MLF-H2

ミューオン線型加速器中におけるスピンダイナミクスシミュレーション
The Spin Dynamics Simulation in the Muon Linac

安田浩昌 [1], 飯沼裕美 [2], 大谷将士 [3], 河村成肇 [3], 北村遼 [4], 近藤泰弘 [4,2], 齊藤直人 [5], 佐藤優太郎 [3], 須江祐貴 [6], 竹内佑甫 [7], 中沢雄河 [2], 三部勉 [3], 山崎高幸 [3], 森下卓俊 [4], 四塚麻衣 [6]
1 東大理, 2 茨大理工, 3KEK, 4JAEA, 5J-PARC センター, 6 名大理, 7 九大理

2000 年頃にブルックヘブン国立研究所(BNL)で行われた先行実験[1]より、ミューオンの異常磁気能率(g−2)の実験値と標準模型による計算値[2,3]の間に3σを超える乖離が 10 年以上に渡って存在している。これは標準模型を超えた物理の存在を示唆しており、新物理による影響を支持している。この実験結果を検証するためにも、高精度かつ独自の方法による測定が不可欠である。

J-PARC E34 実験では先行実験とは異なる独立な手法でのミューオン g−2 及び電気双極子能率(EDM)の測定を目指している。本実験では、室温ミューオンを加速した低エミッタンスミューオンビームによる測定を行い、最終的には g−2 を 0.1 ppm の精度、EDM を 10^{-21}e・cm の感度を目指す[4]。

従来の実験における系統誤差要因としては、ビームダイナミクスによる影響が大きく占めており、本実験ではミューオン線型加速器による低エミッタンスミューオンビームの生成でこれを解決できる。一方、過去の実験では検討されていなかったスピンとビームのダイナミクスに相関があった場合をシミュレーションしたところ、スピン方向と運動量分布に相関がある場合、ミューオン g−2 の測定値を系統的にズラしてしまう効果があることを発見した。この新しい系統誤差要因に関して調べるため、線型加速器中のミューオンスピンのダイナミクスに関してシミュレーションした。

線型加速器中でのスピンダイナミクスのシミュテーションは過去に行われた実績がなく、本研究で新たに開発すべき要素であるが、これを既存の粒子追跡シミュレーションソフトウェアと組み合わせることによって可能にした。

本講演ではビームとスピンのダイナミクスに関連する新しい系統誤差の提案および、ミューオン線型加速器中におけるスピンダイナミクスシミュレーションの結果について報告する。

[1] G.W.Bennett *et al.*, Phys. Rev. D73, 072003(2006)
[2] A. Keshavarzi *et al.*, arXiv:1911.00367
[3] M. Davier *et al.*, arXiv:1908.00921
[4] M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053C02 (2019)

NU1

全身 MRI 用磁石技術を応用した ビーム捕捉用超伝導磁石の精密操作
Precise Operation of Superconducting Magnet for Beam Capture Applying Whole-body MRI Magnet Technology

杉田萌[1]、佐々木憲一[2]、阿部充志[2]、飯沼裕美[1]、
山口博史[2]、 三部勉[2]、荻津透[2]、大金千織[1]、齋藤真慶[3]、下村浩一郎[2]
１ 茨城大学、２ KEK、３ 東北大学

J-PARC で行われている MuSEUM 実験において、基底状態のミューオニウムの超微細構造（HFS）を正確に測定するために[1]、1.7 T の高均一磁場でミューオンを捕獲するための実験環境を開発する必要がある。この実験で要求される磁場の空間均一度は、回転楕円体の内部領域（半径 20cm、長さ 30cm）において±0.1 ppm 未満である。この目標を達成するために、全身 MRI 用超電導磁石を使用した磁場の受動型シミング技術が開発されている[2] [3]。本発表において議論する 2 つのトピックのうち、1 つ目は永久電流モードで運用中の温度変化によって引き起こされる長期的な磁場変動の定量的評価である。2 つ目は、磁性流体を使用したシミングの実行可能性の検討である。磁性流体は液体で、かつ同じ体積の鉄に比べて小さい磁化をもつため、磁場の微細な調整を可能にする効果が期待されている。

