

## 2層系の量子ホール効果

大学院理学研究科 澤田安樹 (sawada-a@mail.cc.tohoku.ac.jp)

### 1. 量子ホール効果について

量子ホール効果は、半導体界面に理想的2次元電子状態が実現することによって低温強磁場で起こる特異な現象です。ホール抵抗  $R_H$  の逆数が  $1/R_H = \nu e^2/h$  と量子化し、ランダウ準位占有率と呼ばれる  $\nu$  が整数の場合を整数量子ホール効果、分数の場合を分数量子ホール効果と言います。1985年と1998年にそれぞれの発見者がノーベル物理学賞を受賞したことで量子ホール効果もすっかり有名になりました。

この整数量子ホール効果と分数量子ホール効果を統一的に理解する方法として複合粒子モデルという考え方があります。2次元空間で電荷をもったフェルミオンである電子が磁場で運動する時、アハラノフ・ボーム効果によって波動関数の位相が、磁束量子1本につきフェルミオン1個と位置交換したことに相当する変化をします。そこで、偶数個の磁束量子と電子を合わせて複合フェルミオンと考えることができます。ランダウ準位占有率は、電子密度  $n_e$  と磁束量子数密度  $n_\phi$  を用いて  $\nu = n_e/n_\phi$  と書けるので、例えば、占有率  $\nu$  が  $1/2$  の時、電子1個に磁束量子2個が対応します。この場合、電子1個と磁束量子2個が結合した複合フェルミオンに作用している有効磁場はゼロになります。磁場がこの値からずれると有効磁場はゼロではなく本来のゼロ磁場から出発したと同じように複合フェルミオンの整数量子ホール効果が繰り返されるとして分数量子ホール効果を説明することができます。

一方、電子に奇数個の磁束量子が対応している量子ホール状態は、有効磁場ゼロでの複合ボソンのボーズ凝縮状態とみなすことができます。しかし、その確かな実験的証拠がまだないのです。

### 2. なぜ2層系の量子ホール効果か

量子ホール状態は非圧縮性と呼ばれる電子数の確定した状態であるため、ボーズ凝縮状態であったとしても、電子数のゆらぎがゼロのため不確定性関係からマクロな位相が定まりません。従ってボーズ凝縮特有のジョセフソン効果のような現象が観測できないので、量子ホール状態を複合ボソンのボーズ凝縮状態と捉えることが本当に妥当なのか調べる実験がないのです。そこで、素粒子理論研究室の江澤さんは、2層系の量子ホール状態ではマクロな位相が定まり、ボーズ凝縮特有の現象が観測さ

れるのではないかとアイディアを出しました [1]。そのことを少しだけ説明しておきます。もう少し詳しくは参考文献 [2] に解説を書いています。

ラフリンの波動関数と呼ばれる多体の波動関数を用いて2層系の量子ホール状態も記述されるのですが、式を使わず視覚的に解るように図1に特徴的な量子ホール状態を模式的に書いてみました。(a)は層間の相互作用が弱いために、それぞれの層で独立に量子ホール状態を形成している状態であり、独立2層量子ホール状態と呼んでいます。(b)は強い層間クーロン相互作用があるときに安定化する量子ホール状態、強相関2層量子ホール状態と呼びます。強相関2層量子ホール状態は、両層の電子密度差によらず安定な状態です。その詳しい説明は5.で実験結果と比較しながらします。

