

令和 2 年 6 月 27 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01133

研究課題名(和文)ミュオニウム超微細構造精密測定によるミュオン質量の精度向上と新物理探索

研究課題名(英文)Precise measurement of muonium HFS for new physics search hunting

研究代表者

下村 浩一郎 (Shimomura, Koichiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

研究者番号：60242103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はミュオニウムの基底状態の超微細構造の精密分光を行うことである。J-PARC 物質・生命科学実験施設で取りだされる世界最高強度のミュオンビームを用いて10数年前に行われた先行研究を200倍上回る統計量を蓄積し、ミュオンの質量と磁気モーメントをこれまでより一ケタ程度上回る精度で決定することを目指すことが最終目標である。本研究期間中にはゼロ磁場下での共鳴測定に成功し、様々な測定・解析手法を開発するとともに、同条件では世界最高精度を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の採取目標はミュオニウムの超微細構造とミュオン磁気モーメントを従来より10倍高い精度で測定することにより、束縛系量子電磁力学の最高精度検証、標準理論の重要な入力パラメタであるミュオンの質量の精度向上、ローレンツ対称性などの基礎的対称性の検証を目的としている。本期間内の研究活動によって、ゼロ磁場下での測定精度を従来の2倍まで改善することに成功し、来るJ-PARCミュオン施設のHライン完成時における高磁場実験のための基礎開発が終了した。

研究成果の概要(英文)：Muonium (Mu) is a hydrogen-like atom made of a positive muon and an electron. Unlike hydrogen or other ordinary atoms, there is no effect from internal structure of the nucleus in muonium. One can calculate muonium ground-state hyperfine structure (MuHFS) without considering such effect. These features make muonium one of the best probes to test the bound-state Quantum Electrodynamics (QED). We demonstrated the first measurement of muonium hyperfine structure interval in Kr gas. The measurement was conducted in a magnetic field of 100 nT. This is the first attempt to apply "old muonium" and "Rabi oscillation" methods for pulsed muon beam to reduce the statistical uncertainty. We obtained the value of the ground-state hyperfine structure interval of muonium as $\nu = 4\,463\,301.61 \pm 0.71$ kHz. Systematic uncertainty was evaluated to be 83 Hz. The uncertainty is two times better than the preceding zero-magnetic-field measurement.

研究分野：素粒子・原子核物理

キーワード：ミュオン ミュオニウム

1. 研究開始当初の背景

水素(様)原子の分光は量子力学の創生期から現在に至るまで、常に重要な役割を果たしてきた。水素原子のスペクトルにみられる単純な規則性はボーアの量子仮説を生み、スペクトルの中に見出された二重線が電子のスピンが存在とディラック方程式を導いた。ラムシフトは場の量子論による真空偏極の効果によって説明され、ラビらによる超微細構造(以下 HFS)の分光実験は電子が異常磁気モーメントをもつことを示した。水素(様)原子のスペクトルは QED によって非常に厳密に計算することができるため、水素(様)原子の精密分光は、束縛系 QED の精密検証や未知の相互作用・粒子の探索として用いることができる。ところが、水素原子のエネルギー準位の計算においては、有限の大きさを持つ陽子の内部構造の不確かさが理論計算の不確かさの支配項となってしまう。そのため、水素原子の精密分光は QED の検証や標準理論を超える新しい物理へのプローブとしての魅力に乏しい。

一方、水素原子の陽子を正ミュオンで置き換えた原子であるミュオニウムは図 1 に示すように水素原子と非常によく似たスペクトルをもつが、水素原子と異なりハドロン大きさや内部構造を考慮する必要がない。ミュオンの寿命が 2.2 μ 秒と比較的長いこともあって、その精密な分光は QED の精密検証等に最適な候補となる。本研究ではミュオニウム基底状態の超微細構造の

