

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800164

研究課題名(和文) ミュー粒子g-2/EDM精密測定実験のためのビームイオン源の開発

研究課題名(英文) Development of beam ion source for muon g-2/EDM measurements

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARCミュー粒子g-2/EDMの精密測定実験(E34実験)のためのビームイオン源の開発を行った。イオン源として、J-PARC MLFの正ミュー粒子と標的との散乱によって生成される、負ミューオニウムを利用する方法を考案した。負ミューオニウムを生成・加速し、その収量を測定するための実験装置をJ-PARC MLFに構築し、負ミューオニウム検出のためのMCP検出器の性能評価を行った。

研究成果の概要(英文)：Development of beam ion source for the J-PARC muon g-2/EDM measurements (J-PARC E34) was performed. We utilize negative muonium produced by muon beam of J-PARC MLF for the ion source. Experiment setup to produce, accelerate and measure negative muonium was constructed at J-PARC MLF. Performance of MCP for negative muonium detection was evaluated.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ミュー粒子 負ミューオニウム ビームイオン源 MCP J-PARC

1. 研究開始当初の背景

CERN LHC加速器での実験を始め、素粒子の標準模型を超える物理の探索が世界中で行われている。申請者の参加するJ-PARCにおけるミュー粒子の異常磁気能率($g-2$)、電気双極子能率(EDM)の精密測定実験(J-PARC E34実験[1])もその一つである。先行実験であるBNL E821実験[2]では測定値と理論計算との間に約3標準偏差の不一致があることが報告されており、これを決定的にすることがJ-PARC E34実験の目的である。J-PARC E34実験では、コンパクトなミュー粒子ビーム貯蔵リングを使用し、電場によるビーム収束を必要としない設計にすることで、先行実験よりも4倍以上の測定精度を実現する計画である。これを実現するためには、高強度の極冷ミュー粒子ビームを生成することが必須であった。研究開始当初、熱ミューオニウムをレーザー解離し、再加速する方法が進められていたが、大強度レーザーの開発と同時にビームライン開発を進めるため、レーザーを必要としない手法の研究を進める必要があった。

2. 研究の目的

当該研究の目的は高強度の極冷ミュー粒子ビーム生成のためのビームイオン源の開発である。その主要な利用目的はJ-PARC E34実験である。E34実験では、J-PARCの大強度ミュー粒子ビームを利用して、先行実験とは異なる新しいアイデアを用いて従来の測定誤差を大きく改善した測定値を得ることを目標としている。これを達成するためには、これまでになく収束性が良く、かつ、高強度のミュー粒子ビームが必要であり、そのための新しいビーム生成方法を確立することが必要である。当該研究ではビームの初期加速までを視野に入れている。

3. 研究の方法

当該研究において、極冷ミュー粒子ビームの生成方法としては、まず、正ミュー粒子(μ^+)を標

的に入射することで、低エネルギーの負ミューオニウム(Mu^-)を生成し、それを再加速する。 Mu^- は荷電を持っているため、直接、静電場によって加速することができるのが利点である。図1に当該研究において、 Mu^- を生成し、検出するための実験セットアップを示す。

