

ミューオン・中性子グループは、ミューオンと中性子を用いて素粒子標準理論を超える物理現象を探る実験的な研究を推進している。現在は、東海キャンパスの J-PARC におけるミューオンの異常磁気能率( $g-2$ )・電気双極子モーメント(EDM)測定を行う「ミューオン  $g-2$ /EDM」実験、カナダ・TRIUMF 研究所における超冷中性子を用いた中性子電気双極子モーメント探索実験 TUCAN を行っている。

また、グループの国際連携強化の一環として、物構研ミューオン科学系、素核研ハドロングループと協力して、スイス PSI と J-PARC の学术交流協定に基づき、ミューオンと中性子を用いた施設と実験技術に関するワークショップ BRIDGE 2023 を 2023 年 10 月に PSI で開催した (<https://indico.psi.ch/event/14832/>)。

### (1) J-PARC ミューオン $g-2$ /EDM 実験



図1 実験概要

ミューオンの  $g-2$  および EDM はいずれも量子補正の効果として標準理論を超える物理の寄与が顕著に現れることが予想されている。2023 年 8 月にフェルミ国立研究所(FNAL)において新しい測定結果が発表され、2021 年の結果と矛盾がないことを確認するとともに、精度を 2 倍に改善した。標準理論の予想値は、2021 年にホワイトペーパーに取りまとめられた値があるが、その後新しい実験データや格子 QCD 計算を用いた手法による新しい評価値が報告されており、精査が続いている。つい先日、Belle II 実験から、3 パイオン生成に関する新しい結果が発表された[1]。今後はハドロン真空偏極にもっとも重要である 2 パイオン生成の測定・解析が計画されている。一方、測定値については、BNL/FNAL の結果を追試した実験はまだなく、独立な実験による検証が望まれている。J-PARC では、ミューオンを冷却・加速してコンパクトな蓄積磁石に蓄積するという新しい手法でミューオン  $g-2$  および EDM を精密測定する実験を準備している (図1)。

実験は MLF ミューオン H ラインで実施する。物質構造科学研究所ミュオン科学研究系と連携して、新しい実験エリア (H2 エリア) の整備を進めた。2024 年 3 月には、レーザールーム[ 2 ]と電源プラットフォームなどの整備を完了した。2024 年度は、施設整備費として当初予算措置されており、ビーム輸送のための電磁石を製作し H2 エリアまでのビームライン延伸を完了する計画である (図 2)。

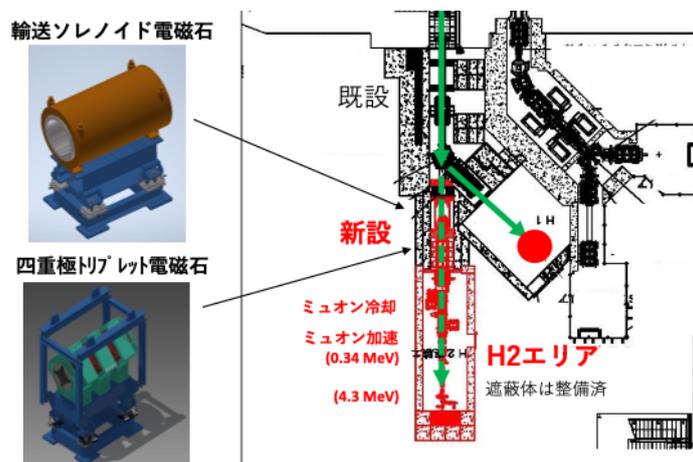


図 2 H ラインと H2 エリアの整備計画 (予算措置済)

2023 年度に引き続き 2024 年 3 月、J-PARC MLF S2 実験エリアにおいてでは室温のミュオニウムを生成しレーザーイオン化するミュオン冷却の実証試験のデータ収集を行った。岡山大学の協力により波長 244nm のパルスレーザーをミュオニウムに照射し、イオン化したミュオンを静電場で取り出して測定した。室温に冷却されたミュオン源のエミッタンスを評価するためのデータ取得を行った。また、ミュオン源領域における環境磁場の計測と監視する手法の開発を完了し、必要とされる精度で環境磁場を計測、補正できることを示した[3]。2024 年 4 月から、いよいよ RFQ 加速空洞を用いて 80keV まで加速する実験を行う。

