

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13572

研究課題名（和文）ミュオン水素原子の精密レーザー分光による陽子半径測定

研究課題名（英文）Measurement of the proton radius by a precision laser spectroscopy of muonic hydrogen atom

研究代表者

神田 聡太郎（KANDA, Sohtaro）

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・助教

研究者番号：10800485

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、陽子のZemach半径を測定するためにミュオン水素原子の基底状態における超微細構造をレーザー分光することを目指して装置開発および原理実証を行った。得られた主な成果は次の二つである。(1) 遷移光源である大強度中赤外パルスレーザーの開発を行い、波長6.8 μm で発振する狭線幅かつ高出力の量子カスケードレーザーを開発した。さらに、中赤外領域で高い反射率を有する多重反射セルを開発した。(2) 低圧の気体水素を標的とした μ -SR法を確立し、ミュオン水素およびミュオン重水素原子の横磁場中ミュオンスピン回転の観測に成功した。これらの成果によりレーザー分光実験の実現が大きく近づいた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陽子の電荷半径が測定によって異なる「陽子の半径問題」は素粒子・原子核・原子物理学における重要な未解決問題であり、その解決は学術的な急務である。本研究ではこれに従来法とは異なるアプローチで取り組み、実験に不可欠な装置の開発と手法の原理実証に成功した。本研究において開発した大強度の中赤外パルスレーザーは前例のない波長領域で大強度かつ狭線幅を実現し、微細加工や低侵襲治療への応用が可能である。低圧の気体標的を用いた負ミュオンによるミュオンスピン回転法は原子核・原子物理学および放射化学における重要な基礎技術となるもので今後の多方面への展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed at laser spectroscopy of the hyperfine structure of the muonic hydrogen atom in the ground state to determine the proton Zemach radius. The main results obtained are the following two. (1) We developed a high-intensity mid-infrared pulsed laser as a transition light source, and developed a narrow linewidth and high-power quantum cascade laser that oscillates at a wavelength of 6.8 μm . Furthermore, we have developed a multi-reflection cell with high reflectivity in the mid-infrared region. (2) We established the μ -SR method with low-pressure gaseous hydrogen, and successfully observed the muon spin rotation of muon hydrogen and muon deuterium atoms in a transverse magnetic field. With these results, the realization of the experiment became realistic.

研究分野：素粒子・原子核・原子物理学

キーワード：ミュオン レーザー ミュオン水素原子 レーザー分光 陽子半径

1. 研究開始当初の背景

陽子は物質の基本的な構成要素でありながら、その内部構造は複雑でありいまだに理解されていない部分が多く残っている。陽子の内部構造を理解するためには、電荷や磁気能率の空間分布を調べるのが有効である。陽子半径の測定手法には大別して二種類あり、ひとつは電子と陽子の弾性散乱によるもの、もうひとつは水素原子やミュオン水素原子の分光によるものである。ミュオン水素原子は陽子と負ミュオンとの束縛状態であり、その Bohr 半径は水素原子と比較して 1/200 と小さい。そのため、ミュオン水素原子のエネルギー構造には陽子の有限体積効果が顕著に現れる。図 1 に陽子電荷半径の測定結果を示す。

