

真空中におけるポジトロニウムのレーザー冷却 Laser cooling of positronium in vacuum

石田明¹, 橋立佳央理¹, 難波俊雄¹, 浅井祥仁¹, 五神真¹, 田島陽平¹, 小林拓豊¹, 魚住亮介¹,
周健治¹, 蔡恩美², 吉岡孝高¹, 大島永康³, オロークブライアン³, 満汐孝治³,
伊藤賢志³, 熊谷和博³, 鈴木良一³, 藤野茂⁴, 兵頭俊夫⁵, 望月出海⁵, 和田健⁵, 甲斐健師⁶

¹ 東京大学, 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

² 高麗大学, 〒02841 大韓民国ソウル特別市城北區安岩洞 5 街

³ 産業技術総合研究所, 〒305-8560 茨城県つくば市梅園 1-1-1

⁴ 九州大学, 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

⁵ 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 低速陽電子
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

⁶ 日本原子力研究開発機構, 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

Akira ISHIDA^{1,*}, Kaori HASHIDATE¹, Toshio NAMBA¹, Shoji ASAI¹,
Makoto Kuwata-GONOKAMI¹, Yohei TAJIMA¹, Takuto KOBAYASHI¹, Ryosuke UOZUMI¹,
Kenji SHU¹, Eunmi CHAE², Kosuke YOSHIOKA¹, Nagayasu OSHIMA³, Brian E. O'ROURKE³,
Koji MICHISHIO³, Kenji ITO³, Kazuhiro KUMAGAI³, Ryoichi SUZUKI³, Shigeru FUJINO⁴,
Toshio HYODO⁵, Izumi MOCHIZUKI⁵, Ken WADA⁵ and Takeshi KAI⁶

¹The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

²Korea University, Anam-dong 5, Seongbuk-gu, Seoul 02841, South Korea

³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki
305-8560, Japan

⁴Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8560, Japan

⁵Slow Positron Facility, Institute of Materials Structure Science,
High Energy Accelerator Research Organization,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

⁶Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195, Japan

電子とその反粒子である陽電子からなるポジトロニウム (Ps) は、純粋なレプトン系であるとともに反粒子を含む反物質系であるため、素粒子標準理論の精密検証や物質優勢の宇宙の謎に迫る研究に適した系である。これら検証や謎の解明のためには Ps の 10 K 以下への冷却が必須であるが、Ps は 142 ns と短い寿命で消滅しガンマ線になってしまうため、困難を極めている。我々はこれを高速レーザー冷却によって達成する計画であり、検出手法や Ps 生成手法、プロトタイプレーザーの開発を完了した。Ps レーザー冷却の予備実験を行ったところ、紫外レーザー照射による Ps 遷移率測定へのバイアスという問題が浮き彫りとなったため、本実験課題で当該問題を解決し、次年度以降の Ps レーザー冷却実験に向けた準備を完了した。

1 はじめに

ポジトロニウム (Positronium, Ps) は、電子 (e^-) とその反粒子である陽電子 (e^+) の束縛系であり、以下 2 つの観点から興味深い系である。

- (1) 純粋なレプトン系かつもともと軽い原子であるため、束縛系量子電磁力学 (Quantum electrodynamics, QED) の精密検証に適する。
- (2) 反粒子を含む反物質系であるため、物質・反物質の未知の非対称性の探索に適しており、「なぜ、宇宙に物質のみ残ったのか」という究極の謎を解く鍵となる。

(1) に関連し、Ps の $2S-2P$ 量子状態間エネルギー準位差の精密測定において、素粒子標準理論と測定値間に 4.2σ (σ は標準偏差) もの乖離が存在することが、2020—2021 年にかけてイギリスのグループによって報告された[1,2]。この乖離が本物なら、素粒子標準理論を超えた新しい物理現象の間接的な証拠になるため、より精度を向上させた実験による検証が必須である。精度を一桁向上させるには、Ps を 10 K まで冷却することによって Ps の運動量を量子制御し、超高精度量子計測技術を確立する必要がある。