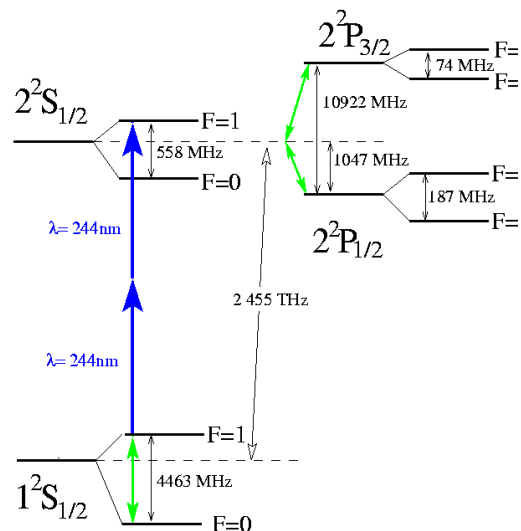


図 1 ミュオニウムのエネルギー準位

エネルギー差 ΔE_{HFS} (図 1 に示す $1S_{1/2}$ 状態が $F=0$ と $F=1$ に分裂している間隔) の精密測定を行い、超微細構造定数および、次世代のミュオン $g-2$ 測定に必須のミュオンの磁気モーメント ($\cdot \cdot$) (あるいはミュオンの質量) をこれまでより約一ケタ高い精度で決定する。

2. 研究の目的

本研究計画には、以下に示すような意義がある。

A) QED の精密検証およびミュオニック水素に現れる陽子半径異常への寄与

一般に「最も厳密に検証されている理論」と言われる QED であるが、いくつかの系において実験値と理論値にずれがあることが報告されている。その一つは負ミュオンと陽子の束縛系であるミュオニック水素のラムシフトの測定である。現時点で、実に約 7σ ものずれが実験値と理論値との間にあることが知られている。このずれが QED 計算における高次項の見落としによるものか、SUSY などの新粒子による寄与によるものか、あるいは実験の系統的な不確かさによるものか、というのは非常に興味深い問題である。ミュオニウムの基底状態の HFS 分光においては、実験値と理論値に大きなずれは報告されていないものの、上記の問題を踏まえ、この比較にはさらなる向上が求められている。現在実験値、理論値は各々

$$\Delta\nu(\text{exp}) = 4463302776(51) \text{ Hz}, \quad \Delta\nu(\text{theory}) = 4463302891(272) \text{ Hz}$$

であり、現状では理論値のほうが 5 倍以上悪い精度となっている。この際、理論値の不確かさの主要な原因はミュオンの質量の直接測定値(現在のところミュオニウムの超微細構造測定から最も正確に求められる)が、120ppb の精度であることによる。したがって本研究により、統計精度として約 1 桁向上させつつ、系統的な不確かさを 10ppb 程度に抑えることができれば、理

論的には予想されているが、実験的には確かめられていない、強い相互作用($\sim 230\text{Hz}$)および弱い相互作用($\sim 65\text{Hz}$)からの寄与を確認することが可能となる。また、ミュオニック水素のラムシフトの定量的理解に必要な陽子 Zemach 半径の高精度決定に寄与し、さらには、このラムシフト異常を説明するために提唱された新粒子(Massive Vector Boson)の最高精度の探索を可能とする。

B) ミュオン異常磁気能率測定実験の正しい解釈に必要なパラメータの決定

ミュオンの異常磁気能率 $g-2$ の測定実験は BNL において 90 年代後半から行われ、2006 年に発表された最終結果 (不確かさはおよそ 0.5ppm) において、標準理論による理論値から約 3σ ずれていることが報告され、未知の粒子による寄与によるものではないかとして大きな話題となっている。現在、この結果を追試するとともにさらに精度を上げた実験を行うべく、Fermi Lab. や J-PARC において新しい実験の準備が進行している。ここで重要な点は、 $g-2$ の測定実験においてはミュオンの磁気モーメントと陽子の磁気モーメントの比 (μ_μ/μ_p) を外部パラメータとして用いる必要がある、ということである。なぜなら $g-2$ の測定は均一磁場中の蓄積リングにミュオンを周回させてその中のミュオンのスピン歳差運動を測定することによって行われるが、この際、蓄積リング中の磁場の大きさを最も精度よく校正するために陽子 NMR を用いた磁気プローブを用いる必要があるからである。前に述べた通り、 μ_μ/μ_p の値は Liu らのミュオニウム ΔE_{HFS} 測定実験によって直接的に 120ppb の精度で、理論計算との比較によって間接的に 30ppb の精度で決められている (BNL における最終結果では後者を用いて計算している)。前項で述べた通り、束縛系 QED における理論計算と実験値との比較に万全の信頼をおくことに不安がある現状においては、本研究によって統計量を 200 倍にあげ、 μ_μ/μ_p と ΔE_{HFS} を「直接的に」これまでより約一ケタ高い精度で決定することは、 $g-2$ の測定結果を解釈し、次世代の実験の準備を推進するにあたって必須かつ急務である。本計画は J-PARC でのみ推進可能な研究であることから Fermi Lab の $g-2$ 実験グループからもその実現を強く望まれている。

