

付録 1 低速陽電子実験施設

低速陽電子実験施設

和田 健

物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設,

総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

1. 概要

低速陽電子実験施設は、陽電子を用いた物質最表面近傍の原子配列、およびそれと表面物性の関係解明、陽電子やポジトロニウム (Ps), Ps 負イオンといったエキゾチック粒子の基礎的性質の解明、それらの粒子と物質との相互作用の解明を目的として、全反射高速陽電子回折 (TRHEPD, トレプト), 低速陽電子回折 (LEPD, レプト), 汎用ステーションにおける実験 (現在 Ps のレーザー冷却実験), Ps 飛行時間 (Ps-TOF) 測定などの研究を進めている。低速陽電子とは、加速器で加速した電子を重金属 (Ta) 標的に当てて、電子陽電子対生成で生じたエネルギー幅の大きな高エネルギー陽電子のエネルギーを、金属 W がもつ負の陽電子仕事関数を利用してそろえたものである。

スタッフは、自身の研究と共に、ビームライン・ステーションの最適化や研究開発を行い、共同利用研究を推進している。構成ビームライン・実験ステーション名と担当者は下記のとおり。

BL・実験 ステーション	担当者	備考 (ユーザー運営, 大学運営など)
SPF-A3・TRHEPD ステーション	和田 健	
SPF-A4・LEPD ステーション	和田 健	
SPF-B1・汎用 低速陽電子実験 ステーション	和田 健	現在は Ps のレーザー冷却実験に用いられている。整備には東京大学石田明氏が協力
SPF-B2・Ps-TOF ステーション	和田 健	

2. 活動内容

2020 年度は、夏の停止期間中に低速陽電子生成部を 10 年ぶりに更新した。その際、低速陽電子を生成するモデレータの構造を変更したところ、それまで 10^7 slow- e^+/s 半ば以下だった低速陽電子ビーム強度が 10^8 slow- e^+/s の大台に乗った。ビームラインの真空悪化によるビームダウンを防ぐための真空インターロックの導入が、放射光実験施設基盤技術部門のインターロックチームにより、2 カ年計画で開始された。新型コロナウイルス感染症への対応は PF に準じており、第 1 期はビームタイムの配分は行わず、陽電子回折実験の代行測定の可能性の検討と実地試験のための運転を行った。

【実験施設として推進している研究】 TRHEPD, LEPD による表面原子配列および表面直下の原子配列の研究, Ps のレーザー冷却研究, および Ps 飛行時間 (Ps-TOF) 法による表面研究。現在多くの成果が出つつある TRHEPD をさらに発展させ、表面科学の重要問題に関係する原子配列を陽電子回折によって解決する。

TRHEPD ステーション (APF-A3) では、 ZrB_2 基板上に形成された二次元 Ge 層状物質の構造が二重三角格子であると特定された。

LEPD ステーション (SPF-A4) では装置改良を行った。十字状の不感領域のある DLD 検出器を、そのない HEX 型に変更した HEX-LEED/LEPD 検出器を新たに開発し、電子銃をもちいて十字状の不感領域のない LEED 回折パターンを観測した。

TRHEPD のデータ解析の高度化を、データ駆動科学の専門家である星健夫 KEK 客員准教授 (鳥取大学) が中心となって進めた。初期配置を必要としない表面原子座標の

SPF
Slow Positron Facility

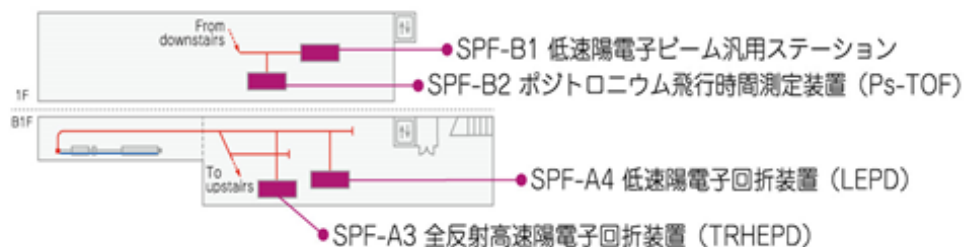


図 1 低速陽電子実験施設のビームライン

広域探索において、最適解の存在領域を絞り込み、そこから高速な局所探索を行う方法を実装した表面構造解析のための汎用データ解析ソフトウェア「2DMAT」を、東大物性研・計算物質科学研究センターにおいて公開した。これにより、従来、熟練した専門家の経験に依存していた構造解析を、一般ユーザーがデスクトップ PC やスーパーコンピュータを用いて簡便に短時間で行えるようになりつつある。

