

ミュオン加速器で探る未知の素粒子現象

MUON ACCELERATOR EXPLORES UNKNOWN ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS

大谷将士^{*A)}, 石田勝彦^{B)}, 飯嶋徹^{C)}, 飯沼裕美^{D)}, 居波賢二^{C)}, 惠郷博文^{A)}, CICEK Ersin^{A)},
河村成肇^{A)}, 北村遼^{E)}, 近藤恭弘^{E, D)}, 齊藤直人^{A)}, 下村浩一郎^{A)}, 鈴木一仁^{C)}, 須江祐貴^{C)},
鷺見一路^{C)}, 高柳智弘^{C)}, 竹内佑甫^{F)}, 東城順治^{F)}, 中沢雄河^{D)}, 長谷川和男^{G)}, 深尾祥紀^{A)},
二ツ川 健太^{A)}, 三部勉^{A)}, 三宅康博^{A)}, 森下卓俊^{E)}, 安田浩昌^{H)}, 山崎高幸^{A)}, 四塚麻衣^{C)}
Masashi Otani^{*A)}, Katsuhiko Ishida^{B)}, Toru Iijima^{C)}, Hiromi Iinuma^{D)}, Kenji Inami^{C)}, Hiroyasu Ego^{A)},
CICEK Ersin^{A)}, Naritoshi Kawamura^{A)}, Ryo Kitamura^{E)}, Yasuhiro Kondo^{E, D)}, Naohito Saito^{A)}, Koishiro Shimomura^{A)},
Kazuhito Suzuki^{C)}, Yuki Sue^{C)}, Kazumichi Sumi^{C)}, Tomohiro Takayanagi^{C)}, Yusuke Takeuchi^{F)},
Junji Toji^{F)}, Yuga Nakazawa^{D)}, Kazuo Hasegawa^{G)}, Yoshinori Fukao^{A)}, Kenta Futatsukawa^{A)},
Tsutomu Mibe^{A)}, Yasuhiro Miyake^{A)}, Takatoshi Morishita^{E)}, Hiromasa Yasuda^{H)},
Takayuki Yamazaki^{A)}, Mai Yotsuzuka^{C)},
^{A)}KEK, ^{B)}RIKEN, ^{C)}Nagoya University, ^{D)}Ibaraki University, ^{E)}JAEA/J-PARC,
^{F)}Kyushu University, ^{G)}QST, ^{H)}University of Tokyo

Abstract

Why did antimatter disappear from the universe and only matter survived? What is the dark matter? In order to solve these mysteries, which cannot be answered by Standard Model (SM) of elementary particle physics, it is necessary to capture new phenomena that cannot be explained by SM. The precise measurement of the muon anomaly magnetic moment ($g-2$) published by FNAL in April 2021 is consistent with the BNL measurement of more than 10 years ago, and the discrepancy with the SM calculation reaches 4.2 standard deviations. The FNAL and BNL experiments, however, measure the muon $g-2$ with same method using same muon storage magnet. Therefore, precise measurement with completely different approach is required to solve its anomaly. The muon $g-2$ /EDM experiment at J-PARC (E34) aims to measure muon $g-2$ and EDM with unprecedented low-emittance muon beam realized by acceleration of thermal muons. Thanks to its low emittance, it can measure muon $g-2$ in a completely different way than FNAL or BNL. The muon linac accelerates muons from thermal energy (25 meV) to 212 MeV with electro-static extraction and four different radio-frequency cavity: RFQ, IH-DTL, DAW-CCL, and DLS. We succeeded in accelerating muons using the radio-frequency accelerator for the first time, and are now fabricating actual acceleration cavities. In this paper, demonstration of first muon acceleration and current status of the fabrication will be presented.

