

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

周健治¹, 山田恭平¹, 橋立佳央理¹, 石田明¹, 難波俊雄², 浅井祥仁¹, 五神真¹,
田島陽平³, 蔡恩美³, 吉岡孝高³, 大島永康⁴, オロークブライアン⁴, 満汐孝治⁴,
伊藤賢志⁴, 熊谷和博⁴, 鈴木良一⁴, 藤野茂⁵, 兵頭俊夫⁶, 望月出海⁶, 和田健⁷, 甲斐健師⁸

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 東京大学素粒子物理国際研究センター, ³ 東京大学大学院工学系研究科,

⁴ 産業技術総合研究所, ⁵ 九州大学グローバルイノベーションセンター, ⁶ 高エネルギー加速器研究機構,

⁷ 量子科学技術研究開発機構, ⁸ 日本原子力研究開発機構

Laser Cooling of Positronium to Search for Matter-Antimatter Asymmetry

Kenji SHU¹, Kyohei YAMADA¹, Kaori HASHIDATE¹, Akira ISHIDA¹, Toshio NAMBA², Shoji ASAI¹,
Makoto KUWATA-GONOKAMI¹, Yohei TAJIMA³, Eunmi CHAE³, Kosuke YOSHIOKA³,
Nagayasu OSHIMA⁴, Brian E. O'ROURKE⁴, Koji MICHISHIO⁴, Kenji ITO⁴, Kazuhiro KUMAGAI⁴,
Ryoichi SUZUKI⁴, Shigeru FUJINO⁵, Toshio HYODO⁶, Izumi MOCHIZUKI⁶, Ken WADA⁷, Takeshi KAI⁸

¹ Graduate School of Science, University of Tokyo, ² International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo,

³ Graduate School of Engineering, University of Tokyo, ⁴ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,

⁵ Global Innovation Center, Kyushu University, ⁶ High Energy Accelerator Research Organization,

⁷ National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, ⁸ Japan Atomic Energy Agency

Abstract

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 低速陽電子実験施設にて行っている, ポジトロニウムのレーザー冷却実験について紹介する。ポジトロニウムは, 電子とその反粒子の陽電子によって構成される束縛系であり, その性質を精密に調べることで, 物質反物質非対称を探索し, 宇宙から反物質が消えた謎に迫ることができる。精密測定にとって重要なブレイクスルーとなるのが, ポジトロニウムのレーザー冷却である。本研究では, 冷却に最適化したポジトロニウム生成ターゲットとレーザー光源を開発し, 世界初となるポジトロニウムのレーザー冷却実現を目指している。

1. はじめに

我々の住む宇宙ができた直後は物質と反物質が同じだけあったと考えられている。しかし, 今では見渡す限りにおいてほとんどが物質で形作られており, 反物質はめったにみることができない。この不均衡は電荷の符号の違いだけでは説明できず, 非対称性に根ざしていると考えられ, 世界中で盛んに反物質が詳しく調べられ, 物質と比較されている。例えば, KEK ではクォークと反クォーク間の非対称性を精密に調べる Belle II 実験が進んでいる。我々の研究グループも反物質が消えた謎の解明に挑戦している。そのために選んだのが, 電子とその反粒子, 陽電子で構成される束縛系—ポジトロニウム (Ps) —である。

Ps が反物質の性質を調べるのに適しているのは, それがレプトンだけで構成されるシンプルな構成のためである [1]。そのおかげで物性値を高い精度で計算でき, その結果と精密実験との比較から既知理論とのズレを見出し, 未知の現象を探し当てることが期待される。そして, この“シンプルさ”を最大限に活かすには実験の信頼性を高めることが重要になる。Ps 内部エネルギーの準位差測定を例にあげると, これまでは高温の Ps を使っていたため, Ps の激しい運動に起因する不定性により測定精度は十分

ではなく, 電子と陽電子との間の質量に差があるか判定するまでにはいたっていない [2]。我々の目下の課題は, Ps の素性をよくするために数 K まで低温にするための Ps レーザー冷却を実現することである。この技術によりエネルギー準位差の測定精度を飛躍的に向上でき, 例えば, 地球と陽電子の間に“反”重力効果がはたらくかどうか判別できると期待される [3]。