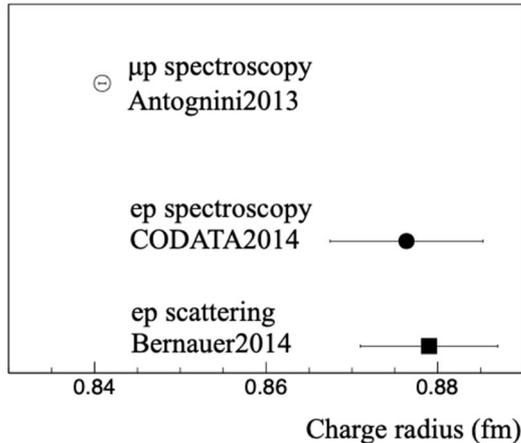


図 1：陽子の電荷半径。ミュオン水素原子による測定結果は水素原子および電子陽子散乱による測定結果と約 4%乖離している。

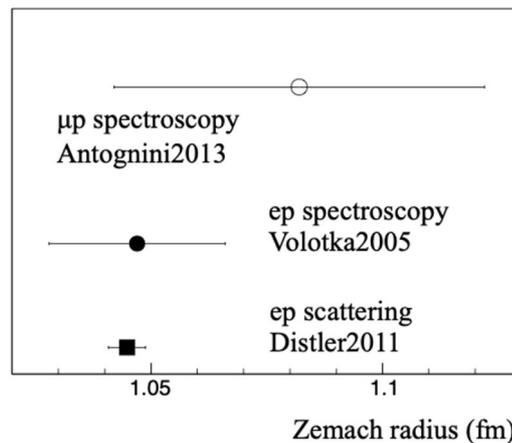


図 2：陽子の Zemach 半径。ミュオン水素原子による測定結果の不確かさが大きく、精度の向上が望まれている。

2010 年にスイス Paul Scherrer Institute (PSI) で測定されたミュオン水素原子の Lamb シフト分光に基づく陽子の電荷半径は 0.84087(39) fm であり、それまでに電子陽子散乱および水素原子の分光から得られていた 0.877(7) fm という数値と比較して約 4%小さく、測定の不確かさ(0.5%)を考慮しても有意に乖離していた。2013 年までに電子測定、ミュオン測定ともに追試が行われたが、状況は変わらず決定的な解釈が存在しない。これは「陽子の半径問題」と呼ばれ、素粒子・原子核・原子物理学における重要な未解決問題の一つとされている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ミュオン水素原子の基底状態における超微細構造(HFS)をレーザー分光し、陽子の Zemach 半径を実験的に決定することである。Zemach 半径は HFS を記述するために現象論的に導入された量であり、電荷分布を磁気能率分布で畳み込んだ形で定義される。すなわち、電荷とスピンの双方の情報を持つ。HFS の分光から Zemach 半径を直接決定することは、PSI における実験でミュオン水素原子の Lamb シフトが分光され、陽子の電荷半径が求められたことと対照的かつ相補的である。図 2 にこれまでに得られている Zemach 半径の測定結果を示す。

PSI の結果は二つの Lamb シフト周波数を組み合わせて 2S 準位における HFS を間接的に求めたものであり、計算の過程に含まれる系統誤差が大きいために他の実験結果との整合性を議論することが難しいという問題があった。

本研究で目指す HFS の測定精度は 2ppm であり、導出に伴う理論計算の不確かさを考慮した Zemach 半径の決定精度は 1 % である。これは PSI の結果と比較して三倍の精度向上に相当し、電子陽子散乱および水素原子分光との整合性を議論する上で必要十分な精度である。

本研究計画における重要な目標は、超微細遷移を共鳴させるための大強度かつ狭線幅な中赤外パルスレーザーを開発することである。ミュオン水素原子の 1S 準位における HFS は 183 meV であり、これは 6.8 μm の波長に相当する。超微細遷移は光学的に禁制であり、誘起するためにはパルスエネルギー 10 mJ 程度の高出力レーザーが必要となる。PSI における実験では水素気体中の Raman 効果を利用した光源が用いられ、その光出力は 0.25 mJ であった。この出力では HFS の分光は不可能であり、40 倍の強度向上も難しい。実験の要求を同時に満たす既存のコヒーレント光源は存在せず、本研究において新規に開発する必要がある。

本研究計画におけるもうひとつの重要な目標は、低圧の気体水素を標的とした負ミュオンスピン回転/共鳴(μ^- SR)実験の手法を確立することである。 μ SR は局所的な磁気プローブとして物性物理学の実験的研究において広く用いられているが、その多くは正ミュオンを固体標的に照射することで行われている(μ^+ SR)。 μ^- SR は負ミュオン原子の連鎖脱励起によるスピン減偏極や原子核への吸収による寿命の変化を伴うため μ^+ SR と比べて複雑かつ困難であり、さらに低圧の気体標的の場合はミュオン静止位置分布の空間的広がりが大きいため解析には注意を要する。