1. はじめに

なぜ宇宙から反物質が消え去り物質だけが生き残ったのか? 暗黒物質の正体はいったい何なのか? これまでの実験結果のほとんどすべてを精密に記述する素粒子標準模型であるが、これらの問いに答えることはできない。これらの謎を紐解くためには、標準模型では説明できない現象を実験的にとらえ、標準模型を包括するような素粒子の統一理論を探求する必要がある。大型ハドロン衝突型加速器 LHC における最高エネルギーでの陽子衝突実験で新現象の兆候が現れない一方で、B 中間子などの精密測定結果において標準模型からの乖離の兆候が現れている。その中でも、近年、注目されているのがミュオン異常磁気能率 $g_\mu - 2$ である。

2021 年 4 月、米国フェルミ研究所において $g_\mu - 2$ 精密測定結果が発表 [1] され、約 20 年前のブルック

ヘブン研究所の測定結果 [2] と合わせると、標準模型計算値 [3] との乖離は 4.2 標準偏差に達している。このズレを素粒子標準模型を超える新現象と解釈する事ができる一方で、先行実験はいずれも同じミュオン蓄積リングを使った全く同じ手法の測定であり、空間的にもエネルギー的にも広がったエミッタンスの大きいミュオンビームに由来する種々の不定性が存在している。標準模型との差異がはたして未知の現象によるものなのか、それとも実験手法によるものなのか、という疑問に決着をつけるには、先行実験とはまったく独立な手法での $g_\mu - 2$ 精密測定が必須である。

我々は近年確立したミュオンの冷却・加速技術によって可能となった低エミッタンスミュオンビームによるまったく新しい手法の $g_\mu - 2$ 精密測定を準備している (J-PARC E34 [4])。本実験では、大強度陽子加速器施設 J-PARC MLF に建設中のミュオン H ライン [5] で得られる大強度のパルス表面ミュオンビームを、ミュオニウムレーザーイオン化によって

* masashio@post.kek.jp

室温 (25 meV) まで冷却 [6-8] したのち、ミュオン専用の線型加速器によってほぼ光速 (212 MeV) まで加速し [9]、超伝導のミュオン蓄積磁石 [10] に入射 [11] して $g_{\mu} - 2$ 測定を行う [12,13]。ミュオンの冷却・加速によって従来の表面ミュオンビームの 1/1,000 程度のエミッタンス (横方向の規格化エミッタンスが $\sim 0.3\pi\text{mm mrad}$) のミュオンビームが実現し、先行実験において主要な系統誤差であったビーム由来の不定性を悉く排除するとともに、先行実験の 1/20 の大きさ (ミュオン軌道半径 7 メートル \rightarrow 0.33 メートル) のミュオン蓄積リングで精密測定を行うことができる。

ミュオニウムレーザーイオン化によるミュオン冷却技術は東大や KEK を中心に 30 年以上に渡って開発されてきた歴史があり、現在でも J-PARC MLF ミュオン U ラインにおいて物性研究に利用されている。一方で、非常に低速度のミュオンをほぼ光速まで加速する加速器はこれまでに前例がなく、実験実現のために新しく開発・実証する必要がある。

本稿の構成は以下の通りである。まず、J-PARC E34 実験のミュオン線型加速器の概要を 2 章で説明する。続いて 3 章で初段加速器を用いたミュオン加速の実証と、後段の加速器の開発状況について述べる。最後に今後の展望を 4 章で述べる。

2. J-PARC E34 実験ミュオン線型加速器

ミュオンは 2 マイクロ秒の寿命を持つため、崩壊損失を抑え大強度を維持するには素早く加速する必要がある。そのため、高い加速勾配で素早く加速できる高周波線型加速器を採用した。

高周波線型加速器の設計において、特に粒子の速度が重要なパラメータになる。図 1 に電子、陽子、ミュオンの運動エネルギーに対する速度変化を示す。ミュオンは陽子と比較してエネルギーの増加に伴う速度変化が大きい一方で、電子銃からバンチングによってすぐに光速まで達する電子と異なり、速度に応じて加速効率の高い空洞を切り替えながら 212 MeV 付近まで加速する必要がある。ほぼ光速に達した後は電子と同様の進行波型の加速管を用いることで、高い加速勾配で加速が可能になると考えられる。

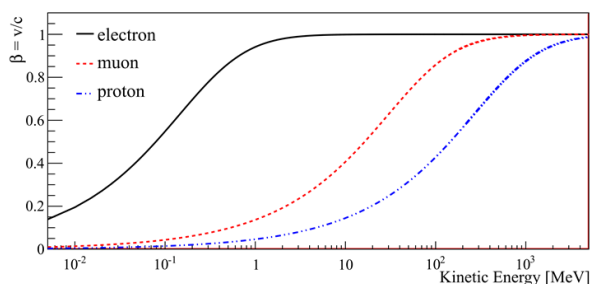


Figure 1: Particle velocity as a function of kinetic energy for electron (black line), muon (red hatched line), and proton (blue dot-dash line).

