

ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮を目指して —高密度化と冷却における連携研究—

産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門

石田 明

akira.ishida@aist.go.jp

2025 年 (令和 7 年) 11 月 26 日

1 はじめに

本研究は、電子 (e^-) 1 個とその反粒子である陽電子 (e^+) 1 個が電磁相互作用で結合した束縛系であるポジトロニウム (Ps: positronium, 図 1) を高密度化・冷却し、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC: Bose-Einstein condensation) 相転移させることを目指しておこなっている。産業技術総合研究所 (産総研, AIST: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)・KEK・東京大学を中心とした連携研究である。本稿では、まず第 2 節にて、Ps の BEC (以下、Ps-BEC) 実現に向けた研究の概要および最初のマイルストーンとしての Ps レーザー冷却成功について紹介する。次に第 3 節で連携体制構築の経緯を、成果を交えつつ時系列で紹介する。そして第 4 節では、満を持して KEK で Ps のレーザー遷移実験を開始してから、信頼性の高い計測系を構築するまでにかかった 3 年間の軌跡を簡単に辿る。最後に、第 5 節で研究の現状と今後の展望について述べる。

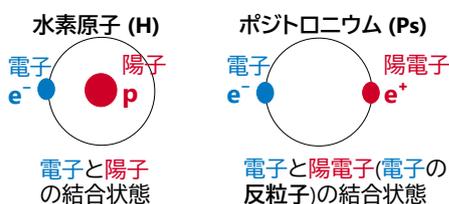


図 1: 水素原子 (H, 左) とポジトロニウム (Ps, 右)。

2 研究の概要と Ps 冷却

2.1 Ps 研究の目的

本研究の目的は、Ps を用いた小型精密計測実験により、反物質 (反粒子) を含む系の精密計測結果と理論計

算値にズレがあるかを調べ、束縛系量子電磁力学 (QED: quantum electrodynamics) の精密検証や、素粒子標準理論を超えた新物理現象の探索、特に物質優勢宇宙 (消えた反物質) の謎の解明につながる未知の物質・反物質非対称性を探ることである。Ps が目的達成に有用である理由は、以下のユニークな Ps の性質による。

1. Ps は反粒子を含む水素様エキゾチック原子であるため、反粒子である陽電子の性質を反映する。また、粒子・反粒子系であるため、対消滅・対生成の効果が寿命やエネルギー準位などに直接影響する。
2. Ps は純粋なレプトン系であるため、水素原子で問題になるようなハドロン相互作用の不定性がなく、高精度での理論計算が可能であり、実験計測値と理論計算値のズレを探索しやすい。
3. Ps は 2 つの素粒子からなる電氣的に中性な系であり、また束縛エネルギー (6.8 eV) が Ps 質量の 7×10^{-6} しかないため、Ps にはたらく重力を測定することで純粋な素粒子にはたらく重力の大きさを測定し、弱い等価原理 (WEP: weak equivalence principle) を検証できると期待される。

Ps は水素原子と同様に $1S$, $2S$, $2P$, ... といったエネルギー固有状態を有し、さらに電子と陽電子のスピンの合成によって、スピン三重項である全スピン 1 のオルト・ポジトロニウム (o -Ps: *ortho*-positronium) と、スピン一重項である全スピン 0 のパラ・ポジトロニウム (p -Ps: *para*-positronium) の 2 つのスピン固有状態をもつ (図 2)。 $1S$ 基底状態において、 o -Ps (項記号¹を用いて表記すると、 1^3S_1) は寿命 142 ns で消滅し [1], 電子質量エネルギー (511 keV) 以下になる 3 本の消滅 γ 線を主に放出する (観測スペクトルは連続エネルギーをも

¹全スピン S , 全軌道角運動量の記号 L , 全角運動量 J によって $2S+1L_J$ と書く。

つ) ²。一方、別のスピン固有状態である p -Ps(1^1S_0) は寿命 125 ps で消滅し [5], 511 keV の消滅 γ 線を back-to-back に 2 本、主として放出する。 1^3S_1 状態 (o -Ps) のほうが 1^1S_0 状態 (p -Ps) よりエネルギーが高く ³, 差を超微細構造 (HFS: hyperfine splitting) とよび, 大きさは 0.84 meV (周波数換算で 203 GHz) である [6]。なお, o -Ps は光と同じ量子数をもつため “質量をもつ光” とみなすことができ, また p -Ps は (擬) 真空と同じ量子数をもつため “質量をもつ (擬) 真空” とみなすことができる点も, 素粒子と時空・真空にまつわる研究の観点から興味深い。

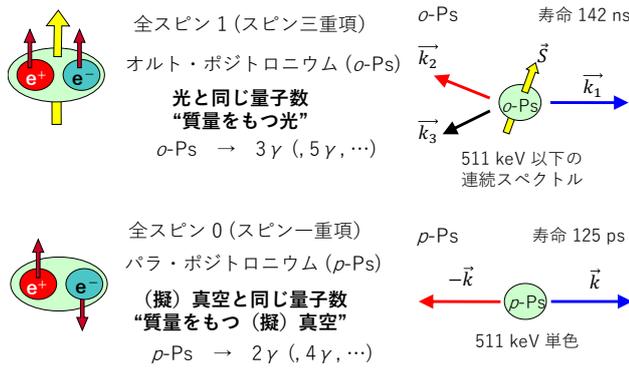


図 2: Ps の 2 つのスピン固有状態。

Ps を用いた新物理探索として, これまで以下に例示する研究などがおこなわれている [7, 8] が, いずれにおいても現状では標準理論からのズレは見つかっていない。

- 寿命の精密計測 (1^3S_1 [1], 1^1S_0 [5])
- エネルギー準位の精密計測 (1^3S_1 - 2^3S_1 [9], 2^3S_1 - 2^3P_2 [10], 1^3S_1 - 1^1S_0 [6])
- 対称性を破る崩壊過程の探索 (CP [11, 12], CPT [13])

そこで本研究において着目したのが重力である。反物質にはたらく重力の研究 (WEP の検証) においては, 2023 年 9 月の ALPHA 国際共同研究グループが CERN でおこなった実験結果の発表 [14] により, 反水素原子 (水素原子の反物質であり, 反陽子 1 個と陽電子 1 個の束縛系) と地球との間にはたらく重力が, 水素原子の場合と同様に引力であることが示された。この結果は大きなブレークスルーであったものの, 重力の大きさについては不確かさが 20 % 以上と大きく, また反水素原子の質量の 99.95 % を占める反陽子は, その質量の 99 % 以上が量子色力学 (QCD: quantum chromodynamics) の効果により生じていることを考えると, 「粒子や反粒子