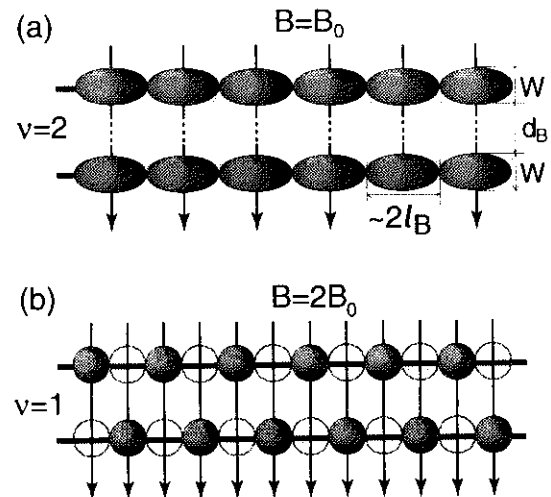


図1. 2層系の量子ホール状態。2層間の電子密度が等しい場合の典型的な量子ホール状態である  $\nu=2$ 、1の電子軌道と磁束量子の関係を示しました。矢印は一本の磁束量子を示しています。黒丸は電子が存在することを示し、白丸は別な層の電子の存在を認識する軌道の大きさ（空孔）を示します。 $\nu=2$ の状態は、白丸がないので独立にそれぞれの層で量子ホール状態を形成しています。 $\nu=1$ の状態は、強い層間クーロン相互作用によって安定化した量子ホール状態です。 $W$ と  $d_B$  は伝導層および障壁の幅を示します。 $l_B$  は電子のラーモア半径を示します。

電子密度差の揺らぎが許される強相関2層量子ホール状態では、電子密度差を  $n_d$ 、マクロな位相差を  $\theta_d$  とすると、 $\Delta n_d$  はゼロでなくなり、不確定性関係  $\Delta n_d \Delta \theta_d \geq 1$

から  $\Delta\theta_d$  も有限の小さな値にすることが可能になります。従ってこの様な2層系量子ホール状態では、超伝導と同じようにボーズ凝縮特有のマクロ・コヒーレンスが存在する可能性があります。マクロ・コヒーレンスは超流動性やジョセフソン効果などボーズ凝縮特有な現象の起源です。これが2層系量子ホール効果の研究にこだわるゆえんです。研究はマクロ・コヒーレンスを求めてまだ発展途上段階ですが、すでいくつか面白い結果が得られました。それについて次に紹介致します。

### 3. 試料について

量子ホール効果の研究を行うには高い移動度の試料を必要とします。この実験では GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As の超格子を、分子線エピタキシーと呼ばれる高性能な蒸着装置で成長させて製作します。x を 0 から 1 まで変えることにより、ポテンシャル井戸の深さを 0 から 1.35 eV の範囲で変えることができるので、種々の深さと幅のポテンシャル井戸の伝導層を自由に作ることができます。余談になりますが、携帯電話のマイクロ増幅をする高移動度トランジスタ (HEMT) と呼ばれる素子もこのような超格子からできております。30 年も前に当時は奇抜な超格子のアイデアを提案した江崎玲於奈先生の偉大さを感じます。

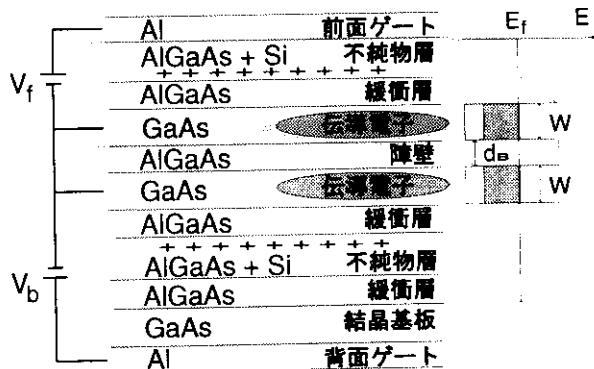


図 2. 試料構造図。GaAs 基板上に GaAs と AlGaAs を積層し、GaAs 層に伝導電子層を作ります。前面および背面ゲートの電圧  $V_f$ ,  $V_b$  をかけることにより、電子密度を独立に変化させることができます。