一方、(2) に挙げた物質優勢の宇宙の謎を解明すべく、我々は反物質系である Ps と地球の間にはたらく

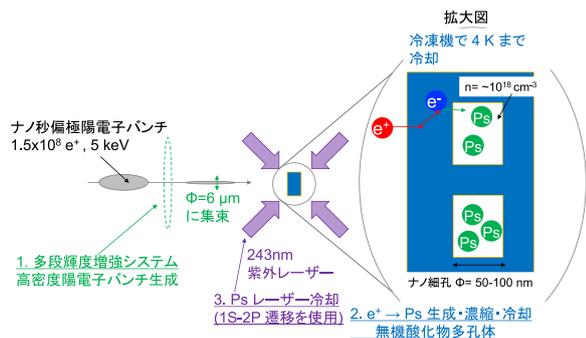


図1：Ps-BEC 実現スキーム。多段輝度増強システムで生成した高密度陽電子ビームを、ナノ細孔をもつ Ps 生成・濃縮・冷却無機酸化物多孔体に照射して高密度 Ps を生成し、熱化とレーザー冷却の2段階冷却で BEC 転移温度の 10 K 以下まで冷却する。(成果 11.より転載)

重力を精密測定する計画である。この測定には 10 K 以下の低温かつ 10^{18} cm^{-3} 以上の超高密度の Ps が発現する量子縮退、すなわち Ps のボース・アインシュタイン凝縮 (Bose-Einstein condensate, BEC) を活用する。Ps-BEC を反物質レーザーとして地球重力場中で干渉させることで、反物質にはたらく重力を測定することができる。さらに、Ps-BEC はガンマ線レーザーの光源としての活用も期待されている。BEC 状態の Ps が自己消滅する際に、511 keV のコヒーレントなガンマ線パルスを生じさせることができる。

上述のように、Ps の 10 K 以下への冷却は喫緊の課題であるが、Ps と物質との熱交換による冷却 (熱化冷却) では 100 K 程度までの冷却が限界である。これは、Ps が低温になるほど熱化による冷却効率が下がるためであり [3], Ps 消滅寿命の 142 ns より高速に冷却するには、Ps のレーザー冷却を実現することが必須である。我々は熱化冷却および $1S \rightarrow 2P$ 量子状態間遷移を利用したレーザー冷却の2段階冷却によって Ps の超高速冷却を実現するアイデアを提案しており、別途開発する高密度陽電子ビーム生成システムと組み合わせるスキーム (図 1) により Ps-BEC が実現可能であることを理論的に示し、冷却用レーザーの開発を進める [4] とともに、KEK 物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設 (Slow Positron Facility, SPF) B1 ビームラインにおいて Ps レーザー冷却実験に用いる測定手法の開発を進めてきた。2017 年度の 2017P009 課題で Ps 消滅ガンマ線の検出手法を確立し [5], 2018 年度—2019 年度の 2018G100 課題ではシリカ (酸化ケイ素, SiO_2) エアロゲル空洞中で $2P$ 状態にレーザー励起された Ps が瞬時に消滅することを発見するとともに、消滅の影響を受けない真空中での Ps レーザー冷却実現に向け、高効率 $1S \rightarrow 2P$ 遷移手法を確立した [6]。本報告では、これらの準備状況を受け、真空中での Ps レーザー冷却を実現すべく 2020 年度—2021 年度に実施した 2020G101 課題について記述する。

