャーを除いた構成は以前行った実証試験 [5] [7] と同様である。しかし、89 keV という低エネルギーのためエミッタンスの広がりが大きく、RFQ 出口から MCP までのおよそ 900 mm の粒子移送の間にバンチ構造が悪化し測定が不可能となる問題があるため専用のバンチャーを設計して用いる。

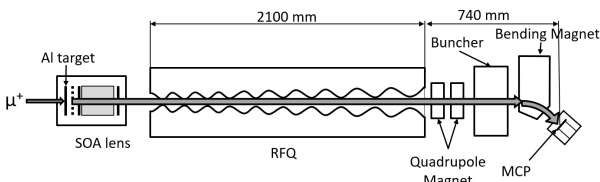


Figure 1: The setup of demonstration of longitudinal bunch size measurement.

Figure 2 はこの実証実験セットアップで得られるミューオンのバンチ構造の予想値であり、MCP 表面で縦方向におよそ 600 ps の広がり（広がりガウス分布の σ としたとき）を持っている場合のものである。このセットアップによって得られる MCP 表面でのビームプロファイルは Fig. 3 のようになる。RFQ 下流のビームラインでは、運動量の違いにより異なる軌道を描く。よって、検出器位置でビーム粒子の X 方向位置と運動量に相関が生じる。そこで X 方向（偏向電磁石によるビームの偏向方向）に MCP アノードを 4 分割することで検出位置による飛行時間依存性を低減と 1 アノードあたりの有感面積を削減し時間分解能の向上を狙う。E34 実験で用いられる線形加速器の上流部および実証試験における RFQ は 324 MHz で運転される。バンチ構造の位相を 1% の精度で測定する為には本装置にはおよそ 30 ps の時

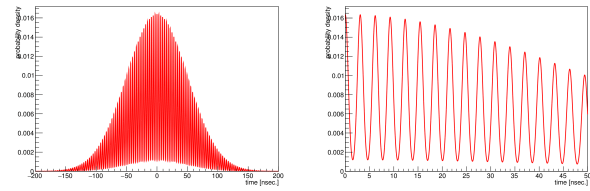


Figure 2: Expected bunch structure at the MCP surface in demonstration setup. the overall structure (Left) and the zoomed out one during [0 ns., 50 ns.] (Right).

間分解能が要求される。

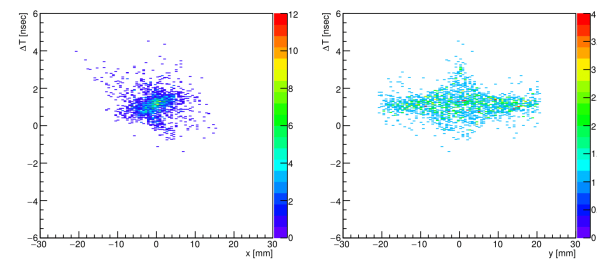


Figure 3: Simulated beam profile at the MCP surface. X(Y) vs. kinematic energy difference from 89 keV.

この実験構成においてミューオンのレートは 0.5 mHz 程度得られるため、1 回の RFQ への入射につき 1 ミューオン程度、すなわち出力されるバンチ構造 (Fig. 2) のどこかで 1 ミューオン程度が測定できる。そのままでは十分な統計量が期待できないため、飛行時間に対して 3.09 ns ごとに剰余をとったものを積算することでバンチの縦方向構造を測定する。ビームレート 0.5 mHz のとき 4.5 日でおよそ 200 ミューオンの測定が期待される。そのときの測定結果のモンテカルロシミュレーションを行ったものが Fig. 4 である。この図は測定するバンチの幅が 600 ps、S/N 比がおよそ 4 でのシミュレーション結果となっている。分布に対しガウスフィットをかけたものであるが、元のバンチ構造の幅に対しておよそ 15% 程度の精度で幅を測定可能である。これは統計誤差が主要であるため、今後の運用でビームレートが向上すれば精度は装置の時間分解能である 4 度程度まで向上すると考えられる。

3. 装置構成

Figure 5 はミューオンビームの縦方向構造測定装置の概念図である。ミューオンが MCP に衝突して発生した二次電子から増幅された信号を 4 チャンネル読み出しのマルチアノードで読み出し、アンプと CFD 回路により信号処理する。データとしては TDC、ADC をもちいてミューオンの飛行時間と MCP 信号の出力電荷を記録する。同時に飛行時間の基準として RFQ に印加する RF の位相に同期した参照信号を用いる。使用する MCP は、 $\phi 42$ mm の有感領域を持ち、応答時間およそ 900 ps、位置依存での時間分解

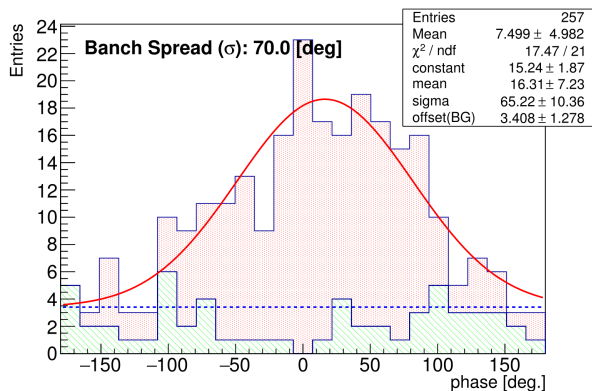


Figure 4: The M.C. simulation result of this beam monitor in demonstration setup. The red histogram (dotted) is signal. The Green histogram (line hatched) is accidental background.