【試料作成チェンバー整備】 各ビームライン分岐ステーションでは、in situ で試料を作製して実験を行うが、本施設の測定チェンバーの試料作製／評価環境は各研究室のものと異なるため、様々な困難がある。その緩和のため、所内公募研究費に採択された資金と他の外部資金も用いて、表面研究用の汎用の試料チェンバーの整備を進めている。2020 年度は、LEED 測定装置、試料ホルダ追加×3、水晶振動子膜厚計、W フィラメント加熱型簡易蒸着装置×2、RHEED スクリーンシャッターなどを整備した。

【実験施設内活動】 小杉実験施設長を交えた施設会議を半年に1回行った。

3. 今後の展望

TRHEPD は、視射角を変化させた測定で最表面および表面下数層に絞った原子配列の情報が高精度で得られる。この特徴を最大限に活かして、最近盛んに研究されている単原子層物質の構造を解明する。

LEPD は、装置改良がほぼ完了したので、2020 年度から試運転を行う。表面構造解析のための実用的な実験ステーションに必要な基本的な環境整備を進めていく。

汎用ステーションは、将来の Ps ボース-アインシュタイン凝縮の実現に必要な Ps レーザー冷却の研究を継続する。

Ps-TOF は、引き続き Ps 生成と放出を通じた、金属、半導体、絶縁体表面の電子構造の研究を展開する。

ユーザーからは測定時間短縮のための低速陽電子ビーム強度増強の希望が強い。現在のシステムで共同利用を継続しつつ、天井が厚くシールド増設の容易な北側の旧テスト・リニアック室において、高電界電子線形加速器などの新しい加速器と低速陽電子生成ターゲットを用いた新システム開発を行うための予算獲得を目指す。

データ解析ソフトウェアの開発は、2DMAT を充実させ、LEPD をはじめとして、電子回折、X線回折への拡張を図る。

SPF-A3：全反射高速陽電子回折（TRHEPD）ステーション

和田 健^{1,2}, 望月 出海^{1,2}, 兵頭 俊夫¹

¹物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設,

²総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

1. 概要

SPF-A3 ステーションでは、低速陽電子実験施設 (slow positron facility, SPF) の専用リニアックで生成されたロングパルスモードの高強度・高輝度低速陽電子ビーム [1] を用いて、全反射高速陽電子回折 (total-reflection high-energy positron diffraction, TRHEPD [2, 3]) 実験を行っている。

実験は、図 1 に示したように、10 keV に加速した高輝度陽電子ビームをすれすれ視射角で試料に打ち込み、進行方向に配置したスクリーンに現れる回折パターンを撮影する。入射陽電子ビームに対する試料の視射角 (θ) と方位角 (ϕ) は PC により自動制御でき、視射角変化させながらパターン取得する方法 (ロッキング曲線と呼ばれる) と方位角変化させながらパターン取得する方法 (方位角プロットと呼ばれる) の測定ができる。

測定試料の標準的な大きさは 10 mm × 5 mm × 0.5 mm である。試料は、ロードロック室を経由して、超高真空を破らずに測定チェンバ内の試料マニピュレータ上に搬送できる。試料温度は、直接通電加熱もしくは電子衝撃加熱による高温域の温度制御 (500~1500 K 程度) と、GM 冷凍機とヒーターを併用した低温域の温度制御 (15 K ~ 250 K 程度) が可能である。

2. 整備開発および運用状況

2020 年度は、慢性的なビームタイム不足問題の当面の解決のための試料準備チェンバ整備を進めた。所内公募研究費の採択や外部資金獲得もあり、LEED 測定装置 (含 LEED 試料ステージ取り付け)、試料ホルダ × 3、水晶振動子膜厚計、W フィラメント加熱型簡易蒸着装置 × 2、RHEED スクリーンシャッターなどを導入した。これら整備により、共同利用実験において本チェンバのユーザー利用が本格的に始まった。より多くの表面試料作製に対応できるよう、今後も継続して整備を進める。

本ステーションには、TRHEPD 測定システムの他、以

下の設備が常設されている :LEED 装置 RHEED 装置; Ar⁺ イオンスパッタ装置; 蒸着源用ポート (ICF70 × 4); 電子衝撃加熱 (最大印加電圧 2 kV) 型 3 源エバポレータ; Ar ガス導入; O₂ ガス導入; H₂ ガス導入; 試料通電 / 電子衝撃加熱機構; 試料冷却 / 温度制御機構; 試料ストック交換用ロードロック機構; 超高真空維持型試料トランスファーベッセル; 試料ホルダ × 4; 試料温度測定用放射温度計。

