

■ 研究紹介

極冷ミュオンビーム実現のためのミュオンニウム標的開発

KEK 素粒子原子核研究所

三部 勉

tsutomu.mibe@kek.jp

理化学研究所仁科加速器研究センター

石田 勝彦

ishida@riken.jp

2016年8月22日

1 はじめに

このたび、高エネルギー加速器科学研究奨励会より、表記の開発に関して平成27年度西川賞をいただけることとなりました。身に余る光栄に感ずると共に、この開発に携わった多数の方々の貢献無しでは成しえなかったとの思いを強くしております。この研究はミュオンを用いた超精密実験、ミュオン $g-2$ /EDM 測定に用いるビーム開発が動機となっていますので、その概要と開発経緯をこの場をお借りして紹介いたします。

2 背景

我々の研究目的はミュオンを用いて、標準理論を超える物理法則を探ることです[1]。特に、我々は双極子能率に注目し、精密に測定することで標準理論の予測からのズレを検証します。ミュオンの双極子能率はスピンに比例する形で定義されます。磁場と相互作用するものを磁気双極子能率、電場と相互作用するものを電気双極子能率と呼びます。電磁場を含むディラック方程式を非相対論近似すると、双極子能率は電磁場と相互作用する項として表れます。磁気双極子能率の強さを表す無次元の比例係数（ランダウの g 因子）を g と定義すると、最低次では2が得られます。

場の量子論では、真空は場で満たされていて、「真空はゆらぐ」わけですが、この量子論的効果により、 g 因子は様々な相互作用に起因する量子補正を受けます。 g 因子の2からのずれ($g-2$)を異常磁気能率と呼び、量子補正の大きさを直接示す物理量として用います。レプトンの $g-2$ は素粒子標準理論で精密に計算することができることが知られており[2]、実験値と予想値のズレを測ることで標準理論を超える物理現象の有無を探ることができます。

電気双極子能率(EDM)は対称性の観点から重要な物理量です。スピンは角運動量ですから、双極子能率は磁場と同様に、空間(P)反転に対して符号を変えず、電荷(C)反転・

時間(T)反転に対して符号を変えます。一方、電場は $P \cdot C$ 反転に対して符号を変えるが、T 反転では符号を変えません。このことより、EDM を有すると、P 対称性、T 対称性を破ることがわかります。CPT 定理を仮定すれば、T 対称性の破れは CP 対称性の破れを意味します。現在、レプトンセクターでの CP 対称性の破れは未だ発見に至っておらず、発見されれば重要な知見が得られることに疑いの余地がありません。

先行実験である、米国 BNL E821 実験はミュオン $g-2$ を 0.54ppm の精度で測定し、標準理論の予想値よりも約 3σ 大きい値を報告しました[3]。これは標準理論のほころびを示しているのでしょうか。我々は J-PARC ミュオン施設 H ラインにおいて、まったく新しい実験手法を用いてミュオン $g-2$ を精密測定するとともに、EDM を世界最高感度で測定する実験を準備しています[4]。

2.1 先行実験

ミュオンの $g-2$ と EDM はスピン偏極したミュオンのスピン歳差運動と磁場を測定することで得られます。ミュオンは弱い相互作用で崩壊し、崩壊で生じる陽電子の方向とミュオンのスピンは相関を持つため、陽電子を計測することでミュオンのスピン歳差運動が測定できます。測定は、1970年代に CERN で行われた実験に始まり、現在は BNL の実験(BNL-E821)が最高精度の結果を発表しています。

BNL-E821 実験は $3 \text{ GeV}/c$ のミュオンビームを直径 14 m の超伝導蓄積リングに入射し測定を行いました。ミュオンをリング内に蓄積するためには、収束電場を印可する必要があります。この電場は、ミュオンの静止系では一部磁場として作用するため、スピンを回転してしまい精度が制限されますが、BNL-E821 実験では運動量を $3 \text{ GeV}/c$ (魔法運動量) に設定し、この項を抑制しています。また、蓄積リングとして一体型の超伝導コイルを用いることで安定かつ様な磁場を実現し、直径 14 m 蓄積領域の平均磁場を 0.17 ppm の精度で測定しました。現在、BNL から FNAL

