

### 3-5. 低速陽電子グループ

永井 康介

物質構造科学研究所放射光科学第一研究系

#### 1. 概要

低速陽電子グループは、物質最表面の結晶構造と物性との関係解明、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)、低速陽電子回折 (LEPD)、汎用ステーションにおける実験 (現在 Ps 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。

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	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, 産業技術総合研究所白澤徹郎氏が協力。
SPF-B1: 汎用陽電子実験ステーション	望月 出海	Ps 負イオン - 実験のために整備され, 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	

#### 2. 活動内容

【グループとして推進している研究】全反射陽電子回折 (TRHEPD) および低速陽電子回折 (LEPD) による表面構造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 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。

新奇的な表面構造や特性の解明のために 2016 年度に新たに共同利用を開始したグループの成果が出始めている。1 グループは 2017 年度に得た興味深い結果の解析と論文執筆を行った。他の 1 グループは結果の解析を終了し, 論文執筆を開始した。さらに, TRHEPD の特徴を最大限に活かす, 視射角を変えてプローブ深さを調節しつつ回折スポットの強度を方位角の関数として測定する方位角プロット法の開発を終了し, 論文執筆を開始した。

また, LEPD ステーション (SPF-A4) では加速器ベース

LEPD による初めての回折パターンを論文発表した。2018 年にユーザーの科研費が採択され, あらたに装置の改良を始めた。内容はバックグラウンドを減らすために静電レンズを長くすることと, 不感領域のある DLD 検出器を, それのない HEX-DLD に変更することである。

【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を用いて, 汎用の試料チェンバーの製作を開始した。

【グループ内活動】月に 1 度グループミーティングを開催し, 情報交換, 活動報告, 研究報告, 今後の方針, 競争的資金申請等の議論を行った。

【その他】日本陽電子科学会は, 日本学術会議の学術大型研究計画 2020 に低速陽電子研究施設計画を提出した。計画実現に本施設が中核的な役割を果たすことが期待されている。

#### 3. 今後の展望

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る。実験施設長は小杉信博物構研所長が兼任する。

TRHEPD は, 全反射条件で最表面のみの情報を得られるだけでなく, 視射角を臨界角より大きくすることで表面直下の原子配置の正確な情報も得られる。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, 改良した装置を利用して, I-V 曲線解析のほか, LEED では難しいホログラフィー法やパターン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。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 (パルス幅伸張) 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。そのための予算獲得を目指す。

# 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放射光科学第一研究系,

<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、KEK-PF 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, 2] を用いて、全反射高速陽電子回折 (total-reflection high-energy positron diffraction, TRHEPD [3-5]) 実験を行っている。

実験は、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 (図 1)。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) のどちらの測定もできる。

測定試料の大きさは 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), 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) が可能となっている。

## 2. 整備開発および運用状況

2018 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、試料準備チェンバの整備を開始した。所内公募研究費の採択や外部資金により、超高真空チェンバ、チェンバ架台、真空ポンプ、各種真空バルブ等を購入し設置した。今後も継続して整備を進め、2019 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、本エンドステーションには、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、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、課題審査委員会 (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。

2018 年度の本ステーション利用課題は、「(G) 反射高速陽電子回折による Ag(100) 上のバナジウム酸化物超薄膜の構造解析」, 「(G) 全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) 法による 2 層グラフェン層間化合物の表面構造解析」, 「(G) 全反射高速陽電子回折を用いた IV 族原子層物質の構造解析」, 「(G) 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」, 「(G) 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」, 「(PF) 全反射高速陽電子回折による光照射 Anatase 型 TiO<sub>2</sub>(101) 表面の構造解析」, 「(G) 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」, 「(G) 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」であった。

2018 年度は、TRHEPD 表面構造解析のレビュー論文が 2 件 [4, 5] 出版された他、TRHEPD 構造解析における高速化データ駆動科学との融合 [6], TRHEPD 方位角プロット法の開発 [7], 2 層グラフェン層間化合物の表面構造解析 [8] などの成果が発表されており、近く論文投稿される予定である。

## 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、ユーザーは着実に増加している。引き続き、TRHEPD の表面超感応性を活かして、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

