


スピン偏極陽電子ビームを基軸とする新しいサイエンスの展開

	研究代表者	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先進ビーム利用施設部・上席研究員
	研究課題情報	河裾 厚男 (かわすそ あつお) 研究者番号:20354946 課題番号: 23H05462 研究期間: 2023年度~2027年度 キーワード: 陽電子スピン、物質、生物、宇宙、非対称性

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像 スピン偏極陽電子ビームで観る! 創る! 拓く!

「スピン偏極陽電子ビーム」は、電子の反粒子である陽電子とそのスピンを使った我が国独自の実験技術だ。最大の特徴は、物質中の様々な場所にある電子のスピンを原子レベルの分解能で観測できる点にある。この技術はまた、生物を構成するアミノ酸やDNAには単一の型しか存在しないという謎や、宇宙から反物質が消えて物質だけが残ったという謎を検証する上でも有力とされており、今や物質から生命そして宇宙の研究へと波及しようとしている。その根底には、素粒子・原子・分子・物質さらには宇宙の対称性とその破れに起因する普遍的な原理が流れている。そこで本研究では、スピン偏極陽電子ビームが持つ可能性の下に、異分野の研究者が結集し、物質から生物そして宇宙の成り立ちまでを統一的に俯瞰する新たな学術領域の創出に挑戦する。



図1 本研究課題のイメージ図。

●スピン、カイラリティ、対称性の破れ

スピンとは電子などが持つ極微小の磁気である。カイラリティ(キラリティともいう)とは鏡の映した像が元と同じにならない(例えば右手が左手になる)という幾何学である。そして対称性の破れとは、鏡に映した電荷や時間を逆転すると物理法則が変わる性質である。これらは、超伝導を始め多くの驚異的な現象と関係している他、生物の分子には片方のカイラリティしかないホモキラリという謎、そして宇宙から反物質が消えて非対称になっている謎など、素粒子→原子・分子→物質・生物→地球・宇宙という階層構造を貫く普遍原理ともいえる。

●スピン偏極陽電子が拓く「スピン、カイラリティ、対称性の破れ」の世界

電子スピンの研究には、光や電子を使った多くのツールが開発されてきた。ここで登場する陽電子は、これらとは少し異なっている。陽電子が電子と出会うと、ガンマ線を放出して消える(対消滅)。このガンマ線の本数とエネルギーは、図2に示すように、陽電子と電子のスピン向きで異なる。スピンが揃った陽電子(スピン偏極陽電子)を使うと、電子のスピンひいてはカイラリティや対称性の破れの世界を見渡すことができる。

身近な応用例として、高輝度青色LEDを実現した窒化ガリウム(GaN)に磁性元素(ガドリニウム:Gd)を導入した研究を紹介する。元々磁性を持たないGaNにGdを導入すると強磁性になることが知られているが、その詳しいメカニズムは全く解明されていなかった。スピン偏極陽電子を使った研究から、図に示すようにGdの導入によって空孔の集合体ができ、そこに電子スピンが存在することで強磁性となっていることが初めて解明された。

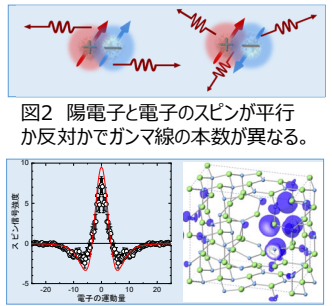


図2 陽電子と電子のスピンが平行か反対かでガンマ線の本数が異なる。図3 (左) Gd添加したGaNからの電子スピン信号強度、(右) その起源である余剰スピンをもつ原子空孔。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●スピン偏極陽電子が魅せる物性物理・化学の世界

①強相関電子系の磁気・構造相転移

3d, 4d遷移金属: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Al, Si, IV族元素: MnSi, MnGe

FeSi 近絶縁体 提案された諸理論 ←未決着 新たな提案 遷延電子磁性理論 原子空孔のスキルミオン相転移への影響 多体効果平均場近似理論 中性フェルミオン

Reiner et al., Sci. Rep. 6(2016)29109

スピン偏極陽電子ビーム

強相関電子系の磁気/構造相転移の新側面を解明

②埋もれた界面の電子スピン

カイラル誘起スピン選択(CISS)効果 直列キラリ分子の多重トンネリング

磁性体-磁性体間にグラフェン, h-BN, TMD を挿入 → 新たなスピンフィルターの可能性

磁性体・磁場下で スピン偏極電子流を生成

キラリ分子を挿入した層状物質の超伝導

Spinning et al., Nature Commun. (2020) 11:5670

スピン偏極陽電子ビーム

界面のクーバー対を捉えられるか? 界面にスピン偏極電子状態はあるか?

③生体分子非対称性の検証

人類の二つの大きな謎

物質優勢な宇宙 生物物質非対称性

ビッグバンでは物質と反物質の鏡像異性体のエネルギー差はないはずだが、生体では一方の鏡像異性体だけが生き残っているだけ... DNAは右巻きだけ

これらは関係しているか?

ベータ崩壊放射線分解 未確認の有力な仮説 スピン偏極電子

地球誕生から数十億年かけて生体アミノ酸の一方の異性体を破壊? スピン偏極陽電子ビーム

宇宙の非対称性が生物に継承しているかを検証

本研究では、スピン偏極陽電子を最も有効に活用できるものとして、物理・化学・生物の3つのサブテーマを進める。まず、強相関電子系や物質界面における新奇スピン現象の解明を目指す。これは将来的に画期的なデバイスの開発に繋がる可能性を持つ。次に生体分子の非対称性については、そのベータ崩壊起源説という40年越しの仮説に決着をつけたいと考えている。これは生物と宇宙の進化が密接不可分であるかを検証するものだ。さらに、将来的に物質優勢宇宙の解明を目指すPs-BEC実現に向けて、高密度・高スピン偏極ポジトロニウム生成技術や第一原理計算手法の高度化などを行う。以上の活動を通じて、物質・生物・宇宙の共通性についての理解を深めていくことを考えている。

●スピン偏極陽電子の将来展開を目指す新たな試み

①ポジトロニウムBECの必須要素技術開発

Ps-BECの実現には高密度・高スピン偏極ポジトロニウムが必須

サイクロトロン 高エネルギー陽子 目標値: 偏極率60% 強度10⁹ e⁺/秒

超伝導磁石 4K 冷凍機

陽電子ビーム

ガンマ線検出器

高強度・高スピン偏極ポジトロニウムを生成

高密度・高スピン偏極ポジトロニウムを生成 →Ps-BEC実現に近づける

②第一原理計算の利活用・高度化

密度汎関数法, 多成分分子軌道法, 多成分分子モンテカルロ法

糖・アミノ酸・DNA・層状物質などに用いる電子-陽電子計算

Probability distribution of electron-positron contact

Delocalized trapped positron

Two-photon annihilation

Electrons in amino acid

Ammonium acid's positronium formation mode

層状物質+分子インターカレーション

陽電子を含む少数多体系の精密計算

Ps-BEC過程の理論シミュレーションに挑戦

Ps二重体・三重体→Ps二重体・Ps三重体のポテンシャルの導出

大規模化でPs多体系の基底状態→Ps-BEC生成過程の予測

Ps-BECエネルギー分布