

光渦照射による量子ホール電子系の伝導度変化 ～カイラリティを持つ光と電子状態との相互作用を探る～

矢ヶ崎 慶、音 賢一、三野 弘文
千葉大学大学院理学研究科物理学コース

Transport Properties of Quantum Hall Electron System under Optical Vortex Irradiation

～Interactions between light and electrons with the chirality～

K. Yagasaki, K. Oto, H. Mino

Department of Physics, Graduate School of Science, Chiba University

We have studied the electron transport in a GaAs quantum well in the quantum Hall regime under the optical vortex irradiation. The resistance change by the vortex beam was observed only at the sample edge, where the chiral edge states exist. The influence of topological charge of the vortex beam and the hysteresis behavior on the magneto-resistance have been reported.

1. はじめに

らせん状の等位相面をもつ光渦は、中心軸に電場ゼロの特異点を有し、その周りの放射状電場や中心軸を周回する方向の回転電場が発生するカイラリティを持った光であり、光の軌道角運動量を有する特異な電磁波である。このため、光渦が半導体に吸収されたときに生じる励起電子の状態は、平面波で近似される通常の光励起によるものとは異なる性質を持つ可能性があり、様々な研究が行われている。光渦と物質の相互作用の例として、半導体中の励起子への軌道角運動量転写 [1]、微粒子の回転マニピュレーション [2]、光渦アブレーションによるキララらせん構造体の生成 [3] などの

興味深い実験結果が報告されている。

光渦による電子励起において、光渦の持つ角運動量が電子系に与える影響については未解明な点が多い。特に、電子系自身がカイラリティを持つ量子ホール系に対して、光渦による電子励起では、その物性に光渦の特性が強く反映することが期待される。

量子ホール電子系は、2次元電子系に強磁場を印加することによりスピン分離したランダウ準位を形成する。このとき、ランダウ準位の指数により電子系の軌道角運動量やスピン角運動量は決まっている。また、量子ホール状態にある2次元電子系の端に沿った1次元のカイラルな電子状態である「エッジ状態」は、加えられた磁場の向きにより試料端に沿って伝播する方向が決まっ

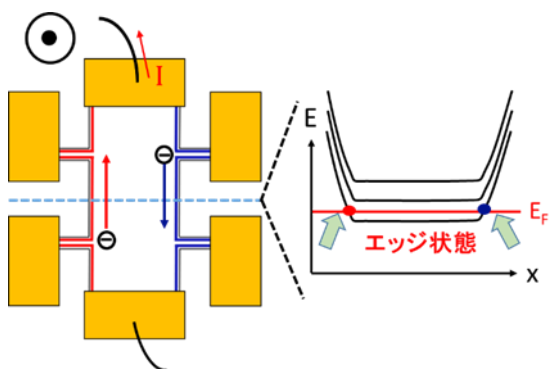


図1：量子ホール・エッジ状態の模式図。試料の端に沿って周回する1次元な電子状態で、磁場の向きで決まるカイラリティを持つ電子状態である。

ており、後方散乱の無い量子伝導を示す。

(図1参照) この量子ホール・カイラルエッジ状態と光渦との相互作用については、未解明であり、本研究では、量子ホール電子系を光渦で励起して生じたキャリアによる伝導を計測することにより、光渦と量子ホール系との相互作用について調べる。

2. 測定方法・実験系

試料はGaAs/AlGaAs量子井戸構造 2次元電子系を線幅 $500\mu\text{m}$ のホールバー形状に加

工したもので、光学窓付きクライオスタット内にセットした。図2のように、チタンサファイア波長可変レーザーのCW光を光源として、透過型空間位相変調器 (SLM) にホログラムを投影して光渦を生成し対物レンズで集光し試料上に照射する。この照射位置をガルバノミラーを用いて走査し、光渦の顕微照射系を構築した。光渦からのガウスビームがホログラムパターンを通過すると、干渉縞が現れ、0次光はガウスビーム、 ± 1 次回折光は光渦となる。 ± 1 次回折光の光渦のうち、いずれかをアパーチャーで切り出した。測定温度は、 $T = 4.2\text{K}$ である。印加する磁場は $B = -6\text{T} \sim 6\text{T}$ で、また、レーザー光の波長は、本試料での円二色性吸収による実験[4]から、GaAs量子井戸の吸収が見られる $\lambda = 805\text{nm}, 807.5\text{nm}$ と、吸収にはわずかに届かない波長 $\lambda = 816.5\text{nm}$ の3種類の波長で測定した。また、微小な伝導度変化をS/N良く計測するため、SLMに投影するホログラムパターンを周期的に切り替えて、光渦の変調を行い、そのタイミングに合った伝導度変化をロックイン検出した。なお、実験に使用した光渦の次数(トポロジカルチャージ)は $m = \pm 1, \pm 2$ である。

