

2 層 2 次元電子系における新しい量子ホール状態

東北大学 理学部 澤田 安樹¹

2 層 2 次元電子系の磁場中での電気伝導特性の測定を行い、従来報告されている量子ホール状態と全く異なる新しい量子ホール状態 $\nu = 2$ を観測した。実験結果は、電子密度差と横磁場に対する振る舞いからマクロ・コヒーレンスを持つ状態であることを示唆しており、今後、理論・実験の両面から研究する必要のある量子ホール状態である。

1 はじめに

量子ホール効果と超伝導には、多くの類似性があることが知られている。典型例は、縦磁気抵抗がほとんどゼロでありエネルギー散逸を伴わない電流が流れることである。理論的にも、量子ホール状態を電子と奇数個の磁束量子を合わせた複合ボソンのボーズ凝縮状態と捉える考え方もある。一方大きな相違点は、超伝導状態が圧縮性状態であるのに対し、量子ホール状態は電子密度の揺らぎのない非圧縮性状態である。従ってこの様な系では、ハイゼンベルグの不確定性原理により共役量の位相の揺らぎが無限大となり、たとえボーズ凝縮状態でも超伝導で見られるようなマクロ・コヒーレンス現象は期待できない。

さて、2 次元電子を近接して配置した系において、1 層系と異なる量子ホール状態ができることが知られている。特に 2 層間のクーロン相互作用が層内のクーロン相互作用と同等な大きになると、層内と層間の電子が同等な役割をして 2 層の電子がひとつの量子ホール状態を形成する。この量子ホール状態の場合には、層間の密度差の自由度が存在し、その共役量の位相差も存在できる。従ってこの系では超伝導と同様にマクロ・コヒーレンス現象が存在する可能性があることが理論的に指摘されている [1]。

我々は 2 層系量子ホール状態にマクロ・コヒーレンスが存在する事を検証するために、2 層の電子密度差と横磁場を変数として電気伝導特性の実験を行ってきた。横磁場を加えることは、層間の位相差を変えることに対応する。その結果、電子密度差を変えることが「コヒーレント」量子ホール状態を識別する極めて有効な実験手段であることを初めて明らかにした。さらに、 $\nu = 1$ だけではなく低電子密度の $\nu = 2$ 状態が意外にも「コヒーレント」量子ホール状態であることが解った。この状態は、これまで理論的予想も実験もないスピン状態の異なる 2 種類ラフリン状態の重ね合わせからなる全く新しい量子ホール状態と考えられる。

¹ E-mail:sawada-a@mail.cc.tohoku.ac.jp

2 実験方法

本実験に用いた試料は、GaAs 系超格子で井戸幅 200 Å、障壁幅 31 Å、トンネルギャップ 6.8 K、移動度 $3.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ である。2 層の電子密度は、両面のゲート電圧により変えることが可能である。

試料は、希釈冷凍機の混合器中に入れ超伝導マグネットにより最大 13.5 T の磁場をかけることができる。また、試料はゴニオメータの上ののっており磁場に対して自由に傾けることにより、試料に平行な磁場を加えられる。磁気抵抗やホール抵抗の測定は、ロックインアンプを用いて 16 Hz, 100 nA の微小電流で行った。

3 実験結果 A

図 1 は、代表的な量子ホール状態のホールプラトー幅の 2 層の電子密度差依存性を示す [2]。ホールプラトー幅の定義は参考文献 [3] に詳しく書いてある。 $\nu=2/3$ の状態は、2 層がほぼ等電子密度の場合にのみプラトー幅が広く安定で、かつ総電子密度が減少すると不安定になる。この量子ホール状態は、各層 $\nu=1/3$ 状態の重ね合わせからなるコンパウンド量子ホール状態として理解できる。

$\nu=1$ 状態は、総電子密度が減少すると 2 層の電子密度差が如何なる場合にも安定になる。また、密度差が大きいほど安定になり、完全に片側の層に偏った 1 層系の $\nu=1$ 状態へ連続的に移行する。この量子ホール状態は、後で議論するように「コヒーレント」量子ホール状態として解釈できる。

総電子密度が大きい $\nu=2$ 状態は $\nu=2/3$ と同様に各層 $\nu=1$ のコンパウンド状態と考えられる。総電子密度が減少すると、 $\nu=1$ 状態と同様な 2 層の電子密度差が如何なる場合にも安定な「コヒーレント」状態になる。すなわち、総電子密度の変化によりコンパウンド状態から「コヒーレント」状態へ相転移することを意味している。また活性化エネルギーの測定でもホールプラトーと同様な振る舞いを示した [2]。

