

# 低速陽電子実験施設

永井 康介

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 (現在は Ps レーザー冷却実験), Ps 飛行時間測定 (Ps-TOF) 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標的 (ここでは Ta) に当て、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って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	望月 出海	
SPF-A4: LEPDステーション	望月 出海	整備には量子科学技術研究開発機構和田健氏が協力。
SPF-B1: 汎用低速陽電子実験ステーション	望月 出海	現在は Ps 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	望月 出海	整備には量子科学技術研究開発機構和田健氏が協力。

## 2. 活動内容

2019年4月1日付で物質構造科学研究所が改組され、低速陽電子実験施設がこれまでの実験スペースの名称から組織および実験スペースの名称となった。実験施設長代行を小杉信博物構研所長が兼任している。

**【実験施設として推進している研究】** TRHEPD および LEPD による表面原子配列および表面直下の格子緩和の研究, Ps レーザー冷却研究, および 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り解決する。

TRHEPD ステーション (SPF-A3) では, SiC 表面上に形成した 2 層グラフェンに Ca をインターカレートした 2 次元超伝導体の構造を解明した。その結果, Ca がインターカ

レートされている位置およびグラフェンの積層状態が, それまで考えられていたものとは異なることを明らかにした。

また 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, それのない HEX 型に変更した。ここでは HEX-LEED/LEPD 検出器を新たに開発し, 電子銃を用いて十字状の不感領域のない回折パターンを観測した。

**【試料作製チェンバー整備】** 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。それを緩和するため, 所内公募研究費の採択資金や外部資金を用いて, 表面研究用の汎用試料準備チェンバーの整備を進めている。2019年度は, 試料マニピュレータ, 電子衝撃加熱型 3 源エバポレータ, RHEED 装置, Ar<sup>+</sup> イオンスパッタ装置, 真空維持型の試料搬送ベッセルなどを導入した。

**【実験施設内活動】** 従来メンバーの研究室は 4 号館と PF 研究棟の個室に分散していたが, 4 月より 4 号館の大部屋に全員集まったので随時情報交換ができるようになった。また, 小杉低速陽電子実験施設長代行を加えた実験施設会議を年 2 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。また, データ駆動科学と協力して特定のモデルを仮定しない大域探索及び高速最適化による解析効率の高効率化を図る。

LEPD は, 装置改良の各要素技術開発がほぼ完了し, 2020 年度からこれらを組み合わせた LEPD 観測を進め, I-V 曲線解析の他, 逆関数を用いた解析法などの開発を進める。

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進める。

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。天井が厚くシールド増設の容易な北側の旧テスト・リニアック室に陽電子生成ターゲットを移設して, 現加速管の電流増強 (パルス幅を伸張する) や加速管の一段追加などが可能で, 最小限の費用で強度増強することができる。そのための具体的な検討を進める。

# SPF-A3：全反射高速陽電子回折（TRHEPD）ステーション

望月 出海<sup>1,2</sup>, 兵頭 俊夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設,

<sup>2</sup>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, トレプト [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 ( $\theta$ ) と方位角 ( $\phi$ ) は PC により自動制御でき、視射角を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) と方位角を変化させながら取得する方法 (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、超高真空を破らずに、ロードロック室を経由して測定チェンバ内の試料マニピュレータ上に搬送される。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

2019 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、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により、試料マニピュレータ、電子衝撃加熱型 3 源エバポレータ、RHEED 装置、Ar<sup>+</sup> イオンスパッタ装置、真空維持型の試料搬送ベッセルなどを導入した。今後も継続して整備を進め、2020 年度に共同利用実験での利用を開始する予定である。

現在、本ステーションには、TRHEPD 測定システムの他、以下設備が常設されている：RHEED 装置、Ar<sup>+</sup> イオンスパッタ装置、蒸着源用ポート (ICF70 × 4)、電子衝撃加熱

型 3 源エバポレータ、Ar ガス導入、O<sub>2</sub> ガス導入、H<sub>2</sub> 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、試料ホルダ (× 3)、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、専用リニアックを用いて 1 つのターゲットから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。

2019 年度の本ステーション利用課題は、「(2017G519) 全反射高速陽電子回折を用いた 2 次元超伝導体の構造解析」、「(2017G639) 全反射高速陽電子回折を用いた ZrB<sub>2</sub> 薄膜上のシリセンの構造決定」、「(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 ZrB<sub>2</sub> 基板上のゲルマネンの構造決定」であった。

