

## ポジトロニウムのレーザー冷却 Laser cooling of positronium

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

<sup>1</sup> 東京大学, 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

<sup>2</sup> 産業技術総合研究所, 〒305-8560 つくば市梅園 1-1-1

<sup>3</sup> 九州大学, 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

<sup>4</sup> 物質構造科学研究所, 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

<sup>5</sup> 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<sup>1,\*</sup>, Kaori HASHIDATE<sup>1</sup>, Kyohei YAMADA<sup>1</sup>, Kenji SHU<sup>1</sup>, Toshio NAMBA<sup>1</sup>,  
Shoji ASAI<sup>1</sup>, Makoto Kuwata-GONOKAMI<sup>1</sup>, Yohei TAJIMA<sup>1</sup>, Eunmi CHAE<sup>1</sup>,  
Kosuke YOSHIOKA<sup>1</sup>, Nagayasu OSHIMA<sup>2</sup>, Brian E. O'ROURKE<sup>2</sup>, Koji MICHISHIO<sup>2</sup>,  
Kenji ITO<sup>2</sup>, Kazuhiro KUMAGAI<sup>2</sup>, Ryoichi SUZUKI<sup>2</sup>, Shigeru FUJINO<sup>3</sup>,  
Toshio HYODO<sup>4</sup>, Izumi MOCHIZUKI<sup>4</sup>, Ken WADA<sup>4</sup> and Takeshi KAI<sup>5</sup>

<sup>1</sup>The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo, 113-0033, Japan

<sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1 Umezono,  
Tsukuba, 305-8560, Japan

<sup>3</sup>Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8560, Japan

<sup>4</sup>Institute of Materials Structure Science (IMSS), 1-1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

<sup>5</sup>Japan Atomic Energy Agency (JAEA), 2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195,  
Japan

電子と陽電子の束縛系であるポジトロニウム (Ps) の新規低温量子凝縮相であるボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) を実現して究極のコヒーレンスを達成し、未知の物質・反物質非対称性の解明に利用することを目的としている。課題は Ps の寿命が 142 ns と短いことであり、本研究では高密度陽電子ビームによってナノ空孔中に生成した高密度 Ps を熱化冷却およびレーザー冷却によって超高速冷却することで Ps-BEC を実現する。本課題ではその肝となる Ps レーザー冷却実現に向け、陽電子ビームの時間的および空間的性質を向上させ、レーザー冷却の基礎過程である Ps の 1S→2P 遷移実験を行った。シリカエアロゲル空孔中では 2P 状態の Ps が瞬時に消滅することが判明したため、まず真空中における Ps レーザー冷却実現を目指し、レーザー多重反射装置を開発して真空中で 1S→2P 遷移実験を行い、遷移を飽和させるのに十分な Ps とレーザーの相互作用領域を確保することに成功した。今後、開発した多重反射装置を活用して真空中における Ps レーザー冷却を実現し、Ps-BEC 実現に必要な冷却手法を確立する。

### 1 はじめに

水素様原子の研究は基礎物理学の発展に大きく寄与し、基礎物理定数の決定にも重大な役割を果たしている。中でも、電子とその反粒子である陽電子の束縛系：ポジトロニウム (Ps) は、反物質を含むシンプルな系であるため、基礎物理学の検証、物質・反物質非対称性 (なぜ、宇宙に物質のみ残ったのか) の解明に有用である。

Ps の重力測定による反物質系での重力相互作用の解明や、Ps のエネルギー準位の超精密測定による量子電磁力学の精密検証を通じた、反物質による新たな真空・時空の研究を切り拓くためには、10 K 以下の低温かつ超高密度 ( $>10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) の Ps が発現する、反物質系で世界初の低温量子凝縮相であるボース・