2層系試料の構造は図2のようになっています。GaAs のエネルギーギャップは AlGaAs より小さいので、GaAs のギャップ上のバンドが、電子の存在しない最もエネルギーの低い状態です。従って、上下の不純物層に入っている Si から放出された電子が GaAs のギャップの上にあるバンドに入り込み伝導層を形成します。本研究で用いた試料の伝導層の厚みは  $W = 200 \text{ \AA}$  であり、障壁の厚みは  $d_B = 31 \text{ \AA}$  です。この様にキャリアの供給層と伝導層が分離した構造を持つことにより、高い移動度を持つ試料を製作することができます。興味に応じて自由に試料のパラメータを変えることができることがこの様な試料の大きな魅力です。

### 4. 測定結果

14.5 tesla の超伝導マグネットでは磁場を加え、マグネットの中心に位置する希釈冷凍機の混合器の底に試料を入れて実験を行っています。(図3参照)。測定は、20 nA 程度の電流でロックインアンプを使用します。

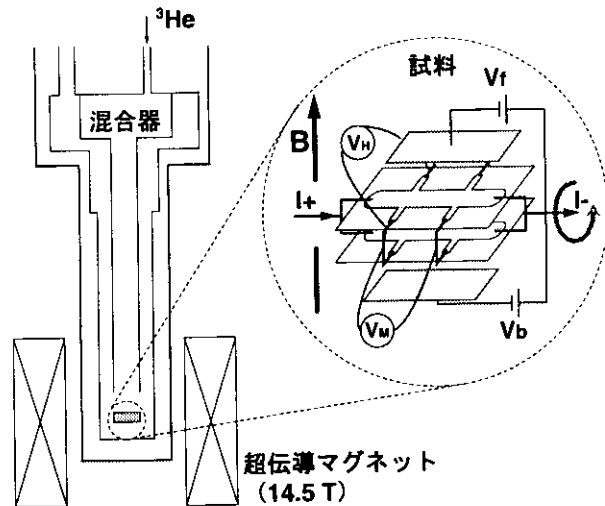


図 3. 実験及び測定装置概念図。試料はマグネットの磁場中心に置いています。磁気抵抗およびホール抵抗はそれぞれ  $V_M$  と  $V_H$  の測定から求めます。超伝導ゴニオメータ [3] で試料の磁場に対する方向を変えて、電子面に平行な磁場を加えることができます。

図4は温度 30 mK でゲート電圧を調整して総電子密度  $n_t$  を一定に保ちながら、種々の電子密度差で量子ホール効果の測定を行った結果の一例です [4]。横軸のゼロから始まる曲線が等電子密度の場合の結果であり、その線から左右に離れる線ほど電子密度差の大きな場合の実験結果を示します。この例では、ランダウ準位占有率  $\nu = 2/3$ , 2 状態において等電子密度付近でのみ量子ホール状態が現れていることを示し、 $\nu = 1$  では密度差に関係なく安定であることが判ります。

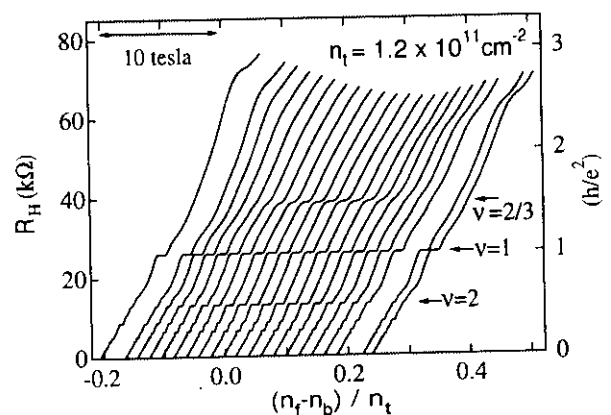


図 4. ホール抵抗の磁場変化。2層の総電子密度を一定に保ちながら電子密度差を変えて、繰り返しホール抵抗の磁場変化を測定した結果です。横軸は規格化した電子密度差  $(n_f - n_b) / n_t$  に比例させて磁場の原点を移動して図示してあります。