にはたらく重力」の大きさについては, さらに精密な検証実験が待たれる。

Ps は反水素原子がもつ問題を解決し, 反粒子にはたらく重力を精密に測定するのにきわめて適している。なぜならば, 前述した Ps のユニークな性質 3. により, Ps にはたらく重力を測定することで, 電子と陽電子にはたらく重力の和を直接測定可能だからである。ただし, Ps の寿命が短く, また Ps 質量が反水素原子質量の 0.1 % しかないため, Ps にはたらく重力の測定は困難であり, 1990 年代からさまざまな実験が提案されているものの [15, 16, 17, 18, 19], いまだ実現には至っていない。この困難を, Ps-BEC 実現によって乗り越えようというのが, 本研究の目論見である。次節で, Ps-BEC がなぜ Ps 重力測定に適しているかを簡単に説明する。

2.2 Ps-BEC 実現の目的

2.2.1 反粒子にはたらく重力測定

BEC は, 固体・液体・気体・プラズマに次ぐ「第 5 の状態」ともよばれる量子多体凝縮系であり, 同種ボース粒子が多数集積することで, ボース・アインシュタイン統計の性質により, 粒子系の大部分が単一の量子状態 (基底状態) になる相転移現象である。多数の粒子 (原子) が単一の波動関数で表現され, 全体として一つの波のようにふるまうため, ミクロな世界で起きている量子現象が, マクロなスケールで観測できるようになる。いわば原子で構成された「レーザー」であり, 干渉計実験にきわめて有用である。なぜならば, BEC の干渉では, 通常みられる自分自身との干渉のみならず, 系全体のコヒーレンスにより BEC を構成する他の原子とも干渉するためである。BEC 相転移させるためには, 原子集団を高密度かつ低温にする必要がある, その転移条件は以下のように計算される [20]。

$$n\lambda_D^3 = n \left(\frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T} \right)^{\frac{3}{2}} > \zeta \left(\frac{3}{2} \right) = 2.612 \dots \quad (1)$$

ここで, n は数密度, λ_D は熱的ド・ブローイ波長, $\hbar = h/(2\pi)$ は換算プランク定数, m は質量, k_B はボルツマン定数, T は温度, $\zeta(s)$ はリーマンゼータ関数である。式 (1) は, 位相空間密度 $\rho = n\lambda_D^3$ が 1 のオーダーになる, つまり熱的ド・ブローイ波長が原子間平均距離より大きくなることで, 原子の波動関数が互いに重なりはじめる条件, として捉えるとわかりやすい。

図 3 に, 式 (1) の BEC 相転移条件を 3 つの原子系について示す。Ps 原子はボース粒子であり, BEC 相転移を起こすと期待される。また Ps は軽いため, 他の原子系に比べて高い転移温度 T_C をもち, 数密度 $n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のとき $T_C = 14 \text{ K}$ である。以上から, 本研究は Ps を

²最近 GEANT4 [2, 3, 4] にも実装されており, Ps 研究にとって便利なツールになった。

³スピン・スピン相互作用および仮想的な対消滅・対生成の効果による。

10^{18} cm^{-3} 以上の超高密度かつ 10 K 以下の低温にすることで BEC 相転移させ、図 4 に示すような Ps の重力干渉計を構築することで、Ps と地球の間にはたらく重力を測定し、粒子と反粒子にはたらく重力に差異があるかどうかを探索することを目指す。研究開始時点の 2015 年においては、数密度 10^{15} cm^{-3} 、温度 150 K が世界記録であったため、密度で 3 桁、温度で 1.2 桁の改善を目標とした⁴。

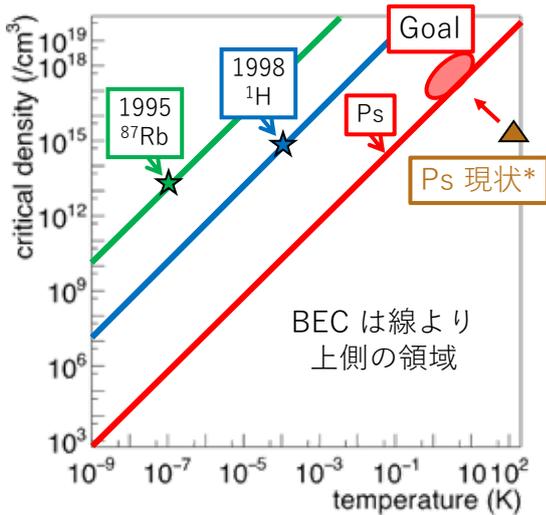


図 3: BEC 転移密度と転移温度の関係。線はそれぞれ ^{87}Rb (1995 年に★の条件で BEC 実現), ^1H (1998 年に★の条件で BEC 実現), Ps (赤線) の条件を示し、線より上の高密度・低温領域が BEC である。Ps-BEC については、本研究の目標値付近を○で、2015 年時点での世界記録 [21, 17] を△で示す。

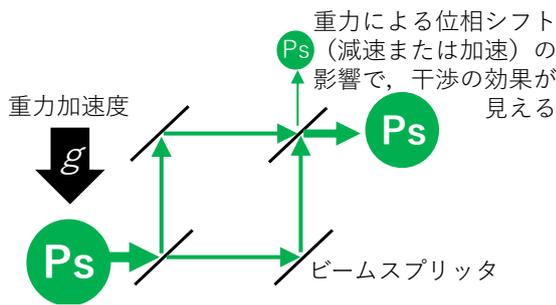


図 4: Ps-BEC を用いた Mach-Zehnder 干渉計の概念図。

2.2.2 γ 線レーザーの実現

本研究はまた、世界で初めて γ 線レーザーを実現するための光源として、Ps-BEC を活用することも見据えている。 γ 線レーザー実現は破壊的イノベーションをも

⁴その後、温度は後述のレーザー冷却成功により 1 K まで冷却可能になったので、数密度の条件はやや緩和された。

たらすと期待されており、例えば、 γ 線レーザーと原子核を用いた量子光学系の革新や、 γ 線・ γ 線衝突実験の実現、X 線非破壊計測技術の高エネルギー化による高度化、超長距離通信の基盤技術としての活用等が考えられる。