C) ローレンツおよび CPT 対称性の破れの探索

いわゆる CPT 定理はローレンツ不変性と相互作用の局所性から一般的に導かれる。Kostelecky らは CPT 対称性を破る項をできるだけ一般的な形で標準理論のラグランジアンに付け加え、こうした項が存在したならばどのような観測量として表れるかを論じた。一般に CPT 対称性の破れに対して最も厳しい制限を与えていると言われるのは K_0 中間子の粒子と反粒子の質量差であるが、陽子や原子核の内部構造によらない系であるミュオニウムについて長期間にわたって高精度の測定実験を行うことにより、ローレンツ不変性の破れや物理定数の時間変化に対して大きな制限を与えることができる。

3. 研究の方法

ミュオニウムの基底状態は磁場中では、その縮退が解け、図 2 に示すような磁場依存性を示す。Liu らによる先行研究においては、一様な強磁場中に設置したガスチェンバー中にミュオンを照射しミュオニウムを作り、マイクロ波共鳴によって、 ν_{12} , ν_{34} の共鳴周波数を測定した。

高磁場下での測定では、 $\Delta E_{\text{HFS}} = \nu_{12} + \nu_{34}$ という関係が成り立つため、磁場の大きさの測定精度に関わりなく ΔE_{HFS} を求めることができるという利点がある。また、 ν_{12} , ν_{34} と外部磁場の正確な値 (誤差 10ppb 程度、この場合の μ_μ/μ_p への系統的不確かさの寄与は 5ppb) を用いて μ_μ/μ_p (m_μ/m_e) を同時に求められる。

先行研究では、同じ実験装置で ν_{12} , ν_{34} の両方が測定できるようにするため、RF キャビティ (円筒型) のサイズと磁場の強さは、それぞれの周波数に対して TM_{110} 、 TM_{210} モードが対応す

るように設定していた。本研究においても、まずは先行研究と同様の円筒キャビティを用いて測定を行う。このキャビティはすでに製作済であり、所定の仕様を達成していることは確認済である。また、共鳴線幅を狭めるための工夫として、ミュオンが入射し生成されたミュオニウムに RF を照射してから十分に時間が経ったミュオニウムからの信号だけを選んで観測する (old muonium 法) という手法を採用する。(最近になり後述するように時間微分法という新たな解析手法が我々のグループにより開発された。)

PSI 等の DC ビーム源では (先行研究と同様に) 1 つのミュオンが入射したのち、生成されたミュオニウムが崩壊するまで待つ必要があり、大強度のビームを有効に利用できない。J-PARC においてはビームの時間構造がパルス状であるため、大量のミュオニウムを短時間に生成し、それらの RF 共鳴信号をすべて有効に利用する。先行研究においては、実験の不確かさの最大要因が統計量 (約 10^{13} 個のミュオンを入射した)、次がキャビティ内にミュオンが止まる位置と其中での磁場の不均一性であった。まず、統計量について考え

る。現在 J-PARC ミュオン施設で建設が進められている H ラインを用いた場合、1MW 時には毎秒 1×10^8 個もの表面ミュオンを引き出すことが可能である。このビームラインを用いて 100 日程度の測定を行えば、統計量で 100 倍 (統計精度で 10 倍) の向上を目指すことが可能である。これが先行研究を大きく統計的に上回る実験を可能とする理由である。また後述するように系統誤差低減のための開発もほぼ終了している。

さらに先行研究においては、RF 磁場の空間分布を考慮していないなど、従来見逃されていた系統的な不確かさの要因が含まれている可能性もあり、我々のコラボレーションでは新たに系統的な不確かさを評価するシミュレータを開発し、これらの評価を進めている。