さらに, この冷却技術と高密度化技術とを組み合わせると, 反物質系で初となる Ps のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) が実現できる [4, 5]。そして究極的には, Ps-BEC, すなわち“反物質レーザー”による原子干渉計を利用した反物質の運動の精密測定 [6] や, BEC 状態の Ps を 511 keV ガンマ線レーザーに変換 [7] することによる高精度・高効率のインフラ非破壊検査のための次世代光源の実現など, 基礎応用両面において革新的な成果が期待される。このように, Ps のレーザー冷却実現は, 反物質研究にとどまらず, 物理学研究の新たな扉を開く野心的なテーマである。本稿では我々のグループが KEK にて進めている, パルスレーザーを用いた Ps 冷却実験についての概要や Ps 生成実験結果, 今後の展望について述べる。

2. KEK 低速陽電子実験施設におけるパルスレーザーを用いたポジトロニウムのレーザー冷却

Ps の冷却を実現するためにドップラー冷却法というレーザー冷却を利用する。これは原子の光共鳴波長より少しだけ長い波長のレーザー光を照射することにより、原子を冷却する手法である。ドップラー効果により、レーザー光と対向して運動する原子のみが光波長を短く感じることで共鳴が生じ、レーザー光を吸収する。このとき、吸収した光の波長よりも、放出した光の波長の方が平均すると短いので、運動エネルギーが減少し、冷却される。Ps のレーザー冷却は、2つの理由により難しい。まず、Ps は、電子と陽電子との対消滅により、スピン 3 重項である *ortho*-ポジトロニウム (*o*-Ps) の場合 142 ns の寿命でガンマ線に崩壊する不安定原子であるため、安定原子に用いるような、蓄積しながら徐々に冷やすといった手法が使えない。さらに、Ps の質量は水素原子の約 1/1000 と非常に小さく、高速で運動するため、ドップラー効果による光波長のシフトが大きい。300 K の Ps が持つ波長 243 nm の Lyman- α 吸収線はドップラー効果により 0.1 nm 程度も広がるので、効率的な冷却のためには、レーザー光が様々な波長を含む必要がある。これら 2つの課題を解決するために、サブ μ s の持続時間を持つ広帯域パルスレーザー光源を開発している [8]。発振方式をパルスにするのは、冷却に必要なおよそ 300 ns 間にエネルギーを集中することで、広帯域に光パワーを分散しつつ、短時間での高速冷却に十分な光パワーを確保するためである。この光源の繰り返し周波数は 10 Hz 程度になるため、Ps も同程度の繰り返しで、レーザー光と同期してパルスの生成しなければならない。KEK 低速陽電子実験施設 (SPF) では、Table 1 に示すスペックを持つ繰り返し周波数が 50 Hz の短パルス陽電子を得ることができる。共同利用施設としてパルスレーザーと同期可能な陽電子を供給しているのは、現在世界中で SPF のみであろう。我々は 2 課題 2017P009, 2018G100 を申請・採択され、SPF-B1 ビームラインで実験を進めている。B1 ビームラインは汎用実験ポートであり、ユーザーが自身で設計したチャンバーを接続することができる。

Fig. 1 に B1 ビームラインの様子を、Fig. 2 に我々が接続したチャンバーの断面図を示す。加速器上流側からやってくる陽電子を、レーザー光の照射範囲と同程度であるおよそ 4 mm 径に磁気コイルで集束し、Ps 生成ターゲットに照射する。陽電子はターゲット中の電子をはぎとり、Ps を形成する。紫外レーザーは陽電子トリガーに同期し、陽電子照射方向に対向してターゲットに照射される。陽電子照

Table 1 Specification of slow-positron beam with the short-pulse mode at KEK-SPF

Number of Positrons	$10^5 e^+ / \text{bunch}$
Repetition	50 Hz
Pulse width	10 ns
Beam energy	0.1 - 35 keV

