

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247046

研究課題名(和文)大強度パルスミュオンビームで可能となるミュオニウム超微細構造の精密分光

研究課題名(英文)Precision Measurement of Muonium Hyperfine Structure in J-PARC

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・准教授

研究者番号：60242103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最も単純な2体束縛系であるミュオニウムのミュオニウムの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(あるいはミュオンの質量)を約一ケタ高い精度で決定する。この結果を利用して標準理論(主に束縛系QED)の精密検証をおこない、合わせて、様々な実験・理論モデルとの突合せをおこなうことでミュオニック水素のラムシフトの異常を説明するために提唱された新粒子の探索、あるいはローレンツ対称性の破れの探索などを行う。2016年度には、世界で初となるパルスミュオンを用いた、ミュオニウムの共鳴測定に成功した。

研究成果の概要(英文)：At the Muon Science Facility (MUSE) of J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), the MuSEUM collaboration is planning new measurements of the ground state hyperfine structure (HFS) of muonium both at zero field and at high magnetic field. The previous measurements were performed both at LAMPF (Los Alamos Meson Physics Facility) with experimental uncertainties mostly dominated by statistical errors. The new high intensity muon beam that will soon be available at MUSE H-Line will provide an opportunity to improve the precision of these measurements by one order of magnitude. In FY 2016, we succeeded to observe the resonance of muonium hyperfine structure at zero field.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ミュオン ミュオニウム 超微細構造 精密磁場

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、常に物理学の進展において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の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。近年の原子トラップ技術、原子メーザー技術、レーザー技術の進展によって、水素原子の分光は非常に高精度で行うことが可能となっており、例えば 1S-2S 準位間の分光は 0.013ppt の精度に、基底状態の超微細構造の分光は 0.6ppt の精度にまで達している。

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、逆に水素(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荷電の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 $2.2\mu\text{s}$ と比較的長いこともあって、QED の検証や標準理論を超える新しい物理のプローブとして魅力的な候補となる。本研究ではミュオニウムの基底状態の超微細構造のエネルギー差 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) の精密分光実験を行う。1999 年に Liu らは強磁場中で縮退が解かれた基底状態の遷移間の準位を高精度で測定することによって 12ppb の不確かさで ΔE_{HFS} を、120ppb の不確かさで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) を直接測定した。CODATA2006 においては μ_{μ}/μ_p と m_{μ}/m_e (ミュオンの質量と電子の質量の比) は 30ppb の精度で与えられているが、

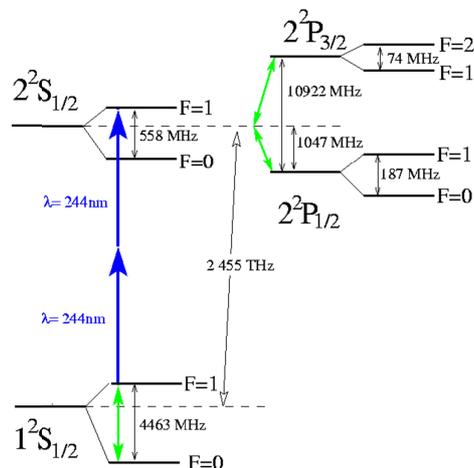


図 1 ミュオニウムのエネルギー準位

これは Liu らの測定結果を他の実験結果を用いた理論計算と比較することで求められたものであり、その精度は現在も Liu らの実験結果が決めている。

ここに提案する研究計画において、改めて ΔE_{HFS} を測定し、その不確かさを Liu らによる先行研究から一桁程度向上させることには以下に示すような意義がある。

(1) QED の精密検証

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。その一つは水素原子とポジトロニウム (e^+e^-) の基底状態の HFS 分光であり、もう一つはミュオンの異常磁気能率 $g-2$ である。

本研究開始時点で、水素(様)原子の HFS について、水素原子の基底状態においては約 3σ 、ポジトロニウム (e^+e^-) の基底状態においては約 4σ 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た。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誤差によるものか、というのは非常に興味深い問題であり、本計画開始時には、ポジトロニウムの新しい HFS 分光実験の結果に非常に大きな関心がよせられていた。一方で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。例えば先行研究である Liu らの測定結果を用いて微細構造定数 α を計算した値は CODATA2006 で与えられている値と矛盾しない値となる。しかし、Liu らの測定から求めた α の不確かさは

