

学位論文題名

Anisotropic Ground States of the Quantum Hall System with Currents

(電流が流れている量子ホール系の異方的基底状態の解析)

学位論文内容の要旨

—研究の背景

1999 年、非常に移動度の高い試料を用いた極低温 (150 mK 以下) での量子ホール系 (磁場中の 2 次元電子系) の実験において、2 つの実験グループにより独立に縦抵抗の強い異方性が報告された[1]。彼らは正方形の試料に対し 2 つの直交した方向に 1-20 nA 程度の微小電流を流して縦抵抗 (およびホール抵抗) の測定を行い、その結果、ランダウ準位占有率 $\nu=9/2$ 、 $11/2$ 等の半占有率の近傍で縦抵抗の強い異方性を観測した。この異方的状態を理論的に説明する電子状態として現在までに、電子が一方向には一様にもう一方向には周期的に並んだ「ストライプホール状態 (ストライプ状態)」[2]、及び電子密度が両方向に周期的だがその周期の大きさに強い異方性を持つ「異方的電荷密度波状態 (ACDW 状態)」[3]の 2 つが主に提案されている。しかし、どちらが実験で実現されている電子状態なのか未だはっきりしていなかった。

ストライプ状態は一方向にはギャップレス、もう一方向にはエネルギーギャップを持った異方的なフェルミ面を持つ。電流を流した際に、ギャップレス方向にフェルミ面がずれるとエネルギーの散逸が生じ縦抵抗が生じるが、ギャップのある方向にフェルミ面がずれてもエネルギーの散逸を生じず縦抵抗は発生しないと期待される。このことから、ストライプ状態は縦抵抗の強い異方性をうまく説明する。一方、ACDW 状態は半占有率で 2 枚のエネルギーバンドを形成しエネルギーギャップを持つ。このエネルギーギャップの大きさは温度に換算して 10 K 程度であり、100 mK 程度の極低温においては実験で見つかっているような強い異方性は期待できない。しかしながら、電流の流れていない場合における両状態のエネルギーの研究では、ハートリーフォック近似と呼ばれる平均場近似の範囲内で ACDW 状態の方が低いエネルギー値を示すことが分かっており、実験結果をうまく説明できないにもかかわらず理論的には ACDW 状態の方がエネルギー的に安定な状態であるという点が今まで問題となっていた。

—本研究内容

量子ホール系の実験では、縦抵抗の測定の際に系に微小電流を流している。古典的なホール効果に見られるように、磁場中では電流を流すと電流に垂直な方向に電荷の蓄積が生じ、その結果、系のエネルギーは上昇する。従来の理論研究ではこの電流によるエネルギー補正の効果は一切考慮されていなかった。そこで本研究では、ストライプ状態及び ACDW 状態に対する有限電流の効果を解析した。この解析は我々が独自に開発した von Neumann lattice 形式と呼ばれる計算方法を応用することで初めて可能となったものである[4]。その結果、古典的なホール効果から期待されるとおり、系に電流が流れることにより電流に垂直な方向の試料端に電荷が蓄積し、この蓄積された電荷間のクーロン相互作用を通じて電流の大きさに依存した

エネルギー補正が生じることが分かった。このエネルギー補正は両状態に対してわずかに違う大きさで現れ、この補正を含めた両状態の全エネルギーの大きさはある電流の値（臨界電流値）を境に逆転することが分かった。臨界電流値はその値よりも小さい電流では ACDW 状態の方が、その値よりも大きい電流ではストライプ状態の方がエネルギーが低くなること示す。臨界電流値は我々の理論計算から 0.04-0.05 nA と見積もられる。この結果から、実際に実験で使われているような大きさの電流（1-20 nA）ではストライプ状態のほうが低いエネルギーを持つということ、また、臨界電流値近傍で両状態間の相転移が起こる可能性があることがわかった。我々の研究結果は、実験で観測されている異方的状態は「ストライプ状態」であり、電流効果をきちんと取り入れることで実験と理論は整合性が取れるということを示している。これにより異方的状態に対して今まで理論的に問題となっていた点が解決されると期待する。

—まとめ

本研究では von Neumann lattice 形式による新たな計算方法を開発し、量子ホール系における異方的状態に対する電流の効果を理論的に解析した。その結果、0.04-0.05 nA 程度の臨界電流値を境に相転移が起こり、この値より小さい電流では ACDW 状態、大きい電流ではストライプ状態が基底状態となることを示した。これにより、実験で観測されている異方的状態は「ストライプ状態」であり、電流効果をきちんと取り入れることで実験と理論は整合性が取れるということを示した。

