

論文内容の要旨

論文題目 量子ホール系における熱輸送現象の観測

[Observation of the thermal transport in quantum Hall systems]

氏名 小森 陽介

近年における半導体成長技術および微細加工技術の著しい発達によって、半導体界面二次元電子系を舞台とした量子現象の研究はますます盛んになっている。その成果の一つとして、低温強磁場の二次元電子系で観測される量子ホール効果が挙げられる。量子ホール効果は、二次元電子系が強磁場下で示す特殊な量子状態（ランダウ量子化）として理解されており、このときのホール抵抗は基礎物理定数のみで表される量子化された普遍的な値をとる。量子化ホール抵抗は微細構造定数の高精度決定に用いられるだけでなく、抵抗標準の定義としても採用されている。また、量子ホール効果の研究によって強磁場における電子の局在状態の理解が発展するなど、実験・理論の両面から固体物理学の飛躍的な発展に寄与した。

量子ホール状態にある試料に大電流を流すと、量子ホール効果のブレイクダウンが生じて電子温度が上昇した状態になる。量子ホール抵抗の高精度測定には大電流が必要なので、ブレイクダウンを生じる機構の解明は重要である。大電流状態における電子温度の空間分布を測定することで、ブレイクダウン状態の解明に寄与すると期待できる。ブレイクダウン状態における電子温度の空間分布は、電流の流れる方向については報告されているが、電流と直交する方向については明らかになっていない。電流と直交する方向に電子温度差が生じる現象を Ettingshausen 効果という。本研究は量子ホール系における Ettingshausen 効果の観測を目的とする。Ettingshausen 効果の観測によって、十分に解明されていない量子ホール状態における熱輸送現象について知見を与えることができる期待できる。本研

究は、量子ホール状態における Ettingshausen 効果の観測を、局所電子温度計となるミニホールバーを用いた検出、および電子スピン流となる熱流に伴って生じる核スピン偏極の検出という2種類の方法を用いて行った。

本研究では、Ettingshausen 効果の観測を行う準備として、電子温度変化によって核スピン偏極を引き起こすことができることを示した。核スピンの制御は、量子計算への応用という観点からも重要である。量子ホール状態においてこれまでに報告されている核スピン偏極は、電子スピン共鳴を用いたもの、スピン分離したエッジチャンネル間の散乱を用いたもの、スピン偏極状態の異なる分数量子ホール効果の共存状態を用いたものなどがあった。本研究で報告する電子温度変化による核スピン偏極は、核スピン偏極を引き起こす試料構造の単純性、液体ヘリウム温度の 4.2K という高温でも観測可能などの点で、これまでに報告された方法に比べて優れている。

1. ミニホールバーを用いた Ettingshausen 効果の観測

本測定は、ミニホールバーの対角抵抗を電子温度計として用いた測定を行った。

測定を行うチャンネルに電流を流すことで、Ettingshausen 効果によって電流と直交する方向に電子温度差が生じることが期待される。このチャンネルの上下に、電子温度計としてミニホールバーを取り付けた。チャンネルの熱電子をミニホールバーに引き込んで微分対角抵抗を測定することで、チャンネルの両端に生じる電子温度差の有無を観測できる。

Ettingshausen 効果の観測を、電子の軌道運動に対応するランダウ準位充填率 $\nu = 2$ で行った。図 1 に測定結果を示す。上下のミニホールバーの微分対角抵抗に差が生じており、電流の流れるチャンネル上下の電子温度差が観測されている。同様の結果は、電子のゼーマン分離に対応する $\nu = 1$ 、および $\nu = 2$ の近傍でも観測された。