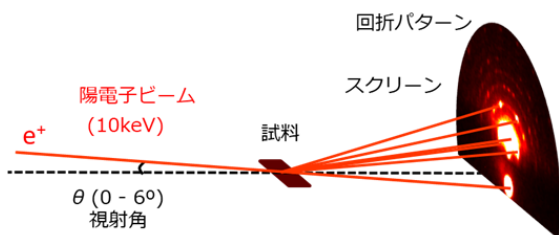


図 1 TRHEPD 実験配置

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 10 倍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] M. Maekawa, K. Wada, Y. Fukaya, A. Kawasuso, I. Mochizuki, T. Shidara and T. Hyodo, *Eur. Phys. J. D* **68**, 165 (2014).
- [3] A. Ichimiya, *Solid State Phenom.* **28/29**, 143 (1992).
- [4] 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).
- [5] Y. Fukaya, A. Kawasuso, A. Ichimiya, and T. Hyodo, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52**, 013002 (2019).
- [6] 星健夫, 応用物理学会春季学術講演会シンポジウム, 9p-W833-2 (2019).
- [7] 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).
- [8] 高山あかり, 遠藤由大, 深谷有喜, 望月出海, 兵頭俊夫, 長谷川修司, 応用物理学会春季学術講演会シンポジウム, 9p-W833-8 (2019).

# SPF-A4：低速陽電子回折（LEPD）ステーション

望月 出海<sup>1,2</sup>, 兵頭 俊夫<sup>1</sup>, 和田 健<sup>3</sup>, 白澤 徹郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>物質構造科学研究所放射光科学第一研究系,

<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>量子科学技術研究開発機構, <sup>4</sup>産業技術総合研究所

## 1. 概要

SPF-A4 では、KEK-PF 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) 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、Ge(001)-2x1 構造によ

る LEPD 回折パターンの観測に成功した (図 1) [4]。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

RI ベースと常伝導リニアックベースの LEPD 実験システムにはいくつかの違いがある。1つは、ビームの時間構造である。RI ベースのビームは、 $\beta^+$  崩壊のポアソン過程によって放出される陽電子による連続的な低速陽電子ビームであるが、常伝導リニアックベースのビームの場合には、リニアックのパルス構造を反映した低速陽電子ビームとなる。高強度のパルス低速陽電子ビームは LEPD パターンを観測する MCP (Multi-channel plate) と DLD (Delay-line detector, DLD) による位置敏感検出器において多重検出の問題を引き起こす。この問題を解決するため、約 6 m の長さの Penning-Malmberg トラップによるパルス伸長システムを開発した [5]。

もう1つの違いは、ビームの輸送方法である。RI ベースの LEPD システムはビームライン全体で静電レンズのみが用いられたが、リニアックベースのシステムの場合には、ビームラインにそった磁場により低速陽電子生成部から遠く離れた実験スペースにビームを輸送する。回折パターンの観測システムを電場から遮蔽するよりも、磁場から遮蔽

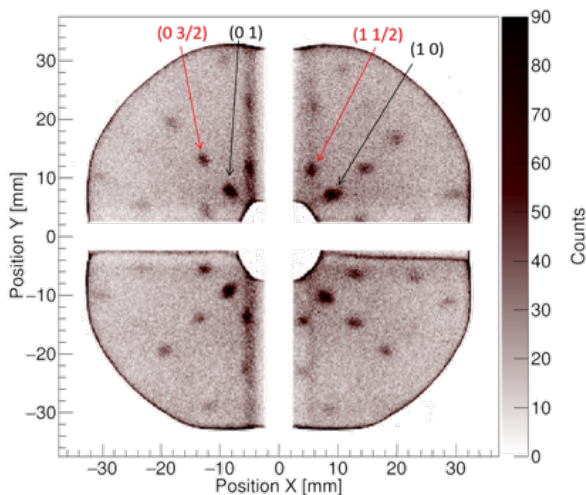


図 1 リニアックベースの低速陽電子ビームを用いた Ge(001)-2x1 構造による LEPD 回折パターン (144.5 eV) [4]。

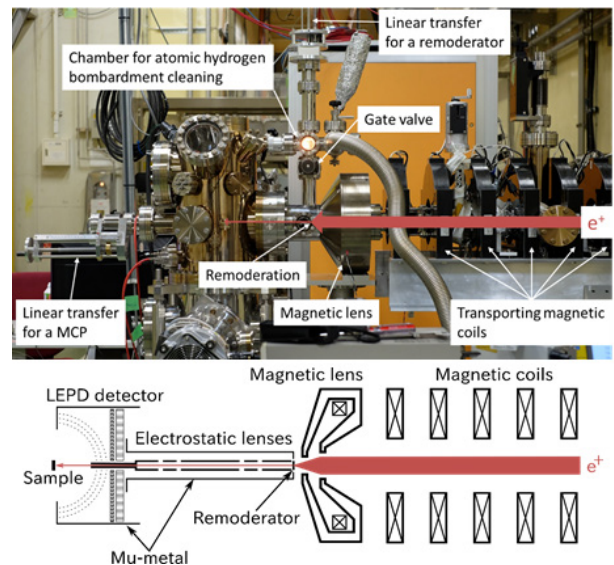


図 2 開発した LEPD ステーションの写真 (上) と透過型輝度増強システムの概念図 [6]。

することの方が困難である。十分な強度と適切な品質の低速陽電子ビームが非磁場空間で試料に入射しその回折パターンを観測できるよう、静電レンズを伴う Ni 薄膜（リモデレータ）による透過型ビーム輝度増強システムを新たに開発した（図 2）[4,6]。

