

■ 研究紹介

世界初の冷却ミュオンの高周波加速

J-PARC ミュオン $g-2$ /EDM 実験にむけて

KEK 素粒子原子核研究所
上岡 修星
kamioka@post.kek.jp

岡山大学 異分野基礎科学研究所
今井 康貴
imai1117@s.okayama-u.ac.jp

KEK 物質構造科学研究所
山崎 高幸
takayuki@post.kek.jp

2024 年 (令和 6 年) 11 月 1 日

1 はじめに

我々のグループは J-PARC において正ミュオンの異常磁気能率 ($g-2$) 測定と電気双極子能率 (EDM) 探索実験 [1] にむけた開発を進めている。本実験の重要な技術要素の一つに正ミュオンの冷却とその再加速による高品質ミュオンビーム生成がある。実証に向けた開発が長年にわたって行われてきたが、今年ついに世界初の冷却ミュオンの高周波加速に成功した [2]。

本稿では 2024 年 3 月から 4 月にかけて行ったミュオンの冷却と再加速実験の結果と J-PARC ミュオン $g-2$ /EDM 実験にむけた新実験エリア、拡張建屋の準備状況について報告する。

2 J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験とミュオン加速

2.1 J-PARC $g-2$ /EDM 実験

$g-2$ は g 因子の量子補正による 2 からのずれである。そしてミュオン¹の $g-2$ は標準模型による計算結果 [3] とフェルミ国立加速器研究所のグループらの測定結果 [4, 5] の間に 5σ の乖離が報告されている。これは新物理の寄与の可能性として長年に渡って注目されている。その一方でミュオン $g-2$ へのハドロン真空偏極の寄与について、格子 QCD を用いた計算結果 [6] と分散関係を用いた従来の計算結果が一致しない。さらに、分散関係を用いた計算に必要な $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ の断面積測定も従来の結果と有意に異なる結果が報告されており [7] 複雑な状況を呈している。そのなかで我々はミュオン $g-2$ の測定結果を直接検証できる唯一のグループである。 $g-2$ の物理の詳細については過去の高エネルギーニュースの記事 [8] も参考にしていきたい。

¹以下、正ミュオンを単にミュオンと書く。

ミュオン EDM は第 2 世代のレプトンセクターの CP 対称性の破れを探索する実験である。 $g-2$ と EDM は同じ演算子の実部と虚部であるためミュオン $g-2$ のアノマリーが正しいならば、 10^{-22} e-cm 程度の大きなミュオン EDM が自然に期待できる [9]。ミュオンの EDM については過去の高エネルギーニュースの記事 [10] も詳しい。

ミュオン $g-2$ 測定も EDM 探索も一様な磁場中に蓄積したミュオンビームのスピンの歳差運動周期の測定である。従来のミュオンビームは、陽子ビームを炭素標的に照射、生成されたパイ中間子からの崩壊ミュオンを電磁石で捕獲、輸送することで得られる。ほぼ 100% スピン偏極したビームが得られるが、3 次粒子ビームであるためビーム品質が悪く、ビーム品質の指標の規格化エミッタンスは典型的に 1000π mm-mrad とされる²。そのため、既存のミュオンビームを磁場中に安定して蓄積するには電気四重極を用いた強収束をする必要がある。しかし、光速に近い速度で運動するミュオンであるため電場もスピンの歳差運動に寄与することから、このままではミュオン $g-2$ の精密測定が困難になる。現行の実験ではスピンの歳差運動への電場の寄与がキャンセルされる特別な運動量³のミュオンビームを用いて測定を行っているが、打ち消しきれなかった電場の寄与は最も主要な補正項目の一つになっている。

そこで、そもそも電場を用いずにミュオンを蓄積しよう、というのが我々のアイデアである [1]。一様磁場に加えて弱収束磁場を用いることで粒子を安定に蓄積する。既存の手法の最大の補正要因がなくなるとともに、ミュオンの運動量も自由に選べるため実験設計の自由度も増える。しかし、ビーム品質の悪さが出発地点であるため、ビーム品質の向上、つまりミュオンビームの冷却が必要になる。

²以下、単にエミッタンスと言ったときは、規格化 rms エミッタンスのことを指す。

³具体的には $\gamma = 29.3$

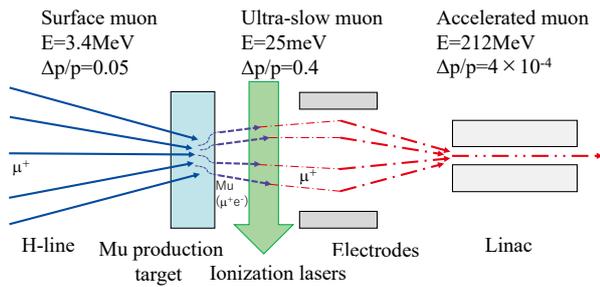


図 1: 我々のミュオン冷却と再加速の手法 [1].

