

低速陽電子実験施設の現状

低速陽電子実験施設 和田 健
(2024年5月6日付け)

はじめに

低速陽電子実験施設 (Slow Positron Facility, SPF) では、専用リニアックで加速された電子ビーム ($\sim 50 \text{ MeV}$, $\sim 530 \text{ W}$) で生成した高強度低速陽電子ビームを共同利用実験に供給している。物質最表面および表面直下の原子配列の解明、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物理実験や、それらの粒子と物質との相互作用の解明を目的に、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 のレーザー冷却実験を実施中), Ps 飛行時間 (Ps-TOF) 測定などの共同利用実験を実施している。TRHEPD は電子による反射高速電子回折 (RHEED) の陽電子版, LEPD は低速電子回折 (LEED) の陽電子版である。施設の名称にもなっている「低速陽電子」は、負の仕事関数を使う特殊な方法でエネルギーを単色化した陽電子の名称で、その後に加速した場合もこの名称で呼ばれる。TRHEPD のビームも同様であるが、この場合だけは RHEED と名称を揃えて「高速」陽電子回折と呼ばれる。さらに「全」反射と呼ばれるのは、電子にはない全反射が陽電子には起きるためである。

専用リニアックの管理・運転は、加速器研究施設第5研究系によってなされ、低速陽電子生成部から下流側の管理・運転は物構研 SPF と PF によってなされている。共同利用は放射光共同利用実験の一環として行っており、2023年度の共同利用実施課題数は 17 課題、有効課題のユーザー数は 54 名、ユーザー実験の配分時間は 3,368 時間であった。

ビームラインの状況

実験装置の高度化が進んだことから、ビーム強度やビーム位置の微妙な変化に対する実験への影響が徐々に顕在化してきた。特に精緻な光学系を用いている LEPD 実験において、ビーム強度のランダムな変動が観測されたことから調査を進めたところ、原因として低速陽電子生成ターゲット部の電位の変動とパルスストレッチャー用の出口ゲート電極の電位変動が疑われた。ターゲット部の高電圧フローティング電源（特注）における陽電子モデレータへの出力電圧の時定数を計算した所、330 秒と非常に長く、チャージアップ時の正常電位への回復が遅れていることが推測されたため、電源内部の抵抗の交換によって時定数を 3.3 秒にした。また、陽電子コンバータ部に対しても、ターゲット部そばに既設の 30 nF 程度のキャパシタに並列に $120 \text{ M}\Omega$ のシャント抵抗を追加することで、220 秒だった時定数を 4.2 秒にした。パルスストレッチャーのゲート電極に対しては、 $47 \text{ M}\Omega$ のシャント抵抗をつけた。これによりビーム強度のランダムな変動が抑えられたと共に、異なる実験ステーションへのビーム供給パラメータの切り替え後

すぐにビームが安定するようになった。以前は安定するまでに数時間要していた。

また、SPF の短パルスモード（繰り返し 50 pps, 幅 10 ns）における低速陽電子ビーム強度に 10 Hz と 25 Hz の 1–2% 程度の強度変動（強度の 2 倍化）があることが、ポジトロニウムのレーザー冷却実験のデータ解析から判明した。SPF のある入射器棟内の他の加速器モジュール由來の電源ノイズによるものと思われる。SPF の専用加速器のタイミングを入射器棟メインリニアックに対して相対的に 8.0 ms 遅らせると共に、クライストロンの加速電圧を上げることでこのビーム強度の 2 倍化の問題が解決された。この問題に関する調査と対策にあたっては、SPF ユーザーおよび入射器の RF グループの方々の多大なご協力をいただいた。

2022 年 6 月 18 日に SPF で漏電があり、これによって同じ入射器棟内のメインリニアックのマグネット用電源が落ちて SuperKEKB, PF, PF-AR への連続入射が中断した可能性が高いという指摘があった。このことをきっかけに、漏電を起こさないよう注意をより徹底すると共に、仮に漏電があった場合にも上流側の電気系統に影響を与えないよう SPF で対策を進めることになった。PF では既に漏電遮断器の効果的活用によって、漏電事象（上流側の漏電警報機の発報）が 1/30 程度に激減したとのことで、その詳細を PF の電気安全担当者からご指導いただき、SPF にも同様の対策の導入を進めた。まず、最も漏電の可能性の高いベーキング用に漏電遮断器を導入し、ベーキング時には必ずこれらの漏電遮断器を利用することを周知徹底し、運用を開始した。また、各実験盤の下流側の全ての電源ラインに 30 mA 以下の漏電遮断器を入れることを基本としたことにした。漏電遮断器を入れる位置は、停止すると他への影響の大きな真空機器関連は各機器の直前とし、真空インターロックは他と独立とする方針とした。それ以外は次の(1)～(3)のいずれかの対策を行った。(1) 子実験盤の各端子台の過電流遮断器を過電流漏電遮断器に変更、(2) 電源タップを漏電遮断器付きのものに変更、(3) 電源プラグへの簡易漏電遮断器の導入。2023 年度夏の停止期間の停電時にこれら全ての対策を終えた。

