NIMS

新規トポロジカル物性 現象と量子機能を発見

スピントロニクスにも役立ち

物質・材料研究機構（NIMS）国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（WPI-MANA）の吉月暁主任研究者、梁奇鋒MANAリサーチアソシエイト、呉龍華NIMSジュニア研究員らのグループはこのほど、室温を超える高温でもゼロ抵抗電流を運ぶことができる物質の設計に成功した。この物質は大きなスピン軌道相互作用を持ち、スピン偏極したエッジ電子状態に特徴づけられる新しいトポロジカル状態を示す。スピン偏極は磁場調整で制御可能であり、スピントロニクスにも役立つ。

現在のパソコンには主に半導体技術が使われている。1回の演算にはおよそ10万個程度の電子を狭い集積回路の中で早く駆動する必要があり、それに伴い大きな発熱が生じ、エネルギーの消費につながる。小型化が進めば発熱問題はより深刻になるため、新しいテクノロジーの開発が喫緊の課題となっている。

トポロジカル絶縁体と呼ばれる量子状態の発見は、この分野で大きなブレークスルーをもたらす可能性を秘めている。この新規量子状態では、スピン軌道相互作用が重要な役割を果たし、電子の波動関数は、普通の半導体とは異なるトポロジカルな性質を示す。その結果、サンプルのバルク部分は絶縁体として振る舞うが、サンプルのエッジに量子化された状態が現れ、抵抗のない電流を運ぶことができる。

この量子状態を示す新規物質の探索は、物性物理と物質科学の新たなフロンティアとなっているが、これまで極低温でしか実現されていない。また、エッジ電流の中で上向きと下向きのスピンを持つ電子が存在し、このままではスピントロニクスに応用できない。

研究グループは今回、蜂の巣構造を持つ層状物質に着目した。蜂の巣は6角形であり、正方形や3角形と同じように、あるユニットの繰り返しで平面を埋め尽くすことができるが、結晶学的には極めてユニークである。つまり、蜂の巣格子には等価ではない2つの副格子が存在する。そのため、その上で動く電子は普通の固体中の電子とは異なる振る舞いを示す。

とくに、フェルミエネルギー近傍では、エネルギーと運動量の関係が線形的になり、見かけ上質量のない、相対論に従うディラック電子になっている。この線形形状のためディラック・コーンと呼ばれる分散関係から派生する特異な電子物性はグラフェンの発見で脚光を浴び、2010年のGeim、Novoselov両博士のノーベル物理学賞につながった。

光が円偏光を持つのと同じように、ディラック電子はカイラリティという特性を持っている。蜂の巣格子上では、2つの異なるディラック・コーン（谷とも呼ばれる）の周りの電子は正と負のカイラリティを示すことが判明している。普通の状態では、2つのカイラリティが相殺してしまい、マクロなスケールではっきりとその効果を観測することができないが、何らかの方法で谷を操作して、カイラリティを揃えることができれば、電子の波動関数が系全体にわたってメビウスの帯のようにねじれた構造をとり、トポロジカル状態になる。揃い方には数通りの可能性があり、05年に発見された量子スピンホール効果はその一例になっている。

同グループは、ペロブスカイト金属酸化物が示すバックルした蜂の巣構造を巧みに利用して、スピン軌道相互作用、反強磁性交換場、および交代電気ポテンシャルという3つの"外場"による、電子の副格子、谷とスピンという3つの自由度の操作を考案した。その結果、量子スピンホール効果とは異なるカイラリティの揃い方が実現され、強靭なトポロジカル状態の設計に成功した。

この新しい量子状態にある物質はサンプルのバルク部分では絶縁的であるが、エッジにスピンが揃った縁状態が現れ、抵抗のない電流を運ぶことができる。エッジ電流のスピンの向きは、磁場ではなくて、電場で逆転することが可能である。興味深いことに、この物質全体の磁化はゼロになっている。フェルミエネルギー近傍に他の状態がないため、電子の散乱が強く抑制され、欠陥や有限温度による揺らぎからの影響を受けにくく、極めて安定な電流輸送が可能である。

このような理論的指針の下、物質設計も行われた。例えば、分子線エピタキシー法を用いて、ペロブスカイト構造を持つ反強磁性モット絶縁体$LaCrO_3$を結晶「111」方向に成長させ、その上に$La_2Au_2O_6$を1原子層挿入した後に、また$LaCrO_3$のバルクを成長させて、サンドイッチ構造をつくる。バックルした蜂の巣構造により交代電気ポテンシャルが生じ、理論モデルで要求されている3つの外場が得られる。

第一原理計算の結果、反強磁性交換場とスピン軌道相互作用によって、谷のところでエネルギーギャップが開くことが示された。この結果から、温度に換算して600Kにあたる、大きなトポロジカルなエネルギーギャップが見積もられ、室温を超える高温でも機能する強靭なトポロジカル状態を実現できることが明らかになった。

さらに、金原子のd電子はペロブスカイト結晶の「111」面で動くため、原子軌道の混成が起き、大きなスピン軌道相互作用が生まれる。この状態で「111」方向に電場をかければ、バックルした蜂の巣構造により交代電気ポテンシャルが生じ、理論モデルで要求されている3つの外場が得られる。

第一原理計算の結果、反強磁性交換場とスピン軌道相互作用によって、谷のところでエネルギーギャップが開くことが示された。この結果から、温度に換算して600Kにあたる、大きなトポロジカルなエネルギーギャップが見積もられ、室温を超える高温でも機能する強靭なトポロジカル状態を実現できることが明らかになった。

再転載禁止

科学新聞 4面
2013年7月26日(金)