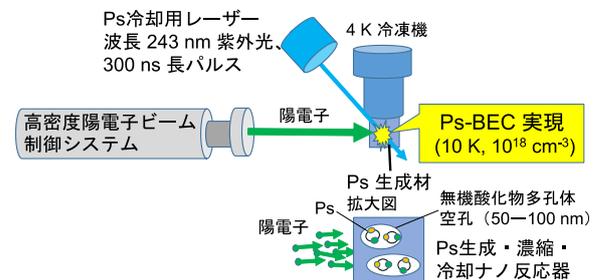


図 1 Ps-BEC 実現スキーム。高密度陽電子ビーム制御システムによって生成した高密度陽電子を Ps 生成・濃縮・冷却ナノ反応器に入射して高密度 Ps を生成する。ナノ反応器の空孔壁との衝突による熱化冷却とレーザー冷却を組み合わせた超高速 Ps 冷却により Ps-BEC を実現する。

アインシュタイン凝縮 (BEC) を実現することで究極のコヒーレンスを達成し、測定精度を飛躍的に向上させることが必須である。

図 1 に本研究における Ps-BEC 実現スキームを示す。Ps-BEC 実現の最大の課題は 142 ns という Ps 寿命の短さであり、本スキームでは高密度陽電子によって生成した高密度 Ps を超高速冷却することによって解決する [1]。まず、高密度陽電子ビーム制御システムによって生成した高密度陽電子を Ps 生成・濃縮・冷却ナノ反応器に打ち込み、高密度 Ps を生成する。ナノ反応器は 50—100 nm の空孔を持ち紫外線を透過する無機酸化物多孔体とし、4 K 冷凍機によって冷却する。生成後、空孔内に濃縮された Ps は空孔壁との衝突によって運動エネルギーを失い、300 K 程度まで熱化冷却される。さらに紫外レーザー（波長 243 nm、パルス幅 300 ns）を用いた Ps の 1S-2P 準位間遷移によるレーザー冷却（ドップラー冷却）による超高速 Ps 冷却 [2] を行い、Ps 生成から 350 ns 程度で 10 K、 $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の低温・超高密度状態を達成して Ps-BEC を実現する。2017 年度の 2017P009 課題において、レーザー冷却の前提となる、バンチあたり大量の陽電子が含まれるパルスビームでの測定に適したガンマ線検出法を試験し、適切なシンチレータと光電子増倍管 (PMT) の組み合わせとして LaBr<sub>3</sub>(Ce) シンチレータと低温動作 PMT (Hamamatsu R6041) を決定した [3]。本実験課題 2018G100 ではこの結果を受け、Ps-BEC 実現スキームに必要な Ps レーザー冷却技術の確立を目指し、測定精度向上のために陽電子ビームの時間分解能改善と集束を行った上で、シリカ (SiO<sub>2</sub>) エアロゲルを用いた Ps 生成材の空孔中に生成された Ps 及びシリカエアロゲル表面から真空中に放出された Ps について、243 nm 紫外レーザーを用いた 1S→2P 遷移実験を行った。

## 2 実験

図 2 に実験セットアップを示す。実験は KEK SPF-B1 で行い、ビームタイムは 2018 年 5 月 17 日 17 時—24 日 17 時、11 月 26 日 9 時—29 日 9 時、12 月 12 日 9 時—15 日 9 時、2019 年 3 月 18 日 9 時—25 日 9 時、5 月 30 日 17 時—6 月 6 日 9 時、11 月 15 日 17 時—18 日 1 時、2020 年 2 月 20 日 9 時—24 日 9 時 で、ビーム中断等を除き合計 676 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  $10^6 \text{ e}^+/\text{s}$  であった。以下に時間分解能改善のための陽電子ビームチョッパーおよび集束のための磁気レンズについて詳細を述べたのち、Ps の 1S→2P 遷移実験について記す。

### 2.1 陽電子ビームチョッパー

陽電子が長寿命成分である Ps を生成しないカプトンおよびコバルガラスにビームを照射したときの消滅ガンマ線の時間スペクトルを取得することによって陽電子ビームの時間構造を測定したところ、