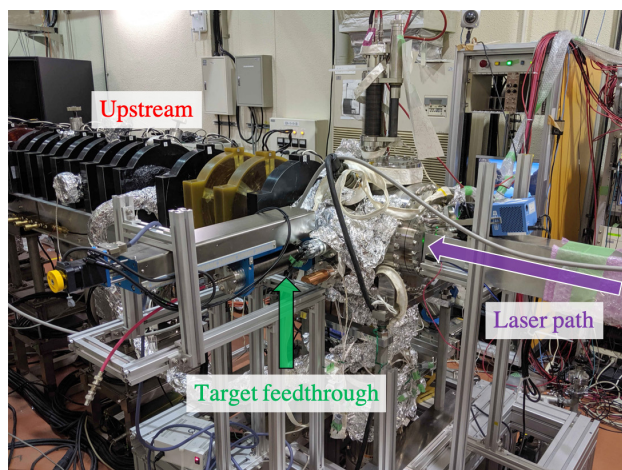


Figure 1 SPF-B1 beamline with an experimental chamber

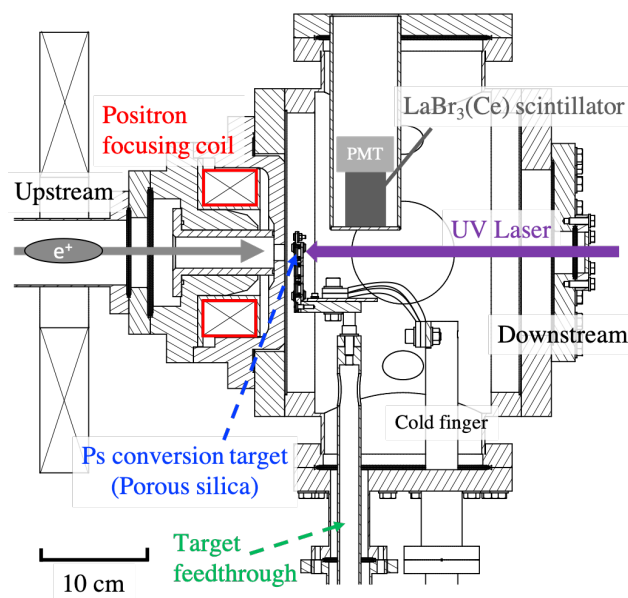


Figure 2 Cross sectional view of the chamber

射後に発生する崩壊ガンマ線を LaBr₃(Ce) シンチレータで検出することにより、Ps が生成、冷却されたことを確認する。なお、Ps 生成ターゲットを冷却することでも、取り出される Ps の温度を下げるができる。これまでの実験により、Ps 生成の確認、紫外レーザー照射による Ps の Lyman- α 遷移の観測に成功している。

3. ポーラスシリカターゲット中に閉じ込められた Ps の生成

Ps 冷却のために最適化したレーザー光源を開発していることを紹介したが、陽電子に電子を供給し Ps を生成するためのターゲットにも工夫が必要である。前述の通り Ps は 300 K で平均速さ 80 $\mu\text{m}/\text{ns}$ という高速で運動するため、空間的に閉じ込めなければ、冷却に必要な 300 ns の間にレーザー光の照射された数 mm の領域から逃げてしまう。我々は、ナノ空孔に Ps を生成し閉じ込めるポーラスシリカターゲットを開発し、SPF にて Ps 生成試験を実

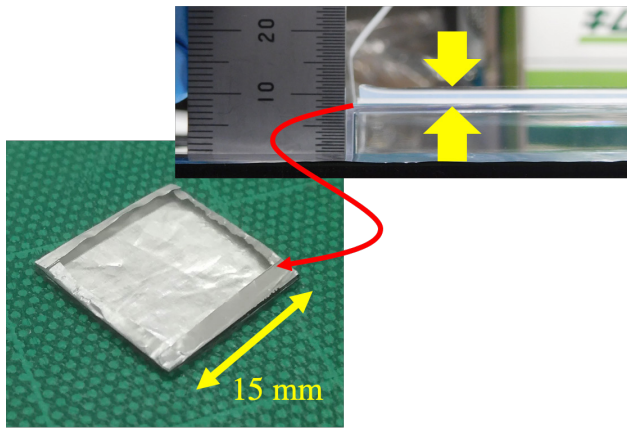


Figure 3 Right top: Silica aerogel seen from its side. Rayleigh scattering makes it looked in pale blue color. Thickness at the edge becomes larger due to tension during the production. Left bottom: Aerogel cut for mounting. The top surface is capped with non-porous silica film. An aluminum foil is surrounding the gel just for easy handling.

