

学 位 論 文 題 名

Dynamical properties of anisotropic state
in the quantum Hall system

(量子 Hall 系における異方的状態の動的性質)

学位論文内容の要旨

極低温、強磁場下における二次元電子系である量子 Hall 系には、様々な相が存在することが実験で明らかにされてきている。特に近年、三番目以上のランダウ準位で半充填される磁場の近傍で、抵抗が大きな異方性をもつ状態が実現することが報告されている。この状態は Hall 抵抗の量子化を起こさない圧縮性状態にある。二番目以下のランダウ準位における等方的状態と大きく異なるこの異方的状態は、新しい量子 Hall 相として最近注目されている。実験の発見以前から、高いランダウ準位の半整数充填率では、電子密度が一方では周期的で、それと直交する方向では一様なストライプ状態が実現し、半整数近傍では電子が数個集まったバブル状態になることが Hartree-Fock 近似で示唆されていた。実験でみられる抵抗異方性は、ストライプに平行な場合は電流が流れ易く、直交する方向には電流が流れにくい、という直観的描像で容易に理解されると考えられるが、いまだにこのストライプ状態の直接的な実験証拠は得られていない。ストライプの方向を決める要因も不明である。また、ストライプ状態による具体的な異方的抵抗値の理論的予測もなされていない。更に、この異方的状態に対して、回転対称性を破り並進対称性を保った液晶ネマチック状態や、回転対称性を破り一方の並進対称性のみを保った液晶スメクティック状態が安定である、という提唱も最近なされてきている。このように、異方的 Hall 状態についての理解はほとんどなされていないといえる。

本研究では、このストライプ状態の解明にむけて以下の理論的研究を行なった。

まず、異方的状態は、常識的に考えられる方向に直交する方向を向くことを発見した。異方抵抗は二次元電子系が実現する半導体基板 GaAs の結晶軸と相関があると考えられている。このため、半導体基板の表面の凹凸と異方性の方向の相関や、二次元電子密度の変化と異方性の方向の相関などが実験で調べられているが、まだ異方性の方向を決める原因はわかっていない。我々は、異方電子密度変調が加えられた時の多体電子状態の性質を調べ、その向きとストライプの向きとの相関を調べた。直観的には電子密度変調のポテンシャルの谷間に電子が束縛され、ストライプと電子密度変調が平行になると考えられる。電子密度変調の強さが十分強い場合や、変調の波数とストライプの波数がほぼ同程度の場合は予想通り両者が平行になる結果を得た。しかしながら、電子密度変調の強さが小さく、変調の波数とストライプの波数がある程度異なる場合には、両者が直交することが判明した。電子密度変調は外部電場と見なし得るので、この直交相は電場に直交する方向に電流が流れる Hall 効果を想起させる現象になっている。実際、半導体基板の表面に人為的に溝をつけて異方電子密度変調を実現させ、抵抗を測定した最近の実験は、この結果を支持している。

さらに、ストライプ状態における励起状態を調べた。ストライプ状態は平均場近似で磁

気並進及び回転対称性を自発的に破った状態になっている。それゆえ、対称性の破れにともなった Nambu-Goldstone ボソンの出現が予想される。そこでまず、Nambu-Goldstone の定理を証明した。磁場中では電子のサイクロトロン中心座標が、正準変数と正準共役変数同士の交換関係と同じ構造になり、非可換になる。スピンなどの内部対称性の破れとは異なり、非可換性を備えた空間の対称性の破れに関する Nambu-Goldstone の定理の証明は、非自明で興味深い問題であるが、これを初めて証明した。更に、対応する励起スペクトルを単一モード近似で求めた。単一モード近似はヘリウム系の励起スペクトルを導くのに成功した手法であり、最低ランダウ準位における分数量子 Hall 系の励起スペクトルの導出にも成功を収めている。この手法をストライプ状態に適用して、対称性の破れに起因した異方的なギャップレスモードを得た。長波長領域では、液晶スメクティックや液晶ネマチック状態から予想される励起スペクトルの波数依存性とは異なる結果が得られ、短波長領域では電子-ホール対生成による影響が見られた。今後、電磁波の吸収等による実験でこのモードが測定されれば、我々のストライプ状態の証拠となると考えている。

