

【学術変革領域研究 (B)】

エニオンの動的制御による情報技術の開拓

研究代表者	東京大学・物性研究所・准教授	
	橋坂 昌幸 (はしわか まさゆき)	研究者番号：80550649
研究課題 情報	課題番号：24B203	研究期間：2024年度～2026年度
	キーワード：エニオン、量子統計、分数量子ホール効果、トポロジカル量子計算	

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

従来のコンピュータの限界を超えた高速情報処理の実現に向けて、量子コンピュータ開発が強力に推進されている。量子コンピュータの物理的な構成要素である量子ビットは、環境との相互作用によって量子情報を失い、計算のエラーを発生させる。このエラー訂正の困難さが、量子コンピュータ開発のボトルネックとなっている。この問題を克服する技術として、原理的なエラー耐性を持つトポロジカル量子計算の重要性が広く認識されている。トポロジカル量子計算の実現に向けて起点となるのが、エニオンと呼ばれる準粒子 (粒子として取り扱うことができる素励起) を操作する技術である。

3次元空間の粒子は、必ずボース粒子、またはフェルミ粒子のいずれかに分類される。一方、半導体界面などで生じる2次元電子系では、この常識を覆す準粒子 (エニオン) が存在する場合がある。エニオンの特徴は、2粒子の位置を交換した状態が、元の状態と量子力学的に区別されることである。エニオンを量子力学的な紐と見立てると、位置交換は2本の紐を絡み合わせる操作に相当し、組み紐操作 (プレーディング) と呼ばれる。紐が絡んだ状態と絡んでいない状態を「1」「0」とみなすことで、プレーディングに基づく量子計算 (トポロジカル量子計算) が可能と考えられている。絡み合い状態は紐をほく操作を行わない限り情報を失わないため、トポロジカル量子計算はエラーに対し耐性を持つ。

物性物理学分野では、様々な物質においてエニオンを探索する研究が活発に行われてきた。ところが従来の研究はエニオンの観測にとどまっておき、組み紐操作によってトポロジカル量子コンピュータを構築するための現実的なビジョンは存在しない。本領域研究では、エニオンを発現する代表的な試料である分数量子ホール系を用い、組み紐操作のためのエニオンの動的制御技術を開拓する。この研究を通してトポロジカル量子コンピュータ構築のビジョンを示し、次世代情報技術研究分野の創出を目指す。

トポロジカル量子コンピュータ科学

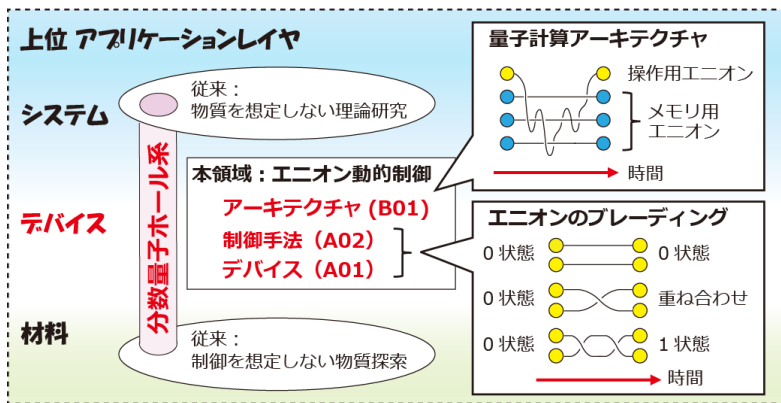


図1 本領域の全体像。これまでのトポロジカル量子コンピュータ研究分野では、主に物質を想定しないシステムの理論研究、およびエニオンの操作を想定しない物質材料科学の研究が行われてきた。本領域は分数量子ホール系を対象とするデバイスレイヤの研究に取り組み、システムレイヤと材料レイヤの従来の研究成果を結び付け、トポロジカル量子コンピュータ構築に向けたビジョンを示すことを目的とする。