3. 研究の方法

図 3 にレーザー分光実験の概念図を示す。負ミュオンビームを低圧(0.1 atm)かつ低温(20 K)の水素標的に入射し、ミュオン水素原子を生成する。生成直後のミュオン水素原子は主量子数 14 程度の励起状態にあるが、短時間のうちに基底状態まで連鎖的に脱励起する。脱励起に関与する過程には輻射脱励起、Auger 過程、Coulomb 脱励起などがあり、それらの一部はミュオンスピンを減偏極させる。基底状態のミュオン水素原子に円偏光した波長 6.8 μm のレーザー光を照射することで、超微細遷移を誘起できる。ミュオン水素原子がスピン三重項状態から三重項状態に遷移すると、それに伴いミュオンのスピンの反転する。ミュオン崩壊によって生じる電子はミュオンのスピンと反平行に放出されやすいため、標的セルの周囲に電子検出器を配し、崩壊電子の角度異方性をレーザー光の波長の関数として求めることで HFS の共鳴曲線を測定することができる。

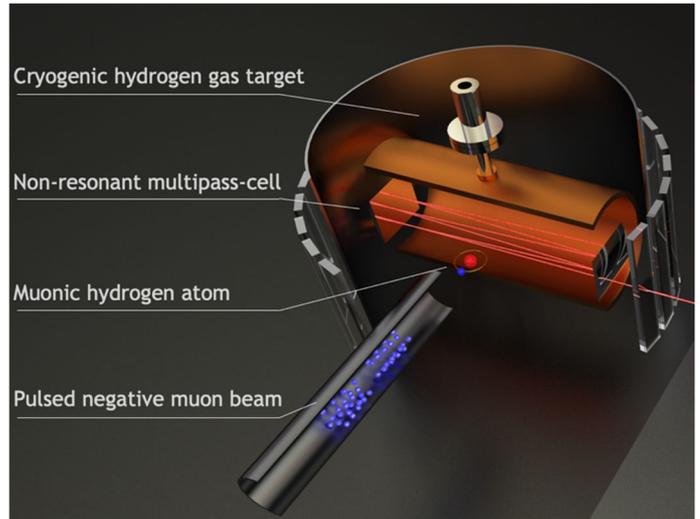


図 3：ミュオン水素原子レーザー分光実験の概念図。超微細遷移に伴うミュオンスピンの反転を崩壊電子の角度分布から検出する。

粒子加速器を用いて陽子ビームから生成されるミュオンのエネルギーは典型的には数 MeV であり、これを気体標的に入射して静止させるためにはある程度の物質質量が必要となる。標的圧力が高ければミュオンの標的中静止効率も高くなるが、 $\text{pp}\mu$ 分子の生成やミュオン水素原子と標的中陽子との非弾性散乱によるスピン三重項状態の脱励起という問題が生じる。また、Doppler 広がりによって HFS の共鳴曲線の線幅が自然幅よりも広くなるため高精度分光のためには低温の標的が必要とされる。標的溫度 20 K における共鳴の線幅を考慮して、レーザー光のスペクトル線幅に対する要求値は 150 MHz とした。

本研究の主要な部分は、次に述べる装置開発および予備実験で構成されている。

3-(1) 大強度パルス中赤外光源の開発

図 4 に光学系の概念図を示す。重要な要求性能である大きなパルスエネルギーと狭いスペクトル線幅は、前者を波長 2.09 μm で発振する大強度の Tm,Ho:YAG セラミックレーザーを励起光源とすることで、後者を波長 6.8 μm で発振する半導体量子井戸を応用した CW 量子カスケードレーザー(QCL)で実現する。これら二つのレーザーの出力光を ZnGeP₂ (ZGP)非線形光学結晶中で光パラメトリック発振(OPO)させることで目的の光を得る。

