

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13944

研究課題名（和文）レーザー精密分光によるミュオン粒子質量の測定

研究課題名（英文）Measurement of muon mass by precision laser spectroscopy

研究代表者

今井 康貴（Imai, Yasutaka）

岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任助教

研究者番号：30888342

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：ミュオンニウム1S-2S遷移分光に用いる深紫外レーザーの基本波光源として、Yb添加ファイバ増幅器の開発を行った。増幅器はシミュレーションによる設計に近い増幅度を達成し、数ワットの高出力化に成功した。並行してJ-PARCの高強度ミュオンビームラインにて、パルスレーザーを用いたミュオンニウムの1S-2S遷移分光実験を行い、先行研究より約60倍強い信号レートで1S-2S遷移スペクトルの観測に成功した。また、先行研究では信号レート不足により観測が困難だった1S-2S遷移の別超微細構造間を世界で初めて観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミュオンニウム1S-2S遷移のレーザー分光によるミュオンニウムに関わる基礎物理定数の精密測定は、素粒子標準理論の検証、また標準理論を超える新たな物理の探査にもつながる。また、Yb添加ファイバ増幅器は高出力かつ高品質な空間モードが実現可能なため、その開発のノウハウを得ることは今後のレーザー実験の光源開発につながる。

研究成果の概要（英文）：We developed a Yb-doped fiber amplifier as a fundamental laser source of deep ultraviolet laser for spectroscopy of the 1S-2S transition in muonium. The amplification of the fiber amplifier is close to that of the simulation design, and the output power was successfully increased up to several watts.

We also conducted spectroscopy of the 1S-2S transition in muonium using a pulsed laser at the muon beamline at J-PARC. We succeeded to observe the spectrum of the 1S-2S transition with a signal rate about 60 times stronger than that of previous studies. In addition, we observed the other hyperfine transition line of the 1S-2S transition, which was difficult to observe in previous studies due to insufficient signal rate.

研究分野：素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する実験

キーワード：素粒子実験 ミュオンニウム 高出力光源 Yb添加ファイバ増幅器

1. 研究開始当初の背景

近年、光周波数を直接計測できる光コムの開発により、原子のレーザー分光技術は著しい発展を遂げた、今日では、水素原子 1S-2S 遷移周波数は、 4.2×10^{15} という極めて小さな不確かさで計測されている。しかし一方で、原子の理論計算では最も単純な構造を持つ水素原子でさえ 3×10^{-11} も計算値と実測値にずれが生じている。これは原子核を構成する複合粒子(ハドロン)の一つ、陽子の電荷半径が測定系により 4 も食い違うことが原因である(陽子半径パズル)。この問題はミュオニウム(Mu)を用いることで解決することが可能である。Mu は水素の同位体とみなせるが、構造の無い素粒子のみで構成されている。したがって、陽子半径パズル問題を回避し、理論と実験を高精度で比較・検証することが可能となる。また Mu のエネルギー準位には、電弱相互作用による周波数シフトが実験で検出可能な大きさに現れることが示唆されている。そのため、Mu の精密分光は量子電磁気学(QED)のみならず、電弱理論および新物理の効果を検証する非常に有用な手段となりうる。

2. 研究の目的



図1 ミューオニウム分光の目的

本研究課題の目的は Mu 1S-2S 遷移精密分光用の高強度励起光源開発の開発を行うことが目的である。純レプトン原子である Mu の 1S-2S 遷移分光の不確かさを従来の研究より 3 桁小さい 10 kHz まで向上させることができれば、実験によるミュウ粒子の質量決定精度を 120×10^{-9} から 1×10^{-9} まで向上させ、CODATA 推奨値へ寄与することも可能である。現在、ミュウ粒子に関する基礎物理定数の決定は、その質量精度もしくは電子との質量比の精度により大きく制限されている。例えば、Mu の 1S 超微細構造間周波数は QED だけでなく電弱相互作用の影響が -65 Hz 存在することが計算で明らかとなっている。したがって、実験値と理論値を精密に比較することで、レプトンのみで構成される荷電束縛系のエネルギー準位に電弱効果が与える影響を精密に調べることが可能となり得るが、1S 超微細構造間周波数には -510 Hz のミュウ粒子質量由来の不確かさが存在するため、現状では検証が困難である。しかし、本研究の目標を達成することで不確かさは 4 Hz まで減らすことが可能となり、QED だけでなく素粒子の標準理論の実験的な精密検証が可能となる。

