

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23244046

研究課題名(和文)ミュオニウム基底状態の超微細構造分光

研究課題名(英文) Measurement of hyperfine splitting of the ground state of muonium atom

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,200,000円、(間接経費) 11,160,000円

研究成果の概要(和文)：ミュオニウム原子は水素原子の陽子を正電荷のミュオンで置き換えた原子であるが、水素原子と異なり陽子の大きさや内部構造を考慮する必要がないことから、QEDの検証や標準理論を超える新しい物理の探索のための強力なプローブとして用いることができる。ミュオニウム原子の超微細構造をこれまでより1ケタ上回る精度で測定する新たな実験をJ-PARC MLFで行うために、新たに2つの共鳴周波数を持ち、独立にチューンすることができるRF共鳴空洞、不純物濃度を1ppm以下の高純度のKrガスを3カ月にわたって保持できるガスチェンバー、1Tの磁場中で動作し高計数率に耐えられる陽電子検出器等の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Muonium atom is a unique probe to verify the consistency of the standard model in very high precision and/or to investigate new physics beyond the standard model, because it is made of only leptons which do not have internal structures. We aim to realize a new experiment which aims to improve the accuracy of the measurement of hyperfine splitting of the ground state of muonium atom by an order of magnitude at J-PARC MLF. We have developed a RF cavity which has two resonance frequencies which can be independently tuned with two tuning bars, a gas chamber which holds Kr gas for three months with less than 1 ppm impurity, positron detectors which can cope with high counting rate under 1T magnetic field, and a NMR system which can measure magnetic field with accuracy better than 1ppm.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子(実験) ミュオン ミュオニウム 超微細構造 マイクロ波分光

### 1. 研究開始当初の背景

いわゆる素粒子の標準理論は現時点までに行われた素粒子物理学実験の実験結果のほとんど全てを高い精度で矛盾なく説明できる非常に成功している理論体系である。その一方で、自然の真の姿は標準理論の枠組みを超えたところにあると信じる強い理由があり、超対称性粒子や暗黒物質などの標準理論を越えた新しい物理現象の探索と理解は現代の物理学の大きな課題となっている。

ミュオニウム原子は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が、そのエネルギー準位を計算する際には、水素原子と異なり、陽子の大きさや内部構造を考慮する必要がないため、標準理論の検証や未知の相互作用・粒子の探索に非常に適した実験系であると言える。

ミュオニウムと同じくレプトンの束縛系であるポジトロニウム原子の基底状態の超微細構造については標準理論による予言値から約 4 ずれていることが報告されており、標準理論の破れによるものではないかと注目されている。現在、東京大学の難波、浅井らが新しい手法を用いた測定実験を進めており、その結果が注目される。もし、このずれが単なる測定における誤りでないならば、同様のレプトン束縛系であるミュオニウムの基底状態の超微細構造においても標準理論からのズレが現れることが期待される。

また、ミュオンについては 2006 年に最終結果が発表された BNL E821 実験においてその異常磁気モーメントの値が標準理論による予言値から約 3 ずれていることが報告されており、こちらも大きな話題になっている。ここで重要な点はこの測定結果を得るために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をパラメータとして用いる必要があることであり、この比の値は別途ミュオニウムの基底状態の超微細構造の分光実験から求めなくてはならないことである。現在、J-PARC と米国フェルミ国立研究所において新たな異常磁気モーメント測定計画が立案段階にあり、ミュオンと陽子の磁気モーメント比を精度よく求めることは急務といえる。

このようにミュオニウムの基底状態の超微細構造の分光実験は基礎物理学において非常に重要な意味を持つが、1999 年の Liu らによる測定を最後に行われていない。一方、茨城県東海村において稼働を開始した J-PARC の物質生命科学研究所(MLF)では世界最高強度のパルスミュオンビームを利用することができ、ミュオンを用いた世界トップレベルの基礎物理学研究を行う基盤が確立しつつある。この優位性を生かし、ミュオニウムの分光実験を行う機運が高まりつつある。

### 2. 研究の目的

J-PARC MLF において、ミュオニウム原

子の基底状態の超微細構造を測定するために必要な実験装置の開発を行う。特に、J-PARC MLF における大強度パルス状ミュオンビームのメリットを最大限に生かすため、高レート耐性を持つ陽電子検出器の開発と、高度に制御されたマイクロ波印加システムの開発が必要である。これらの開発の終了後、J-PARC MLF での実験を行い、先行実験を 1 ケタ上回る精度の測定実験をめざす。