施, 閉じ込められた Ps の生成を確認した。このターゲットは、アモルファス酸化ケイ素 (SiO_2 , シリカ) で構成された多孔質の表面に, Ps 放出を防ぐ緻密膜を形成したものである。多孔質材料として, Fig. 3 に示す厚さ $500 \mu\text{m}$, 密度 0.1 g/cm^3 のシリカエアロゲルを用いた。空孔径はおおよそ 50 nm , 空隙率は 95% 以上と, ナノ空孔を多数持つ非常に疎な材料である。緻密膜の厚さは 75 nm であり, テトラエトキシシラン (TEOS) と酸素との混合気体を用いたプラズマ化学気相成長 (CVD) によりシリカで形成した。緻密シリカ膜の側から陽電子を照射すると, 5 keV のエネルギーを持つ陽電子はエネルギーを失いながら緻密シリカ膜を貫通, 入射表面から数 μm の深さにて多孔質中を拡散する。拡散長も数 μm の距離である [9]。拡散の間, 入射した陽電子のうちおおよそ 5 割が電子をはぎとり, $o\text{-Ps}$ を形成する。Ps はシリカに対し負の親和性を持つ, すなわち, 真空中にいた方が低いエネルギーを持つため [10], 空孔中に放出された後は, 周りを覆うシリカのバルク中に戻ることはない。シリカエアロゲルの空孔は互いに連結した構造を持つため, Ps が拡散中に入射表面に達することもあるが, 緻密シリカ膜がフタとしてはたらき, 多孔質中から飛び出してしまうことを防ぐ。こうして Ps をナノ空孔に保持し, レーザー光照射領域に留めることができる。なお, シリカエアロゲルは紫外光をレイリー散乱してしまうが, $500 \mu\text{m}$ と薄くすることで, 使用する 243 nm の波長にて 8 割以上の透過率を確保している。このため, 陽電子照射面と反対面から紫外レーザーを照射しても, Ps まで光を十分透過させることができる。

期待通りの Ps 閉じこめ効果は Ps の崩壊寿命を測定して確認した。Ps がシリカに囲まれた空孔中に存在する場合, Ps 中の陽電子とシリカ表面にある電子との間に対消滅が発生し, 寿命が短くなる。この消滅現象は Pick-off 消滅と呼ばれる。空孔が小さいほど Pick-off 消滅率が大きくなる

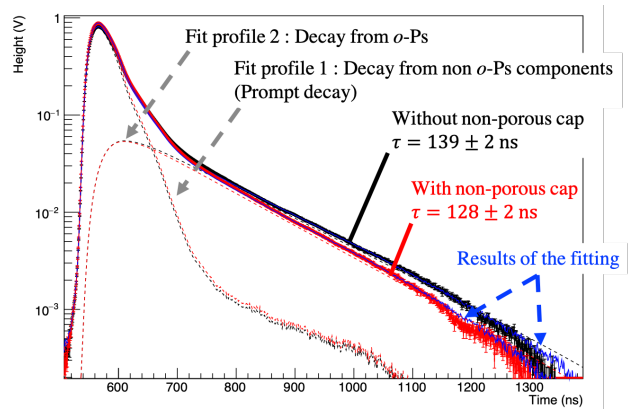


Figure 4 Output waveforms of PMT by detecting decaying gamma rays. Averaged waveforms with around 30,000 shots are drawn. Each result of the fitting is a sum of the corresponding fit profile 1 and fit profile 2.

ため, Ps の寿命からそれを閉じ込めている空間のサイズが分かる [11, 12]。Fig. 4 に, **SPF-B1** ビームラインにて短パルス陽電子を緻密シリカ膜の有無が異なる 2 種類のポーラスシリカターゲットに照射して得られた PMT 出力波形平均を示す。これらの波形から Ps 崩壊寿命を求める。シンチレータが検出する崩壊ガンマ線には, $o\text{-Ps}$ が崩壊した成分に加え, $o\text{-Ps}$ を形成せず照射後 1 ns 足らずで崩壊する成分 (Prompt 崩壊と呼ばれる) が含まれる。まず, ターゲットとして Ps を形成しないことが知られるカプトンを用いることで, Prompt 崩壊によって得られる波形を取得した。Fig. 4 中の Fit profile 1 は, こうして得られた波形をスケールしたものであり, 陽電子ビームの時間構造とシンチレータの応答とが畳みこまれたものとなる。 $o\text{-Ps}$ からの崩壊ガンマ線波形は, Fit profile 1 と指数関数を畳みこんだものと推定する (Fig. 4 中の Fit profile 2)。2 成分の強度と Ps 寿命をフリーパラメータとし, シリカターゲット波形をフィッティングすることで, Ps 寿命を計算する。膜有りの場合, 寿命値として $128 \pm 2 \text{ ns}$ が得られ, 空孔径と Ps 寿命の関係から空孔径がおおよそ 50 nm だと分かる。一方, 膜無しの場合, 寿命値は $139 \pm 2 \text{ ns}$ であり, 真空中の Ps 寿命と無矛盾である。これらにより, 製作した緻密膜付きポーラスシリカターゲットを用いることで空間的に閉じ込められた Ps の生成に成功したことを確認できた。