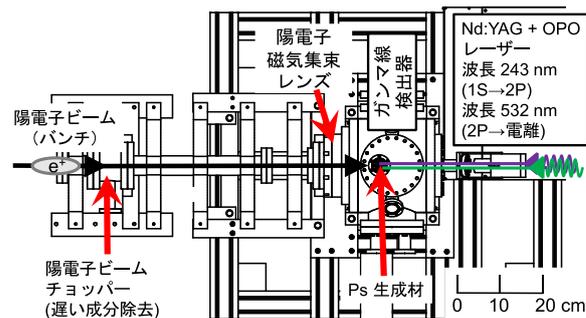


図 2 実験セットアップ。陽電子ビームは時間分解能改善のためのチョッパー及び集束のための磁気レンズを通して Ps 生成材に入射される。陽電子ビームとは逆側から Ps の 1S→2P 遷移用 243 nm レーザー及び 2P→電離用 532 nm レーザーを照射する。2017P009 課題で決定したガンマ線検出器によって Ps 消滅ガンマ線を検出する。

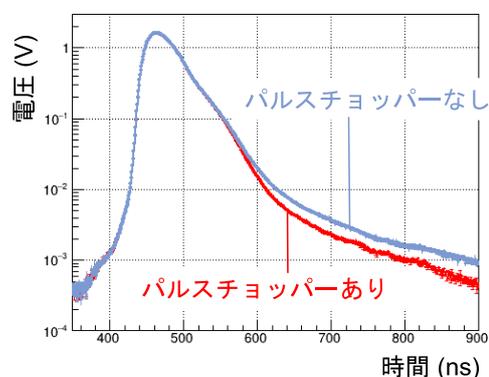


図 3 陽電子ビームチョッパーの有無による陽電子消滅ガンマ線の時間構造の変化。MCP に陽電子ビームを照射した際の PMT 平均出力波高を示す。チョッパーによってテール成分が 1/2 以下に減少した。

陽電子到着タイミング付近のピーク成分 (FWHM 16 ns) と、遅い時間のテール成分 (減衰時間 200 ns) が見られた。レーザー冷却実験においては冷却後に Ps を電離して陽電子の 2 光子消滅イベントを測定する必要があるが、Ps 寿命と同程度の時間で減衰するテール成分があると、Ps の信号と区別しにくいバックグラウンドとなり、測定精度悪化の原因となる。そこでテール成分を除去するための陽電子ビーム高電圧チョッパーを導入した。最大 +5,300 V まで印加できるメッシュを、接地したメッシュ 2 枚で挟み込む構造とし、欲しいピーク成分通過のタイミングで陽電子ビームエネルギー (5 keV) を上回る電圧をメッシュに高速印加することでテール成分を跳ね返して除去する仕組みになっている。

図 3 にチョッパーの有無による陽電子消滅ガンマ線の時間構造の変化を示す。チョッパーによってテール成分を半分以下に減少させることに成功した。残りのテール成分については、ピーク成分の波高に比例することや、ガンマ線エネルギースペクトルが

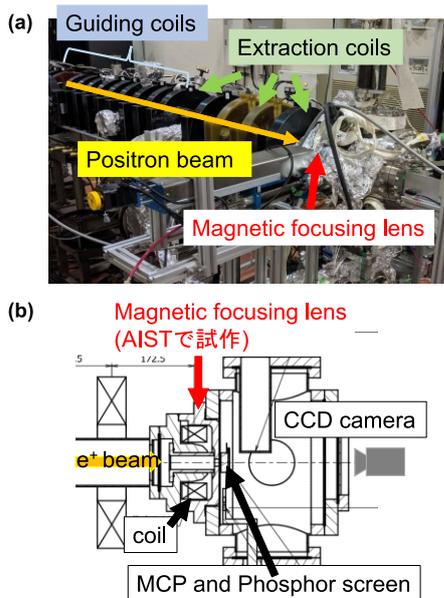


図4 陽電子磁気集束レンズ性能評価実験セットアップ。(a) 写真。左から入射する陽電子ビームを Guiding coils によって輸送し、Extraction coils によってレンズ位置でのビーム径を調整し、磁気集束レンズによって集束する。(b) 上から見た断面図。陽電子ビームを MCP に入射し、Phosphor screen 上のイメージを CCD カメラで撮影して集束後の陽電子ビーム形状を取得した。

当初のテール成分に見られるような 511 keV にピークを持つ2光子消滅スペクトルではなく、511 keV 以下の連続スペクトルに変化したことから、MCP から放出された Ps の3光子自己消滅によるものと推測される。以上から、導入した陽電子ビームチョッパーによって Ps レーザー冷却実験の精度悪化をもたらす陽電子ビームテール成分を除去できたと結論した。

