

素核研ミューオングループではミューオン LFV 探索・ミューオン精密測定の本柱で研究を推進している。

■ ミューオン LFV 探索研究

通常のミューオン崩壊と異なり、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊やミューオン電子 ($\mu^- e$) 転換事象ではレプトン世代数の保存が破れており (charged Lepton-Flavor Violation (cLFV)), 標準理論では起こりえない。このため cLFV 探索は高エネルギーフロンティア実験と並んで新物理の検証に重要な役割を果たすと考えられている[1]。

■ MEG 実験

MEG 実験は、ポールシェラー研究所での $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊を探索する実験であり分岐比上限値として 4.2×10^{-13} を与えている[2]。現在、第二期のデータ収集 (MEG II) 開始に向けて測定器コンディショニング作業を行っており 2018 年中に物理データの取得を開始する予定である。素核研ミューオングループは液体キセノンガンマ線検出器の冷却システム整備を行うなどの貢献を行っている。

■ COMET 実験

cLFV 物理に関してミューオングループが精力的に推進している実験が J-PARC での $\mu^- e$ 転換事象探索 (COMET) 実験である。COMET 実験は 16 カ国、32 研究機関 (2018 年 1 月) の研究者が参加する国際共同実験である。COMET 実験は、建設予定の超伝導電磁石のうち、最初の 90 度の折曲がりまでを建設して物理計測を行い (Phase I 感度 10^{-14})、その後、電磁石を延長 (Phase II 感度 10^{-16}) して段階的に物理感度を上げていくことを計画している。

COMET 実験では、陽子標的でパイ中間子を生成し、その崩壊でできるミューオンを静止標的へと輸送する。静止標的で停止したミューオンはミューオン原子を形成し、その後スペクトロメータにより特徴的なエネルギーの電子を計測して $\mu^- e$ 転換事象を同定する。

生成されたミューオンの輸送並びに信号電子の弁別のためには長大な超電導ソレノイド磁石を使用する。この磁石は、低温センターならびに素核研低温グループとの強固な協力関係のもとで準備を進めている。

COMET 実験で使用する陽子ビームは他のハドロンホール実験のためのビームとは異なり、実験の要請から取出し時のエネルギーが 8GeV である必要がある。また、加速器内でのパルス構造を保ったまま実験室に取出す必要

があり、さらには取出されたビームではパルスからの陽子の漏れ出し率 (エクステンションファクター R_{ext}) が 10^{-10} 以下である必要がある。ミューオングループではこれを計測するための検出器開発も含めて J-PARC 加速器グループと連携して研究を進めてきた。2018 年 1 月 -2 月には初めて COMET 実験用の陽子ビームの加速・取り出し試験を実施し、 R_{ext} の計測を行った。計測は早い取出し (FX)、遅い取出し (SX) 両モードで行い、FX では加速器内のアポトラインに設置した専用の測定器を使用し、SX では取り出したビームをハドロン一次標的に入射して生成される 2 次粒子を計測して行った [3]。SX での測定では K1.8 ビームラインの最下流にホドスコープカウンターを配置してビーム時間構造を計測した。図 1 にビームパルス時間構造の計測結果を示す。加速器内の 9 個ある加速バケツのうち 4 つのバケツに陽子を入射して加速・取出しを行っているため、その 4 つのバンチに対応するピークがはっきりと見える。最後のピークの後方には、このバケツから漏れ出したであろうと考えられる陽子に対応するピークが見られたが、解析の結果この陽子はビーム取出し開始後の 100 ミリ秒以内のみ飛来していることが確認できており、今後加速器グループと協力して更なる精査を行っていく予定である。

