

学 位 論 文 題 名

Spontaneous symmetry breaking and photon energy absorption rate of striped Hall gas

(ストライプホールガスの自発的対称性の破れと光子エネルギー吸収率)

学位論文内容の要旨

本研究は量子ホール系の磁気並進対称性が自発的に破れた場合の光子エネルギーの吸収率を量子ホール系で一般的に定式化したものである。現在、量子ホール系で磁気並進対称性を自発的に破るような状態が次々に発見されつつあり、この定式化はそのような状態のゼロエネルギー励起スペクトルを解明する上で非常に重要な役割を担う。さらに我々はストライプホールガスの光子エネルギー吸収率を具体的に求めた。ストライプホールガスは磁気並進対称性を破る状態の中で最も実験が進んでいるものだ。これまでに我々はクーロン相互作用の平均場近似で基底状態、単一モード近似でゼロエネルギー励起を求めており、ストライプホールガスの光子エネルギー吸収の計算にこれらの結果を応用した。

二次元平面を貫く方向に強い磁場がかかっている二次元電子系を量子ホール系と呼ぶ。量子ホール系のような二次元系では電気抵抗率が2行2列の行列になっており、その各成分が量子ホール系の種々の電子状態の性質を測る指標となっている。抵抗率行列の対角成分を縦抵抗率と言い、電流に沿った方向の抵抗率を表している。量子ホール系は30年ほど前から量子効果が実現する極低温の電子系として注目されてきたが、近年の実験技術の向上により高移動度の量子ホール系が実現できるようになり、高次ランダウ準位の分数占有率付近での特異な状態が発見されつつある。これにより量子ホール系の活発な議論が再燃した。約5年前に縦抵抗率が強く異方的な状態が発見され、この状態をストライプホールガスという。量子ホール系は電磁 $U(1)$ 対称性、磁気回転対称性、 x 方向と y 方向の磁気並進対称性の合計四つの対称性を持っており、ストライプホールガス状態はこのうち全方向の磁気回転および一方向のみの磁気並進を自発的に破るものだ。このガス状態では磁気並進対称性が自発的に破れているので、南部・ゴールドストン (NG) モードというゼロエネルギー励起が存在することを我々はこれまでに示してきた。

量子ホール系の電磁的性質は電子密度と磁束密度の比によって数種類に分類でき、この比をランダウ準位の占有率と言う。ランダウ準位とは磁場中の電子の一粒子運動の運動エネルギーが量子化されてできるエネルギー準位のことで、縦抵抗率の強い異方性はこの占有率が2.5以上の半整数の場合に観測されている。これはランダウ準位で表すと第3ランダウ準位以上にあたる。本研究では触れていないが、ストライプホールガスの他にも占有率が0.25のまわりではウィグナー結晶とみなせる状態が磁気並進対称性を自発的に破っている。

われわれは磁場中の電子の運動を解析するために、以前からノイマン格子基底という基底で電子の場を展開してきた。ノイマン格子基底は電子の運動エネルギーの固有関数と電子の古典的なサイクロトロン運動の中心を示す中心座標演算子のコヒーレント状態の直積で張られる関数空間だ。この基底を使うと電子間相互作用を扱う際に、各ランダウ準位への射影が明確になるだけでなく運動量空間を二つの方向に対称にとれる。二つ目にあげた対称な運動量空間というのは磁場中の電子の運動を磁場が無い場合と比較して議論するのに非常に便利だ。ノイマン格子以外では磁場がない場合との対応は明快ではなく、ノイマン格子基底を使った量子ホール系の解析は本研究の特色の一つになっている。

ストライプホールガスをはじめとして、磁気並進対称性を自発的に破るような状態は電気抵抗以外で最も測りやすいとされる励起エネルギーの測定ですら測定が難しい。そのため縦抵抗率の強い異方性等の異方的な状態が本当に自発的に起きているのか実は未だ立証されていない。事実われわれの他にストライプ状態を研究しているグループの中には、外部ポテンシャルの束縛が強い異方性を造ると主張するものもある。これまでに外部ポテンシャルのモデルと我々のモデルとでは、励起スペクトルが理論的に異なることがわかっている。本研究の目的は励起スペクトルに強く依存する物理量を提案し、磁気並進対称性の破れに起因する励起スペクトルを測定するように呼び掛けることで、異方的な状態の原因が対称性の自発的破れだと明らかにすることだ。

我々が提案する励起スペクトルに強く依存する物理量とは、光子エネルギーの吸収率である。量子ホール系に外から電磁波をかけると、電子系が光子エネルギーを吸収する。一方で電子系の励起スペクトルは光子の波数に依存する。励起スペクトルの違いが光子エネルギー吸収率に現れるのだ。吸収率は電子系の遷移確率に光子のエネルギーを乗じたものだが、量子ホール系では磁場のために遷移確率が自明ではなくなる。磁場のために量子ホール系カレント代数は非可換になる。この非可換代数が本研究の定式化の鍵となった。

