

### 3-5. 低速陽電子グループ

兵頭 俊夫

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、SPF-B1におけるポジトロニウム負イオン (Ps-) の原子物理学およびそれを利用した物性研究用の可変エネルギー・ポジトロニウム・ビームの生成、ビームライン SPF-B2におけるポジトロニウム飛行時間測定 (Ps-TOF) 法による物質とポジトロニウムの相互作用や物質の表面状態の研究、ビームライン SPF-A3における全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) による物質の最表面の構造 (原子配置) 決定、およびそれと表面物性との関係の解明、さらに、同様の目的のためのビームライン SPF-A4の低速陽電子回折 (LEPD) 装置建設などを進めている。各スタッフは、自身の研究と共に、ビームライン・ステーションの開発や最適化を行い、その上で共同利用研究のユーザーを支援している。

2015年度の構成ビームライン・実験ステーション名と担当者名は下記のとおり。

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-B1: 汎用陽電子実験ステーション	兵頭 俊夫, 和田 健*, 望月 出海	Ps- 実験装置が設置されている。装置の整備には東京理科大学 (長嶋泰之研) が協力している
SPF-B2: Ps-TOFステーション	兵頭 俊夫, 和田 健*, 望月 出海	装置の整備には共同研究契約のある日本原子力研究開発機構 (河裾厚男グループ*), および東京理科大学 (長嶋泰之研) が協力している
SPF-A3: TRHEPDステーション	兵頭 俊夫, 和田 健*, 望月 出海	装置の整備には共同研究契約のある日本原子力研究開発機構 (河裾厚男グループ*) が協力している。
(SPF-A4: LEPDステーション)	兵頭 俊夫, 和田 健*, 望月 出海	建設中。東京大学物性研究所 (白澤徹郎氏**) が協力している。

\*2016年4月1日より 量子科学技術研究開発機構 (量研機構) 高崎量子応用研究所

\*\*2016年4月1日より 産業技術総合研究所

#### 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) による、表面構造および表面直下の格子緩和

の研究および、ポジトロニウム飛行時間 (Ps-TOF) 法による表面研究。

【ビームライン整備】当グループが管理するビームラインは、様々な研究者が材料を持ち込んで実験を行うため、実験環境に対するニーズも多様化している。また利用者の装置に対する習熟度もさまざまである。それに応えるべく様々なビームライン、各ステーションの環境整備を実施している。

【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、今後の方針等の議論を行っている。

#### 3. 今後の展望

現在多くの成果が出つつある全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) をさらに発展させ、表面科学で未解決のまま残されている表面原子配置の重要問題を陽電子回折によって解決する。また、現在外部資金で進められている低速陽電子回折 (LEPD) 装置を完成させ、陽電子ホログラフィー法や I-V 曲線解析などの手法開発を進めると共に、重元素を含むために電子回折では困難なトポロジカル絶縁体表面や重元素吸着表面などの構造解明の研究を推進する。また、ポジトロニウム負イオンのフェッシュバハ共鳴の観測やエネルギー可変ポジトロニウムビームの利用実験、種々の便属や磁性材料、あるいは絶縁体表面からのポジトロニウム放出の実験を推進する。

現在の専用リニアックの最大出力は本施設の放射線シールドの厚みで制限されている。厚い放射線シールドが可能なテストホール北隣のスペースを利用して強度増強ができれば、最小限の費用で低速陽電子ビーム強度を現在の10倍にすることが可能である。これを実現できれば、当面の共同利用ユーザーの増加に対応できる。

表面研究のみならず、数多くの新しい陽電子研究の開拓も視野に入れて推進する。例えば、最近、リニアックのパルス運転を反映したパルス状低速陽電子ビームのパルス幅を数桁広げるパルスストレッチに成功した。これを利用すると、広く使われている陽電子消滅  $\gamma$  線ドップラー広がり法の測定が可能になる。またビームを改めてバンチすることにより超短パルス化すれば、陽電子寿命測定等も可能になる。将来は、このような一般的な低速陽電子研究の手法が使えるビームラインを整備し、利用を促進したい。RIビームに用いられる  $^{22}\text{Na}$  密封線源の入手が困難になってきているので、その観点からも、本施設の運営は大変重要である。