### 3. 研究の方法

ミュオニウム原子の基底状態のエネルギー準位は磁場中でその縮退が解け、図 1 に示すような磁場依存性を示す。我々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、ガス中にミュオニウムを作り、マイクロ波共鳴によって図に示す  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{34}$  の共鳴周波数を測定する。

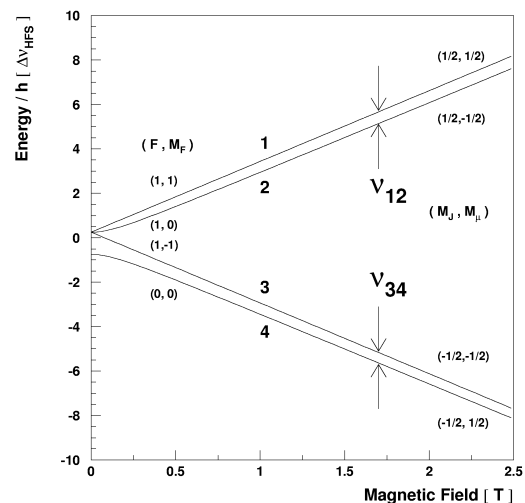


図 1 ミュオニウム原子の基底状態の磁場中でのエネルギー準位

この方法には、ミュオニウム原子の基底状態の超微細構造と  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{34}$  の間には  $\Delta E_{\text{HFS}} = \nu_{12} + \nu_{34}$  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  $\Delta E_{\text{HFS}}$  を求めることができるという利点がある。また、無磁場中でミュオニウムを生成すると偏極率が 50% になってしまうが、強磁場中であればその偏極が失われないため、統計的にも有利である。

同じ実験装置で  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{34}$  の両方が測定できるようにするため、磁場の強さと RF キャパティ(円筒型)のサイズは、磁場の強さによって定まる  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{34}$  がそれぞれ  $\text{TM}_{110}$ ,  $\text{TM}_{210}$  モードに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経過し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。この際、ミュオンがパルス状に入射される J-PARC MLF においては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り、また他の大強度ミュオンビームを供給している施設（PSI 研究所、TRIUMF 研究所）では不可能な理由である。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。

#### 4. 研究成果

##### (1) 超伝導磁石と磁場プローブの開発

先行研究において不確かさを決めている大きな要因の一つはミュオニウムが生成され、RF が照射される領域における磁場の不均一さであった。これを改善するため、直径 35cm の球内で磁場の不均一度を 1ppm 以下となるように MRI 用超伝導磁石を改造した。この改造によって磁場の不均一さによる系統誤差は先行研究の 1/3 程度にまで小さくなるものと期待される。

また、超伝導磁石に取り付けられる GM 冷凍機の機械的振動が磁場の時間的な安定性にどれほど影響するかを確かめるために、実際の振動を測定し（図 2）、GM 冷凍機による振動の他に、実験室の地盤の振動も問題になりうることを見出した。磁石の支持架台と磁石内部の構造を含めた 3D モデルを有限要素法によって解析し、架台に防振ダンパーを含めることでこれらの実験への影響を小さくできることを示した。

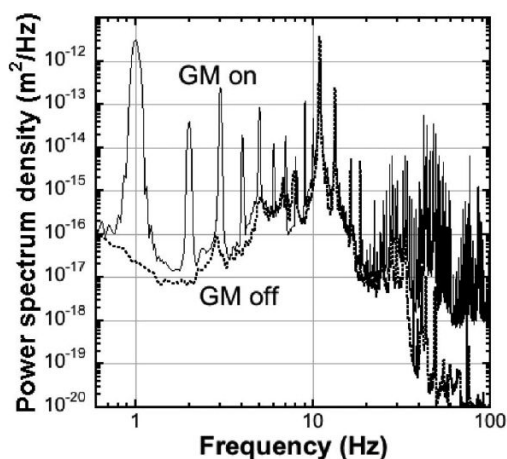


図 2 測定されたヘリウム容器の振動スペクトル

同時に、ミュオニウムが生成される空間内の各点における磁場の大きさを 0.1ppm 以下の絶対精度で測定するための高精度磁場プローブの開発を進めた。NMR プローブの形状をデジタルカメラで撮影し、形状の真球からのずれを定量的に測定する装置を開発した。これによって、プローブが真球でない場合にサンプルの磁性によってスペクトル線が広がってしまう効果を補正することができるようになった。また NMR 信号の読みだしをデジタル化することで高速・高精度での測定を可能とした。