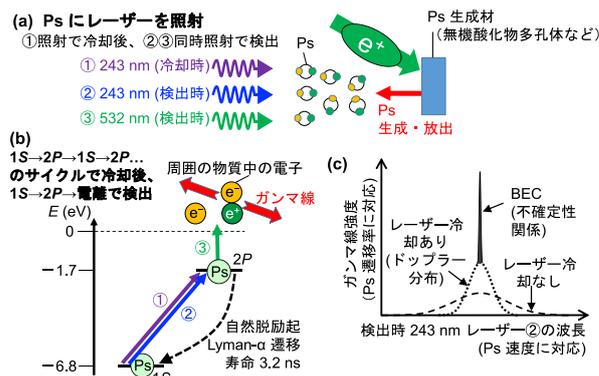


図2：実験原理。(a) 実験セットアップ概念図。(b) 関連する Ps のエネルギー準位図と各レーザーによる遷移。(c) 期待される Ps 速度分布のレーザー冷却による変化。(成果 15.より転載)

2 実験

図 2 に実験原理を示す。図 2 (a) の概念図に示したように、陽電子ビームを無機酸化物多孔体などに照射し、Ps を生成する。生成された Ps のうち真空中に放出されたものに対し、①243 nm (冷却時) の Ps 冷却用レーザーを照射して Ps を冷却する。図 2 (b) のエネルギー準位図に示したように、レーザー①による Ps の $1S \rightarrow 2P$ 励起と自然脱励起による $2P \rightarrow 1S$ 遷移のサイクルを繰り返すことで Ps をドップラー冷却する。冷却後、②243 nm (検出時) レーザーによる $1S \rightarrow 2P$ 励起と③532 nm (検出時) レーザーによる $2P \rightarrow$ 電離を同時に行うことで Ps を電離させる。電離した陽電子が周囲の物質中の電子と対消滅した際のガンマ線を検出することにより、レーザー②による $1S \rightarrow 2P$ 遷移率を測定することができる。レーザー②の波長を変えながらこの $1S \rightarrow 2P$ 遷移率を測定すると、図 2 (c) に示すような Ps ドップラー速度分布が得られる。レーザー①によって冷却された Ps では、冷却されなかった場合に比べて速度分布の幅が狭くなることを期待されるため、Ps 速度分布の形状変化から Ps レーザー冷却の効果を検証することができる。なお、この $1S \rightarrow 2P$ 励起を利用した Ps 温度測定手法は、Ps-BEC 検出法としても活用する。Ps-BEC 検出には、図 2 (c) に示すとおり、BEC 相転移が起きた際に Ps 速度分布がドップラー分布ではなく、Ps の空間的拡がりとの不確定性関係を反映した、より狭い分布に変化することを利用する。

図 3 に実験セットアップを示す。ターゲット直線導入機の先に取り付けた Ps 生成ターゲット (シリカエアロゲル) を真空チャンバー内に設置し、KEK-SPF-B1 ビームラインからの陽電子ビームを入射して Ps を生成させ、陽電子ビーム上流側に向けて真空中に Ps を放出させた。陽電子ビームの反対側から真空チャンバー内に入射したレーザーによって Ps の $1S \rightarrow 2P$ 遷移を引き起こし、Ps レーザー冷却

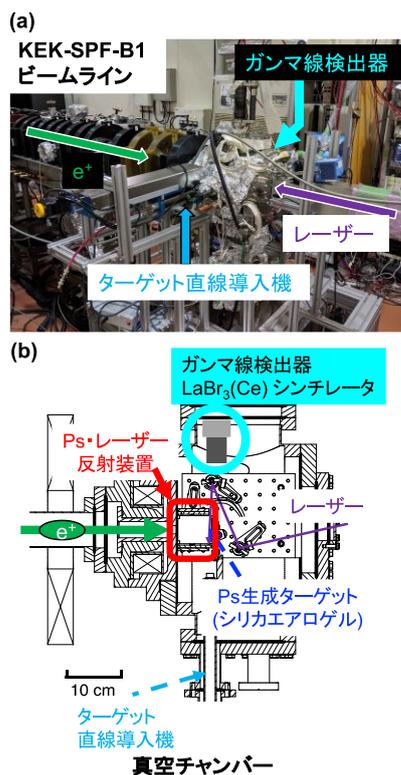


図3：実験セットアップ。(a) KEK-SPF-B1 ビームラインに設置した実験装置の写真。(b) 鉛直上から見た真空チャンバー断面図。(成果 15.より転載)