本研究を実現するためには高度にセグメント化された陽電子検出器が必要となるが、これについては後述する。検出器はミュオニウムの崩壊数のみならずおよそその崩壊位置を再構成する能力を有し位置情報を用いた解析により静磁場や RF 磁場、ミュオン静止位置分布の分布が共鳴曲線に与える影響を抑えることができる。これは検出器の細分化を行わなかった先行研究では不可能であった解析であり、系統的な不確かさの理解および低減に大きな寄与がある。

なお本研究期間内では残念ながら、H ラインは完成されていなかったため、実験を既存の D ラインを用いてゼロ磁場環境下でおこなわれた。

4. 研究成果

・RF キャビティの大型化およびこれを低圧下での用いた測定

RF 共鳴装置については、理化学研究所加速器グループ、高エネ研加速器グループの協力を得て、極小磁場での共鳴装置を大型化した。この大型共振器を用いるとともに、ミュオンビームの強度ドリフトから来る測定の不確かさを抑制するためパルス毎の RF スwitching を実装した。これにより新ビームラインにおける長期間のデータ取得に更に適したデータ取得系を構築できた。

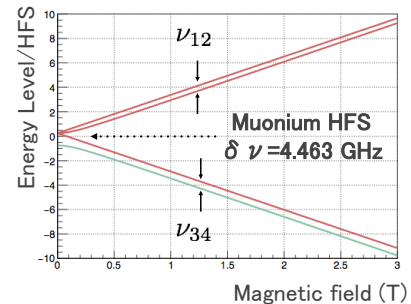


図2 ミュオニウム基底状態の磁場中でのエネルギー準位

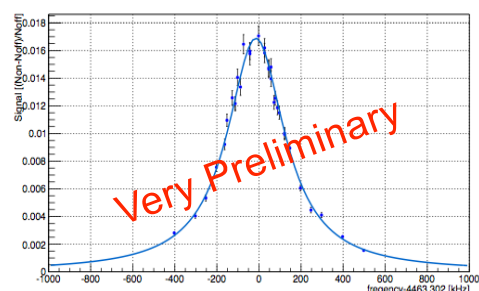


図3 0.7 atm における共鳴信号

またガス装置については、従来のオフラインでの分光開始前あるいは終了後の質量分析機による不純物測定で不純物を十分抑制したガス系の構築が可能であることを確認したが、今年度はさらにオンラインで分光実験中も不純物測定が可能であるよう実験系の改良に着手した。

これらの大型 RF 共振器およびガス系を用いて従来よりも更に低い Kr ガス圧(0.3-0.7 atm)での測定に成功した(図3)。ガスの衝突に伴う不確かさは高磁場における実験で最も大きな系統的な不確かさを及ぼしうるものであったが、今回と同様のガス圧で測定を行うことで不確かさを2倍程度抑制し、1 Hz 程度に抑えることが可能であることを示す結果となった。

・時間微分 (Rabi Oscillation) 法の開発

さらなる測定精度向上を目指して、新解析手法の開発を行っている。従来の解析ではマイクロ波周波数を掃引して、全陽電子数の変化から共鳴曲線を得て、そのピーク中心周波数から HFS 遷移周波数を決定する。この方法を時間積分法と呼ぶ。一方で、新解析手法である時間微分法では、共鳴信号の時間発展から直接 HFS 遷移周波数を決定する。そのため、マイクロ波周波数掃引の必要がなく、単独のマイクロ波周波数測定で HFS を決定でき、マイクロ波キャビティの周波数特性の影響を受けない。また、積分により失われていたマイクロ波強度やスピン緩和の情報なども同時に得られ、系統的、統計的不確かさを同時に改善できる優れた方法である。しかし、これまでの研究では開発が不十分であり、新規に開発する必要があった。

まず、シミュレーションベースでの開発を行った。シミュレーションにより得られたマイクロ波強度分布とミュオンの静止位置分布から得られる共鳴信号を見積り、時間積分法と時間微分法による解析を行って得られる精度を比較した。その結果、時間微分法を利用すると最も有感なマイクロ波周波数に測定を特化でき、時間積分法に比べて統計的不確かさを 3.2 倍改善できることが分かった。