遷移効率を増大させるため、標的中に二枚の高反射率ミラーを対向して設置することで多重反射セルを構成する。レーザー光を外から入射して内部に閉じ込める必要があるため、ミラーにはセル内面の高い反射率に加えて入射面におけるある程度の透過率が求められる。

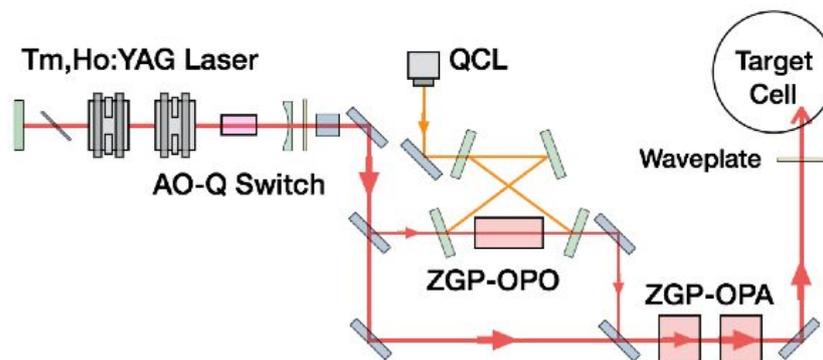


図 4：中赤外パルスレーザー光源の概念図。LD 励起した Tm,Ho:YAG セラミックレーザーを Q スイッチ発振させた励起光源と量子カスケードレーザーを用いた種光源の出力光を ZGP 非線形光学結晶に入射して光パラメトリック発振により目的の波長の大強度パルス光を実現する。S. Kanda *et al.*, RIKEN APR 51, 214 (2018) より。

3-(2) 低圧気体水素を用いた μ^- SR 法の確立

図5に μ^- SR 測定概念図を示す。横磁場中でミュオン水素原子を生成し、スピンの Larmor 歳差運動に伴う崩壊電子の角度非対称度を測定する。

非対称度はミュオンのスピン偏極に比例し、ミュオン水素原子については12%程度の残留偏極が理論的に予言されているが、実験的に確認した例はない。これは、ミュオン水素原子の偏極が陽子とのスピン交換を伴う非弾性散乱によって容易に減ってしまうことによる。この反応の断面積は大きく、偏極の寿命は0.1気圧で50 ns程度となる。振幅が小さく減衰の速い回転を観測する実験には困難が伴うため、振幅が同程度で偏極寿命のより長い重水素を標的とした実験で原理実証を行い、それに続けて水素を標的とした実験に進むことを計画した。

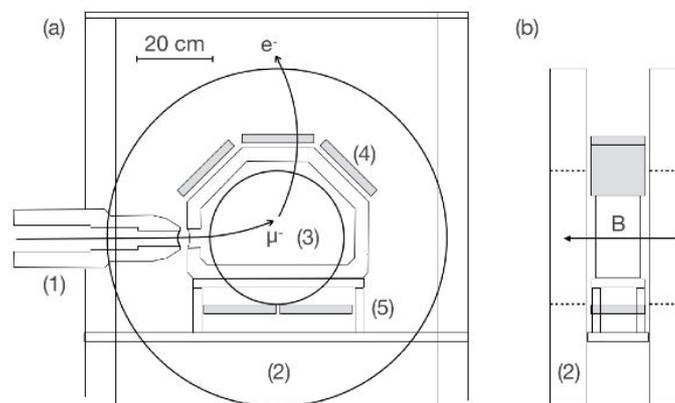


図5：気体水素標的を用いた負ミュオンスピン回転実験の概念図。パルス負ミュオンビーム(1)を横磁場(2)中に設置した標的容器(3)に入射し、ミュオンが崩壊して生じる電子の角度分布を上下に配した粒子検出器(4, 5)で測定する。S. Kanda *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. 1138 (2018) 012009 より。

