

大強度低速陽電子ビームによる物性科学・基礎科学の革新的展開

① ビジョンの概要

我が国の低速陽電子ビーム生成技術や今後開発される新規技術を用いて、大強度低速陽電子ビームを実現する。これによって固体表面の原子配列やそのダイナミクス、表面スピンの分布、原子空孔・サブナノ空隙の3次元マッピングの高速で高精度な測定等を実現し、新たな機能性材料や量子技術開発に繋げる。また純レプトン束縛系や陽電子・電子ペアプラズマに関連する新規基礎研究を開拓し、産業・文化的な貢献も果たしていく。

② ビジョンの内容

陽電子発生源から得られる白色陽電子をタングステン等の金属や希ガス固体に入射すると、バルク中で熱化し狭いエネルギー広がりを持って表面から再放出される。これを加速することによって得られる単色陽電子ビーム(低速陽電子ビーム)は様々な研究で利用されている。特に近年、実用的な陽電子回折が我が国で実現し、他の手法では困難な最表面構造解析が行われるようになった。この技術は、従来からの陽電子プローブによる物質の電子状態や固体中の原子空孔・ボイド等の研究と相俟って、物質の重要な情報を導き出す。また固体表面スピンの研究やポジトロニウム(電子と陽電子の水素原子様束縛状態)などのレプトン束縛系の研究でも大きな進展が見られる。現時点で最大強度 10 pA 程度の低速陽電子ビームが2-3桁高い大強度に進化を遂げれば、物質科学研究や基礎科学研究の深化、機能性材料や量子技術開発にさらに大きく寄与する。

本ビジョンを実現するためには、時間構造を持つことからパルスレーザーとの同期や飛行時間測定、陽電子蓄積等に有効な大強度パルス低速陽電子ビームと、積分強度を最大に利用して高計数率かつリアルタイムの陽電子計測が可能な大強度直流陽電子ビームの両方があれば、多くの確実な成果があがる。そこで20-30年をかけて、下記の二つの方式で最大強度 1-10 nA の低速陽電子ビームを実現する。

- (1) 電子線形加速器を用いる大強度低速陽電子ビーム：加速器で数 10 MeV に加速した電子を重金属に入射し、制動 X 線の対生成によって得られる陽電子を減速して、低速陽電子ビームとして利用する。高エネルギー物理実験分野で培われてきた加速器技術を結集させれば、1-10 nA の低速陽電子ビームの実現が期待できる。この方法では加速器の特性を反映してパルス状低速陽電子ビームが得られる。
- (2) 原子炉を用いる低速陽電子ビーム：原子炉内で $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$ 等の核反応によって放出される γ 線の対生成で得られる陽電子を減速して低速陽電子ビームを得る。

(2)の方法による世界最大強度の低速陽電子ビーム装置がミュンヘン工科大に設置されており(NEPOMUC)、ヨーロッパにおける陽電子研究の大きな拠点となっている。わが国が持つ技術力を活かして国内に(1)(2)の双方で NEPOMUC を大きく超える強度の低速陽電子実験施設を設置し、世界の陽電子研究拠点とする。これら以外にも、サイクロトロンやハイパワーレーザーを使った新規陽電子生成法も検討する。

これらの開発を行う中で人材育成を行い将来のさらなる発展を目指す。さらに中性子・放射光・自由電子レーザー・ミュオン・陽電子の量子ビームを横断的に連携活用する量子マルチビーム研究体制によってより高度な物質研究を目指す。