3. ビームタイム利用状況

SPF では、一台の専用リニアックで生成した低速陽電子ビームを、輸送ラインの途中で 4 本 (SPF-A3, A4, B1, B2) に分岐して、ビームタイム毎のタイムシェア方式で共同利用実験に供している。このため SPF-A3 のビームタイムは、他 3 本と一体で、放射光共同利用実験課題審査委員会 (PF-PAC) 評点に基づいて配分される。どの課題も統計が必要な蓄積型実験で、1 課題に対して、1 期あたり概ね 3-4 日間割り振られる。ビーム輸送パラメータのセットアップはスタッフが対応している。経験のあるユーザーは、輸送パラメータ変更などを各自で行なうことが可能になりつつある。

2020 年度の本ステーション利用課題は、「(2018G513) 全反射高速陽電子回折による Ag(100) 上のバナジウム亜酸化物薄膜の構造決定」、「(2018G664) 酸化物チタニア結晶に光生成された励起子が誘起する表面反応後における結晶表面構造の全反射高速陽電子回折」、「(2019G123) 新奇ディラック電子系ポロフェンの構造解析」、「(2019G124) ランダム欠陥を取り入れた超巨大構造としてのグラフェンの構造解析」、「(2019G540) 全反射高速陽電子回折による Si(111)7×7 再構成表面の原子座標の決定」、「(2019G615) Si(001)2×1 上 Mn 1 次元構造の反射高速陽電子回折 (TRHEPD) 観察」、「(2019G684) 全反射高速陽電子回折による ZrB₂ 基板上のゲルマネンの構造決定」、「(2020G040) Experimental determination of interlayer distance of graphene/CFGG heterostructure」、「(2020G625) 新奇ディラック電子系ポロフェンの構造解析：基板依存性」であった。

2020 年度は、TRHEPD によって、Ge(111) 基板上 ZrB₂ 薄膜表面に拡散した二次元 Ge 層の構造が、二重三角格子であると特定された [4]。また、表面構造解析のための汎用データ解析ソフトウェア「2DMAT」[5, 6] が公開された。

従来の TRHEPD 解析では、熟練研究者がさまざまな二次元物質の初期配置を設定し、経験を生かしてその原子位置を探していた。2DMAT では、この試行錯誤プロセスを自動化・高速化し、さまざまな困難 (モデル構築に熟練が

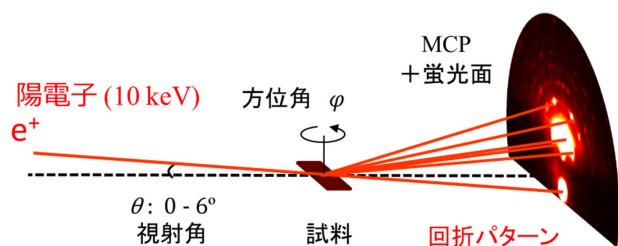


図 1 TRHEPD 実験配置

必要、初期配置に依るローカルミニマムが最適解とは限らない、計算時間が膨大)を克服する方策を探り、ユーザーが未知の2次元物質の構造を簡便に決定できるようになることを目指している。これにより、従来、熟練した専門家の経験に依存していた構造解析を、一般ユーザーが簡便に短時間でできるようになりつつある。

4. 今後の展望

本格的に共同利用実験を開始した2013年以降、TRHEPDの認知度も上がり、ユーザーも増加してきた。引き続き、TRHEPDの表面超感受性を活かして、表面特性が重要なグラフェンやボロフェン(ホウ素の単原子シート)などの単原子層状物質、もしくはそれらの多原子層物質や化合物、遷移金属ダイカルコゲナイド、新合成の超薄膜物質、触媒物質などの構造解析の研究を推進する。一方で、ビームタイム配分率が低下し、慢性的なビームタイム不足の問題が表面化している。これを当面解決するため試料準備チェンバ整備が進められているが、根本的な解決策としては、専用リニアック強化による低速陽電子強度増強を進める必要がある。

引用文献

- [1] M. Maekawa, K. Wada, Y. Fukaya, A. Kawasuso, I. Mochizuki, T. Shidara and T. Hyodo, *Eur. Phys. J. D* **68**, 165 (2014).
- [2] 兵頭俊夫, 「全反射陽電子回折 (TRHEPD) による表面構造解析」*固体物理* **53**, 705 (2018年11月号 p141).
- [3] Y. Fukaya, A. Kawasuso, A. Ichimiya, and T. Hyodo, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52**, 013002 (2019).
- [4] A. Fleurence, C.-C. Lee, R. Friedlein, Y. Fukaya, S. Yoshimoto, K. Mukai, H. Yamane, N. Kosugi, J. Yoshinobu, T. Ozaki, and Y. Yamada-Takamura, *Phys. Rev. B* **102**, 201102(R) (2020).
- [5] <https://www.pasums.issp.u-tokyo.ac.jp/2dmat/>
- [6] 星健夫, 田中和幸, 阪田大志郎, 尾家翔太郎, 望月出海, 田中悟, 兵頭俊夫, 日本物理学会第75回年次大会 (2020年) 11aJ1-1.