この様な測定をいろいろな総電子密度で行い、量子ホール状態の幅（プラトー幅）を縦軸に取り、図示したのが図5です。 $\nu = 2/3$ は等電子密度でピークを作り、総電子密度が小さくなるとともにピークも小さくなり終いには消えてしまいます。2層それぞれが量子ホール状態を生じる電子密度を満足する条件が重なったときのみ量子ホール状態が発生しているので、従って $\nu = 2/3$ は両層がそれぞれ $\nu = 1/3$ を形成した独立2層量子ホール状態の振る舞いとして説明できます。

一方、 $\nu = 1$ は等電子密度で極小値をもち、総電子密度が大きくなるとともに極小値はさらに小さくなり終いには消えてしまいます。この振る舞いを、 $\nu = 1$ が強相関2層量子ホール状態にあるとして理解できます。詳しくは次節で説明します。

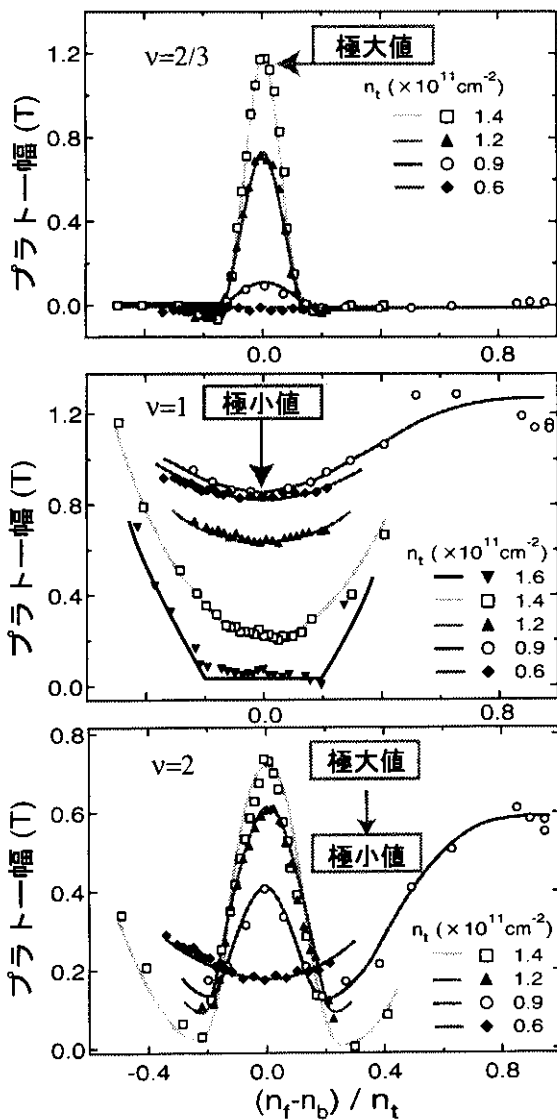


図5. 総電子密度一定での2層の電子密度差に対するプラトー幅の変化。3種類の量子ホール状態について、総電子密度が一定になるように前面ゲート電圧  $V_f$  と背面ゲート電圧  $V_b$  を同時に変化させて量子ホール効果の測定を行い、両層の電子密度差に対する量子ホール状態のプラトー幅を調べ図示しました。

$\nu = 2$ は $\nu = 1$ と $\nu = 2/3$ の性質を合わせたような複雑な変化を示します。それは極大値から極小値へ変わることによって示されているように $\nu = 2$ 状態は総電子密度を小さくしていくとともに独立2層量子ホール状態から強相関2層量子ホール状態へ相転移することを意味しております。この様な相転移は、横磁場を加えてゼーマンエネルギーを増加させることによって起こります[5]。

