

ポジトロニウムレーザー冷却のための新しいシリカキャビティと
ガンマ線検出手法の試験

Test of new silica cavity and gamma-ray detection method
for positronium laser cooling

石田明^{1,*}, 周健治¹, 村吉諄之¹, 難波俊雄¹, 浅井祥仁¹, 蔡恩美¹, 吉岡孝高¹,
大島永康², オロークブライアン², 満汐孝治², 伊藤賢志², 熊谷和博², 藤野茂³,
兵頭俊夫⁴, 望月出海⁴, 和田健⁵, 川合健太郎⁶

¹ 東京大学, 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

² 産業技術総合研究所, 〒305-8560 つくば市梅園 1-1-1

³ 九州大学, 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

⁴ 物質構造科学研究所, 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

⁵ 量子科学技術研究開発機構, 〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

⁶ 大阪大学, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

Akira ISHIDA^{1,*}, Kenji SHU¹, Tomoyuki MURAYOSHI¹, Toshio NAMBA¹, Shoji ASAI¹,
Eunmi CHAE¹, Kosuke YOSHIOKA¹, Nagayasu OSHIMA², Brian E. O'ROURKE²,
Koji MICHISHIO², Kenji ITO², Kazuhiro KUMAGAI², Shigeru FUJINO³, Toshio HYODO⁴,
Izumi MOCHIZUKI⁴, Ken WADA⁵ and Kentaro KAWAI⁶

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

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

³Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8560, Japan

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

⁵National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), 1233 Watanuki,
Takasaki, Gunma, 370-1292, Japan

⁶Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan

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 を 10 K 以下の低温まで冷却すれば、Ps のエネルギー準位の超精密測定やスピン偏極陽電子ビームを用いた反物質を含む系で世界初のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) を実現できる。1S-2S 状態間エネルギー準位差の超精密測定をすれば、量子電磁力学の精密検証、陽電子に働く重力効果の検証、電子と陽電子の質量比の最高精度での決定など物質・反物質対称性の検証ができる。また BEC を実現すれば、コヒーレンシーを利用して原子干渉計を用いた反物質重力測定・弱い等価原理の検証や対消滅ガンマ線を用いたガンマ線レーザーの開発などが可能になると期待される。

Ps の冷却は、その崩壊寿命が 142 ns (スピン 3 重項=オルソ Ps の場合) と非常に短いため難しい。我々は Ps の高速冷却を可能とする新しい方法を提案し、これにより BEC が実現可能であることを理論的に示した [1-3]。想定する BEC 実現のセットアップを図 1 に示す。この方法のポイントは、低温の多孔質シリカ (SiO₂) の孔中に Ps を生成し特殊な紫外レーザー光を照射することで反物質初のレーザー冷却を行うことである。これを可能とするために、紫外光に透明かつ高い Ps 生成率及び長い Ps 寿命をもつ新しいシリカ材料が必要である。

本実験では Ps のレーザー冷却の予備実験として、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手法を試験し、適切なシンチレータと光電子増倍管 (PMT) の組み合わせを調べた。また試作した新規シリカガラス材料の有用性も調べた。

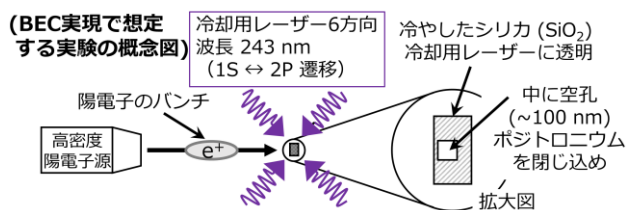


図1：BEC 実現で想定する実験の概念図 [1-3]。高密度陽電子源からの偏極陽電子のバンチを冷やしたシリカターゲットに打ち込み、Ps を生成する。そこに波長 243 nm の紫外レーザーを照射して高速レーザー冷却する。

2 実験

図2に測定セットアップ概念図を示す。測定はKEK SPF-B1で行い、ビームタイムは2017年12月17日9時~19日9時、2018年3月6日1時~8日9時、2018年3月8日17時~9日9時で、合計120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で、MCP + Phosphor Screenによって測定した試料位置でのパルス幅は16 ns FWHM、サイズはφ6 mm (2σ. 途中でφ5 mmのアパーチャを通して)であった。

Ps 生成率・寿命を測定するシリカターゲットを真空チャンバー内に取り付けた。試料は、Ps を生成しないカプトン、Ps 生成率50%のシリカエアロゲル、試作した新規シリカガラス材料各種の計6つを用意した。真空を破ることなく測定試料を替えるため超高真空用マニピュレーター(直線導入機)を用いた。シリカガラスへ低速陽電子を入射し Ps を生成した。シリカで Ps が生成された場合は長寿命崩壊ガンマ線が発生するため、ガンマ線検出器 (LaBr₃(Ce) 又はプラスチックシンチレータとファインメッシュ PMT 又は低温動作用 PMT (Hamamatsu R6041) の組み合わせ) で検出したガンマ線強度から Ps 生成率・寿命を求めた。サンプルの高電圧バイアスを -5 kV ~ +4.8 kV の間で変化させることによってビームエネルギーを 0.2 keV ~ 10 keV の間で変えながら測定し、Ps 生成率・寿命の変化を調べ、最適な陽電子ビームエネルギーを調査した。データはデジタル化を用いて、陽電子がサンプルに照射された時刻を基準に -120 ns ~ +1090 ns の間の全信号波形を記録した。実験チャンバー内真空度は 7×10^{-7} Pa であった。