および Ps 温度測定を試みた。Ps とレーザーの相互作用領域を確保するため、Ps が放出される領域には Ps・レーザー反射装置[6]を設置した。反射装置は Ps を反射させるための鉛直上下に設置した石英(シリカ) ガラス板およびレーザーを反射させるための高反射率(98%) ミラーによって構成した。LaBr₃(Ce) シンチレータと光電子増倍管(Photomultiplier tube, PMT) からなるガンマ線検出器を反射装置近傍に設置し、Ps 消滅ガンマ線を検出した[5]。なお、反射装置によって高効率で Ps を 1S→2P 遷移させられることは 2018G100 課題で確認済みであり、レーザー②および③は当該課題で使用したもの[6]を用いた。Ps 冷却用レーザー①には、別途開発したプロトタイプレーザー[4]を用いた。

実験は KEK-SPF-B1 で行い、ビームタイムは 2020 年 11 月 29 日 17 時—12 月 7 日 17 時、2021 年 3 月 12 日 9 時—18 日 9 時、5 月 30 日 9 時—6 月 2 日 9 時、6 月 11 日 17 時—15 日 17 時、12 月 1 日 17 時—7 日 17 時、2022 年 3 月 3 日 1 時—7 日 17 時で、電子銃の高圧電源トラブルによるビーム中断 9 時間を除き合計 751 時間であった。陽電子ビームはビームエネルギー 5 keV、繰り返し 50 Hz、パルス幅 11 ns FWHM、強度 10^7 e⁺/s であった。

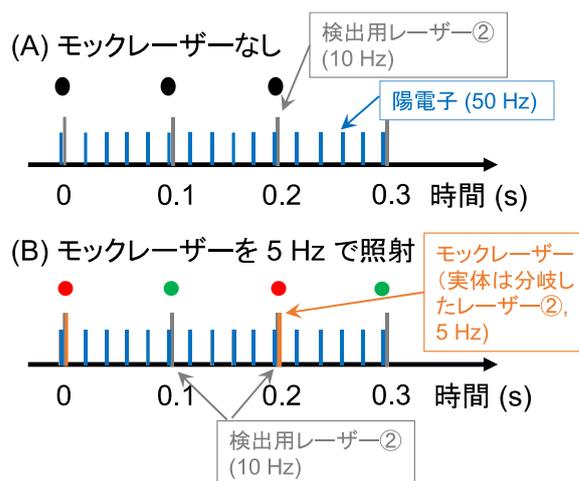


図4：紫外レーザー照射が Ps の 1S→2P 遷移率測定に対してバイアスを生じる可能性を検証する実験の時間構造。(A) 冷却用レーザー①を模したモックレーザー(実体は分岐したレーザー②)を照射しないときの時間構造。(B) モックレーザーを照射するときの時間構造。(成果 15.より転載)

3 結果および考察

Ps 検出用レーザー②および③によって測定した Ps の 1S→2P 遷移曲線、すなわち Ps 速度分布を、冷却用レーザー①照射の有無によって比較した。その結果、レーザー①照射時には、1S→2P 遷移率がレーザー②の波長によらずレーザー①非照射時の約 2 倍になるという、想定された速度分布変化とは異なる現象が観測された。その後の調査により、紫外レーザー照射によって 1S→2P 遷移率測定にバイアスを生じる可能性が疑われたため、冷却用レーザー①を使用せず、波長がほぼ同じである検出用レーザー②を用いた検証を行った。

検証は、検出用レーザー②を光路の途中で 2 つに分岐させ、一方を冷却用レーザー①を模した「モックレーザー」とし、他方を検出用レーザー②(パワーは元の 1/2)として使用することで行った。これにより、「冷却用レーザー①照射の有無」を「モックレーザー照射の有無」と読み替えた実験を行い、先に冷却用レーザー①照射により観測された 1S→2P 遷移率増大現象がモックレーザーで再現されるかを確認した。