SPF-A3 (TRHEPD ステーション) では、回折パターンの観測に使用している MCP の劣化が確認され、新品に交換した。2020 年の低速陽電子生成部の改良に伴うビーム強度の向上により、TRHEPD の回折ビームで MCP の劣化が急速に進み得ることは予想されていた。現状の低速陽電子ビームの時間平均強度は典型的な電子ビームによる実験と比較して 6 衍程度弱く、その強度増大は喫緊の課題である。ところが、20 ms 毎に $1 \mu\text{s}$ のパルス幅のビームで供給されるため、パルス中では時間平均強度に対して 20,000

倍もの瞬間強度になっており、現状の TRHEPD の回折ビームでも MCP の許容検出レートを超えると考えられていた。すぐに可能な当座の対策として、TRHEPD に限ってはビーム強度を意図的に弱めて共同利用を行っていたが、予想より早く MCP の劣化が進んだ。これに対する本質的な対策のために、LEPD 用に開発し稼動中のパルスストレッチャーを TRHEPD でも使用できるよう、開発をあらかじめ進めてきた。パルスストレッチャーで使用している Penning-Malmberg トラップの電極は、真空配管内の長さ約 6 m のトラップ電極およびその両端のゲート電極と接地電極から構成されており、現在は 5.0 keV の 1 μ s のパルスビームを 5.2 keV の準 DC ビームに変換して LEPD 実験に供給している。TRHEPD に必要な 15 keV の準 DC ビームを供給できるようにするために、15 kV を超える電圧の印加のための特殊パルス電源の開発と、各電極の放電対策を進める必要がある。このための特殊電源を開発し、放電対策の評価用試験電極を作成し、電圧印加試験を行った。特殊電源については、入口ゲート電極用のパルス電源回路へのコンデンサの追加と、電極に接続した場合のインピーダンス整合をとりかつ電極で放電が起こった時の電源保護のための抵抗を追加すれば必要とする性能が達成できることが確認できた。試験結果は概ね良好であり、予算の目途さえ立てば、TRHEPD に必要な 15 keV の準 DC ビームを供給できる Penning-Malmberg トラップ電極への交換を行うことで、従来の 10 倍の強度での実験を開始できると見込んでいる。また、ビーム強度を上げるかわりに、TRHEPD ビームのコヒーレンス長をより長くしていくことも可能となり、近年ニーズが高まっている超長周期表面構造を持つ試料への TRHEPD 実験の対応への期待にも応えることができるようになると期待している。

また、陽電子回折実験により高強度ビームでの実験を可能にするため、磁場によって輸送した低速陽電子ビームを非磁場領域にビームを引出してから透過型減速材（透過型リモデレータ）に高効率にビームを収束するシステムの改良の開発を進めている。この開発研究で得られた知見は、ポジトロニウムのレーザー冷却実験におけるポジトロニウム生成材料への低速陽電子ビーム入射にも応用されている。

2023 年度は、ビームラインの加速器フェンス上流側におけるステアリングコイルで地絡（配線の接地電位への接触）が発生した。これらは全て同タイプのもので、かつて KEKB の陽電子用リングに導入されたものと同タイプのソレノイドコイルの内部に設置された、ビーム輸送用真空配管の上下方向および左右方向に磁場を発生させるステアリングコイルである。低速陽電子は磁場の向きにガイドされていくが、ステアリングコイルは、地磁気によるビーム軌道偏向の補正あるいはビーム軌道の調整に用いている。地絡部の接触抵抗の変動によりビーム位置が安定せず、低速陽電子回折のような精緻な光学系を用いた実験に著しい影響が出た。問題のステアリングコイルは、熱による膨張と収縮によって固定治具のエッジで被覆がはがれてきて同時

期に次々地絡はじめたのではないかと推測しているが、ソレノイド内部をファイバースコープで観測したものの、どこで地絡をしているかは判別がつかなかった。これらのステアリングコイルの交換にはビームラインの解体が必要となるためそれは行わずに、ソレノイドコイル外側から新たにステアリングコイルを 6 セット設置した。

2024 年 2 月 11 日未明に、ビーム強度の著しい低下の報告がユーザーからあった。調査した所、最上流から 2 番目のビーム輸送用ソレノイドコイルへの配線で地絡が見つかった。問題のコイルのみをバイパスしビーム調整を試みた所、1/10 程度の強度であればビームが輸送できることがわかった。問題のコイルはコンクリートシールド内部にあって、これ以上の調査と対策はシールドを大規模に開けて中に入りての作業が必要だが、それも加速器停止から 1 ヶ月程度線量が下がるのを待つ必要があることから、このまま予定されていたユーザー運転終了日の 3 月 25 日まで 1/10 のビーム強度で運転を継続した。3 月末にシールドを大規模に開けて 4 月に調査したところ、コイルへの配線が地絡の原因となっている可能性が最も高かったため、シールド内の近隣のコイルも含めた 4 つのコイルへの配線を新しいものと交換した。ソレノイドコイルへの配線のトラブルは初めての事例だが、運転中は現場近辺の線量が高くなることから、配線の劣化が原因として考えられる。現場ではガラス被覆熱電対線の劣化が少なかったため、新しいコイル用配線として、ポリイミドテープ巻きガラス編組電線を導入した。配線交換後は問題が無く、現在は以前の正常なビーム強度を回復している。