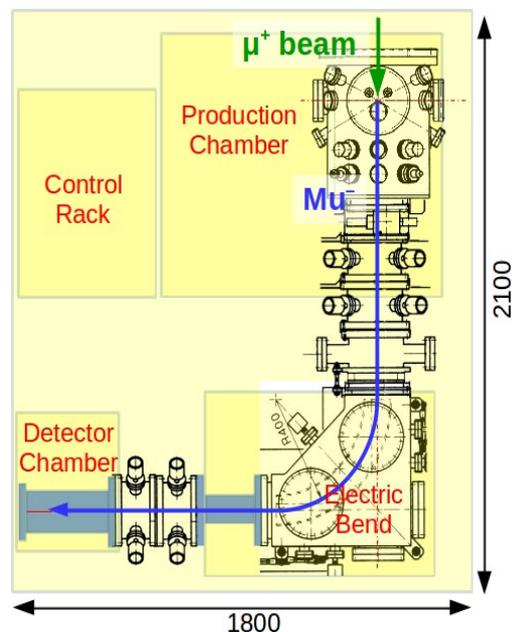


図1 実験セットアップ

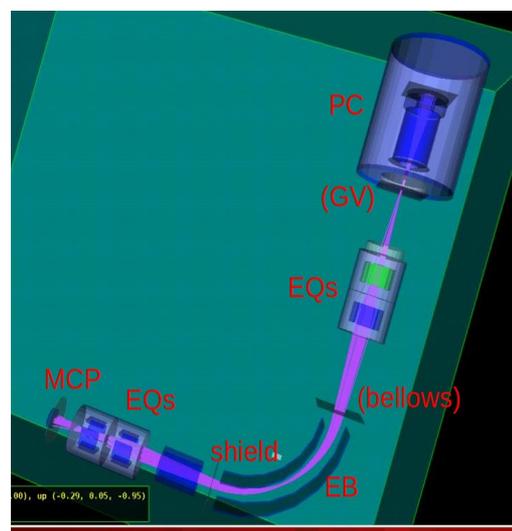


図2 ビームラインシミュレーション

Production Chamber(PC)には Mu^- 生成標的と初期加速のための電極が設置してあり20keVまで加速する。その後、静電四重極(EQ)を利用して Mu^- 検出器である浜松ホト

ニクス社製Micro Channel Plate (MCP)まで Mu^- を輸送する。ビームライン途中に設置したElectric Bend (EB)によってビームを曲げ、背景事象となる陽電子などを除去する。ビームライン途中から発生する正ミュー粒子の崩壊による陽電子を除くため、EBやMCPの周りは遮蔽で覆う。この実験セットアップでのビーム輸送効率をGEANTシミュレーションで見積もった。図2はシミュレーションの様子を示している。

4. 研究成果

(1) MCP検出器の性能評価

Mu^- 検出の要であるMCP検出器の性能評価を行った。図3は当該研究で使用する直径42cmの有感領域を持つMCP検出器の写真である。

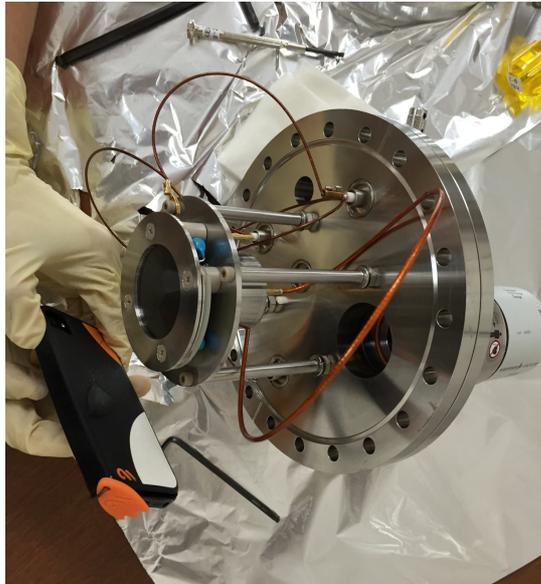


図3 MCP性能評価時の写真

性能評価の内容は、ダークカウントレート、波高分解能、時間分解能、ゲインの4項目である。(ダークカウントレートを除く)測定では ^{55}Fe からのガンマ線(5.9keV)、Xeランプによる紫外線(最大6.7eV)、光電効果による電子(電場により100、300、500eVに加速)、J-PARCミュー粒子ビームからの崩壊陽電子(最大53MeV)などを利用した。ダークカウントレート、波高分解能、時間分解能の測定値は、それぞれ2.8Hz、85.1%、4nsec以下となっており、浜松ホトニクスによる性能評価値をほぼ再現している。図4のヒス

トグラムは500eVの電子をMCPに入射したときの出力電子数(ゲイン)の分布である。分布のピーク値は浜松ホトニクスによる評価値より若干大きい 2.1×10^7 乗となっている。

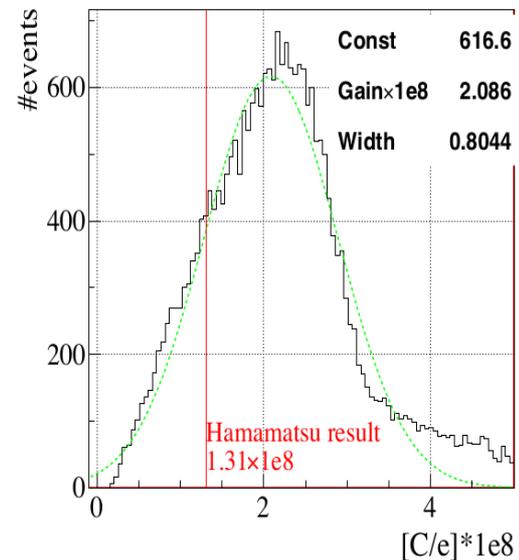


図4 MCPのゲイン分布(信号増幅回路による約10倍のゲインを含む)