SPF-A4：低速陽電子回折（LEPD）ステーション

和田 健^{1,2}, 望月 出海^{1,2}, 兵頭 俊夫¹, Rezwan Ahmed³

¹ 物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設

² 総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

³ 物質構造科学研究所 量子ビーム連携研究センター

1. 概要

SPF-A4 では、低速陽電子実験施設 (Slow positron facility, SPF) の専用リニアックのロングパルスモードで生成された高輝度・高強度低速陽電子ビームを用いた、低速陽電子回折 (Low-energy positron diffraction, LEPD, レプト) ステーションの開発が行なわれている。LEPD 法は、結晶表面構造解析の手法である低速電子回折 (Low-energy electron diffraction, LEED) 法の陽電子版である。LEPD は LEED より表面敏感で多重散乱が少なく、X線回折と同様な単純な散乱因子を持つため、理想的な表面構造解析手法になり得ると理論家により予想されている [1]。

SPF-A4 では、加速器で生成した高強度低速陽電子ビームを用いた LEPD パターンの観測に、世界で初めて成功し [2]、表面構造解析のための実用的な共同利用ステーションを目指した整備を進めている。

2. 整備開発および運用状況

SPF で LEPD パターンの初観測に用いられた遅延線アノード検出器 (delay-line detector, DLD) [3] は、MCP 背面に 2 層のアノードワイヤを配置して 2 次元位置情報を得る。MCP によって増幅された電子流が遅延線アノードに到達すると、そこから遅延線の両端にパルス信号が伝達され、両端での到達時間の差から位置情報が得られる。SPF で LEPD 初観測に成功した 2 層式の DLD では、X 座標と

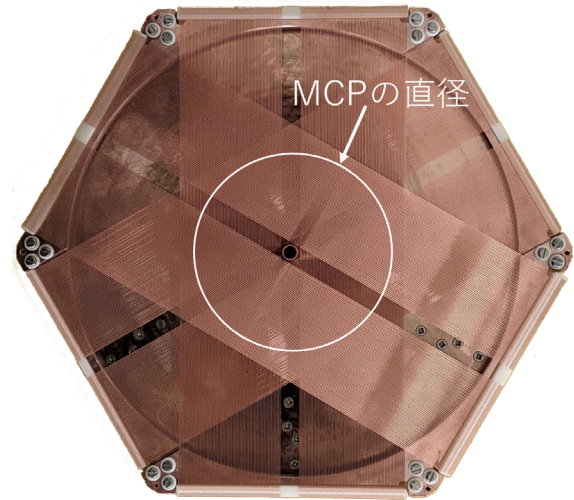


図2 新しく LEPD 検出器に組み込んだ LEPD 用の 3 層遅延線アノード検出器

Y 座標を決めるための独立な 2 本の遅延線が互いに 90° をなすよう巻かれている。LEPD 用に使う DLD には中央ビームを通すためのセンターホールがあるので、図 1 に示すように 2 本の遅延線はそれぞれこのセンターホールをまたいで巻かれている。そのため、センターホールで交差する、十字状の遅延線が 1 層しか無い領域が存在し、この領域では位置情報が得られない。

この十字状の不感領域に隠れた回折スポットについては、試料を回転することで再観測も可能ではあるが、測定に時間がかかるため、表面が汚染される前の迅速な測定が重要となる表面研究にとっては問題である。そこで我々は、2 層遅延線アノード検出器にかえて、図 2 に示す 3 層遅延線アノード検出器 (六角形の外観から HEX 検出器と呼ばれる) を導入した。HEX 検出器では、3 本の遅延線が独立に互いに 120 度の角度をなすようセンターホールをまたいで巻かれている。こうすることで、センターホールのごく近傍の領域を除き、必ず 2 層または 3 層の遅延線が存在するため、十字状の不感領域の無い回折パターンの観測が可能である。