2019 年度は、TRHEPD 構造解析における高速化データ駆動科学との融合 [4, 5]、TRHEPD 方位角プロット法の開発 [6]、2 層グラフェン層間化合物の原子配置の決定 [7] などの成果が発表された。2020 年に出版 (電子出版 2019 年) された、Ca インターカレート 2 層グラフェン超伝導体の構造決定 [7] について述べる。

グラファイト積層間に金属原子を挿入すると超伝導を示すものがあることは良く知られている。そうであればグラファイト層 2 枚だけの間に金属原子を挿入しても超伝導になるのではないかという興味が湧く。

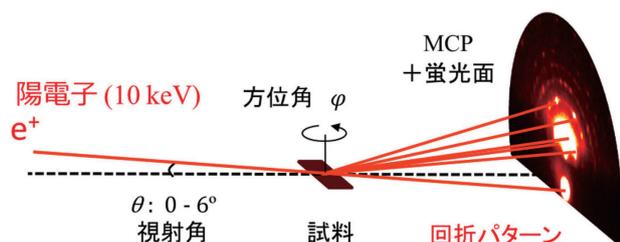


図 1 TRHEPD (トレプト) 実験配置

最近、グラファイトにインターカレートしたとき最も高い超伝導転移温度を持つ Ca 原子を、SiC 基板上に作った 2 層グラフェンに吸着させると超伝導を示すことが示された。このとき Ca 原子は 2 層グラフェン間にインターカレートすると考えられていたが、直接的な構造解析法で確かめられてはいなかった。また試料の調整方法によっては、転移温度が上下することも分かっていた。そこで TRHEPD 法で構造解析したところ、超伝導転移温度が再現良く 4 K を示すのは、これまで考えられていたように Ca 原子が 2 層グラフェン間にあるのではなく、その下のグラフェン層とバッファ層間にあるものであることが分かった。また興味深いことに、安定なグラファイトは ABA…積層で、そこに Ca をインターカレートすると AAA…積層に変わると知られているが、この場合はバッファ層を含めて ABA…積層が維持されたまま Ca がインターカレートしていることが分かった。この系の構造が実験的に決定されたことは、2 次元超伝導の発現機構の解明を前進させるものである。また、1 層グラフェンとバッファ層間に Ca をインターカレートしても超伝導発現する可能性を示唆する重要な結果である。

#### 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 の表面超感性を活かして、表面特性が重要なグラフェンなどの単原子層物質、もしくはそれらの多原子層物質や複合物質、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、各課題へのビームタイム配分時間が低下し、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の整備が始まったが、根本的な解決策としては、専用リニアック増強による低速陽電子強度増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] K. Tanaka, T. Hoshi, I. Mochizuki, A. Ichimiya, and T. Hyodo, 15th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications (SLOPOS-15) P-26 (2019).
- [5] K. Tanaka, T. Hoshi, I. Mochizuki, T. Hanada, A. Ichimiya and T. Hyodo, *Acta Phys. Pol. A* **137**, 188 (2020).
- [6] 望月出海, 深谷有喜, 一宮彪彦, 兵頭俊夫, 応用物理学会春季学術講演会シンポジウム, 9p-W833-3 (2019).
- [7] Y. Endo, Y. Fukaya, I. Mochizuki, A. Takayama, T. Hyodo, and S. Hasegawa, *Carbon* **157**, 857 (2020).

# SPF-A4：低速陽電子回折（LEPD）ステーション

望月 出海<sup>1,3</sup>, 兵頭 俊夫<sup>1</sup>, 和田 健<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設,

<sup>2</sup> 量子科学技術研究開発機構,

<sup>3</sup> 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-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]。

1980 年に米国 Brandeis 大学のグループが、放射性同位体 (RI) から  $\beta^+$  崩壊によって放出される陽電子の静電輸送による低速陽電子ビームを用いたチャンネルトロンによる初めての LEPD 観測の成功を報告した [2]。その後、同グループは複数の回折スポットを一度に観測するシステムを開発し、LEPD は LEED よりも動力的回折理論による計算結果が実験結果により近いことを示した [3]。LEPD は表面構造解析手法としての理想的な特性を備えていることが確認されていたものの、陽電子は反粒子のため実験に必要な強度と適切な品質のビームを得るのが困難で、この約 20 年間、実験的な研究は行なわれていなかった。

SPF-A4 では、常伝導リニアックを用いて生成した高強度低速陽電子ビームを用いた LEPD の実験システムを開発することでこの困難を克服し、図 1 に示したように、