2.2 超低速ミュオンとその再加速

ひとことにミュオンビーム冷却と言ってもミュオンの寿命が $2.2 \mu\text{s}$ しかないため長寿命粒子に用いられている既存の手法では冷却できない。ミュオンに特化した新しい手法が必要になる。超低速ミュオン (ultra-slow muon) は日本で開発が行われている冷却ミュオン源である [11]。図 1 に冷却と再加速の概念図を示す。まず従来の表面ミュオンビームをシリカエアロゲルなどの標的に打ち込む。ここで、表面ミュオンとはパイ中間子生成標的の表面で静止したパイ中間子から得られるミュオンのビームである。標的内で静止したミュオンは電子を捕獲しミュオニウム (電子とミュオンの束縛系) を形成する。ミュオニウムは標的内で熱運動し、その一部はマイクロ秒程度の時間スケールで標的外に再放出される。このミュオニウムは標的と熱平衡になっている。このミュオニウムにコヒーレント光を照射して多光子共鳴イオン化することで熱エネルギーのミュオンが得られる。これが超低速ミュオンである。ミュオニウムのイオン化は 2P 状態を経由して乖離する方法と、2S 状態から乖離する方法の双方を開発している。生成効率はミュオニウム放出効率やイオン化効率に依存するが、 $\mathcal{O}(0.1)\%$ の効率が達成可能である。これらを静電レンズで引き出し、適切なエネルギーと収束を与えて後段の線形加速器に入射し、再加速する。

一次ミュオンビームのサイズと熱エネルギーで超低速ミュオン源の品質が決まる。シミュレーションによると、 $1 \pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 以下のエミッタンスが達成できる。これは既存ミュオンビームに比べて 3 桁の向上である。提案されているミュオン冷却手法⁴の中でも最も良いエミッタンスを達成できる手法の一つであり、冷却に複雑な電磁場を要さないので冷却後の取り出しと高周波加速器までの初期輸送も容易に行える。良いことづくめのだが、正ミュオンしか冷却できない点と大強度パルス光源が必要なため連続ビームや高繰り返しビーム冷却には不適な点、ミュオニウム形成時にスピン偏極

⁴詳しくは触れないが、ミュオンコライダーに向けたイオン化冷却という手法や PSI の muCool グループによる開発が進行している。

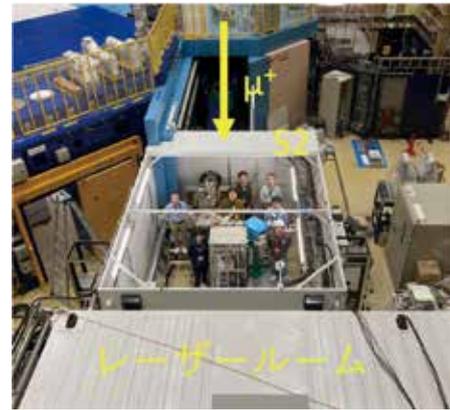


図 2: S2 エリア付近の写真。写真の上から下に向かって表面ミュオンビームが供給される。写真下部にあるのがレーザールーム。

率が半減する点が欠点である。

2.3 これまでの開発の歴史

高品質ミュオンビーム開発に関連する報告は過去の高エネルギーニュースでも数多く取り上げていただいているため、過去の記事も紹介しながら簡単に開発の歴史をまとめる。

まず、2013 年にはミュオニウム生成標的として短パルスレーザーで穴をあけたシリカエアロゲルを開発した [12]。ミュオニウムが飛び出せる表面積を増やすことで既存のシリカエアロゲル標的に比べて 10 倍の放出効率を達成した。現在でも室温で用いる標的はこの標的である。2017 年には負ミュオニウムイオンの高周波加速を行うことで、J-PARC のイオン源用に開発されたプロトタイプの高周波四重極線形加速器をミュオン加速のために応用できることを実証した⁵ [13]。今回のミュオン高周波加速実験で用いた加速器も同じものである。2020 年からはミュオニウム 1S-2S 分光実験がスタートした [14]。この実験はミュオン質量の世界最高精度での決定を目指したものであり、今回の実験で用いたミュオニウムイオン化光源はもともと分光実験用に開発されてきたものを応用したものである。2021 年からは今回使用した実験エリアである MLF S2 エリアへのビーム供給が開始された。我々のグループは実験エリアのコミッションングにも参加しビームの評価なども行ってきた。

ビームライン、標的、加速器、光源と各分野の要素開発が組み合わさって今回の冷却ミュオンの再加速につながった。

⁵この実験では、ミュオンを負ミュオニウムイオンとして減速させることで加速器に再入射させた。とはいえ、初期のエミッタンスは $20 \pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 程度と加速器のアクセプタンスよりはるかに大きい。

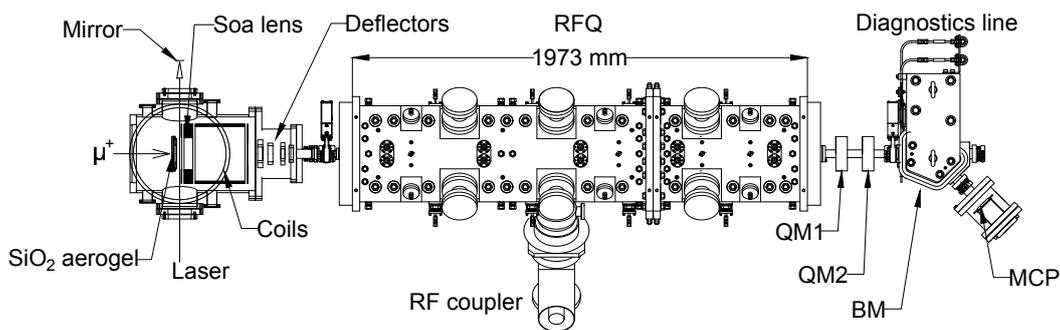


図 3: 実験セットアップ。上流 (図の左) から表面ミュオンビーム, ミューオニウム生成標的, イオン化レーザー, 静電レンズと静電偏向器, RFQ, 診断系, 検出器が配置されている。



図 4: S2 エリア内の写真。右側に見えるのがミュオン冷却チェンバー, 左側にあるのが RFQ である。

3 冷却ミュオン再加速実験

今回の実験は 2024 年 3 月から 4 月にかけて J-PARC の物質化学生命棟 (MLF), ミューオン科学実験施設 (MUSE) [15] の S2 エリアと呼ばれる実験エリアで行った (図 2)。S2 エリア横にはミュオニウムの 1S-2S の分光実験のためにレーザーームも整備されている。