2020 年度に、HEX 検出器を用いた HEX-LEED/LEPD システムを新たに開発し、まずは電子銃を用いて、十字状の不感領域の無い LEED パターンの取得に成功した (図 3)。2021 年度は、この HEX-LEED システムの電子銃を LEPD 光学系にかえた HEX-LEPD システムによる LEPD 回折パターンの取得実験を開始する予定である。

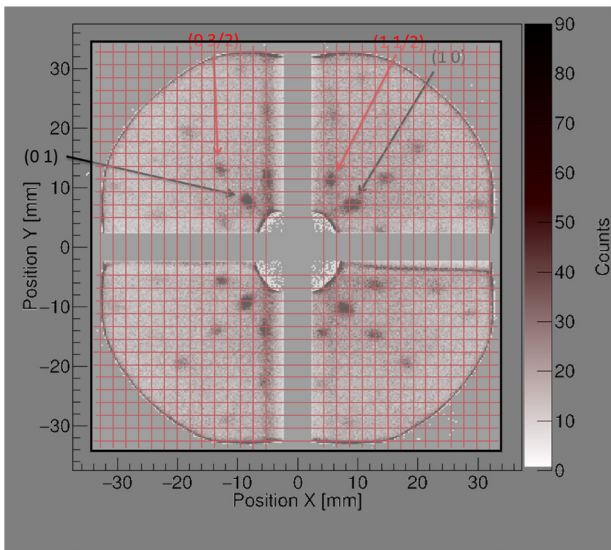


図1 遅延線アノード検出器の配置を LEPD パターンに重ねた概念図

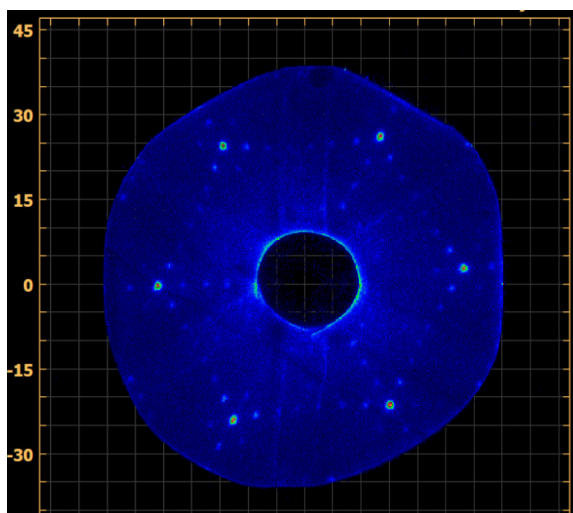


図3 3層遅延アノード線検出器によるLEEDパターン (Si(111)7 × 7, 52 eV)

[3] O. Jagutzki, A. Cerezo, A. Czasch, *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., **49**, 2477 (2002).

3. ビームタイム利用状況

SPFでは、一台の専用リニアックで生成した低速陽電子ビームを、輸送ラインの途中で4本 (SPF-A3, A4, B1, B2) に分岐して、ビームタイム毎のタイムシェア方式で共同利用実験に供している。このため SPF-A4 のビームタイムは、他3本と一体で、放射光共同利用実験課題審査委員会 (PF-PAC) 評点に基づいて調整される。どの課題も統計が必要な蓄積型実験で、G型課題の場合、每期1課題に対して概ね3-4日間割り振られる。ビームタイム開始前の事前準備や、ビーム輸送パラメータのセットアップは、基本的に内部スタッフが対応しているが、十分経験のあるユーザーは、輸送パラメータ変更などを各自で行なうことが可能になりつつある。

2020年度に SPF-A4 を利用した課題は、「(2019G692) 表面構造解析のため低速陽電子回折 (LEPD) 法の確立」である。

4. 今後の展望

LEPD は、LEED による解析が困難な重元素を含む表面の構造解析に特に有用であると考えられている。また垂直入射方式のため、平滑性に多少乏しい試料表面も観測できる。LEPD ステーションを、全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) に加え、もう1つの表面構造解析の基盤ツールとして KEK 施設利用者に提供できるよう整備を進める。2021年度に HEX-LEPD システムによる LEPD パターンの取得を試みる。また、表面の汚染が進む前の迅速な LEPD 測定を可能にし、表面科学にとって意味のあるデータを提供できるよう、基本的な実験環境整備を進める。

引用文献

[1] S. Y. Tong, Surf. Sci. **457**, L432 (2000).
 [2] K. Wada, T. Shirasawa, I. Mochizuki, M. Fujinami, T. Takahashi, M. Maekawa, A. Kawasuso, M. Kimura, and T. Hyodo. e-J. Surf. Sci. Nanotechnol. **16**, 313 (2018).