## 2.2 陽電子磁気集束レンズ

ナノ空孔中における Ps レーザー冷却に必要なレーザーパワー密度を得るためにはレーザーを直径 1 mm 程度に絞る必要がある。レーザー冷却はレーザー照射領域のみで可能であるため、実験精度を高めるためには陽電子ビームも集束し、レーザー照射領域内の Ps 生成数を最大化する必要がある。陽電子ビームアパーチャーを用いた測定から陽電子ビーム直径は 5 mm (FWHM) 以上であることが分かっていたため、これを集束するための陽電子磁気集束レンズを試作して導入し、集束性能を評価した。

図4に産総研で試作した陽電子磁気集束レンズを用いた集束性能評価実験のセットアップを示す。レンズ通過後の陽電子形状を MCP および Phosphor screen によってイメージングし、CCD カメラで輝度分布を撮影することで集束後の陽電子ビーム形状を取得した。レンズはターゲット付近に急峻な勾配のある磁場分布をもち、実測した磁場分布は Poisson Superfish による計算でよく再現できた。

図5に集束後の陽電子ビーム形状測定結果を示す。図はコイル電流 0.28 A (470 AT) のときの結果であり、このときレンズ通過後の陽電子数を最大化することができた。またコイル電流 0.26 A のときビームは最も集束され、集束後のビーム径は 2.6 mm (FWHM) であった。セットアップの都合上、集束前のビーム強度やビーム径が測定できなかったため、現在、General Particle Tracer (GPT) を用いたシミュレーションによって実験結果を再現する初期ビーム径や陽電子のレンズ通過効率を求めるための解析を行っている。現在までに、初期ビーム径 20 mm 以下、陽電子ビームのレンズ通過効率 6%以上であることが分かっている。シミュレーションによる解析が終了次第、レンズ通過効率を高めつつ陽電子ビームをさらに集束するための陽電子集束レンズの設計改良を進めるとともに、実験装置を改良して初期ビームパラメータを測定できるシステムを構築する計画である。

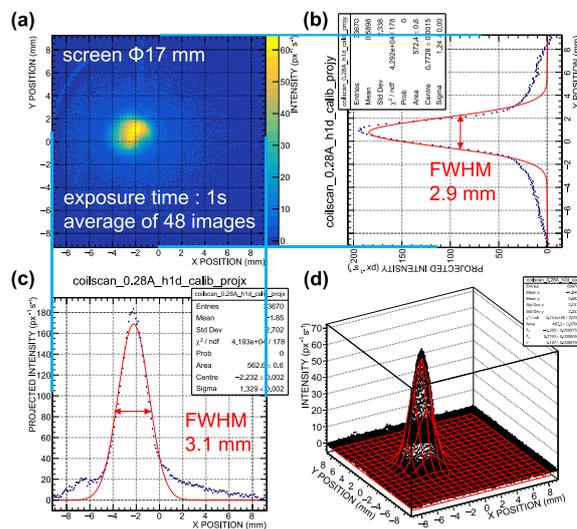


図5 陽電子磁気集束レンズによる陽電子集束結果 (コイル電流 0.28 A)。(a) 集束後の陽電子ビーム強度の2次元分布。(b) 縦軸 (Y 軸) に射影した1次元強度分布と正規分布によるフィット結果。(c) 横軸 (X 軸) に射影した1次元強度分布と正規分布によるフィット結果。(d) 2次元正規分布によるフィット結果。

## 2.3 Ps 生成材ナノ空孔中における 1S→2P 遷移実験

図6にPsの1S→2P遷移実験に関するエネルギー準位を示す。Ps レーザー冷却は 1S→2P 遷移・2P 自然脱励起のサイクルを繰り返すことで行うため、Psの1S→2P遷移はPsレーザー冷却の必須プロセスである。遷移実験セットアップは図4とほぼ同様で、MCP + Phosphor screen の位置に Ps 生成材を設置し、陽電子ビームの逆方向からレーザーを照射した。Ps 生成材には表面に緻密シリカ膜を形成した孔径 50 nm のシリカエアロゲル [4] を用いた。243 nm レーザ