その他、2018 年にユーザーの科研費が採択され、あらたに装置の改良を始めた。内容はバックグラウンドを減らすために静電レンズを長くすることと、十字形の不感領域のある DLD 検出器を、それのない HEX-DLD に変更することである。

LEPD ステーションにおける陽電子の主な消失点となっているのは、検出器上流側の輝度増強ユニットである。そこからの 511 keV の陽電子消滅  $\gamma$  線が検出器の DLD-MCP におけるバックグラウンドとなっている。輝度増強ユニットから検出器までの距離を以前より 2.5 倍遠くとしてこのバックグラウンドを低減するよう、レンズの全長を長くすると共に、球面収差を抑えるためその内径を 2 倍に広くしたものを設計・作成した。新しいレンズ系による電子と陽電子を用いたビーム試験を行なった。

従来の 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 次元のデータを得ていたが、センターホールのギャップにより 2 次元のデータが得られない十字の不感領域が存在した。これに 3 層目のアノードワイヤを追加した、十字のデッドエリアの無い HEX-DLD に変更するため、新たな検出器の設計を行ない、2019 年度の導入に向けて作成を進めている。

### 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、実験審査委員会（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。

2018 年度に SPF-A4 を利用した課題は、「低速陽電子回折法による表面構造解析」（2016S2-006）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。LEPD は垂直入射のため平滑性に多少乏しい試料表面にも用いることができ、また将来、局所表面構造解析の手法へと発展していくことが考えられる。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、今後 KEK の施設利用者に提供できるよう整備を進めていく。

### 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, 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).
- [5] K. Wada, M. Maekawa, I. Mochizuki, M. Kimura, T. Hyodo, Annual report 2015 of Innovative Measurement and Analysis for Structural Materials, 73 (2015).
- [6] K. Wada, T. Shirasawa, I. Mochizuki, M. Fujinami, M. Maekawa, A. Kawasuso, T. Takahashi, and T. Hyodo., JJAP Conf. Proc. **7**, 011301 (2018).

# SPF-B1：汎用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放射光科学第一研究系,

<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。2016 年度までポジトロニウム負イオン (Ps<sup>-</sup>) 関連の実験が行われていたが [1], 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。

2018 年度に行った Ps レーザー冷却実験の概念図を図 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シリカエアロゲルに入射して Ps を生成する。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。

## 2. 整備開発および運用状況

Ps は陽電子 1 個と電子 1 個からなる束縛状態である。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、反物質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世界初実現に応用できる。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 [2-4], 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されている。

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。陽電子ビームの時間的性質改善のため高電圧チョッパーを導入し、陽電子ビーム集束のため磁気集束レンズを導入した。レーザー光学系として Nd:YAG レーザー 2 台と OPO を設置し、陽電子とレーザーの時間的・空間的アラインメントを行った。

## 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「(G) 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。2019 年度中にも世界初の Ps レーザー冷却を実現する計画である。

## 引用文献

- [1] K. Michishio, T. Kanai, S. Kuma, T. Azuma, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, A. Yagishita, and Y. Nagashima, Nat. Commun. **7**, 11060 (2016). <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20160318103000/> (KEK プレスリリース).
- [2] 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).
- [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, JJAP Conf. Proc. **7**, 011001 (2018).
- [4] A. Ishida, "Positron focusing system and positronium thermalization measurement for realizing positronium Bose-Einstein condensation", 18th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-18), August 22, Orlando, Florida, USA (2018).

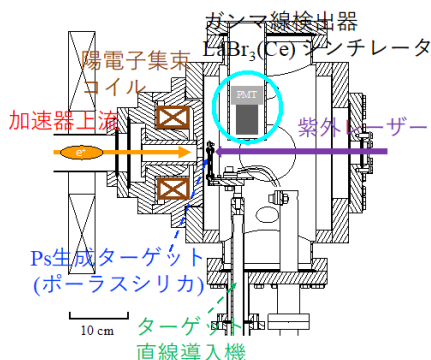


図 1 Ps レーザー冷却実験のセットアップ概念図

# 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>

<sup>1</sup> 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系,

<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, KEK-PF 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 (Ps) 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  $\phi 15$  mm  $\times$  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