## SPF-A3：全反射高速陽電子回折（TRHEPD）ステーション

兵頭 俊夫<sup>1</sup>, 望月 出海<sup>1</sup>, 和田 健<sup>1\*</sup>, 深谷 有喜<sup>2</sup>, 前川 雅樹<sup>2\*</sup>, 河裾 厚男<sup>2\*</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>日本原子力研究開発機構

### 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て, 全反射高速陽電子回折 (total-reflection high-energy positron diffraction, TRHEPD) 法による結晶最表面の構造解析が行われている。

TRHEPD 法 (図 1) は, 反射高速電子回折 (reflection high-energy electron diffraction, RHEED) 法の陽電子版で, 1992 年に名古屋大学 (当時) の一宮彪彦 [1] によって提唱され, 日本原子力研究所 (当時) の河裾厚男・岡田漱平 [2] によって実用化された, 純粋に日本発の手法である。実験では, 10 keV 程度の陽電子ビームを大きさ 10 mm × 5mm × 0.5mm 程度の単結晶試料表面にすれすれ視射角で打ち込み, 進行方向に配置したスクリーン上に陽電子回折パターンを得る。

本ステーションは, 2010 年度に原子力機構 (現・量子科学技術研究開発機構) 高崎量子応用研究所から SPF 1 階のクライストロンギャラリ実験室に移設された装置が元になっている。2011 年 1 月から SPF での実験が開始された [3]。2012 年度には, W 薄膜 (100 nm) 透過型再減速材による輝度増強 [4] ユニットをもつ新装置が導入され, ビーム強度を 100 倍程度引き上げることに成功した。続いて汎用陽電子実験ステーションおよびポジトロニウム飛行時間測定ステーションと実験スペースを交換する形で地下のテストホールのビームライン分岐 SPF-A3 に接続された。この高輝度・高強度低速陽電子ビームを用いて Si(111) (7×7) 超構造の分数次スポットを明確に観測 [5] するなど, 高精度なデータ取得を容易に行えるようになり, 本手法が結晶最表面の構造解析に非常に有効であることが明らかになった。並行してステーションの整備拡充も進められ, 新装置の導入と共に新しい実験チェンバーや試料交換機構が設置されたことで, in situ での試料作製もスムーズに行

えるようになった。Pt/Ge(001) 原子ナノワイヤ表面の構造決定 [6], Ag(111) 面上のシリセンのバックリングとシリセン-基盤間距離の測定 [7] など, いくつかの顕著な成果も挙がっている。2015 年度には, 30 年来未解明であった TiO<sub>2</sub> (110) (1×2) 表面の構造決定 [8], 基板金属が Cu(111) と Co(0001) の場合にグラフェン-基盤間距離が異なるという理論予想の実証 [9] 等の成果を公表した。

### 2. 整備開発および運用状況

2015 年度は, 以下の 3 つの高度化整備を実施した。①これまで原子力機構から借用していた旧試料マニピュレータの返却に伴い, 試料マニピュレータを新しいものに変更した。この新マニピュレータを導入したことで, これまで同様に, 入射陽電子ビームに対する試料の視射角回転方向の自動調整が行えることに加えて, 方位角回転方向の自動調整も可能になった (方位角回転用の自動測定プログラムも既に作成済)。今後は, 入射ビーム視射角変化させながらパターン取得する従来の方法 (ロッキング曲線) に加えて, 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) も可能である。また, 試料の通電加熱に加えて, 電子衝撃加熱 (~1800 K) や, GM 冷凍機とヒーターを併用させた低温域の温度制御 (16 K ~ 250 K 程度) も可能になった。②マニピュレータ更新に伴って試料ホルダ形状を再設計した。これにより, 同じ試料で方位角回転方向が広範囲に異なるデータの取得が可能になった。③試料交換用のロードロック機構を更新し, 内部で水素終端処理などを行えるよう, 予備ポートを増やして対応できるようにした。現在, 実験チェンバーには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, 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, 蒸着源用ポート (ICF70×7), 試料交換用ロードロック機構