鉄シムは、磁石内部の静磁場の均一性を調整するために使用され、これらは超電導磁石のボア内面に配置される（Fig. 1）。そして、室温の変化は支持構造が熱膨張することによる鉄シム位置の変位と、Bloch $T^{3/2}$ の法則による鉄の磁化率の変化を引き起こす。そのため、磁場の精密制御には、長期動作における温度変化の影響を考慮する必要がある。今回は、支持構造に埋め込まれた傾斜磁場コイルに通電し、支持構造の温度を変化させながら、磁石中心の磁場変化測定を行った。また、従来の鉄を使用したシミングよりも高精度な磁場調整を目指して、磁性流体を使用したシミングの実現可能性に関する実験を行っている。

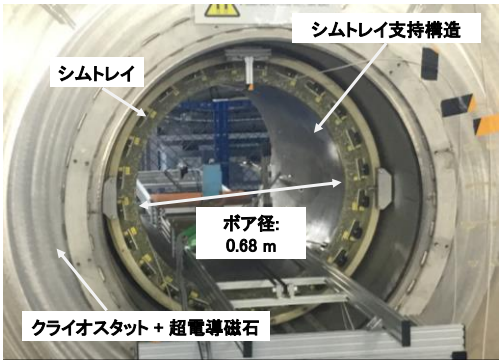

Fig. 1 全身 MRI 用超電導磁石

[1] T. Tanaka et al., J. Phys. Conf. Ser. 1138 (2018) 012008.
[2] M. Abe et al., in Proceedings of the PASJ. (2019) THOH07.
[3] M. Sugita et al., in Proceedings of the ACASC. (2020) 7P-34.

P1-104Q ＜基礎物理（素粒子・原子核）＞

MLF-D2

クリプトンヘリウム混合ガス中における ミュオニウム超微細構造精密分光
Precision spectroscopy of muonium hyperfine structure using Kr-He mixing gas

瀬尾 俊[1、2] for MuSEUM collaboration
1 東京大学、2 理化学研究所

MuSEUM (Muonium Spectroscopy Experiment Using Microwave)グループはミュオニウムの基底状態における超微細構造(MuHFS)の精密分光実験を進行中である。ミュオニウム(Mu)とは正ミュオンと電子とのレプトン二体系であり、水素様原子の一つである。核子の有限体積効果がないため、水素原子と比べて理論計算と測定結果を高精度で比較することが可能であり、束縛系 QED の精密検証や標準模型を超えた相互作用の探索に適した系である。LAMPF で行われた先行実験[1][2]での支配的な不確かさは統計的不確かさであった。MuSEUM グループは、加速器施設 J-PARC において世界最高強度のパルスミュオンビームを用い、先行実験の 10 倍の精度改善を目標としている。

本実験手順を以下に説明する。Kr ガス中に偏極ミュオンを静止させ、ミュオンが Kr 原子から電子を受け取ってミュオニウムを生成する。そこへマイクロ波を印加することで超微細構造間の遷移を誘起する。ミュオンは寿命約 2.2 μs で崩壊し、陽電子を放出する。この陽電子はミュオンのスピン方向により多く放出されやすい。マイクロ波の周波数を掃引しながら崩壊陽電子数を計測することにより、遷移周波数を決定する。

先行実験において支配的であった系統的不確かさの一つが、ガス標的の圧力変動や圧力測定精度に由来する不確かさであった。MuHFS は Mu 原子と標的ガス原子の衝突によりガス圧力に依存するため、複数の圧力で測定し真空外挿する必要があり、これに伴いガス圧力由来の不確かさが生じる。10 倍の精度改善のためにはこれを抑制する必要があり、そのためにMuSEUMグループは2019年の測定においてKrガスの代わりにKrとHeの混合ガスを用いた。Kr原子は遷移周波数を減少させるのに対し、He原子は増大させることが水素の超微細構造測定において見られており[3]、MuHFS に関しても同様と考えられたことから Kr-He 混合ガスはその圧力依存性を相殺できると期待したためである。本講演では 2019 年度ビームタイムにおける測定について報告する。

[1] D. E. Casperson, et al., Physics Letters 59B 4 (1975).
[2] W. Liu, et al., Physical Review Letters 82 711 (1999).
[3] B. K. Rao, et al., Phys. Rev. A 2(4), 1411(1970).