図 5 に Ps-BEC を光源とした γ 線レーザーの原理を示す。まず寿命の長い *o*-Ps で BEC を実現し、これに 203 GHz のコヒーレントなミリ波を照射することで、BEC 状態を保ったまま *p*-Ps に遷移させる。この状態が真空準位に対して反転分布となることに注目いただきたい。*p*-Ps は 125 ps で自己消滅し、種となる γ 線を放出する。BEC を構成する *p*-Ps は同じエネルギー固有状態にあることから、すべての *p*-Ps が種 γ 線と同じエネルギーの γ 線に崩壊するので、種 γ 線が *N* 本存在する条件下では、ボース・アインシュタイン統計の性質により、消滅率が (*N* + 1) 倍に増大する。Ps-BEC を細長く作成しておけば、長軸方向に γ 線が増幅する確率が高くなり、 γ 線レーザーとして取り出せる、という仕組みである。

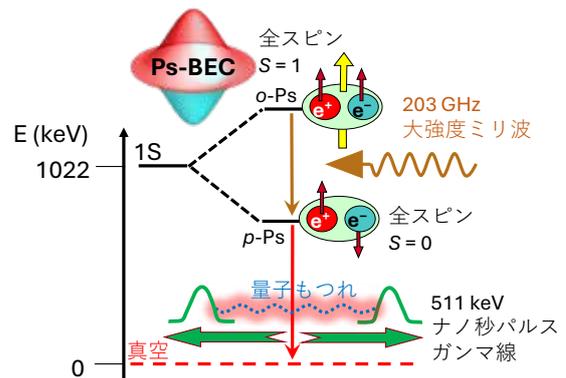


図 5: Ps-BEC を光源とする γ 線レーザー実現の原理 [22]。

2.3 Ps-BEC・ γ 線レーザー実現スキーム

図 6 に、本研究で提案し、理論的検証をおこなった Ps-BEC および γ 線レーザーの実現スキームを示す。本スキームは Ps-BEC 実現の 3 つの要素技術および γ 線レーザー発生技術からなり、その理論的妥当性はモンテカルロシミュレーションにより検証した [20, 23]。検証においては、既存の陽電子・Ps 研究における先端技術および現実的な Ps レーザー冷却モデルを仮定した。

2.3.1 高密度陽電子ビーム生成・制御システム

1.5×10^8 個のスピンの偏極陽電子バンチ (直径 5 mm, エネルギー 5 keV) を、多段階輝度増強システム (BES:

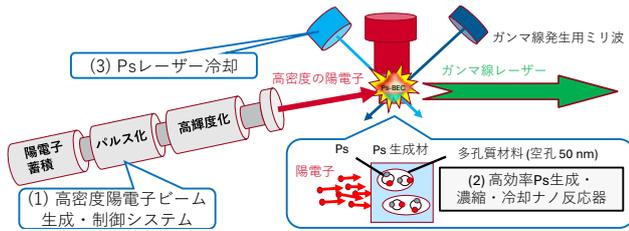


図 6: Ps-BEC・ γ 線レーザー実現スキーム。

Brightness Enhancement System) によって直径 $6 \mu\text{m}$ に集束する。詳細は第 3.2 節に後述する。

2.3.2 高効率 Ps 生成・濃縮・冷却ナノ反応器

生成した高密度陽電子バンチを、以下の 3 つの機能をもつ多孔体ターゲットに入射し、高密度 Ps を生成する (図 7)。

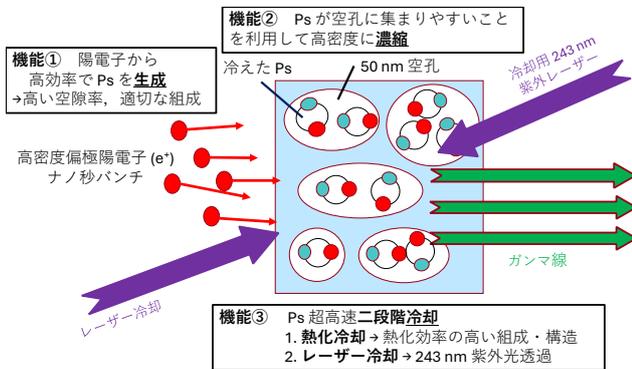


図 7: 高効率 Ps 生成・濃縮・冷却ナノ反応器の概念図と満たすべき 3 つの機能。

1. 陽電子から高効率で Ps を生成する機能。高い空隙率と適切な組成を必要とする。
2. Ps が空孔に集まりやすいことを利用して高密度に Ps を濃縮する機能。50 nm 程度の空孔径をもつことを必要とする。
3. Ps を超高速二段階冷却する機能。

- 1 段目は熱化冷却であり、熱化冷却効率の高い組成と構造を持つことを必要とする。熱化冷却では、生成した Ps と空孔壁との間の運動エネルギー交換を利用する。Ps は陽電子を含むが、空孔壁と衝突した際に Ps 中の陽電子と空孔壁中の電子が消滅するピックオフ (pickoff) 確率は小さい。生成時にもつ $\sim \text{eV}$ 程度のエネルギーから室温まで冷却するのに Ps は空孔壁と 10^5 回程度衝突するが、ピックオフによる消滅率は 10 %程度である。

- 2 段目はレーザー冷却であり、 $1^3S_1-2^3P$ 間 (エネルギー準位差 5.1 eV) の遷移を利用するため、波長 243 nm の紫外光を透過することを必要とする。

2.3.3 Ps レーザー冷却

室温程度から Ps-BEC 相転移温度 (10 K) 以下まで高速冷却するため、世界初 Ps レーザー冷却をおこなう。詳細は第 2.4 節に後述する。

2.3.4 γ 線レーザー発生用ミリ波

BEC 状態となった *o*-Ps にコヒーレントなミリ波 (周波数 203 GHz) を照射して *p*-Ps-BEC に遷移させ、その自己消滅 γ 線が増幅することで γ 線レーザーが実現する。ミリ波光源には、Ps の HFS 測定実験 [24] において技術を確立したジャイロトロンが候補として挙げられる。

2.4 Ps レーザー冷却の世界初実現 (2024 年)

本研究の最初のマイルストーンとして、Ps のレーザー冷却に世界で初めて成功した。この成果はすでに論文 [25] にて発表済みであり、また Ps レーザー冷却の共同研究者がレーザーの専門家としての見地から執筆された日本語の解説記事 [26] も出版されているので、ここではレーザー冷却の原理と冷却に必要なレーザーの一般的な性質、実験セットアップ概念図と結果について、ごく簡単に紹介する。なお、本成果は 2024 年 12 月、英国物理学会 Physics World 誌 Top 10 Breakthroughs of the Year for 2024 に選出された (CERN の反水素実験国際共同研究グループ AEGIS と共同) [27]。