3.1 実験セットアップ

図 3 に実験セットアップを示す。実際の写真は図 4 である。以下, 個々の装置について説明する。過去に高エネルギーニュースで紹介された装置の詳細については過去記事に譲る。

まず S2 エリアに供給される表面ミュオンビームはミュオニウム生成標的に照射される。ミュオニウム生成標的は上述の微細加工シリカエアロゲル標的である。標的の直径は 78 mm, 厚さは 8 mm である。標的の表面付近に表面ミュオンビームが止まるように, 標的の上流側に減速材 (アルミ箔) を配置している。シミュレーションによると 38% のミュオンが標的内部に止まる。そのうち 52% がミュオニウムを形成する [16]。ミュオニウムの拡散と放出は過去の実験結果をもとに

モデル化されており [17], 今回の実験では, 生成されたミュオニウムに対する標的外への放出効率 は 13% と予想される。その一部がレーザー領域に飛び込む。

イオン化レーザーは標的から 2 mm の地点に水平方向に照射する。対向照射のためにミラーで一度打ち返している。レーザー構成の詳細については次節で触れる。イオン化されたミュオンはエアロゲル標の下流に設置されたメッシュ電極とそこから 10 mm 離れた場所に設置したメッシュ電極に 25 V の電位差を与えて引き出す。低速のミュオンは磁場で容易に軌道が曲がってしまうため, ミューオニウム生成領域付近の磁場が μT 程度の磁場になるように 3 軸ヘルムホルツコイルを用いて磁場を打ち消している⁶。引き出したミュオンは Soa lens と呼ばれる静電レンズで輸送する。メッシュ電極を含む 4 個の電極からなっており, それらへの電圧を調整することで引き出しエネルギーと焦点距離が決まる。後段の加速器のアクセプタンスにマッチするように電圧を決定しており今回は 5.7 keV で引き出している。初期輸送中に 20% のミュオンが崩壊する。静電レンズ後には静電偏向器も配置されている。水平方向に 2 自由度, 垂直方向に 2 自由度の偏向器があるためこれで加速器までのミュオンの軌道と位置を補正できる。

加速器には J-PARC プロトタイプ高周波四重極線形加速器 (radio-frequency quadrupole, RFQ) を用いた。負ミュオニウムイオンの加速実験 [18] に用いたものと同じである。これでミュオンを 100 keV まで加速する。RFQ 中では 19% のミュオンが崩壊する。RFQ の後の診断系は粒子選別のための偏向電磁石と 2 個の四重極電磁石からなる。診断系の最後には検出器が設置されていて, 実験目的にあわせてシングルアノードのマイクロチャンネルプレート (MCP) と MCP をベースにしたビームプロファイラー [19] を使い分けた。

⁶ ミューオニウム生成領域の磁場を制御したい理由はもう一つあり, それはスピンの方向の制御である。ミュオニウム形成中は磁気回転比が約 100 倍大きくなるためスピンの方向が外部磁場に敏感になる。

3.2 ミューオニウムイオン化用 244 nm 光源

ここでは、今回の実験で用いた光源とイオン化手法の特徴についてももう少し詳細に説明する。

今回は 244 nm 深紫外パルスレーザーでミューオニウムの 2S 状態を経由してイオン化する。122 nm 真空紫外レーザーによる 1S-2P 間の 1 光子遷移を経由したイオン化に対し、1S-2S 間の遷移は 2 光子過程であるため遷移の断面積が小さく効率は下がるが、244 nm パルスレーザーは比較的高強度化が容易であり、2S に励起されたミューオニウムのイオン化も 244 nm パルスレーザーで行うことが可能である。また、対向した 2 光子を吸収させ 1 次のドップラー効果をキャンセルして共鳴幅の広がりを抑えるという高精度分光に適した手法が可能である。122 nm は大気中で吸収があるため光学素子を真空中に設置する必要があるのに対し、244 nm は大気中で運用が可能であり、比較的扱いやすいことも現実的な利点の一つである。

S2 エリア横に設置した幅 6 m、奥行き 2.4 m のコンテナ内をレーザーームとして使用している。庫内はコンテナ脇に設置した精密空調機で温度を一定に保っており、また天井の空調孔には HEPA フィルタを設置し、外部の塵埃が入り辛い仕様になっている。光源類はコンテナ内に設置した幅 1.2 m、奥行き 3 m の光学定盤と脇の 19 インチラック上にインストールされている。

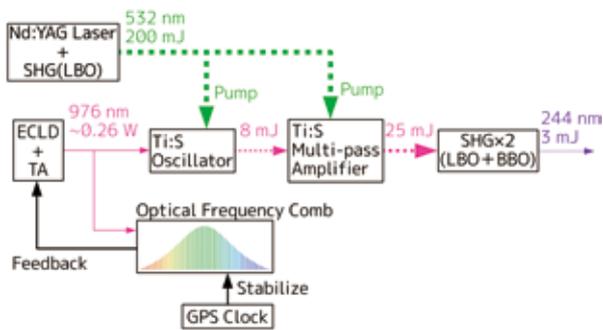


図 5: 244 nm パルスレーザー全体の概略図。

ミューオニウムイオン化用 244 nm パルスレーザーのセットアップを図 5 に、またレーザー駆動中のレーザーームを図 6 に示す。244 nm パルスレーザーは 532 nm 励起レーザーおよび、976 nm パルス発振器、976 nm マルチパス増幅器、第四高調波発生部で構成した。532 nm 励起レーザーでは、25 Hz 駆動の Q スイッチ Nd:YAG レーザーをシード光として、3 台の Nd:YAG 結晶増幅器により増強した後、三ホウ酸リチウム (LiB_3O_5 , LBO) 結晶を用いた第二高調波発生により、約 200 mJ の 532 nm 光を生成している。532 nm 光は 976 nm パルス発振器、および 976 nm マルチパス増幅器のゲイン媒質であるチタンサファイア (Ti:S) 結晶の励起レーザーとして使用