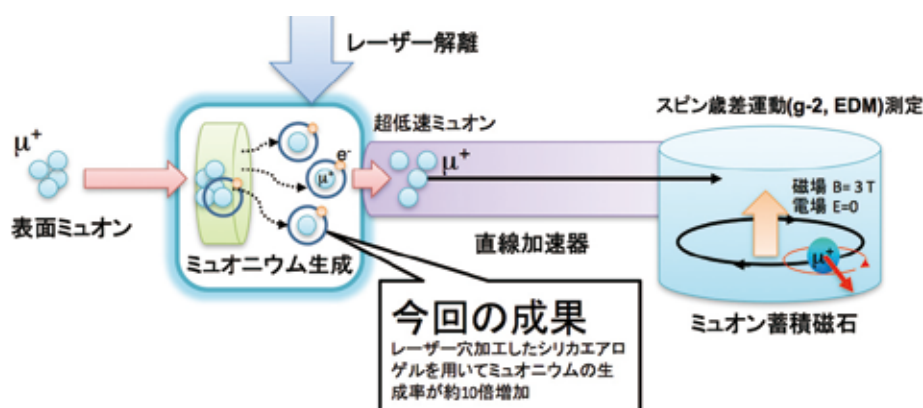


図1：J-PARC ミューオン $g-2$ /EDM 実験概要と今回の成果

へ蓄積磁石を移設し、さらにデータを取得する実験 (FNAL-E989) の準備が進んでいます。

BNL-E821 実験で測定された $g-2$ は標準模型から 3σ 大きい値を示しています。これは現状で最もシリアスなアノマリー (の候補) の一つとして捉えられており [5]、実際に最終報告論文 [3] の引用数は年々増加して、積算で 1,200 を超えるまでになりました。

2.2 J-PARC $g-2$ /EDM 実験と極冷ミュオンビーム

このような状況の中、いま新しい実験を行うことに、どのような意味があるのでしょうか。以下に、二つの観点を述べます。まず、新しい発見は独立に検証されるべきだということです。FNAL-E989 実験は BNL-E821 と同じ方法で主要な実験装置も同じであるため、自ずと系統誤差は強く相関をもっています。 $g-2$ のズレの有無に決着をつけるためには、全く新しい独立な測定が必要です。二つめに BNL-FNAL の方法は、最終的にはビームに起因する系統誤差で制限されるということです。例えば、ビームが蓄積リングのアクセプタンスを埋め尽くすために起きるビームロスや、強い収束が必要なためビームのベータトロン振動数が $g-2$ 振動数の近傍になることに起因する系統誤差があります。この測定にエミッタンスが小さい全く新しいビームを持ち込むことができれば、小さいビームサイズとわずかな収束力でビームを蓄積することができるため、これらの系統誤差を払拭することができます。これにより、BNL-E821 や FNAL-E989 の精度を超えて、さらに高い精度で測定を行う可能性が開けます。

我々は全く新しいミュオンビームと実験装置を組み合わせることで、新しい実験方法により $g-2$ と EDM を世界最高感度で測定する実験を準備しています。この実験は KEK 齊藤直人氏の発案によるもので、様々な共同研究者のアイデアを取り入れて、現在次のように実現する計画が進められています。