2.4.1 Ps レーザー冷却の原理

Ps レーザー冷却の原理を図 8 に示す。静止した 1^3S_1 状態の Ps は 243 nm の紫外レーザーと共鳴して光を吸収し励起されるが、速度 v の Ps では、レーザー波長がドップラー効果により変化して見える。そこで、図 8 中央上 to 示すように、共鳴波長より長い波長のレーザーを照射すると、Ps と反対方向の光のみが共鳴して Ps が 2^3P 状態に励起し、光子の運動量分だけ Ps が減速する。そして図 8 右に示すように、励起状態 Ps は 3.2 ns で脱励起するが、このとき光子の運動量はランダムのため温度は変化しない。この励起・脱励起サイクルを 50 回程度繰り返すことで、10 K 以下に冷却することができる。

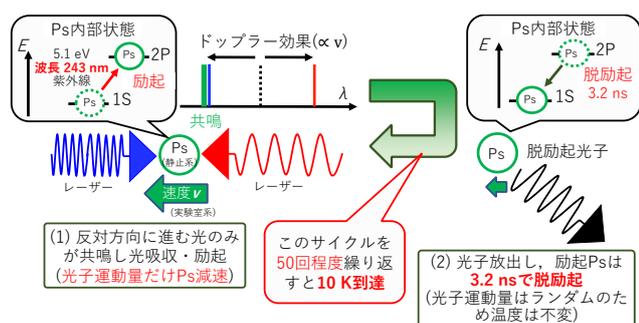


図 8: Ps レーザー冷却の原理。左側の図は Ps の静止系。

2.4.2 Ps 冷却用レーザーの最適化

図 9(a) に 300 K と 50 K の Ps 速さ分布を、図 9(b) に Ps 速さ分布を考慮したときに必要となる冷却レーザーの波長分布を示す。Ps 冷却用レーザー波長分布は、短い寿命をもつ Ps の冷却中の速度分布変化に追従させる必要がある。この分布変化にマッチした広い線幅 (波長分布) と Ps 寿命をカバーする長パルス (持続時間) を両立するため、新しい光学システムとして Chirped Pulse Train Generator (CPTG) を核とするレーザー源を開発した [28]。

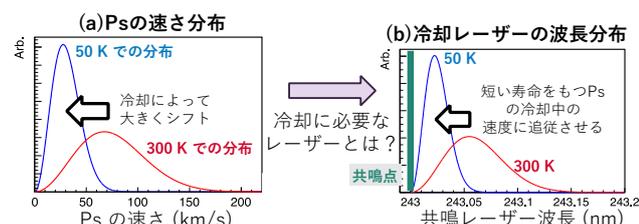


図 9: Ps 冷却用レーザーに必要な性質。(a) Ps の速さ分布、(b) (a) によるドップラー効果で広がった共鳴レーザー波長分布。

2.4.3 真空中での Ps の一次元レーザー冷却

図 10(a) に、真空中での一次元レーザー冷却による原理実証実験の概念図を示す。Ps 生成材として開孔 (材料内部から表面までつながった空孔) をもつシリカ (二酸化ケイ素, SiO_2) エアロゲルを用いることで、陽電子ビームにより生成した Ps の約半数を真空中に放出させることができる。この Ps 放出軸と垂直方向に冷却用レーザーを照射して Ps を冷却した。Ps の放出量を最大化しつつ放出エネルギーを低くすることで冷却効率を高めるため、Ps 飛行時間 (TOF: Time-of-Flight) 計測システムを構築し、図 10(b) に示す Ps-TOF スペクトルを取得し、インセットに示す Ps 放出量と平均エネルギーの結果から、陽電子入射エネルギー 5.0 keV を選択した。

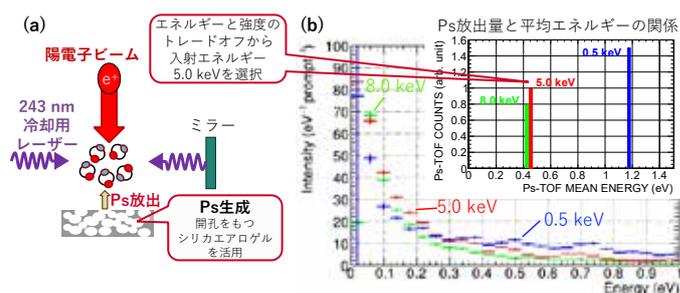


図 10: Ps レーザー冷却原理実証実験セットアップ。(a) 真空中における Ps の一次元レーザー冷却セットアップ概念図、(b) Ps-TOF スペクトル例。

2.4.4 Ps レーザー冷却結果

図 11(a) に示す冷却前の Ps 速度分布において、ドップラー広がりモデルから冷却前 Ps 温度 600 K 相当と推定した。図 11(a) の中央部分の範囲を冷却した結果 (Ps 分布変化率) を、図 11(b) にモデルフィットとともに示す。冷却用レーザーの波長を冷却条件に最適化した場合のみ、Ps 速度が大きい成分が減り、Ps 速度の小さい成分が増え、すなわち Ps が冷却されたことが読み取れる。冷却後の温度は 1.2 K 以下相当と推定でき、目標とする数密度 10^{18} cm^{-3} (未達成) における Ps-BEC 相転移条件の 10 K 以下を達成した。

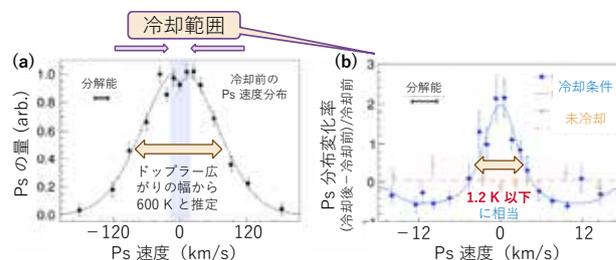


図 11: Ps レーザー冷却結果。(a) 冷却前の Ps 速度分布、(b) 冷却後の Ps 速度分布の変化率 ((冷却後 - 冷却前) / 冷却前)。(文献 [25] の図を一部改変して引用)

3 連携体制構築 (2015 年–2018 年)

