

素核研ミューオン中性子グループでは、ミューオンのレプトン世代数の破れを探索する LFV グループ、ミューオンの磁気・電気双極子モーメントの精密測定を行う g-2/EDM グループ、超冷中性子を用いて中性子の電気双極子モーメントの精密測定を行う UCN グループから構成され、それぞれが基礎物理の重要な課題に取り組む研究を推進している。

### LFV グループ

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。

#### ■ MEG 実験

MEG 実験は、現在、実験の第二期 (MEG II) のデータ収集をようやく開始した。第一期の MEG 実験が達成した物理感度のおよそ 10 倍の感度を達成することを目標に実験を遂行している。

#### ■ COMET 実験

cLFV 物理に関して LFV 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 18 カ国、45 研究機関 (2021 年 9 月現在) の 283 名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。また Phase-I 開始前には、後述するパイ中間子を捕獲収集するための捕獲ソレノイド磁石を配置せずに低強度の陽子ビームを薄い標的に照射し、8GeV での二次粒子生成、陽子ビームの詳しい振る舞いを調べるためのエンジニアリングラン (Phase- $\alpha$ ) を 2022 年度に実施することを予定している。

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、低温センサ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 実験では背景事象の原因となり得るパイ中間子が原子核に捕獲された後に放出されるガンマ線が起源となって信号電子と同等のエネルギーをもった電子を、電子が放出される時間情報を利用して排除する。これを行うためにはミュオンの親粒子であるパイ中間子を生成するための陽子ビームの時間構造が精密にパルス化されている必要があり、ビームパルスからの陽子の漏れ具合（ビームエクステンクションファクター: Rext）が  $10^{-10}$  以下である必要がある。COMET 実験グループでは J-PARC 加速器グループと協力して Rext の測定とその向上のための研究開発を続けてきた。この開発を続ける中で、陽子ビームを前段の RCS 加速器から主リングに入射する際の入射方法の改良が重要であることをつきとめ、様々な試験を経てようやく要求の Rext を確実に実現できる目処が立った。2021 年 5 月にはハドロン実験ホールにて Rext を計測するための



図 1 2021年5月に実施された Rext 測定実験時の参加メンバー

実験 (J-PARC T78) 行われた。準備においては実験に参加する共同利用の大学院生らが主導的に活躍し COMET 実験の感度実現のために不可欠の計測を行うことに成功した (図 1)。データ解析は現在進行中であり、速報結果はすでに物理学会で報告されているが、COMET 実験 Phase I の感度を実現するためには十分な Rext が実現できていることが確認されている

### g-2/EDM グループ

ミュオン異常磁気能率(g-2)や電気双極子能率(EDM)実験は量子ループ効果を通じて素粒子標準理論を超える新しい物理現象の効果が顕著に現れうる物理量である。米国・フェルミ国立研究所は、2021 年 4 月にミュオン g-2 の新し

い測定結果を発表し、約 20 年前にブルックヘブン国立研究所で行われた結果を再確認した。これによるとミューオン g-2 の値は素粒子標準理論の予測から 4.1  $\sigma$  大きいことになり、新しい物理現象の兆候が示唆されたとして注目を浴びている。J-PARC ミューオン g-2/EDM 実験は、ミューオン g-2 を同程度以上の精度で測定可能な世界で唯一の計画であり、先行実験の g-2 測定結果を独立に検証するとともに世界最高精度でミューオン EDM の探索を行うことが目的である。

この実験は世界 9 カ国、120 名から構成される国際共同研究グループにより、実験装置・設備の準備を進めている。2025 年度の測定開始を目指しており、まず最初の目標は g-2 を 0.45ppm、EDM を  $10^{-21}$  e $\cdot$ cm の精度で精密測定することである。実験設備は J-PARC MLF を一部拡張する形で整備する。概要を図 2 に示す。H ラインで輸送されたパルス表面ミューオンを冷却・加速した後、ミューオン蓄積磁石へ入射し、スピン歳差運動を測定する。実験設備を設置するためには、現在駐車場として利用されているスペースに H ライン実験棟を新設する必要がある。J-PARC センターや施設部の協力の下、その準備業務を進めてきた。2019-2020 年度にかけては、図 3 に示すように測量調査、ボーリング地盤調査、埋設文化財調査、外構基本設計などを完了している。2021 年度は外構整備の実施設設計を進めている。