各ステーションの状況

現在、SPF では 4 つの実験ステーションが稼働している。地下テストホールの SPF-A3, SPF-A4 と、地上階クライストロンギャラリー実験室の SPF-B1, SPF-B2 である。

SPF-A3 の全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) ステーションでは、表面構造解析の共同利用実験が行なわれている。2023 年度は、準フリースタンディング単層グラフェン (quasi-freestanding monolayer graphene, QFMLG) と呼ばれる H 端終 SiC 基板上のグラフェンの構造解析が行なわれた。原子スケールで平坦なグラフェンシートを高品質・大面積に工業的規模で作製するためのさまざまなアプローチの中でも、QFMLG はハイパワーまたは高周波エレクトロニクスにとって特に有望視されている。6H-SiC(0001) 上に成長した QFMLG の構造を、TRHEPD を用いて調べた結果、グラフェンと基板間の層間距離 ($d_{\text{QFMLG}} = 4.18 \pm 0.06 \text{ \AA}$) は、垂直入射 X 線散乱法 (NIXSW) 法や高分解能 X 線反射率 (XRR) 法による従来研究による値 ($d_{\text{QFMLG}} = 4.22 \pm 0.06 \text{ \AA}$) と比較するとわずかに小さい値となり、第一原理計算の結果 ($d_{\text{QFMLG}} = 4.16$) とよりよく一致した。

また、TRHEPD により、Co(001) 基板とその上のグラフェンの間に貴金属原子を挿入 (インターラーション) したときの積層構造の変化が調べられた。下地基板を利用し

てグラフェンの物性を制御する試みは、グラフェン材料開拓研究における新たな自由度をもたらすものである。Co 上グラフェンと基板との層間距離 (2.04 Å) は、Ag, Au 原子挿入により、3.24 Å (Ag), 3.32 Å (Au) へと広がり、デバイ温度は 430 K (Co) から 320 K (Ag), 368 K (Au) に変化した。これは、インターラーニングの結果、ファンデルワールス相互作用を介して準フリースタンディングのグラフェンに変化したことを示している。銀の場合は、700°Cまでさらに熱処理することで、銀の脱インターラーニングによってグラフェンの高さとデバイ温度が元の状態に戻ることが確認された。即ち、下地基板と強く相互作用している Co 上グラフェンを、貴金属原子の挿入によりフリースタンディングな状態との間でリバーシブルに作り換えられることが示された。

SPF-A4 の低速陽電子回折 (LEPD) ステーションでは、ビーム強度の増大と、基本的な実験環境の整備が進んだことで、2 桁強い回折強度が得られるようになり、Cu(001) 表面で高品位な回折パターン 1 枚を 1 分で取得できるようになった。得られた LEPD のデータの解析を行っているが、LEED よりもさらに表面敏感であることが明らかになりつつある。

SPF-B1 の汎用ステーションでは、Ps レーザー冷却実験を行っている。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となっている。短パルスモードの低速陽電子ビームを、レーザー冷却用に作成したシリカエアロゲルと呼ばれるシリカナノ微粒子が 3 次元ネットワーク構造を形成した物質に入射して Ps を生成している。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、トリプレットの 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 温度測定を行っている。2023 年に世界に先駆けてポジトロニウムのレーザー冷却に成功したことに関する国際会議で発表し、現在論文を投稿中である。

SPF-B2 のポジトロニウム飛行時間法 (Ps-TOF) ステーションでは、試料表面からの Ps 放出のエネルギー分布を通じての表面および Ps 生成媒質の研究のための共同利用実験が行われている。現在、試料を冷却しながらの Ps-TOF 測定が行なわれている。

その他

2 次元物質の構造決定に用いられる複数の先端量子ビーム計測技術向けの汎用データ解析ソフトウェア “2DMAT (ツーディマット)”において、並列モンテカルロ型ベイズ推定などの解析手法を駆使して、TRHEPD や X 線回折などの複雑なデータ構造の中に潜む「真の解」 (= 正しい原子配列) を効率的に高信頼に見つけ出すことが可能となっている。また、決定した表面構造の情報を用いて第 1 原理計算 (QUANTUM EXPRESSO) による電子状態の計算などをシームレスにできるようになっている。最近、LEED/

LEPD の構造解析への拡張が進み PC やスーパーコンピュータによるこれらの計算も開始された。さらに、LEED/LEPD による深さ方向の感度解析や、複数の手法を組み合せた解析などの試みも開始されている。

人事異動

SPF 施設長を兼務されていた小杉信博 前物構研所長が 2024 年 3 月末で退職されました。2024 年 4 月からは雨宮健太 物構研副所長に SPF 施設長を兼務いただいております。