いずれの実験も実現のうえで最も大きな障壁の一つとなるのがコストである。特に線型加速器においては、加速空洞本体と大電力高周波源が主要なコスト源となる。本ミュオン線型加速器では、コスト削減のために、J-PARC 線型加速器の 324 MHz 高周波四重極型加速器 (RFQ) 予備機 [14] を再利用する。本来は負水素イオンを加速するための RFQ であるが、投入する高周波電力を質量比でスケールして加速に応じた速度変化をミュオンに合わせることで、ミュオン加速に利用することができる。さらに、後段の加速器のためのクライストロンに関して、つくば入射器のアップグレード計画のために開発された L バンドクライストロン [15] を再利用し、高周波電源のコストを削減する。

これらの経緯を踏まえたミュオン線型加速器の概略を図 2 に示す。ミュオニウムレーザーイオン化による冷却の後、静電レンズ [16] によって 5.6 keV まで加速し [17]、RFQ に入射する。RFQ で 340 keV まで加速したのちは、IH-DTL (Inter-digital H-mode Drift Tube Linac) で 4 MeV まで加速する [18]。IH-DTL で加速したのちは加速周波数を 4 倍の 1296 MHz に変更し、DAW-CCL (Disk and washer coupled-cell linac) [19] および DLS (disk-loaded structure) 進行波型加速器 [20] でそれぞれ 40 MeV、212 MeV まで加速する。

図 3 にシミュレーションによるミュオン線型加速器出射ビームの位相空間分布、表 1 に各空洞における透過率・崩壊損失・横方向の規格化エミッタンスを示す。パルス長は全幅で約 10 ナノ秒で、ミュオニウムレーザーイオン化時のレーザー時間幅と、静電レンズ取り出し時の空間方向の広がりによる飛行時間の違いによって決まっている。運動量分散は 0.04% でエミッタンスも実験要求を満たしている。J-PARC MLF 1MW での設計強度で毎秒 3×10^5 個のミュオンが得られ、2 年間のデータ取得で $g_{\mu} - 2$ の統計精度 450 ppb を達成する見込みである。

3. これまでの開発状況

前述の通り、実験実現にはこれまで実現していないミュオンの加速を実証する必要がある。ミュオニウムレーザーイオン化を含めた実験設備の建設前に加速を実証するためには、よりシンプルで取り扱いが容易なミュオンの冷却手法を開発する必要がある。そのような手法の一つとして考えられたのが、ロスアラモス研究所で提案された金属薄膜を用いた減速と RFQ による加速手法である [21]。我々は本手法をベースに、金属薄膜において負ミュオニウムイオン (正の電荷を持ったミュオンと電子 2 個からなる束縛状態) を生成することで減速し、それを RFQ で加速するという手法を考案した。負ミュオニウムイオンを加速して偏向電磁石で輸送することで、正ミュオンを加速した場合に問題となる RFQ 加速と同じエネルギーを持つ減速ミュオンバックグラウンドを排除することができる。一方で、負ミュオニウムイオンは 1980 年代に真空中で初観測 [22,23] された後の測定が皆無であったため、ミュオン加速の実証に十分な強度が得られるか検証が必要であった。

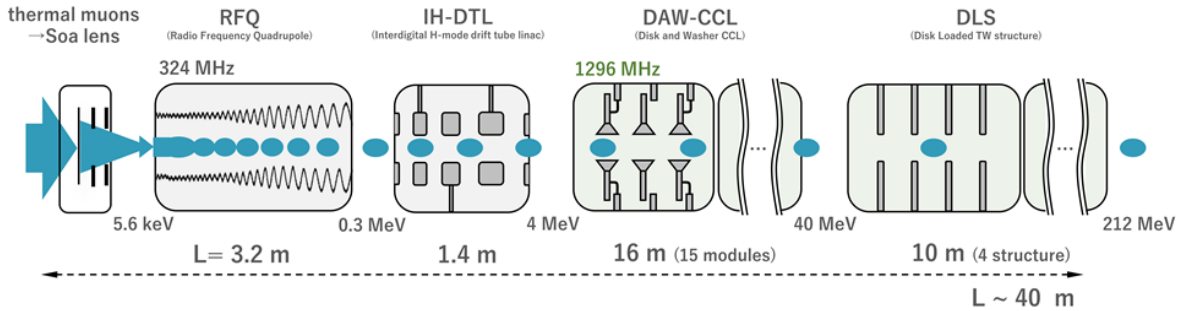


Figure 2: Configuration of the muon linac.

