

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、物質の最表面の結晶構造と物性との関係の解明、陽電子やポジトロニウム (Ps), Ps 負イオンといった粒子の基礎的な性質の解明、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) 測定装置や低速陽電子回折 (LEPD) 測定装置, Ps 負イオン実験装置, ポジトロニウム飛行時間 (Ps-TOF) 測定装置などを用いて研究を進めている。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、その上で共同利用研究を推進する。

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-A3: TRHEPDステーション	兵頭 俊夫, 望月 出海	整備には日本原子力研究開発機構深谷氏が協力
SPF-A4: LEPDステーション	兵頭 俊夫, 望月 出海	整備には量子科学技術研究開発機構和田氏, 産業技術総合研究所白澤氏が協力
SPF-B1: 汎用陽電子実験ステーション	兵頭 俊夫, 望月 出海	現在は Ps 負イオン - 実験装置が設置されている。整備には東京理科大学長嶋研が協力
SPF-B2: Ps-TOFステーション	兵頭 俊夫, 望月 出海	整備には東京理科大学長嶋研, 量子科学技術研究開発機構河裾グループが協力

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, 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全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) をさらに発展させ, 数多くの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。2016年度は, 新規な表面構造の作製や表面特性の発現に挑戦しているグループ等からの問い合わせが3件あり, 2グループは年度内に共同利用を開始し, 1グループは2017年度からの共同利用を申請して採択された。また, 外部予算獲得により進めていた低速陽電子回折 (LEPD) ステーション (SPF-A4) が完成した。

【ビームライン整備】当グループが管理するビームライン分岐のステーションは, 様々な研究者が in situ で試料を作製して実験を行うため, 試料作製/モニター環境に対するさまざまなニーズがある。まだそれらに十分対応できる環境になっておらず, 予算の範囲で, 希望の強いものを整備している。

【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

TRHEPD では, 全反射条件で最表面だけ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情報も得られる。これまでに引き続き, 構造の起伏が大きいため確定していない表面について, TRHEPD による解明に挑戦する。また, 最近盛んに合成されている単原子層物質の構造は基板の物質の種類によって多様である。その中でも表面科学的に重要なものについて構造を解明する。

LEPD では, 低速電子回折 (LEED) で行われている 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ソン法などの手法開発を進める。

汎用ステーションでは Ps 負イオンの研究が一段落したので, Ps のボースアインシュタイン凝縮のために将来必要となる Ps のレーザー冷却の測定を検討する。

Ps-TOF では, 引き続き金属, 半導体, 絶縁体表面について, Ps 生成と放出を通じた電子構造の研究を展開する。また, ユーザー増加にともなって, 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出ている。現状は, リニアック出力の最大定格が本施設の放射線シールドで制限されている。天井が厚く放射線シールド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すれば, 加速管も一段追加が可能になり, 最小限の費用でビーム強度を増強することができる。強度が一桁増して 10^8 e⁺/s 以上になると, 多くの共同利用ユーザーの受け入れが可能になる。パルスストレッチと組み合わせると, 2次元2光子角相関 (2D-ACAR) 法による表面近傍の電子-陽電子対の運動量分布の測定も短時間で可能になる。

また, 日本陽電子科学会が提出した低速陽電子研究施設計画は学会会議の学術の大型研究計画のリストに含められており, 今後大型計画が実現する場合, 本施設がその中心施設として大きな役割を果たすことが期待される。低速陽電子実験施設では, 今後もこのような新しい陽電子研究を推進してゆきたい。

SPF-A3：全反射高速陽電子回折（TRHEPD）ステーション

兵頭 俊夫¹, 望月 出海¹, 深谷 有喜²

¹物質構造科学研究所放射光科学第一研究系, ²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] をもちいて, 全反射高速陽電子回折 [3] (total-reflection high-energy positron diffraction, TRHEPD) 実験を行っている。