4. 今後の展望

レーザー冷却実現に向けた次のステップは, 閉じ込められた Ps の Lyman- α 遷移共鳴幅と消滅率を測定し計算と比較し, レーザー冷却が有効かどうかの検証を行なうことである。原子の運動が制限された場合, 実効的なドップラー効果の大きさが小さくなる [13]。今回用いた 50 nm の空孔に閉じこめたときのドップラー効果の大きさが, 計算通りレーザー冷却が有効な範囲内にとどまるか, 確かめる必要がある。また, Ps をシリカ空孔中で Lyman- α 遷移させると消滅率が大きくなる現象も報告されている [14]。製法・

空孔径が異なる我々のターゲットでも同様の現象が起こるかどうかが、検証する。Fig. 1, 2 に示した通り、紫外レーザーを照射するシステムは既に構築しており、市販の光パラメトリック共振器レーザーを用いた Lyman- α 遷移観測実験を行った。共鳴中心波長である 243 nm 付近で Lyman- α 遷移が起こったことを確認しており、現在共鳴幅や消滅率を求めるため結果を精査している。結果として閉じ込めによる効果が強すぎるということが分かった場合、空孔径の大きいターゲットに変更するなどの対策をとる。その後、東大で開発している Ps 冷却用レーザーを KEK へ輸送、設置する計画であり、Ps レーザー冷却の早期実現を目指している。

5. まとめ

低温 Ps を用いることで物質反物質非対称性探索の高度化などを目的し、Ps のレーザー冷却実現に取り組んでいる。Ps 冷却を可能とするパルスレーザー光源、Ps 生成・閉じ込めターゲットの開発を進めており、短パルス陽電子の得られる KEK SPF-B1 ビームラインにて実験を行っている。ターゲットとしてポーラスシリカターゲットを製作し、Ps がナノ空孔に閉じ込められたことを確認した。今後、閉じ込めが Lyman- α 遷移にもたらす効果の検証、冷却用レーザー光源の開発、設置を進めるなど、早期の Ps レーザー冷却実現に向け研究を加速していく。また、本研究は共同利用実験課題（2017P009, 2018G100）によって行われた。実験遂行にご協力いただいた皆様に感謝いたします。

引用文献

- [1] S. G. Karshenboim, Phys. Rep. **422**, 1 (2005).
- [2] M. S. Fee, S. Chu, A. P. Mills, R. J. Chichester, D. M. Zuckerman, E. D. Shaw, and K. Danzmann, Phys. Rev. A **48**, 192 (1993).
- [3] P. Crivelli, D. A. Cooke and S. Friedreich, Int. J. Mod. Phys.: Conf. Series **30**, 1460257 (2014).
- [4] P. M. Platzman and A. P. Mills, Phys. Rev. B **49**, 454 (1994).
- [5] K. Shu, X. Fan, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami, J. Phys. B **49**, 104001 (2016).
- [6] D. B. Cassidy and A. P. Mills, physica status solidi (c) **4**, 3419 (2007).
- [7] H. K. Avetissian, A. K. Avetissian, and G. F. Mkrtchian, Phys. Rev. Lett. **113**, 023904 (2014).
- [8] K. Shu, T. Murayoshi, X. Fan, A. Ishida, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B. E. O'Rourke, and R. Suzuki, J. Phys.: Conf. Series **791**, 012007 (2017).
- [9] K. Ito and Y. Kobayashi, Materials Science Forum **445-446**, 307 (2004).
- [10] Y. Nagashima, Y. Morinaka, T. Kurihara, Y. Nagai, T. Hyodo, T. Shidara, and K. Nakahara, Phys. Rev. B **58**, 12676 (1998).

- [11] T. L. Dull, W. E. Frieze, D. W. Gidley, J. N. Sun, and A. F. Yee, J. Phys. Chem. B **105**, 4657 (2001).
- [12] K. Wada and T. Hyodo, J. Phys.: Conf. Series **443**, 012003 (2013).
- [13] D. B. Cassidy, M.W. J. Bromley, L. C. Cota, T. H. Hisakado, H.W. K. Tom, and A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett. **106**, 023401 (2011).
- [14] B. S. Cooper, J.-P. Boilot, C. Corbel, F. Guillemot, L. Gurung, L. Liskay, and D. B. Cassidy, Phys. Rev. B **97**, 205302 (2018).

(原稿受付日：2019年6月22日)

著者紹介

周健治 Kenji SHU



東京大学大学院理学系研究科

博士課程3年

〒113-0033 東京都文京区本郷

TEL: 03-3815-8384

FAX: 03-3814-8806

e-mail: kshu@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

最近の研究：ポジトロニウムのレーザー

冷却。