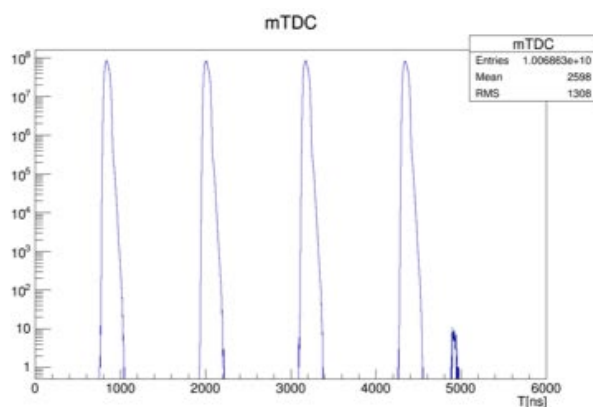


図 1 COMET 実験のための陽子ビーム時間構造の計測結果。

検出器に関しては、国内外のコラボレータとの協力関係により開発・製作を行っている。検出器開発・製作はビームスタディ用の検出器 [4] と物理計測用検出器の 2 種類の検出器について行っている。関連するエレクトロニ

クスに関しても海外の共同実験者を中心に、素核研エレクトロニクスシステムグループの協力を得ながら Open-it に参加して効率的な開発を行っている。

実験グループではコラボレーションの拡大にも力を入れている。2017年にはフランス・LPC とオーストリア・モナッシュ大学のグループが加わり、2018年にはフランス・LPC Caen と中国・中山大學が加わった。

■ ミューオン精密測定研究

ミューオンの異常磁気能率($g-2$)は、先行実験の結果に新物理の兆候が既に見えている可能性がある。また、電気双極子能率は、有限の値があれば即新物理を意味する。従来とは全く異なる新しい実験手法を用いてこれらを同時に測定する実験として、J-PARC $g-2$ /EDM 実験(E34)の準備を進めている[5]。機構内では、素核研・物構研・加速器施設・超伝導低温工学センター・機械工学センターが参画する、機構横断的研究課題である。

ミューオン $g-2$ に関する国際的な興味の高まりを受け、2018年2月に、ミューオン $g-2$ のハドロン真空偏極に関する国際研究会を KEK つくばキャンパスで開催し、国内外の70名の専門家が集結した。2016年にJ-PARCで行った研究会をさらに発展させる形となった。新しい理論手法や実験を用いたミューオン $g-2$ 理論計算の精度向上について活発な議論が行なわれた[6] (図2)。

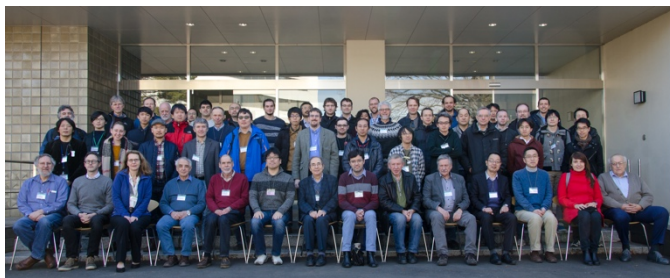


図2 ミューオン $g-2$ ハドロン真空偏極に関する国際研究会(KEK, 2018年2月)

J-PARC 原子核素粒子共同利用実験審査委員会 (PAC) 及び実験技術報告書 (TDR) 評価委員会の答申を受け、TDRの改訂を行い、2017年12月に再提出した。PACではステージ2採択に関する審議が続いている。

■ 極冷ミューオン源・ミューオン加速器の開発

熱ミューオニウムを真空中に生成するシリカエアロゲル標的の開発を行っている。2017年6月に TRIUMF にてミューオニウム生成標的の試験データを取得し、様々な条件でレーザー穴加工された標的からのミューオニウム生成収量を測定した。生成効率について、長期安定性や

再現性を確かめることができた。

JAEA および加速器研究施設の協力を得つつ、ミューオン加速器の設計を進めている。KEK・JAEA・東京大学・茨城大学のチームがミューオン加速を実証する実験を行なった。2017年10月にサブ keV エネルギーまでミューオンを減速させ負ミューオニウムイオンを生成し RFQ を用いて 90 keV まで加速させることに成功した (図3) [7]。