する。976 nm パルス発振器は 976 nm CW レーザーをシード光とした注入同期型の Ti:S レーザーである。外部共振器型半導体レーザーとテーパー型増幅器で構成した 976 nm CW レーザーを Ti:S 結晶を内蔵した共振器で共鳴させ、Ti:S 結晶を 25 Hz の 532 nm で励起することで 976 nm をパルス化している。出力のパルス幅は 96 ns、エネルギーは 8 mJ である。976 nm パルス発振器の出力は後段の 976 nm マルチパス増幅器で 25 mJ まで増幅する。第四高調波発生部では、前段の LBO 結晶で 976 nm パルス増幅部出力の第二高調波を発生させ、後段のベータホウ酸バリウム (β - BaB_2O_4 , BBO) 結晶でさらに第二高調波を発生させることで 244 nm パルスを生成している。出力は最大で 3 mJ 程度である。当初 BBO 結晶は結晶の入出力端面に反射を低減するコーティングを施していたが、BBO 結晶からの出力による端面の損傷が頻繁に発生した。そのため、現在は両端面にコーティングを施していない BBO 結晶を使用し、ダメージ耐性を向上させている。結晶に潮解性があり無コーティング面の劣化が懸念されたため、結晶はヒーターで 150 °C に常時温調して使用している。現在、無コーティングの BBO 結晶に交換してから数ヶ月程度運用しているが目立った劣化は確認されず、長時間安定したエネルギー出力が得られている。また周波数に関しても、シード光である 976 nm CW レーザーの周波数を GPS 時計に同期した光周波数コムに安定化させることで、50 kHz/h 程度の周波数安定度を達成している。エネルギーの調整や周波数の変更といった実験に必要なレーザーの制御はほぼ全て、レーザーーム外からリモートで行うことが可能である。



図 6: 244 nm パルスレーザー駆動中のレーザーーム。画像中央付近で橙色に光っているのがパルス増幅部の Ti:S 結晶。右側でフレームに覆われ水色に光っているあたりが第四高調波発生部である。

生成した 244 nm パルスレーザーはダクトを通して S2 エリアに供給され、ミューオン冷却チェンバーに入射している。チェンバーを通過した 244 nm パルスは対向 2 光子励起のため、元のパスに戻るようミラーで反射する。レーザーの往路、復路共にチェンバーから約 2 m

上流に設置した 1 mm 径のピンホールを中心を通るように調整することで、レーザーのアライメントを行っている。光源からチェンバーまではおよそ 10 m の距離があり、また光源とチェンバーはそれぞれ異なる経時変位を起こす構造物に固定されているため、長時間レーザーを同じ場所に照射し続けるのは困難である。そのため光路に組レンズを設置して光源近くの像をチェンバー付近に結ぶことで、ポインティングの揺らぎを低減している。また、3 台のカメラを用いてレーザーのポインティングを監視し、光路途中に設置したリモート制御可能なミラーマウントに変動分を打ち消すようにフィードバック制御を行っている。これにより、長時間の実験でも設定した照射位置から 1 シグマ 30 μm 程度の範囲内に収めることに成功している。

3.3 表面ミュオンビームの評価

まずは冷却前の、表面ミュオンビームの性能評価の結果を紹介する。

S2 エリアには 100 ns 程度の時間幅を持つシングルパンチのミュオンビームが 25 Hz 繰り返して供給される。ビームライン出口で測定したビーム強度は、MLF に供給される陽子ビーム強度が 940 kW の際に、パルス当たり $9.5 \times 10^4 \mu^+$ であった。図 7 に、ミュオンビーム用に開発されたビームプロファイラー [20] で実測したビームライン出口でのプロファイルを示す。ビームが左右方向に広がった楕円になっているが、これは水平方向に走っている小さなスポットサイズのレーザー上に飛び込むミュオニウムを増やすために意図的に調整している⁷。運動量はシミュレーションでよると中心値が 28 MeV/c、分散が 0.46 MeV/c であった。シミュレーションで評価したエミッタンスは水平方向、垂直方向それぞれが $160 \pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 、 $130 \pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ である。

このように大きく広がったミュオンビームを使って生成、放出されるミュオニウムを、水平方向に走る直径 1 mm のレーザーでイオン化するため、本実験の超低速ミュオンの初期分布は水平、垂直方向の空間広がり大きく非対称な初期分布を持つ。

3.4 冷却ミュオンの評価

加速実験に先立って、2024 年 3 月は冷却ミュオンの評価実験を行った。RFQ の代わりに低速ミュオンビームラインと呼ばれる keV 程度のエネルギーのミュオン用に開発された輸送系 [21] を設置して、冷却後に 5.7 keV または 10 keV で引き出すことで高周波加速前