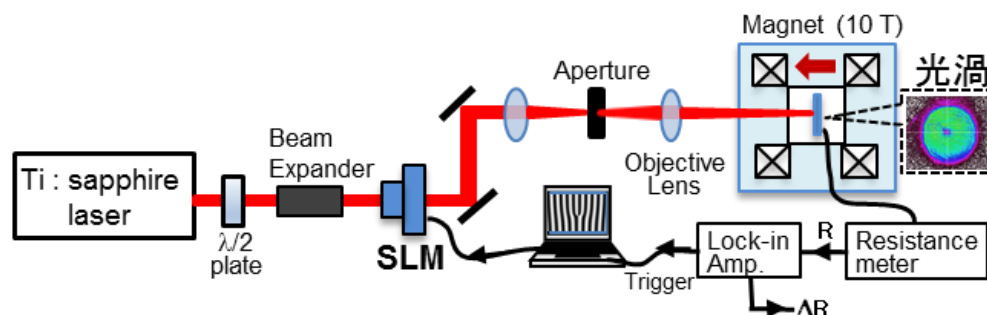


図2：光渦顕微照射系の概要図。SLMに投影されたホログラムパターンによる回折で光渦が発生する。

3. 実験結果と考察

3.1 光渦を照射する位置による違い

図3は、光渦を照射する試料の位置①～③において抵抗の変化を測定した結果である。

ランダウ準位占有数が $\nu = 2$ となる $B = \pm 5T$ 付近で、試料の端部①に光渦を照射したときに伝導度の変化が観測され、試料内部②や電極近傍③に照射してもほとんど変化が無いことが分かる。

また、図3の①の結果に注目すると、 ΔR の信号が $B = +5T$ 付近では負、 $B = -5T$ 付近では正に出る傾向があり、磁場の向きで影響が逆転している。これは、図4に示すように、光渦の持つ角運動量の向きと磁場の向きで決まるエッジ状態の周回する向き（いずれもカイラリティを持つ）が一致した場合に信号が現われるものと考えられる。そのため、磁場の正負でエッジ状態の周回の向きも反転するため、 ΔR の信号の正負が反転しているものと推察される。

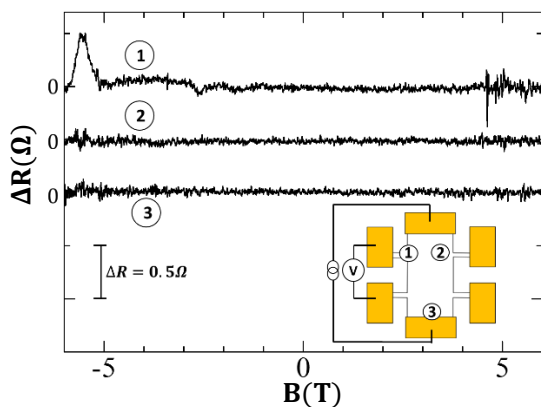


図3：光渦を照射する位置を①試料端近傍、②試料内部、③電極近傍、と変えた時の伝導度変化の違い。(次数 $m = \pm 1$ 、レーザーの波長 $\lambda = 807.5nm$)。②、③に対し、①では、 $B = -5T$ 付近で抵抗の変化が観測された。

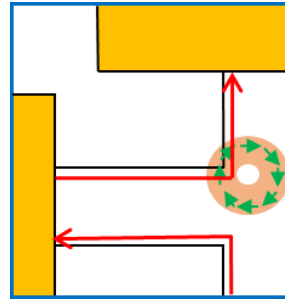


図4：光渦の電場が量子ホール系のエッジ状態にある電子と相互作用する概念図。図3の①に対応する。

3.2 光渦の次数の違いによる信号の比較

図5は、試料に照射する光渦の次数 m を $m = \pm 1$ と $m = \pm 2$ にしたときの各々の抵抗変化のグラフである。比較のため、0次光のガウスビームを照射したときには、伝導度変化は現れなかった。それに対し、光渦を照射した場合には $B = -5T$ 付近の磁場位置で変化が観測され、照射する光渦の次数の違いによって抵抗変化の磁場依存性が変化していることがわかる。このことから、光渦の次数により、量子ホール電子系に与える影響が変化することがわかる。