2015 年に Ps-BEC を目指した本研究をスタートし、2024 年の Ps レーザー冷却成功により最初のマイルストーンを達成したが、これを実現可能としたのは産総研・KEK・東京大学の 3 者連携によって開発・最適化した Ps 生成材、陽電子ビーム制御システムと、高信頼性 Ps レーザー遷移計測系の構築であった。本節では、Ps レーザー遷移実験を開始するまでの、Ps 生成材開発と陽電子ビーム最適化について、連携の経緯を振り返りながら概観する。レーザー遷移実験開始後の経緯については、次節で紹介する。

3.1 Ps 生成材開発

東京大学において 2015 年に構想し、2016 年に論文発表 [20] した Ps-BEC 実現スキームを起点に、シリカゲル中の Ps 熱化モデルの基盤を確立するための研究を開始した。当初、Ps 生成率の高いシリカ組成のターゲット材が候補であったが、低温での Ps 熱化効率に関する実験データが不足しており、高温データの外挿に依存していたため、冷却効率の不確かさがシミュレーションに与える影響が不明確であった。これを解決するため、東京大学 大学院理学系研究科（以下、東大理）および素粒子物理国際研究センター (ICEPP) にてシリカエアロゲルを用いた熱化関数測定を室温で実施し、計測法を確立した。その後、2016 年から産総研 分析計測標準研究部門（以下、分析部門）と連携して 4 K-GM(Gifford-McMahon) 冷凍機を用いた 25 K における測定を経て、熱化モデルの構築と不確かさ評価を進めた。実験値は Ps-BEC シミュレーションに使用していた熱化効率外挿モデルの中心値とほぼ一致した（結果は 2021 年論文発表 [29]）ため、幸いにも Ps-BEC 実現可能性への影響は小さく、研究継続を強力に後押しする結果となった。

この間に並行して、2017 年から産総研 物質計測標準研究部門（以下、物質部門）と連携して、Ps-BEC 実現に適した Ps 生成のためのターゲット開発を推進した。Ps 生成率向上と光学特性確保を両立するため、シリカエアロゲルの空隙構造を最適化し、積層膜作製や評価技術を確認した [30]。なお、本連携では、産総研の技術研修制度を活用し、ターゲット作製と評価の実践的スキル並びに物理・化学両分野の知見を共有する体制を整えた。

3.2 陽電子ビーム制御技術開発

第 2.3.1 節に述べた高密度陽電子ビーム生成・制御システム開発には、産総研の陽電子ビーム集束技術と、KEK の大強度パルス陽電子ビーム制御技術が必要となり、2016 年から産総研 分析部門と、また 2017 年から KEK 物質構造科学研究所（以下、物構研）との連携を開始した。

3.2.1 連携の肝 (1) : 産総研の陽電子ビーム集束技術

陽電子ビームの集束には、文部科学省のマテリアル先端リサーチインフラ事業 (ARIM: Advanced Research Infrastructure for Materials and Nanotechnology in Japan) にも参画している産総研の共用施設である先端ナノ計測施設 (ANCF: AIST Nanocharacterization Facility) のひとつ、陽電子プローブマイクロアナライザー (PPMA: Positron Probe MicroAnalyzer) [31] で実用化されている輝度増強システム (BES) を活用する。BES

は、電磁コイルおよびパーマロイ（透磁率の大きい Ni-Fe 系合金）からなる磁気集束レンズと、Ni 薄膜からなる透過型陽電子再減速材で構成される [32]。磁場に巻きつけて輸送（磁気輸送）した陽電子ビームを、一度弱磁場領域に引き出して広げた後、強い磁場勾配で集束し、その焦点に設置した Ni 薄膜に照射する。薄膜を透過した陽電子は Ni の仕事関数で単色化されて裏側から出てくるので、ビームの発散角がリセットされ、輝度増強されるとともに、再度の輝度増強も可能になる。ただし、再減速材を通過する度に強度が 10 %程度に減少してしまうので、磁気レンズの倍率および再減速材の透過率を高めることが重要となる。

Ps-BEC に必要な高密度陽電子ビーム生成には、2 段 BES の後、強磁場への断熱磁気輸送により集束する計画である。本研究では 2019 年初頭、産総研で試作した磁気集束レンズ（再減速材は含まない）の性能試験を KEK 共同利用陽電子ビームラインにておこない [33]、結果をもとに今後の開発方針を検討するとともに、Ps レーザー冷却実験向けに調整した Ps 生成材配置における陽電子照射量の最大化と陽電子ビーム径の最適化をおこない、Ps レーザー冷却実験成功の鍵となった。

3.2.2 連携の肝 (2) : KEK のパルス陽電子ビーム技術

大量の Ps を超高速レーザー冷却するためには、瞬間エネルギーの大きいパルスレーザーを用いる必要があるため、陽電子ビーム、すなわち Ps 生成タイミングもパルス化しレーザーと同期させる必要がある。また、Ps の高密度化や高統計の計測をおこなうにはパルス当たりの陽電子数が多いほどよい。Ps レーザー冷却に必要な陽電子数を供給できる、国内で現状唯一の施設が KEK 物構研の低速陽電子実験施設 (SPF: Slow Positron Facility) であり、KEK-SPF では 2025 年現在、専用の電子線形加速器により生成した $10^7 \text{ e}^+ \text{ s}^{-1}$ の陽電子バンチを繰り返し 50 Hz、パルス幅 10 ns で供給している⁵。

2017 年に連携を開始し、まずは P 課題⁶にて共同利用ビームタイムを配分いただき、高速シンチレータ (LaBr₃(Ce) またはプラスチック) を結合した低温動作用光電子増倍管 (R6041) の波形を高速オシロスコープ (分解能 10 ビット, 1.25 GS s^{-1}) を用いて 50 Hz で取得して波形データ解析をおこない、陽電子消滅 γ 線の時間およびエネルギースペクトルを作成するシステムを構築した [34]。それから 8 年間、G 課題⁷を継続しながら開発を進めてきたが、ビーム供給はきわめて安定的であり、アップグレードによりビーム強度はおよそ 10 倍に向上した。またこの間、ビームライン担当者とユー

⁵短パルスモードの場合。

⁶通年募集している初心者・お試用課題。

⁷年 2 回募集している一般課題 (2 年間)。

ザーが緊密に連携し、Ps 消滅寿命 (142 ns) と紛らわしい ~ 200 ns 程度の時定数をもつ遅い陽電子ビーム成分を除去するチョッパーシステム導入 [33] や、前述した陽電子磁気集束レンズの性能評価を含めた磁場制御システム構築、さらには 10 Hz および 25 Hz で強度が最大 1.5 % 程度振動していた問題を加速器研究施設協力のもと解決するなど、ビームライン・加速器ともハードウェアの改善を続けてきた。これらすべての尽力が、Ps レーザー冷却成功につながったと確信している。