データは比較的新しい手法であるシングル・ショット法(電流モード。SSPALS (Single-Shot Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy) と呼ばれる)及び従来の TAC (Time-to-Amplitude Converter) 形式の2通りで解析し、結果を比較した。レーザー冷却実験時にはバンチあたり大量のガンマ線が検出されるため、PMT の信号波形の平均値そのものを陽電子消滅の時間プロファイルとみなす SSPALS を用いるが、今回は検出効率の低いセットアップであったためプロンプト (Ps などの長寿命成分にならず即時消滅する陽電子) 以外はパイルアップしない。そのためオフラインで discriminator をかけて TAC 形式でのイベ

ント数カウントによる解析も同時に行い、SSPALS によって従来法と同じ結果が得られるかを確認した。

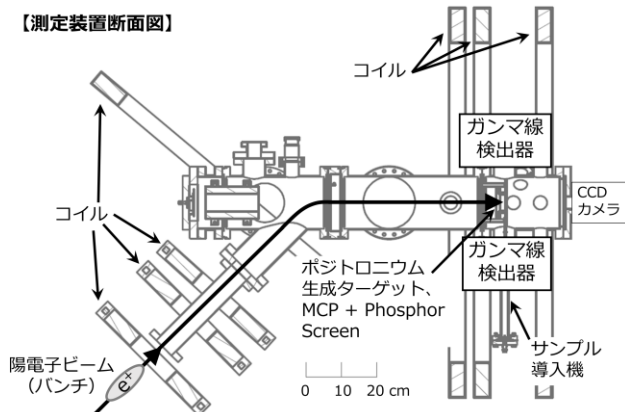


図2：実験セットアップ概念図。Ps 生成ターゲット3種類を測定できるサンプル導入機と、MCP + Phosphor Screen の導入機は独立しており、同じ場所にどちらかを導入することができる。ガンマ線検出器と CCD カメラはノンスケール。

3 結果および考察

LaBr₃(Ce)シンチレータと低温用 PMT の組み合わせで取得した、シリカエアロゲル中で生成された Ps 生成率・寿命の陽電子ビームエネルギー依存性について、図3に長寿命成分の寿命、図4に長寿命成分の検出率(陽電子ビームエネルギー5 keVで規格化した)の測定結果を示す。エラーバーは統計誤差のみを考慮した。0.2 keV を除き、TAC 形式と SSPALS 形式で統計的に無矛盾な結果が得られた。寿命値は高エネルギー側で真空中の Ps 寿命 (142 ns) と無矛盾であり Ps が生成したと結論できる。また陽電子ビームエネルギーが小さくなるにつれて短くなった。一方、長寿命成分の検出率は Ps 生成率と見なせるが、これについては 0.2 keV を除いてエネルギー依存性は見られなかった。

TAC 形式と SSPALS 形式で無矛盾な結果が得られたことから SSPALS によるガンマ線検出法がレーザー冷却実験に使用可能であることが判明した。なお、ファインメッシュ PMT はアフターパルスの影響が大きく SSPALS では使用できなかった。また、検出効率が高いことからプラスチックシンチレータより LaBr₃(Ce)シンチレータが適していた。

陽電子エネルギーが小さいほど寿命が短くなっている理由については現在詳細な理由を調査中である。理由の一つにサンプル表面から真空中への Ps 放出が挙げられる。サンプル外へ放出された Ps の寿命は真空中の寿命 142 ns であるが、Ps 生成後の時間が経つにつれ消滅位置が変化するためガンマ線検出効率が変化し、これにより見かけ上の寿命が変化する。定量的に評価するには検出効率の位置依存性を知る必要があり、シミュレーションや線源を用いた測定

によって今後調査する。表面からの Ps 放出を防ぐ方策についてはサンプル表面にシリカ薄膜でフタをすることを予定している。

また 0.2 keV において SSPALS と TAC で結果が異なるのは以下の原因によると考えられる。0.2 keV ではビームエネルギーの拡がりによりサンプルバイアス (+4.8 kV) で跳ね返される陽電子が存在し、その陽電子はサンプル外で消滅する。実際に図 4 の TAC 形式のデータから Ps 生成率が減少しており、サンプルに到達できなかった陽電子の存在を支持している。サンプル外で発生した陽電子消滅ガンマ線については、TAC 形式で得られるカウント数と SSPALS 形式で得られる平均エネルギーの比例係数が、サンプル内で消滅したガンマ線と異なる。この効果により SSPALS と TAC で結果が異なると考えられる。