物構研が中心となり進めている H ライン基幹部の建設は最終段階を迎えている。2021 年度は、さらにミューオン冷却部分へ接続する延伸工事の準備を進めている。ミューオン冷却部分では、ミューオニウムを生成し、レーザーでイオン化することにより 30meV 程度まで冷却する。従来検討してきた 122nm のレーザー光に加えて 244nm のレーザー光を用いたイオン化の開発にも着手し複層的に準備を進めている。物構研・岡山大学が中心となって建設した S2 実験エリアへ素核研が開発したミューオン冷却実証試験のセットアップを設置した。その次の段階として、ミューオン冷却試験を行う準備を整えるとともに、RFQ を用いた加速試験の計画も立てた。ミューオン LINAC の開発は加速器施設の協力を得て進めており、IH-DTL 加速空洞の実機製作と DAW 型加速空洞の試作機の製作、DLS 加速空洞の設計を行っている。また、加速器施設・茨城大学と共同でミューオンの蓄積磁石への入射に必要なビームラインおよび調整機器の設計や試作、電子ビームを用いた実証試験を進めている。ミューオン蓄積磁石の開発は超伝導低温工学センターとの協力により磁場設計の最適化、磁場調整手

法および精密磁場測定装置の開発を行った。機械工学センター・九州大学・新潟大学と共同で、陽電子飛跡検出器の開発を進めている。これまで読み出し集積回路の量産、QA システムの開発、組立方法の開発を行った。計算科学センターの協力を得てソフトウェア開発環境の整備を行った。



図 2 実験概要



図 3 施設整備の準備業務

## UCN グループ

日本・カナダの国際共同実験、TUCAN (TRIUMF Ultra-Cold Advanced Neutron) コラボレーションは超冷中性子 (Ultra-Cold Neutron: UCN) を用いた中性子電気双極子モーメント (EDM) の探索実験を行っている。目標とする感度は  $10^{-27}$  ecm である。

中性子等の基本粒子が EDM を持つ場合、時間反転対称性 (T 対称性) が破れる。CPT 保存が成り立つこと仮定すれば T 対称性の破れはすなわち CP 対称性の破れを意味する。中性子 EDM 探索をプローブとして既存の物理法則になり CP 対称性の起源を探る。

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  $300\text{neV}$  以下の極低エネルギーの中性子を用いて行う。UCN は物質表面において全反射し、容器の中に溜め込むことが出来る。容器内に溜めこんだ UCN に電磁場を印加したときにおこる歳差運動の周期を精密に観測することによって中性子 EDM を測定する。現在の測定感度は UCN の統計によって制限されているため、高強度の UCN 源が必要である。TUCAN では 2017 年より

TRIUMF においてプロトタイプ UCN 源を用いた UCN 生成を行っており、現在、UCN 源のアップグレードを進めている。アップグレードにより、先行実験と比べ 100 倍高い中性子密度を持つ世界最大強度の UCN 源となる見込みである。

素核研では大型ヘリウム 3 冷凍機の開発を担当している。必要な冷凍能力は 1.0 K で 10 W である。このヘリウム 3 冷凍機は KEK での冷却試験を終え、TRIUMF に移送された。現在、現地コラボレーターの協力の下で、コミッショニング作業の準備が進んでいる。今後、最終熱交換器の開発を進め、2022 年中の UCN 源運転開始を目指している。

UCN グループではこのほかに中性子 EDM 実験のための要素開発を行っている。UCN を輸送するための物質ガイド、スピン解析に用いる鉄薄膜の評価を J-PARC MLF BL05 ビームラインで行われた。図 4 は UCN ガイド評価のセット

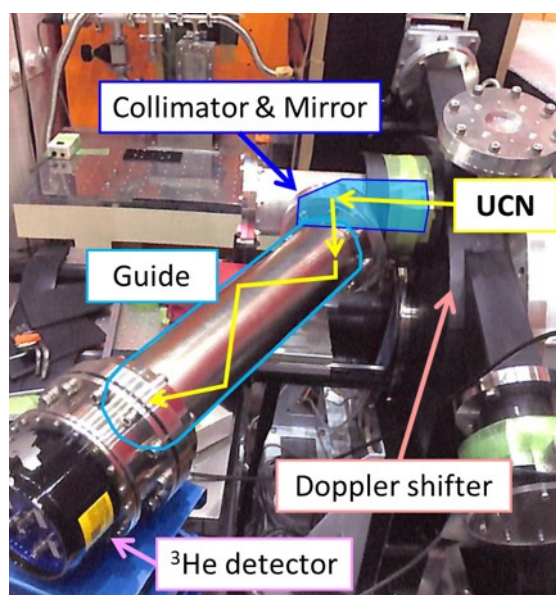


図 4 UCN ガイド評価セットアップ

アップである。BL05 に設置されている UCN 源からの UCN ビームを物質ガイドで輸送し、 $^3\text{He}$  ガス検出器で検出する。入射する UCN の角度を 0 度、15 度、30 度と変化させ、その検出数、検出時間 (TOF) の変化を観測する。モンテカルロシミュレーションと比較することで、UCN の物質ガイドによる輸送を再現するとともに、ガイドの評価方法を確立した。

UCN は磁化した鉄薄膜のポテンシャルによって偏極される。京都大学複合原子力科学研究所で作成された鉄薄膜

を中性子反射率計で評価し、UCN を偏極するのに十分な性能を持つことが確認された。今後は実際に UCN を偏極し、その偏極率等の解析を行う。