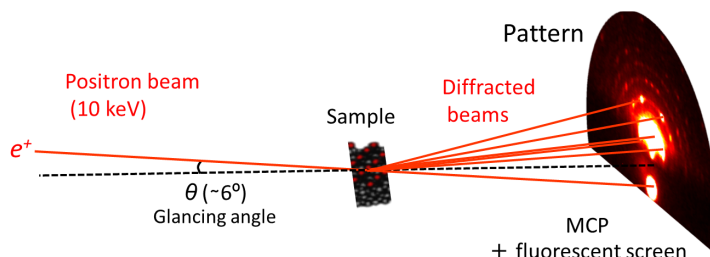


図 1 TRHEPD 実験配置の概略図

### 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の輸送ラインの途中に分岐を作り、3本の分岐ビームライン (SPF-A3. 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。SPF-A3 のビームタイムは、他の2本のライン (B1, B2) と一体で PAC 評点に基づいた日程配分が行われている。どの課題も統計精度をためることが必要な蓄積型の実験なので、1課題に対して概ね3~6日間程度を割り振っている。ビームタイム開始前の事前準備や、ビームタイム開始時のビーム輸送パラメータのセットアップなどは、休日関係無しに、基本的に我々スタッフが対応している。十分に経験のあるユーザーに関しては、輸送パラメータの変更などを各自で行なうことが可能になりつつある。2015年度に利用した課題は、「全反射高速陽電子回折を用いた最表面構造決定」(S2課題)、「反射高速陽電子回折法と表面X線回折法の協同利用による Ag 表面上のエピタキシャルシリセンの構造研究」(G課題)、「Si(110)2×16超構造の反射高速陽電子回折 (RHEPD) 観察」(G課題)、「高強度陽電子ビームを用いた深さ分解高精度電子運動量測定システムの構築とイオン照射試料評価への応用」(G課題)、「高輝度反射高速陽電子回折による Ge(001) 表面一次元超構造の研究」(G課題)、「リニアックベース高強度低速陽電子ビームを用いた低速陽電子回折実験装置の開発」(G課題)である。

### 4. 今後の展望

TRHEPD の認知度が次第に上がり、2013年以降共同利用ユーザーは着実に増加している。今後も引き続き、表面構造に対する TRHEPD の超高感度性を活かした、グラフェンに代表される単原子層物質、新しく合成された超薄膜物質、表面の特性が重要な触媒物質などの構造解析が行われる予定である。一方で、ビームタイム配分率が次第に圧迫され、このままでは慢性的にビームタイムが不足すると考えられる。これを当面解決するために、ユーザーからは、試料交換や in situ での試料作製を能率的に行うための試料準備槽の整備が強く要望されており、早急の予算確保を目指している。さらに本格的な解決策としては、専用リニアックの増強による低速陽電子の強度10倍増を構想している。

### 引用文献

- [1] A. Ichimiya, *Solid State Phenom.* **28/29**, 143 (1992).
- [2] A. Kawasuso and S. Okada, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2695 (1998).
- [3] 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).
- [4] M. Maekawa, K. Wada, Y. Fukaya, A. Kawasuso, I. Mochizuki, T. Shidara and T. Hyodo, *Eur. Phys. J. D* **68**, 165 (2014).