3. 研究の方法

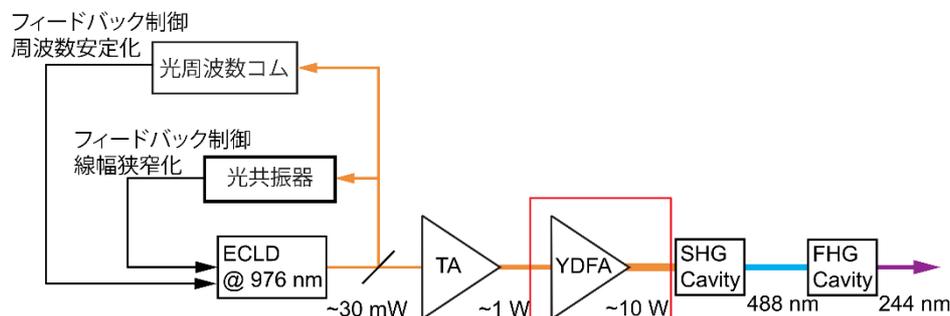


図2 開発予定の CW 励起光源。本研究課題では赤線枠部を開発。

深紫外である 244 nm を直接発振させることは困難であるため、外部共振器型半導体レーザーをシード光とした 976 nm 基本波光源から第二高調波生成を 2 回繰り返すことで、目標の波長を生成する。そのため、976 nm 基本波光源の出力は高出力、かつ高品質な空間モードであることが望ましい。イッテルピウム(Yb)添加ファイバ光増幅器 (Ytterbium-doped Fiber Amplifier: YDFA) は光ファイバからの出力であるため空間モードが良好であり、高出力化の機構として採

用した．976 nm 光は Yb 添加ファイバでの吸収が大きく，増幅するには Yb 添加ファイバを高強度で光励起する必要があり，光ファイバ融着部の接続損失で発生する熱により光ファイバを損傷する可能性が高くなる．また，高強度での光励起によりノイズとなる増幅自然放光（Amplified spontaneous emission：ASE）が発生しやすいため，ASE を抑えつつ，976 nm を増幅する必要がある．そのため，高品質の融着による損失低下，熱対策の試行錯誤，およびレート方程式に基づいたシミュレーションによる設計を行い，YDFA の開発を進めた．Yb 添加ファイバに関しては，入手性の観点から市販の Yb 添加ファイバを用いた．