2018 年度は, 角型 (15 mm  $\times$  15 mm  $\times$  0.5 mm (t)) の半導体試料を取り付けるためのホルダーを用意した。また, 測定槽と TMP とを仕切るゲートバルブを圧空閉鎖式のものに交換して TMP コントローラを設置した。これにより, 停電時に自動的にゲートバルブが閉鎖することで測定槽真空を維持できるように対策した。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, Ar<sup>+</sup> イオンスパッタ装置, 蒸着源用ポート (ICF70  $\times$  1), O<sub>2</sub> 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, 実験審査委員会 (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。

2018 年度の本ステーション利用課題は, 「(G) 金属薄膜を用いた低エネルギーポジトロニウムビームの生成とその応用」, 「(G) 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。

2018 年に出版された, シリコン表面からの Ps 放出機構の解明についての成果 [3] について報告する。シリコンやゲルマニウムの表面では, 温度 1000 K 付近で Ps 生成量がほぼ 100% になる。これを Ps 生成媒体として利用できる可能性がある。Cassidy ら [4] によれば, p 型のシリコン表面で生成される Ps は室温付近でも 200 meV 程度のエネルギーをもつ。彼らは陽電子と表面準位にある電子が励起子に類似する結合状態を生成するとしてこの「非熱的な」Ps の生成を説明した。もしこれが正しいならば, Ps 生成量は (1) 試料が n 型になるにつれて増加し, さらに強い n 型では温度に依存しなくなる, (2) 面方位によって異なる, (3) 光照射などの励起によって増加する, といったことが予想される。

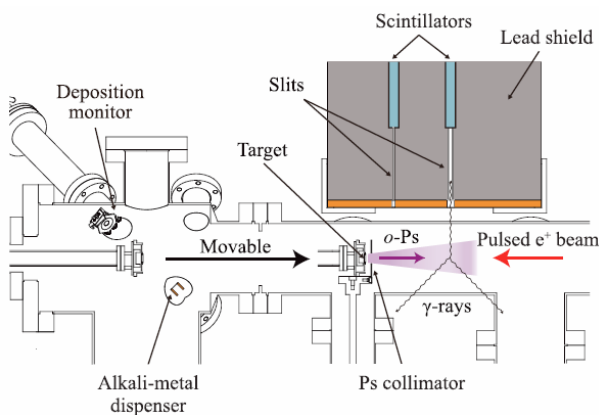


図 1 Ps-TOF 実験装置 [3]

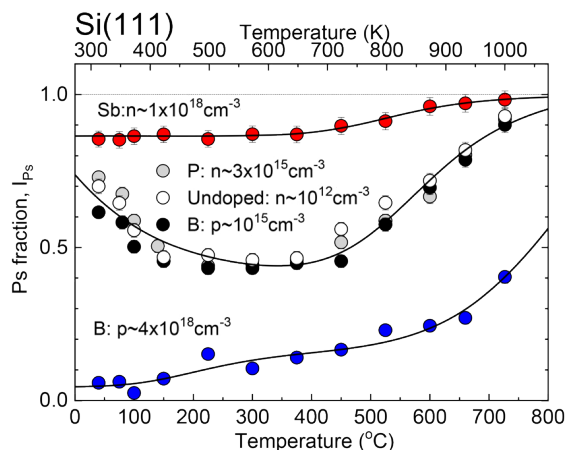


図2 Ps生成の温度依存性

そこで、n型、intrinsic、およびp型の、Si(111)とSi(100)について、Ps生成の温度依存性を調べた。図2はSi(100)についての結果である。確かにドーピングの違いでPs生成量とその温度依存性が大きく変わった。すなわち、Ps生成量はn型(P, Sb添加)、intrinsicおよび低ドーピング、p型(B添加)の順に高い。また、n型は400~700°Cで穏やかに増加した。intrinsicおよび低ドーピングでは、室温付近から200°Cの間で減少し、500°C以上で急に増加する。p型では、200~300°Cと600~700°Cの2段階で増加する。また、Si(111)面でもほとんど同じ結果が得られ、面方位には依存しないことが分かった。

また、TOFスペクトルの形からエネルギー0.6~1.5 eVと0.1~0.2 eVのPsが放出されていることがわかり、仕事関数機構と表面トラップ陽電子機構によるものとされた。前者は、表面近くのバルク領域での励起子の電子・陽電子束縛状態が表面を抜けてPsとなったことを示唆する。第一原理計算によると、陽電子仕事関数は正であるがPs仕事関数は負であり、この解釈を支持する。

#### 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、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。これを当面解決するため、試料交換やin situ試料作製を効率化するためユーザーから強く要望されていた試料準備チェンバの整備を開始した。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10倍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).