参考文献

- [1] M. P. Lilly, K. B. Cooper, J. P. Eisenstein, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. Lett. **82**, 394 (1999); R. R. Du, D. C. Tsui, H. L. Stormer, L. N. Pfeiffer, K. W. Baldwin, and K. W. West, Solid State Commun. **109**, 389 (1999).
- [2] K. Ishikawa, N. Maeda, and T. Ochiai, Phys. Rev. Lett. **82**, 4292 (1999); N. Maeda, Phys. Rev. B **61**, 4766 (2000).
- [3] R. Côté and H. A. Fertig, Phys. Rev. B **62**, 1993 (2000).
- [4] K. Tsuda, N. Maeda, and K. Ishikawa, Phys. Rev. B **76**, 045334 (2007)

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 川 健 三
副 査 教 授 河 本 昇
副 査 教 授 大 川 房 義
副 査 准教授 中 山 隆 一
副 査 准教授 鈴 木 久 男

学 位 論 文 題 名

Anisotropic Ground States of the Quantum Hall System with Currents

(電流が流れている量子ホール系の異方的基底状態の解析)

強磁場中の2次元電子系である量子ホール系は、多くの特異な物理を発現させる興味深い電子系である。近年、量子ホール系の実験で、極めて異方的な性質をもつ電子多体系が発見された。この状態の電気抵抗は、通常の量子ホール系とは大きく異なり、電流を流す方向に大きく依存する。また高移動度の半導体で、極低温下の状況で初めて発現する。これらのことから、この異方的な状態は、電子間の相互作用により形成された新たな凝縮状態であると考えられている。しかしながら、この異方的状態が何なる凝縮状態であるのか、未解決のままであった。

本学位論文の著者津田和実君は、量子ホール系における異方的電子多体状態を理論的に研究し、今まで理論と実験との間にあった矛盾が、有限電流の効果を取り入れることにより解消されることを示した。この理論的研究は、強相関量子ホール系における有限電流効果を初めて計算し、また有限電流による相転移の存在を初めて示したものである。得られた臨界電流の値は、 $0.04\text{--}0.05\text{ nA}$ 程度であり、実験で使われている電流値 $1\text{--}20\text{ nA}$ より小さいことを確認した。この結果、異方的状態について、初めて首尾一貫した説明が可能になった。

津田和実君の研究は、量子ホール系の電子をフォンノイマン格子表現を使い表し、電子多体系の基底状態をハートリーフック近似に基づいて解析した。フォンノイマン格子表現を使うことにより、磁場中の電子に対して二次元運動量を導入することが可能となった。この方法で、様々な平均場解を求めると共に、ランダウ準位の移行と共に、等方的な状態から非等方的状態に変化する様子、平均場からの揺らぎの効果、さらに電流の効果等の系統的な計算を実行した。この解析では、先ず、外部電流を流す系で電流の効果を理論的に求め、次に得られた分布から電子系のエネルギーを求めた。非相対論的な電子系では、通常電流間の相互作用エネルギーは、電荷間のエネルギーよりもはるかに小さい。しかし量子ホール系では、強磁場によるローレンツ力の電流の効果が電流の効果を増幅されるため電流を持つ系で、電荷分布に偏りが生じる。このため、電流の効果が電流のエネルギーが電流と共に大きく変化する。得られた結果は、非等方的な性質を持つ二つの平均場相であるストライプ相と、非対称電荷密度相の基底状態のエネルギーが、電流の効果のため臨界値を境に逆転することを示した。津田和実君の理論的な研究成果より、今まで理論と実験との矛盾は、零電流下で得られた理論と有限電流下の実験とを比較したためであることが判明した。有限電流下における理論と実験を比較する場合は、理論と実験との矛盾はなく、実験で見えている異方的基底状態が、ストライプ相であることが確かとなった。また、新たに、 0.05 nA 程度の極めて小さな電流下における実験が、電流による相転移を示すことを予言した。

これを要するに、著者は量子ホール系における非等方的な強相関多電子状態の相や有限電流効果を理論的に解明し、新たな知見を得たものである。その成果の一部はすでに公表され、おおきな関心を持たれている。著者の研究並びにその成果は、場の理論並びに凝縮系の物理の理解に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者が北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。