⁷厳密にはビームの焦点で取得したプロファイルではないとは言え、このビームサイズからもビーム品質が悪いというのがイメージできるかと思う。

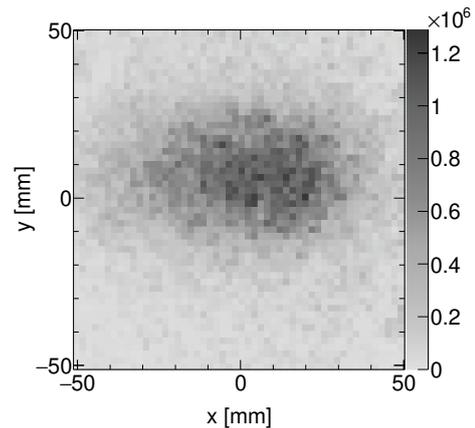


図 7: 実測した表面ミュオンビームのビームプロファイル。ビームサイズは 1 シグマで水平方向に 24 mm、垂直方向に 13 mm と大きい。

のミュオンの評価をおこなうことができる。この測定以前にも同じセットアップで冷却ミュオンの生成と観測は実証済みで、過去にはミュオニウム生成標的の個体差評価なども行っている。

輸送系出口の MCP を用いて超低速ミュオンの信号を確認しながら表面ビームラインの輸送電磁石の調整、レーザーの照射時間、レーザーの周波数をスキャンして信号強度を最大化した。信号強度は $(4.0 \pm 0.4) \times 10^{-3} \mu^+/\text{pulse}$ であった。表面ミュオンに対する冷却効率にすると 1.2×10^{-7} である。実験中の典型的なレーザーエネルギーを仮定した理想的なシミュレーションで予想される効率は 6×10^{-7} 程度であるが、信号強度のシミュレーションとの詳細な比較は実験プランの考案も含めてこれからの課題である。

ちなみに、3 週間程度にわたるビームタイム中、光源の大きかりな調整はほぼ不要、もしくは遠隔で対応可能であった。狭い共鳴幅の遷移のための深紫外領域のパルス光源であるにもかかわらずスムーズな連続測定が可能だった。

3.5 ミュオン再加速実験

2024 年 4 月は静電レンズ後に RFQ を設置し冷却ミュオンの再加速実験を行った。小型とは言え長さ 2 m の加速器を導入したため実験エリアの端から端のギリギリまで装置が埋め尽くす形になった。

図 8 が最後段の検出器で測定したタイミングスペクトル分布の結果である。表面ミュオンビームが標的に届いた時刻を時間の原点にとっている。レーザーと RFQ の運転状態が異なる 3 種類の測定を行ったが、レーザー周波数が遷移周波数に共鳴かつ加速器に電力が投入されているときのみ鋭いピークが現れているのが分かる。こ

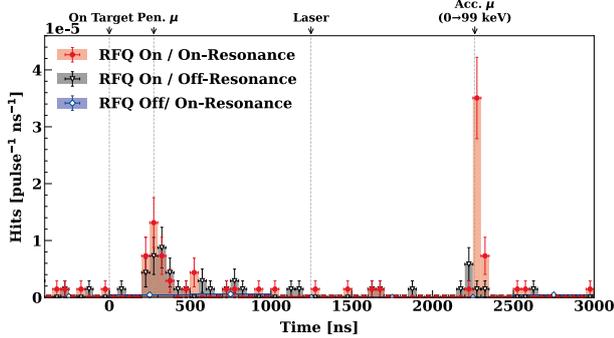


図 8: MCP で検出した信号の TOF 分布。加速器に RF を投入しないとき, RF を投入しているがレーザーの周波数を共鳴周波数からずらしたとき, RF を投入してレーザーの周波数を共鳴周波数に合わせているときの 3 つの異なる条件での結果を示している。2280 ns に現れている鋭いピークが加速ミューオンの信号である。表面ミューオンビームの到達, 標的を突き抜けたミューオンが検出器に到達する予想タイミング, レーザー照射, そして加速ミューオンが到達する予想タイミングを点線で示している。

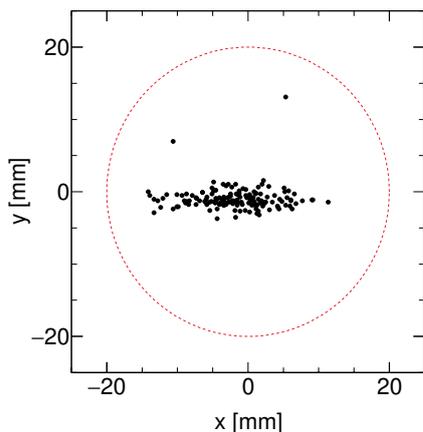


図 9: 加速ミューオンビームのプロファイル。点線はビームプロファイラーの有効径を表している。四重極磁石への電流は $I_1 = 0.90$ A and $I_2 = -0.75$ A。

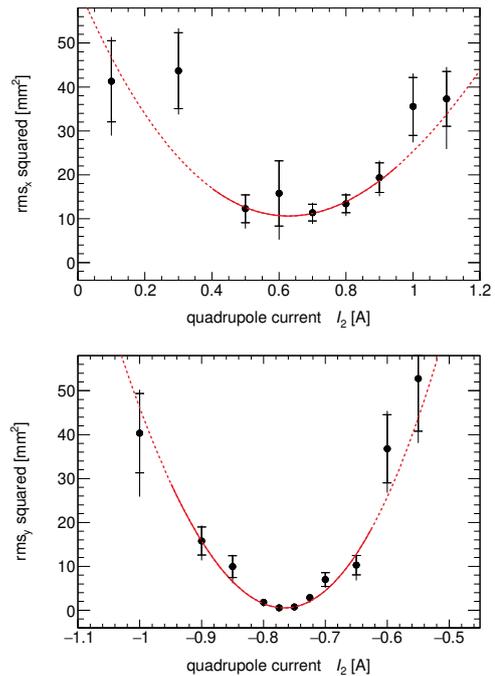


図 10: 上図: 水平方向の Q スキャン結果。点が rms ビームサイズの 2 乗, 赤実線が転送行列を用いたフィッティング結果である。検出器の有効径によるバイアスをさけるため 5 mm 以下の領域でフィットしている。点線はフィット結果を全領域まで外層したものを示している。下図: 垂直方向の Q スキャン結果。