- [5] Y. Fukaya, M. Maekawa, A. Kawasuso, I. Mochizuki, K. Wada, T. Shidara, A. Ichimiya and T. Hyodo, *Appl. Phys. Express* **7**, 056601 (2014).
- [6] I. Mochizuki, Y. Fukaya, A. Kawasuso, K. Yaji, A. Harasawa, I. Matsuda, K. Wada, and T. Hyodo, *Phys. Rev. B* **85**, 245438 (2012).
- [7] Y. Fukaya, I. Mochizuki, M. Maekawa, K. Wada, T. Hyodo, I. Matsuda and A. Kawasuso, *Phys. Rev. B* **88**, 205413 (2013).  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20131121140000/> (KEK プレスリリース)
- [8] I. Mochizuki, H. Ariga, Y. Fukaya, K. Wada, M. Maekawa, A. Kawasuso, T. Shidara, K. Asakura and T. Hyodo, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 7085 (2016).  
<http://www.rsc.org/chemistryworld/2016/03/surface-bulk-analysis-positron-spectroscopy-titanium-dioxide-structure> (Chemistry World, news) 記事  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20160224140000/> (KEK プレスリリース)
- [9] Y. Fukaya, S. Entani, S. Sakai, I. Mochizuki, K. Wada, T. Hyodo, S. Shamoto, *Carbon* **103**, 1 (2016).  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20160307150000/> (KEK プレスリリース)

\* 現所属・量子科学技術研究開発機構

## SPF-B1：汎用陽電子実験ステーション

兵頭 俊夫<sup>1</sup>, 和田 健<sup>1\*</sup>, 望月 出海<sup>1</sup>, 長嶋 泰之<sup>2</sup>, 満汐 孝治<sup>2</sup>, 東 俊行<sup>3</sup>, 久間 晋<sup>3</sup>, 立花 隆行<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>東京理科大学, <sup>3</sup>理化学研究所, <sup>4</sup>立教大学

### 1. 概要

本ステーションは、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、ポジトロニウム負イオン実験装置が設置されている。現在の装置の詳細を図1に示す [1]。専用リニアックの短パルス (~10 ns, 50 Hz) モード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、アルカリ金属を蒸着したタングステン標的に入射してポジトロニウム負イオンを生成する。これを電場で加速した後、レーザー光を照射して電子1個を光脱離させる。光脱離によって生成された中性のポジトロニウムをマイクロチャンネルプレートで検出することで、ポジトロニウム負イオンと光子の相互作用を調べることができる。またポジトロニウム負イオンの加速を電場制御すれば、光脱離によって得られるポジトロニウムをエネルギー可変ビームとして引き出すことも可能である。なお、この実験ではアルカリ金属蒸着した標的を用いるため、装置内は 1 × 10<sup>-8</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

ポジトロニウム負イオンは陽電子1個と電子2個からなる束縛状態で、三体の束縛系を理解する上で大変重要な研

究対象である。このため、その存在が1946年にJ. Wheeler [2] によって予測されて以来、数多くの理論的研究が行われてきた。ポジトロニウム負イオンが存在することは、1981年にA. P. Mills, Jr. [3] によって実験で確かめられたが、生成効率が入射陽電子数に対して僅か0.03%と低く、実験的な研究は殆ど行われていなかった。2008年度に東京理科大学のグループが、アルカリ金属を蒸着したタングステンを用いてポジトロニウム負イオンの生成効率を2桁増やすことに成功 [4-7] して以来、その研究はSPFを中心に行われ、大きな成果が挙がっている。2009年度から2010年度にかけて最初に行われたのは、ポジトロニウム負イオンの光脱離の研究 [8] である。ポジトロニウム負イオンにレーザー光を照射して、電子1個が脱離する様子を捉えることに成功した (実験ではポジトロニウム飛行時間測定装置が用いられた)。この研究結果はプレスリリースされ、新聞誌上でも取り上げられた。2012年度まで、この装置は低速陽電子ビーム生成用の専用リニアックと同じ地下一階テストホールに設置されていたが、2012年度の冬の停止期間中に一階のクライストロンギャラリーに移設された。ビームラインの新たな分岐 (SPF-B1) に接続されて、エネルギー可変ポジトロニウムビーム装置として整備され、ポジトロニウムビームの生成実験が行われた [9]。この実験では、ポジトロニウム負イオンをつくり、電場で加速してからレーザー光で光脱離させることで、必要なエネルギーを有するポジトロニウムを単色ビームとして得ることが可能になった。この結果もプレスリリースされた。2013年度にはポジトロニウム負イオン生成ターゲットのサイズや傾きの最適化などの実験 [1] が行われ、また2014年度からはポジトロニウム負イオン共鳴の実験が行われた。この実験では、レーザー光の波長をスキャンしながら光脱離したポジトロニウムの生成量を調べることによって、ポジトロニウム負イオン光脱離の断面積が測定され、共鳴によるピークが観測された (図2) [10]。この結果は、世界初のポジトロニウム負イオンの本格的なレーザー分光として、世界中から大きな注目を浴びている。