次に、実験データに対して時間微分法を適用して解析を行った。実験で得られた共鳴信号の時間発展を図4に示す。複数のマイクロ波周波数のデータに対して時間微分法が実際に適用でき、それぞれで HFS が得られた。さらに、複数のマイクロ波周波数測定結果を統合する方法を開発した(図5)。特に2017年後期の測定では、大型キャビティを用いた最初の測定であったため、マイクロ波キャビティの周波数特性が極めて大きく、時間積分法での解析も試みたが HFS を決定することができなかった。それでも時間微分法で HFS を決定でき、時間微分法が極めて有効であることが分かった。

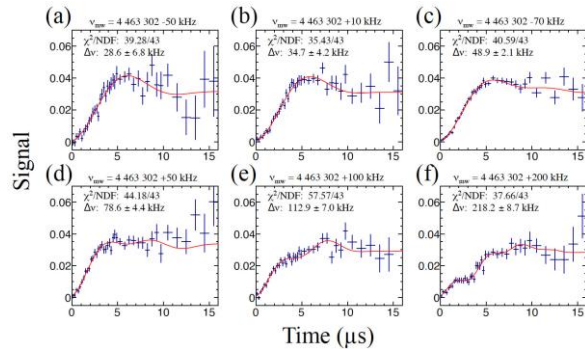


図4 実験データでの時間微分法解析の代表的な結果。赤線はフィット結果

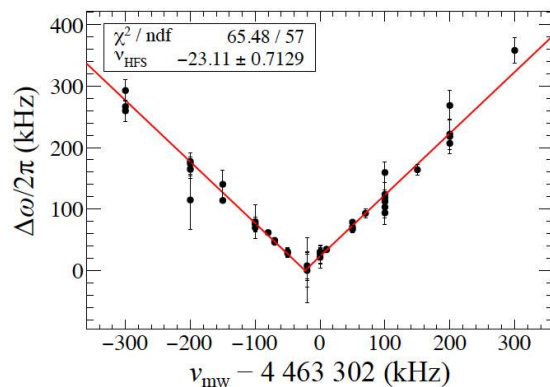


図5 複数のマイクロ波周波数測定を統合した結果。赤線はフィット結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 T. Aoyagi, Y. Honda, H. Iked, M. Ikeno, K. Kawagoe, T. Kohriki, T. Kume, T. Mibe, K. Namba, S. Nishimura, N. Saito, O. Sasaki, N. Sato, Y. Sato, H. Sendai, K. Shimomura, S. Shirabe, M. Shoji, T. Suda, T. Suehara, T. Takatomi, M. Tanaka, J. Tojo, K. Tsukada, T. Uchida, T. Ushizawa, H. Wauke, T. Yamanaka, T. Yoshioka	4. 巻 15
2. 論文標題 Performance evaluation of a silicon strip detector for positrons/electrons from a pulsed a muon beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P04027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/04/P04027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Alexander Keshavarzi, Daisuke Nomura, Thomas Teubner	4. 巻 101
2. 論文標題 g-2 of charged leptons, $\alpha(M^2_Z)$, and the hyperfine splitting of muonium	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 014029-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.014029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 P. Strasser et al.	4. 巻 198
2. 論文標題 New precise measurements of muonium hyperfine structure at J-PARC MUSE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences 198, 00003 (2019)	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/epjconf/201919800003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Alexander Keshavarzi, Daisuke Nomura, Thomas Teubner	4. 巻 97
2. 論文標題 Muon g 2 and alpha: A new data based analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.114025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Diogo Boito, Maarten Golterman, Alexander Keshavarzi, Kim Maltman, Daisuke Nomura, Santiago Peris, Thomas Teubner	4. 巻 98
2. 論文標題 Strong coupling from $e^+ e^- > \text{hadrons below charm}$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 74030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.074030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 P. Strasser, K. Shimomura, and H. A. Torii	4. 巻 21
2. 論文標題 Possibility of New Precise Measurements of Muonic Helium Atom HFS at J-PARC MUSE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011045(1-6).
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.21.011045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計51件 (うち招待講演 21件 / うち国際学会 30件)