図1に実験概要を示します。J-PARC ミューオン施設 H ラ

インにおいて室温ミュオニウムをレーザー解離することにより、超低速ミュオンを生成し、その後直線型加速器で $300\text{ MeV}/c$ まで加速することにより、エミッタンスが極めて小さい「極冷ミュオンビーム」を生成します。極冷ミュオンビームを用いることにより、電場収束を持ち出すことなくミュオンを一様磁場中に蓄積することが可能になります。実験では直径 66 cm のコンパクトな超伝導蓄積磁石を用いることで、磁場の一様性を飛躍的に向上することができます。加えて、従来の方法の測定感度を決めていたビーム由来の系統誤差を大きく抑制できると見込まれています。この着想にいたる経緯やより詳しい実験手法の概要は文献 [6, 7] をご覧ください。

2015 年には技術設計報告書を作成し、実験の実現に向けた準備が整いつつあります。その中でも、ミュオニウム生成標的の開発は、提案当初から最優先で着手してきた、要となる開発項目であり、以下で述べる良い研究結果が得られたのは大変喜ばしいことです。

3. ミュオニウム生成標的としてのシリカエアロゲルの開発

3.1 超低速ミュオンビームの開発

典型的なミュオンビームは、高エネルギー陽子を静止標的などに当ててパイオンを生成し、その崩壊したもの ($\pi \rightarrow \mu + \nu$) を用います。パイオンが飛行中に崩壊してできたものを集める場合 (崩壊ミュオン) と、生成標的の表面付近にたまたま静止したパイオンが崩壊してできたものを集める場合 (表面ミュオン) があり、ミュオンスピン緩和法による物性研究などに用途が多い低速の正ミュオンを得るには後者が主に使われています。

ミュオン $g-2$ /EDM 実験に必要な極冷ミュオンビームの源となるのが 1 eV 以下のエネルギーを持つ超低速ミュオン源です。さきほど述べた表面ミュオンビームは、約 4 MeV のエネルギーと数 cm 程度のビームサイズを持ち、小さなあるいは薄い試料に止めるのは容易なものではありません。また単純に減速材を通してエネルギーを落

表 1: タングステンとシリカエアロゲルの比較

標的	高温タングステン	シリカエアロゲル
組成	W	SiO ₂
密度 [9g/cc]	19.25	0.03-1.2
硬度	硬い	非常に脆い
電気伝導度	導体	絶縁体
熱伝導	良	遮熱材
拡散中のミュオン状態	μ^+	Mu (52%)[16]
利用温度[K]	2100	300

とすのでは、エネルギーの広がりが増え拡大するために本当に欲しいエネルギーのミュオンはわずかしか得られません。ここで重要な役割を果たすのがミュオンの拡散・再放出です。ミュオンが標的に止まってしまうとしても、標的中の拡散が速ければ、たまたま表面に到達したものが真空中に出てきます。これが熱エネルギー(1 eV 以下)で出てくるなら大幅にエネルギー広がりやを圧縮できることになります。これまでわかっている限りでは、真空中には大概ミュオニウムという電子が束縛した水素原子の様な状態で出てきます。これをレーザーイオン化することにより熱エネルギーを持った正ミュオン源が得られ、必要エネルギーまで加速することにより、横運動量が加速方向運動量に対して大幅に抑えられた直進性の良いビーム（極冷ミュオンビーム）の利用が可能となり、高精度一様磁場リングに蓄積しての測定が容易となります [9, 10]。

ミュオニウムを真空中に放出する物質としては、高温タングステンと並んで、シリカパウダーが知られていました[11]。高温タングステンは日本が開発した超低速ミュオン源として、KEK [12]、理研 RAL ミュオン施設 [13]、J-PARC [14]で長年の実績があります。しかし、ミュオン $g-2$ /EDM 実験では非常に指向性の良いビームが必須となりますので、高温のビームをコリメートするなど、さらに切り刻むことなく、そのまま冷却ビームが達成できるシリカパウダーなどの常温源が便利です。一方ではシリカパウダーについてはパウダーであるが故のいくつかの問題が知られています。まずは設置方法ですが、薄膜などの上にパウダーを置いて下方からミュオンを照射できれば問題ないのですが、大概のミュオンビームラインはそうではなく、水平方向にビームが入射されます。また加速器の関わる真空容器中で粉をまき散らさないような細心の注意が必要です。さらにはシリカパウダーについては測定を開始して数日程度で生成効率が低下するなどの問題がしばしば言われていました。パウダーを積み上げるのに寄与していた水が抜けて隙間が減るのが原因でないかなどと推測されています。