4. 研究成果

本研究によって得られた成果を遷移光源の開発と気体水素 μ^- SR のそれぞれについて述べる。

4-(1) 大強度パルス中赤外光源の開発における成果

4-(1)- : 励起光源である Tm,Ho:YAG セラミックレーザーに関して、目標の出力および時間幅の性能を達成し、開発を完了した。図6に出力光のパルスエネルギーとパルス時間幅をセラミックの励起に用いたレーザーダイオードの電流量の関数として示す。

4-(1)- : 種光源である QCL に関して、目標の波長における発振、必要十分な出力および波長掃引性能を確認した。図7に QCL の発振波長を印加電流の関数として示す。目標波長近傍における出力は約 25 mW であった。

4-(1)- : 光パラメトリック発振器を構成する共振器の設計を光線行列解析によって最適化し、目標の波長変換効率を達成できる見込みとなった。

4-(1)- : QCL のスペクトル線幅を詳細に評価するために、Fabry-Pérot 干渉計を用いた測定計と回折格子を用いた測定系を構築した。独立な複数の手法で線幅を評価し、測定に伴う系統的不確かさを含めた解析を進めている。また、吸収分光や周波数コムレーザーを用いた波長の絶対値校正の手法を検討した。

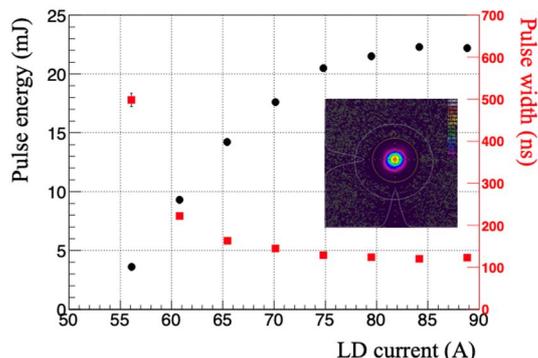


図6：励起光源である Tm,Ho:YAG セラミックレーザーのパルスエネルギーとパルス時間幅。エネルギーの目標値 20 mJ および時間幅の目標値 150 ns をそれぞれ同時に達成した。ビームプロファイルを小図に示す。S. Kanda *et al.*, RIKEN APR 51, 214 (2018) で誌上発表。

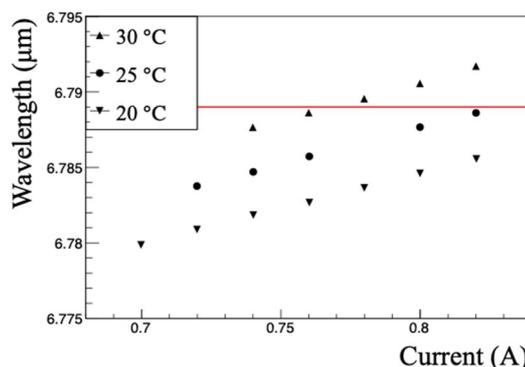


図7：種光源である量子カスケードレーザーの発振波長。TEC コントローラーにより温度を制御し、印加電流と合わせて波長の設定が可能である。赤線は実験で必要とされる 6.789 μm に対応する。波長掃引範囲は実験で要求されるよりも一桁広い範囲が達成された。国際会議 NuFACT2018 で発表。

4-(1)- : ZnSe 基板に誘電体多層膜のコーティングを施すことで多重反射セルの試作を行い、目標の波長領域で高い反射率が得られていることを確認した。図 8 に試作したミラーの透過率を波長の関数として示す。より詳細な反射率の評価を進めている。