ここでは, 大きさ 10 mm × 5 mm × 0.5 mm 程度に切り出した試料に, 10 keV 程度に加速した陽電子ビームを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と方位角はマニピュレータにより自動調整でき, 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) 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) も測定できる。

また, 試料の通電・電子衝撃加熱 (室温 ~1800 K 程度), ヘリウム冷凍機とヒーターを併用した低温域の試料温度制御 (20 K ~ 250 K 程度) が可能で, 本エンドステーションにおける in situ 試料作製にも幅広く対応できる。

2. 整備開発および運用状況

2016 年度は以下の高度化整備を実施した。①電子衝撃加熱型 3 源エバポレータを導入し, 複数の高融点物質蒸着が必要な試料作製に対応できるようになった。②試料交換用ロードロックを更新し, 試料を内部でストックできるようにした。これにより試料交換時の真空回復作業 (~8 時間) が不要となり, ビームタイムを効率良く測定時間に費やせるようになった。

現在, 実験チェンバーには, TRHEPD 測定システムの他に以下が常設されている: 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, 試料交換ストック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。

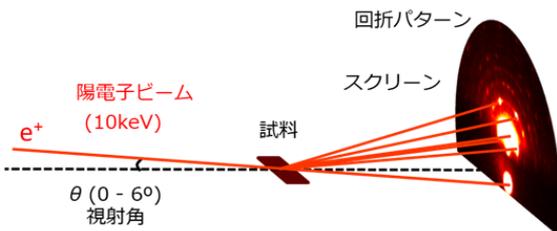


図 1 TRHEPD 実験配置

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 3 本と一体で実験審査委員会 (PAC) の評点に基づいた日程配分が行われる。どの課題も, 統計をためることが必要な蓄積型実験なので, 1 課題に対して概ね 5 日間を割り振っている。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は, 休日関係無しに, 基本的に内部スタッフが対応している。十分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。

2016 年度に本ステーションを利用した課題は, 「(S2) 全反射高速陽電子回折を用いた最表面構造決定」, 「(G) Ge(110)2×16 超構造の TRHEPD 測定」, 「(G) 触媒担体材料結晶の表面構造解明のための全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) を用いた新手法開発」, 「(G) アナターゼ型酸化チタン表面の構造解析と金属絶縁体転移の研究」, 「(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」である。

2015 年度末に出版したルチル型 TiO₂(110) (2 × 1) 表面の構造決定 [4], 及び Cu(111) 面上および Co(0001) 面上のグラフェンと基板の間の距離の決定 [5] に引き続いて, 2016 年度は, Al(111) 面上のゲルマネンのバックリングが図 2 のように非対称的になっていることを発見した [6]。

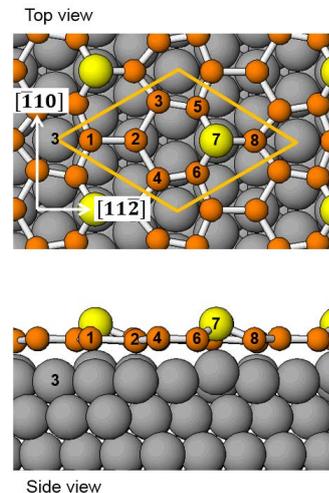


図 2 Al(111) 面上の非対称なグラフェン [6]

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、TRHEPD の表面構造に対する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は圧迫されており、このままでは慢性的にビームタイム不足が生じると予想される。これを当面解決するため、ユーザーからは、試料交換や in situ 試料作製を効率化する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] 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] 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.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20160224140000/> (KEK プレスリリース)
- [5] 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).
- [6] Y. Fukaya, I. Matsuda, B. Feng, I. Mochizuki, T. Hyodo, S. Shamoto, *2D Materials* **3**, 035019 (2016). <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/pressrelease20160913.pdf> (KEK プレスリリース).