れがまさに再加速された超低速ミューオンである⁸。信号強度は $2 \times 10^{-3} \mu^+$ /pulse であった。レーザー照射から加速ミューオン検出までの TOF は 1032 ± 4 (stat.) ± 18 (syst.) ns であり, シミュレーションから予想される 1009 ± 5 ns と誤差の範囲で一致した結果が得られた。

表面ミューオンが届いてから 275 ns 後にもピークが現れているが, これはミューオニウム標的で減速されたものの静止せずに突き抜けたミューオンのうち, 100 keV 程度のエネルギーを持っていたものが診断系を通りぬけて検出器に届いた信号である。TOF に加えて, レーザーが遷移に非共鳴でも確認できることから加速ミューオン信号と区別できる。

続いて Q スキャン法を用いて加速ミューオンビームのエミッタンス測定を行った。四重極電磁石の強さを変えながら電磁石から離れた地点に設置したプロファイラーでビームサイズの変化を測定することで, ビームの Twiss パラメータ⁹を求める手法である。図 9 が典型的な加速ミューオンのビームプロファイルである。表面ミューオンビームと比べると非常に小さく収束できている。四重極電磁石に与えた電流値ごとにプロファイル

⁸ちなみに, 加速ミューオン信号は実験開始数時間後には確認できた。最初の信号を見つけるのに苦労することを危惧していたが杞憂であった。入念な準備の賜である。

⁹ビームの占める位相空間分布を記述する 3 つのパラメーターのことを指す。

測定し、それぞれ rms ビームサイズを計算した。そのビームサイズの変化を、診断系の転送行列から決まる関数を用いて、四重極電磁石に与えた電流の関数としてフィットした。図 10 にその結果を示す。RFQ の後ではビームは約 1% の運動量広がりを持っているため、偏向電磁石で曲げた際に水平方向のビームサイズは分散の影響を受ける。今回はシミュレーションから予想される運動量広がりを仮定して Twiss パラメーターを推定した。エミッタンス推定の系統誤差にはビームサイズの評価、診断系中でのビームのロス、運動量幅の不定性が寄与する。これらはシミュレーションなどを用いて評価した。

最終的に、水平方向のエミッタンスは $(0.85 \pm 0.25_{-0.13}^{+0.22}) \pi$ mm·mrad、垂直方向のエミッタンスは $(0.32 \pm 0.03_{-0.02}^{+0.05}) \pi$ mm·mrad という値が得られた。これに対してシミュレーションで予想されるエミッタンスは水平方向、垂直方向それぞれ $(0.27 \pm 0.04) \pi$ mm·mrad と $(0.154 \pm 0.008) \pi$ mm·mrad であった。水平方向と垂直方向でエミッタンスが異なるのは、前述したように超低速ミュオンの初期分布が非対称なことなどに起因する。実測のエミッタンスは予想していたエミッタンスとは一致してしないが、この原因は調査中である。

冷却前の表面ミュオンのエミッタンスと加速後のビームのエミッタンスを比べると加速ミュオンビームのエミッタンスは水平方向で 2.0×10^2 倍、垂直方向で 4.1×10^2 倍だけ小さくなっている。ついに世界初の低エミッタンスの加速ミュオンビームが実現したのである¹⁰。

3.6 ミューオン加速の今後の展望

世界初のミュオン加速には成功したが、信号強度はパルス当たり 2×10^{-3} 個、エネルギーは 100 keV とまだ実用には遠い。次なるステップはビーム強度の増強、さらなる高エネルギーまでの加速である。前者は大強度の表面ミュオンビームラインとミュオニウムのイオン化に特化した高強度紫外光源によって、後者はミュオン専用の加速器の導入によってそれぞれ実現させる。2029 年度までにパルス当たり 10^4 個、エネルギー 212 MeV のミュオンビームの実現が目標となる。今回の実験は既存のビームエリアで実施したが、ここからは専用のビームライン、実験建屋で行うことになる。建設が進んでいる新しいビームライン、そして拡張建屋の準備状況について次章で詳しく述べる。

4 J-PARC MLF H2 エリアおよび H ライン実験棟の建設状況

4.1 J-PARC ミューオン H ライン

J-PARC ミューオン H ライン [22, 23] は物質・生命科学実験施設 (MLF) にある 4 本のミュオンビームライン (D, U, S, H ライン) の中で最も新しいビームラインであり、大強度な正負パルスミュオンを利用可能な汎用ビームラインである。図 11 に 2024 年 1 月現在の MLF 第 1 実験ホールミュオンエリアのレイアウトを示す。H ラインは 2012 年の建設開始から約 10 年の建設期間を経て 2022 年 1 月に H ライン第 1 分岐の実験エリア (H1 エリア) へのファーストビームを達成した。現在は H1 エリアの大強度ビームを用いて、ミュオニウム超微細構造の精密測定 (MuSEUM) [24] やミュオン-電子転換過程探索実験 (DeeMe) [25] が行われている。また、H1 エリアでの実験と並行して、現在 H ライン第 2 分岐に設けられた実験エリア (H2 エリア) に設計強度 (10^8 /s) の表面ミュオンビームを輸送するためのビームライン建設を進めている。H2 エリアの大強度表面ミュオンビームをエアロゲル標的に照射することで大量のミュオニウムを生成し、ミュオニウムをレーザーイオン化することで超低速ミュオンが得られる。H2 エリア内では超低速ミュオンを RFQ および IH-DTL の 2 種類の線形加速器を用いて運動エネルギー 4 MeV まで再加速する。H2 エリアからさらにビームラインを延長することで、ミュオン $g-2$ /EDM 実験に必要な運動エネルギー 212 MeV まで加速を行う。このための加速器の設置には MLF 棟を拡張する建屋 (H ライン実験棟) を建設する必要があり、本稿では H ライン実験棟建設の準備状況についても報告する。