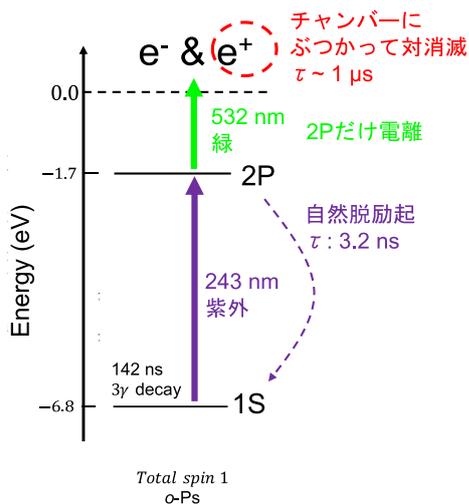


図 6 Ps の 1S→2P 遷移実験に関するエネルギー準位。1S→2P 遷移には 243 nm 紫外レーザーを用いる。2P 状態に励起された Ps を検出するため、紫外レーザーと同時に照射する 532 nm レーザーによって 2P 状態の Ps のみ電離し、陽電子の消滅ガンマ線を検出する。

には、Nd:YAG レーザー (Continuum Surelite I-10) の三倍波である 355 nm レーザーでポンプした OPO レーザー (Continuum Panther EX) の二倍波出力 (強度 300  $\mu J/pulse$ 、パルス幅 5 ns、繰り返し 10 Hz、 $\phi$  6 mm) を用いた。また、2P 状態の Ps (以下 2P-Ps) を検出するため 2P-Ps のみを電離する 532 nm レーザーには Nd:YAG の二倍波 (強度 8 mJ/pulse、パルス幅 5 ns、繰り返し 10 Hz、 $\phi$  6 mm) を用いた。

### 2.4 真空中における 1S→2P 遷移実験

第 3 節にて後述するように、シリカエアロゲル空孔中において Ps レーザー冷却実験を行うことが困難であることが判明したため、真空中で Ps レーザー冷却を実現することによる Ps-BEC 実現手法の原理検証実験を先に行うことにし、その前段階として真空中における 1S→2P 遷移実験を行った。図 7 に実験概念図を示す。Ps 生成材には、表面に緻密シリカ膜を形成せず開放孔をもつシリカエアロゲル [4] を用いた。真空中では Ps が 150 mm/ $\mu s$  程度の高速で飛行するため、レーザーとの相互作用領域が小さくなってしまふ。そこでレーザーを多重反射し、Ps も閉じ込めることによりレーザーと Ps の相互作用領域を確保する。レーザーおよび Ps 反射装置を製作し、レーザーを多重反射させることを可能にするとともに、真空チャンバーへのレーザー入射角を調整することでレーザーが多重反射せず Ps 放出領域を 1 回だけ通過する条件 (レーザー 1 回照射条件) での実験も可能とした。また、反射装置内にレーザー光を充満させるため、光学レンズによってレーザー径を  $\phi$  9 mm に調整した。

### 3 結果および考察

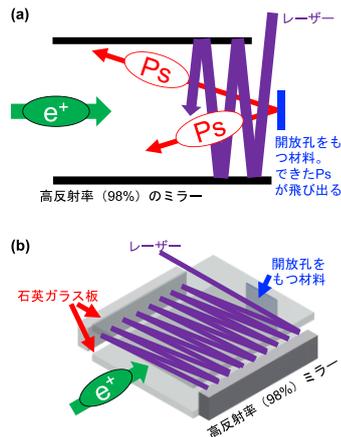


図 7 真空中における Ps の 1S→2P 遷移実験概念図。(a) 上から見た図。(b) 鳥瞰図。開放孔をもつ Ps 生成材から真空中に放出された Ps にレーザーを照射する。レーザーと Ps の相互作用領域を確保するため、レーザーは高反射率ミラーで多重反射させる。また、2枚の石英ガラス板で Ps をレーザー平面と垂直な方向に閉じ込める。