Table 1: Summary of the particle simulations through the muon linac: Transmission and decay loss in each section, and the emittance at the exit of each section.

	Soa	RFQ	IH-DTL	DAW-CCL	DLS
Transmission	87	95	100	100	100
Decay loss	17	19	1	4	1
ϵ_x [π mm mrad, rms, normalized]	0.38	0.30	0.32	0.32	0.33
ϵ_y [π mm mrad, rms, normalized]	0.11	0.17	0.20	0.21	0.21

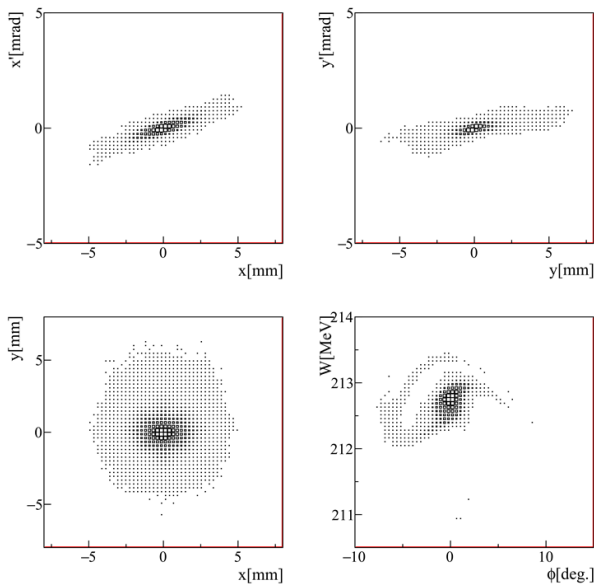


Figure 3: Phase space distributions at the DLS exit: (a) Horizontal divergence angle x' vs. x , (b) vertical divergence angle y' vs. y , (c) y vs. x , and (d) ΔW vs. time.

そこで我々は J-PARC MLF ミュオン D ラインにおいて、負ミュオニウムイオンの測定実験を行った [24]。詳しくは第 14 回加速器学会年会プロシーディングスを参照して欲しい [25]。本実験で負ミュオニウムイオンを観測することに成功し、測定強度に基づいてシミュレーションで評価した結果、約一週間のビーム試験で十分なイベント数の加速ミュオンが得られることが分かった。

2017 年 10 月 24 日から 6 日間、J-PARC MLF ミュオン D ラインにおいて、ミュオン加速の実証試験を行った。図 4 に実験セットアップを示す。負ミュオニウムイオン実験と同様に、表面ミュオンビームをアルミ薄膜に照射して負ミュオニウムイオンを生成し、静電レンズで加速・取り出した後、RFQ に入射する。本実験で用いた RFQ は J-PARC リニアック負水素イオン加速用に開発された試作器で [26]、質量比で電力をスケールすることでミュオン加速に用いた。RFQ で負ミュオニウムイオンを 89 keV まで加速した後は、四極電磁石ならびに偏向電磁石で輸送したのち、マイクロチャンネルプレート (MCP) で測定する。負ミュオニウムイオン生成標的チェンバの隣に設置した崩壊陽電子カウンターによってミュオンビームの標的到達時刻を測定し、MCP 観測イベントとの時間差を取ることで飛行時間を算出して加速ミュオンイベントを同定する。

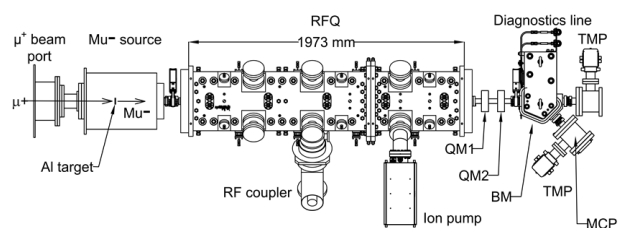


Figure 4: Schematic drawing of the experimental setup for the demonstration of muon acceleration.