ところで、我々が考えているストライプ状態は、一電子スペクトルが異方的なフェルミ面を持つ異方的圧縮性ガス状態として、自己無撞着に実現されるものである。その解析には、磁場中のクーロン相互作用から自己無撞着に形成される電子スペクトルを、明確な形で求めるのに適した、von-Neumann 格子形式という形式を用いている。この形式は電子のサイクロトロン中心座標の期待値が、磁気長を単位とした格子を組む基底をとっており、電子場の基底関数が x, y 方向に関して対称なものになっている。この形式を用いると磁場中の電子系を、磁場の無い通常の電子系の解析と同じように解析できる。それゆえ、電子ガスの状態として実現しているストライプ状態を、通常の電子ガスで行なわれてきたように、Hartree-Fock 近似を越えた RPA で解析することが可能となる。特に、一ランダウレベル内のみの RPA の寄与は大きくなる可能性があり、その説明は重要である。また、RPA は、通常の摂動論を越えた単一モード近似や、現象論的に提唱された液晶モデル等を考察する上で有用な役割を果たすと考えられる。RPA は本質的に電子に関する一ループ近似で求めた分極関数の足し上げである。これから誘電率やプラズマ振動数、および系の相関エネルギーが具体的に求められる。解析によると、ストライプ状態を反映して誘電率およびプラズマ振動数はそれぞれ異方的な性質を持つことがわかった。この結果を支持する実験が現れればストライプ状態の証拠となり得ると考えられる。更に、RPA による相関エネルギーは負の値をもつことがわかった。異方的状態の候補の一つである両方向に周期的な構造をもった異方的電子密度波状態のエネルギーは、我々のストライプエネルギーより低いが、RPA 相関エネルギーを取り込むと我々の状態の方が低い。一方、有限電子系の数値計算は我々のストライプ状態に近い状態を実現し、そのエネルギーは相関エネルギーを取り込んだ我々のエネルギーに近い。これは、異方的電子密度波状態よりもストライプ状態がより安定な状態であることを示唆している。

以上のとおり本研究により、異方的状態の性質に関して以下の新しい知見を得た。(1) 異方的状態のストライプは、電子密度変調に対して直交する場合があること。(2) ストライプ状態において Nambu-Goldstone の定理が成立すること、また対応する非対称の励起スペクトルが単一モード近似で求められた。(3) RPA 解析から誘電率、プラズマ振動数、及び相関エネルギーが導出され、大きな RPA の寄与が求められた。

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	助教授	北 孝 文
副 査	助教授	中 山 隆 一
副 査	助教授	鈴 木 久 男

学位論文題名

Dynamical properties of anisotropic state in the quantum Hall system

(量子 Hall 系における異方的状態の動的性質)

状態の本理論は新しい物理者として新しいものをいふ基礎と量の特異性に共通的な理論を進める。このため、平均理解の分平の抵抗をなすかたに大なるガスの研究の多岐性から、ホーリクと持異源を起質する関係性を有する状態で見出し、電で驗をこる系実度なるにた移動したか一時移ったか同行いっいホ同行高かが子、をみつ現量し言めつ見発、明予極最近の解の果が性質的効

量子ホール系では電子の一粒粒子状態は磁場の強さに比例する一定の縮退度と、とびとびのエネルギーを有する。その為多電子状態はさらに大きな縮退を有する。また系は座標系の回転や平行移動に不変である。ミルト二アンが持つ上記対称性や平行移動に対する破壊性をたてて説明した。

この破壊性はHartree-Fock近似に基づいて

ハミルトニアンが持つ対称性を自発的に破るため、異方的多体系ガス状態は南部ラウンド生成の伴うと依らずに、一方の方向に物理的に、南の方の物向。中2破の方々に、場の破れの共磁動性なそれと強移動性はえらガ行対磁一考あ体し平るはギとで多か、け質ルる題的しめお性ネま問方。たにの工決る。異つる系ドのがある。

持ある一モ状態向味あをで一ホースでに柄ド換ガスでに柄る一可子ギガ果的事破モ非量ル体効論な起的励標めエ的多の理要的一座た零外つも発中心のに異はかでル中こび方でなえ

自能ル中こび方でなえ性をエめる。並一系いう対零決な定るあれす称りをとんれがさ明つり位置換一ら場明解に位可トえ外解を持に位の非ス考なで態安電子にドと弱ま状ン電イルる微今る一互一の、いハミルトニアンの子一くいいハミルトニアンの子一くいい準演南大しい在

[illegible]

小さいことから、近似法には信頼性があることが確認された。またプラズマモードにも磁場中の非等方的な性質が大きく反映している事が分かった。周期外場のもとでの量子ホール系については人工的なエッチング法で周期的な外場を導入した量子ホール系で最近一つの実験がなされ、申請者らの結果を支持する結果が得られている。これらより総合して、実験で観測された異方的ガス状態が申請者らの求めた状態である可能性は大きいと思われる。

これを要するに、著者は量子ホール系における回転対称性や平行移動対称性を破る特異な圧縮性異方的ガス状態の性質を解明した。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。この結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。