4.2 H2 エリア建設

2022 年 1 月に H ライン基幹部および第一分岐の H1 実験エリアまでのビームライン建設が完了して以降、H1 エリアでのユーザー実験と並行しながら H ライン第二分岐の建設を進めてきた。2022 年度には、H2 エリア遮蔽体および電動扉の製作・設置と人的保護システム (PPS) の更新を行った。製作した遮蔽体等は夏季の長期シャットダウン期間だけでなく年末年始や年度区切りなどの短期シャットダウンの期間を利用して断続的に MLF 第一実験ホール内への設置を行い、最終的に 2023 年 4 月に H2 エリアが完成した。

ただし、これはいわば「ガワ」だけが完成した状態であり、H2 エリアへ表面ミュオンビームを設計強度で輸送するためには図 11 において赤枠で囲った箇所の HS4、

¹⁰結果は Nature news (<https://www.nature.com/articles/d41586-024-03460-9>) でも取り上げていただいた。ミュオンコライダー色が強めの記事になっていて興味深い。

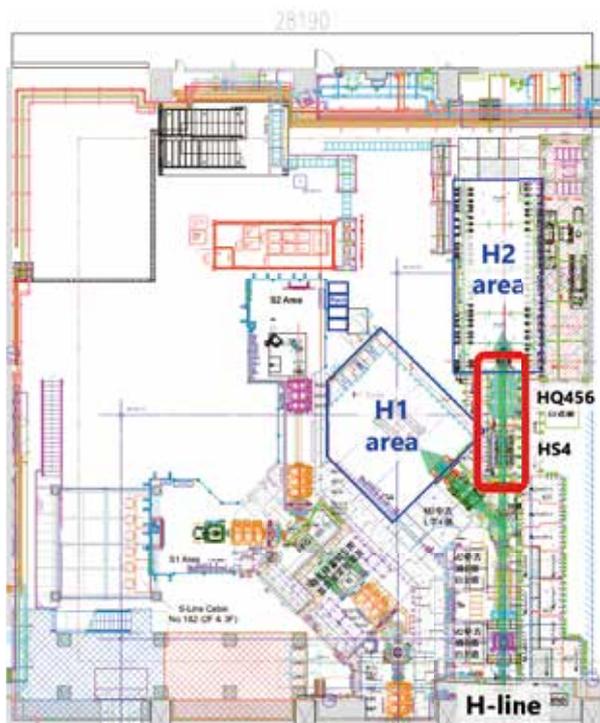


図 11: J-PARC MLF 第一実験ホールミュオンエリア

HQ456 と呼ばれる電磁石を含む部分のビームライン建設が必要である。2024 年度現在、2 台の電磁石（ソレノイド電磁石 HS4 および四重極トリプレット HQ456）を製作中であり、2024 年 12 月末～2025 年 1 月頭の短期シャットダウン期間にインストール予定である。なお、大強度ミュオンビームをロスなく輸送するため、ソレノイド電磁石 HS4 はダクト内径 610 mm、四重極トリプレット HQ456 はダクト内接円の直径約 400 mm という大型なものである。また、あらかじめ 2024 年夏季シャットダウン期間中に電力ケーブルの敷設や冷却水配管など行っており、年末年始の短期のシャットダウン期間でもインストール可能な工程となっている。

2023 年度には、H2 エリアでミュオンを冷却するために必要となるレーザー用のクリーンルームを H2 エリア横に整備した。温度は ± 0.2 °C 以下で制御され、清浄度は ISO 6 (Class 1000) である。2024 年度からレーザーシステムのインストールを予定している。

また、H2 エリア内では超低速ミュオンを RFQ および IH-DTL といった高周波線形加速器を用いて運動エネルギー 4 MeV まで再加速する [1]。これらで使用する RF 電源 (324 MHz クライストロン等) を設置するための電源ヤードもレーザークリーンルームの上に整備した。図 12 に現在の MLF 第一実験ホールの写真を示す。

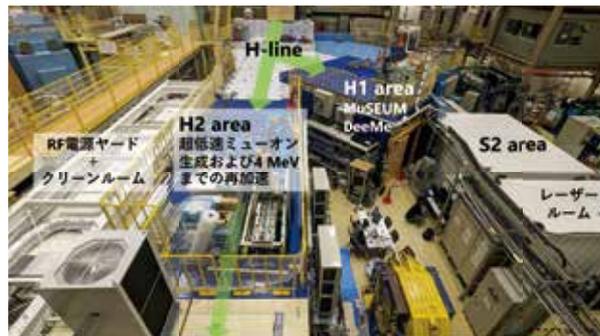


図 12: 2024 年現在の H ラインおよび S ラインの写真

4.3 H ライン実験棟（拡張建屋）の建設に向けて

ミュオン $g-2$ /EDM 実験では超低速ミュオンを運動エネルギー 212 MeV まで再加速することで得られる低エミッタンスミュオンビームを用いるが、MLF 棟内では線形加速器を用いて高効率で加速しても約 4 MeV までしか到達できない。そこで我々は MLF 棟の東側、現在は駐車場となっているスペースに新たな建屋（H ライン実験棟）を建設し、後段の線形加速器（DAW および DLS 加速器 [1]）をインストールすることで運動エネルギー 212 MeV までミュオンを再加速する（図 13）。