SPF-A4：低速陽電子回折（LEPD）ステーション

兵頭 俊夫¹、望月 出海¹、和田 健²、白澤 徹郎³、藤浪 眞紀⁴、前川 雅樹²、河裾 厚男²

¹物質構造科学研究所放射光科学第一研究系、

²量子科学技術研究開発機構、³産業技術総合研究所、⁴千葉大学

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）実験ステーションの開発が行なわれている。LEPD法 [1] 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 測定装置では、陽電子輸送ビームラインとの幾何学的干渉により、一般の LEED 装置のように回折パターンを背面からカメラ撮影することが困難なため、遅延アノード検出器（Delay-line detector, DLD）を MCP 背面に配置してパターンを得る。DLD は 100 ns 程度の間に複数の陽電子を多重検出してしまふとパターンを正しく表示できないので、多重検出をしないよう陽電子ビームのパルス幅を伸張して単位時間あたりの陽電子の個数を減らすシステムを導入している。

2. 整備開発および運用状況

2015 年度までに、陽電子のパルス幅を伸長するパルスストレッチング（パルス伸張）セクションの開発と、50 eV から 500 eV のビームを非磁場領域で得るための輝度増強ユニットの導入を行ない、2016 年度にはそれらの試験・評価を行うと共に LEPD 実験の共同利用を開始した。

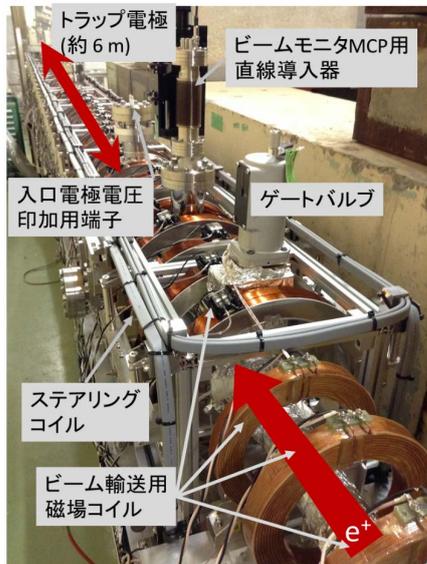


図1 パルス伸張セクション入口電極付近

パルス幅 1.2 μ s、繰り返し 50 Hz のロングパルスモードでは、各パルス中に陽電子が 10^6 個（単位時間換算で 10^{12} 個/s）程度存在する。これらを多重検出の問題無く検出できるようにするため、図1に示すような、パルス幅を最小 200 μ s から、最大で繰り返し上限の 50 Hz で決まる 20 ms 程度まで任意のパルス幅に引き伸ばすことのできるパルス伸張セクションを建設し、その動作試験を行なった。

本パルス伸張セクションは、図2の上部に示すように、ビームラインを内包するコイルと、円筒形の入口ゲート電極と出口ゲート電極、及びその間の長さ約 6 m の円筒形のトラップ電極から構成されている。また、パルス伸張セクションの中心軸に沿ってビームを入射できるよう、その上流側にビーム位置を調整するステアリングコイルを内包したソレノイドコイルを設置した。まず、各陽電子パルスをトラップ電極内に蓄積する。陽電子のビームラインに垂直な方向に関しては、コイルによるビームラインに沿った磁場で束縛し、ビームラインに沿った方向に関しては、入口ゲート電極と出口ゲート電極の電位 (> 陽電子ビームエネルギー) により束縛する。

動作は図2の下部に示すように行う。出口ゲート電極の電位 V3 は、ストレッチしたビームのエネルギーが所望の値になるような一定値に保つ。50 Hz の各パルスの到着にタイミングを合わせて入り口ゲート電極の電位 V1 を下げて陽電子をトラップ電極の円筒内に導入する。そのパルスの先頭が 6 m 先の出力電極で反射して戻ってくる前に、V3 を V1 より高くして、陽電子を閉じ込める（すなわち、陽電子が入り口電極と出口電極の間を往復する状態に保つ）。その後トラップ電極の電位 V2 を徐々に上昇させる。これにより、一定値に保たれた V3 を越えて少しずつ下流側に陽電子が溢れ出るので、時間的にパルス幅が広がった一定エネルギーの陽電子ビームが供給される。パルス伸張