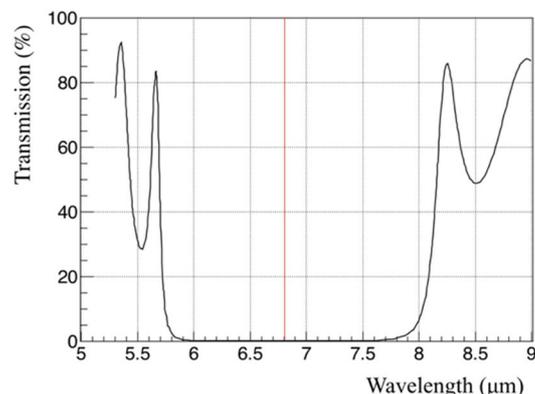


図 8：多重反射セル用ミラーの透過率。赤線は目標波長近傍の 6.8 μm に対応する。国際会議 ProtonRadius2019 で発表。

4-(2) 低圧気体水素を用いた $\mu\text{-SR}$ における成果

4-(2)- : J-PARC MLF MUSE においてミュオン水素原子の生成実験を行い、1 気圧および 0.5 気圧の気体水素標的を用いてミュオン水素原子の生成数と空間分布を測定した。ミュオンビームの運動量を走査して崩壊電子の時間スペクトルを解析し、ミュオン水素原子の収量と背景事象の比を最適化できることを示した。また、ミュオンの静止位置分布を解析し、GEANT4 を用いた Monte-Carlo シミュレーションの結果と比較してよく一致する結果を得た。

4-(2)- : 低圧気体水素を標的とした $\mu\text{-SR}$ の手法を確立するために、半導体光検出器(SiPM)とプラスチックシンチレータおよびシンチレーションファイバを組み合わせた電子検出器を開発した。実験に用いる横磁場コイルの磁場均一度を考慮した標的容器を設計し、内壁を銀板で覆うことで背景事象を大幅に低減することに成功した。図 9 にこれらの装置を用いて測定した電子の時間スペクトルを示す。

4-(2)- : 英国 Rutherford Appleton Laboratory (RAL) の理研支所におけるミュオン実験施設でミュオン重水素原子のスピンの回転実験を行い、1 気圧の気体重水素標的を用いて 120 Gauss の横磁場中でスピン歳差運動を観測することに成功した。基底状態における残留偏極率を求め、理論計算と不確かさの範囲で一致する結果を得た。図 10 にミュオン重水素原子のスピンの回転信号を示す。

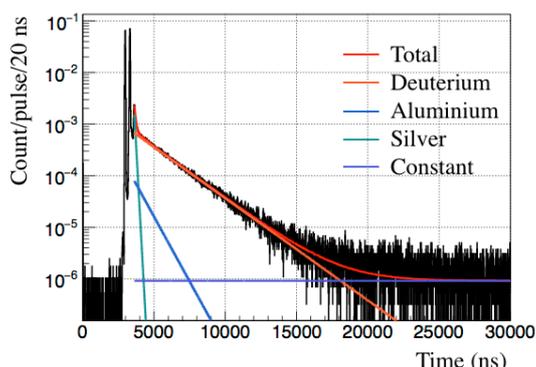


図 9：1 気圧の重水素を標的として測定した崩壊電子の時間スペクトル。早い時間にある二つの鋭いピークはミュオン生成標的における即発電子によるものである。S. Kanda *et al.*, RIKEN APR 52, 180 (2019) で誌上発表。

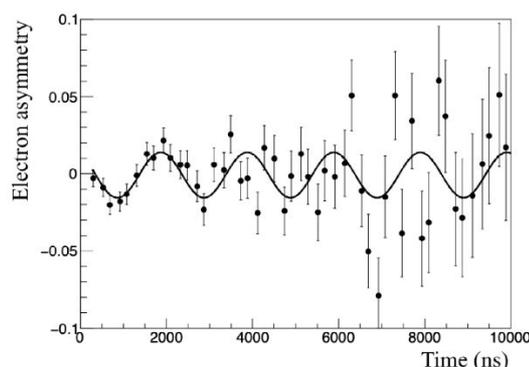


図 10：1 気圧の重水素を標的として測定した崩壊電子の非対称度。横磁場 120 Gauss のもとで期待される通りの周期および振幅で振動する信号が観測された。国際会議 MRM2019 で報告。

4-(2)- : 英国理研 RAL 支所のミュオン実験施設においてミュオン水素原子のスピンの回転実験を行い、0.1 気圧の気体水素標的を用いて 766 Gauss の横磁場中でスピン歳差運動を観測することに成功した。基底状態における残留偏極と偏極寿命を決定するための詳細な解析を進めている。

