

論文の内容の要旨

論文題目 Charge neutral current generation and phase transitions in quantum Hall antiferromagnet of bilayer graphene

(2層グラフェンの量子ホール反強磁性状態における非電荷流生成と相転移)

氏 名 田中 未羽子

電子の内部自由度は長距離秩序の発現やその相転移、内部自由度の伝導である非電荷流の伝播など多くの興味深い現象を引き起こす。最も基本的な内部自由度はスピンであり、磁性の発現や磁気相転移、スピン流伝播などの現象が知られている。グラフェン中の電子はスピンの加えてバレーという波数で定義される内部自由度を持つため、二種類の内部自由度に起因してさらに多彩な秩序や伝導現象を示すことが期待されている。本論文ではグラフェン中の電子の内部自由度がもたらす秩序と特徴的な伝導現象を理解することを目的とした。

電子相関が強い系では一般的に交換相互作用によって内部自由度の秩序化が起こる。量子ホール状態は電子相関が強い系の一つである。ランダウ準位が形成されると系の運動エネルギーは離散化するため、ランダウ準位内にフェルミエネルギーがあるときには状態密度が発散するためである。ランダウ準位が部分占有されたとき交換相互作用によって内部自由度が秩序をもつ現象は一般に量子ホール磁性と呼ばれる。内部自由度がスピンのみの場合は強磁性秩序が生じることが知られているが、グラフェンのようなスピンとバレーの複数の内部自由度を持つ系では秩序化の選択肢が多様になり系のパラメー

タに依存して異なる秩序状態が安定化する。

グラフェンのゼロエネルギーランダウ準位が半分占有されたときに少なくとも3つの異なる秩序状態を持つことが理論と実験から示されている。特に面内磁場ゼロ、面直電場ゼロという条件ではバレーの状態関数の重ね合わせで表現される異なる層の副格子の波動関数が互いに逆方向のスピン偏極を持つ層間反強磁性状態が安定化すると考えられている。この状態ではスピンとバレーが結合するために特徴的な電子伝導現象が起これと期待されていたが、その詳細や測定方法の提案はされておらず実験的に未解明であった。また異なる秩序状態間の相転移に関しても理論、実験ともに研究は発展途上であった。本研究では2層グラフェンを対象物質としてこれらの課題の解決を目標に実験を行った。単層ではなく2層グラフェンを用いたのは層間エネルギー差を面直電場の印加によって調整でき、各秩序状態間の操作性に優れているためである。

また、バレーに加えて別の内部自由度を持つ系としてABA積層3層グラフェンの電子伝導現象の研究も行った。ABA積層3層グラフェンは単層グラフェンに似た線形バンドと2層グラフェンに似た放物線型バンドの両方をもつ半金属である。二つのバンドは異なるベリー位相を持つがそれらの共存が量子干渉効果にどのように反映されるのかは未解明であった。これを調べるためにABA積層3層グラフェンの磁気抵抗測定を行った。

研究① 層間反強磁性状態における新奇な非電荷流生成の実証

層間反強磁性状態におけるスピンとバレーの結合を利用して新たなスピン・バレートロニクスの可能性を開くことを目標に研究を行った。従来グラフェンではスピン流とバレー流という2つの非電荷流が研究されてきた。スピン流生成の基盤であるスピンホール効果にはスピン軌道相互作用が必要であり、スピン軌道相互作用の小さいグラフェンでこれを実現するには別の物質との積層や原子、ナノパーティクルの添加によってスピン軌道相互作用を誘起する必要があるが、このような構造では原子レベルの不純物や不均一性が問題になりやすい。一方バレー流は空間反転対称性を破ることで生じたベリー曲率を使ったバレーホール効果による生成、検出が報告されていた。バレー流は原子レベルのポテンシャル変化が存在すると散乱されてしまうため均一で不純物の少ない試料が必要であった。このような事情からグラフェンにおいてスピン流とバレー流を同時に扱い、結合することは困難と考えられてきた。

しかし層間反強磁性状態はスピン軌道相互作用なしでスピンとバレーが結合した状態であり、この問題を解決できる可能性がある。

本研究では層間反強磁性状態においてスピンとバレーが結合した非電荷流が発生し、それを非局所輸送測定で観測できることを提案した。

これを実証するために高移動度かつ均一な2層グラフェンのホールバー型試料を作製し、非局所輸送測定を行った。非局所輸送測定とは非電荷流の生成、検出に広く使われている手法である。印加電流に対して垂直に発生した非電荷流はその非散逸性から長距離

(数ミクロン) にわたって拡散し、電流印加端子から離れた別の端子間に逆ホール効果による電圧を生じる。この非局所的な電圧を測ることで非電荷流の存在を確認することができる。本実験では面直磁場下で実現した層間反強磁性状態において非局所電圧を観測した。また、電気抵抗と非局所電圧のスケーリング関係を調べることで非局所電圧の原因が非電荷流であるという証拠を得た。

研究② 層間反強磁性状態とその周辺の状態間の相転移

2つ目の実験ではパラメータ操作が容易で秩序状態を変調することができるという2層グラフェンの特長に注目して秩序状態間の量子相転移及び温度による相転移の研究を行った。ホールバー型試料では自明なエッジ伝導のために特に低温でバルクの抵抗値が正確に測れないという先行研究の課題を解決するために、試料端のないコルビノ型試料を作製した。これによってバルク状態のみを反映した抵抗の温度依存性を測定することが可能になり、従来の先行研究ではわかっていなかった温度依存性の情報を得ることができた。

温度-面直電場の相図を考察することにより量子相転移の次数が理論予想とは異なって2次以上であることが明らかになった。また温度依存性からこの系を特徴づける複数の温度スケールがあることがわかり、温度の上昇に伴って多段階の相転移が起きていることを示唆する結果を得た。

研究③ 3層グラフェンの弱局在効果

上記2つの量子ホール磁性に関する研究に加えて弱局在効果による磁気抵抗の実験を行った。単層グラフェンではディラック点周りの π のベリー位相のために弱局在に加えて特定の温度、キャリア密度条件下で弱反局在が起こることが理論的、実験的に知られている。一方2層グラフェンではベリー位相が 2π となるため弱局在が起こる。ABA積層3層グラフェンは単層グラフェンに似た線形バンドと2層グラフェンに似た放物線型バンドの両方をもつ半金属である。そのため磁気抵抗を調べることで3層グラフェンの異なるバンドに起因する電子がそれぞれどのように振舞うのかを明らかにすることができる考えた。実験ではトップゲートとバックゲートを備えた3層グラフェンホールバー型試料を作製し面直磁場に対する磁気抵抗のキャリア密度依存性を測定した。キャリア密度と温度に依存して磁気抵抗の符号が反転する振る舞いが見られ、弱局在と弱反局在の競合によって符号反転が起きていることが示唆された。