SSPALS 形式ではエラーバーが TAC 形式に比べ小さくなっている。TAC 形式の誤差推定はポアソン分布に従うと仮定したものであり妥当と考えられるため、SSPALS 形式の推定が過小評価になっている。今回は PMT 信号波形の誤差を実際に測定された信号波形のバラツキから推定したが、この方法に誤りがあると考えられる。レーザー冷却実験までにシンチレータの応答関数を考慮して誤差推定方法を改良する。

なお、その他の試料について、カプトンは Ps を生成しないとされたが一部で長寿命成分が見られたため原因を調査中である。新規シリカガラスターゲット 4 種の測定結果に関しては現在も詳細な解析を継続中である。これらの解析・改良に加え、今後は今回 Ps 生成が確認されたシリカエアロゲルを薄膜化して紫外線透過率を高める研究も行う。

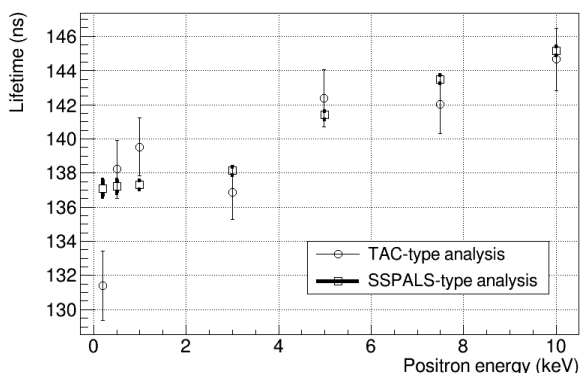


図 3 : シリカエアロゲルで生成された長寿命成分 (Ps) 寿命の陽電子ビームエネルギー依存性。統計誤差のみを考慮した。TAC 形式と SSPALS 形式の解析手法による比較を行った。

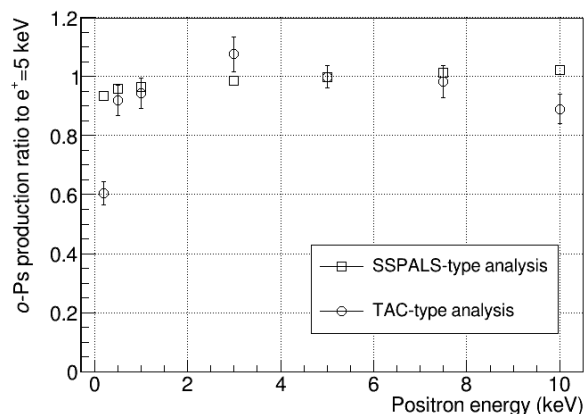


図 4 : シリカエアロゲルで生成された長寿命成分の検出率 (Ps 生成率) の陽電子ビームエネルギー依存性。ビームエネルギー 5 keV で規格化している。統計誤差のみを考慮した。SSPALS のエラーバーはマーカーサイズより小さくなっている。

4 まとめ

Ps を 10 K 以下まで冷却すれば、物質・反物質非対称性の謎の解明や反物質初の BEC 実現などが可能になる。寿命の短い Ps を冷却するため、反物質初のレーザー冷却を行う計画である。本研究はその予備実験として、パルスビームでの測定に適したガンマ線検出法を試験するとともに、レーザー冷却のための新規シリカガラス材料の有用性を調べた。その結果、誤差推定に一部課題が見つかったものの SSPALS 形式でのデータ取得・解析が有用であることが確かめられ、適したシンチレータと PMT の組み合わせを選択することができた。新規シリカガラス材料については詳細な解析を継続中である。本研究結果を元に、既に採択されている G 課題 (2018G100) において 2019 年度中にレーザー冷却を実現する。これにより反物質を用いた研究をより推し進める。

謝辞

本実験に当たっては都留稔了教授 (広島大学) にテストサンプルの提供と有益な議論を頂きました。また五神真総長 (東京大学)、鈴木良一首席研究員 (産総研) にご助力頂きました。深く感謝の意を表します。

本研究の一部は JSPS 科研費 JP17H02820 及び TIA 連携プログラム探索事業「かけはし」の助成を受けたものです。

参考文献

[1] K. Shu, X. Fan, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka and M. Kuwata-Gonokami, "Study on cooling of positronium for Bose-Einstein condensation", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **49**, 104001 (2016).

- [2] 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, "Study on Bose-Einstein condensation of positronium", J. Phys.: Conf. Ser. **791**, 012007 (2017).
- [3] 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, "Study on Positronium Bose-Einstein Condensation", JJAP Conf. Proc. (Accepted for publication).

成果

1. (招待講演) A. Ishida, "Recent progress in positronium experiments for Bose-Einstein condensation", Low Energy Antiproton Physics Conference 2018 (LEAP 2018), March 15, Paris, France.
2. (一般講演) 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", 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 22 日, 東京理科大学.
3. (一般講演) 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 II", 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 22 日, 東京理科大学.

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