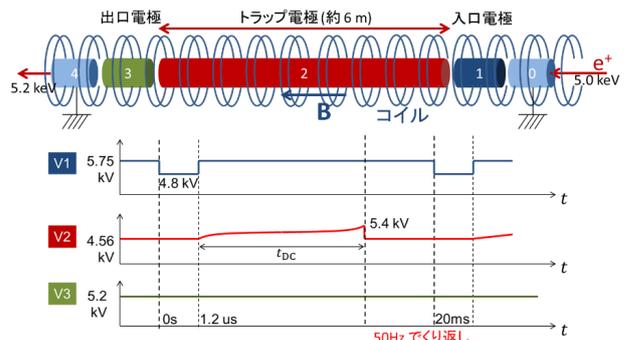


図2 パルスストレッチングセクションの動作の概念図

幅は、V2の上昇の速さにより調整することができる。動作試験を行ない、LEPDステーション手前での輝度増強に適した5.2 keVのパルス伸張ビームを得るための諸電源のパラメータを決定した。

リニアックベース低速陽電子ビームのパルス伸張セクションは、10 eV程度のエネルギーの陽電子ビーム用に既に産業技術総合研究所で実用化されている。そこでは、各パルスをリニアストレッチした後に出口のゲート電極の電位を下げていくことで徐々に陽電子を下流側に供給してパルス幅を広げる方式が採用されている。KEKで開発したパルス伸張セクションは、出口のゲート電極が一定のためエネルギーの揃った長パルスビームが得られる。原理的には、各電極の電位の変化を調節することで、元々の陽電子ビームよりも高エネルギーの陽電子を得ることも可能である。伸張された陽電子ビームは引き続き磁場輸送されるが、これを回折実験に利用するには、まずは非磁場領域へ解放しつつ必要なビーム輝度を確保しなければならない。そのため、厚さ150 nmのNi薄膜を用いた透過型リモデレータによるビーム輝度増強システムを開発し、50 eVから500 eV程度の高輝度低速陽電子ビームを輸送するためのレンズ系を構築した。

構築した装置を用いて、実際にLEPD実験を試みたところ、輝度増強ユニットで9割方消滅する陽電子の消滅 γ 線によるバックグラウンドが強く、MCP-DLDによる回折パターンの観測に支障があることが判明した。MCPは陽電子消滅 γ 線に対して0.1%のオーダーの検出効率しか無いが、回折パターンを形成する陽電子の試料表面からの後方弾性散乱の確率も同程度に低いため、このような問題が生じていることがわかった。そこで、輝度増強ユニットからの γ 線を遮蔽するための厚さ1 cmのタングステン板をDLDの背面に設置し、かつMCPの出力信号のパルス波高分析をし、減衰指数関数的に分布する γ 線由来の信号と、ガウシアン的に分布する陽電子由来の信号を波高弁別する測定系を構築した。これらにより、バックグラウンドを1桁低減することができた。

また、使用している試料ホルダがチャージアップしてLEPD回折パターンが取得できないという問題も判明した。LEPD実験はビーム強度が十分弱いので、たとえ絶縁体試料であっても陽電子ビームによるチャージアップの問題は生じないが、試料表面を作成する時に使用するAr⁺スパッタやRHEED測定により、試料ホルダの絶縁部品がチャージアップし得る。試料ホルダがAr⁺スパッタやRHEEDでチャージアップしないよう、改造を行なった。

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の輸送ラインの途中に分岐を作り、4本の分岐ビームライン（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。2016年度にSPF-A4を利用した課題は、「(G)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」と「(S2)低速陽電子回折法による表面構造解析」である。