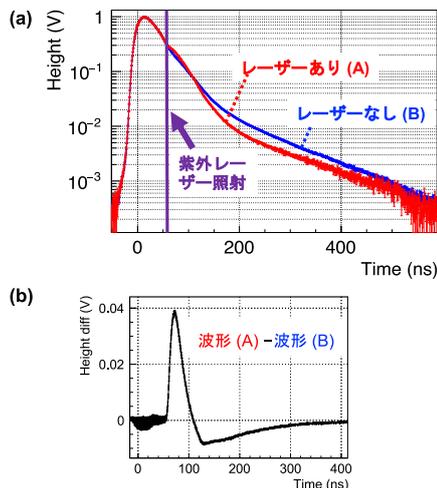


図 8 シリカエアロゲル空孔中における Ps の 1S→2P 遷移時の消滅ガンマ線時間スペクトル。縦軸は PMT の平均出力波高を示す。(a) 紫外レーザー照射有無による時間スペクトルの比較。(b) (a) 図における 2 つのスペクトルの差。紫外レーザー照射タイミング (陽電子照射後 60 ns) で消滅ガンマ線強度が上昇し、その後は Ps が消滅して残存 Ps 数が減少したことによるガンマ線強度減少が見られる。

シリカエアロゲル空孔中における 1S→2P 遷移実験での消滅ガンマ線時間スペクトルを図 8 に示す。243 nm 紫外レーザーのみ照射したところ、レーザー照射タイミングで消滅ガンマ線強度の上昇が見られた。これによりシリカエアロゲル空孔中では 2P-Ps が瞬時にガンマ線に消滅することが判明した。レーザー冷却には 1S→2P 遷移と 2P-Ps の自然脱励起を繰り返す必要があり、2P-Ps が瞬時にガンマ線に消滅することはレーザー冷却の阻害要因である。

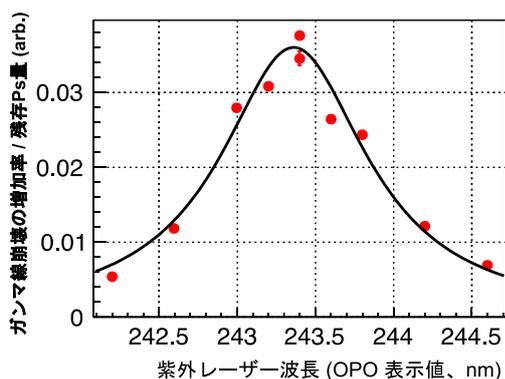


図 9 シリカエアロゲル空孔中における 2P-Ps 消滅率の遷移レーザー波長依存性。レーザー照射タイミングは陽電子の 60 ns 後。横軸は OPO の表示値で、精度は 1 nm である。縦軸は残存 Ps 量で規格化したガンマ線強度の増加率である。赤丸は測定結果で、縦軸については統計的不確かさのみ考慮し、横軸については波長の相対的な不確かさのみ考慮している。黒実線はローレンツ関数によるフィット結果。

図 9 に 2P-Ps 消滅率の遷移レーザー波長依存性を示す。ローレンツ関数によるフィット結果から、中心値は 1 nm の精度で 1S-2P 準位間エネルギーに一致し、遷移の共鳴幅は 1 nm であった。この幅は期待される自然幅 0.06 pm や運動エネルギー 1 eV の Ps のドップラー幅 0.5 nm に比べて有意に広い。仮にこの幅が 2P-Ps の寿命を反映したものとすると寿命は 30 fs となり、シリカエアロゲル中での平均自由時間 100 fs と比較しても短すぎる。これに関しては Ps の運動エネルギー依存性や空孔表面の Ps に対する仕事関数依存性を詳細に調査・検討中である。仮説としてはシュタルク効果が考えられ [5]、シリカエアロゲルの表面基組成や空孔径から見積もられる最大 40 mV/nm 程度の残留電場が空孔中で分布していることによって 1 nm の広い幅になっている可能性がある。