4 レーザー計測系 (2019 年–2021 年)

2019 年初頭、陽電子ビーム・Ps 生成材の開発とレーザー冷却実験に向けた最適化を完了し、Ps 遷移用の 243 nm 光パラメトリック共振器 (OPO: optical parametric oscillator) レーザーを借り受け、いよいよ Ps レーザー冷却に向けたレーザー遷移実験に取り組んだ。しかし、ここで大きな問題が 2 つ発覚した。ひとつは、Ps 生成材空孔中における Ps レーザー冷却を阻害する現象の発見であり、もうひとつは、Ps 冷却用レーザー照射時における偽信号の発生である。これらの暫定回避・解決には 3 年を要した。以下で、それぞれの問題の概要と、どのように暫定回避・解決したかを簡単に紹介する。

4.1 ナノ空孔中の励起状態 Ps 短寿命崩壊

第 2.4.1 節で述べたように、Ps レーザー冷却には Ps の 1^3S_1 - 2^3P 状態間の励起・脱励起サイクルを 50 回程度繰り返す必要がある。既存技術では真空中で Ps を閉じ込めることができないため、真空中においては Ps の密度を維持できず、冷却中に密度が下がってしまう。したがって、Ps-BEC 相転移密度を達成するには Ps 生成材ナノ空孔中に生成した高密度 Ps を、ナノ空孔中に閉じ込めたまま冷却する必要がある。

しかしながら、Ps 生成材として選択したシリカエアロゲルのナノ空孔中で Ps をレーザー励起したところ、真空中における脱励起寿命 3.2 ns よりはるかに短い寿命で γ 線に崩壊してしまった [35]。これでは 1^3S_1 状態に戻すサイクルを回せないため、シリカエアロゲルのナノ空孔中では Ps をレーザー冷却できないことになった。図 12 に示すように Ps の遷移曲線を取得したところ、確かに 243 nm でのみ崩壊していることから、 2^3P 状態の Ps を経由して γ 線に崩壊していることが確認できた。一方で、共鳴曲線の幅も遷移による γ 線の増加率も、想定より 5 倍–10 倍大きいことがわかり、明確な理解ができず悩むこととなった⁸。

⁸なお、多孔質シリカ薄膜中で同様に 2^3P 状態 Ps の寿命が短く遷移曲線の幅が広がることを示した先行研究 [36] があったが、当該研

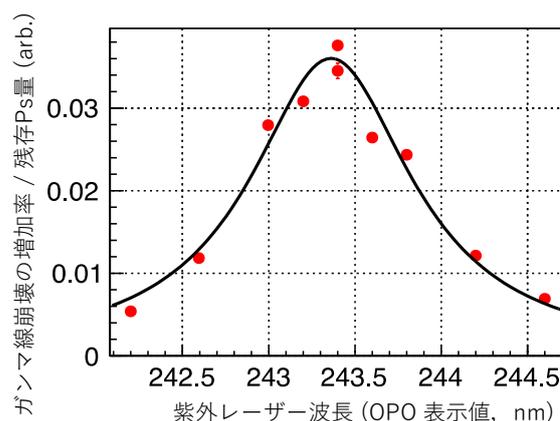


図 12: シリカエアロゲルのナノ空孔中における励起状態 Ps 崩壊率の OPO レーザー波長依存性。横軸は OPO の表示値で、確度は 1 nm。縦軸は統計的不確かさのみ考慮。実線はローレンツ関数によるフィット結果 [33]。

共同研究者間で相談した結果、この問題をすぐに解決することは難しいと判断し、ナノ空孔中での Ps レーザー冷却は一旦先送りして、Ps レーザー冷却原理実証実験を真空中でおこなうことにし、問題を暫定回避した。図 13 に示すように、真空中において同様に Ps の $1^3S_1 \rightarrow 2^3P$ 遷移曲線を取得した結果、当初予想したとおり、Ps の速度分布を反映したドップラー広がり曲線が得られ、このまま冷却実験が可能であると期待された。

4.2 レーザー照射による偽信号の発生と対策

2020 年、開発したプロトタイプ Ps 冷却用レーザーを用いて、真空中での Ps レーザー冷却を試みた。実験手順としては、生成後に Ps 表面から真空中に放出された Ps に対して冷却用レーザーを照射し、冷却用レーザー照射後に、前述の OPO レーザーを用いて Ps の $1^3S_1 \rightarrow 2^3P$ 遷移率の波長依存性を測定することで、冷却用レーザーの有無により Ps の速度分布が変化するかどうかを捉える、というものである。

実験したところ、冷却用レーザーの照射によって、照射後の Ps の $1^3S_1 \rightarrow 2^3P$ 遷移率が OPO レーザーの波長によらず約 2 倍になる現象が観測された [37]⁹。その後の調査により、当時観測した遷移曲線の形状変化は冷却用レーザー特有のものではなく偽信号であり、単に紫

究で使用されたシリカでは基底状態 Ps の寿命がナノ空孔サイズから予想される値と矛盾しており、空孔表面に不純物があったために当該現象が起こったと結論付けられていた。本研究で使用したシリカエアロゲルでは基底状態 Ps の寿命はナノ空孔サイズと無矛盾であり、少なくとも基底状態 Ps が感じることでできる不純物は空孔壁表面に存在しなかった。にもかかわらず同じ現象が観測され、その理由がわからなかったわけである。

⁹このとき、詳細は不明だが冷却用レーザー照射による何らかの変化が見られたということで、当時の KEK-SPF シフト担当者で記念写真を撮影した。その写真が、Ps レーザー冷却成功に関する複数のウェブサイトに掲載されている。