対称性の保存カレントのカレント代数を用いて磁気並進対称性を自発的に破る状態を定義して光子エネルギー吸収率の一般形を定式化した。磁気並進の生成子の固有値がトライプホールガス等の自発的に磁気対称性を破る状態の良い量子数になっている。これが本研究の最も独創的な点だ。この定式化はストライプホールガス以外の場合の励起スペクトルの解析にも適応できる。

一般にゲージ場の対称性が自発的に破れる場合には南部-ゴールドストン (NG) モードというゼロエネルギー励起が存在することが知られている。以前の我々の研究で磁気並進対称性という空間のもつ対称性の場合にも NG モードがあることが明らかになっている。本研究ではストライプホールガスの自発的対称性の破れの検証のために、NG モードの光子エネルギー吸収率を得た。ストライプホールの NG モードのスペクトルは近似の範囲でしか得られていない。したがって NG モードの量子数を近似的に与えた。手法としては基底状態を電子間クーロン相互作用の平均場近似で求め、NG モードをストライプホールガスが様な波数で揺らぐという描像の変分法である単一モード近似 (SMA) で求めた。我々はこれまで SMA を用いた研究により、独自のスペクトルを得ている。SMA のスペクトルはゼロエネルギー励起の中で最も安定なものになっている。ストライプホールガスが測定されるような極低温ではランダウ準位の開きが電子間相互作用エネルギーより遥かに大きいと考えられる。したがってランダウ準位を固定し、平均場理論を用いると等方的電子密度波 (UCDW) が安定な解になる。本研究では UCDW を SMA を使って NG モードの量子数を定量化し、NG モードの光子エネルギー吸収率を得た。

ランダウ準位を射影すると、カレント相関関数の虚部は長波長極限でゼロになる。したがって、光子エネルギー吸収率は一見ゼロになるように見える。しかしながら長波長極限では光子の周波数は NG モードの周波数と等しくなるから光子エネルギー吸収率の分母もゼロになる。このため光子吸収率は長波長極限で有限値をとりうる。実際に我々は NG モードの周波数で激しい電磁波吸収があることを示した。さらに得られた光子エネルギー吸収率が入射波の方向に強く依存することを明らかにした。

以上をまとめると、本研究は磁気並進対称性が自発的に破れた場合の光子エネルギー吸収率の一般的な定式化を与えた。さらにストライプホールガスでは長波長極限での異方的な電磁波吸収がある事を示し、自発的対称性の破れの兆候を表す物理量を提案した。したがって本研究は縦抵抗率の異方性の起源が自発的対称性の破れだということを明らかにするために重要なものである。

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	大西明
副査	助教授	中山隆一
副査	助教授	鈴木久男

学位論文題名

Spontaneous symmetry breaking and photon energy absorption rate of striped Hall gas

(ストライプホールガスの自発的対称性の破れと光子エネルギー吸収率)

極めて高い移動度を有する量子ホール系で抵抗の大きな異方性をもつ量子ホール状態が最近見つかった。この状態に関して多くの研究がなされてきたが、この状態の完全な解明にはまだ至っていない。申請者は平均場理論に基づき、異方的性質を持つ量子ホールガス状態の特異な長波長の光吸収を理論的に研究していくつかの新たな知見を得た。

量子ホール系では電子の一粒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。またこの物理系は他の電子系と同じに空間の回転や平行移動についての不変性を有する。電子間相互作用により、多電子凝縮状態の縮退は通常は破れ、またさらにハミルトニアンが持つ上記対称性を自発的に破る基底状態が実現することがある。この時、零エネルギー励起状態が発現し、系の性質に特異な大きな寄与を与える。

申請者は量子ホール系における回転対称性や平行移動に対する対称性を自発的に破る物理状態が持つ南部ゴールドストーン零励起モードの光吸収の寄与を解明し、量子ホール系で良く知られたコーンの定理との関連を明らかにした。磁場中で電流演算子は相互作用する電子系に対するエネルギーを昇降させる演算子でもある。長波長の光はこの演算子を通して電子系と相互作用する間隔でサイクロトロンのエネルギー間隔は、磁場の強さに比例し相互作用に依存しない。これがコーンの定理である。ハミルトニアンで対称性である回転対称性や平行移動対称性を相互作用で自発的に破っている多体状態である異方的多体ガス状態は、南部ゴールドストーン定理により零エネルギー励起モードを持つ。量子ホール系では、磁場のため二つの直交する平行移動は非可換になり、またランダウ準位にある電子の位置を決める中心座標が非可換である。その為、量子ホール系における対称性の破れに伴う南部ゴールドストーン定理並びに零エネルギーモードの性質は磁場の物理系とは大きく異なる。申請者は、今までの解明されていなかったこの性質の零エネルギー励起が光吸収に及ぼす効果を明らかにした。この問題を理論的に研究するにあたり、申請者はまず量子ホール系に於ける空間周期性を考慮に入れて電流励起モードの定式化と、南部ゴールドストーン定理を満たす粒子の寄与を求めた。サイクロトロンの励起モードの有限な効果を与えることとを明らかにした。これらの結果は、南部ゴールドストーン粒子のスペクトルが特異であることにより、異方的な量子ホールガス状態が解明されることを期待する。

れ、実験的な検証が待たれている。

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光吸収にかんする重要な性質を解明した。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。