このために、常温でこれに代わる形状の安定した扱いやすい物質がないかということで疎水性シリカエアロゲルが提案されました。シリカエアロゲルが候補として上がった

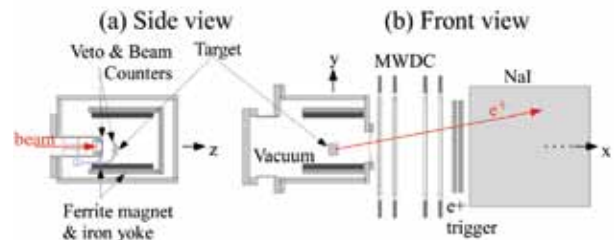


図 2: TRIUMF S1249 実験セットアップ(2013 年)

理由は、シリカパウダー同様に 10 mm 程度の微粒子が連結したネットワーク構造を作っているため、この大きな間隙チャンネルがミュオンの速い拡散に大きく寄与すると考えられました。素粒子実験で用いられるチェレンコフカウンター用途として千葉大（河合秀幸氏、田端誠氏）に最新の作成技術[15]があったということも大きく貢献しています。

表 1 にシリカエアロゲル物質の性質をタングステンと比較して示します。密度などは両極端にあると言え、これらが共にミュオニウム放出標的候補として用いられるのは興味深いことです。

3.2 シリカエアロゲルからのミュオニウム測定

真空中に出た少数のミュオニウムを観測するためには、ミュオン崩壊からの陽電子のトラッキングを行いミュオンの崩壊位置を決めますが、標的中に残った多数のミュオンとより分けるために位置精度の良い検出が必要となります。J-PARC などのパルス状ミュオンと違ってパイプアップの問題が少ない DC 状ミュオンが最適と考え、2009 年に TRIUMF 研究所に利用申請をしたところ、実験課題 S1249 として認められることとなりました。TRIUMF の共同研究者（Glen Marshall, Art Olin, George Beer）はシリカパウダーでの実験を 1980 年代に行った先駆者であり、実験を進めるにあたって我々の知らなかった貴重な情報・提案を得ることができました。さらに幸運だったことは、彼らが直前までミュオン崩壊パラメータの精密測定（TWIST 実験）に利用していたドリフトチェンバーが陽電子トラッキング用途に最適であったことです。

当初は、理研 RAL と KEK 素核研、それぞれ予算をやりくりし標的チェンバーやビームカウンター製作などを行い、実験を開始しました。2011 年には、鳥養映子氏を代表とする新学術領域研究[17]が採択され、その中の研究計画班（代表：岩崎雅彦、理研）として、本格的に研究を始められることとなりました。

TRIUMF M15 チャンネルに設置した測定チェンバーの概略を図 2[18]、ビーム斜め下流側から見た写真を図 3 に示します。ミュオンビームが標的に当たったことをビームカウ



図3：TRIUMFで実験中の標的チェンバーと陽電子トラッキング測定器（2013年）

ンターとベトカウンターを用いて同定します。ミュオンが崩壊して出る陽電子をトリガー用シンチレーター検出器、位置検出用ドリフトチェンバーで検出し、散乱の影響が少ない高エネルギーの陽電子だけをNaI検出器で選ぶことにより位置分解能を上げます。