P1-105Q ＜基礎物理（素粒子・原子核）＞

MLF-D2

高磁場におけるミュオニウム超微細構造測定のための磁場測定器開発
Development of magnetic field detection system for the muonium hyperfine structure measurement with high magnetic field

田中 陶冶 [1,2 for] MuSEUM collaboration
[1] 東京大学総合文化研究科 [2] 理化学研究所

MuSEUM(Muonium Spectroscopy Experiment Using Microwave)グループはミュオニウム基底状態の超微細構造(MuHFS)の精密測定を行なっている。正ミュオンと電子の基 底状態であるミュオニウムはレプトンのみからなる水素様原子であるため、その超微細構 造は量子電磁気学の理論計算で高精度に決定される。そのため精密測定の結果を理論値と比較することにより、量子電磁気学の厳密な検証が可能となる。現在 MuSEUM グループでは極小磁場における MuHFS 測定を J-PARC で行なっているが、将来建設される大強度ミュオンビームラインである H ラインの実装にあわせて 1.7 T の磁場を用いた測定を計画中である。この測定では、磁場によるスピン準位のゼーマン分裂を起こし、MuHFS に加えてミュオン-陽子磁気モーメント及びミュオン-電子質量比が導出される。特にミュオン-陽子磁気モーメント比に関しては、現在理論値と測定値が 3.7σ 乖離しているとされている[1][2]ミュオン異常磁気能率(ミュオン g-2)の測定値を決定するために必要な外部パラメータであるため、精密測定が重要となる。

高磁場における MuHFS の先行研究での主な不確かさは統計量の不足であったが、次に大きかったのはミュオニウム生成領域での磁場の不均一性による系統的不確かさであった[3]。そのため、標的領域での磁場均一性を評価する高精度 NMR 磁場測定器の開発が不可欠である。MuSEUM 測定ではミュオニウムが生成される領域(直径 100mm、長さ 300mm の回転楕円体)で 0.1 ppm の磁場均一性を実現することを目標としており、そのため回転楕円体の表面における磁場を多チャンネルで同時読み出し可能な磁場測定器開発を行っている。米国フェルミ研究所におけるミュオン g-2 測定のグループと協力し、共通の電磁石を用いて互いの測定器をクロス・キャリブレーションするプロジェクトが進行中である。2019 年に試験測定を行い、2020 年中に測定の確度を評価する予定である。本発表では磁場測定器開発と性能評価に関する進捗を報告する。

[1] A. Keshavarzi, D. Nomura and T. Teubner, Phys. Rev. D 97 114025 (2018). [2] G.W. Bennett *et al*., Phys. Rev. D73 072003 (2006).
[3] W. Liu *et al*., Physical Review Letter 82 4 (1999).

P1-106Q ＜基礎物理（素粒子・原子核）＞

MLF-H2

ミュオン線形加速器実現に向けた IH-DTL プロトタイプによるミュオン加速の現状

Current state of the muon acceleration with IH-DTL prototype for muon accelerator

中沢雄河[1]、飯沼裕美[1]、岩下芳久[2]、岩田佳之[3]、Cicek Ersin[4,5]、大谷将士[5]、河村成肇[5]、北村遼[6]、近藤恭弘[6,1]、齊藤直人[7]、須江祐貴[8]、竹内佑甫[9]、長谷川和男[6]、林崎規託[10]、三部勉[5]、森下卓俊[6]、安田浩昌[11]、山崎高幸[5]、吉田光宏[5]、四塚麻衣[8]

１ 茨大理工、２ 京大理、３ NIRS、４ Siirt 大、５ KEK、６ JAEA、
７ J-PARC センター、８ 名大理、９ 九大理、１０ 東工大、１１ 東大理

２０００年初頭に米国ブルックヘブン国立研究所のE８２１実験において、ミュオンの異常磁気能率(g-2)の実験値[1]が素粒子標準模型による理論値[2,3]から３σ以上の乖離があることが示された。このズレに標準理論を超える物理の兆しが潜むと期待されている。

J-PARC では先行実験とは異なる独立な方法で検証するための新しい高精度測定(J-PARC E34 [4])が計画進行している。E34 実験では超低速ミュオンをミュオン線形加速器にて再加速することによって生成される低エミッタンスのミュオンビームを用いることで高精度な測定を目指す。

ミュオン線形加速器の低速部領域には IH 型ドリフトチューブ線形加速器（IH-DTL）を採用しているが、IH-DTL でのミューオン加速は前例がないため原理実証が不可欠である。我々はミューオンを運動エネルギー0.34 MeV から 1.3 MeV まで加速する運転周波数 324 MHz の IH-DTL プロトタイプ空洞を開発し、加速試験の準備を整えた。本発表では、J-PARC MLF H ラインにて計画している IH-DTL プロトタイプによるミューオン加速実証の実現性を示し、実証試験に向けた準備状況について述べる。

