

論文の内容の要旨

Laser Excitation of Confined Positronium in Porous Materials for Rapid Cooling

(高速冷却を目指した多孔質材料中におけるポジトロニウムのレーザー励起)

周 健治

電子とその反粒子対である陽電子とが構成する水素様束縛系原子はポジトロニウム (Ps) と呼ばれ、基礎物理学研究において有用な系である。Ps を応用した研究をさらに深化するために、Ps の高速冷却手法の開発が重要である。オルソ-ポジトロニウム (*o*-Ps) の崩壊寿命である約 142 ns と同程度の時間に Ps を 10 K 以下まで冷却できれば、ドップラー効果の低減による Ps 精密分光精度の向上、また、反粒子系で初となるボース-アインシュタイン凝縮の実現が期待できる。これらの応用として、反粒子と地球との間にはたらく重力効果の精密測定や、*CPT* 非対称性の探索、また、511 keV という高エネルギーのガンマ線レーザー光源の開発への道が拓ける。以降の本文では、Ps とは *o*-Ps のことを示す。

著者らは、Ps を高速に冷却する新しい手法を提案した。この手法は、Ps の物質中での熱化とレーザー冷却とを併用する。Ps をシリカ (SiO₂) でできた多孔質材料中の空孔に閉じ込めると、Ps の温度は材料の温度に近づいていく。この過程は熱化過程と呼ばれ、材料を 10 K 程度に冷却しておけば、Ps を 200 K 程度まで高速に冷却できることを実測している。熱化す

る Ps に対し、Lyman- α 遷移を誘導する波長 243 nm の紫外レーザーを照射することでドップラー冷却を行う。このドップラー冷却により、熱化過程が非効率となる 200 K 以降の冷却を加速し、300 ns 程度で 10 K までの冷却が可能となる。

新しい冷却手法では Ps の Lyman- α 遷移を繰り返すため、空孔中で 2P 励起状態である時間が長くなる。しかし近年、2P 状態にある Ps (2P-Ps) は、シリカ多孔質材料中で大きい消滅率をもつこと、また、Lyman- α 遷移曲線の幅が既存の現象では説明できないほど広がることが報告された。提案した冷却手法を実現するためには、これらの異常現象が生じる機構を解明し、それらの発現が抑制された多孔質材料を開発する必要があることが分かった。

2P-Ps の異常現象が発現しない可能性のある材料として、シリカエアロゲルという多孔質材料を用いた。先述の先行研究では、材料に残留した何らかの不純物により、基底 (1S) 状態にある Ps が空孔表面に束縛されていることが示唆されており、この表面束縛状態の形成が 2P 異常現象の発現に寄与していることが提案された。一方シリカエアロゲルでは、1S-Ps はそのような表面束縛状態を形成しないため、シリカエアロゲル中での Ps の Lyman- α 遷移を観測することで、提案された仮説を検証することができる。さらに本研究では、2P-Ps の消滅率を陽に含んだ現実的なモデルを構築し適用することで、2P-Ps の空孔中での消滅率を定量的に測定することとした。エアロゲルに陽電子を照射し Ps を生成するタイミングに対し、紫外励起レーザーを照射するタイミングを変えることにより、消滅率の Ps 運動エネルギー依存性も初めて測定した。これらの情報は、2P 異常現象の発現機構解明に資すると期待される。

エアロゲル中に Ps を生成し、レーザー照射により Lyman- α 遷移を観測する実験は、高エネルギー加速器研究機構の低速陽電子実験施設 (KEK-SPF) にて行った。KEK-SPF では、約 10 ns の時間幅に多数の陽電子が含まれたバンチ状のビームが得られるため、本実験で用いるナノ秒パルスレーザーと同期して Ps を生成することができる。Ps をエアロゲル空孔中に生成し、パルスレーザーを照射、出てきた消滅ガンマ線をシンチレータで検出することで、Ps の消滅率を測定する装置を構築した。KEK-SPF での実験に先立ち、エアロゲルの物性と空孔中での Ps の振る舞いを詳細に測定している。特に、エアロゲル中での 1S-Ps の寿命値と、Ps が空孔中で自由に運動しているときに予想される寿命値との一致を確認した。空孔中での *o*-Ps の寿命は、運動する Ps の波動関数と空孔表面からの電子の染み出し (距離にして約 0.18 nm) との重なりにより Ps 中の陽電子と染み出した電子との間で対消滅が生じるため、短くなることが知られている。寿命値の空孔径に対する依存性はよく較正されている。エアロゲルは約 50 nm 直径の空孔をもっており、空孔径から期待される寿命である約 130 ns と実測した寿命値が一致した。このことから、Ps はエアロゲル空孔中で表面に束縛されず、自由に運動していると考えられる。なお、KEK-SPF においてもエアロゲル中での 1S-Ps の寿

