

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K13862

研究課題名（和文）ポジトロニウムのレーザー冷却実現のための高速周波数シフト紫外パルスレーザーの開発

研究課題名（英文）Development of a pulsed laser with rapid frequency shift in ultraviolet region for realizing laser cooling of positronium

研究代表者

周 健治（Shu, Kenji）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：70881233

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）：最も精密な物理理論のひとつである量子電磁力学の検証と、宇宙から反物質が消えた謎の解明をすべく、電子とその反粒子である陽電子とが束縛してできた原子「ポジトロニウム（Ps）」を冷却可能なレーザーを開発した。Psは水素原子の約1000分の1しかない低質量性と、100ns程度の短い寿命を有するため、レーザー光の周波数・時間両領域における特性を従来にない方法で制御することが必要だが、本研究では光周波数変調技術の深化によりこれを解決した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、Psを1K以下の極低温へ冷却することが可能となり、Psの高い温度が大きな不確かさを生んでいた分光測定の高精度化や、原子コヒーレンスが向上することでPs干渉計の実現への応用が拓ける。これにより、暗黒物質の存在をはじめとする現代物理学の問題の解決や、反粒子にまつわる謎の解明が期待される。両者とも、新現象の発見の傾向が見られるなど、国内外の機関において熱心に研究がなされており、本研究は高い注目を集めると考えられる。

研究成果の概要（英文）：To testify quantum electrodynamics and solve the mystery that antimatter has disappeared from our universe, I developed a laser system for cooling positronium (Ps), which is the bound state of an electron and a positron - the antiparticle of electron. The laser was required to be well controlled in both time and spectral domains due to difficulties arising from that Ps has the light mass, which is approximately one thousandth of that of hydrogen atom, and short lifetime of approximately 100ns. The unprecedented control was achieved by enhancing a method to modulate an optical spectrum.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：反粒子 ポジトロニウム レーザー冷却 レーザー 光周波数変調 量子電磁力学 対称性

1. 研究開始当初の背景

電子とその反粒子である陽電子とで構成される束縛系—ポジトロニウム (Ps)—は、基礎物理学の研究を行うにあたり優れた特性をもつ水素様原子である。Ps は強い相互作用の影響を受けないレプトンのみで構成されるため、その遷移周波数等の性質は、最も精密な物理理論のひとつである量子電磁力学 (QED) を用いて、高精度に計算できる。このような計算結果と、正確な測定による実験結果とを比較すると、QED の高精度な検証が可能となる。わずかでも理論で説明できない実験結果が得られたら、暗黒物質の存在をはじめとする、現代物理学における謎の解明の端緒を開くことができる。また、Ps を構成する反粒子は、現在の宇宙において、粒子と比較してその数が圧倒的に少ないことが分かっているが、その原因は不明である。宇宙創成時に同数だけできた粒子と反粒子の数のバランスを崩す、何らかの非対称性が予想されている。Ps の性質を精密に調べることはすなわち反粒子の性質を解き明かすことにつながり、反物質が消えた謎の解明が期待される。

Ps は基礎物理学研究を行うために優れた性質をもつが、現代物理学の謎の解明に至らない原因のひとつに、冷却が困難であることが挙げられる。原子気体の温度が高いと、例えば遷移周波数の測定では、ドップラーシフトや動的シュタルクシフト、transit-time broadening 等の効果で、誤差の発生や不確かさの増大が生じる。現在得られる Ps の温度は数 100 K 程度の高温であり、多くの測定で精度を制限する要因となっている。

量子エレクトロニクスの分野において、原子気体の冷却手法に革新をもたらした手法にレーザー冷却が挙げられるが、この手法で Ps を冷却することは、長年不可能であった。これは、Ps の質量が水素原子の約 1000 分の 1 と小さいこと、また、100 ns 程度の時間でガンマ線に崩壊する不安定原子であることが原因である。後述の理由により、これらの特徴を有する Ps のレーザー冷却を実現するためには、波長 243 nm の紫外レーザーを用意し、その周波数・時間両領域での特性を Ps の冷却に最適化して制御する必要がある。そのような特性を有する光源を実現する手法を研究し、実際に構築することで、Ps を 1 K 以下の極低温まで冷却することが可能となり、レプトン系粒子反粒子対による精密科学の新しい展開が期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、Ps を反跳限界温度である 300 mK までレーザー冷却が可能なレーザーを開発することである。開発するレーザーは、Ps の Lyman- α 遷移を誘導する波長 243 nm の紫外パルスレーザーであり、以下の特徴を実現する：

- A) Ps を十分に冷却するために必要な、300 ns 程度の時間持続する。
- B) Ps の遷移周波数は、ドップラーシフトを受けるため速度に依存する。冷却に伴い減速する Ps の遷移周波数に追従するよう、レーザーの光周波数が時間変化する。