これらの実験が成功したのは、SPF 低速陽電子ビームの大強度かつショートパルスである特性が、ポジトロニウム負イオンの光脱離に必要なナノ秒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ったためである。今後も、陽電子ビームとパルス状レーザーを組み合わせた様々な研究が行われ、成果が上がるも期待される。

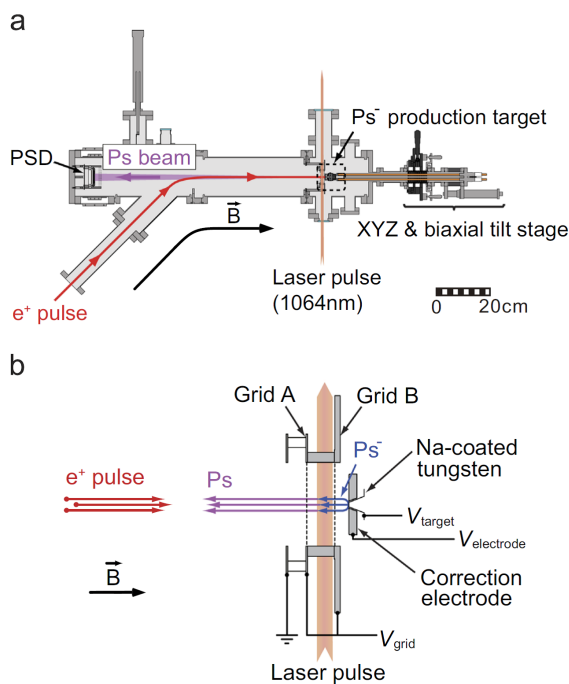


図1 ポジトロニウム負イオン実験装置 [1]

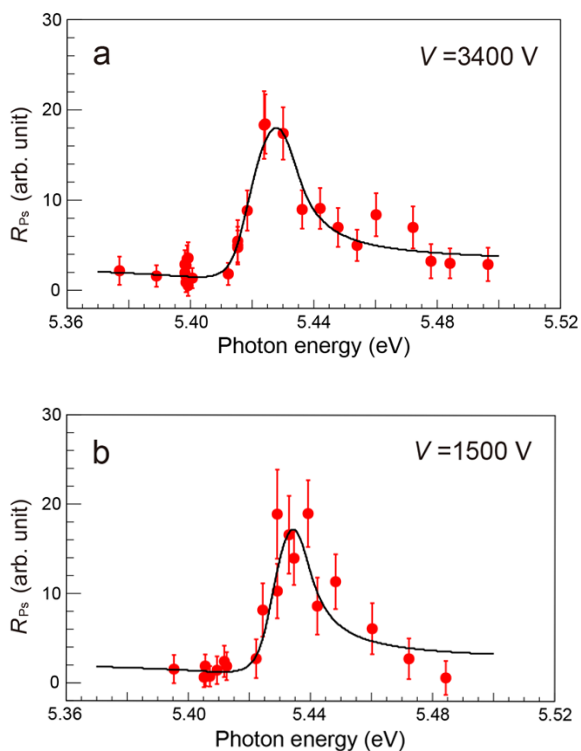


図2 ポジトロニウム負イオンの共鳴の証拠 [10]

### 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、3本のビームライン（SPF-A3, 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。2015年度までは、「ポジトロニウム負イオン光脱離実験の新展開とエネルギー可変ポジトロニウムビームの応用」（S2 課題）に長いビームタイムを配分し、このBLで験が行われた。