J-PARCでのミュオン $g-2$ /EDM測定に利用できる極冷ミュオンビーム強度を評価する上で、入射ミュオンのどれくらいが真空中ミュオニウムに変換されるかが最も重要なファクターの一つです。効率をあいまいさなく言うには2つの量が必要となります。まずはTRIUMFでの実験条件でミュオンがどのように標的に分布して止まっているかを知る必要があります。このためには運動量を変えて、標的に止まった個数と標的を通り抜ける個数との比較を行うことにより、ビームシミュレーションと合わせて条件を詰めることができました。次は、真空中に出たミュオニウムの強度および空間時間分布で、これにはミュオン崩壊位置をドリフトチェンバーによる陽電子トラッキングで観測します。ドリフトチェンバー自体の粒子ヒット位置分解能は非常に良いのですが(0.2 mm程度)、真空と大気を仕切るフォイルでの陽電子散乱や発生位置の奥行きの広がりなどによる像のぼやけなどが加わります。薄いガラスプレート(100 μm 厚)を標的として置いて測定分解能を見積ったところ、発生位置で約2 mmという、以前の同様の実験に比べると格段に良い精度が得られました。

さて測定器は十分な性能を発揮しましたが、30 mg/ccのエアロゲル標的をセットし観測を始めたところ、真空中での崩壊ミュオンと、標的中崩壊ミュオンの混じり込みとのS/N比が期待通りに改善しません。そもそも標的から出るミュオニウムの絶対量が期待していたより少ない(シリカパウダーの文献値と比べて1/5程度)という結論が得られました。しかし、標的を交換しようとしていた矢先、2010年のビームタイムはM9チャンネル先頭部での真空トラ

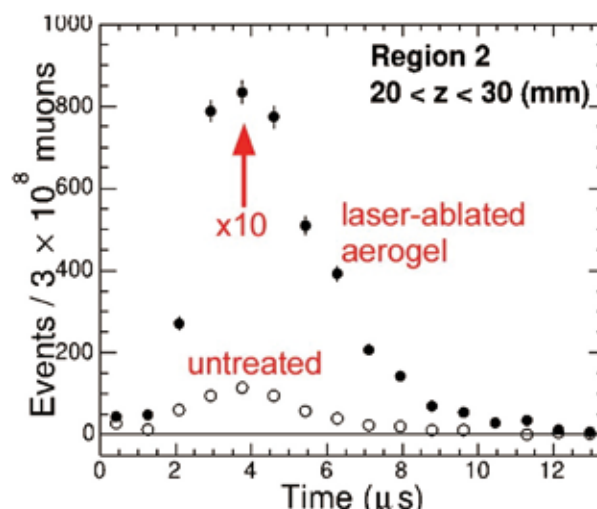
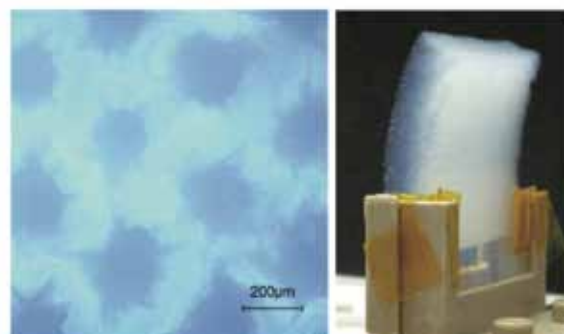


図4：レーザー加工されたシリカエアロゲルの表面付近(400 μm 間隔の穴開き)と標的ホルダへの設置、および真空中でのミュオニウム収量増加の様子(未加工標的との比較)

ブルのため、半ばで中止となりました。再起をかけた2011年の実験では4つの異なる密度のエアロゲルでの測定など十分なデータをとることができました。しかし残念なことには、測定した4種類の密度(0.03, 0.05, 0.10, 0.19 g/cm³)のサンプル間では、ミュオニウム放出率自体はほとんど違いがないという結論[18]となり、効率改善の兆しを得ることはありませんでした。