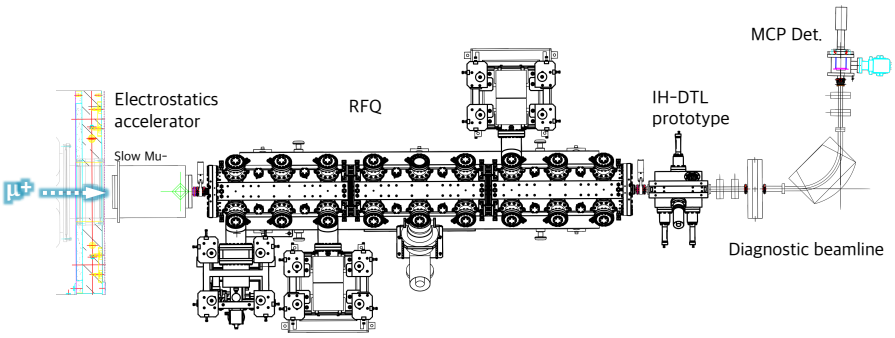

Fig. 1: Schematic drawing of the setup of the muon acceleration experiment with the IH-DTL prototype.

[1] G. W. Bennett *et al.*, Phys. Rev. D73, 072003 (2006).
[2] A. Keshavarzi *et al.*, Phys. Rev. D 97, 114025 (2018).
[3] M. Davier *et al.*, arXiv:1908.00921.
[4] M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, no 5, 053C02 (2019).

P1-107Q ＜基礎物理（素粒子・原子核）＞

Design of active shield multipole magnets for precise control of muon beam in the injection volume

Hiromi Iinuma[A], Chiori Ohgane[A] and Mitsuchi Abe[B]

A) Ibaraki University, B) KEK

E Mail/ hiromi.iinuma.spin@vc.ibaraki.ac.jp

ABSTRACT

In order to explore the beyond standard model of elementary physics, we are engaged in a new fundamental physics experiment at J-PARC/MLF muon beam line. In order to measure the muon spin precession frequency in the level of sub-ppm, a relativistic energy of muon beam is injected into a precisely adjusted storage magnet of sub-ppm uniformity by applying medical MRI magnet technologies. One of major technical keys of this experiment is to perform a three-dimensional spiral injection scheme to guide and control the relativistic muon beam into a compact storage ring of 0.66 m diameter and field strength is 3T. In this poster presentation, we will introduce a basic design of an active shield multipole coils which allow us to apply fine-tuning of the beam trajectory without disturbing the magnetic field in the beam storage volume. We also discuss detailed specifications of the prototype production in our test bench study.

Keywords: beam steering; MRI magnet technology; muon beam; shield coil; three-dimensional spiral injection;

P1-108Q ＜基礎物理（素粒子・原子核）＞

ミューオン g-2/EDM 実験のための 3 次元らせんビーム入射の実証実験の現状報告

The status report of demonstrative experiment of 3D spiral beam injection for muon g-2/EDM experiment

新しいビーム入射手法である 3 次元らせん入射技術を実証するために、電子ビームを小型ソレノイド磁石への入射するテスト実験に取り組んでいる。本発表では、Qscan 法によるエミッタンス測定結果、および実験の鍵であるビームの水平方向と鉛直方向の運動の結合（XY 結合）と蓄積後のビーム運動の相関の評価を行う。これらの結果をもとに実機の J-PARC ビームラインでの設計にどのように反映すべきかを議論する。また、電子ビームの最終的な蓄積に必要なパルス磁場発生装置の仕様についても議論する。(226 字)

P2-092Q ＜基礎物理（素粒子・原子核）＞

MLF, S1

Generation of Ultra Cold Muonium from Silicon into Vacuum

*Amba Datt Pant[1,2], Katsuhiko Ishida[3], Naritoshi Kawamura[2], Shiro Matoba [2] Koichiro Shimomura[2]

[1] Institute of Quantum Beam Science, Ibaraki University, Mito, [2] IMSS, KEK, [3]Advanced Meson Science Laboratory, RIKEN, Japan

*Email: amba.datt.pant.phys@vc.ibaraki.ac.jp

The search of new material for production of ultra cold muonium has important applications –target material for generation of ultra slow muon beam [1] for nanoscience, understand the H dynamics in materials, etc. In order to search the material, we performed muon spin rotation and relaxation measurement in N-type Si at low temperatures using positive muon in MLF, J-PARC. When muon incidents on materials, based on property of material, in some cases it picks up an electron and forms muonium (Mu = μ^+e^-). The Mu having low thermal energy (~ eV) is called as ultra cold muonium (UCM). The intense UCM generation material helps to produce intense and coherent slow muon beam for development of instrumentations (transmission muon microscope, ultra slow muon microscope) developing in J-PARC and, muon *g-2/*EDM experiment, and explore fundamental surface science.