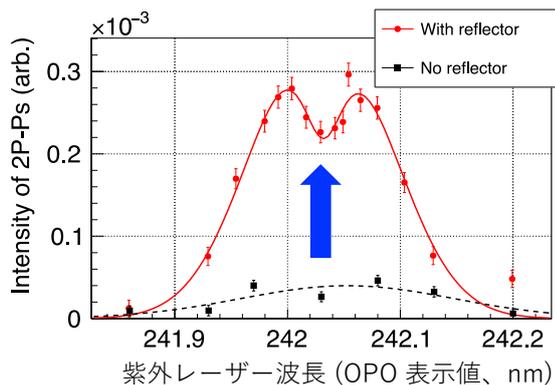


図 13: 真空中における Ps の $1^3S_1 \rightarrow 2^3P$ 遷移率の OPO レーザー波長依存性。横軸は OPO の表示値で、精度は 1 nm。縦軸は統計的不確かさのみ考慮。黒破線は Ps 放出領域に OPO レーザーを 1 回だけ通過させた場合で、赤実線は OPO レーザーをミラーで反射させ Ps 放出領域を複数回通過させた場合。多重反射条件では Ps に対し両方向からレーザーが照射されるため、Ps の光吸収が飽和してくると、遷移中心から外れた波長では実効的に遷移率が 2 倍になる一方、遷移中心ではその恩恵がなく遷移率が低いままとなる（ラムディップ） [33]。

外パルスレーザーを照射したことで引き起こされていたことが判明した。原因を追究したところ、真空中でレーザー光を反射させるために使用していた高反射率の誘電体多層膜ミラー表面が、紫外ナノ秒パルスレーザー照射により負に帯電していた。

ミラーが帯電して $1^3S_1 \rightarrow 2^3P$ 遷移率が增大したのは見かけ上のもので、遷移率測定においては $1^3S_1 \rightarrow 2^3P \rightarrow e^+ + e^-$ と電離させ、電離した陽電子が真空容器内の構造物に衝突して消滅した際の γ 線を計測していたためである¹⁰。電離した陽電子の軌道が帯電したミラーによる電場の影響を受け、その消滅時間分布が変化することで、計測時間窓内の検出効率が 2 倍になっていた。そこで、Ps 電離領域内に電場を印加したところ、ミラーの帯電による影響を排除することに成功した¹¹。

これでようやく、信頼性の高い Ps 速度分布 ($1^3S_1 \rightarrow 2^3P$ 遷移率) 計測ができるようになった。ここから本物の Ps レーザー冷却信号を捉えるまでにはさらに時間がかかったのだが、その詳細については別の文献 [26] に譲りたい。

4.2.1 連携の肝 (3) : 東京大学のデータ解析技術

Ps のレーザー遷移実験におけるデータ取得および解析ソフトウェアの根幹部分は、東大理・ICEPP が開発

¹⁰電離には、OPO レーザーと同時に照射した 532 nm パルスレーザー (Nd:YAG) を使用。

¹¹なおその後、ミラーをアルミニウム製に変更することで、電場を印加することなくミラーの帯電の影響を完全に排除することにした。

した。データを圧縮しつつ高速に記録するため、波形データは ROOT [38] の TTree 形式で保存し、レーザーの ON/OFF¹²やレーザーパワーの情報を記録・解析してパルス波形ごとに分類し、統計的な処理をおこなう必要がある。本研究を可能にしたデータ解析技術は、素粒子実験分野の強みであると感じる。

5 現状と今後の展望

真空中での Ps 一次元レーザー冷却により、Ps レーザー冷却の原理実証に成功した。Ps-BEC 実現に向けた今後の優先開発項目は、第 4.1 節で回避した問題に立ち戻り、Ps 生成材空孔中における Ps 冷却に取り組むことである。以下で、空孔中における励起状態 Ps 消滅現象に関して得られている現状の知見と、それを踏まえた今後の展望について述べる。

第 4.1 節で述べたように、シリカエアロゲルの空孔中では、Ps の $1^3S_1 \rightarrow 2^3P$ 遷移曲線の幅が温度による Ps の速度分布を反映したドップラー広がりよりはるかに広がったわけだが、この幅が仮に 2^3P 状態 Ps の寿命¹³によって決まっているとすると、幅の逆数から寿命が数 100 fs と計算される。この時間スケールは空孔中の Ps 平均自由時間と同じオーダーであり、 2^3P 状態の Ps が空孔壁と衝突した瞬間に 2^3P 量子状態が壊れていることを示唆する¹⁴。

励起状態 Ps の崩壊率を、Ps 生成から励起までの遅延時間を変えながら測定すると、遅延が長くなるほど崩壊率が小さくなることが観測された。Ps の熱化を考慮すると、Ps 生成から励起までの時間を長くすることは、Ps を熱化冷却して温度 (運動エネルギー) を低下させることに相当する。Ps 温度が下がれば Ps 速度が小さくなり、Ps と空孔壁の衝突率も低下するので、この結果は、 2^3P 状態の Ps が空孔壁に衝突した瞬間に崩壊するという仮定と矛盾しない。この仮定が正しいとすると、シリカエアロゲルを冷凍機で冷却すれば、Ps 温度がより低下し、 2^3P 状態 Ps の消滅率がさらに低下するはずである。現在までに、低温シリカエアロゲルにおける計測をおこない、新たな知見を得ている。結果については国際会議 ICPA20(The 20th International Conference on Positron Annihilation) の Proceedings にて公表した [39]。

¹²陽電子ビームは 50 Hz で照射され、検出器信号は 50 Hz で記録するが、レーザーの繰り返しは 10 Hz であるため、5 陽電子パルスあたり 1 回はレーザー ON, 4 回はレーザー OFF となる。レーザー ON/OFF の両条件のデータを同時に取得できるため長期ドリフトによる影響を抑えることができる一方、正しくデータを分別する必要がある。

¹³ γ 線に崩壊するまでの寿命とは限らず、 2^3P 量子状態が壊れるまでの寿命。

¹⁴なお、レーザーパルス幅が数 ns あるため、数 100 fs の寿命を時間領域で直接測定することは困難である。

今後の方策としては、励起状態 Ps のナノ空孔中における短寿命崩壊現象解明のため、要素のパラメータ化と励起状態 Ps の崩壊率計測を系統的におこなう。予想される要素は、すでに測定した Ps 温度（運動エネルギー）に加え、空孔構造（空孔径）や化学組成が挙げられる。特に、化学組成の変更は Ps に対する空孔表面の仕事関数を変化させるため、励起状態 Ps 消滅率に大きな影響があるものと予想される。そして、本現象解明の暁には、励起 Ps をプローブに活用した新規表面分析手法に展開し、物質科学研究への応用を期待するとともに、Ps-BEC の早期実現に向け、空孔中で励起状態 Ps が崩壊しない材料の開発や、偏極陽電子ビームの生成・大量蓄積・高輝度化研究を推進する計画である。