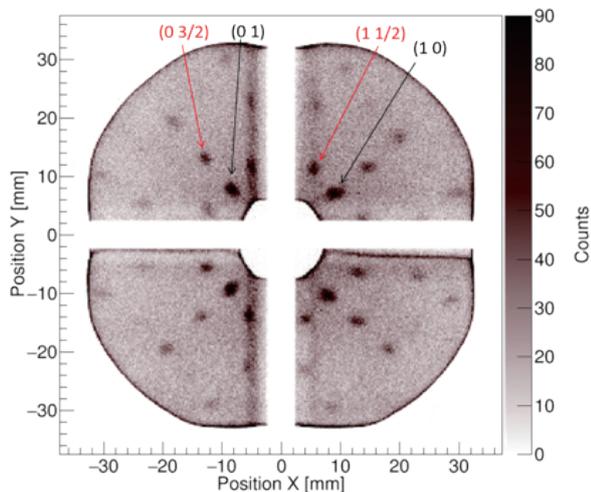


図 1 リニアックベースの低速陽電子ビームを用いた Ge(001)-2x1 構造による LEPD 回折パターン (144.5 eV) [4]。

Ge(001)-2x1 構造による LEPD 回折パターンの観測に成功した [4-6]。これは、リニアックベースの低速陽電子ビームを用いた最初の LEPD 観測である。

## 2. 整備開発および運用状況

リニアックベースビームによる LEPD 観測に成功した DLD 検出器は、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が、検出器の中心に陽電子ビームが通り抜けるセンターホールが存在し、そのギャップによりデータが得られない不感領域 (図 1 の十字状の領域) が存在した。この DLD 検出器を変更し、3 層目のアノードワイヤを追加した HEX-DLD 検出器を用いた LEED/LEPD システムを新たに開発し、電子銃を用いて十字状のデッドエリアの無い回折パターンが取得できることを確認した。

## 3. ビームタイム利用状況

SPF では、専用リニアックを用いて 1 つのターゲットから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 課題の場合、1 課題に対して概ね 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、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。

2019 年度に SPF-A4 を利用した課題は、「(2016S2-006) 低速陽電子回折法による表面構造解析」「(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。将来的には、陽電子のビーム径を絞ることで局所表面構造解析の手法へと発展できる。LEPD ステーションは、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。

## 引用文献

- [1] S. Y. Tong, Surf. Sci. **457**, L432 (2000).
- [2] I. J. Rosenberg, A. H. Weiss, and K. F. Canter, Phys. Rev. Lett. **44**, 1139 (1980).
- [3] C. B. Duke, in: *Positron Spectroscopy of Solids*, edited by A. Dupasquier and A. P. Mills Jr. (IOS Press, Amsterdam, 1995) pp. 317-359.
- [4] K. Wada, M. Maekawa, I. Mochizuki, M. Kimura, T. Hyodo, Annual report 2015 of Innovative Measurement and Analysis for Structural Materials, 73 (2015).
- [5] K. Wada, T. Shirasawa, I. Mochizuki, M. Fujinami, M. Maekawa, A. Kawasuso, T. Takahashi, and T. Hyodo., JJAP Conf. Proc. **7**, 011301 (2018).
- [6] 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

望月 出海<sup>1,2</sup>, 兵頭 俊夫<sup>1</sup>, 石田 明<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設,

<sup>2</sup> 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, <sup>3</sup> 東京大学

## 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。

2019 年度に行った Ps レーザー励起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 (~10<sup>6</sup> e<sup>+</sup>/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。このとき図 1 のようにレーザーはビーム軸に垂直な水平方向に多重反射させ, 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<sup>-7</sup> Pa 程度の真空が維持されている。本セットアップは 2020 年度以降の真空中における 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 [1,2], 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 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 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 [3-5]。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, 図 1 のセットアップに改良した。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 1S-2P 遷移を確認できた。