図 5 に飛行時間分布を示す。赤色が RFQ に高周波電力を投入した時、青色が未投入の時、緑色がシミュレーションによる予想分布である。シミュレーションで予想される飛行時間が 837 ナノ秒であるの

に対し、測定結果が 830 ± 11 ナノ秒で、統計誤差の範囲内で無矛盾な結果が得られた。観測イベントレートは $(5 \pm 1) \times 10^{-4}/s$ であり、負ミュオニウムイオン測定実験の結果をもとにした予想と無矛盾であった。データ取得や解析方法の詳細は詳細は第 15 回加速器学会年会プロシーディングスなどを参照して欲しい [27,28]。以上から世界初のミュオン加速に成功した。

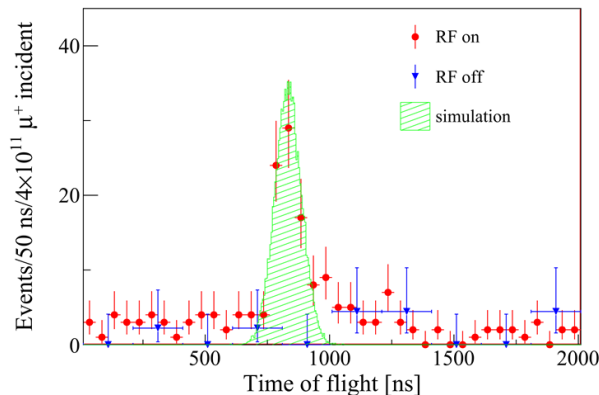


Figure 5: TOF spectra of the negative-charge configuration with RF on and off. The clear peak of the RF on the spectrum at 830 ns corresponds to the accelerated Mu^- 's. The error bars are statistical. A simulated TOF spectrum of the accelerated Mu^- 's is also plotted (cited from [29]).

RFQ 後段の加速空洞に関しても開発を進め、これまでに前例のないミュオン線型加速器の原理実証を進めている。2 段目の加速空洞 IH-DTL は既に実機の三分の一の長さの試作機を製作 (図 6) し、低電力試験で性能を実証している [30]。図 7 にビーズ測定によるビーム軸上の電磁場測定結果を示す。軸上電磁場は 2 ~ 3% 以下で設計通りであり、ビームダイナミクスシミュレーションを用いたエラースタディに基づき十分小さなエミッタンス増加で加速できることが分かっている。さらにカプラーなどの大電力試験にむけた開発も完了し [32]、2021 年内に大電力試験まで完了する予定である。並行して実機製作に着手しており、2021 年度内に空洞の製作を完了する。

3 段目の加速空洞 DAW についてもアルミ製のコールドモデル (図 8) による低電力試験ならびに空洞電力・位相などに由来するエラースタディまで完了している [33]。既に実機製作に着手し、2021 年度は全 14 タンク中の 1 番目のタンクの基本パーツを製作し、低電力試験まで行う予定である [34]。4 段目の加速管 DLS も詳細設計を進め、2021 年度中に完了する予定である [35]。

これまでに前例のない加速ミュオンビームを測定してビームライン機器を調整するためには、新規にミュオンビームモニターを開発する必要があった。MCP のミュオンならびにミュオン崩壊由来の陽電子バックグラウンドに対する応答を測定し [36]、MCP・蛍光板・CCD カメラを用いた低エネルギーミュオンビームプロファイルモニターを開発した [37,38]。

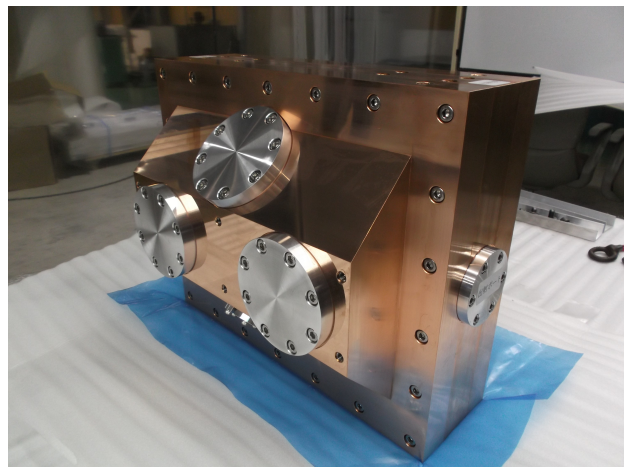


Figure 6: Photo of the IH-DTL proto-type.