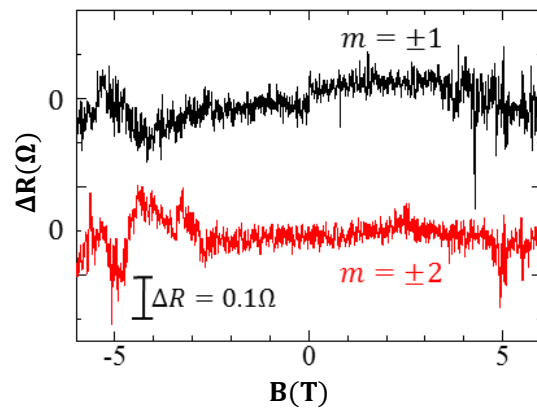


図5：試料端への光渦照射による抵抗変化 ΔR 。光渦の次数 $m = \pm 1$ 、 $m = \pm 2$ によって異なる信号が観測された(レーザーの波長 $\lambda = 805nm$)。

3.3 磁場変化によるヒステリシスの観測

図6は、磁場を $B = 0\text{T}$ から $B = -6\text{T}$ の間で、上げる場合と下げる場合の抵抗変化の測定結果を並べて比較したものである。 $B = -3\text{T}, -6\text{T}$ 付近でヒステリシスを観測した。このヒステリシスは、量子ホールプラトーの状態ではなく、バルク状態の電子が拵がっている磁場範囲で観測された。

量子ホール系では、近年、GaAsの核スピと電子スピンの相互作用が注目されており [5]、本研究で見られたヒステリシスも核スピンの整列が関わっている可能性がある。今後、さらなる実験によって光渦が与える影響の詳細を明らかにしていきたいと考えている。

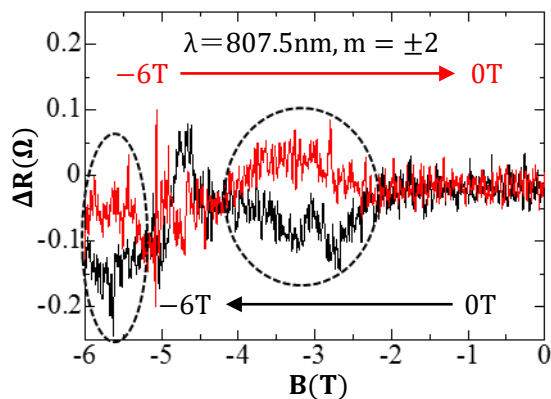


図6：磁場を上げるとき ($0\text{T} \rightarrow -6\text{T}$) と、下げるとき ($-6\text{T} \rightarrow 0\text{T}$) に見られる磁気抵抗のヒステリシス。

4. まとめ

本研究では、光渦による電子励起が量子ホール電子系の電子状態にどのような影響を及ぼすのかを調べることを目的として、光渦照射のもと、低温・強磁場下における抵抗変化をロックイン検出した。

光渦を試料の端部に照射することで、量

子ホール系の電気伝導が影響を受けることが示された。これは、量子ホール電子系と光渦の相互作用を初めて実験的に観測したものである。

今後、このメカニズムを明らかにするとともに、光渦の軌道角運動量成分が量子ホール電子系に及ぼす効果について詳細に調べていきたいと考えている。

謝辞

本研究は、千葉大学分子キラリティ研究センターからの支援と、千葉大学尾松孝茂教授の協力を受けて行われました。ここに、深く感謝します。

参考文献

- [1] K. Shigematsu, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 08JL08 (2013).
- [2] S. H. Tao, X-C. Yuan and J. Lin, Opt. Express **13**, No.20 7726–7731 (2005).
- [3] K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, and T. Omatsu, Nano Lett., **12**, 3645 (2012).
- [4] H. Ito, T. Yamazaki, D. Fukuoka, K. Oto, K. Muro, Y. Hirayama, and N. Kumada J. Phys., **334**, 012021 (2011).
- [5] K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama Phys. Rev. Lett., **88**, 1176601 (2002).