次の段階の加速に用いる IH-DTL 空洞は実機の製造が完了し、高電力試験を実施し、良好な結果が得られた[4]。中速部の加速のための Disk And Washer(DAW)型の加速空洞については、組み立て方法の改善を行い、より一様な加速電場を形成する設計を完了した[5]。高速部に用いる Disk-Loaded Structure(DLS)型の加速器の輸送ラインの設計を行なった。ミュオン源を含むミュオン加速全体のシミュレーションを行い、実験で要求される性能を満たすことを確かめた[5]。

つくばキャンパスの入射器棟では、低エネルギー電子ビームを用いた 3 次元らせん入射の実証実験を行なった。最終段階のデータ取得が行われている。つくばキャンパス北カウンターホール側室では、陽電子飛跡検出器の構成要素であるクォーターペーンの製作を進めている。プロトタイプを製作しノイズ性能の評価を行い良好であることを確かめた[6]。データの読み出しに用いる 2 個の FPGA を搭載した読み出し回路システムを開発し、試験によって要求を満たすことを確かめた[7]。読み出し ASIC は全数の品質検査が終了し、その結

果を論文に投稿した[8]。ミュオン蓄積磁石の設計をキッカーコイルの配線を考慮した設計に変更した。蓄積磁場を測定するプローブシステムの開発を行なった。FNAL g-2 実験で用いられている磁場測定器の相互比較するため米国 ANL の磁石を用いてデータを取得した。

また、実験建屋の建設準備のため、KEK 施設部や J-PARC 施設工務セクションの全面協力のもと、実験建屋及び設備の実施設計を行なった。2024 年度に予算が措置されれば、すぐに外構整備の工事に着手可能な準備を整えた。

2023 年 12 月に新潟大学でコラボレーション会議を行なった (図 3)。そこで、コラボレーション議長が Seonho Choi 氏 (ソウル大学) から吉岡瑞樹氏 (九州大学) に交代となった。2024 年 3 月に上海交通大学が新たにコラボレーションに加わった。実験装置に起因する様々な誤差と物理精度・感度の関係についてより詳細に検討するため、物理解析ワーキンググループを発足し、実験グループ全体で共有するリストに基づきスタディを進めている。2024 年 3 月 12・13 日に第 2 回の進捗評価委員会を開催し、実験の設計や準備の進め方について委員から助言を受けた。



図 3 新潟大学で開催したコラボレーションミーティング (2023.12)

ミュオン g-2/EDM 実験で開発する実験技術の波及効果として、将来のミュオンコライダーやイメージング研究への応用が期待されている。2023 年 11 月にミュオン加速とそれを用いた将来コライダーに関する研究会[9]、2024 年 1 月に加速ミュオンを用いたミュオンイメージング研究の可能性に関する研究会[10]を開催し、物質生命科学の研究者や産業界の関係者と議論を深めている (図 4)。



図4 (左) 素核研ワークショップ「Muon acceleration and future colliders with muon」  
(右) 研究会「加速ミュオンを用いたミュオンイメージング研究の可能性」

#### 参考文献

- [1] 須江 祐貴(名古屋大学), IPNS Physics Seminar (<https://kds.kek.jp/event/50442/>, 2024年4月10日)
- [2] 第166回 機構会議 物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系 活動報告(2024年4月)
- [3] 有留 翔一、東京大学 修士論文 (2024)
- [4] 茨木 優花、名古屋大学 修士論文 (2024)
- [5] 竹内 佑甫、九州大学 学位論文 (2023)
- [6] 梅林 恵祐、九州大学 修士論文 (2024)
- [7] 岡村 麗矢、新潟大学 修士論文 (2024)
- [8] T. Yamanaka, et al., [arXiv:2401.11920](https://arxiv.org/abs/2401.11920) (submitted to NIMA) (2024.1)
- [9] 素核研ワークショップ「Muon acceleration and future colliders with muon」(2023.11.2) <https://kds.kek.jp/event/48168/> (92人参加)
- [10] 研究会「加速ミュオンを用いたミュオンイメージング研究の可能性」(2024.1.18) <https://conference-indico.kek.jp/event/249/> (89人参加)