4. 今後の展望

陽電子は電子と比較して、結晶中の多重散乱が少ないこと、陽電子と電子との間に交換相互作用が無く、また原子核からの反発により相対論的効果が小さいため散乱因子が単純であること、平均自由行程が短くより表面敏感であること、という利点があり、LEEDと比較して実験と理論計算が良く一致することがわかっている[2-4]。LEED法は表面構造解析の強力な手法ではあるが、とりわけ重元素を含む系では散乱が複雑となり解析が困難になる場合がある。LEPD法の持つ利点はLEED法における困難を生じないことを示唆している。また、LEED法では困難な表面ホログラフィーがLEPDでは可能であることも理論的に予想されている[5]。

2016年度に開始したLEPD実験は、輝度増強ユニットからの消滅 γ 線によるバックグラウンドの問題とAr⁺スパッタやRHEED測定による試料ホルダのチャージアップの問題を解決した。2017年度にはまずはLEPDパターンの測定を目標とし、続いてホログラフィー法やI-Vによる表面構造解析を行なえるよう整備を進めていく。

引用文献

- [1] I. J. Rosenberg, A. H. Gneiss, and K. F. Canter, Phys. Rev. Lett. **44**, 1139 (1980).
- [2] T. N. Horsky, G. R. Brandes, K. F. Canter, et al., Phys. Rev. Lett. **62**, 1876 (1989).
- [3] C. B. Duke and D. L. Lessor, Surf. Sci. **225**, 81 (1990).
- [4] S. Y. Tong, Surf. Sci. Lett. **457**, L432 (2000).
- [5] S. Y. Tong, H. Huang, and X. Q. Guo, Phys. Rev. Lett. **69**, 3654 (1992).

SPF-B1：汎用陽電子実験ステーション

兵頭 俊夫¹, 望月 出海¹, 長嶋 泰之², 満汐 孝治^{2*}

¹物質構造科学研究所放射光科学第一研究系, ²東京理科大学

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) 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 (~10⁶ e⁺/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 Ps 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 Ps をマイクロチャンネルプレートで検出することで, Ps 負イオンと光子の相互作用を調べることができる。また Ps 負イオンを電場で加速した後光脱離して, Ps のエネルギー可変ビームを得ている。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 × 10⁻⁸ 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 負イオンは陽電子1個と電子2個からなる束縛状態である。三体の束縛系を理解する上で大変重要な研究対象で, 1946年に J. Wheeler [2] によって存在が予測されて以来, 数多くの理論的研究が行われてきた。実験的検証は1981年に A. P. Mills, Jr. [3] によって行われたが, 生成効率が僅か0.03%と低く, その後の実験は殆ど行われてい

なかった。2008年度に東京理科大学の Y. Nagashima ら [4] 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 Ps 負イオンの生成効率を2桁増やすことに成功して以来, SPF を中心に行われた研究で, 大きな成果が挙げられている。まず, ポジトロニウム飛行時間 (Ps-TOF) 測定装置を用いて, レーザービームによる Ps 負イオンの光脱離が実現された [5]。その後, 一階のクライストロンギャラリ実験室の本汎用ステーション (SPFB1) に整備された装置で, エネルギー可変 Ps ビームの生成実験が行われた [6]。ここでは Ps 負イオンを電場で加速してから光脱離させることで, 所望のエネルギーを有する単色の Ps ビームを得る方法が用いられた。さらに, Ps 負イオン生成ターゲットの最適化 [1] も行われた。引き続き, レーザー光の波長をスキャンしながら光脱離した Ps の生成量から Ps 負イオン光脱離の断面積が測定され, 理論で予想されていた形状共鳴によるピークが観測された [7]。この結果は, 世界初の Ps 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, Ps 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。

Ps 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, Ps 負イオンの光脱離によって生成される Ps ビームは物性研究への応用が可能である。特に Ps 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。

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「(S2) 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」, 「(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」である。形状共鳴の研究の後, それまで並行して東京理科大学で開発されていた Ps 負イオン実験用の放射性同位体陽電子源 (²²Na) を利用したパルス陽電子装置が完成したので, Ps 負イオン実験の中心はそちらに移った。