検証実験の時間構造を図 4 に示す。モックレーザーを照射しない場合を図 4(A) に、照射する場合を図 4(B) に示した。(A), (B) とも陽電子パルスは 50 Hz で照射された。(A) では 10 Hz、すなわち陽電子パルス 5 回あたり 1 回の頻度で検出用レーザー②(パワー 1/2)を照射した。一方(B) では(A)に加えて、モックレーザーを 5 Hz、すなわち検出用レーザー②(パワー 1/2)パルス 2 回あたり 1 回の頻度で照射した。モックレーザーの実体は分岐したレーザー

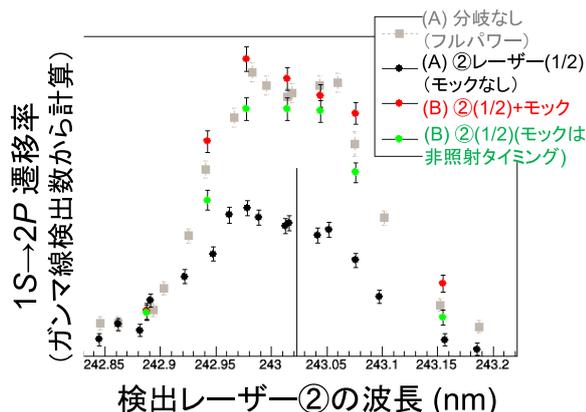


図5：モックレーザー照射の有無による Ps の 1S—2P 遷移曲線の変化。色の違いはレーザー照射条件の違いを示す。(成果 15.より転載)

②であるため元の照射頻度は 10 Hz であるが、回転ディスク式のチョッパーホイールによる光チョップを行うことで照射頻度を 5 Hz にした。

検証実験の結果を図 5 に示す。図 4 に示した(A), (B)それぞれの条件についてさらに2種類の照射条件に分け、計 4 種類のレーザー照射条件において Ps の 1S—2P 遷移曲線を測定した。(A) では、モックレーザー作成用の分岐がない条件 (条件 1: レーザー②フルパワー) および分岐をさせたがモックレーザーは一切照射しない条件 (条件 2: レーザー②パワー 1/2) で測定した。図 5 に示したように、条件 1 (灰色) での遷移率は条件 2 (黒色) での遷移率の約 2 倍であった。一方 (B) では、検出用レーザー②パワー 1/2 とモックレーザーが同時に照射されたタイミング (条件 3) , およびレーザー②パワー 1/2 のみ照射されモックレーザーは光チョップにより非照射となるタイミング (条件 4) での遷移率を比較した。条件 3 では実質的に条件 1 と同等のパワーのレーザー②が照射されることになり、確かに図 5 においても条件 1 (灰色) と条件 3 (赤色) は 1S→2P 遷移率が等しくなっている。図 5 でもっとも興味深いのは条件 4 (緑色) の結果であり、モックレーザーは非照射でレーザー②パワー 1/2 のみ照射されるタイミングであるにもかかわらず、同等パワーである条件 2 (黒色) ではなく条件 1 (灰色) や条件 3 (赤色) と同程度の 1S→2P 遷移率が観測された。

モックレーザーが照射されていないにもかかわらず、条件 4 においてモックレーザー照射時と同等の 1S→2P 遷移率が観測されたことから、紫外レーザー照射が Ps の 1S→2P 遷移率測定に対してバイアスを生じていることは明らかである。また、条件 4 の直前にモックレーザーが照射されるのは 0.1 s 前 (条件 3) であるため、バイアスは少なくとも 0.1 s 間以上続くことが判明した。