これらの開発成果は別途計画中の J-PARC やフェルミ国立研究所におけるミュオン異

常磁気モーメントの測定実験にも応用可能なものであり、Applied Superconductivity Conference 2012 (ASC2012)等の国際会議や学会にて報告された。

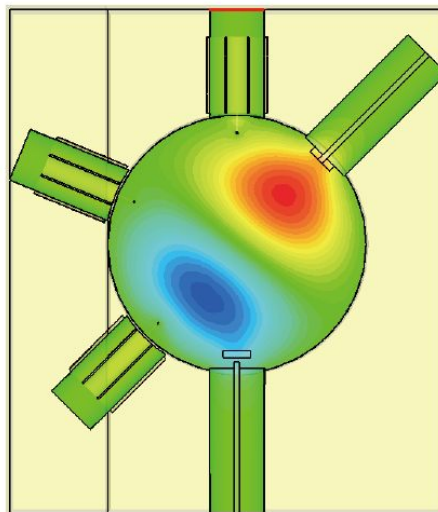


図 3 チューニングバーを入れたときのキャビティ内の電磁場分布の一例

##### (2) ガスチェンバーと RF キャビティの開発

超伝導磁石中には高純度の Kr ガスを封入したガスチェンバーが設置され、その内部には RF 分光を行うための RF キャビティが設置される。先に述べたようにより大きな体積内で磁場の均一性が確保されたことに伴い、ビーム軸方向の長さが 30cm と、先行研究の 2 倍近い長さを持つ RF キャビティを設計・制作した。これによって、低い圧力の Kr ガス中でもミュオンを内部に止めてミュオニウムを生成することができ、ガス圧力による系統誤差を小さくすることができる。ガスチェンバーのリーク量およびアウトガス量を測定し、1ppm 以下の不純物濃度を 3 カ月にわたって保持するという要求性能を満たすことを確認した。

RF キャビティは二つのチューニングバーによって、 $\nu_{12}$ ,  $\nu_{34}$  に対応する共鳴周波数を独立に制御できるよう設計・制作された。このキャビティ内の電磁場分布を有限要素法を用いて計算し、共鳴周波数の実測値と一致していることが確認した。また、チューニングバーを入れた状態の RF キャビティ内の電磁場分布はチューニングバーがない理想的な円筒型キャビティの分布とは異なることを確認した。例えば図 3 に示した電磁場分布では、赤く表示されている部分と青く表示されている部分が完全に対称にはなっておらず、理想的なキャビティの TM<sub>110</sub> モードとは分布が一致しないことが分かる（この図では分からないが、円筒軸方向の分布も TM<sub>110</sub> とは異なる）。先行研究においてはこうした分布の違いが考慮されておらず、新たな系統誤差の要因を明らかにした。これらの成果は

The 23<sup>rd</sup> International Conference on Atomic Physics (ICAP 2012) 等の国際会議や学会で報告された。

### (3) 陽電子検出器の開発

この実験は J-PARC MLF における大強度パルス状ミュオンビームを用いて大量のミュオニウムを一度に生成し、その崩壊陽電子の角度分布の変化を観測することになるため、高い時間分解能を持ち、かつ高磁場中でも動作する陽電子検出器の開発が必要となる。近年浜松ホトニクス社が開発した Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) は磁場の影響をほとんど受けずに動作する点で我々の要求にかなっている。また、多電極光電子増倍管 (MAPMT) も高磁場下で動作可能で、ゲインが大きくアフターパルス特性に優れているという特徴を持つ。そこで、シンチレーションファイバーと MPPC、シンチレータタイルと MPPC、シンチレーションファイバーと MAPMT の3種の組み合わせのもとで、ファイバー径やシンチレータ厚を変えた試作機を複数個制作し、密封線源、宇宙線等を用いて性能を比較した。その結果、1辺が10mmの正方形で3mm厚のシンチレータタイルにMPPCを二つ取り付けるデザインの検出器が最も効率的に陽電子を検出することができ、高レートに耐え、アフターパルス特性も良いことを見出した。この結果を受けてこのデザインによる試作機の試験を J-PARC MLF の D ラインで行い、実験に必要な性能を持つことが示された。これは実験開始に向けた大きなマイルストーンであり、日本物理学会第 69 回年次大会等で報告された。