### 5. 強相関2層量子ホール状態

強相関2層量子ホール状態と称した状態について、前節の実験結果と対比しながら、もう少し詳しく説明します。2層系量子ホール状態 $\nu = 1$ についてあらゆる電子密度差で安定であることを模式的に示したのが図6です。図6(a)は図1(b)と同じです。(b)は前面層の電子密度を背面層の2倍にした場合です。(c)は前面層に全ての電子が集まった場合で1層系の $\nu = 1$ 状態と同じものです。従って(a)から(c)の状態は、電子密度差は異なりますが、連続的につながったひとつの2層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態であるとして図5(b)の振る舞いを説明できます。安定性も層内と層間のクーロン相互作用の大きさの比で決定するので、バランス点(a)が一番不安定であり、層間クーロンエネルギーが無くなる(c)が一番安定になるので実験結果を説明できます。また、 $\nu = 2$ の強相関2層量子ホール状態は、スピン自由度により、2重に $\nu = 1$ 状態のような電子状態が出現することによって説明できます。繰り返しになりますが、この量子ホール状態では電子密度差のゆらぎが許されますので、マクロ・コヒーレンスの存在が期待できます。

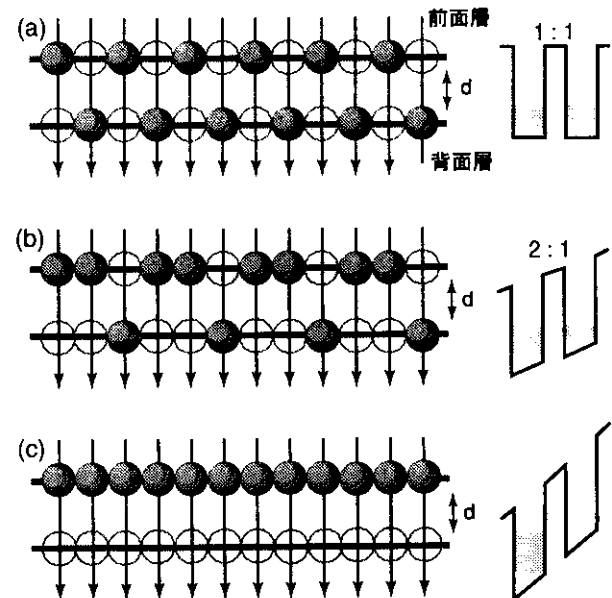


図6. 強相関2層系 $\nu = 1$ における電子状態。この状態では2層の電子密度差は如何なる値でも取ることがができます。(a)は等しく、(b)は前面層に2倍、(c)ではすべての電子が前面層にある場合です。

## 6. 多数の強相関2層量子ホール状態

$\nu = 1$  と  $\nu = 2$  状態に如何なる電子密度差でも安定に存在する性質を見つけ大いに感激したのですが、もっと他にもあるのではないかとさらに興味がわいてきます。

ここまで紹介した実験に用いた試料の移動度は、 $0.3 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  でした。次に紹介する示す実験に用いた試料の移動度は1桁大きな  $2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  で、現在のところ2層系試料としては最も良質です。

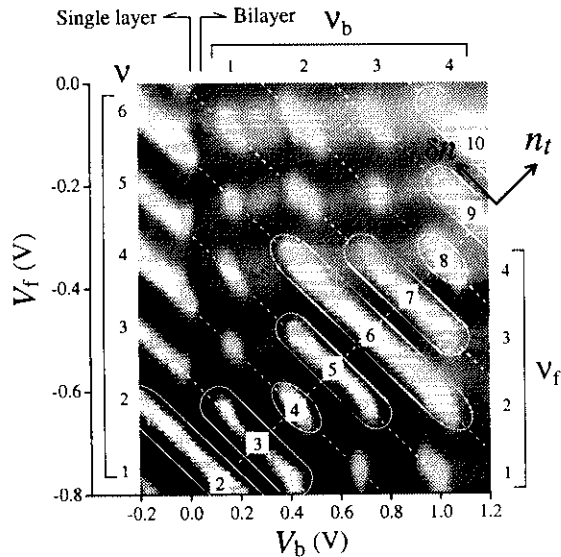


図7. 一定磁場 (1.4 tesla) における磁気抵抗の電子密度依存性。白い部分は磁気抵抗が小さく、黒い部分は磁気抵抗が大きいかを示します。横軸は背面ゲート電圧ですが、背面層の電子密度に相当します。同様に縦軸は前面ゲート電圧ですが、前面層の電子密度に相当します。 $n_t$  に向かう直線上は等電子密度であり、右上にいくほど総電子密度の大きくなります。左上がりの直線上は総電子密度一定です。