上記バイアスの原因として、紫外レーザー照射によって Ps ・ レーザー反射装置内の Ps 飛行領域に電場が形成され、検出用レーザー②および③によって

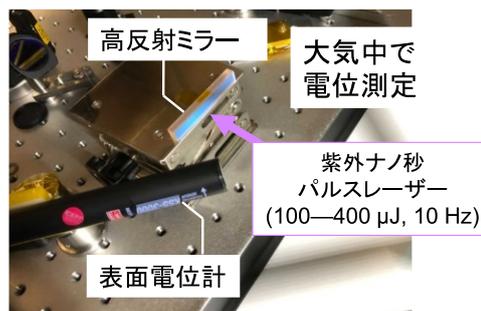


図6：紫外パルスレーザー照射による高反射ミラー表面電位の変化を測定する実験の様子。(成果 22.より転載)

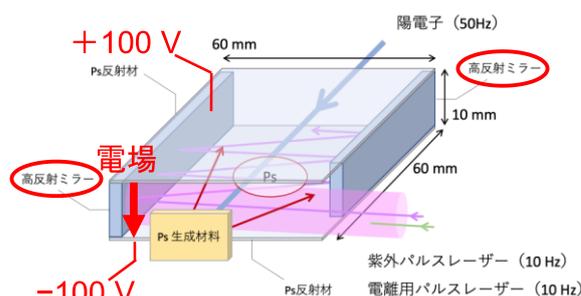


図7：Ps ・ レーザー反射装置に印加した電圧と形成した電場の模式図。(成果 22.より転載)

その領域内で Ps から電離した陽電子が、電場によって長時間真空チャンバー内を漂うようになることを疑った。なぜならば、図 5 の 1S→2P 遷移率測定には、陽電子ビーム照射後 1 μs—7 μs という Ps 寿命 (142 ns) に対して遅い時間領域内のガンマ線検出数を用いていたためである[6]。電場によって陽電子が真空中に滞留し周囲の物質と衝突するまでに時間がかかるようになると、実際には Ps の 1S→2P 遷移率が増大していなくても、遅い陽電子消滅ガンマ線イベントが増加し、遷移率が増大したように見えてしまうのである。

図 6 に、Ps ・ レーザー反射装置に用いている高反射率レーザー反射用誘電体多層膜ミラーに紫外レーザーを照射し、表面電位計で帯電の有無を調査した際の写真を示す。大気中での電位測定の結果、ミラーが負に帯電することが判明し、Ps ・ レーザー反射装置内で電離した陽電子の軌道を変化させる可能性があることが確かめられた。

そこで、ミラーの帯電による 1S→2P 遷移率測定へのバイアスを抑制する測定手法を新たに開発した。図 7 に示すように、Ps 反射用石英ガラス基板の内側表面にタングステン製メッシュを貼り、上下のメッシュに±100 V の電圧を印加し、陽電子ビーム軸 (陽電子は磁気輸送であるため磁場の軸と共通) およびレーザー反射面に対して垂直な向きに電場を形成した。これにより、電離後の陽電子が電場と磁場によってドリフトされ、短時間のうちに周囲の物質に衝

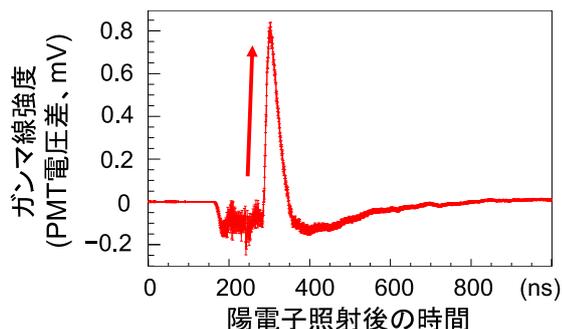


図8：Ps・レーザー反射装置内に図7の電場を形成した際のガンマ線検出器信号。複数の陽電子パルスおよびレーザーを照射した際の信号波形の平均値を用いた。ピーク電圧が $1S \rightarrow 2P$ 遷移率に対応する。(成果22.より転載)