このままでは、J-PARCでのミュオン $g-2$ /EDM測定に用いるには不足であることが明らかであり、効率向上が最重要宿題となりました。それから1年以上、実験結果の解析と議論を続ける中で、拡散モデルに基づいた理解と考察を進めてゆきました。エアロゲルは数10 nm程度のシリカ粒が鎖状につながったネットワーク構造を持っており、多孔質構造を有しています。放出率の低さについては、ミュオニウムの標的の内拡散距離がミュオン静止分布拡がりの1/100程度しかなく、たまたま表面付近に止まったミュオンしか放出に寄与できないためと理解され、100 μm 程度の中間構造を作って標的の表面積を増やしてやると放出率が少なくとも5倍程度増やすことができることが計算で示さ

れました。ただしいったん表面から離れたミュオンが向かい合う表面にぶつかるということも起こりますので、表面からのミュオン離れやすさをどう仮定するかで期待できる結果が大きく変わってきます。後の測定結果から考えるに、この表面への吸着時間が非常に短かったのがうまくいった原因の一つと考えられます。

さて、表面積を増やすアイデアを実行するとして、いかにこのもろい物質に加工を行うかという問題が次にあり、いくつかの手法を実際に試しました。イオン照射、剣山状鋳型、薄膜スタック、など試行の結果、レーザー加工が安定して比較的短時間で規則的な穴を空けられるという事で、これと鋳型作成の試料とを準備し、試すこととなりました。

2013年10月に TRIUMF で測定を始めたところ、すぐさまシミュレーション予測をも超えるミュオニウム数の増加が観測されました(図4)。図4(下)の横軸はミュオンビームが入射した時からの経過時間で、縦軸はミュオニウムが崩壊して生成された陽電子の数です。実験途中結果は表面積につれてミュオニウム放出が増えていくことを示しており、ビームタイム終了3日前に日本で新たな標的を作り、後から参加した実験者に運んでもらい、それが現在の記録となっています[19-21]。別の収穫は2年前に用いた標的でのミュオニウム収量がほぼ再現されたことです。これは標的の長期安定性ということからも画期的なことです。収量が上がって実験効率が大幅にあがったために、予期していた以上に多数の標的を試験できたのも収穫でした。

現時点で得られている収量の最大値は未加工のもの比べて10倍ですが、これが限界というわけではなく、たまたま実施した10個(内レーザー加工品は5個)のサンプルの内の一ひつです。穴密度を増やすことが収量に効くであろうことは実験データの傾向およびシミュレーションから予測できるので、今後とも効率改善を図ってゆく予定です。この成功を受けて、日本でも測定環境を整備し、J-PARCのミュオンDラインにおいて、TRIUMFの結果の再現[22-23]穴密度などをパラメータとした生成量の比較を行いました[24]。さらには、カナダの研究グループと共同研究を進め、レーザー穴構造の詳細観測、レーザー穴の安定作成(反りの軽減など)などについて大幅な進展が得られました。さらなる収量向上を目指して、いろいろな標的条件での測定を系統的に行うため、今年11月に TRIUMF、来年1月に J-PARC での実験を予定しています。

3.3 今後の開発

次の課題は、真空中に発生させたミュオニウムにレーザーを照射し、超低速ミュオン発生につなげることです。タングステンと違って、エアロゲルは柔らかくてもろいので、如何に標的を崩さずに精度よく設置するか、の対策が

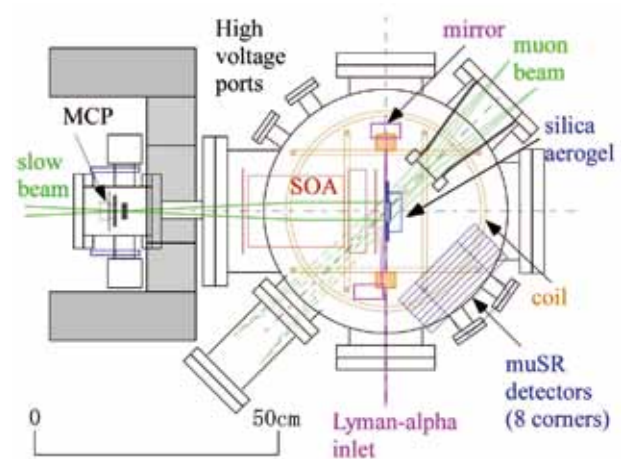


図5:理研 RAL ポート3の超低速ミュオン源チェンバーの概念図。ミュオンビーム入射窓、エアロゲル標的ホルダー、ミュオンスピン制御磁場、スピン偏極測定器、レーザー入射窓、初期加速電極を備える。