## (2) TUCAN

KEK 素核研は中性子電気双極子モーメント(EDM) を  $10^{-27}$  ecm の測定感度で観測することを目標とする国際共同実験 TUCAN に参加している。中性子 EDM の探索は超冷中性子(UCN: Ultra-Cold Neutron)という運動エネルギーが 300neV 以下の極低エネルギーの中性子を用いて行う。TUCAN では現在、UCN 源のアップグレードが行われており、世界最大強度の UCN 源の建設が進められている。KEK で開発されたヘリウム 3 冷凍機や、TRIUMF で開発されている液体重水素モデレータと組み合わせることで、世界最高強度の UCN 源を実現する。2024 年中に新 UCN 源での UCN 生成を開始する予定である。

効率的に UCN を発生させるには UCN コンバータである超流動ヘリウムを 1.0 K 程度以下に維持しなければならない。中性子を発生させるための核破砕反応時の放射線発熱は 8.1 W と見積もられており、輻射・伝導熱を含めると約 10 W の熱負荷が超流動ヘリウムにかかる。ヘリウム 3 冷凍機はこの熱負荷を除去するために用いられる。ヘリウム 3 冷凍機は現在 TRIUMF の UCN ビームライン上にインストールされ、コミッショニング作業が進められている(図 5)。これまでに高価なヘリウム 3 の代わりに通常のヘリウム 4 を用いた冷却試験が行われ、正常にヘリウム 3 冷凍機が動作することが確認された。今後、ヘリウム 3 を用いた冷却試験が行われる。

ヘリウム 3 は保存タンク、ヘリウム 3 冷凍機、排気ポンプを繋ぐクローズドループの中で循環運転される。不純物が含まれると冷凍機内部で固化し、配管の目詰まりを起こすため、冷凍機運転開始前にヘリウム 3 およびその配管を循環精製する必要がある。このためのヘリウム精製器を現在、KEK では開発している。ヘリウム精製器内には 2 段の GM 冷凍機によって冷却された 70 K, 20 K の活性炭トラップがありそれぞれ、水、窒素、酸素(70K トラップ)、水素(20K トラップ)が除去する仕組みになっている。

TRIUMF では中性子 EDM 測定時の系統誤差を押さえるための磁気シールドルームが建設されている。磁気シールドルームは 4 層パーマロイシールドにより、磁気遮蔽率 1/10,000 を持つ。磁気シールドルームの建設が完了し、詳細な性能評価が行われている(図 6)。

J-PARC MLF BL05 のパルス UCN 源や JRR-3 の冷中性子ビームラインを用いた装置開発も行われている。磁化鉄薄膜を用いた超冷中性子偏極解析装置、UCN を効率的に輸送するための UCN 輸送ガイドの開発が行われている。

2024 年 2 月 5 日から 8 日の日程でカナダ・ウィニペグ大学において TUCAN コラボレーションミーティングが行われた(図 7)。ミーティングでは UCN 源コミッショニングの結果、今後の計画や、磁気シールドルームの性能評価、中性子 EDM 測定装置についての R&D の進捗状況が報告された。



図 5 ヘリウム3 冷凍機 左：内部 右：ビームラインにインストールされた

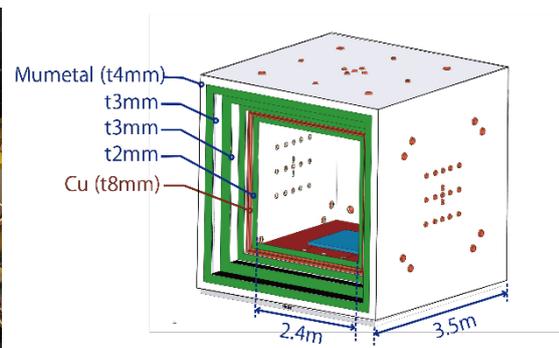


図 6 磁気シールドルーム



☒ 7 TUCAN Collaboration Meeting at University of the Winnipeg, Feb. 2024