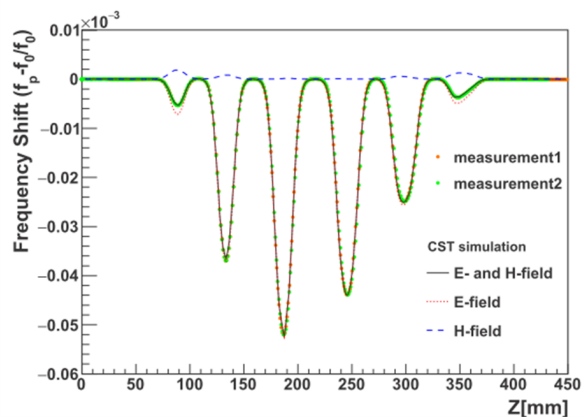


Figure 7: Frequency shift measured by bead-pull measurement [31]. The frequency shift is proportional to strength of the RF field on the bead position. Red and green points show the measured result and black line shows the simulation result.

さらに高時間分解能を有する信号処理回路と組み合わせたバンチ幅モニターを開発し [39]、実際の加速ミュオンビームを測定して予想通りのバンチ幅測定に成功した [40]。

4. まとめと展望

ミュオン異常磁気能率 $g_\mu - 2$ は素粒子標準模型による計算値と実験値との間に約 4.2 標準偏差の乖離があり、暗黒物質など標準模型の未解決問題を解決するうえで現在最も注目を浴びている。一方で、先行実験はエミッタンスの大きなミュオンビームを用いた単一手法による測定しかなく、まったく独立な手法による高精度測定での検証が切望されている。

J-PARC E34 実験は近年確立したミュオンの冷却・加速によって実現する低エミッタンスミュオンビームを用いて先行実験と全く異なる手法で $g_\mu - 2$ を測定する。実験のかなめの一つはこれまでに前例のな

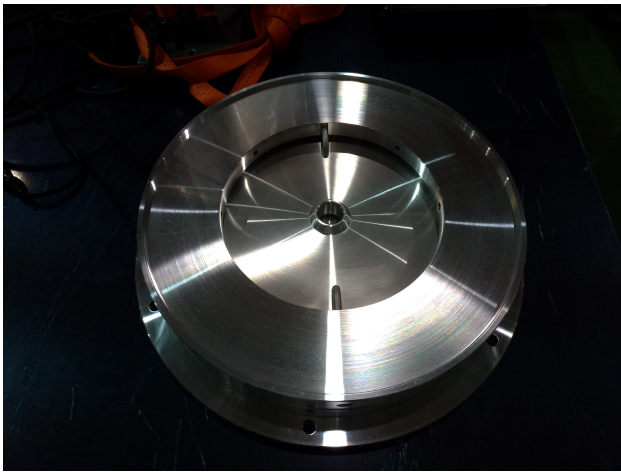


Figure 8: Photo of the DAW-CCL cold model.

いミュオンを超低速からほぼ光速度まで加速する線型加速器である。

我々はミュオン線型加速器初段の RFQ を用いて世界で初めてミュオンの高周波加速に成功し、実験実現に必要なミュオンの高周波加速スキームを実証した。さらに後段の加速空洞に関しても試作機製作を進め、2021 年度には 2 段目加速空洞 IH-DTL ならびに、DAW-CCL の前段部の実機を製作する予定である。加速器を含めた実験全体の予算を要求中で、予算開始後約 5 年で精度約 0.5ppm の $g_{\mu} - 2$ 測定を行う。

さらに、ミュオン加速器で得られたミュオンビームを用いて透過イメージングを行う検討も進んでいる [41]。現在行われている手法では宇宙線ミュオンの強度やエネルギーなどの不定性によって像がぼやけてしまうが、加速ミュオンビームを用いることでより高精度な透過イメージング画像を短時間で得ることができる。また、現行 40 メートルを要する加速器の小型化技術の検討も進んでおり [42]、近い将来、持ち運び可能なミュオン加速器で地球上のあらゆるものを透視する事ができるようになるかもしれない。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP25800164, JP15H03666, JP15H05742, JP16H03987, JP16J07784, JP18H03707, JP18H05226, JP18J22129, JP19J21763, JP20J21440, JP20H05625, JP21K18630 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Phys. Rev. Lett. **126** (2021) 14180.
- [2] Bennett G. W. *et al.* [Muon $g - 2$ Collaboration], Phys. Rev. D **73**, 072003 (2006).
- [3] T. Aoyama *et al.*, Phys. Rept. **887**, 1 (2020).
- [4] M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2019**, 053C02 (2019).
- [5] N. Kawamura *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 113G01 (2018).