命を測定し、前述の予想、測定との一致を確認している。KEK-SPF ではバンチ化された陽電子からの多数の消滅ガンマ線が検出されるため、パイルアップを適切に処理できる解析方法を採用した。

まず、2P-Ps が空孔の外では消滅しないことを確認した。これは、空孔中に生成されその後の運動によりエアロゲルから外の真空に飛び出した Ps にレーザーを照射することで行った。Lyman- α 遷移を誘導する紫外レーザーと、2P-Ps のみを電離する 532 nm 緑レーザーを同時に照射することで、遷移が生じた際に電離した陽電子による対消滅が信号として観測される。電離陽電子による対消滅信号は、紫外レーザーと緑レーザーを同時に照射し、かつ、紫外レーザーの波長を Lyman- α 共鳴中心である 243 nm 付近としたときにのみ観測された。これにより、Ps は 2P 状態に励起され、空孔の外ではガンマ線に崩壊しないことが示された。また、遷移曲線の幅は、熱化過程より期待される Ps の温度から生じるドップラー広がりと同程度であり、異常な広がりが生じないことも観測された。

一方、空孔中で 2P-Ps へ励起すると、先行研究と同様の消滅現象と共鳴幅の広がりが観測された。この測定では、Ps をエアロゲル空孔中に閉じ込めるために、エアロゲルの陽電子入射面を 75 nm 厚の非多孔質シリカ膜で塞いだ。紫外レーザーのみを膜付きエアロゲルに照射することで、空孔中に閉じ込められた Ps の Lyman- α 遷移を誘導した。空孔の外で遷移した場合と異なり、紫外レーザーのみの照射に同期した消滅ガンマ線の増加が観測された。消滅した Ps の量は、レーザー照射タイミングに残っていた 1S-Ps のおよそ半数であった。このことは、2P-Ps がエアロゲル空孔中においても高い消滅率で崩壊することを示している。また、243 nm を中心とする幅広い遷移共鳴が観測された。共鳴の幅は半値全幅で 1 nm であり、やはりドップラー広がりや衝突広がりといったような既存の現象で説明することはできないほど広い値であった。

また、新たに構築した Ps の崩壊モデルを適用することにより、2P-Ps の空孔中での消滅率を定量的に測定した。消滅率は 1 THz-7 THz 程度の値をとり、Ps 運動エネルギーに依存することが観測された。一方、共鳴幅は消滅率に依存しなかった。このことから、消滅現象と独立な機構により、空孔中では 1S-2P 状態のエネルギー準位差に幅が生じていることが示唆される。消滅率を空孔中での Ps 平均衝突頻度で規格化すると、両頻度が同程度の値であり、Ps 運動エネルギー 0.06 eV 程度にて最大となることが分かった。

以上の測定により、1S-Ps が表面に束縛されないエアロゲル空孔中においても、2P-Ps の消滅率が高く、共鳴幅が広がることが分かった。これら異常現象を引き起こしうる機構や原因を考察した。まず、共鳴幅の広がりは消滅率に依存せず、空孔に存在する電場によるシュタルク効果など、消滅現象と独立な機構によって生じることが示唆された。エアロゲルを構成する微粒子表面にはシラノール基 (-Si(OH)) が存在するため、Ps はその双極子電場を表面

からの距離に依存して感じる。空孔中で励起される際の位置が同様であれば、2P 状態のエネルギー準位が広がると考えられる。空孔径と典型的なシラノール基の密度から双極子電場の大きさを見積もると、観測された共鳴幅を説明できるほど大きくなり得ることが分かる。また、消滅機構については、1S-Ps にはない 2P 状態の特徴的な性質が寄与していると考えられる。励起状態では束縛エネルギーが小さいため、電子と陽電子がシリカ中に存在することが安定であったり、または P 状態がもつ大きな電気感受率が物質との間の相互作用効果を増幅している可能性がある。