

解禁時間(テレビ、ラジオ、web) : 3月 1日(金)午後 2時(日本時間)
(新聞) : 3月 2日(金)付 朝刊



+

「高次トポロジカル状態による電子の伝導制御の機構の提案」 -超低消費電力の新しい電子・光デバイスの設計応用に期待-

関西学院大学
KWANSEI GAKUIN UNIVERSITY

報道各位

関西学院広報室

関西学院大学工学部の若林克法教授と Feng Liu 博士(JSPS 外国人特別研究員), 英国 Exeter 大学の Hai-Yao Deng 博士(Associate Research Fellow)は、高次のトポロジカル状態における、新しい電子伝導の制御機構を提案いたしました。高次のトポロジカル状態をもつ物質では、エッジに沿って電流が散逸をせずに完全に伝導する機構があるだけでなく、その逆の極限である、電子をコーナーに強く局在させる機構も併存させることが可能であることを、提案いたしました。また、今回の提案では、スピン軌道相互作用を必要としないため、従来のトポロジカル物質とは異なった、新しいトポロジカル物質を設計する指針も与えています。この研究成果は3月1日に物理学で最も権威のある学術誌「Physical Review Letters」に掲載されます。本研究は一部、文部科学省科学研究費補助金の援助を受けています。

ポイント

- ・ 高次のトポロジカル状態において、エッジに沿って電流が散逸をせずに完全に伝導する機構があるだけでなく、その逆の極限である、電子をコーナーに強く局在させる機構も併存させることが可能であることを見出しました。
- ・ スピン軌道相互作用を導入せずに、高次のトポロジカル状態を実現する理論的な枠組みを提示しました。
- ・ 散乱を受けにくい電流が表面やエッジで流れるため、超低消費電力の光・電子デバイスや量子計算素子への応用が期待されます。また、コーナー状態を利用することで、光や電子を空間的に閉じ込める量子ドットや光共振器を設計することが可能になります。

1. 研究の背景

近年、電子エネルギーバンド構造の位相幾何学(トポロジー)的な性質から、電子材料を区別し、新しい電子相を有する物質を探索する研究が、世界中で爆発的に行われています。特に、トポロジカル絶縁体と呼ばれる物質では、物質の表面やエッジなどの境界面において、無散逸なスピンの流が現れることが知られています。この特性を利用することで、超低消費電力の電子デバイスや量子計算素子への応用が期待されています。

従来から知られているトポロジカル絶縁体では、スピン軌道相互作用が重要な役割を果たしています。本研究グループでは、スピン軌道相互作用を導入せずに、高次のトポロジカル状態を実現する物質群の理論設計指針を提示しました。さらに、エッジに沿って電流が散逸をせずに完全に伝導する機構があるだけでなく、その逆の極限である電子をコーナーに強く局在させる機構も併存させることが可能であることを見出しました。今回の成果を用いることで、超低消費電力で光や電子を伝搬させる光・電子デバイスへの応用へと期待されます。また、コーナー状態を利用することで、光や電子を空間的に閉じ込める量子ドットや光共振器を設計することが可能になります。

2. 研究内容と成果

本研究では、最近節格子間の電子ホッピングエネルギーが空間的に異なる六角格子を、理論模型の出発点として考えました。図1がトポロジカル状態を示す2次元六角格子の模式図です。薄い黄色のひし形の領域は単位胞を意味し、2次元の最小構成単位になっています。単位胞内部での電子ホッピングエネルギー(γ)を青色の実線、単位胞間同士での電子ホッピングエネルギー(γ')をオレンジ色の実線として表しています。本研究では、ザック位相とよばれるトポロジカル量を解析することで、この系には、トポロジカルエッジ状態とコーナー状態が出現することを示しました。