必要です。さらにはエネルギーのばらつきなく加速するために、絶縁体であり帯電なども予想されるエアロゲルの周囲に如何に一樣電場を保証するかの問題があります。一方で、利点と考えられるのはミュオニウム状態では磁気回転比が約100倍となるので(電子磁気モーメントの寄与)、1 Gauss程度の弱い磁場でもミュオンスピンの向きを一斉に変えるのが容易なことです。これにはミュオンがエアロゲル標的に止まった直後からレーザーによるイオン化まではミュオニウム状態のままであることが貢献します。これを用いればミュオン $g-2$ /EDM 測定でミュオンスピンの向きを反転した測定を行い、スピン偏極に依存した項だけを抜き出すことにより、系統誤差を減らすことが期待できます。これらを実証するための試験チェンバー(図5)を理研 RAL に設置して、試験を始めています。

これと平行して、J-PARC ではミュオンを RF 加速する準備を進めています。静電場で 5 keV まで加速し、RFQ、IH-DTL [25]、DAW、Disk-loaded 型空洞を組み合わせて、210 MeV までミュオンを加速します。既に 5 keV までのミュオンの静電加速は成功しています。次の段階として、J-PARC の陽子 LINAC の RFQ 予備機を借りて 340 keV まで加速する準備を進めています[26]。また、加速後の蓄積リングへ入射方法についても最近論文[27]としてまとめました。

シリカエアロゲルの開発には紆余曲折ありましたが、やっと超低速ミュオン源として利用するに足りるミュオニウム放出が得られることになりました。今後はさらなる高効率化を目指すとともに、これを用いて性質の良い超低速ミュオンビームを得ることが次の目標となります。さらには、これを元に画期的な極冷ミュオンビームを作り、ミュオン $g-2$ /EDM 実験を実現するための準備も進んでお