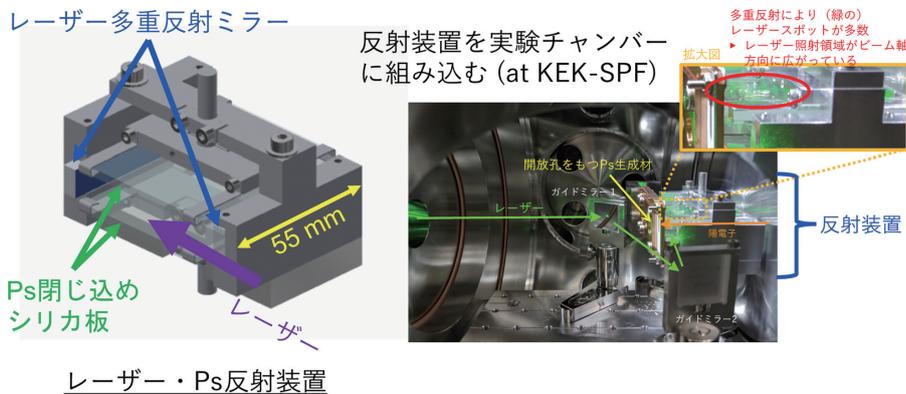


図 1 Ps レーザー励起実験のセットアップ。(左) レーザー・Ps 反射装置。(右) 真空チャンバー内写真。陽電子ビームは写真右から導入されてレーザー・Ps 反射装置を通過し, 開放孔をもつ Ps 生成材 (シリカエアロゲル) に入射する。生成された Ps は写真右側の真空中に放出され, レーザー・Ps 反射装置内に導入される。一方, 陽電子ビーム下流側から導入したレーザー光はチャンバー内 2 つのガイドミラーで反射し, レーザー・Ps 反射装置に導入される。右上拡大図に示したように, 多重反射によってレーザー照射領域をビーム軸方向に広げることで, Ps とレーザー間の十分な相互作用領域を確保している。

### 3. ビームタイム利用状況

SPF では、専用リニアックを用いて1つのターゲットから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「(2018G100) 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。2020年度からの利用課題「(2020G101) 真空中におけるポジトロニウムのレーザー冷却」において世界初の Ps レーザー冷却を実現する計画である。

### 引用文献

- [1] K. Shu, X. Fan, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka and M. Kuwata-Gonokami, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **49**, 104001 (2016).
- [2] 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, *JJAP Conf. Proc.* **7**, 011001 (2018).
- [3] A. Ishida, "Experimental progress towards positronium Bose-Einstein condensation", 8th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2019), August 26, Chania, Crete, Greece (2019).
- [4] A. Ishida, "Recent progress towards positronium Bose-Einstein condensation", 15th International Workshop on Positron Beam Techniques and Applications (SLOPOS-15), September 2, Prague, Czech Republic (2019).
- [5] A. Ishida, "Experimental progress towards positronium Bose-Einstein condensation", 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS2019), October 31, Nara, Japan (2019).

## SPF-B2：ポジトロニウム飛行時間測定（Ps-TOF）ステーション

望月 出海<sup>1,4</sup>, 兵頭 俊夫<sup>1</sup>, 長嶋 泰之<sup>2</sup>, 河裾 厚男<sup>3</sup>, 和田 健<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設,

<sup>2</sup> 東京理科大学理学部第二部, <sup>3</sup> 量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所,

<sup>4</sup> 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。4.2 keV に加速するのは、輸送途中でパルス幅が広がるのを防ぐためである。この結果、試料位置でのパルス幅は 10 ns 程度を実現している。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  $\gamma$  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サイザに入力し、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  $\gamma$  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  $\phi 15 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  ( $t$ ) 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おり、2270 K 程度まで加熱することが可能である。

### 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、 $\text{Ar}^+$  イオンスパッタ装置、蒸着源用ポート (ICF70  $\times$  1)、 $\text{O}_2$  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、専用リニアックを用いて 1 つのターゲットから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、1 課題に対して概ね 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、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。

2019 年度の本ステーション利用課題は、「(2017G57) ポジトロニウム飛行時間測定法による表面形成素過程の研究」, 「(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」である。

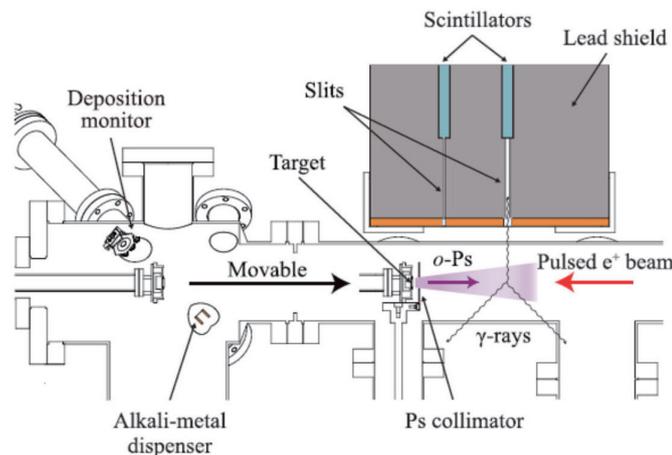


図 1 Ps-TOF 実験装置 [3]

#### 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、専用リニアック増強による低速陽電子強度増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] D. B. Cassidy, T. H. Hisakado, H.W. K. Tom, and A. P.Mills, Jr., *Phys. Rev. B* **86**, 155303 (2012).