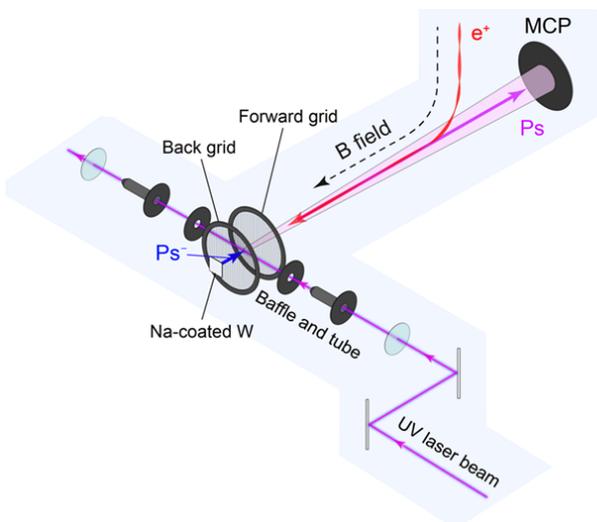


図1 Ps 負イオン実験装置 [7]

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。東京理科大学での研究の進展によって将来 SPF の低速陽電子ビームの強度を必要とする研究が再開される可能性もある。また、新規ユーザーによって、本ステーションを利用した Ps のレーザー冷却の研究も構想されている。

引用文献

- [1] K. Michishio, R. H. Suzuki, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, A. Yagishita, and Y. Nagashima 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, Phys. Rep. **545**, 95 (2014). 及び引用文献.
- [5] 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://www2.kek.jp/ja/news/press/2011/Positronium.html> (KEK プレスリリース), <http://www2.kek.jp/ja/news/highlights/2011/Positronium.html> (KEK ハイライト).
- [6] 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).
- [7] 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).

* 現所属 産業技術総合研究所

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¹, 望月 出海¹, 長嶋 泰之², 飯田 進平^{2*}

¹物質構造科学研究所放射光科学第一研究系, ²東京理科大学

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 (幅 ~10 ns, 50 Hz) で生成された高強度の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 (Ps, 電子と陽電子の水素原子様束縛状態) の飛行時間スペクトルを測定する。これにより、Ps 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) の電子状態について調べる「ポジトロニウム飛行時間測定 (Ps-TOF)」の実験が行われている。何度か改修を行った後の、現在の装置の概要を図 1 に示す [1]。

低速陽電子を物質中に入射すると、陽電子はすぐには消滅せず、ほとんどは内部で熱化してから電子と対消滅するが、その一部は表面に戻ってくる。その陽電子のさらに一部は、表面で電子を捕獲し、Ps 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 Ps が消滅前に表面に達して放出されることもある。放出された Ps のうち、オルソ Ps (真空中の寿命 142 ns) が飛行中に自己消滅したときに放出される γ 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。表面からはパラ Ps (真空中の寿命は 125 ps) も放出されるが、寿命が短いので、表面のすぐ近傍で消滅してしまう。

シンチレーション検出器の前には鉛スリットが置かれており、それを通してシンチレータが見込む狭い視野の範囲内をオルソ Ps が通過する際に自己消滅した消滅 γ 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 1×10^{-8} Pa である。

2. 整備開発および運用状況

Ps-TOF 装置は、SPF における最初の測定ステーションとして 1995 年度に開発された。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。その最初の実験として、1996 年度に SiO₂ 表面からの Ps-TOF 測定が行われた [2]。当時、SiO₂ 表面から放出される Ps のエネルギーについて、1 eV と 3 eV の 2 つの値が報告されていた。この実験によって、SiO₂ 単結晶およびアモルファス SiO₂ のいずれの表面からも 1 eV と 3 eV の Ps が放出されるという結果が得られた。また、以前の実験法ではその片方しか測定できなかったことの説明も与えられた。