### 4. 今後の展望

ポジトロニウム負イオンの共鳴には、上で述べた形状共鳴の他に、より線幅が狭いフェッシュバッハ共鳴が存在することが予測されている。フェッシュバッハ共鳴のエネルギーは量子電気力学によって計算されるため、これを正確に測定すれば量子電気力学の検証を行うことが可能である。また、ポジトロニウム負イオンの光脱離によって生成されるポジトロニウムビームは物性研究への応用が可能である。特にポジトロニウムは電気的に中性であるため、絶縁体や磁性体表面のプロブとして有効であると考えられる。今後は、このような観点からの実験を行うことが検討されている。

### 引用文献

- [1] K. Michishio, R. H. Suzuki, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, and A. Yagishita, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A **785**, 5 (2015).  
 [2] J.A. Wheeler, Ann. New York Acad. Sci. **48**, 219 (1946).  
 [3] A.P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett. **46**, 717 (1981).

- [4] Y. Nagashima and T. Sakai, New J. Phys. **8**, 319 (2006).  
 [5] Y. Nagashima, T. Hakodate, A. Miyamoto, and K. Michishio, New J. Phys. **10**, 123029 (2008).  
 [6] H. Terabe, K. Michishio, T. Tachibana, and Y. Nagashima, New J. Phys. **14**, 015003 (2012).  
 [7] Y. Nagashima, Phys. Rep. **545**, 95 (2014).  
 [8] K. Michishio, T. Tachibana, H. Terabe, A. Igarashi, K. Wada, T. Kuga, A. Yagishita, T. Hyodo, and Y. Nagashima, Phys. Rev. Lett. **106**, 153401 (2011).  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20160318103000/> (KEK プレスリリース)  
 [9] K. Michishio, T. Tachibana, R. H. Suzuki, K. Wada, A. Yagishita, T. Hyodo, and Y. Nagashima, Appl. Phys. Lett. **100**, 254102 (2012).  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20120620140000/> (KEK プレスリリース)  
 [10] K. Michishio, T. Kanai, S. Kuma, T. Azuma, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, A. Yagishita, and Y. Nagashima, Nat. Commun. **7**, 11060 (2016).

\* 現所属 量子科学技術研究開発機構

# SPF-B2：ポジトロニウム飛行時間測定ステーション

兵頭 俊夫<sup>1</sup>, 和田 健<sup>1\*</sup>, 望月 出海<sup>1</sup>, 長嶋 泰之<sup>2</sup>, 飯田 進平<sup>2</sup>, 山下 貴志<sup>2</sup>, 立花 隆行<sup>3</sup>,  
前川 雅樹<sup>4\*</sup>, 河裾 厚男<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>東京理科大学, <sup>3</sup>立教大学, <sup>4</sup>日本原子力研究開発機構

## 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) の専用リニアックの短パルスモードで生成された低速陽電子ビームを試料に入射し、試料表面から放出されるポジトロニウムの飛行時間スペクトルを測定することで、ポジトロニウム生成のメカニズムや物質中 (絶縁体) や物質表面 (絶縁体・金属) の電子について調べる「ポジトロニウム飛行時間測定」の実験が行われている。装置の概要を図1に示す [1]。

低速陽電子を物質中に入射すると、陽電子は内部で熱化し、その一部は表面に戻って表面でポジトロニウム (電子と陽電子の水素原子様束縛状態) を形成して放出される。試料が絶縁体の場合は、内部で生成されたポジトロニウムが表面から放出されることもある。試料表面から放出されたポジトロニウム (パラポジトロニウムとオルソポジトロニウムの2種類。オルソポジトロニウムの寿命はパラポジトロニウムよりも約1000倍長い142 nsである) のうち、オルソポジトロニウムが飛行中に自己消滅したときに放出される $\gamma$ 線を、試料から水平距離で4 cmあるいは12 cm離れた位置に置かれたシンチレーション検出器で検出する。シンチレーション検出器の前には鉛スリットが設置されており、シンチレータが見込む狭い視野の範囲内を通過する際に自己消滅したオルソポジトロニウムの消滅 $\gamma$ 線の