約 0.04ppm であるのに対し、電子のトラップ実験からは 0.001ppm の不確かさで求められており、ミュオニウムの HFS 分光にさらなる測定精度向上の余地があることが分かる。もし、水素原子やポジトロニウムに見られるずれが「本物」であれば、ミュオニウムについても何らかのずれが現れるはずであり、第 2 世代の素粒子を含むミュオニウムの精密分光実験には大きな意味がある。

(2) 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 らはこの 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、ローレンツ不変性の破れが空間の等方性の破れとなって現れた場合には、原子のエネルギー準位間隔の時間変化として検出することが可能である。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って、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) 蓄積リングを用いたミュオンの異常磁気能率測定実験との相補的役割

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、QED 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計画が立案されつつある。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。 $g-2$ 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

のミュオニウムの 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 400 倍にあげ、 μ_μ/μ_p と ΔE_{HFS} を「直接的に」これまでより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、次世代の計画を立案するにあたって必須かつ急務である。

2. 研究の目的

本研究の目的はミュオニウム原子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 400 倍上回る統計量を蓄積し、QED の精密検証、ローレンツ対称性の破れの探索を行うとともに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上回る精度で決定することを目指す。

3. 研究の方法

ミュオニウムの基底状態は磁場中でその縮退が解け、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ャ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、図に示す ν_{12}, ν_{34} の共鳴周波数を測定した。

本研究においても同じ手法を踏襲する。この手法には、 $\Delta E_{\text{HFS}} = \nu_{12} + \nu_{34}$ という関係が成り立つため、ゼロ次においては、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、ミュオンをガス中に止めてミュオニウムを生成する際、強磁場中であればその偏極が失われないため、信号が大きくなることも利点である。

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 $\text{TM}_{110}, \text{TM}_{210}$ モードが対応するように設定する。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た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。このため、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。

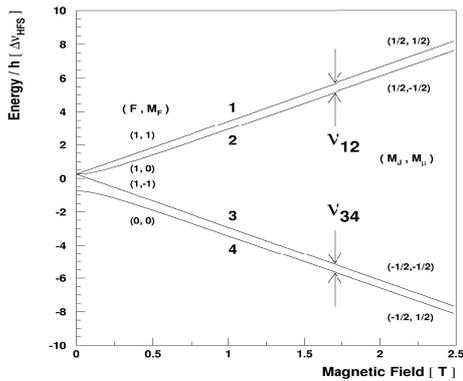


図2 ミュオニウム基底状態の磁場中でのエネルギー準位

J-PARC においては始めからパルス構造を持つため、大量のミュオニウムを一気に作り、それらの RF 共鳴信号をすべて有効に利用することが可能である。これが先行研究を大きく統計的に上回る実験が可能である理由である。これ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。

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そこ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 ミュオン施設で開発が進められている H ラインを用いた場合、1MW 時には毎秒 2×10^8 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 200 日程度の測定を行えば、統計量で 400 倍（統計誤差で 20 倍）の精度向上を目指すことが本研究の最終目標となる。

4. 研究成果

本研究費により以下の開発を行い、**平成 28 年 6 月にパルスミュオンビームを用いて初めてゼロ磁場下でのミュオニウムの共鳴信号を観測することに成功した。**

(1) 高精度超伝導マグネットの磁場一様性の確認・精密磁場測定

・精密磁場測定のためのデジタル式 NMR 測定装置を開発し、従来の方式が 160ppb 程度の精度しかなかったことに比較して約 200 倍高い精度(0.88ppb)を達成した。(図 3)

・広い領域（直径 20cm, 長さ 30cm）で一様磁場条件（1ppm 以下）を達成するために独自に開発したシミング評価プログラムを用いて、実機の調整を行い、所定の条件を達成した。(図 4)