これらの特徴を実現するために、注入同期パルスレーザー共振器中に配置した周波数変調器による光周波数の深い変調を実現する方法を開発する。

3. 研究の方法

本研究に先立ち、Ps のレーザー冷却のために開発した chirped pulse-train generator (CPTG, K. Yamada, ..., K. Shu, and K. Yoshioka, Phys. Rev. Appl. **16**, 014009 (2021).) を発展させ、要求の性能を実現する。このレーザーは、注入同期 Ti:Sapphire パルスレーザーの共振器中に電気光学変調器 (EOM) を配置したものであり、先の要求 A (持続時間) を満たし、かつ光周波数が時間変化する動作 (要求 B) が得られている。一方、光周波数の変化率 (チャープレート) は、Ps の減速に伴う遷移周波数の変化に追従するための値と比べ 1 桁小さいため、周波数変化の起源である EOM による変調方法を大幅に改善する必要がある。レーザー動作の理論的解析により、EOM の変調深さを表すパラメータ β を 9 rad 程度まで大きくするために、周波数 236 MHz の RF 信号を 50 W 程度 EOM に印加すれば良いことが分かった。このような大きいパワーの RF 信号で EOM を駆動しつつ熱による EOM の損傷を回避するために、繰り返し周波数が 10 Hz のレーザー発振に同期し 20 μ s 程度の時間のみ RF 信号を印加することで低いデューティに落とす駆動方法を考案した。本研究ではまず、低デューティのパルス RF 信号を印加し EOM による深い光周波数変調が可能であるか検証した。次に、CPTG レーザー共振器中で EOM を同様の条件で駆動し、所望の特性が得られるか、2つの方法による時間分解分光測定により検証した。

4. 研究成果

A) EOM のパルス・低デューティ駆動による深い変調の実現

レーザー共振器中に配置する EOM を、周波数 236 MHz、ピークパワー 50 W のパルス RF 信号により駆動したとき、光周波数の深い変調が可能であるか検証した。EOM は、レーザー共振器中に配置するのに適した低挿入損失を実現できる、自由空間型 EOM を採用した。定常発振レーザーを EOM に入射し、パルス駆動時に生成されるサイドバンドの発生効率を測定することで、変調深さを評価する。図 2 に、EOM を駆動する RF 信号のピーク振幅の関数として、生成