1. 発表者名 下村浩一郎
2. 発表標題 Present status of muonium hyperfine splitting in J-PARC
3. 学会等名 International Conference on Precision Physics and Fundamental Physical Constants (FFK2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下村浩一郎
2. 発表標題 MuSEUM
3. 学会等名 Third Plenary Workshop of the Muon g-2 Theory Initiative (INT Workshop INT-19-74W) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下村浩一郎
2. 発表標題 ミューオン崩壊における時間反転対称性の破れを探索する新たな実験の提案
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下村浩一郎
2. 発表標題 Muon pair production from ILC
3. 学会等名 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村大輔
2. 発表標題 Status of Standard Model Prediction for Muon g-2
3. 学会等名 The 21st International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFACT 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村大輔
2. 発表標題 Measuring both T-violation and Majoranality of neutrinos in muon decays
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村昇一郎
2. 発表標題 J-PARCミュオニウム超微細構造測定の実験状況
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村昇一郎
2. 発表標題 Muonium Hyperfine Structure Measurement in a Zero/High Magnetic Field at J-PARC
3. 学会等名 J-PARC symposium 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村昇一郎
2. 発表標題 Muon Spin Resonance Experiment in the High Magnetic Field at J-PARC
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (MRM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野恭裕
2. 発表標題 Spectroscopy of Muonium Hyperfine Structure at J-PARC
3. 学会等名 The 21st Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬尾俊
2. 発表標題 クリプトンヘリウム混合気体中におけるミュオニウム超微細構造の精密分光
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬尾俊
2. 発表標題 Precise measurement of muonium hyperfine structure using Kr-He mixture gas
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬尾俊
2. 発表標題 Precise spectroscopy of muonium hyperfine structure using Kr-He mixture gas
3. 学会等名 Physics of fundamental Symmetries and Interactions - PSI2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬尾俊
2. 発表標題 Precise spectroscopy of muonium hyperfine structure using Kr-He mixture gas
3. 学会等名 The 12th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬尾俊
2. 発表標題 クリプトンヘリウム混合気体中におけるミュオニウム超微細構造の精密分光
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 多田紘規
2. 発表標題 高磁場におけるミュオニウム超微細構造測定のための時間微分法開発
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中陶冶
2. 発表標題 High precision measurement of muonium hyperfine structure
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation (CLFV2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中陶冶
2. 発表標題 Spectroscopy of muonium hyperfine structure
3. 学会等名 Workshop "New Developments of Muon Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中陶冶
2. 発表標題 高磁場におけるミュオニウム超微細構造測定に向けた磁場測定器開発
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中陶冶
2. 発表標題 Development of magnetic field measurement system for muonium hyperfine structure spectroscopy with high magnetic field
3. 学会等名 J-PARC symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福村省三
2. 発表標題 J-PARCでの高磁場ミュオニウム超微細構造の精密分光に向けた前置検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福村省三
2. 発表標題 Development of forward detector for measurement of muonium hyperfine structure in high magnetic field at J-PARC
3. 学会等名 J-PARC symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福村省三
2. 発表標題 高磁場下におけるミュオニウム超微細構造精密測定に向けた前置検出器開発
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿部充志, 佐々木憲一, 山口博史, 荻津透, 下村浩一郎, 三部勉, 齊藤直人, 田中陶冶, 大金千織, 齋藤真慶, 杉田萌, 楊井京輔, 飯沼裕美
2. 発表標題 MRI磁石を用いた超高均一度シミングの可能性検討
3. 学会等名 第98回低温工学会・超伝導学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mitsushi Abe, Ken-ichi Sasaki, Hiroshi Yamaguchi, Toru Ogitsu, Koichiro Shimomura, Tsutomu Mibe, Naohito Saito, Chiori Ohgane, Moe Sugita, Kyosuke Yanai, Hiromi Iinuma, Masayoshi Saito, Toya Tanaka
2. 発表標題 Discussions on a shimming strategy to obtain very homogeneous magnetic fields using shimming calculation based on TSVD
3. 学会等名 The 10th ACASC/ 2nd Asian-ICMC/ CSSJ Joint Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koichiro Shimomura
2. 発表標題 Auxiliary measurements, esp. $\mu\mu\mu/\mu p$ in Muonium; MuSEUM experiment
3. 学会等名 The 15th International Workshop on TauLepton Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichiro Shimomura