図7に示す実験は一定の磁場中で、前面層と背面層の電子密度を変えながら磁気抵抗の変化を測定したものです [6]。横軸は背面ゲート電圧ですが、背面層電子密度に相当します。縦軸もやはり前面ゲート電圧ですが、前面層電子密度に相当します。量子ホール状態にあるときは磁気抵抗が小さくなりますので白い部分は量子ホール状態にあることを意味します。図中の数字はランダウ準位占有率を示しており、 $\nu = 2, 3, 5, 6, 7, \dots$  に電子密度差を変化させても安定な量子ホールが存在します。また、 $\nu = 4, 8, \dots$  には密度差に依らない安定性が存在しないことが判ります。従って  $\nu = 4N - 3, 4N - 2, 4N - 1$  ( $N$  は自然数) で表される多数の占有率に電子密度差のゆらぎが許される強相関2層量子ホール状態が存在することが明らかになりました。この周期性は、ひとつのランダウ準位がスピンとトンネル効果によって4準位に分裂することによって説明できます。また試料の質の向上が、より普遍的な実験結果をもたらすことが解ります。

## 7. 次の目標

電子密度差のゆらぎが許される強相関2層量子ホール状態に、期待通り超伝導体のようなマクロ・コヒーレンスが存在するのか調べる必要があります。マクロ・コヒーレンスがあるとプラズモン励起と呼ばれる密度差と位相差の固有振動モードが存在するので、**プラズモン励起の存在を調べ**ことは有力な実験方法です。超伝導では2個の電子が対を作ってボソン化してボーズ凝縮していますが、量子ホール状態では、1個の電子と磁束量子がいつしよになってボーズ凝縮を起こしていることを実験で示せたなら何と奇想天外で面白いことでしょうか。

強相関2層量子ホール状態に焦点を絞って紹介しましたが、独立2層状態の研究でも興味深い結果が得られています [7]。スカーミオンと呼ばれるスピンの同時集団反転励起が量子ホール状態に存在します。独立2層量子ホール状態では、電子の層間トンネルによって前面層と背面層で同時にスカーミオンが励起するために、スピン反転数がさらに2倍に増大するのです。

## 謝辞

ここに紹介致しました研究は、N T T物性科学基礎研究所の平山祥郎さんのグループ、本学電気通信研究所の大野英男さんのグループ、素粒子論研究室の江澤潤一さん、および低温物理学研究室の院生との共同研究の成果です。この研究は大量の液体ヘリウムを長期にわたって使用します。極低温科学センターからの安定した寒剤の供給があつて実験を行うことができました。

## 参考文献

- [1] Z.F. Ezawa, and A. Iwazaki, Phys. Rev. B **47** (1993) 7295.
- [2] 澤田安樹、江澤潤一、大野英男 固体物理 **32** (1997) 941.
- [3] M. Suzuki, A. Sawada, A. Ishiguro and K. Maruya, Cryogenics **37** (1997) 275.
- [4] A. Sawada, Z.F. Ezawa, H. Ohno, Y. Horikoshi, Y. Ohno, S. Kishimoto, F. Matsukura, M. Yasumoto and A. Urayama, Phys. Rev. Lett. **80** (1998) 4534.
- [5] A. Sawada, Z.F. Ezawa, H. Ohno, Y. Horikoshi, A. Urayama, Y. Ohno, S. Kishimoto, F. Matsukura and N. Kumada, Phys. Rev. B **59** (1999) 14888.
- [6] K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, N. Kumada, A. Sawada and Z.F. Ezawa, Solid State Commun. **112** (1999) 625.
- [7] N. Kumada, A. Sawada, Z.F. Ezawa, S. Nagahama, H. Azuhata, K. Muraki, T. Saku and Y. Hirayama, cond-mat/0004259.