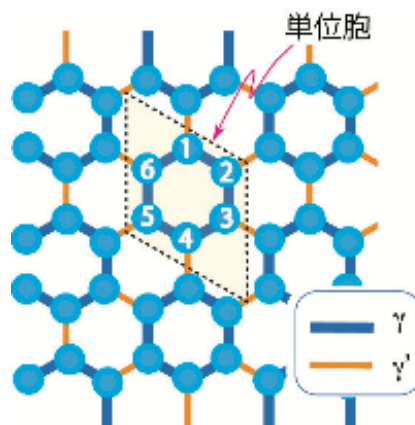


図1：トポロジカル状態を示す2次元六角格子の模式図。最近接格子点の実線で結ばれており、破線のひし形は単位胞を表しています。また、単位胞内部での電子ホッピングエネルギー(γ)を太線、単位胞間同士(γ')での電子ホッピングエネルギーを青色の実線として表しています。単位胞間のホッピングエネルギー γ' の大きさが、 γ の大きさより大きい場合に、トポロジカル状態が実現する。

単位胞間のホッピングエネルギー(γ')を徐々に小さくしていくことで、電子状態が変化し、 $|\gamma| < |\gamma'|$ となると、トポロジカル状態が出現します。図2(a)に示すようなリボン構造の電子状態を考えると、 $|\gamma| < |\gamma'|$ の条件下では、図2(b)に示すような電子エネルギーバンド構造が得られます。青線と赤線で示すような、新しいエネルギー分散がバンドギャップ内部に現れます。これらのエネルギー分散を担う電子の状態は、エッジ付近にのみ振幅をもっており、電流はエッジのみを伝って流れます。このようなエッジが担う電流は、不純物や欠陥による電子散乱を受けにくいため、極めて高い電子伝導性の起源となり、超低消費電力で光や電子を伝搬させる光・電子デバイスへの応用が期待されます。

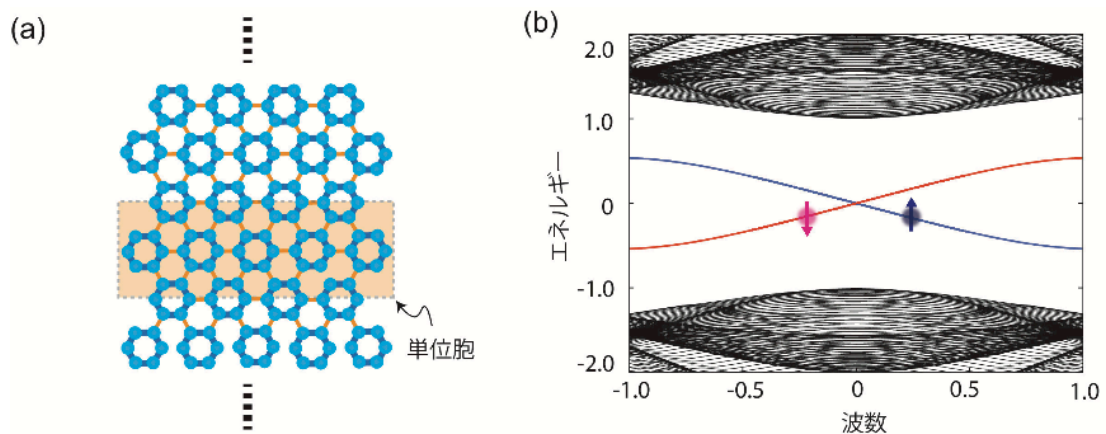


図2: (a) リボン構造にした六角格子模型の構造。のエネルギー分散関係。(b) $|\gamma| < |\gamma'|$ での電子バンド構造。ギャップ内部にエッジ状態に起因するエネルギー分散（青線と赤線）が現れる。そこでは、電子はエッジに沿って、無散逸の電子伝導を実現する。

次に、図3(a)に示すように、有限サイズの構造を考えます。すると、図3(b)に示すように、電子は試料のコーナー部分に強く局在を起し、コーナー状態が実現することがわかります。この性質を用いると、電子や光を空間のある一部分に閉じ込めることが可能になります。この結果を用いることで、光や電子を空間的に閉じ込める量子ドットや光共振器を設計することが可能になります。