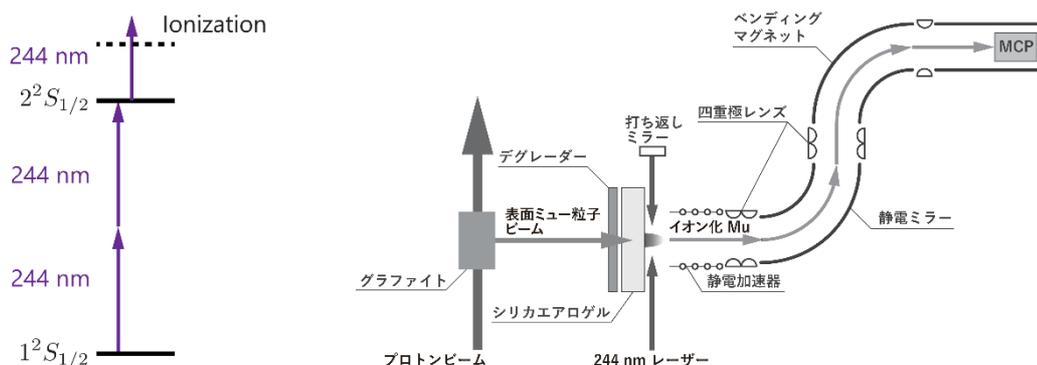


図 3 Mu 1S-2S 遷移分光実験概要

並行して，J-PARC の S2 高強度 μ ビームラインにてパルスレーザーを用いた Mu1S-2S 遷移の分光実験を行った．大強度ミュー粒子ビームを室温のシリカエアロゲルに照射することで， μ^+ 粒子がシリカエアロゲル中の電子を捕獲し，300K の速度分散を持つ Mu が生成される．ゲル外に放出された Mu に対し 244 nm パルス励起レーザーを照射する．1S-2S 遷移は一光子遷移が禁止されているため，一度入射した 244 nm パルスレーザーを打ち返し逆側からも照射することで二光子励起を行う．Mu は非常に軽いため，室温程度でも約 100 GHz のドップラー広がりが存在するが，対向する二光子で励起することでドップラーシフトをほぼキャンセルすることが可能である．2S に励起した Mu を 244 nm 光でイオン化させ，静電加速器により引き出し加速し，下流にある MCP で励起信号を検出する．

4．研究成果

シミュレーションの結果，Yb 添加ファイバを伸ばせば 976 nm の増幅率は増加していくが，ある値を超えると増幅率が急激に低下し，ASE が急増することが分かった．

976 nm 光 Yb 添加ファイバ増幅器をシミュレーション結果に基づき作成したところ，0.3 W の光入力に対し 6.7 W の増幅光が得られた．しかし，時間とともに出力が減衰し続け，累積で 20 時間の運転後には 4 W 程度にまで出力が低下した．原因は高強度の光励起により Yb 添加ファイバ内の透過損失が増加してゆくフォトダークニング現象によるものと思われた．そのため，母材にフォトダークニング抑制の報告があるリンケイ酸ガラスが使用された Yb 添加ファイバを用いた光増幅器を設計し，作成した．結果 0.3 W の入力に対し 5.3 W の増幅光が得られた（図 5a）．増幅光の出力は計算値より低くなったが，ファイバ長や ASE 出力は計算と一致し，シミュレーションによる設計が実用的であることが分かった．また出力の時間減衰も見られず，> 2 % / hour 程度の安定した出力を達成した（図 5b）．

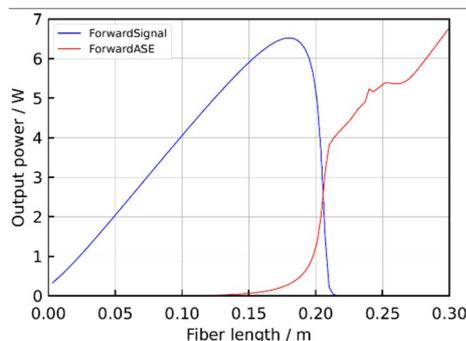
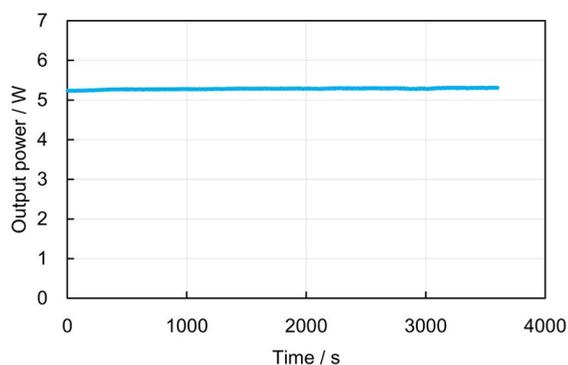
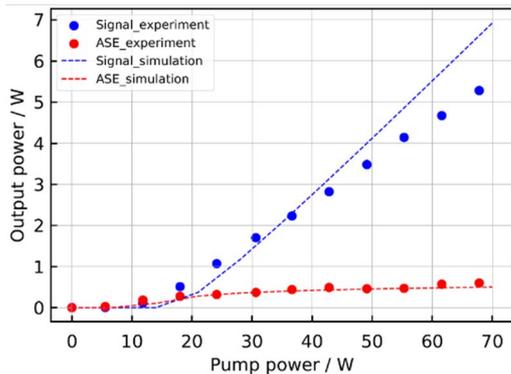