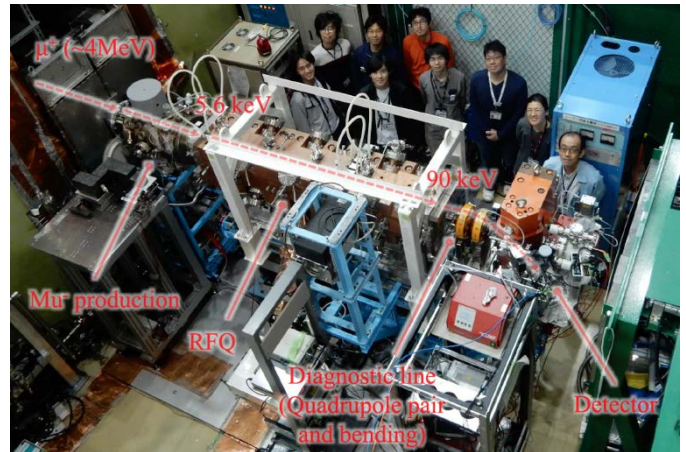


図3 J-PARC MLF D ラインで実施したミューオン加速 (2017年10月)

■ ビームの入射と蓄積・超精密電磁石の開発

超伝導低温工学センター・茨城大学を中心として磁場設計、電磁石の構造設計を進めている。高い一様性を持つ磁場を発生する超伝導電磁石の設計について論文を発表した[8]。独自に開発した磁場測定装置をアルゴン国立研究所が開発した装置と比較測定を行なった。それぞれの独立な測定器による測定値が20ppbの精度で両者が一致することを確認した。ミューオンビームは蓄積磁石上部から螺旋軌道により蓄積磁石中へ入射する。つくばキャンパス KEKB 入射器棟において、低エネルギー電子ビームを用いてビーム入射の実証試験を行っている。電子ビームをバンチ化する装置の開発を行なった。

■ 検出器開発

陽電子飛跡検出器は、科研費補助金の助成を得て実機的设计・製作を行っている。ミューオングループの佐藤研究員とエレクトロニクスシステムグループおよび九州大学が中心となり、シリコンストリップセンサーと読み出し集積回路の開発・評価と組立て方法の検討を行っている。2018年3月にJ-PARC MLFにてミューオンビームを用いて評価を行う予定である。また、機械工学センターの協力を得て、検出器の機械構造の設計と精密姿勢監視システムの検討を進めた。

References

- [1] S. Mihara et al. Ann. Rev. of Nucl. and Part. Sci Vol. 63: 531-552 2013、「荷電レプトンで探る新物理」, 三原智, 物理学会誌 70 巻 10 号 現代物理のキーワード
- [2] A. M. Baldini et al. (MEG collaboration), Euro. Phys. J. 76 :434, 2016
- [3] 素核研ニュース記事「COMET 実験グループ 8GeV 陽子ビーム試験成功」(準備中)
- [4] H. Nishiguchi et al., "Development of an extremely thin-wall straw tracker operational in vacuum – The COMET straw tracker system", NIM. A845 (2017) 269-272
- [5] 齊藤直人, めそん No. 32 (2010); 三部勉、石田勝彦、佐々木憲一、高エネルギーニュース Vol.31 No.3 2012; 三部勉、原子核研究 61 号 99 (2017)
- [6] 素核研ニュース記事 「ミューオン $g-2$ のハドロン真空偏極をテーマとするワークショップを KEK つくばキャンパスで開催」(<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2018/02/g-2workshop/>).
- [7] 素核研ニュース記事「高周波リニアックによるミューオンの加速実験に成功」(<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2017/12/muon/>)
- [8] M. Abe, et al., "Magnetic design and method of a superconducting magnet for muon $g-2$ /EDM precise measurements in a cylindrical volume with homogeneous magnetic field", NIM A 890, 51-63 (2018).