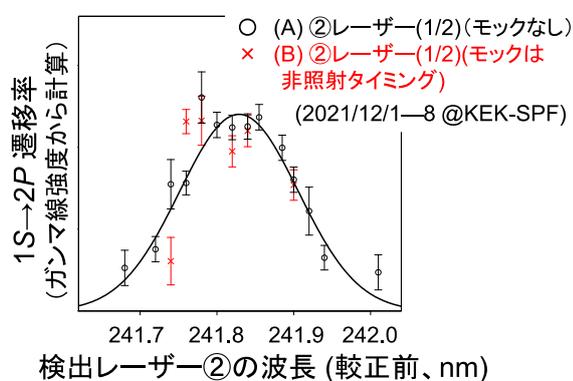


図9：図8のピーク電圧を $1S \rightarrow 2P$ 遷移率に対応させた場合における、モックレーザー照射の有無によるPsの $1S \rightarrow 2P$ 遷移率の変化。色の違いはレーザー照射条件の違いを示す。黒○は条件2に、赤×は条件4に相当する。(成果22.より転載)

突して消滅し、ガンマ線検出器によって検出されることが期待される。

図8に、図7の電場を形成したうえでPs検出用レーザー②および③を照射した際の、レーザー照射有無によるガンマ線検出器信号(PMT出力電圧)の差を、陽電子照射後の時間の関数として示す。パルスの立ち上がりタイミングがレーザー照射タイミングに相当する。形成した電場によってレーザー照射後短時間で電離陽電子を消滅させることで、鋭いピークを形成することに成功した。

図9に、図8のピーク電圧を $1S \rightarrow 2P$ 遷移率とみなし、図5と同様にモックレーザー照射の有無によるPsの $1S \rightarrow 2P$ 遷移率への影響を測定した結果を示す。図5の条件1-4のうち、条件2および条件4の測定を行った。図5では条件4の遷移率が条件2の場合の約2倍に増大していたが、図9では条件4と条件2で等しい遷移率が得られた。条件4と条件2は単一陽電子パルス内に限れば同一のレーザー照射条件であるため、遷移率は等しいはずである。図9

では、Ps・レーザー反射装置内に電場を形成したことでミラーの帯電による遷移率測定へのバイアスを取り除くことができたと考えられる。

以上のように、2020G101課題において、紫外レーザー照射によって生じる $1S \rightarrow 2P$ 遷移率測定へのバイアスを抑制できる測定手法を開発した。2022年度以降の2022G087課題において、開発した測定手法を適用し、Psレーザー冷却に挑戦する計画である。

4 まとめ

Psのエネルギー準位差や反物質にはたらく重力の精密測定、さらにはPs-BECの実現やPs-BECを光源としたガンマ線レーザーの実現のため、10 K以下にPsをレーザー冷却させる研究を、KEK-SPF-B1ビームラインにて行っている。2020年度—2021年度の2020G101課題において、紫外レーザー照射による $1S \rightarrow 2P$ 遷移率測定系へのバイアスを調査したところ、レーザー反射ミラーの帯電に起因して大きなバイアスが生じていたことが判明した。このバイアスを抑制する測定手法を開発し、2022年度以降の2022G087課題においてPsのレーザー冷却に挑戦するための準備を完了した。

謝辞

本研究の一部はJST創発的研究支援事業JPMJFR202L, JSPS科研費JP16H04526, JP17H02820, JP17H06205, JP17J03691, JP18H03855, JP19H01923, 公益財団法人松尾学術振興財団, 公益財団法人三豊科学技術振興協会, 公益財団法人光科学技術研究振興財団, 公益財団法人三菱財団, TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」TK17-046, TK19-016, 【文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)】JPMXS0118067246の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] L. Gurung *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 073002 (2020).
- [2] L. Gurung *et al.*, *Phys. Rev. A* **103**, 042805 (2021).
- [3] K. Shu, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, N. Oshima, B. E. O'Rourke and K. Ito, *Phys. Rev. A* **104**, L050801 (2021).
- [4] K. Yamada, Y. Tajima, T. Murayoshi, X. Fan, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, E. Chae, K. Shu and K. Yoshioka, *Phys. Rev. Applied* **16**, 014009 (2021).
- [5] A. Ishida *et al.*, PFACR 2017, 271 (2018).
- [6] A. Ishida *et al.*, PFACR 2019, 201 (2020).