この建屋の建設準備として、これまで建設サイトの地質調査、埋蔵文化財試掘調査、測量、埋設ネットワークケーブル等の移設などの各種工事を段階的に進めてきた。2023 年度には建築事務所・設備設計事務所と共に最終的な建屋の実施設計を完了した。同時に工程についても管理区域拡張およびビームライン延伸に係る放射線変更許可申請・MLF のビーム運転計画等と矛盾がないよう検討を進めてきた。着工から外構工事、建屋の建築工事、電気・空調などの機械設備・冷却水設備・クレーン等の設備工事をあわせて竣工まで 2 年強の工程となっており、建設開始のゴーサインを今か今かと待っている状況である。

5 おわりに

人類はついにミュオンの高周波数加速に成功した。加速ミュオンビームを使った素粒子実験は将来技術ではなく、目前まで迫りつつある。本記事では紹介しなかったがミュオン専用の加速器の設計や製作も着々と進行している [26–28]。大強度、高エネルギーのミュオンビームを実現し、素粒子の重要な未解決問題に迫ってきたい。

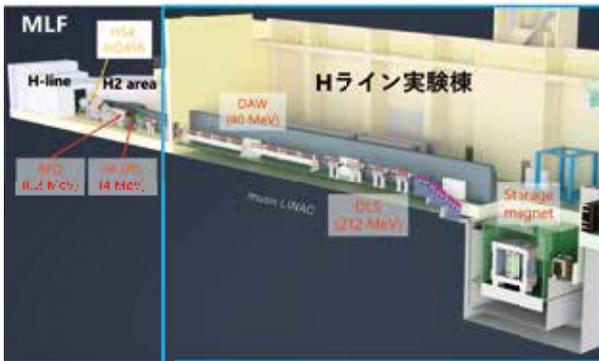


図 13: ミューオン $g-2$ /EDM 実験のための H ライン拡張計画。MLF 棟の東側に H ライン実験棟を新設し、後段加速器および蓄積電磁石をインストールする。

6 謝辞

まず、このような貴重な機会をくださった高エネルギーニュース編集委員の皆様には感謝いたします。今回のミューオン加速実験は J-PARC MLF 課題番号 2011MS06 として実施されたものです。本研究の実施に際して、J-PARC ミューオン科学系グループの皆様には多大なる協力をいただきました。本研究は JSPS 科研費 JP18H05226, JP19H05606, JP20H05625, JP21K13944, JP21J01132, JP22KJ1594, JP22K21350, JP22H00141, JP24H00023, JP24K03211, 文部科学省 Q-LEAP JPMXS0118069021, そして JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A1 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Abe *et al.*, PTEP. **2019**, 053C02 (2019).
- [2] S. Aritome, *et al.*, arXiv:2410.11367 (2024).
- [3] T. Aoyama, *et al.*, Phys. Rept. **887**, 1–166 (2020).
- [4] D. P. Aguillard, *et al.*, (The Muon $g-2$ Collaboration), Phys. Rev. Lett. **131**, 161802 (2023).
- [5] G. W. Bennett, *et al.*, (Muon $g-2$ Collaboration), Phys. Rev. D **73**, 072003 (2006).
- [6] S. Borsanyi, *et al.*, Nature **593**, 51–55 (2021).
- [7] F. V. Ignatov, *et al.*, (CMD-3 Collaboration), Phys. Rev. D, **109**, 112002 (2024).
- [8] 遠藤基, 岩本祥, 北原鉄平, 高エネルギーニュース **40-2**, 56 (2021).
- [9] A. Crivellin, *et al.*, Phys. Rev. D, **98**, 113002, (2018).
- [10] 江間陽平, 高エネルギーニュース **42-2**, 59 (2023).
- [11] K. Nagamine, *et al.*, Phys. Rev. Lett **74**, 4811 (1995).
- [12] 三部勉, 石田勝彦, 高エネルギーニュース **35-2**, 110 (2016).
- [13] 大谷将士, 北村遼, 近藤恭弘, 高エネルギーニュース **37-1**, 20 (2018).
- [14] 植竹智, 平木貴宏, 鈴木一仁, 吉田光宏, 高エネルギーニュース **39-4**, 170 (2021).
- [15] Y. Miyake, *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **225**, 012036 (2010).
- [16] G. A. Beer, *et al.*, PTEP **2014**, 091C01 (2014).
- [17] C. Zhang, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **1042**, 167443 (2022).
- [18] S. Bae, *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **21**, 050101 (2018).
- [19] B. Kim *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **899**, 22 (2018).
- [20] T. Ito. *et al.*, Nucl. Inst. Meth. A **754**, 1 (2014).
- [21] P. Bakule, *et at.*, Nucl. Instr. Meth. B **266**, 335 (2008).
- [22] N. Kawamura, *et at.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 113G01 (2018).
- [23] T. Yamazaki, *et at.*, EPJ Web of Conferences **282**, 01016 (2023).
- [24] K. Shimomura, AIP conf. proc. **1382**, 245 (2011).
- [25] Y. Nakatsugawa, on behalf of the DeeMe collaboration, Nucl. Part. Phys. Proc. **273-275**, 1692-1698 (2016).
- [26] Y. Nakazawa, *et al.*, Phys. Sci. Forum, **8**, 1, (2023).
- [27] M. Otani, *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **1350**, 012097, (2019).
- [28] K. Sumi, *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **2420**, 012038, (2023).