それらの研究の後、本装置は 1998 年度に陽電子入射器棟の地階のテストホールに移設され、2002 年に低速陽電子生成専用の加速器となる「テストリニアック」がテストホールに移設された。さらに、低速陽電子ビームの強度が 10 倍になった後の 2012 年度には、Ps 負イオン実験装置とともに本装置も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、金属表面から放出される Ps の飛行時間測定が行われている。近年、W 表面に低速陽電子ビームを入射すると、0.01% 程度の Ps 負イオン (陽電子 1 個と電子 2 個の束縛状態) も放出されること、および W 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 [3]。この機構を解明するために、アル

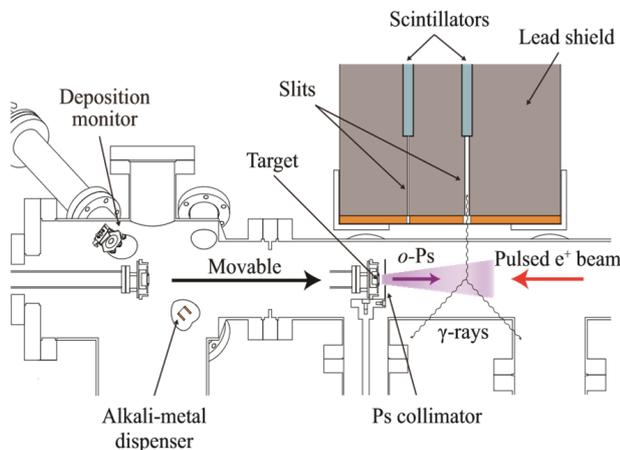


図 1 ポジトロニウム飛行時間測定装置 [1]

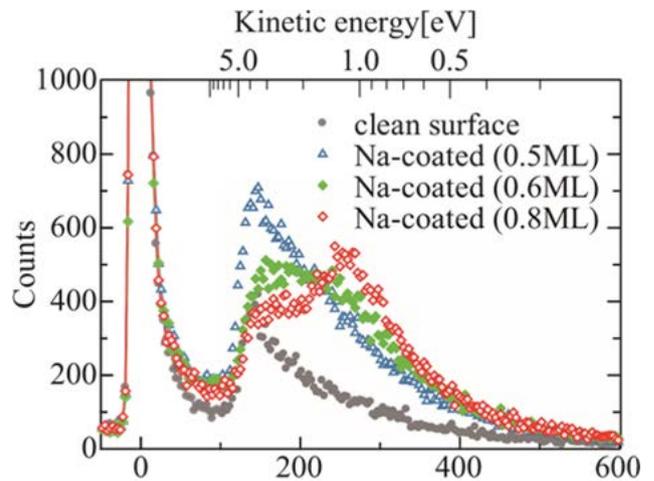


図 2 W(110) 清浄表面と Na を蒸着した表面の Ps-TOF スペクトル [1]。

カリ金属を蒸着した W から放出される Ps の飛行時間分布を測定したところ Ps の放出量も飛躍的に増大していることがわかった [4]。引き続き詳細な研究により、この Ps の、電子と陽電子の仕事関数で決まる最大エネルギーは変わらないが、一部エネルギー損失を受けた成分が含まれていることが明らかになった (図 2) [1]。

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) 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。

4. 今後の展望

表面から放出される Ps 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 Ps は、Ps そのものの性質を調べたり反物質を合成したり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い。上述のように、Ps 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] S. Iida, K. Wada, I. Mochizuki, T. Tachibana, T. Yamashita, T. Hyodo, Y. Nagashima, *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 475002-1-4 (2016)
- [2] Y. Nagashima, Y. Morinaka, T. Kurihara, Y. Nagai, T. Hyodo, T. Shidara, and K. Nakahara, *Phys. Rev. B* **58**, 12676 (1998).
- [3] Y. Nagashima, *Phys. Rep.* **545**, 95 (2014).
- [4] 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).

* 現所属 立教大学理学部