SPF-B1：汎用低速陽電子実験ステーション

和田 健^{1,2}, 望月 出海^{1,2}, 兵頭 俊夫¹, 石田 明³

¹物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設,

²総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究所物質構造科学専攻, ³東京大学理学系研究科

1. 概要

本汎用ステーションは、低速陽電子実験施設 (slow positron facility, SPF) の低速陽電子ビームの特長 (高強度であること、およびパルス状であること) を利用した種々の研究のために用意されている。現在は、ポジトロニウム (Ps) レーザー冷却実験装置が設置されている。Ps は陽電子 1 個と電子 1 個からなる束縛状態である。

2020 - 2021 年に行った Ps レーザー冷却原理実証実験のセットアップを図 1 に示す。専用リニアックの短パルスモード (~10 ns, 50 Hz) で生成された高強度 (~10⁶ e⁺/s) の低速陽電子ビームを、レーザー冷却用に試作した開放孔をもつシリカエアロゲルに入射して Ps を生成する。シリカエアロゲル表面から陽電子ビーム上流側の真空中に放出された Ps に、1S-2P 遷移に相当する 243 nm の紫外レーザー光を照射し、Ps レーザー冷却や Ps 温度測定を行う。このときレーザーはビーム軸に垂直な水平方向に多重反射させ (図 1(d)), また Ps はレーザー多重反射面に垂直な鉛直方向にシリカ板で閉じ込め、Ps とレーザー間の相互作用に十分な領域を確保する。この実験では装置内 7 × 10⁻⁷ Pa 程度の真空が維持されている。本セットアップは 2021 年度以降の Ps レーザー冷却実験にも用いる。

2. 整備開発および運用状況

Ps は束縛系量子電磁力学 (QED) の精密検証に大変重要な研究対象であるとともに、反粒子を含むシンプルな系であるため、物質・反物質非対称性 (なぜ現在の宇宙に物質だけが残ったのか) の解明に有用である。Ps を 10 K 以下まで冷却すれば、Ps のエネルギー準位の超精密測定や、将来的にスピン偏極陽電子ビームを用いることによって反物質を含む系における世界初のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) を実現できる。特に 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の測定 (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可能性を探る実験に応用できる。Ps レーザー冷却を行うことによって 10 K までの高速冷却を行い BEC が実現可能であることを理論的に示し [2], そのための Ps レーザー冷却の世界初実現に向けた実験を行っている。この実験は、世界初の Ps-BEC 実現を目指した実験として注目を浴びている。

Ps レーザー冷却実験成功の鍵は、SPF 低速陽電子ビームの大強度かつ短パルスである特性が、Ps レーザー冷却に必要なパルスレーザーの時間特性と合致しており、レーザー光と同期した実験が可能であることである。2018

