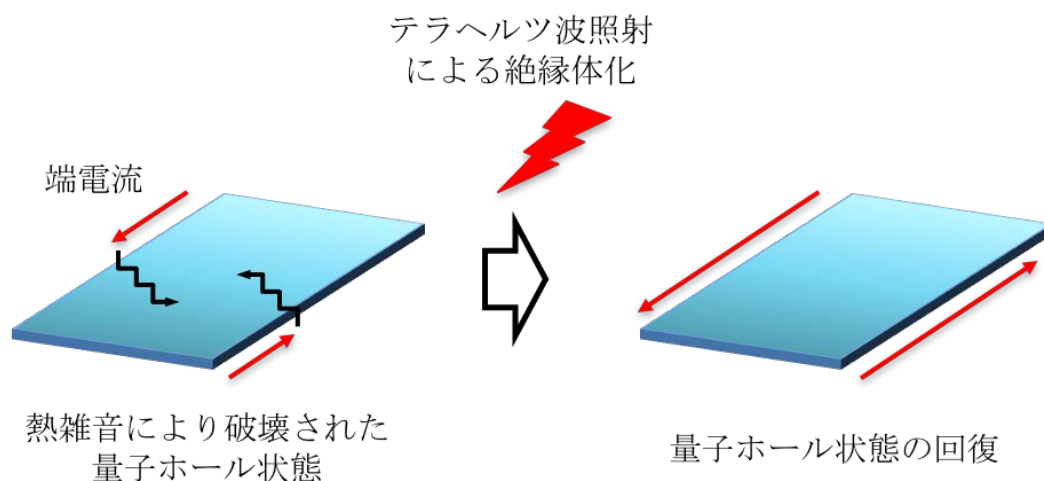


物質のトポロジカルな性質を光で引き出す —光で電気伝導特性を制御し量子ホール状態を復元—

概要

量子ホール効果とは、電子を平面に閉じ込めた2次元電子系物質のホール伝導率¹が物理定数で決まる値の整数倍に量子化される現象²のことで、物理現象として重要であるとともに電気抵抗標準として利用されています。この現象の鍵となるのは物質の絶縁性であり、良い絶縁体であればその物質の端のみに伝導状態が生まれることで理想的な量子ホール状態を観察できます。このように物質の端や表面でのみ伝導状態が見られる物質はトポロジカル絶縁体と呼ばれ、省電力電子デバイスやスピントロニクス、量子コンピュータ等への応用が見込まれる新たな物質群として近年盛んに研究が行われています。有川敬京都大学大学院理学研究科助教らは、光吸収により量子ホール系物質の絶縁性が改善されることを発見し、光による量子ホール状態の制御を実現しました。量子ホール状態のような本来物質が備え持つトポロジカルな性質は、多くの場合電子の不規則な動きによるノイズなどによって見えなくなってしまう。この発見は、トポロジカルな性質を光によって引き出すことを可能にしたもので、物質のトポロジカルな性質の光制御への第一歩であると言えます。

本成果は英国 Nature Publishing Group の発行する *Nature Physics* のオンライン版に平成29年4月4日（日本時間）に掲載されました。本研究は、本学理学研究科の有川敬助教・田中耕一郎教授のグループと、広島大学の角屋豊教授との共同研究です。



¹ 平面に垂直な磁場がかかった状態で、かけた電場に垂直な方向に流れる電流の大きさを表す物理量。

² より正確には整数量子ホール効果と呼ばれ、その実験的発見及び理論的研究に対してそれぞれ1985年、2016年にノーベル物理学賞が与えられた。

1. 背景

量子ホール効果は物理学の歴史上非常に重要な現象です。その驚くべき特徴は、物質の種類によらずホール伝導率が非常に正確に普遍的な値³をとることです。この普遍性は量子ホール効果発見当時の物理学では理解できず、後にトポロジーの概念の導入につながりました。

トポロジーとは、物の形状の特徴を数字で分類する学問です。例えば、我々はドーナツとマグカップを別物と考えますが、両者とも一つの穴を持つという意味でトポロジカルには同じ物に分類されます。この例における穴の数のように、形を連続的に変形しても変わらない整数値（トポロジカル不変量）で物を分類します。この考え方を物質の電子状態に適用することで、量子ホール系のホール伝導率がトポロジカル不変量で決まることが分かっています。従って、ドーナツとマグカップのように一見別の物質でも、トポロジカル不変量が同じであれば普遍的なホール伝導率を示すことが理解されています。

