

論文の内容の要旨

Various Broken Symmetries in Two-component Quantum Hall Systems

二成分量子ホール系における多彩な対称性の破れ

野村 健太郎

二次元電子系は近年の物性物理学の中心的研究対象である。特に強磁場はそこでの電子相関の発現を劇的に増強し、系は数多くの新奇な様相を呈する。分数量子ホール効果はこのような強相関極限で実現する特異な量子輸送現象である。本博士論文の中心的課題は量子ホール状態において強相関効果がスピンや層の自由度に如何に反映するかを定量的に調べることにある。特にふたつの二次元電子系を近接させた二層系は層内と層間の相関効果と層間トンネリングの競合により実に多彩な相構造が実現しうる系として、それ自身量子ホール効果よりも長い歴史を有するが、近年さらに注目を集めている。この系の実効的なパラメータは層間間隔、層間トンネリング率、層間バイアス電圧などであり、これらの変化に伴って、量子相転移が生じ、それらは層の自由度を擬スピンを導入して記述される。本論文第一章では多自由度をもつ量子ホール系でこれまでに行われた実験的・理論的研究を概観する。続く第二章では占有率が整数の場合の基底状態、およびそこから励起構造が調べられる。強磁場のため全ての電子が最低 Landau 準位を占有したとき、運動エネルギーは消滅し、相互作用項はもはや摂動では扱えない。特に交換相互作用はスピンないし二層系であれば擬スピンを揃えるように働き、基底状態では強磁性秩序が反映する。二層系においてこの秩序は相関の量子コヒーレンスに相当し、巨視的な量子効果が期待できる。最近測定された層間の異常コンダクタンスはその強力な証拠に他ならない。この現象が観測されたのは、圧縮性状態と非圧縮性状態の転移点近傍であり、そこでの基底状態、およびその変化が定量的に示らべられる。二つの層が異なる Landau 準位に属するとき、その秩序は違ったものとなる。量子コヒーレント状態の代わりに電子が一方の層のみに占有される、言わばイジング的強磁性状態が実現する。ただし層間隔が有限の場合は通常の平行版コンデンサーと同じく静電エネルギーの効果のため複雑な電子分布となることが予想される。第二章後半では少数電子系の厳密対角化と Hartree-Fock 近似による平均場理論の手法を併用して、層間間隔の変化の下で基底状態がどの様に移り変わるかが調べられる。その結果、一方向のみに並進対称性の敗れたストライプ状態が実現することが明かされる。この結果はこの理論的模型とよく似た試料で最近観測された、異方的輸送現象の実験結果を説明する有力な候補となり得る。一方、二層系イジング的状态にトンネリング率を導入することは、擬スピンの言葉では x 方向へ Zeeman 分

裂を生じさせることになるため、量子相転移の発現が期待できる。有限系の計算では多くの励起状態の準位がある点で減少することが示される。この励起準位の減少の割合は系の大きさが増すほど顕著になるため、熱力学極限でギャップレスとなる二次相転移であると考えられる。最後にトンネリング率を層間間隔に対する相図が与えられる。ここまでの研究では占有率が整数の系のみが考察されたが、これらの結果は特異ゲージ変換（ないし磁束貼付変換）を用いて分数占有率の系へ対応させることができる。これに対し第三章では特異ゲージ変換で有効磁場が零のフェルミオン系に対応する占有率 $1/2$ の状態を考察する。占有率が $1/2$ での量子ホール効果は10年ほど前に二つのグループによって発見された。一方のグループでは典型的な二重井戸構造が採用されたが、他方のグループが採用したのは広い二次元井戸の構造で実効的には二層系とみなせるが層間のトンネリング率は前者よりも大きい系となる。前者のようなトンネリングが殆ど無い場合は Laughlin 状態の拡張として Halperin によって導入された $(3,3,1)$ 状態とよばれる二成分状態が実現される。トンネリングは擬スピンの Zeeman 分裂に相当するため、系はそれによって一成分化を示す事となる。一成分非圧縮性状態としては Moore と Read が提案した Pfaffian 状態が実現することが Greiter らによって主張されている。我々は少数電子系に対する厳密対角化を用いてこの系のギャップ構造の変化を調べ、層間間隔とトンネリングにたいする相構造を明らかにする。二成分状態から一成分状態への変化は連続的であることが定量的に示される一方で励起状態、特に準正孔状態は不連続に移り変わることが示される。これは他に例の無い新しいタイプの量子相転移であり、この理論は実験的に観測された活性化エネルギーの振る舞いを説明できる。