みが検出される。シンチレーション検出器に取り付けられた光電子増倍管からの信号をデジタイザで取り込み、リニアックからの信号をトリガーにして飛行時間スペクトルを得る。測定チェンバーの真空度は $1 \times 10^{-8}$  Paである。

## 2. 整備開発および運用状況

SPFにおけるポジトロニウム飛行時間測定装置は、1995年度に開発され、当時はトリスタンやフォトンファクトリーと同じ電子・陽電子入射器を利用して得られる低速陽電子が用いられた。最初に $\text{SiO}_2$ 表面からのポジトロニウム飛行時間測定が行われた。 $\text{SiO}_2$ は代表的な絶縁体のひとつであり、ポジトロニウムの放出エネルギーを知ることが基礎物理としても応用としても重要であるうえに、 $\text{SiO}_2$ 表面から放出されるポジトロニウムのエネルギーについて次のような未解決の問題があった。米国Brandeis大のグループは $\text{SiO}_2$ 単結晶から放出されるエネルギーをポジトロニウム飛行時間法で測定し、その値を3 eVと報告した [2]。一方、東大のグループは $\text{SiO}_2$ 超微粒子の集合体であるシリカエアロゲルを用いてポジトロニウムの放出エネルギーを測定し、その値をBrandeis大で測定された値よりも小さい1 eVと報告した。この相違について調べるため、1996年度にSPFで実験が行われた [4]。 $\text{SiO}_2$ 単結晶およびアモルファス $\text{SiO}_2$ からのポジトロニウム放出エネルギーが測定され、いずれの表面も1 eV, 3 eVのどちらのポジトロニウムも放出されるという結果が得られた。また、過去の何れの実験法でもその片方しか測定できないことの説明も与えられた。この結果は、ポジトロニウムの精密測定や反水素合成のために必要な、低エネルギーのポジトロニウムの生成に関連して重要である [5, 6]。

それらの研究の後、2010-2011年度にSPFの専用リニアックが整備され、本装置は専用リニアックと同じ地下一階テストホールに移設されてポジトロニウム負イオン光脱離の実験が行われた [7]。2012年度には、この装置はポジトロニウム負イオン実験装置とともに一階のクライストロンギャラリー実験室に移設され、現在のビームラインSPF-B2に接続された。

最近では、種々の金属表面から放出されるポジトロニウムの飛行時間測定が行われている。近年、タングステン表面に低速陽電子ビームを入射すると、0.01%程度がポジトロニウム負イオン (陽電子1個と電子2個の束縛状態) として放出されること [8]、およびタングステン表面にアルカリ金属を蒸着すると、その放出量が2桁以上も増大することが見出された [9, 10]。またポジトロニウム負イオン

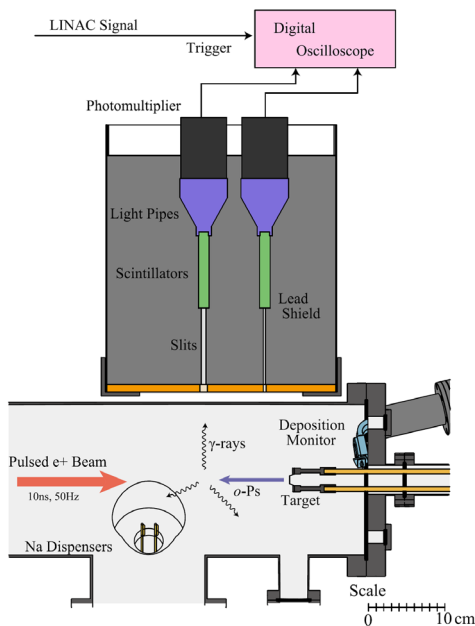


図1 ポジトロニウム飛行時間測定装置 [1]

