

氏名・(本籍)	くま だ のり お 熊 田 倫 雄
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第1999号
学位授与年月日	平成15年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻
学位論文題目	Study of interactions between composite fermions by a comparison of integer and fractional quantum Hall states (整数・分数量子ホール状態の比較による複合フェルミオン間相互作用の研究)
論文審査委員	(主査) 教授 豊田直樹 教授 倉本義夫, 青木晴善, 江澤潤一 助教授 澤田安樹

論文目次

第1章	Introduction
第2章	Overview of quantum Hall effects
第3章	Spin degree of freedom
第4章	Bilayer system
第5章	Experiment
第6章	Results and discussions
第7章	Summary

量子ホール効果は低温・強磁場でホール抵抗が $R_{xy} = h/\nu e^2$ に量子化され、磁気抵抗がほぼ0となる2次元電子系特有の現象である。 ν が整数の時は整数量子Hall効果, 分数の時は分数量子Hall効果と呼ぶ。分数量子Hall効果は、電子と2本の磁束量子を合わせた粒子である複合フェルミオンを導入することにより複合フェルミオンの整数量子Hall効果へ変換することが出来る。ここで、複合フェルミオンの感じる有効磁場 B^* は実際の磁場 B から電子に貼り付けた磁場を引いたものである。様々な分数量子ホール効果における活性化エネルギーやスピン相転移は、複合フェルミオンの有効質量を場合に依って変えることにより、相互作用の無い複合フェルミオンモデルで説明することが出来る。つまり複合フェルミオン間相互作用は有効質量に繰り込まれている、と言うことである。そのため複合フェルミオン間相互作用はこれまでほとんど調べられていない。しかし、分数量子Hall領域でヒステリシスが観測される等、相互作用が重要な役割を果たしている現象も観測されている。

2次元電子系を2層近接配置した2層系では層内と層間の相互作用の比を両層合わせた総電子密度 n_t で制御できる。電子密度が高い時、サイクロトロン運動の半径 $l_B = \sqrt{\hbar/eB}$ は層間距離 d に比べて十分短く層内の相互作用が支配的である。逆に電子密度が低い時、 l_B と d は同程度になり層間の相互作用も重要になって

くる。また、トンネリングエネルギー Δ_{SAS} を変えることによっても両層のカップリングの強さを変えることが出来る。この系では層内/層間相互作用の相関が基底状態を決め、相互作用の効果を調べるのに適しており、複合フェルミオン間相互作用が露になるのではないかと期待される。

そこで本研究では2層系で整数量子ホール効果と分数量子ホール効果を比較することにより、複合フェルミオン間相互作用を電子間相互作用と比較する。具体的には $\Delta_{\text{SAS}} = 1\text{K}, 4\text{K}, 11\text{K}, 23\sim 32\text{K}$ の4つの試料を用い総電子密度 n_i と両層の電子密度差 $\sigma = (n_f - n_b)/n_i$ を変えて $\nu = 2$ 整数量子Hall効果と複合フェルミオンの $\nu_{\text{CF}} = 2$ である $\nu = 2/3$ 分数量子Hall効果を比較する。ここで、 $n_f(n_b)$ は前面層(背面層)の電子密度である。

$\nu = 2$ の実験結果

$\nu = 2$ にはスピン偏極-擬スピン非偏極(SU-PP)状態とスピン非偏極-擬スピン偏極(SP-PU)状態が存在することが知られている。この2つの量子Hall状態の相転移点を定量的に調べるために4つの試料で n_i と σ を変えて相図を作成した。 $\Delta_{\text{SAS}} = 4\text{K}, 11\text{K}$ の試料では $\sigma = 0$ で n_i を下げるとSP-PU状態からSU-PP状態への相転移が観測された。 $\Delta_{\text{SAS}} = 1\text{K}$ の試料では $\sigma = 0$ ではSP-PU状態しか観測されなかった。 $\Delta_{\text{SAS}} = 23\sim 32\text{K}$ の試料ではSU-PP状態のみ観測された。これらの相図は1粒子近似で定性的に説明することが出来るが、定量的には問題がある。相互作用を考えないと2つの状態の相転移点では

$$\Delta_{\text{SAS}} = g^* \mu_B B \quad (1)$$

が成り立つはずであるが、実験結果を説明するためにはZeemanエネルギーを Δ_{SAS} に対して20倍する必要がある。これが、電子間相互作用が整数量子ホール状態に与える影響である。