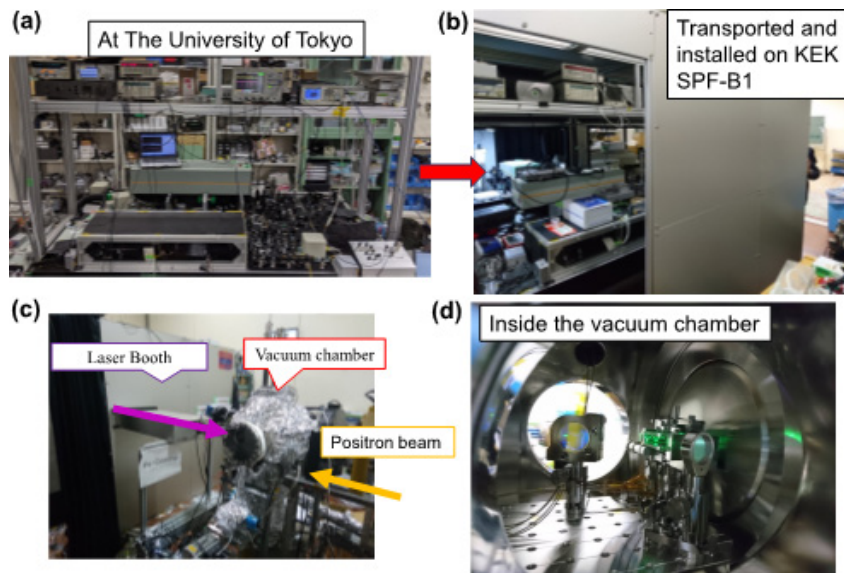


図 1 Ps レーザー冷却原理実証実験のセットアップ (文献 [1] より転載)。(a) Ps 冷却用プロトタイプレーザーセットアップ (東京大学)。(b) KEK に移送し SPF-B1 に設置した (a) のレーザー。(c) SPF-B1 ビームラインにおける実験セットアップ全体写真。(d) 真空チャンパー内写真。陽電子ビームは写真右側から導入されてレーザー・Ps 反射装置を通過し、開放孔をもつ Ps 生成材 (シリカエアロゲル) に入射する。生成された Ps は写真右側の真空中に放出され、レーザー・Ps 反射装置内に導入される。一方、陽電子ビーム下流側から導入したレーザー光はチャンパー内 2 つのガイドミラーで反射し、レーザー・Ps 反射装置に導入される。多重反射によってレーザー照射領域をビーム軸方向に広げることで、Ps とレーザー間の十分な相互作用領域を確保している。

年度末から 2019 年度前半にかけ、シリカエアロゲル空孔中でトリプレットの 2P 状態に励起された Ps が瞬時に消滅する現象を確認した [3, 4]。これは当初計画していたシリカエアロゲル空孔中での Ps レーザー冷却の阻害要因であるため、2019 年度後半には真空中に放出された Ps のレーザー冷却に目標を変更し、2019 年度の実験によって真空中に放出された Ps のレーザー冷却に必要なトリプレットの 1S-2P 遷移を確認した。2020 年度には図 1(a) の Ps 冷却用プロトタイプレーザーを完成させ、当該レーザーを SPF-B1 に設置し (図 1(b))、図 1 のセットアップを完成させて Ps レーザー冷却の原理実証実験への挑戦を開始した。現在までに実験装置の自動化・遠隔化による測定の安定性・再現性向上を進めながら課題を一つひとつ解決し、レーザー冷却原理実証に向けた知見を蓄積しつつある。

3. ビームタイム利用状況

SPF では、一台の専用リニアックを用いて生成した低速陽電子ビームを下流で分岐し、4 本のビームライン (SPF-A3, A4, B1, B2) で、ビームタイム毎のタイムシェア形式で共同利用に供している。本ビームライン利用課題は「(2020G101) 真空中におけるポジトロニウムのレーザー冷却」である。

4. 今後の展望

本汎用ステーションは、レーザー設置用の定盤を置くスペースが確保されているために、レーザーを利用したさまざまな Ps や Ps 負イオンの実験が可能である。今後、世界初の Ps レーザー冷却を実現する計画である。

引用文献

- [1] Y. Tajima, “Development of a chirped pulse laser for cooling positronium”, 12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC12.5), 2021 年 8 月 31 日, オンライン開催.
- [2] 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); 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. **7**, 011001 (2018).
- [3] K. Shu, “Laser Excitation of Confined Positronium in Porous Materials for Rapid Cooling”, Doctoral dissertation, The University of Tokyo (2020).
- [4] 周健治, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 橋立佳央理, 石田明, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 難波俊雄, 満汐孝治, オロークブライアン, 大島永康, 鈴木良一, 伊藤賢志, 熊谷和博, 藤野茂, 望月出海, 和田健, 兵頭俊夫, 甲斐健師, 「シリカ空孔中でのポジトロニウム励起実験」, 陽電子科学 第 **16** 号 31-38 (2021).

SPF-B2：ポジトロニウム飛行時間測定（Ps-TOF）ステーション

和田 健^{1,2}, 望月 出海^{1,2}, 兵頭 俊夫¹

¹ 物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設,

² 総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

1. 概要

本ステーションでは、低速陽電子実験施設 (slow positron facility, SPF) の専用リニアックで生成されたショートパルスモードの短パルス低速陽電子ビーム [1] を用いて、ポジトロニウムの飛行時間測定 (positronium time-of-flight, Ps-TOF) [2, 3] 実験を行っている。

パルス状陽電子ビームは 4.2 keV 程度に加速して Ps-TOF 測定装置 (図 1) まで輸送する。試料位置でのパルス幅は 10 ns 程度である。試料に対する陽電子入射エネルギーの調整は、試料直前に接地されたグリッドを設置するとともに試料に必要な電圧を印加することによって行う。

このビームを試料に打ち込み、試料表面から放出されるスピン三重項のオルソポジトロニウムの飛行時間を測定する。測定チェンバ上部には、試料位置から水平距離にして 40 mm および 120 mm の位置に鉛スリットとシンチレーション検出器が設置されており、真空中の寿命が 142 ns のオルソポジトロニウムがこれらの検出器の真下を通る時に自己消滅して発生した γ 線のうち 1 本を検出する。検出器の光電子増倍管からの信号を高速デジタルに入力し、リニアックのタイミング信号をトリガーとして飛行時間スペクトルを得る。陽電子の入射時刻は、入射後 200 ps 程度の時間内に試料内で消滅した陽電子からの消滅 γ 線がスリットの鉛シールドを抜けたものがプロンプト信号として同じ飛行時間スペクトルに検出されているので、それを利用して知る。