り、さらに先には物理成果が待たれています。今後ともご支援・ご協力をよろしくお願いいたします。

参考文献

- [1] 最近のレビュー論文として, W. Higemoto, J. Sugiyama, T. Mibe (ed.), *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, No. 9 (2016), T. Gorringer and D. Hertzog, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 84, 73 (2015).
- [2] 例えば、青山龍美, 早川雅司, 木下東一郎, 仁尾真紀子, *日本物理学会誌*, Vol 69, No. 6, 376 (2014)
- [3] G. W. Bennett et al. (Muon $g-2$ Collaboration), *Phys. Rev. D* 73, 072003 (2006).
- [4] www.g-2.kek.jp
- [5] J. Ellis, 研究会「Interplay between LHC and Flavor Physics」, 名古屋大学, 2016年3月14-15日
- [6] 齊藤直人, *日本中間子科学会誌*, めそん No. 32 (2010).
- [7] 三部勉, 石田勝彦, 佐々木憲一, *高エネルギーニュース* **31-3**, 209 (2012).
- [9] M. Iwasaki, and K. Ishida, "Development of new muon source for muon $g-2$ measurement and muon magnetic microscope", *J. Phys.: Conf. Ser.* 225, 012005 (2010).
- [10] K. Ishida, for the new muon $g-2$ muon source group, "Ultra slow muon source for new muon $g-2$ experiment", *AIP Conference Proceedings* 1222, 396-399 (2010).
- [11] G.A. Beer et al., *Phys. Rev. Lett.* 57 (1986) 671.
- [12] K. Nagamine, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 74, 4811 (1995).
- [13] P. Bakule, et al., *Nucl. Instrum. Meth. B.*, 266, 335 (2008).
- [14] *日本中間子科学会誌*, 特集「新学術領域研究：超低速ミュオン顕微鏡」めそん 2012年春号 No.35、同めそん 2012年秋号 No.36
- [15] M. Tabata et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 668, 64 (2012).
- [16] 廣田誠子, 東京大学理学系研究科 修士論文 (2010)
- [17] 文科省科研費 2310800N 新学術領域研究「超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア」平成23年-27年度、代表 鳥養映子
- [18] P. Bakule, G. A. Beer, D. Contreras, M. Esashi, Y. Fujiwara, Y. Fukao, S. Hirota, H. Inuma, K. Ishida, M. Iwasaki, T. Kakurai, S. Kanda, H. Kawai, N. Kawamura, G. M. Marshall, H. Masuda, Y. Matsuda, T. Mibe, Y. Miyake, S. Okada, K. Olchanski, A. Olin, H. Onishi, N. Saito, K. Shimomura, P. E. Strasser, M. Tabata, D. Tomono, K. Ueno, K. Yokoyama, S. Yoshida, "Measurement of muonium emission from silica aerogel", *Prog. Theor. Exp. Phys.* 103C0, (2013).
- [19] G.A. Beer, Y. Fujiwara, S. Hirota, K. Ishida, M. Iwasaki, S. Kanda, H. Kawai, N. Kawamura, R. Kitamura, S. Lee, W. Lee, G.M. Marshall, T. Mibe, Y. Miyake, S. Okada, K. Olchanski, A. Olin, H. Ohnishi, Y. Oishi, M. Otani, N. Saito, K. Shimomura, P. Strasser, M. Tabata, D. Tomono, K. Ueno, E. Won, and K. Yokoyama, "Enhancement of Muonium Emission Rate from Silica Aerogel with a Laser-Ablated Surface", *Prog. Theor. Exp. Phys.* 091C01 (2014).
- [20] 北村遼, 東京大学理学系研究科 修士論文 (2014)
- [21] R. Kitamura, G. Beer, K. Ishida, M. Iwasaki, S. Kanda, H. Kawai, N. Kawamura, W. Lee, S. Lee, G. M. Marshall, Y. Matsuda, T. Mibe, Y. Miyake, S. Nishimura, Y. Oishi, S. Okada, A. Olin, M. Otani, N. Saito, K. Shimomura, P. Strasser, M. Tabata, D. Tomono, K. Ueno, E. Won and J-PARC muon $g-2$ /EDM collaboration, "Studies on Muonium Production from Silica Aerogel with Substructure for the Muon $g-2$ /EDM Experiment", *Proc. 2nd Int. Symp. Science at J-PARC*, *JPS Conf. Proc.*, 025016 (2015).
- [22] 神田聡太郎, 東京大学理学系研究科 修士論文 (2012)
- [23] G. Beer, et al., KEK-MSL progress report 2013.
- [24] G. Beer, et al., KEK-MSL progress report 2014.
- [25] M. Otani, T. Mibe, M. Yoshida, K. Hasegawa, Y. Kondo, N. Hayashizaki, Y. Iwashita, Y. Iwata, R. Kitamura, and N. Saito, "Interdigital H-mode drift-tube linac design with alternative phase focusing for muon linac", *Phys. Rev. Accel. Beams* 19, 040101 (2016).
- [26] 大谷将士, 北村遼, 近藤恭弘, *日本中間子科学会誌*, めそん No. 44 (2016) in press.
- [27] H. Inuma, H. Nakayama, K. Oidea, K. Sasaki, N. Saito, T. Mibe, M. Abe, "Three-dimensional spiral injection scheme for the $g-2$ /EDM experiment at J-PARC", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 832 51–62 (2016).