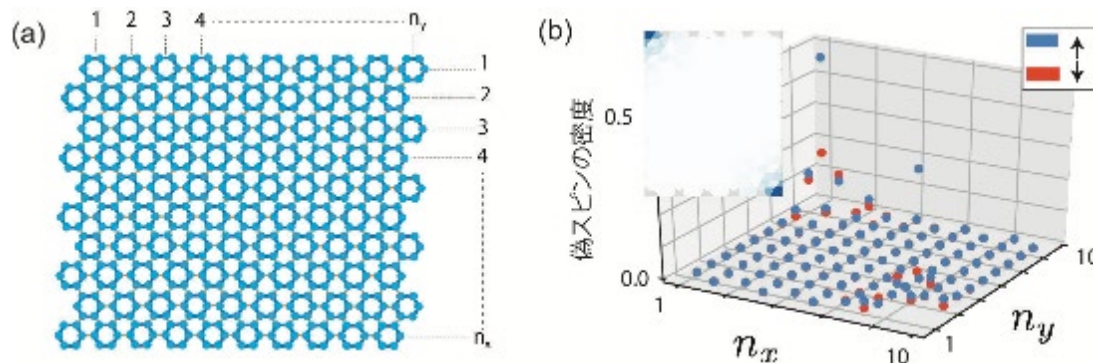


図 3: (a) 有限系にした六角格子模型の構造。(b) 偽スピンの空間分布。左上は、電子の空間分布。コーナーに電子が強く局在している様子がわかる。

3. 今後の展開

本研究成果によって、高次のトポロジカル状態をもつ物質では、エッジに沿って電流が散逸をせずに完全に伝導する機構があるだけでなく、その逆の極限である電子をコーナーに強く局在させる機構も併存させることが可能であることが明らかになりました。本研究で明らかになった原理は、広く 2次元の電子材料に適用できます。さらに、スピン軌道相互作用を必要としないため、フォトニック結晶に対しても適用可能です。今後、この理論指針にしたがった物質設計およびデバイス設計が期待されます。

【論文タイトル】

原題: Helical topological edge states in a quadrupole phase

【タイトル和訳】

四重極相におけるヘリカルトポロジカルエッジ状態

【著者名】

Feng Liu, Hai-Yao Deng, Katsunori Wakabayashi

【用語解説】

注 1) トポロジカル絶縁体

物質がどのような電子物性を示すのかは、物質中の電子の波動関数の振る舞いによって決まります。近年の理論研究から、波動関数の幾何学的（トポロジカル）位相によって、電子物性が分類できることが分かってきています。トポロジカル絶縁体では、電子の波動関数が特異なトポロジカル位相をもつことで、結晶内部では普通の絶縁体と変わらないが、

エッジや表面では散乱されない電流やスピン流が流れている状態をもちます。

注2) スピン流

電子には、電荷の他にスピンと呼ばれる角運動量をもちます。スピンは、電子の自転運動と解釈できます。電荷の流れである電流と対比して、電子スピンの流れをスピン流とよびます。

注3) 格子間のホッピングエネルギー

結晶中では電子は原子核にクーロン引力によって束縛されているが、隣接する原子にある一定の確率で遷移（ホッピング）することが可能である。この現象を理論的に記述するモデルは、強束縛モデルとよばれている。電子のホッピングに伴って、運動エネルギーの分だけ、電子系にはエネルギーの利得が生じます。ホッピングエネルギーは、隣接する原子への電子の遷移のしやすさをエネルギーの単位で表した量。

注4) スピン軌道相互作用

電子は、原子核の周りを公転しています。特殊相対論の効果を考えると、電子の位置の変化（軌道自由度）とスピンの間に相互作用が生じることが知られています。これをスピン軌道相互作用と呼び、トポロジカル絶縁体などの新奇な量子状態を実現するうえでも重要な役割を果たします。

注5) ザック位相

結晶運動量空間において、位相幾何学的に導かれる磁場が、ベリー曲率。結晶運動量空間において、位相幾何学的に導かれるベクトルポテンシャルが、ベリー接続。ベリー接続を結晶運動量について積分したものをザック位相と呼び、物質内部の分極の大きさを表す。

【問い合わせ先】

■ 関西学院大学 理工学部 先進エネルギーナノ工学科

若林 克法 教授 waka@kwansei.ac.jp

研究室 079-565-9751

あるいは、関西学院広報室（0798-54-6873＝報道対応専用）にお願いいたします。