能の悪化を回避するために読み出しアノードを X 方向に 4 分割したマルチアノードのものを用いる。読み出し回路は信号ゲインの変化によるタイムウォークを削減するため、時間応答の良い low noise amp とタイムジッター 10 ps 以下の高速コンパレータを使った CFD 回路を用いる。

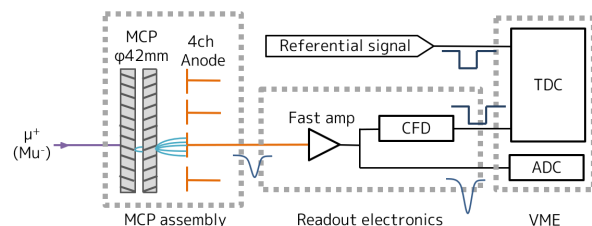


Figure 5: Schematics of longitudinal bunch structure monitor.

また、RFQ 出力のミュオンは MCP 表面に静止し十分なゲインを得られることが過去の試験において確認されている。加えて信号事象は背景事象に対して電荷量が多いことが分かっているため、同時に信号の電荷量を取得することでバックグラウンドの削減を図ることが可能である。

4. オフライン試験

Figure 6 は 2 つの CFD 回路に対して半値幅 1 ns 程度のテストパルスを同時入力し、2 チャンネル間の TDC で取得した時間差の分布を記したものである。TDC は LSB 25 ps のものを用いており、この結果より読み出しシステムの精度としてテストパルスに対しおよそ 14 ps の時間分解能を得られている。

実証試験はビームレートが低いことに加えて使用可能な時間が限られているため、事前にテストベンチを用いて装置全体を校正し時間分解能を評価する必要がある。そこで、参照信号に対し時間分解能の良く MCP に検出感度がある荷電粒子あるいは X 線を MCP に照射し、MCP からの出力信号と参照信号

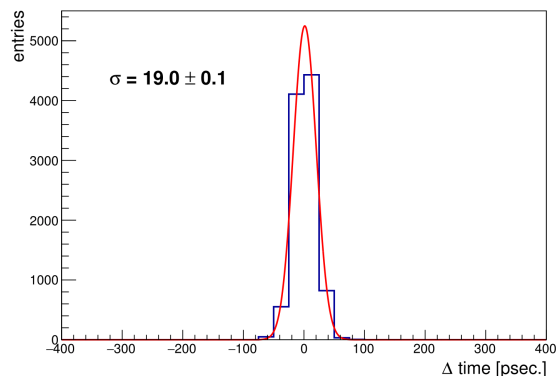


Figure 6: Distribution of time discrepancy between 2 output of CFD that input the same test pulse. Each channel of the DAQ electronics achieve the time resolution of 15 ps.

の時間差から時間分解能を評価する。校正の点においては、φ42 mm の有感領域上に位置を変えながら照射することで位置依存性を校正する必要がある。そこで、405 nm のピコパルスレーザーを低仕事関数の結晶 LaB₆ 表面に照射することで光電子を出し、静電場によって加速することによって MCP 表面に当てる手法を用いたテストベンチを構築する。この手法で時間分解能の主な不定性になるのはピコパルスレーザーのパルス幅と光電子の結晶から MCP 表面までの走行時間となる。ピコパルスレーザーは半値幅 77 ps のものを用いる。走行時間はおおよそ 500 V の正電場を MCP 表面に対して一様になるように設計する。これらにより、信号源側の時間分解能を 35 ps まで抑える。

5. まとめと展望

J-PARC E34 muon $g-2$ / EDM 実験のミュオン線形加速器のビーム診断に用いる 4 チャンネルマルチアノード MCP と CFD 回路を用いた高時間分解能のミュオンバンチ縦方向構造測定装置を開発中である。バンチの構造を周期の 1% の精度で測定するために、加速 RF の位相を基準とした参照信号に対して 30 ps 程度の時間分解能を目指す。現在、校正用テストベンチや高速応答の MCP、実証試験用バンチャーの製作段階でありそれらが完成次第、校正及び時間分解能の測定を行う。2018 年 11 月 J-PARC MLF のミュオンテストビームラインで RFQ を用いたビームテストを行い、本装置を用いてミュオンバンチの縦構造測定の実証試験を行う予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費、JP25800164、JP15H03666、JP15H05742、JP16J07784、JP18H03707、JP18H05226 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] G.W. Bennett *et al.*, Phys. Rev. D 73, 072003, (2006).

- [2] Alexander Keshavarzi, Daisuke Nomura, and Thomas Teubner, *Phys. Rev. D* 97, 114025, (2018).
- [3] <http://g-2.kek.jp/portal/index.html>
- [4] Antoine Chapelain, arXiv:1701.02807[hep-ex].
- [5] S. Bae *et al.*, *Phys. Rev. Accel. Beams* 21, 050101, (2018).
- [6] B. Kim *et al.*, *Nucl. Instr. Meth A* 899, 22 (2018).
- [7] M. Otani *et al.*, to be published in *Journal of Physics: Conference Series*.
- [8] A.P. Mills and K.F. Canter, *Positron Studies of Solids, Surfaces, and Atoms* (World Scientific, Singapore, 1986) p. 199.