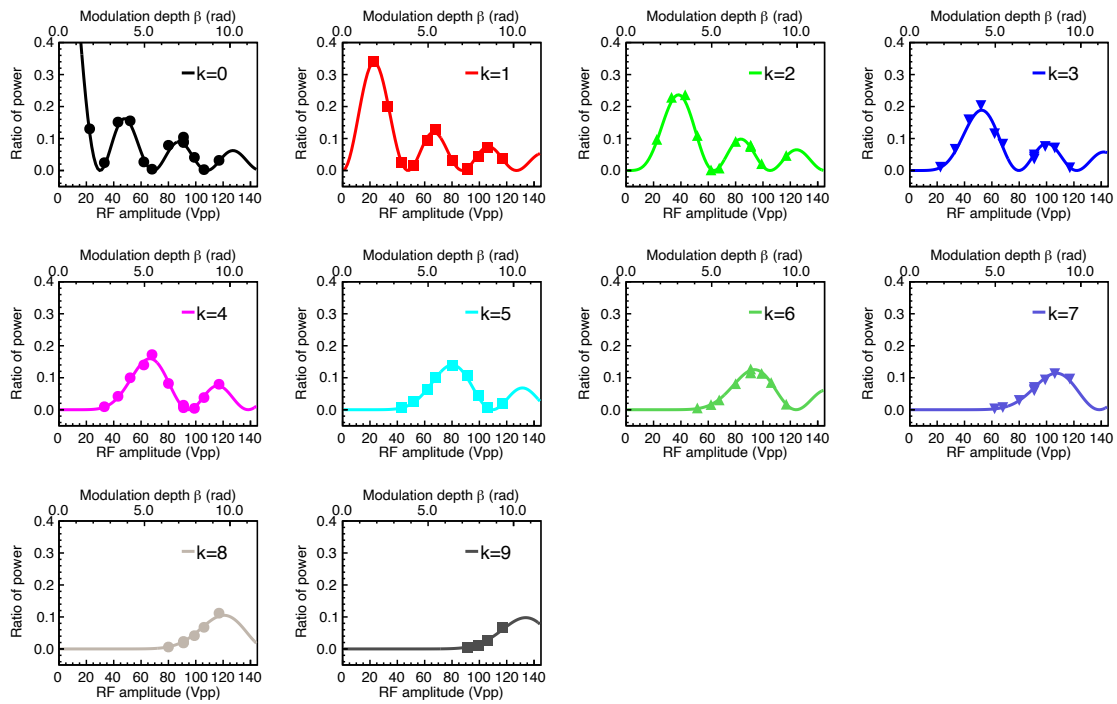


図 2 EOM を駆動する RF 信号の振幅の関数として表した、変調により発生したサイドバンドのパワーの入射パワーに対する比。実線はベッセル関数により表される理論的予想を示している。光周波数が駆動周波数の 9 倍の周波数分変調された、9 次のサイドバンドまでが観測されている。上部横軸には変調深さ β を表しており、要求された 9 rad 程度の変調が実現した。

された再度バンドのパワーの入射パワーに対する比を示す。RF 信号の振幅を大きくするにつれ高次の再度バンドが発生し、今回の測定では最大で 9 次のサイドバンドまで確認された。これは、光周波数が駆動周波数の 9 倍の周波数分変調された成分である。各サイドバンドの発生効率から、目標としていた $\beta=9$ rad の深い変調が実現したことが分かる。本研究から、定常駆動では損傷を避けられないような深い変調を、低デューティ・パルス駆動により自由空間型 EOM を用いても実現できることが明らかとなった。

B) レーザーの時間・周波数特性の評価

P_s の冷却過程から考えられる最適な特性として、本研究で開発した CPTG では、300 ns 程度の持続時間、500 GHz/ μ s 程度のチャープレート、そして、 P_s の 2P 励起状態での自然放出寿命である 3.2 ns 間で評価したレーザーのスペクトル幅が 10 GHz 程度であることが挙げられる。これら 3 つの特性を異なる手法の時間分解分光測定により評価し、目標の性能が実現しているか検証した。

レーザーの持続時間は光検出器によりパワーの時間発展を計測し評価した。測定結果を図 1 に示す。開発したレーザーは、音響光学素子 (AOM) の高速駆動により持続時間を制御できるようになっており、適切な設定とすることで、 P_s の冷却に必要な 300 ns の持続時間を実現できる (図 1 (a))。また、後述のように、レーザーのスペクトル特性を評価する時間分解分光測定のために、短い持続時間となるよう制御を施すことがあり、このときの結果は図 1 (b) である。

スペクトル特性のうち、短時間でのスペクトル幅は以下のように評価した：前述の持続時間制御方法のうち図 1 (b) に示した、可能な限り短い持続時間となるよう設定した上で、レーザーのスペクトル幅を測定する。スペクトル幅の測定は、ファブリ - ペローエタロンを周波数フィルターとして用いた。レーザーをエタロンに入射することを考える。入射角を変化すると、エタロンの共鳴周波数が変化し、透過率の高い光周波数を変化させられる。入射角を掃引しながらエタロンの透過率を測定することで、レーザーのスペクトルを測定できる。図 3 に測定結果を示す。エタロンの透過スペクトルの装置関数を評価し、その影響を差し引くと、レーザーのス

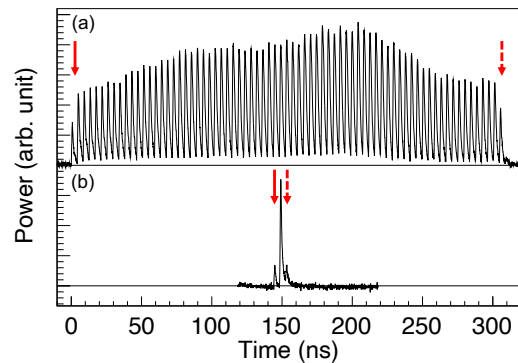


図 1 光検出器により測定したレーザーパワーの時間発展。持続時間は制御が可能である。(a) P_s の冷却に最適化し、300 ns の持続時間を実現できる。(b) 後述の時間分解分光測定のために最小の持続時間となるよう制御した場合。

ペクトル幅は半値全幅にて 8.9 GHz と評価された。この値から、Ps を高い効率で冷却できることが期待される。

チャープレートは、レーザーのスペクトルをストリークカメラにより時間分解測定し評価を行った。図 4 に測定した時間分解スペクトルを示す。時間とともにスペクトル中心は高周波側へ変化しており、冷却に伴い上昇する Ps の遷移周波数に追従する。変化は線形であり、フィッティングにより、チャープレートは 6.3×10^2 GHz/ μ s と推定される。この数値は Ps の冷却に必要な性能を上回るものであり、EOM を駆動する RF 信号のピークパワーを下げる方向で微調整することで、冷却に最適な値を実現することが可能である。