2. 発表標題 Measurement of hyperfine splitting of muonium at J-PARC
3. 学会等名 第5回日米物理学会合同核物理分科会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichiro Shimomura
2. 発表標題 Muonium HFS measurement; Past, Present, Future
3. 学会等名 Physics of muonium and related topics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下村浩一郎
2. 発表標題 ILCによるミュオン生成とその利用
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鳥居寛之
2. 発表標題 スピン共鳴信号の時間微分解析によるミュオニウム原子高精度分光
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳥居寛之
2. 発表標題 従来精度を打ち破るミュオニウム超微細構造のマイクロ波分光
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Strasser Patrick
2. 発表標題 New precise measurements of muonium hyperfine structure at J-PARC MUSE
3. 学会等名 Quantum Technology International Conference(QTech2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sohtaro Kanda
2. 発表標題 Precision spectroscopy of exotic atoms involving muon
3. 学会等名 The 20th International Workshop on Neutrinos (NuFact2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sohtaro Kanda
2. 発表標題 Precision Spectroscopy of Muonic Systems with High-intensity Pulsed Muon Beam
3. 学会等名 Global Developments of Researches in Lepton Flavor Physics with Muons (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Ueno
2. 発表標題 New Precision Measurement of Muonium Hyperfine Structure
3. 学会等名 International Conference on High Energy Physics (ICHEP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Nomura
2. 発表標題 Standard Model prediction for the muon $g - 2$
3. 学会等名 The 20th International Workshop on Neutrinos (NuFact2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Nomura
2. 発表標題 Muon $g - 2$: a new data based analysis
3. 学会等名 2018 WPI next mini workshop 'Hints for New Physics in Heavy Flavors' (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Nomura
2. 発表標題 Muon $g - 2$: a new data based analysis
3. 学会等名 international worksop " $e^+ e^-$ Collisions From Phi to Psi 2019 (Phipsi19) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村大輔
2. 発表標題 ミュオン異常磁気能率に対する標準理論計算:最近の進展
3. 学会等名 日本物理学会 第 74 回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村大輔
2. 発表標題 muon g-2 の理論
3. 学会等名 Flavor Physics Workshop 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shun Seo
2. 発表標題 Precise spectroscopy of muonium hyperfine structure at J-PARC
3. 学会等名 7th Symposium on Symmetries in Subatomic Physics (SSP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬尾俊
2. 発表標題 高磁場におけるミュオニウム超微細構造精密測定
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shoichiro Nishimura
2. 発表標題 Precision measurement of muonium hyperfine structure at J-PARC
3. 学会等名 NITHEP2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shoichiro Nishimura
2. 発表標題 Muonium Hyperfine Structure Measurement at J-PARC
3. 学会等名 FPUA2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村昇一郎
2. 発表標題 ミュオニウム超微細構造精密測定実験の進展
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村昇一郎
2. 発表標題 時間微分法で迫るMu HFS精密測定
3. 学会等名 ミュオン科学と加速器研究
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.Shimomura
2. 発表標題 Precise Measurement of Muonium Hyperfine Structure
3. 学会等名 International Workshop on Fundamental Physics using Neutron and Atoms (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 瀬尾俊
2. 発表標題 1.7T磁場下でのミュオニウム超微細構造精密測定に向けた磁場プローブ開発
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shun Seo
2. 発表標題 Precision measurement of muonium hyperfine structure at J-PARC
3. 学会等名 The 19th International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NUFACT2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 瀬尾俊
2. 発表標題 ミュオニウム超微細構造精密測定における磁場由来の系統的不確かさの評価
3. 学会等名 量子ビームサイエンスフェスタ2017
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬尾俊
2. 発表標題 ミュオニウム超微細構造精密測定に向けた磁場プローブのクロスキャリブレーション
3. 学会等名 日本物理学会2018年年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://msl-www.kek.jp/MuonScience-G/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	鳥養 映子 (TORIKAI EIKO) (20188832)	山梨大学・その他部局等・客員教授 (13501)	
研究分担者	福山 武志 (FUKUYAMA TAKESHI) (40167622)	大阪大学・核物理研究センター・協同研究員 (14401)	
研究分担者	三部 勉 (MIBE TSUTOMU) (80536938)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授 (82118)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	野村 大輔 (NOMURA DAISUKE) (40583555)	香川高等専門学校・一般教育科（詫間キャンパス）・その他 (56203)	削除：平成29年7月7日