③ 学術研究構想の名称

大強度低速陽電子ビームによる物性科学・基礎科学の革新的展開

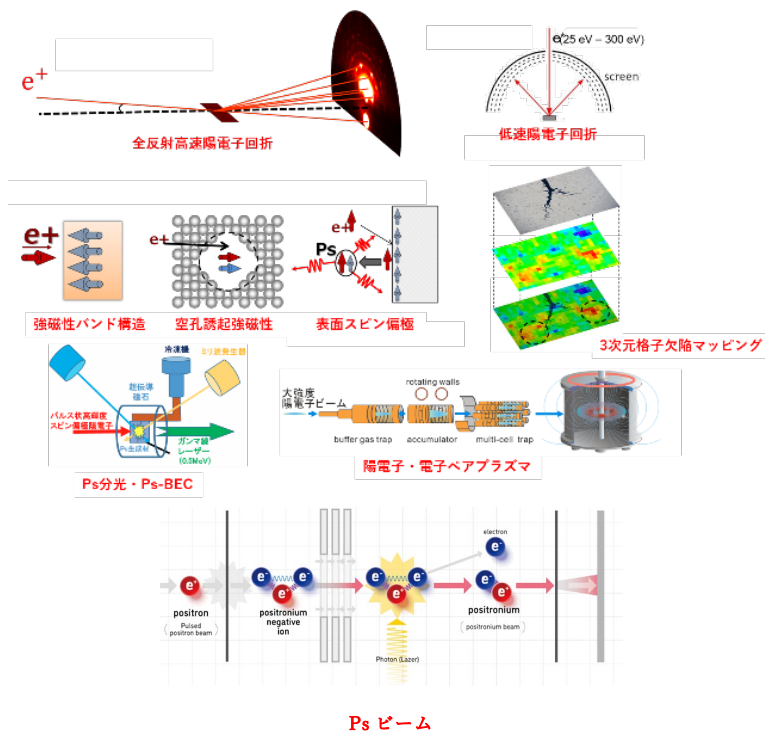


図1 各種低速陽電子ビーム技術

④ 学術研究構想の概要

今後 10 年程度の間で 10 倍の 0.1nA に増大させることを目指す。実現すれば、物質科学研究や基礎科学研究の深化、機能性材料や量子技術開発に大きく寄与する。例えば固体最表面微小ドメインの構造および電子状態、3次元格子欠陥や表面スピン状態のマッピング等は、学術的にも産業にも重要である。また、ポジトロニウムビームによる新奇物質情報取得、ポジトロニウムを用いたレプトンセクターにおける CP・CPT といった基本的対称性の精密検証、ポジトロニウムエネルギー準位の精密測定、陽電子・電子ペアプラズマなど低エネルギー領域での精密科学的手法による基礎物理学研究の発展も可能になる。

これらの開発を行う中で人材育成を行い、将来のさらなる発展を目指す。さらに量子マルチビーム連携体制を強化して、持続的で社会と接続された研究基盤の構築を目指す。

⑤ 学術的な意義

低速陽電子ビームは様々な研究で利用されている。特に近年の発展は目覚ましい。現時点で最大強度 10 pA 程度の低速陽電子ビームが大強度に進化を遂げれば、物質科学から原子物理学、素粒子物理学、宇宙物理学、プラズマ物理学、量子化学、生命科学等に至る様々な分野に波及する成果を上げることができるようになる。

これらの開発を行う中で人材育成を行い、物質科学、原子物理学、素粒子物理学、加速器科学、放射線科学などの研究者を育て、関連する分野の将来のさらなる発展を目指す。さらに量子マルチビーム連携体制を強化して、より高度な物質研究を目指す。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

日本は、陽電子を用いた物質科学研究、特に金属・半導体の格子欠陥や高分子材料の自由体積研究で世界をリードしている。産業界との共同研究が多いのも特徴で、これは日本陽電子科学会の積極的な情報発信によるものである。新規手法の開発や基礎物理学への展開も先導し、多様な陽電子ビーム施設を開発し続けてきた。本構想は、国内の 20 以上の研究拠点からの支援を受け、これまでの研究環境を基盤に高強度低速陽電子ビームの実現を目指している。本構想が実現すれば、国内外の他分野の研究者からも注目を浴び、低速陽電子ビームの世界の重要拠点としての役割を果たすことになる。

⑦ 社会的価値

陽電子研究は、経済的・産業的価値が大きい。金属・半導体における格子欠陥挙動解析と高分子材料におけるサブナノ空隙解析で特筆すべき貢献をしており、数多くの企業が産業に利用している。ビームの高強度・高輝度化によりマイクロサイズの微小ドメインの回折研究が可能になれば、次世代量子デバイスや先進触媒開発に不可欠な表面原子構造や電子密度分布の情報を提供し、これらの分野への大きな貢献ができる。その結果、SDGs への貢献も期待できる。基礎サイエンスの観点からは、レプトン束縛系の研究の新たな進展や陽電子・電子ペアプラズマの実現など、次世代のノーベル賞の温床になり得る成果が得られ、人類の知的価値を創造することになる。マルチビーム連携によって、これらの価値はさらに高まることが期待できる。

⑧ 実施計画等について

＜実施計画・スケジュール＞

初年度：現状調査、第2年度：概念設計、第3年度：陽電子生成部、ビームラインおよび建屋の設計

第4年度－7年度：各コンポーネント製作・設置、第8年度：試運転、第9年度以降：実験開始

＜実施機関と実施体制＞

本構想に参画するのは、国内の 20 ほどの大学、高エネルギー加速器研究機構、原子力機構、量研機構、分子研、産総研、理研、東レリサーチセンターや日東電工、島津製作所、電力中央研究所等である。それを束ねるのが会員数 140 名の日本陽電子科学会である。外国籍の研究者も在籍している。性別では女性会員が少ないが、大学の研究室で女子学生を増やすなどによって女性会員数を増やすことを検討する。

＜所要経費＞

総経費 120 億円

所要経費：電子加速器ベース低速陽電子ビーム費用 30 億円、原子炉ベース低速陽電子ビーム生成費 30 億円、表面構造解析装置開発 5 億円、他各種装置合計 45 億円、人材育成 5 億円、人件費 5 億円

⑨ 連絡先

長嶋 泰之（日本陽電子科学会）