SP-PU状態は両層の電子が別々に $\nu = 1$ を形成している状態であり、Zeemanエネルギーと層内のCoulombエネルギーで安定となっている。SU-PP状態は両層合わせて1つの量子Hall状態となっている状態であり、 Δ_{SAS} と層間のCoulombエネルギーで安定となっている。ここで層内のCoulombエネルギー($\propto 1/l_b$)は必ず層間のCoulombエネルギー($\propto 1/\sqrt{d^2 + l_b^2}$)より大きく、相互作用はSU-PP状態に対してSP-PU状態のエネルギーを下げる向きに働く。これによって実効的に Δ_{SAS} に対してZeemanエネルギーが20倍になると考えられる。

$\nu = 2/3$ の実験結果

複合フェルミオンのサイクロトロンエネルギーはCoulombエネルギーに比例し

$$\hbar \omega_{\text{CF}} = C(\sigma) e^2 / 4 \pi \epsilon l_b^* \propto \sqrt{B} \quad (2)$$

と表される。ここで、 $C(\sigma)$ は比例係数、 $l_b^* = \sqrt{\hbar / eB}$ は有効磁場中におけるサイクロトロン運動の半径である。 $\nu = 2/3$ で $\nu = 2$ と同様に相図を作成したところSP-PU状態、SU-PP状態に加えてSP-PP状態と2種類のヒステリシスが観測された。これは複合フェルミオンのサイクロトロンエネルギー($\propto \sqrt{B}$)がZeemanエネルギー($\propto B$)より高磁場で小さくなるためである。 $\nu = 2/3$ においても相互作用を考えないと相図を定量的に説明できない。SU-PP状態とSP-PP状態間の相転移点では、

$$g^* \mu_B B = C(\sigma) e^2 / 4 \pi \epsilon l_b^* \quad (3)$$

SP-PU状態とSP-PP状態間の相転移点では、

$$\Delta_{\text{SAS}} = C(\sigma) e^2 / 4 \pi \epsilon l_b^* \quad (4)$$

が成り立っているはずであるが、式(3)、(4)で共通の $C(\sigma)$ を用いるためにはZeemanエネルギーを Δ_{SAS} に対して10倍する必要がある。またサイクロトロン共鳴の実験と比較した結果、Zeemanエネルギーは交換相互作用によって2倍増大させられていることが分かった。従って実験結果は Δ_{SAS} が層内/層間相互作用の相関によって5分の1に減少させられていることを示している。即ち電子密度が高く層内の相互作用が

支配的な時、電子はトンネリングによって両層に広がっているより層内の交換エネルギーを下げるためにそれぞれの層に局在する、とすることである。この結果は、2層系では層内と層間の相互作用を同時に1つの有効質量に繰り込むことが出来ず複合フェルミオン間相互作用が露になった、とすることを示している。

ヒステリシス

$\nu = 2/3$ では2種類のヒステリシスが観測されたが、それぞれスピンの異なる量子Hall状態、スピンの異なる励起準位が交差する時発生することが分かった。励起準位の交差によるヒステリシスは2層系特有のものであり、初めて観測されたものである。量子ホール状態の交差によるヒステリシスの原因はSP-PP状態とSU-PP状態のドメイン構造とそれによる核スピン偏極だと考えられている。今回の実験ではどのようなドメイン構造が形成されているか調べるためにヒステリシスの電流、磁場掃引速度、温度依存性を測定した。その結果、ヒステリシスの発生にはある程度大きな電流($I \geq 5\text{nA}$)が必要であり、磁場をゆっくり上げた時だけ準安定状態となっていることが分かった。

