

領域代表者	広島大学・大学院先進理工系科学研究科・教授
	鬼丸 孝博（おにまる たかひろ） 研究者番号:50444708
研究領域情報	領域番号：23A202 キーワード：非対称性、量子物質、交差相関、多極子、スケールシームレス
	研究期間：2023年度～2027年度

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

本研究領域では、固体中の電子系における非対称性、「アシンメトリ」によって生じる交差相関などの電気磁気効果を、電子の電荷とスピンの空間的な分布を表す量子である「多極子」の概念を用いて理解し、革新的な機能物性を開拓する。近年飛躍的な進歩を遂げている放射光や中性子などの量子ビームと最先端の精密測定手法を駆使して、多極子の秩序を可視化する。また、外場に対する応答を表す感受率を定量的に評価することで、多彩な交差相関を理解する。これらの知見を生かして、交差相関のメカニズムを記述する理論モデルを構築し、新機能を有する物質を設計する。そして、得られた指針のもとに、新たな量子物質を創出する。そこで明らかになった新機能を、分子クラスターや人工物質へと広く適用し、次世代の物質科学の変革に導くとともに、「アシンメトリクス」の学理の構築を目指す。

●新たな交差相関の予言

固体結晶では、電子状態の非対称性、「アシンメトリ」こそが、多種多様な機能物性を生み出す源である。例えば、空間の反転対称性が破れると電気分極が生じて強誘電性が現れ、時間の反転対称性が破れることで電子のスピンの強磁性（磁石）を生み出す。さらに、空間と時間の両方の対称性が破れると、電気と磁気が絡み合った「交差相関」と呼ばれる機能が現れる。

最近の研究によると、この交差相関という機能は、電子の電荷とスピンを空間的に分布した1つの量子とみなすことで、簡潔に整理できることが分かってきた。この量子は「多極子」と呼ばれ、近年その理解が急速に進み、適用領域が広がってきた便利な概念である。例えば、図2の左図のように、空間反転対称性があると、磁場による磁化などの対角応答が現れるのみである。一方、右図の空間反転対称性が破れたアシンメトリ状態では、外場に対して高次の奇パリティの多極子が結合できるため、電流や電場によって磁化や応力、格子回転などの非対角応答による交差相関が現れる。ここで多極子を使うメリットは、従来のマルチフェロイクスで考慮されてきた「時間・空間の反転対称性」にとどまらず、「鏡映・回転対称性」などの結晶の対称性に付随する自由度を取り込めることである。これにより、新たな交差相関の機能を制限なしに開拓できるようになり、物質科学に大きなブレークスルーをもたらす。

本研究領域では、アシンメトリによって生じる電子系の複合自由度である多極子が躍動し、機能物性を生み出す物質を「アシンメトリ量子物質」と名付ける。量子ビーム計測、微細精密加工、精密マクロ計測、計算およびデータ物質科学、物質合成を組み合わせ、「可視化」、「設計」、「創出」の研究を推進する。



図1 本研究領域の構成。アシンメトリ量子物質を「可視化・設計・創出」する。

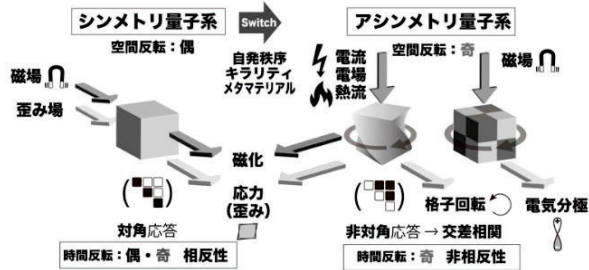


図2 空間反転対称のあるシンメトリ量子系(左)では、外場に対する対角応答、たとえば磁場による磁化のみが現れる。一方、空間反転対称の破れたアシンメトリ量子系(右)では、外場に対する非対角応答によって多彩な交差相関の発現が期待される。