さらに、低温の金属薄膜に気体水素を吹き付けて生成する固体水素薄膜の利用可能性を検討した。固体水素薄膜に負ミュオンを入射すると一定の割合で真空中にミュオン水素原子が放出されるため、陽子との非弾性散乱による脱励起が生じない状態でミュオン水素原子の飛行中分光が可能となる。数値計算により、固体水素標的からのミュオン水素原子放出効率と放出エネルギー分布が予測通りであれば遷移光源のパルスエネルギーに対する要求を大きく緩和できる見通しを得た。

本研究で得られた成果により、ミュオン水素原子の基底状態における HFS をレーザー分光する計画が実現に向けて大きく前進した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 S. Kanda et al.	4. 巻 1138
2. 論文標題 Measurement of the proton Zemach radius from the hyperfine splitting in muonic hydrogen atom	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics Conference Series	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1088/1742-6596/1138/1/012009	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 S. Kanda et al.	4. 巻 51
2. 論文標題 Development of an intense mid-infrared coherent light source for muonic hydrogen spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report	6. 最初と最後の頁 214
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 S. Kanda et al.	4. 巻 NuFact2017 122
2. 論文標題 Precision laser spectroscopy of the ground state hyperfine splitting in muonic hydrogen	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.22323/1.295.0122	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 S. Kanda, K. Ishida, K. Shimomura	4. 巻 NuFact2018 138
2. 論文標題 Precision spectroscopy of exotic atoms involving muons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.22323/1.341.0138	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 S. Kanda et al.	4. 巻 52
2. 論文標題 Negative muon spin rotation with low-density gas target under transverse magnetic field to solve the proton radius puzzle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report	6. 最初と最後の頁 180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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14件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 S. 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, Tokyo (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Measurement of the proton Zemach radius from the hyperfine splitting in muonic hydrogen atom
3. 学会等名 PSAS2018, Vienna (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Laser spectroscopy of the hyperfine splitting in muonic hydrogen atom by a measurement of decay electron asymmetry
3. 学会等名 Nucleon Spin Structure at Low Q: A Hyperfine View, Trento (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Precision Spectroscopy of Exotic Atoms Involving Muon
3. 学会等名 NuFact2018, Virginia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Laser spectroscopy of the ground-state hyperfine splitting in muonic hydrogen atom
3. 学会等名 Symposium for Muon and Neutrino Physics 2018, Osaka (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Development of instruments for the proton radius measurement at RIKEN", International workshop on the structure of the proton
3. 学会等名 International workshop on the structure of the proton, Yamagata (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神田 聡太郎
2. 発表標題 Residual polarization and hyperfine transition rate in muonic hydrogen
3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」キックオフシンポジウム、東北 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神田 聡太郎
2. 発表標題 Laser spectroscopy of the hyperfine splitting in muonic hydrogen
3. 学会等名 第9回Muon科学と加速器研究研究会、大阪
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神田 聡太郎
2. 発表標題 ミュオン水素原子のレーザー分光に向けたスピン回転実験
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会、福岡
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Negative muon spin rotation with low-density gas target under transverse magnetic field to solve the proton radius puzzle
3. 学会等名 MRM2019, Yokohama (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Measurement of the proton Zemach radius from the hyperfine splitting in muonic hydrogen utilizing muon spin repolarization with laser
3. 学会等名 Proton Radius 2019, Losini (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Laser spectroscopy of the hyperfine splitting in muonic hydrogen by a measurement of decay electron asymmetry
3. 学会等名 FAMU Collaboration Meeting, Trieste (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Laser spectroscopy of the hyperfine splitting in muonic hydrogen atom
3. 学会等名 FPUA2019, Okinawa (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Cascade de-excitation and spin-exchange collisions of muonic hydrogen atom
3. 学会等名 FPUA2020, Wako (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<http://ag.riken.jp/kanda/>
<http://research.kek.jp/people/kanda/>

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