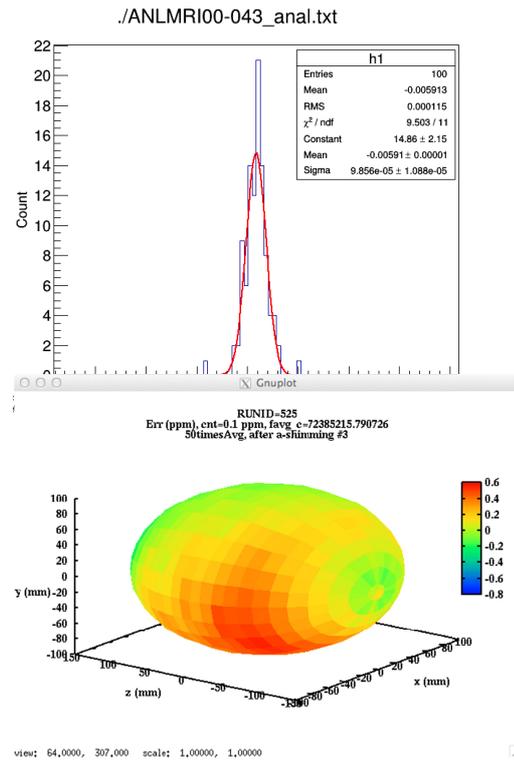


図4 シミング後の磁場

(2) 検出系・系統誤差

・本研究ではピクセル状にセグメント化したプラスチックシンチレータと MPPC とを用いて検出器を開発し、ビーム試験を終了した。
・オンライン 2 次元モニターおよびオフライン 3 次元モニターを各々開発し、測定精度が 1mm 以内であることを確認した。

・実験における系統誤差は、GEANT4 を用いたモンテカルロシミュレーション・ツールを開発し、不定性を高速に評価するためのイベント・ジェネレータを構築した。

(3) ゼロ磁場実験用磁気シールドの開発

・ゼロ磁場実験のための磁気シールドを開発し、フラックスゲートを用いた磁場マッピング測定装置でミュオニウム生成領域において 100nT 以下であることを確認した。

(4) ゼロ磁場実験の実施と共鳴観測の成功

・上記の超伝導マグネット以外の装置を組み上げ、既設の D ラインで、6 時間の測定ではあったが共鳴信号を観測することに成功した。(図 5,6,7)

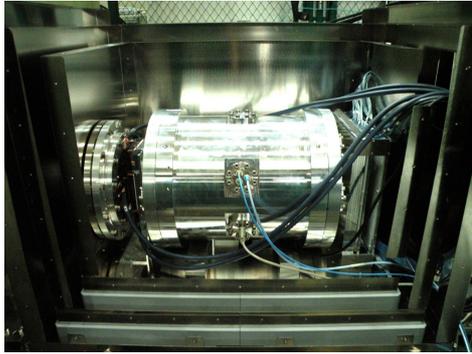


図5 組み上げられた装置

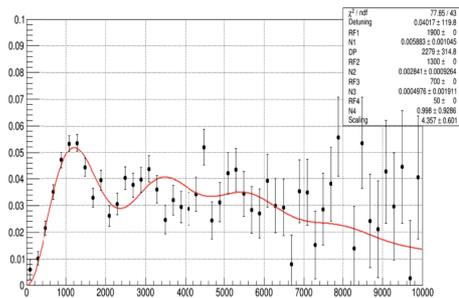


図6 RF周波数4463.3 MHzにおける
ミュオニウム共鳴時間スペクトラム

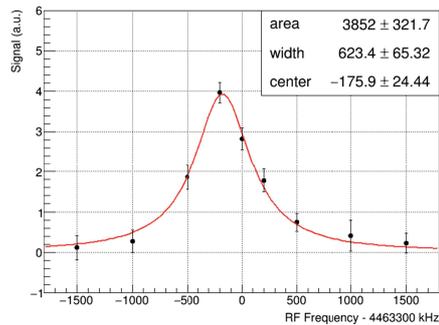


図7 J-PARCにおいて測定されたゼロ
磁場下でのミュオニウム共鳴曲線

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5件)

Y. Ueno, M. Aoki, Y. Fukao, Y. Higashi, T. Higuchi, H. Iinuma, Y. Ikedo, K. Ishida, T. U. Ito, M. Iwasaki, R. Kadono, O. Kamigaito, S. Kanda, D. Kawall, N. Kawamura, A. Koda, K. M. Kojima, M. K. Kubo, Y. Matsuda, T. Mibe, Y. Miyake, T. Mizutani, K. Nagamine, K. Nishiyama, T. Ogitsu, R. Okubo, N. Saito, K. Sasaki, K. Shimomura, P. Strasser, M. Sugano, M. Tajima, K. S.

Tanaka, D. Tomono, H. A. Torii, E. Torikai, A. Toyoda, K. Ueno, A. Yamamoto, and M. Yoshida, “New precise measurement of muonium hyperfine structure interval at J-PARC”, *Hyperfine Interact.*, Vol.238, 2016, pp.14(1-6).