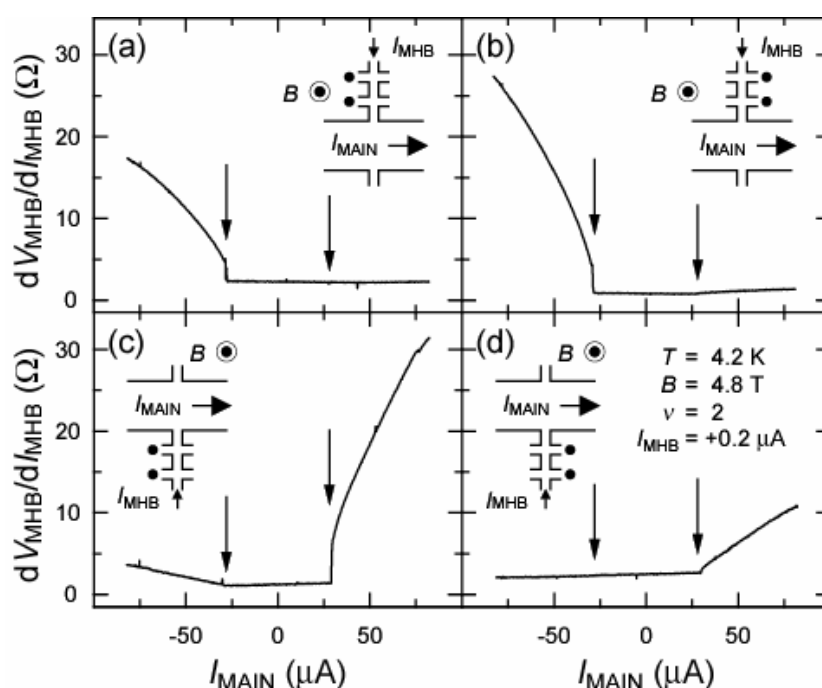


図 1 ミニホールバーを用いたEttingshouse効果の観測

2. 電子温度変化を用いた核スピン偏極

図2に核スピン偏極の原理の概念図を示す。電子の化学ポテンシャルが電子のゼーマン準位間に存在しているとき、電子スピンの偏極率は電子温度によって決まる。電子温度変化によって電子スピンの反転が生じ、超微細相互作用によって核スピンを偏極させることができる。電子温度の変化には、電子温度の電流密度依存性を用いた。図3に核スピン偏極の概念図を示す。試料幅の変化によって電流密度が変化するので、図のように電流を流すことで電子温度の変化による電子スピン反転を生じ、核スピンを偏極させることができる。この状態を長時間保ってから電流を切った後に、微小電流によって対角抵抗を測定すると、対角抵抗の指数関数的な時間変化を観測した。図4に実験結果を示す。対角抵抗が平衡状態における値から変化しており、この対角抵抗の変化量は時間と共に指数関数的に減衰する。核磁気共鳴によって、この対角抵抗の変化が核スピン偏極によって生じたことを確認した。対角抵抗の時間減衰は核スピンの縦緩和によって生じたものであり、その系統的測定から核スピンの縦緩和はフォノン機構が支配的であることを示唆する結果を得た。また、対角抵抗変化量の核スピンの偏極に用いる電流に対する依存性から、核スピン偏極の大きさが励起された電子の数の変化で決まることを示す結果を得た。