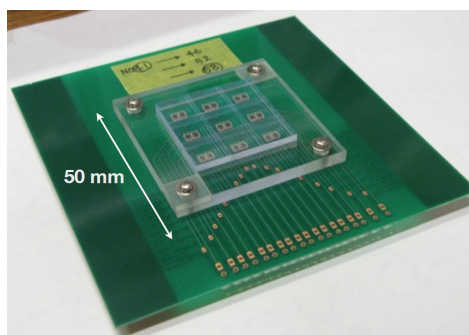


図4 陽電子検出器の試作品。1辺10mmの正方形のシンチレータタイルが9つ敷き詰められている

### (4) ビームプロファイルモニタの開発

(2) で述べたように RF キャビティ内の電磁場分布は様ではないために、分光を行うためには、キャビティ内にミュオニウム原子がどのように分布しているかを知らなくてはならない。このため、2種類のビームプロファイルモニタの開発を行った。

1つは実験中のミュオンビームの位置の変動を検出するためのモニターであり、ミュオンビームのロスを最小限にするために、

0.1mm 厚の短冊状シンチレータを並べて作られる。オプティカルファイバーを用いたライトガイドを新規に設計することで、このような極薄のシンチレータからもビームの位置や大きさの変化をモニターする十分な光量が得られることができた。

もう一つは RF キャビティ内にミュオンが止まる位置を実際に測定するための装置である。このために、プラスチックシンチレータ内での発光を gated IIT と CCD カメラを用いて光学的にデジタル画像として捉えるシステムを開発した。プラスチックシンチレータと gated IIT の位置を物理的に離すことが可能なため、プラスチックシンチレータの位置で定まるミュオンの検出位置での磁場が強くても、その信号を捉える gated IIT と CCD は十分に磁場が弱いところに設置することができるのがメリットとなる。このシステムは実際に J-PARC MLF の D ラインで試験が行われ、これまで用いられていたビームカメラに比べて優れた性能を発揮することが示された。

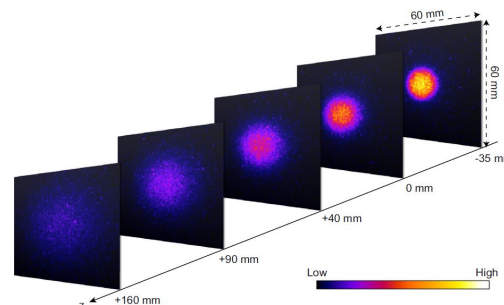


図5 開発されたビームプロファイルモニタによって計測された空気中のミュオンビームプロファイルの変化

### (5) old muonium 法における系統誤差のシミュレーション

この実験ではパルス状に入射されたミュオンビームによって同時に生成される大量のミュオニウム原子に  $\nu_{12}$ , あるいは  $\nu_{34}$  に相当する RF を照射し、エネルギー準位間の遷移が起こる際に生じるミュオンのスピンの反転を、崩壊陽電子の角度分布の変化として検出する。(2) で述べたように RF キャビティ内の電磁場分布は照射する RF の周波数に応じて (チューニングバーの位置の変化に応じて) 変化するため、観測される陽電子の角度分布は、ミュオニウムの崩壊までの時間 (=RF の照射時間)、RF キャビティ内の電磁場分布 (=RF の周波数)、陽電子検出器の検出効率の複雑な関数となる。この複雑な関数を素早く計算するプログラムを開発し、RF や磁場、温度等の条件を恣意的に変化させながら実際の実験に含まれる系統誤差についての考察を行った。(2) でも述べたが、これまでの先行実験で考慮されていなかった系統誤差の要因を見出し、実際のデータの解析の基礎を固めた。



(6) J-PARC MLF D-line における実験

申請時の計画では最終年度の H25 年度に J-PARC MLF の D ラインに実験装置を設置し、60 日程度のデータ収集を行い、この結果を受けて H26 年度に大強度ビームラインにおいて本格的なデータ収集を行う計画であった。しかし、H25 年 5 月 23 日に発生した J-PARC ハドロンホールにおける放射性同位体漏洩事故とそれに伴う安全対策により J-PARC MLF 施設においては 9 ヶ月間の運転停止を余儀なくされた。このため D ラインにおける実験装置の設置とコミッションング等を行うことができず、データの収集を行うことは出来なかった。上に述べたように、超伝導磁石、RF キャピティ、ガスチェンバー、陽電子検出器、ビームプロファイルモニタ等の主要構成要素の開発は順調に進捗しており、データ収集はすぐに開始することができる状態にあるが、H25 年度中に D ラインで行われる予定であった他の実験計画との兼ね合いもあり、予定を変更し、最初から大強度ビームラインに実験装置を設置し、データ収集を行う予定である。現在、準備を進めている。