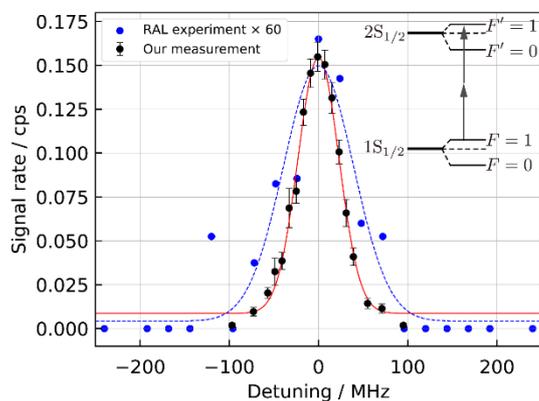
図 4 シミュレーション結果の一例．



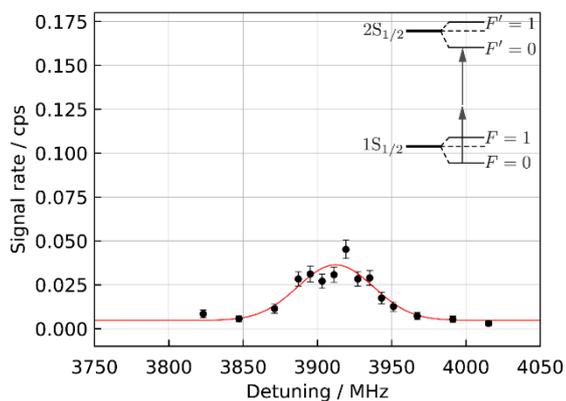
(a) 励起光パワーに対する Yb 添加ファイバ光増幅器の出力 . (b) 増幅された 976 nm 光のパワー時間変動

図 5 Yb 添加ファイバ光増幅器の出力

J-PARC の S2 ビームラインにおける Mu 1S-2S 遷移の分光実験に関しては、先行研究の約 60 倍の信号レートで観測することに成功した (図 6a)。また、先行研究では信号の統計量が少なく観測が困難だった、1S-2S 遷移の別超微細構造間の遷移を世界で初めて観測することに成功した (図 6b)。