近年、イギリスのグループでもナノポーラスシリカ空孔中での 1S→2P 遷移実験が行われ、2P 状態の消滅率が高く、遷移幅が広いという報告があった [6] が、当該報告では 1S 状態の Ps 寿命が空孔径から推測される寿命より短く、シリカ空孔表面の不純物によってこれら現象が起こるといふ仮説が提案されていた。本課題で今回使用したシリカエアロゲルにおいては 1S 状態の Ps 寿命が空孔径から推測される寿命と一致しており [4]、当該報告のような不純物は存在しないと考えられたにもかかわらず、2P-Ps の高い消滅率と広い遷移幅が今回測定されたことで、シリカ空孔表面の不純物によるという仮説は棄却された。今後、さらに本現象を詳細に調べて原理を解明し、その知見を基に 2P-Ps が消滅しない Ps-BEC 実現ナノ材料開発を行う計画である。

真空中における 1S→2P 遷移実験での消滅ガンマ線時間スペクトルを図 10 に示す。シリカエアロゲル空孔中と異なり、紫外レーザーのみ照射した場合に

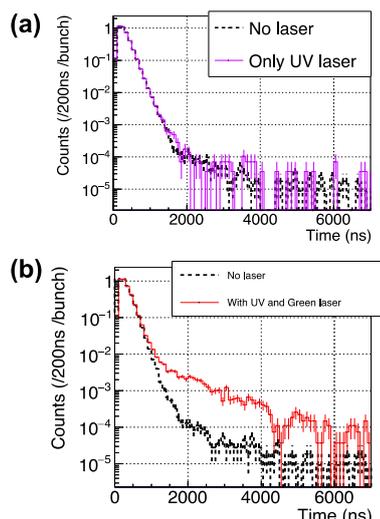


図 10 真空中における Ps の 1S→2P 遷移時の消滅ガンマ線時間スペクトル。縦軸は規格化した消滅ガンマ線検出数を示す。レーザー照射タイミングは陽電子の 200 ns 後。(a) 紫外レーザーのみ照射した際の、レーザー照射有無による時間スペクトルの比較。(b) 紫外レーザーと同時に 532 nm レーザーを照射した際の、レーザー照射有無による比較。

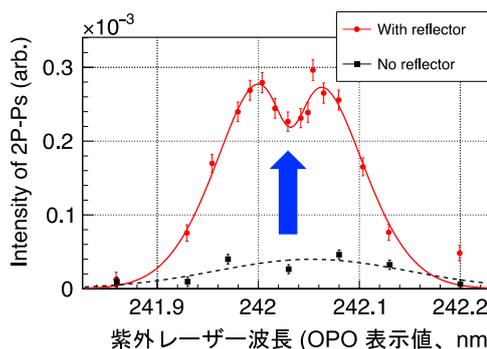


図 11 真空中における 1S→2P 遷移率の紫外レーザー波長依存性。レーザー照射タイミングは陽電子の 200 ns 後。横軸は OPO の表示値であり、精度は 1 nm である。縦軸は残存 Ps 量で規格化したガンマ線強度の増加率である。赤はレーザー多重反射条件、黒はレーザー 1 回照射条件での測定結果で、縦軸については統計的不確かさのみ考慮し、横軸については波長の相対的な不確かさのみ考慮している。赤実線および黒破線はドップラー効果を考慮した理論計算によるフィット結果。多重反射による 1S→2P 遷移率の増大 (青矢印) が見られた。

はレーザー照射によるガンマ線検出率の増加は見られず、2P-Ps の消滅は見られなかった。一方、2P-Ps のみ電離するための 532 nm レーザーを同時に照射した場合には、レーザー照射による 1 μs 以降の長寿命成分の増大が見られた。この時間は典型的な陽電子の運動エネルギーと周囲の物質までの距離から考えられる陽電子寿命と一致することから、2P-Ps の電

離によって生じた陽電子が周囲の物質中の電子と対消滅した信号であると考えられる。

レーザー照射によるガンマ線強度の増加率を  $1S \rightarrow 2P$  遷移率とみなし、紫外レーザー波長依存性を測定した結果を図 11 に示す。レーザー多重反射条件およびレーザー1 回照射条件のいずれの測定結果も、ドップラー効果を考慮した理論計算によって説明できた。また多重反射条件では 1 回反射条件に比べて遷移率が高く、多重反射させたことで飽和吸収によるラムディップも観測することができた。これにより本反射装置によって Ps の  $1S \rightarrow 2P$  遷移を飽和させるのに十分な Ps とレーザーの相互作用領域を確保できることが示された。今後は 2020G101 課題において本装置を用いた真空中におけるレーザー冷却を実現し、Ps-BEC 実現スキームの原理検証を行う。