●アシンメトリ量子物質 × 微細加工技術

アシンメトリ量子物質の電子系の秩序に伴って現れる異方性を、外場に対する感受率として測定し、交差相関を通じた制御と新機能を開拓する。一方、感受率などの応答は、単一ドメイン化と高い電流密度によって増大することが期待される。そこで、半導体業界で活用されている収束イオンビーム (FIB) を使った微細加工を、物性研究に応用する。図3のように、1ミクロンオーダーで加工した試料を用意し、精密計測技術を用いて、秩序の形成に伴うドメイン形成や非相反伝導、非線形応答などの物性を捉える。これらの知見は、未解明であった物性に新たな理解を与え、革新的な新物質機能の創出につながる。

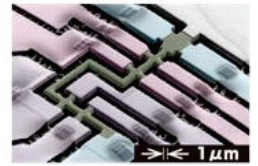


図3 磁場中で伝導特性を測るために FIB で微細加工し、電極を付した希土類化合物の単結晶試料。単ドメイン化による機能向上を実現する。

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

●アシンメトリ量子物質の秩序と揺らぎを「可視化」し、その知見をもとに新物質を「設計」し、「創出」する。

本研究領域では、アシンメトリによって生じる電子系の複合自由度である多極子が躍動し、機能物性を生み出すアシンメトリ量子物質に着目する。量子ビーム計測、微細精密加工、精密マクロ計測、計算およびデータ物質科学、物質合成を組み合わせ、図4に示すように、「可視化」、「設計」、「創出」に関する研究を推進する。そして、それらを相互に連動させることによって、広い分野にわたる次世代の物質科学を創成する。

- (1) アシンメトリ量子物質の秩序と揺らぎを、高い空間・エネルギー分解能をもつ量子ビームにより観測し、電子状態のミクロな解析によって可視化する。(計画研究A01)
- (2) 微細加工技術と精密物性測定によって、交差相関の感受率と機能性を定量的に評価し、高出力・超高速な交差応答を示す革新的な機能を開拓する。(計画研究 A02)
- (3) アシンメトリ量子物質の機能物性を記述する有効理論モデルを確立し、マテリアルズ・インフォマティクスを活用して新物質を設計する。(計画研究 B01)
- (4) アシンメトリ量子物質としての機能を発現するのに適した結晶の対称性に着目して対象物質を絞り込み、系統的な物質合成によって先駆的な機能物性を開発する。計画研究C01では、ユニークな物質合成技術を駆使して系統的に探索し、計画研究C02では広い空間スケールに展開して開拓する。

これらの研究により、アシンメトリを活かした新たな交差相関を開拓し、これまでになく機能を実現する量子物質を開発することによって、「物質科学の学術変革」へと導く。そして、物質科学のブレークスルーにつながる「アシンメトリクス」の学理を構築する。

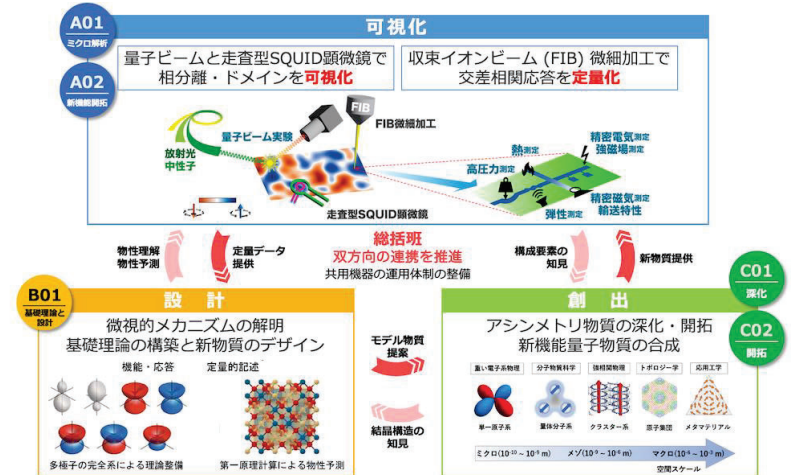


図4 研究領域を構成する計画研究とそれらの綿密な相互連携。