6 まとめ

Ps-BEC を実現して反粒子にはたらく重力を精密測定し、未知の物質・反物質非対称性を探索するとともに、Ps-BEC を光源とした γ 線レーザーを実現すべく、研究を進めている。必須要素技術は3つあり、(1) 高密度陽電子ビーム生成・制御システム、(2) 高効率 Ps 生成・濃縮・冷却ナノ反応器、(3) Ps レーザー冷却で、産総研・KEK・東京大学を中心とした連携によりこれらの開発をおこなっている。2024年には最初のマイルストーンとして(3) Ps レーザー冷却の原理実証実験に成功した。これは、(1)、(2)の開発を含む連携と高信頼性計測系の構築によって困難を乗り越えることにより可能となった。今後の最優先課題は、Ps 生成材ナノ空孔中における Ps レーザー冷却の実現である。今後においても引き続き、連携研究の良さを最大限に活かしながら課題を一つひとつ解決し、Ps-BEC および γ 線レーザー実現に向けて着実に研究を進めていきたい。

謝辞

本研究は現在、以下の研究者との共同研究として推進しています。産総研：物質部門 伊藤 賢志 氏、分析部門 大島 永康 氏、満汐 孝治 氏、オローク ブライアン 氏、KEK 物構研：和田 健 氏、望月 出海 氏、兵頭 俊夫 氏、東京大学 ICEPP：難波 俊雄 氏、量子科学技術研究開発機構：高崎量子技術基盤研究所 前川 雅樹 氏。

本研究成果は以下の助成を受けたものです。科学技術振興機構創発的研究支援事業（課題番号：JPMJFR202L）, 日本学術振興会科研費（課題番号：JP16H04526, JP17H02820, JP17H06205, JP17J03691, JP18H03855, JP19H01923, JP23H05462）, 松尾学術振興財団, 三豊科学技術振興協会, 光科学技術研究振興財団, 三菱財団。

実験は高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光共同利用実験課題（課題番号：2017P009, 2018G100, 2020G101, 2020G631, 2022G087, 2023G157, 2024G143, 2025G151）により実施しました。

OPO レーザーは、岡山大学 吉村 浩司 研究室のご厚意により借り受けて使用しています。

また、Ps のレーザー冷却実験は、上記に加えて以下の方々との共同研究により実施しました（所属は研究当時）。東京大学：大学院工学系研究科 吉岡 孝高 氏、周 健治 氏、田島 陽平 氏、魚住 亮介 氏、宮本 尚樹 氏、白石 蒼馬 氏、小林 拓豊 氏、大学院理学系研究科 浅井 祥仁 氏、山田 恭平 氏、Randall Wayne Gladen 氏。Ps のレーザー冷却研究は、上記に加え以下の助成を受けたものです。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, 日本学術振興会科研費（課題番号：JP21K13862, JP22KJ0637, JP24H00217）, 住友財団基礎科学研究助成。Ps のレーザー冷却実験はフォトンファクトリー共同利用実験課題（課題番号：上記に加え 2023G660）によって、KEK 物構研 低速陽電子実験施設の SPF-B1 ステーションにおいて実施しました。

参考文献

- [1] Y. Kataoka *et al.*, PLB **671**, 219 (2009).
- [2] GEANT4 Collaboration, NIMA **506**, 250 (2003).
- [3] GEANT4 Collaboration, IEEE Trans. Nucl. Sci. **53**, 270 (2006).
- [4] GEANT4 Collaboration, NIMA **835**, 186 (2016).
- [5] A. H. Al-Ramadhan *et al.*, PRL **72**, 1632 (1994).
- [6] A. Ishida *et al.*, PLB **734**, 338 (2014).
- [7] S. G. Karshenboim, Phys. Rep. **422**, 1 (2005).
- [8] G. S. Adkins *et al.*, Phys. Rep. **975**, 1 (2022).
- [9] M. S. Fee *et al.*, PRA **48**, 192 (1993).
- [10] R. E. Sheldon *et al.*, PRL **131**, 043001 (2023).
- [11] T. Yamazaki *et al.*, PRL **104**, 083401 (2010).
- [12] P. Moskal *et al.*, Nat. Commun. **15**, 78 (2024).
- [13] P. Moskal *et al.*, Nat. Commun. **12**, 5658 (2021).
- [14] ALPHA Collaboration, Nature **621**, 716 (2023).

- [15] T. J. Phillips, *Hyperfine Interact.* **109**, 357 (1997).
- [16] M. K. Oberthaler, *NIMB* **192**, 129 (2002).
- [17] D. B. Cassidy *et al.*, *phys. stat. sol. (c)* **4**, 3419 (2007).
- [18] G. Vinelli *et al.*, *Class. Quantum Gravity* **40**, 205024 (2023).
- [19] L. R. McCaul *et al.*, *NJP* **27**, 095001 (2025).
- [20] K. Shu *et al.*, *JPB* **49**, 104001 (2016).
- [21] S. Mariazzi *et al.*, *PRL* **104**, 243401 (2010).
- [22] H. K. Avetissian *et al.*, *PRA* **92**, 023820 (2015).
- [23] A. Ishida *et al.*, *JJAP Conf. Proc.* **7**, 011001 (2018).
- [24] A. Miyazaki *et al.*, *PTEP* **2015**, 011C01 (2015).
- [25] K. Shu *et al.*, *Nature* **633**, 793 (2024).
- [26] 周健治ほか, *陽電子科学* **24**, 29 (2025).
- [27] H. Johnston, Top 10 breakthroughs of the year in physics for 2024 revealed, <https://physicsworld.com/a/top-10-breakthroughs-of-the-year-in-physics-for-2024-revealed/> (2024, Accessed on Nov 26, 2025).
- [28] K. Yamada *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **16**, 014009 (2021).
- [29] K. Shu *et al.*, *PRA* **104**, L050801 (2021).
- [30] K. Shu *et al.*, *JJAP Conf. Proc.* **9**, 011202 (2023).
- [31] N. Oshima *et al.*, *APL* **94**, 194104 (2009).
- [32] N. Oshima *et al.*, *JAP* **103**, 094916 (2008).
- [33] 石田明ほか, *PFACR* **37**, 201 (2020).
- [34] 石田明ほか, *PFACR* **35**, 271 (2018).
- [35] 周健治ほか, *陽電子科学* **16**, 31 (2021).
- [36] B. S. Cooper *et al.*, *PRB* **97**, 205302 (2018).
- [37] 石田明ほか, *PFACR* **39**, 183 (2022).
- [38] R. Brun *et al.*, *NIMA* **389**, 81 (1997).
- [39] A. Ishida *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **3149**, 012001 (2025).