測定試料の標準的な大きさは 15 mm × 15 mm × 2 mm (t) である。試料の背面には電子衝撃による加熱機構が備えられている。

2. 整備開発および運用状況

現在、本ステーションには、Ps-TOF 測定システムの他、以下が常設されている：RHEED 装置、蒸着源用ポート (ICF70 × 1)、O₂ ガス導入、試料温度測定用放射温度計。

3. ビームタイム利用状況

SPF では、一台の専用リニアックで生成した低速陽電子ビームを、輸送ラインの途中で 4 本 (SPF-A3, A4, B1, B2) に分岐して、ビームタイム毎のタイムシェア方式で共同利用実験に供している。このため SPF-B2 のビームタイムは、他 3 本と一体で、放射光共同利用実験審査委員会 (PF-PAC) 評点に基づいて調整される。どの課題も統計が必要な蓄積型実験で、每期 1 課題に対して概ね 2-3 日間割り振られる。ビームタイム開始前の事前準備や、ビーム輸送パラメータのセットアップは、内部スタッフが対応している。十分経験のあるユーザーは、輸送パラメータ変更などを各自で行なうことが可能になりつつある。

2020 年度の本ステーション利用課題は、「(2019G022) ゲルマニウム単結晶表面からのポジトロニウム放出プロセスの解明」、「(2019G599) SiC および SiC 基板上グラフェンから放出されるポジトロニウムの飛行時間測定」、「(2020G631) 多孔体表面から真空中に放出されるポジトロニウムのエネルギー分布の測定」である。

2020 年度は、4H SiC(0001) 表面から放出されるポジトロニウムの飛行時間の測定結果に関する成果などが公表された。

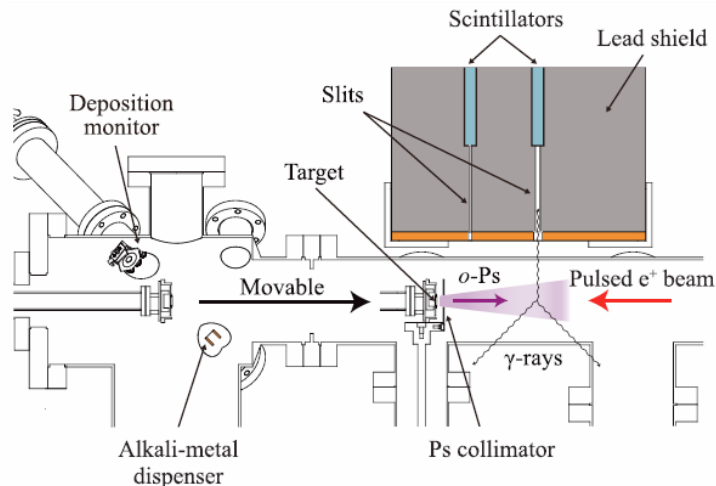


図 1 Ps-TOF 実験装置 [3]

4. 今後の展望

種々の物質表面からのポジトロニウム放出機構の解明を系統的に進めていくことを目指している。一方で、他のステーションも含めたビームタイム配分率が窮屈になり、慢性的なビームタイム不足の問題が表面化している。根本的な解決策としては、専用リニアック強化による低速陽電子強度増強を進める必要がある。

引用文献

- [1] K. Wada, T. Hyodo, A. Yagishita, M. Ikeda, S. Ohsawa, T. Shidara, K. Michishio, T. Tachibana, Y. Nagashima, Y. Fukaya, M. Maekawa and A. Kawasuso, *Eur. Phys. J. D* **66**, 37 (2012).
- [2] S. Iida, K. Wada, I. Mochizuki, T. Tachibana, T. Yamashita, T. Hyodo and Y. Nagashima, *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 475002 (2016).
- [3] A. Kawasuso, M. Maekawa, A. Miyashita, K. Wada, T. Kaiwa and Y. Nagashima, *Phys. Rev. B* **97**, 245303 (2018)
- [4] A. Kawasuso, K. Wada, A. Miyashita, M. Maekawa, H. Iwamori, S. Iida, Y. Nagashima, *J. Phys.: Condens. Matter* **33**, 035006 (2020).