- [6] Bakule P. *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2013**, 103C01 (2013).
- [7] G.A. Beer *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2014**, 091C01 (2014).
- [8] J Beare *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 123C01 (2020).
- [9] Y. Kondo *et al.*, Proceedings of IPAC 2018, 180 (2018).
- [10] M. Abe *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **890**, 51 (2018).
- [11] H. Iinuma *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **832**, 51 (2016).
- [12] T. Aoyagi *et al.*, JINST **15**, P04027 (2020).
- [13] T. Kishishita *et al.*, IEEE TNS, **67**, 2089 (2020).
- [14] Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. AB **16**, 040102 (2013).
- [15] M. Kubosaki *et al.*, Proceedings of PASJ 2011, 1366 (2011).
- [16] K. F. Canter, P. H. Lippel, W. S. Crane, and A. P. Mills Jr., in "Positron studies of solids, surfaces and atoms" (World Scientific, Singapore, 1986) p. 199.
- [17] M. Otani *et al.*, J. Phys. :Conf. Ser. **1067**, 052018 (2018).
- [18] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. AB **19**, 040101 (2016).
- [19] M. Otani *et al.*, J. Phys. :Conf. Ser. **1350**, 012097 (2019).
- [20] Y. Kondo *et al.*, J. Phys. :Conf. Ser. **875**, 012054 (2017).
- [21] H. Miyadera *et al.*, in proceedings of PAC 2007, 3032 (2007).
- [22] Y. Kuang *et al.*, Phys. Rev. A **39**, 6109 (1989).
- [23] D.R. Harshman *et al.*, Phys. Rev. Lett. **56**, 2850 (1986).
- [24] R. Kitamura *et al.*, Phys. Rev. AB **24**, 033403 (2021).
- [25] R. Kitamura *et al.*, Proceedings of PASJ 2017, 100 (2017).
- [26] Y. Kondo, K. Hasegawa, and A. Ueno, Proceedings of LINAC 2006, 749 (2006).
- [27] M. Otani *et al.*, Proceedings of PASJ 2018, 239 (2018).
- [28] 大谷将士、北村遼、近藤恭弘、高エネルギーニュース Vol.37 No.1 2018.
- [29] S. Bae *et al.*, Phys. Rev. AB **21**, 050101 (2018).
- [30] Y. Nakazawa *et al.*, J. Phys. :Conf. Ser. **1350**, 012054 (2019).
- [31] Peter A. McIntosh, Perturbation Measurements on RF Cavities at Daresbury.
- [32] Y. Nakazawa *et al.*, JPS Conf. Proc. , **33**, 011128 (2021).
- [33] Y. Takeuchi *et al.*, JPS Conf. Proc. , **33**, 011129 (2021).
- [34] 竹内 佑甫 他、「ミュオン線形加速器のための Disk-and-Washer 空洞の詳細設計」、第 18 回日本加速器学会年会論文集。
- [35] 鷺見 一路 他、「ミュオン加速用 L バンド円盤装荷型加速管の基礎設計」、第 18 回日本加速器学会年会論文集。
- [36] M. Otani *et al.*, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. Sec. A, **943**, 162475 (2019).
- [37] B. Kim *et al.*, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. Sec. A. **899**, 22 (2018).
- [38] M. Otani *et al.*, J. Phys. :Conf. Ser. **1067**, 052012 (2018).
- [39] M. Yotsuzuka *et al.*, JPS Conf. Proc. , **33**, 011040 (2021).
- [40] Y. Sue, M. Yotsuzuka *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **23**, 022804 (2020).
- [41] M. Otani *et al.*, in proceedings of IPAC 2021 (2021).
- [42] M. Otani *et al.*, Proceedings of PASJ 2020, 202 (2020).