本研究により、CPTG における EOM の駆動を改善し深い変調を実現できることが明らかとなった。これを応用し構築した光源は Ps のレーザー冷却に最適な特性を有することを測定により確認することができた。本研究の成果は、Ps を極低温へ冷却し、基礎物理学研究に新展開をもたらすものと考えられる。

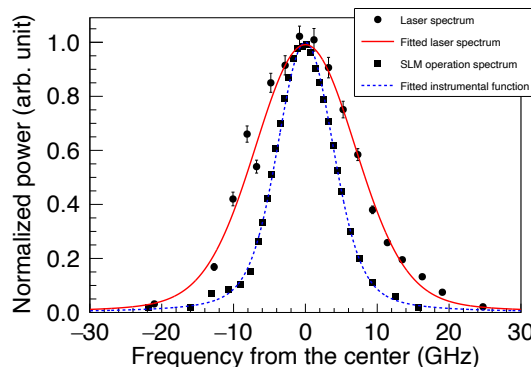


図 3 短い持続時間にて評価したレーザーのスペクトル。四角点はエタロンの装置関数を実測した結果を表し、丸点は開発したレーザーのスペクトル測定結果を表す。装置関数についてはフォークト関数を、レーザーのスペクトルについてはガウス関数に装置関数が畳み込まれた関数をフィッティングし、スペクトル幅を評価すると、半値全幅にて 8.9 GHz であった。

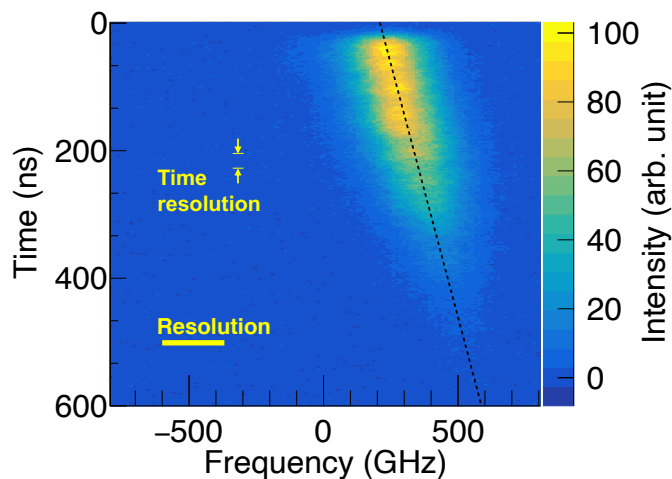


図 4 ストリークカメラにより測定したレーザーの時間分解スペクトル。時間とともに周波数が上昇している。周波数は線形に変化しており、フィッティングにより、チャープレートは 6.3×10^2 GHz/ μ s と推定される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamada K., Tajima Y., Murayoshi T., Fan X., Ishida A., Namba T., Asai S., Kuwata-Gonokami M., Chae E., Shu K., Yoshioka K.	4. 巻 16
2. 論文標題 Theoretical Analysis and Experimental Demonstration of a Chirped Pulse-Train Generator and its Potential for Efficient Cooling of Positronium	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014009--014022
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.16.014009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 周 健治、田島 陽平、吉岡 孝高
2. 発表標題 ポジトロニウム冷却のためのサブマイクロ秒紫外パルスレーザー光源の帯域増強
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会（2022年）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Shu, Y. Tajima, T. Kobayashi, R. Uozumi, E. Chae, K. Yoshioka, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B.E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada and T. Kai
2. 発表標題 Experimental progress in physics of cold positronium
3. 学会等名 Fundamental Physics Using Atoms 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 周 健治、白石 蒼馬、宮本 尚樹、本橋 悠人、田島 陽平、吉岡 孝高
2. 発表標題 ポジトロニウム冷却に最適化したサブマイクロ秒紫外パルスレーザー光源の帯域増強
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 Kenji Shu, Ryosuke Uozumi, Yohei Tajima, Kosuke Yoshioka, Eunmi Chae, Toshio Namba, Akira Ishida, Shoji Asai, Makoto Kuwata-Gonokami, Nagayasu Oshima, Brian E. O'Rourke, Koji Michishio, Kenji Ito, Kazuhiro Kumagai, Ryoichi Suzuki, Shigeru Fujino, Ken Wada, Izumi Mochizuki, Toshio Hyodo, Takeshi Kai
2. 発表標題 Experimental progress towards measuring antimatter gravity using positronium
3. 学会等名 23rd International Conference on General Relativity and Gravity (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京大学大学院工学系研究科附属光量子科学研究センター吉岡研究室ホームページ http://www.fs.t.u-tokyo.ac.jp/ ICEPP-tabletop、ボース-アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110</p>

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