<http://dx.doi.org/10.1007/s10751-016-1381-7>

P. Strasser, M. Aoki, Y. Fukao, Y. Higashi, T. Higuchi, H. Iinuma, Y. Ikedo, K. Ishida, T. U. Ito, M. Iwasaki, R. Kadono, O. Kamigaito, S. Kanda, D. Kawall, N. Kawamura, A. Koda, K. M. Kojima, K. Kubo, Y. Matsuda, Y. Matsudate, T. Mibe, Y. Miyake, T. Mizutani, K. Nagamine, S. Nishimura, K. Nishiyama, T. Ogitsu, R. Okubo, N. Saito, K. Sasaki, S. Seo, K. Shimomura, M. Sugano, M. Tajima, K. S. Tanaka, T. Tanaka, D. Tomono, H. A. Torii, E. Torikai, A. Toyoda, K. Ueno, Y. Ueno, D. Yagi, A. Yamamoto, and M. Yoshida, “New muonium HFS measurements at J-PARC/MUSE”, *Hyperfine Interact.*, Vol.237, 2016, pp.124(1-9).

<http://dx.doi.org/10.1007/s10751-016-1331-4>

S. Kanda, M. Aoki, Y. Fukao, Y. Higashi, T. Higuchi, H. Iinuma, Y. Ikedo, K. Ishida, M. Iwasaki, R. Kadono, O. Kamigaito, D. Kawall, N. Kawamura, A. Koda, K. M. Kojima, K. Kubo, Y. Matsuda, T. Mibe, Y. Miyake, T. Mizutani, K. Nagamine, K. Nishiyama, T. Ogitsu, R. Okubo, N. Saito, K. Sasaki, K. Shimomura, P. Strasser, M. Sugano, M. Tajima, K. S. Tanaka, D. Tomono, H. A. Torii, E. Torikai, A. Toyoda, K. Ueno, Y. Ueno, M. Yoshida, and A. Yamamoto, “Precision Measurement of Muonium Hyperfine Splitting at J-PARC and Integrated Detector System for High-Intensity Pulsed Muon Beam Experiment”, *JPS Conf. Proc.*, Vol.8, 2015, pp.025006(1-6).

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.8.025006>

K. Shimomura, “Muonium in J-PARC; from fundamental to application”, *Hyperfine Interact.*, Vol.233, No.1, 2015, pp.89-95.

<http://dx.doi.org/10.1007/s10751-015-1159-3>

K. S. Tanaka, M. Aoki, H. Iinuma, Y. Ikedo, K. Ishida, M. Iwasaki, Y. Ueno,

R. Ohkubo, T. Ogitsu, R. Kadono, O. Kamigaito, N. Kawamura, D. Kawai, S. Kanda, K. Kubo, T. Kume, A. Koda, K. M. Kojima, N. Saito, N. Sakamoto, K. Sasaki, K. Shimomura, M. Sugano, D. Tomono, A. Toyoda, H. A. Torii, E. Torikai, K. Nagamine, K. Nishiyama, P. Strasser, Y. Fukao, Y. Fujiwara, Y. Matsuda, T. Mibe, Y. Miyake, and M. Yoshida, "Measurement of Muonium Hyperfine Splitting at J-PARC", JPS Conf. Proc., Vol. 2, 2014, pp.010405(1-6).
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.2.010405>

〔学会発表〕(計 4件)

Y.Ueno, 22nd International Spin Symposium, 2016/9/27 "Precise Measurement of Muonium HFS at J-PARC MUSE"
Urbana-Champaign (USA) (招待講演)

S. Kanda, INPC2016, 2016/9/11-16, "Direct measurement of muonium hyperfine splitting at J-PARC", Adelaide (Australia)

S. Kanda, High Sensitivity Experiments Beyond the Standard Model, 2016/7/31-2016/8/6, "Precision Microwave Spectroscopy of Muonium Hyperfine Splitting at J-PARC", Quy Nhon (Vietnam)

Y.Ueno, Symmetries in Subatomic physics 2015, 2015/6/9 "Status of Precise Hyperfine Spectroscopy at J-PARC" Victoria (Canada)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)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・准教授
研究者番号: 60242103

(2)研究分担者

該当者なし

(3)連携研究者

松田 恭幸 (MATSUDA, Yasuyuki)
東京大学・総合文化研究科・准教授
研究者番号: 70321817

鳥居 寛之 (TORII, Horoyuki)
東京大学・総合文化研究科・助教
研究者番号: 20302838

佐々木 賢一 (SASAKI, Kenichi)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター
・准教授
研究者番号: 70322831

三部 勉 (MIBE, Tsutomu)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・地球物質科学研究センター
・准教授
研究者番号: 80536938

豊田 晃久 (Toyoda, Akihisa)
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・助教
研究者番号: 20373186

河村 成肇 (Kawamura, Naritoshi)
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・特別准教授
研究者番号: 60311338

(4)研究協力者

該当者なし