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 10 件)

(1) T. U. Ito, A. Toyoda, W. Higemoto, M. Tajima, Y. Matsuda, K. Shimomura, “Online full two-dimensional imaging of pulsed muon beams at J-PARC MUSE using a gated image intensifier”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 754, 1-9, 2014 年, 査読有

DOI: 10.1016/j.nima.2014.04.014

(2) S. Kanda, N. Saito (19 番目), K. Shimomura (20 番目) 他 21 名 “Development of high-rate positron tracker for the muonium production experiment at J-PARC”, JPS Conference Proceedings, vol. 2, 010404-1-7, 2014 年, 査読有

DOI: 10.7566/JSPSC.2.010404

(3) P. Bakule, M. Iwasaki (10 番目), S. Kanda (12 番目), Y. Matsuda (17 番目), N. Saito (24 番目), K. Shimomura (25 番目) 他 25 名

“Measurement of muonium emission from silica aerogel”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, vol.2013, 103C01-103C10, 2013 年, 査読有

DOI: 10.1093/ptep/ptt080

(4) A. Toyota, Y. Fujiwara, Y. Fukao, O. Kamigaito, N. Kawamura, Y. Matsuda,

T. Mibe, T. Ogitsu, N. Saito, K. Sasaki, K. Shimomura, M. Sugano, K. Tanaka, D. Tomono, H.A. Torii, “J-PARC MUSE H-line optimization for the g-2 and MuHFS experiments”

Journal of Physics: Conference Series, vol. 408, 012073-1-4, 2013 年, (査読有)

DOI: 10.1088/1742-6596/408/1/012073

(5) K. Sasaki, M. Sugano, R. Ohkubo, T. Ogitsu, N. Saito, K. Shimomura, A. Yamamoto,

“Superconducting Magnet Design for the Hyperfine Structure Measurement of Muonium at the J-PARC”,

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 23, 4500704-1-4, 2013 年, 査読有,

DOI: 10.1109/TASC.2013.2245714

[学会発表](計 29 件)

(1) 神田聡太郎, “Precision measurement of muonium hyperfine splitting at J-PARC”, The 3<sup>rd</sup> workshop on the Physics of Fundamental Symmetries and Interactions at low energies and the precision frontier, 2013/09/09-12, PSI 研究所、フィリンゲン、スイス

(2) 鳥居寛之, “Status and prospect of the muonium experiment at J-PARC”, International Workshop on e+e- collisions from Phi to Psi, 2013/09/09-12, ローマ・ラ・サピエンツァ大学、ローマ、イタリア

(3) 松田恭幸, “Fundamental Physics with muon – with emphasis on muonium hyperfine interaction” (招待講演), Preschool of 1<sup>st</sup> International Symposium on Science Explored by Ultra Slow Muon, 2013/08/08-12, くにびきメッセ、島根県松江市

(4) 田中香津生, “Measurement of muonium hyperfine splitting at J-PARC”, The 23<sup>rd</sup> International Conference on Atomic Physics, 2012/07/23-27, Ecole Polytechnique Palaiseau, パレゾー、フランス

(5) 佐々木賢一, “Superconducting Magnet Design for the Hyperfine Structure Measurement of Muonium at the J-PARC”, Applied Superconductivity Conference 2012, 2012/10/07-12, オレゴンコンベンションセンター、ポートランド、米国

(6) 豊田晃久, “J-PARC MUSE H-line Optimization for the g-2/EDM and MuHFS experiments”, the 13<sup>th</sup> International

Workshop on Neutrino Factories, Super beams and Beta Beams, 2011/08/01-06, ジュネーブ大学、ジュネーブ、スイス

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

斉藤 直人 (SAITO, Naohito)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号：20321763

下村 浩一郎 (SHIMOMURA, Koichiro)  
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

### (3) 研究協力者

河村 成肇 (KAWAMURA, Naritoshi)  
高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師  
研究者番号：60311338

佐々木 賢一 (SASAKI, Kenichi)  
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

豊田 晃久 (TOYOTA, Akihisa)  
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

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

三部 勉 (MIBE, Tsutomu)  
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  
研究者番号：80536938