(a) $F=1-F'=1$



(b) $F=0-F'=0$

図 6 Mu 1S-2S 遷移スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名	今井康貴, 足立泰平, 原秀明, 平木貴宏, 池戸豊, 石田勝彦, Saeid Kamal, 上岡修星, 河村成肇, 幸田章宏, 増田孝彦, 三部勉, 宮本祐樹, 嵯峨航, 下村浩一郎, Patrick Strasser, 鈴木一仁, 植竹智, 山基真佑, 山崎高幸, 吉田光宏, 吉村浩司, Ce Zhang
2. 発表標題	ミュオニウム1S-2Sパルスレーザー分光 III
3. 学会等名	日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	山基真佑, 原秀明, 今井康貴, 植竹智, 足立泰平, 平木貴宏, 池戸豊, 石田勝彦, Saeid Kamal, 上岡修星, 河村成肇, 幸田章宏, Yajun Mao, 増田孝彦, 三部勉, 三宅康博, 宮本祐樹, 大石裕, 大谷将士, 嵯峨航, Patrick Strasser, 下村浩一郎, 鈴木一仁, 杉山蒼, 山崎高幸, 吉村浩司, 吉田光宏, 四塚麻衣, Ce Zhang
2. 発表標題	ミュオニウム1S-2Sパルスレーザー分光II
3. 学会等名	日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	嵯峨航, 今井康貴, 池戸豊, 足立泰平, 植竹智, 石田勝彦, 岩井遼斗, Saeid Kamal, 上岡修星, 河村成肇, 幸田章宏, Yajun Mao, 増田孝彦, 三部勉, 三宅康博, 宮本祐樹, 大石裕, 大谷将士, 山基真佑, Patrick Strasser, 下村浩一郎, 鈴木一仁, 杉山蒼, 原秀明, 平木貴宏, 山崎高幸, 吉村浩司, 吉田光宏, 四塚麻衣, Ce Zhang
2. 発表標題	ミュオニウム1S-2Sレーザー分光に向けた二層構造ターゲットの研究
3. 学会等名	日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	上岡修星, 吉田光宏, 三部勉, Ce Zhang, 原秀明, 平木貴宏, 今井康貴, 増田孝彦, 宮本祐樹, 植竹智, 山基真佑, 吉村浩司, 鈴木一仁, 石田勝彦
2. 発表標題	J-PARC muon g-2/EDM実験のためのイオン化レーザーの開発
3. 学会等名	日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名 今井康貴, 足立泰平, 原秀明, 平木貴宏, 池戸豊, 石田勝彦, Saeid Kamal, 河村成肇, 幸田章宏, Yajun Mao, 増田孝彦, 三部勉, 三宅康博, 宮本祐樹, 大石裕, 大谷将士, 下村浩一郎, Patrick Strasser, 鈴木一仁, 植竹智, 山基真佑, 山崎高幸, 吉田光宏, 吉村浩司, Ce Zhang
2. 発表標題 ミュオニウム1S-2S遷移パルスレーザー分光実験およびCWレーザー精密分光実験に向けた研究開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山基真佑, 原秀明, 今井康貴, 植竹智, 足立泰平, 平木貴宏, 池戸豊, 石田勝彦, Saeid Kamal, 河村成肇, 幸田章宏, Yajun Mao, 増田孝彦, 三部勉, 三宅康博, 宮本祐樹, 大石裕, 大谷将士, Patrick Strasser, 下村浩一郎, 鈴木一仁, 山崎高幸, 吉村浩司, 吉田光宏, Ce Zhang
2. 発表標題 ミュオニウム1S-2Sパルスレーザー分光
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原秀明, 今井康貴, 植竹智
2. 発表標題 Yb原子のレーザー冷却・量子操作のための1112nmファイバーアンプ開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 足立泰平, 原秀明, 平木貴宏, 池戸豊, 今井康貴, 石田勝彦, Saeid Kamal, 河村成肇, 幸田章宏, Yajun Mao, 増田孝彦, 三部勉, 三宅康博, 宮本祐樹, 大石裕, 大谷将士, 下村浩一郎, Patrick Strasser, 鈴木一仁, 植竹智, 山基真佑, 山崎高幸, 吉田光宏, 吉村浩司, Ce Zhang
2. 発表標題 ミュオニウム1s-2s遷移レーザー分光実験に向けた新実験エリア「S2」のコミッションング
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上岡修星, 吉田光宏, 三部勉, Ce Zhang, 原秀明, 平木貴宏, 今井康貴, 増田孝彦, 宮本祐樹, 植竹智, 山基真佑, 吉村浩司, 鈴木一仁, 石田勝彦
2. 発表標題 J-PARC muon g-2/EDM実験のためのイオン化レーザーの開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山基真佑, 原秀明, 今井康貴, 植竹智, 足立泰平, 平木貴宏, 池戸豊, 石田勝彦, Saeid Kamal, 河村成肇, 幸田章宏, Yajun Mao, 増田孝彦, 三部勉, 三宅康博, 宮本祐樹, 大石裕, 大谷将士, Patrick Strasser, 下村浩一郎, 鈴木一仁, 山崎高幸, 吉村浩司, 吉田光宏, Ce Zhang
2. 発表標題 ミュオニウム1S-2Sレーザー分光のためのパルスTi:Sレーザー開発
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上岡修星, 吉田光宏, 三部勉, Ce Zhang, 原秀明, 平木貴宏, 今井康貴, 増田孝彦, 宮本祐樹, 植竹智, 山基真佑, 吉村浩司, 鈴木一仁, 石田勝彦
2. 発表標題 J-PARC muon g-2/EDM実験のためのイオン化レーザーの開発
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------