So far, hot tungsten (~ 2000 K) [2] and silica-aerogel (at room temperature) [3] are two candidate materials noticed for relatively higher Mu yield. If we discover new material that can produce Mu at low temperatures (~ 20 K), the energy spread will be lowered by 10 times with respect to silica aerogel. And such low energy spread slow muon will help to study nano-science.

During measurement, we set the momentum of muon beam in such a way that the all muon can stop only in Si or half-half in Si and Ag sheet set downstream. In N-type Si, we observed the significant Mu signal at low temperatures (<10K) however no Mu signal is observed at room temperature. The Mu formed near rear surface (half-half stop case) has larger relaxation rate than that of Mu formed inside Si (full stope case). The difference is larger at low temperatures. One possible interpretation of the difference in rates is due to desorption (coming out) of Mu from rear surface of the Si. Detail result of the study will be discussed in the program.

References:

1) K. Nagamine et al., *PRL* **74** (1995) 4811.
2) A. P. Mills et al., *PRL* **56** (1986) 1463.
3) G. A. Beer et al., *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2014) 091C01.

P2-093Q ＜基礎物理（素粒子・原子核）＞

SPF-B1

高速レーザー冷却を目指した ポジトロニウムのレーザー励起
Laser Excitation of Positronium for Rapid Laser Cooling

周健治[1、4]、山田恭平[1]、橋立佳央理[1、4]、石田明[1]、難波俊雄[2]、浅井祥仁[1]、
五神真[1]、田島陽平[3]、蔡恩美[3]、吉岡孝高[3]、
大島永康[4]、オロークブライアン[4]、満汐孝治[4]、伊藤賢志[4]、熊谷和博[4]、
鈴木良一[4]、藤野茂[5]、兵頭俊夫[6]、望月出海[6]、和田健[7]、甲斐健師[8]
１ 東大-理、２ 東大-素粒子センター、３ 東大-工、４ 産総研、
５ 九大-GIC、６ KEK-放射光、７ 量研機構、８ 原子力機構

反物質系で初のボース・アインシュタイン凝縮（BEC）を実現し、反物質にはたらく重力効果の精密測定や、ガンマ線レーザー光源の開発に応用すべく研究を行っている。電子とその反粒子である陽電子の束縛系であるポジトロニウム（Ps）は、最軽量の原子であり、密度 10^{18} cm^{-3} での BEC 臨界温度が約 10 K と高いため、反物質系 BEC 実現の有力候補である。但し、Ps は三重項でも 142 ns の寿命で自己消滅するため、生成した高密度 Ps を寿命よりも十分早い時間内で 10 K 以下まで冷却する必要がある。そこで我々は Ps を多孔質シリカ中に閉じ込め、シリカ壁との散乱による Ps 冷却（熱化）と、243 nm 紫外レーザーを用いた Ps の 1S-2P 状態間遷移によるレーザー冷却の２手法を併用することで Ps を高速冷却する手法を新たに提案した。世界初の Ps レーザー冷却実現を目指し、KEK-SPF-B1 ビームラインにて実験を行っている。

実験により、(1)輝度増強システムの要となる陽電子磁気集束レンズのプロトタイプ測定を行い、フラックスを 3.5 倍増強することに成功、(2)Ps 生成・濃縮・冷却材としてシリカエアロゲルを試験し、真空中で 1S-2P 遷移によるドップラー拡がり温度測定に成功、(3)2P 状態の Ps が空孔中で瞬時に消滅してしまうことを観測した。また東大において (4)長パルス (>300 ns) かつ広帯域 (8.5 GHz) 高パワー (6 μJ) の Ps 冷却用プロトタイプレーザー (波長 243 nm) を開発した。今後、まず真空中での Ps レーザー冷却を実現し、Ps-BEC やガンマ線レーザー実現を目指す。ポスターではこれら結果の詳細を発表する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16H04526, JP17H02820, JP17H06205, JP17J03691, JP18H03855, JP19H01923, 公益財団法人 松尾学術振興財団、公益財団法人 三豊科学技術振興協会、公益財団法人 光科学技術研究振興財団、公益財団法人 三菱財団、TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」 TK17-046, TK19-016 の助成を受けたものです。