ところが、この不思議なトポロジカルな性質は物質の絶縁性が低いと消失してしまいます。従って、いかに物質の絶縁性を高めるかが重要です。量子ホール系の場合はこれまで、より良質な結晶を作成し、極低温で高磁場をかけることで絶縁性を高めていました。これは電子の平衡状態に限れば絶縁性を高める唯一の方法です。今回の実験で確かめた、光を照射し非平衡な電子状態を利用して絶縁性を高めるという手法はこれまで考案されてきませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究グループは典型的な量子ホール効果を示すヒ化ガリウム（GaAs）の2次元電子系に対して光でエネルギーを与え（以下、光励起）、電気伝導特性がどのように変化するかを調べました。実験開始時点での試料の温度と用いた磁場の強さでは平衡状態における絶縁性は低く、量子ホール効果が消失しかかっている状況を作ったうえで実験を行いました。特定の電子状態を作り出すため、光励起にはテラヘルツ波と呼ばれる 10^{12} Hz 程度の振動数を持つパルス光を用いています。その結果が図1上のグラフです。横軸の遅延時間 0 の位置で瞬間的にテラヘルツ波による励起が行われ、電気伝導率が一旦上昇した後減少し物質の絶縁性が増していることがわかります。また、下のグラフを見ると絶縁性が増している時間領域でホール抵抗率（ホール伝導率の逆数）が普遍的な量子化値に近づいていることがわかります。これは、絶縁性の改善によりトポロジカルな性質が回復していることを表しています。本研究グループは様々な条件下でこの現象を詳しく調べることで、テラヘルツ波照射により絶縁性が増すメカニズムも明らかにしました。

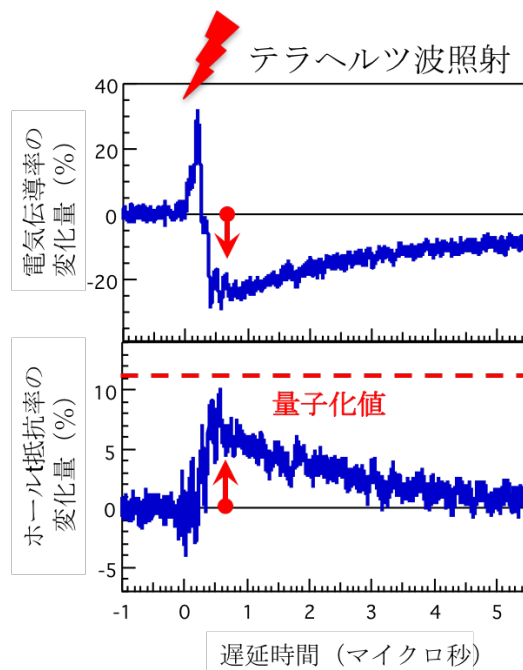


図1 テラヘルツ波照射による電気伝導率の変化とホール抵抗率の変化。上のグラフの電気伝導率が減少している間、下のグラフのホール抵抗率が量子化値に戻る様子が観測されている。

³ 素電荷 e 、プランク定数 h 、及び正の整数 n を用いて ne^2/h というシンプルな式で求められる。

この成果は以下の二つの点で重要な意義を持ちます。一つ目は、光照射後の非平衡状態でも絶縁性が良ければ物質のトポロジカルな性質が現れることを初めて実験的に示した点です。これまで、物質のトポロジカルな性質の研究は主に平衡状態で行われてきましたが、本成果はそれを非平衡状態にまで拡大するものであります。二つ目の点は、光吸収による絶縁性の増加という直感に反する現象が観測されたことです。光はエネルギーを持っているため、物質が光を吸収すると温度が上昇し、熱運動による乱雑な状態になるのが普通です。本結果は、量子ホール系においては光吸収によって電子の流れが止まり、絶縁性が増すという常識とは真逆の現象と言えます。

3. 波及効果、今後の予定

本研究により、量子ホール系物質のトポロジカルな性質が光によって制御できることが示されました。これをきっかけに、光照射によって作られた非平衡状態にまでトポロジカルな性質の研究が拡大することが期待されます。今後は、量子ホール系以外のトポロジカル絶縁体でも非平衡状態でトポロジカルな性質が現れるかを調べる事が重要になります。非平衡状態を含めたより広い物質状態を利用することで、将来のトポロジカル物質を用いた応用のさらなる広がりが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

この研究は以下のプロジェクトによる支援を受けて行われました。

- ・日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究 (A)「超高強度テラヘルツ電磁場による半導体電子状態の動的制御」(JSPS KAKENHI Grant Number 26247052)
- ・科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「高強度テラヘルツ光による究極的分光技術開拓と物性物理学への展開」

<論文タイトルと著者>

タイトル : Light-induced electron localization in a quantum Hall system

著者 : Takashi Arikawa, Katsuya Hyodo, Yutaka Kadoya, Koichiro Tanaka

掲載誌 : *Nature Physics*

DOI: 10.1038/nphys4078