

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。

(1) J-PARC ミューオン $g-2$ /EDM 実験

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。2025 年 5 月にはホワイトペーパーの更新版のリリースや FNAL 実験の最終結果の発表がある予定である。

J-PARC ミューオン $g-2$ /EDM 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ー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 年度はビーム輸送のための電磁石の製作・設置を完了、H2 エリアまでのビームライン延伸を完了した (図 1)。4 月には H2 エリアにファーストビームを出して調整を開始した。2025 年 5 月には施設検査を実施した。

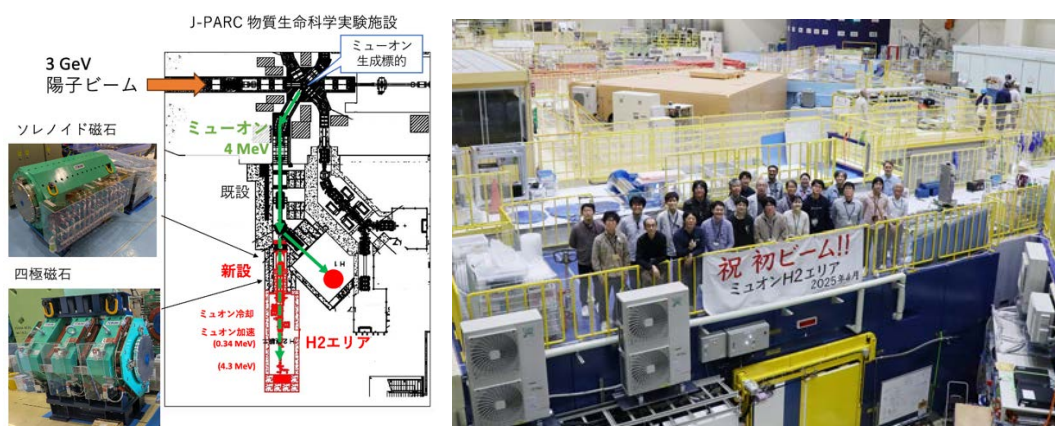


図 1 H2 エリアの整備と初ビーム記念撮影

2024 年、S2 エリアにおいてミューオンの冷却と 100keV までの講習は加速に成功し論文に発表した[1]。次の段階として、新しく完成した H2 エリアにおいて、ミューオン冷却に用いるレーザーやミューオン源診断装置(UDL)の開発を進めている。レーザーは 2025 年度中にファーストライトの予定である。UDL は 5 月に S2 エリアで試験を行い、その後 H2 エリアに設置し、冷却ミューオン源の評価を行う予定である。

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方法の開発を進めている。九州大学と協力してキッカー磁場が検出器に及ぼす影響とその対策方法の検討を進めている。ミューオンビーム入射について、系統的な最適化の方法を確立し、ビーム光学設計を進めた。

また、実験建屋（Hライン実験棟）はKEK施設部やJ-PARC施設工務セクションの全面協力のもと、必要最低限の機能を保持しつつ、コストカットを実現する設計修正の検討を行っている。

2024年12月に名古屋大学でコラボレーション会議を行なった（図2）。2025年3月に英国・リバプール大学が新たにコラボレーションに加わった。4月、素核研進捗評価委員会が開催され、これまでの指摘事項への対応状況と進捗を報告した。

最後に、3月には上海交通大学で”First Europe-China-Japan Workshop on Muon Physics : Synergies in g-2, MUonE and Beyond” [2]を開催し、ミューオン g-2 やミューオン冷却・加速などに関する研究交流を行なった。



図2 2024年12月に名古屋大学で開催したコラボレーションミーティング

参考文献

- [1] [arXiv:2410.11367](https://arxiv.org/abs/2410.11367) (to be published in PRL)
- [2] <https://indico-tdli.sjtu.edu.cn/event/3895/>

(2) TUCAN

KEK 素核研は中性子の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した国際共同実験 TUCAN に参加している。中性子 EDM の探索は運動エネルギーが 300 neV 以下の極低エネルギー中性子である超冷中性子 (UCN : Ultra-Cold Neutron) を用いて行う。TUCAN では現在、UCN 源のアップグレードが進行中であり、世界最大強度の UCN 源の建設が進められている。

効率的に UCN を生成するためには、UCN コンバーターである超流動ヘリウムを 1.2K 以下に維持する必要がある。中性子を発生させる核破砕反応時には、放射線による発熱が約 8.1 W と見積もられており、さらに輻射や伝導を通じて加わる熱を含めると、総熱負荷は約 10 W に達する。この熱負荷を除去するために、KEK で開発されたヘリウム 3 冷凍機が使用され、現在はビームライン上にインストールされている。

2024 年には、このヘリウム 3 冷凍機による超流動ヘリウムの冷却運転が実施された。UCN 生成領域に設置したヒーターを用いて 10 W の熱負荷を模擬したところ、冷媒である液体ヘリウム 3 の温度は 0.9 K に維持でき、超流動ヘリウムの温度も (容器外側に設置された温度計による推定値ではあるが) 1.2 K 以下に保たれた。これは UCN 源の要求性能を満たしていることを確認できた成果であり、今後の高効率な UCN 生成に向けた重要なマイルストーンである。

同時に UCN 生成試験も実施したが、明確な UCN の生成は確認できなかった。これは、UCN コンバーターである超流動ヘリウム中に混入した不純物 (H_2O 、 O_2 、 N_2 など) が原因であると考えられる。超流動ヘリウムの液化中に冷凍機内部のヘリウム供給用の細管が閉塞し、代替として回収配管を経由してヘリウム 4 を注入し、UCN 生成試験を実施した。この細管の閉塞は、配管内への不純物混入があったことを示している。しかし、ビームタイムに限りがある中で試験の中止は難しく、不利な条件ながらも試験を強行せざるを得なかった。結果として、UCN の生成は確認されず、コンバーター中に混入した不純物による UCN の損失が要因であると結論づけられた。

現在は、日本で開発したヘリウム精製機を用いて、UCN コンバーターに使用する超高純度ヘリウムから不純物の除去を進めている。不純物除去後は、2025 年 6 月に再度 UCN 生成試験を実施する予定であり、改善された環境下での成功が期待される。

TRIUMF において開発が遅れていた液体重水素モデレーター用の液体重水素冷凍機および重水素精製機は、TRIUMF からの共同研究費の支援を受け、日本で製作を行うこととなった。重水素精製機は 2025 年 3 月に、液体重水素冷凍機は同年 4 月にそれぞれ完成し(図 3 参照)、無事に TRIUMF へ送付された。これらの機器は 2025 年夏季にビームラインへインストールされ、9 月に予定されている UCN 生成実験より本格的に使用される予定である。

2025 年 3 月 10 日から 12 日の日程で TRIUMF 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 4)。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、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 3 (左)重水素精製機: 冷却された活性炭トラップにより不純物を除去する
(右)重水素冷凍機: パルスチューブ冷凍機により重水素を液化・冷却する



图 4 TUCAN Collaboration Meeting at TRIUMF, March 2025