$\nu = 2$ と $\nu = 2/3$ の比較

$\nu = 2$ では2種類の量子Hall状態が存在するが、 $\nu = 2/3$ では3種類の量子Hall状態と2種類のヒステリシスが存在した。この $\nu = 2$ より多彩な状態が出現は複合フェルミオンのサイクロトロンエネルギーはZeemanエネルギーより小さく成り得るためである。量子Hall状態間の相転移点を定量的に議論した結果、 $\nu = 2$ ではZeemanエネルギーは Δ_{SAS} に対して20倍になっていることが分かった。また $\nu = 2/3$ ではZeemanエネルギーは2倍 Δ_{SAS} は5分の1に、つまりZeemanエネルギーは Δ_{SAS} に対して10倍になっていた。このことから分数量子Hall状態に与える複合フェルミオン間相互作用の影響は、整数量子Hall状態に与える電子間相互作用の影響と同様に大きいと言える。 $\nu = 2/3$ における磁場は $\nu = 2$ における磁場の3倍であり、 $\nu = 2/3$ における有効磁場は $\nu = 2$ における磁場と等しいので、複合フェルミオン間相互作用は有効磁場を用いて表したCoulomb相互作用であると考えられる。

論文審査の結果の要旨

分数量子ホール効果は有効磁場中を運動する複合フェルミオンの整数量子ホール効果と見なすことが出来る。相互作用を考えない複合フェルミオンモデルは有効質量を状況に応じて定義することにより様々な現象を説明でき、これまで複合フェルミオン間相互作用はほとんど議論されてこなかった。本研究では2次元2層系の試料を用いて $\nu=2$ 整数量子ホール効果と $\nu=2/3$ 分数量子ホール効果を比較することにより複合フェルミオン間相互作用を調べた。ここで、 $\nu=2/3$ は複合フェルミオンの $\nu_{cf}=2$ である。2層系では電子密度を変えることにより層内と層間の相互作用の比を制御することが出来る。また、2層間のカップリングの強さはトンネリングエネルギー Δ_{sas} によって変えることが出来る。実験は $\Delta_{sas}=1K, 4K, 11K, 23\sim 32K$ の4つの試料を用いて行った。 $\nu=2$ と $\nu=2/3$ において両層合わせた電子密度と両層の電子密度差を変えて相図を作成した。 $\nu=2$ では2種類の量子ホール状態が観測されたのに対し、 $\nu=2/3$ では3種類の量子ホール状態と2種類のヒステリシスが観測された。相互作用を考えない描像でもこれらの相図を定性的には説明できた。しかし量子ホール状態間の相転移点を定量的に計算した結果、問題があることが分かった。この定量的な問題は層内/層間相互作用の相関から来ている。 $\nu=2$ ではゼーマンエネルギーを Δ_{sas} に対して20倍する必要があった。一方、 $\nu=2/3$ ではゼーマンエネルギーを2倍に Δ_{sas} を1/5に、即ちゼーマンエネルギーを Δ_{sas} に対して10倍する必要があった。従って、分数量子ホール状態に与える複合フェルミオン間相互作用の影響は整数量子ホール状態に与える電子間相互作用の影響と同様に大きいと言える。 $\nu=2/3$ における磁場は $\nu=2$ における磁場の3倍であり、 $\nu=2/3$ における有効磁場は $\nu=2$ における磁場を等しいので、複合フェルミオン間相互作用は有効磁場を用いて表したクーロン相互作用であると考えられる。また、 $\nu=2/3$ で観測されたヒステリシス領域では温度依存性から磁場をゆっくり上げた時だけ準安定状態となっていることが分かった。

本論文は、自立して研究活動を行うための高度な研究能力と学識を有していることを示している。したがって、熊田倫雄提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。