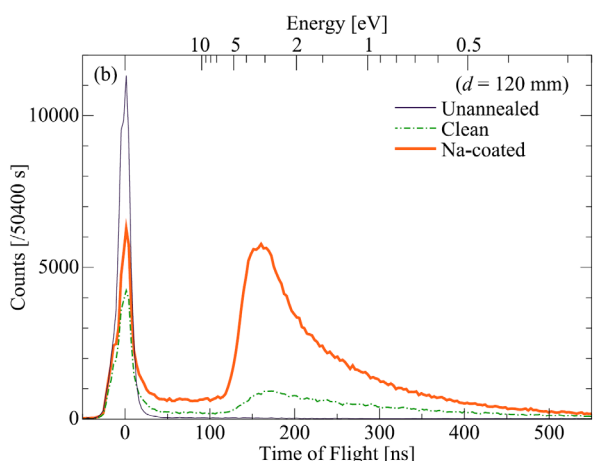


図2 タングステンからのポジトロニウム飛行時間スペクトル

のみならずポジトロニウムの放出量も飛躍的に増大する。これらの現象を統一的に解明するため、アルカリ金属を蒸着したタングステンから放出されるポジトロニウムの飛行時間測定が行われた(図2) [1]。130 ns (5 eVに相当)から立ち上がる成分の強度が飛躍的に増大している。これは、アルカリ金属吸着した表面層に伝導電子密度の低い領域が形成され、ポジトロニウム生成に適した状態ができていると考えられる。

### 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、3本のビームライン(SPF-A3, 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。共同利用の課題は「ポジトロニウム負イオン光脱離実験の新展開とエネルギー可変ポジトロニウムビームの応用」(S2課題)および「アルカリ金属を蒸着したタングステン表面から放出されるポジトロニウムの飛行時間測定」(G課題)、「絶縁体表面から放出されるポジトロニウムのエネルギー分布」(G課題)、「ポジトロニウム飛行時間測定法によるスピントロニクス材料表面電子状態の測定」(G課題)である。

### 4. 今後の展望

表面から放出されるポジトロニウムは、電子のバンド構造や表面近傍の電子密度、表面プラズモン、あるいは陽電子のエネルギー準位に関する情報を有しており、その測定は固体の性質を理解する上で重要である。また表面から放出されるポジトロニウムは、ポジトロニウムそのものの性質を調べたり反物質を合成する場合に重要な役割を演じるが、その生成機構についてはわかっていないことが多かった。上述のように、ポジトロニウム飛行時間測定ステーションではその解明に向けての第一歩を踏み出した。今後は、より詳細な解明を行っていくことが検討されている。

### 引用文献

[1] H. Terabe, S. Iida, T. Yamashita, T. Tachibana, B.

Barbiellini, K. Wada, I. Mochizuki, A. Yagishita, T. Hyodo, Y. Nagashima, *Surf. Sci.* **641**, 68 (2015).  
 [2] P. Sferlazzo, S. Berko, and K.F. Canter, *Phys. Rev. B* **35**, 5315R (1987).  
 [3] Y. Nagashima, M. Kakimoto, T. Hyodo, K. Fujiwara, A. Ichimura, T. Chang, J. Deng, T. Akahane, T. Chiba, K. Suzuki, B.T.A. McKee, and A.T. Stewart, *Phys. Rev. A* **52**, 258 (1995).  
 [4] Y. Nagashima, Y. Morinaka, T. Kurihara, Y. Nagai, T. Hyodo, T. Shidara, and K. Nakahara, *Phys. Rev. B* **58**, 12676 (1998).  
 [5] S. Mariuzzi, P. Bettotti, and R. S. Brusa, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 013401 (2008).  
 [6] D.B. Cassidy and A.P. Mills, Jr., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 243401 (2010).  
 [7] K. Michishio, T. Tachibana, H. Terabe, A. Igarashi, K. Wada, T. Kuga, A. Yagishita, T. Hyodo, and Y. Nagashima, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 153401 (2011).  
 [8] Y. Nagashima and T. Sakai, *New J. Phys.* **8**, 319 (2006).  
 [9] Y. Nagashima, T. Hakodate, A. Miyamoto, and K. Michishio, *New J. Phys.* **10**, 123029 (2006).  
 [10] Y. Nagashima, *Phys. Rep.* **545**, 95 (2014).

\* 現所属 量子科学技術研究開発機構