成果

<受賞>

1. 魚住亮介, 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ学生奨励賞, 「ポジトロニウムのレーザー冷却を見据えたドップラー分光法の開拓」, 2022年3月8日。

< 報文 >

(国内雑誌)

2. 周健治, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 橋立佳央理, 石田明, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 難波俊雄, 満汐孝治, オロクブライアン, 大島永康, 鈴木良一, 伊藤賢志, 熊谷和博, 藤野茂, 望月出海, 和田健, 兵頭俊夫, 甲斐健師, 「シリカ空孔中でのポジトロニウム励起実験」, 陽電子科学 **16**, 31 (2021).

(学位論文)

3. 小林拓豊, 「真空中のオルソポジトロニウムのドップラー分光法の開発」, 修士(工学)論文, 東京大学 (2022)。
4. 橋立佳央理, 「ポジトロニウムのレーザー冷却を目指した高密度陽電子源の開発」, 修士(理学)論文, 東京大学 (2021)。
5. 田島陽平, 「ポジトロニウムのレーザー冷却の検証」, 修士(工学)論文, 東京大学 (2021)。

< 学術講演 >

(国際会議 招待講演)

6. A. Ishida, “Dense positronium formation for Bose-Einstein condensation”, 12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC 12.5), August 31, 2021, Internet.

(国際会議 一般講演)

7. K. Shu, “Experimental progress in physics of cold positronium”, Fundamental Physics Using Atoms 2021 (FPUA2021), August 5, 2021, Online.

[12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC 12.5), August 30—September 3, 2021, Internet.]

8. K. Shu, “Enhanced decay and line broadening of 2P ortho-positronium inside silica pores”.
9. R. Uozumi, “Development of a high-resolution probing laser suited for cold positronium spectroscopy”.
10. Y. Tajima, “Development of a chirped pulse laser for cooling positronium”.

(国内会議 一般講演)

11. 石田明, 「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」, 日本物理学会 2021年秋季大会, 2021年9月17日, オンライン開催。
12. 石田明, 「ボース・アインシュタイン凝縮実現のためのポジトロニウム冷却」, 第58回アイソトープ・放射線研究発表会, 2021年7月9日, オンライン開催。

[日本物理学会 第77回年次大会(2022年), 2022年3月15日—19日, オンライン開催]

13. 小林拓豊, 「ポジトロニウムのレーザー冷却実証に向けたドップラー分光法の開発」。
14. 魚住亮介, 「ポジトロニウムの高分解能速度分布測定法の開発」。
15. 石田明, 「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」。

[日本物理学会 第76回年次大会(2021年), 2021年3月12日—15日, オンライン開催]

16. 石田明, 「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」。
17. 周健治, 「ポジトロニウムのレーザー冷却実験」。

[令和2年度 京都大学複合原子力科学研究所 専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」, 2020年12月11日, オンライン開催]

18. 石田明, 「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(1)」。
19. 周健治, 「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(2)」。

[日本物理学会 2020年秋季大会, 2020年9月14日—17日, オンライン開催]

20. 石田明, 「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I」。
21. 橋立佳央理, 「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II」。

(国内会議 ポスター)

22. 魚住亮介, 「ポジトロニウムのレーザー冷却を見据えたドップラー分光法の開拓」, 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ, 2022年3月8日, オンライン開催。
23. 魚住亮介, 「Psのレーザー冷却の実証に向けた温度測定実験」, 2020年度量子ビームサイエンスフェスタ, 2021年3月10日, オンライン開催。

< 競争的資金 >

24. 石田明, 「反物質量子凝縮体によるガンマ線レーザーの実現」, JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202L, 20,000千円, 2021年4月—2024年3月。

* ishida@icepp.s.u-tokyo.ac.jp