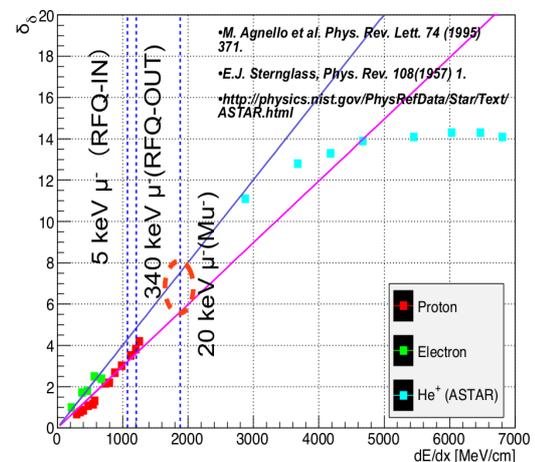


図5 二次電子放出数 δ

荷電粒子がMCPに入射したときの(MCPでの増幅の種となる)二次電子の生成量はMCPでのエネルギー損失に比例すると考えられることから、 Mu^- がMCPに入射した場合の応答を評価した。図5はエネルギー損失と二次電子生成量の関係を示すプロットである。文献による電子、陽子入射の場合の値[3]、シミュレーションによる He^+ 入射時の値[4]を示し

ている。Mu⁻入射の場合は、電子と陽子の値の間にあると想定すると、Mu⁻入射による二次電子生成量は5.5～7.5個程度となる。多数の二次電子がMCPで生成した場合、空間電荷効果による飽和によって、増幅率が抑制される効果(0.3程度)はあるものの、Mu⁻入射でのゲインは十分であることが分かった。

(2) 実験セットアップ構築

図1のビームライン設計図に基づいてJ-PARC MLFにおいて実験セットアップを構築した。図6は実験セットアップの写真である。

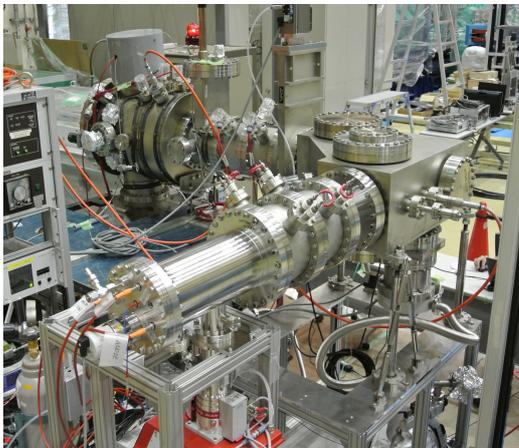


図6 実験セットアップの写真

PC、EB、EQはイギリス・ラザフォードアップルトン研究所で使用されていたものをJ-PARCに移設し、Mu⁻測定実験のために再配置した。ビームライン最下流のDetector Chamber (DC)にはMCP検出器を内蔵している。EBの周囲には背景事象となる陽電子等を除去するための遮蔽を設置し、DCの周囲にはMu⁻の崩壊による陽電子をトリガーするためのシンチレーションカウンターを設置する(これらは写真には写っていない)。2015年秋以降に延期したJ-PARC MLFのμ⁺ビームを利用した実験において、Mu⁻測定を行う予定である。

<引用文献>

[1] http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-12.pdf

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

[3] M. Agnello et al., “Antiproton slowing down in H₂ and He and first evidence of nuclear stopping power”, Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 371、E.J. Sternglass, “Theory of Secondary Electron Emission by High-Speed Ions”, Phys. Rev. 108(1957) 1.

[4] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html>

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 0件)

[学会発表](計 2件)

① J-PARC ミューオン g-2/EDM精密測定実験のためのミューオン再加速試験に向けた低速ミューオン源開発の準備状況

北村遼、深尾祥紀、三部勉、大谷将士、他多数

日本物理学会2015年年次大会 2015年3月21日 早稲田大学

② J-PARC ミューオン g-2/EDM 精密測定実験のためのミューオン再加速試験に向けた低速ミューオン源の研究

北村遼、大谷将士、三部勉、他多数

日本物理学会2014年秋季大会 2014年9月18日 佐賀大学

[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]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深尾 祥紀 (FUKAO, Yoshinori)

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

大谷 将士 (OTANI, Masashi)

高エネルギー加速器研究機構・

素粒子原子核研究所・博士研究員

研究者番号: 90636416

北村 遼 (KITAMURA, Ryo)

東京大学・齊藤研究室・博士課程学生

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