#### 4 まとめ

Ps-BEC を実現し、究極のコヒーレンスを活用して未知の物質・反物質非対称性を解明することを目指している。Ps-BEC 実現の肝となる Ps レーザー冷却実現に向けて、まず陽電子ビームチョッパーと陽電子磁気集束レンズを導入し、陽電子ビームの空間的・時間的性質を改善した。その上で、レーザー冷却の基礎過程である Ps の  $1S \rightarrow 2P$  遷移実験を行った。シリカエアロゲル空孔中における実験では  $2P$ -Ps が瞬時に消滅し、かつ遷移の共鳴幅が 1 nm と広いことが判明した。これは Ps レーザー冷却の阻害要因となる。そこで、まず真空中でのレーザー冷却を実現し Ps-BEC 実現の原理検証を行うことにした。真空中で  $1S \rightarrow 2P$  遷移実験を行った結果、多重反射装置を導入することにより遷移を飽和させるのに十分な Ps・レーザー相互作用を達成することに成功した。今後、この多重反射装置を活用して真空中での Ps レーザー冷却を実現するとともに、ナノ反応器中における  $2P$ -Ps 消滅現象の原理を解明し、 $2P$ -Ps が消滅しない新規 Ps-BEC 実現ナノ反応器開発を行う。

#### 謝辞

本研究の一部は 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」TK19-016 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] A. Ishida, K. Shu, T. Murayoshi, X. Fan, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B. E. O'Rourke and R. Suzuki, *JJAP Conf. Proc.* **7**, 011001 (2018).
- [2] 山田恭平, “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高速冷却光源の開発”, 修士論文, 東京大学 (2020).

- [3] A. Ishida *et al.*, *PFACR* 2017, 271 (2018).
- [4] 周健治ほか, “物質反物質非対称性探索を目指したポジトロニウムのレーザー冷却”, *Photon Factory NEWS* **37** No. 2, 23—26 (2019).
- [5] 周健治, “Laser Excitation of Confined Positronium in Porous Materials for Rapid Cooling”, 博士論文, 東京大学 (2019).
- [6] B. S. Cooper *et al.*, *Phys. Rev. B* **97**, 205302 (2018).

#### 成果

##### <受賞>

1. 周健治, 学生奨励賞、2018 年度量子ビームサイエンスフェスタ、2019 年 3 月。

##### <学術講演>

- (国際会議 招待講演)
  2. A. Ishida, “Experimental progress towards positronium Bose-Einstein condensation”, 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS2019), October 31, 2019, Nara, Japan.
  3. A. Ishida, “Experimental progress towards positronium Bose-Einstein condensation”, 8th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP2019), August 26, 2019, Crete, Greece.  
(国際会議 一般講演)
  4. A. Ishida, “Recent progress towards positronium Bose-Einstein condensation”, 15th International Workshop on Positron Beam Techniques and Applications (SLOPOS-15), September 2, 2019, Prague, Czech Republic.
  5. K. Yamada, “Recent Progress towards Positronium Bose-Einstein Condensation”, The 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2019), March 4, 2019, Okinawa, Japan.  
[4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS2019), November 1, 2019, Nara, Japan]
  6. K. Yamada, “Development of cooling laser for positronium Bose-Einstein condensation”.
  7. K. Hashidate, “Development of focusing lens for high-density positron beam”.
  8. K. Shu, “Excitation of positronium by laser for efficient cooling”.  
[18th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-18), August 22, 2018, Orlando, USA.]
  9. K. Shu, “Development of cooling system for positronium”.
  10. A. Ishida, “Positron focusing system and positronium thermalization measurement for realizing positronium Bose-Einstein condensation”.
- (その他)
  11. 国内会議 招待講演 1 件、一般講演 20 件、ポスター 4 件、セミナー 2 件。成果や発表資料等は [https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page\\_id=110](https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110) にまとめている。

\* [ishida@icepp.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:ishida@icepp.s.u-tokyo.ac.jp)