●エニオンのプレーディング

2次元系に2つのエニオンを準備し、一方のエニオンが他方のエニオンの周りを周回するように運動すると、周回運動の前 (0状態) と後 (1状態) の状態が量子力学的に異なる。この周回運動におけるエニオンの軌跡 (図2の青線と緑線) が絡み合う紐のように見えるため、これを組み紐操作 (プレーディング) と呼ぶ。

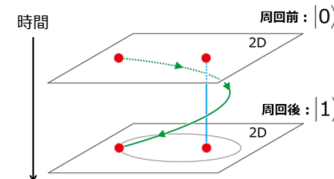


図2 エニオンのプレーディング

●エニオンの動的制御

プレーディングを実現するためには、エニオンの2次元平面内での運動を自由自在に制御する技術が必要である。分数量子ホール系で生じるエニオンは電荷を帯びており、電氣的にその運動を制御できるため、制御技術研究にとって最適な対象といえる。本領域では、実験チーム (計画班A01およびA02) がエニオンの運動を制御するためのデバイス構造と高速電気制御技術の研究に取り組む。理論チーム (計画班B01) は実験チームが検討する技術をベースとして、計算機として動作するアーキテクチャの検討に取り組む。

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

●領域全体の目標

トポロジカル量子コンピュータの構築に向けて、数学・物理学・工学・情報学などの伝統的な学問の枠組みを超えた学際的な研究を推進し、コンピュータを構成する材料・デバイス・システムなどレイヤを跨いで技術革新を達成していく、新しい研究領域「トポロジカル量子コンピュータ科学」の創成を目指す。

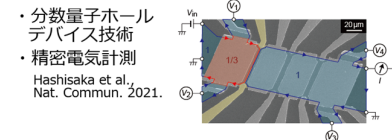
●領域目標の達成に向けた課題

トポロジカル量子コンピュータ構築のビジョンを示すには、(1)エニオンのプレーディングによる量子状態の変化を実証すること、(2)プレーディングをオンデマンドに実行するための基本デバイスを作製すること、(3)プレーディングを高速に実行する制御技術を確立すること、(4)実際の制御技術の特徴や制限を踏まえてアーキテクチャを設計すること、という4つの課題をクリアする必要がある。最近、分数量子ホール系のエニオンについて(1)の実証実験が行われ、エニオン研究は世界的な盛り上がりを見せている。本領域では、3つの計画班がそれぞれ残る3つの課題の達成を目指す。

計画班A01 「プレーディングデバイスの原理検証」

橋坂 昌幸 (東京大学), 藤澤 利正 (東京工業大学)

量子ホールエッジ状態によるエニオン伝送や量子アンチドットを利用したエニオンのトラップ技術を利用して、プレーディングを実行するための基本デバイスの作製に取り組む。計画班A02との連携によるデバイス動作の高速化、計画班B02との連携による小規模アーキテクチャの試作にも挑戦する。



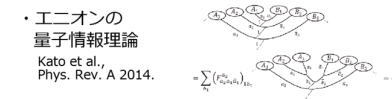
・分数量子ホールデバイス技術
・精密電気計測
Hashisaka et al., Nat. Commun. 2021.

・超高速光電変換技術
・THz エレクトロニクス
Yoshioka et al., Nat. Photonics. 2022.

計画班A02 吉岡 克将 (NTT物性科学基礎研究所)

「超高速信号処理に向けたTHzエレクトロニクスの開拓」

光信号からTHz帯のオンチップ電気信号を生成し、この電気信号による超高速エニオン制御を実現する、THzエレクトロニクスを開拓する。



・エニオンの量子情報理論
Kato et al., Phys. Rev. A 2014.

計画班B01 加藤 晃太郎 (名古屋大学)

「トポロジカル量子計算機アーキテクチャの理論的研究」

分数量子ホール系のエニオン制御技術の特徴を踏まえたトポロジカル量子計算機の理論研究を行う。特に、量子誤り訂正符号の開発と評価や、大規模な計算機実現に向けたアーキテクチャの提案に取り組む。

図3 各計画班メンバーの強み。各メンバーの独自技術を組み合わせることで、エニオンの動的制御による情報技術の開拓に挑む。半導体デバイス作製・制御技術の向上、超高速エレクトロニクスの開拓など、有意義なスピノフ技術の創出も狙う。