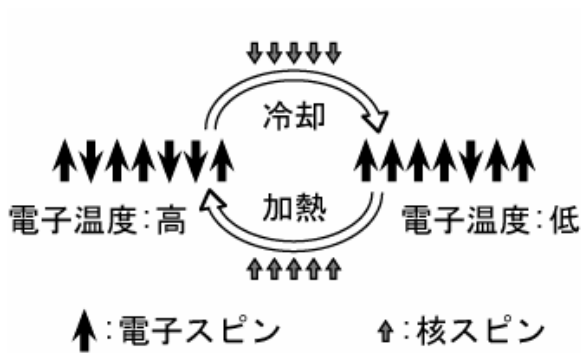


図2 電子温度変化と核スピン偏極

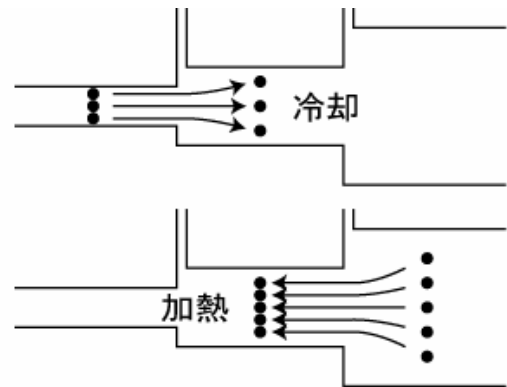


図3 電流密度変化による電子温度変化

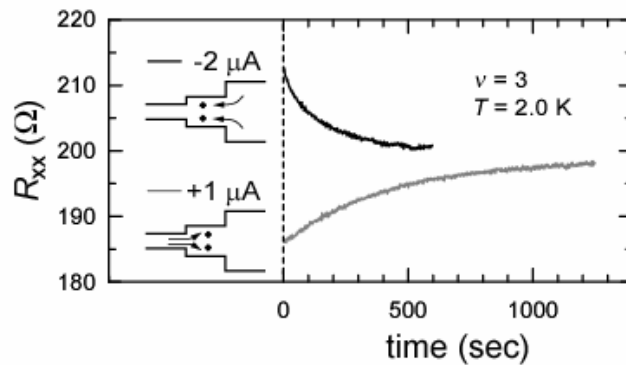


図4 電子温度変化によって生じる核スピン偏極の検出

3. 核スピン偏極を用いた Ettingshausen 効果の観測

Ettingshausen 効果によって電流チャンネルを横切る方向に熱流が流れる場合には、チャンネル端において大きく電子温度が変化し、それにより核スピン偏極が起こることが期待される。このチャンネル端の核スピン偏極を検出することによって Ettingshausen 効果を観測した。チャンネル端の核スピン偏極に敏感な測定量として、エッジチャンネルとバルク領域の間のトンネリングが挙げられる。ランダウ準位充填率を奇数の整数値から増やしていくと、ダウンスピンのランダウ準位に電子が入りだし、エッジチャンネルに加えて試料のバルク部分も電気伝導に寄与するようになる。このような量子ホール状態間の遷移領域では、エッジ・バルク間トンネリング確率が後方散乱を支配する状態を作り出すことができる。チャンネル端の核スピン偏極で生じる有効磁場によって電子のゼーマンエネルギーは変化するので、エッジチャンネルとバルク領域の間のトンネリング確率も変化する。後方散乱によって対角抵抗が変化するので、チャンネル端近傍の核スピン偏極を対角抵抗の変化として観測することができる。

Ettingshausen 効果で生じる核スピン偏極による対角抵抗変化量のランダウ準位充填率依存性を測定した。図 5 に実験結果を示す。ランダウ準位充填率によって核スピン偏極の極性が反転するが、熱流の極性はランダウ準位充填率に依存せず、化学ポテンシャルの高い側のチャンネル端から低い側のチャンネル端に流れることがわかった。核スピン偏極の極性が反転するのは、熱流を担うエネルギーの高い準位の電子スピンのランダウ準位充填率によって変化するためと考えている。

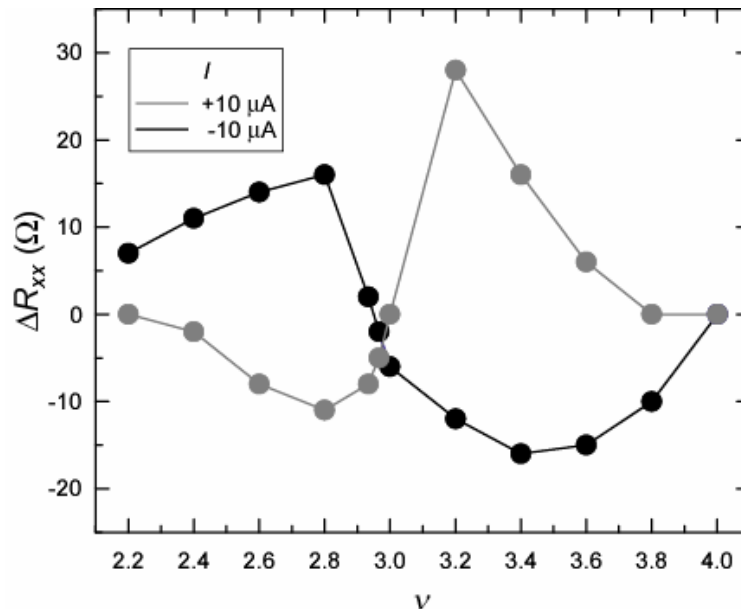


図 5 Ettingshausen効果によって生じた核スピン偏極のランダウ準位充填率依存性