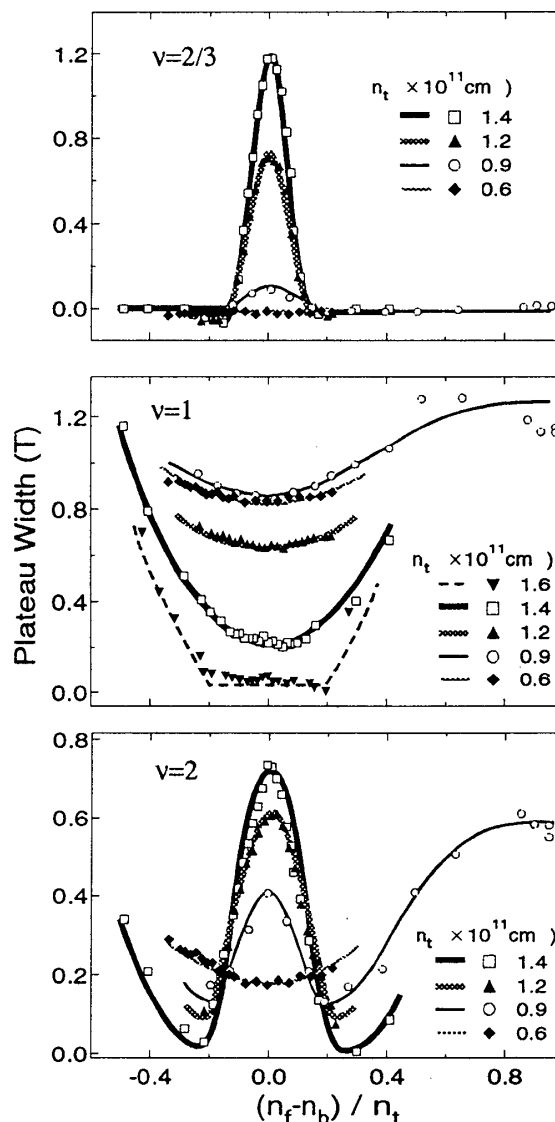


図 1: 総電子密度を固定して電子密度差を変化させたときの 50mK における各量子ホール状態におけるホールプラトー幅の変化。線は単なるガイドラインである。各量子ホール状態により顕著な電子密度差依存性がある。

4 コヒーレントな量子ホール状態

さて2層系の量子ホール状態は、ラフリンの波動関数を応用したハルペリンの波動関数 [4] によって記述できることが知られている。

$$\psi \propto \prod_{i<j} (z_i - z_j)^{m_f} \prod_{k<l} (z_k - z_l)^{m_b} \prod_{i,k} (z_i - z_k)^m \exp\left(-\sum_{i=1}^{N_f} \frac{|z_i|^2}{4\ell^2} - \sum_{k=1}^{N_b} \frac{|z_k|^2}{4\ell^2}\right) \quad (1)$$

ここで N 、 ℓ は電子数、磁気長、また f 、 b の添え字はそれぞれの層を示す。2層間のクーロン相互作用が弱いとき、相対角運動量 $m = 0$ となり、独立な2層の量子ホール状態の重ね合わせ、すなわちコンパウンド状態を記述している。2層間のクーロン相互作用が層内のクーロン相互作用と同じ程度に強いとき、 $m_f = m_b = m$ となり、2層の電子がお互いに補いあってひとつの量子ホール状態を作る。この状態で注目すべきことは、電子が2層のどちらに存在しても量子ホール状態が保たれることである。すなわち図2に示す $m_f = m_b = m = 1$ 状態のように各電子がどちらの層にあってても安定な量子ホール状態になる。この性質は、まさに我々が実験から見出した「コヒーレント」 $\nu = 1$, 2 量子ホール状態の性質と対応している。

量子ホール状態は、奇数個の磁束量子と電子を組み合わせるとひとつの粒子とみなすと、アハラノフ・ボーム効果によりボソンの交換関係を満たすことから、

ボーズ凝縮状態とみなすことができる。しかし、非圧縮性状態であるためマクロな位相の揺らぎが大きくなりマクロ・コヒーレンス現象は存在しない。しかし、2層系の「コヒーレント」量子ホール状態の場合、2層の電子密度差が如何なる場合にも量子ホール状態が保たれるので、電子密度差の自由度が存在する。従って、2層の位相差の揺らぎも小さくなりマクロコヒーレンス現象が存在する可能性がある [1]。これが、我々が「コヒーレント」量子ホール状態と呼ぶゆえんである。しかし、マクロコヒーレンスが存在するかは実験によって確かめなければならない。

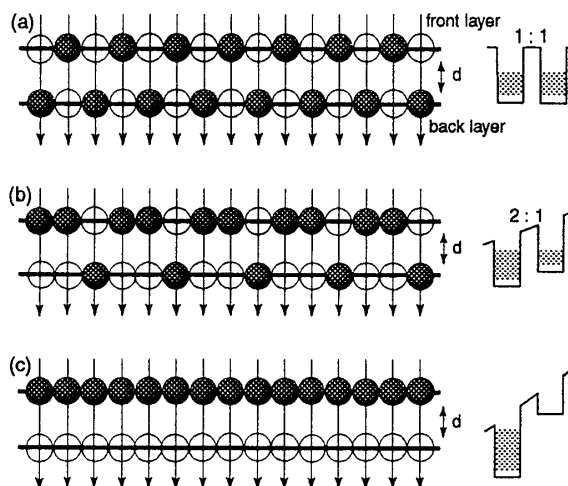


図2: 「コヒーレント」2層系 $\nu = 1$ における電子密度。この相では2層での電子密度の比は自由である。(a)は1:1、(b)は2:1、(c)では全ての電子が一層に移動している。安定性は層内と層間のクーロン相互作用の大きさの比で決まるから、バランス点(a)が一番不安定であり、層間クーロンエネルギーが無くなる(c)が一番安定である。

5 実験結果B

2層系量子ホール効果 $\nu=1$ の特有な活性化エネルギーの横磁場依存性 [5] は、層間コヒーレンスの存在によって説明されている [6]。従って「コヒーレント」量子ホール状態に同様な横磁場依存性が存在することを実験的に確認できれば層間コヒーレンスの存在の強い証拠になる。

図2は、様々の総電子密度と電子密度差で $\nu=2$ 状態のホールプラトー幅の角度依存性を示した [7]。高い総電子密度でかつ2層の電子密度がほぼ等しいとき、プラトー幅は角度とともに増加する。これは1層系 $\nu=1$ 状態のスカームオン励起のエネルギーギャップの振る舞いと対応づけることができる。また低い総電子密度もしくは大きな電子密度差がある場合には、横磁場が無いときに極大を示す。さらに、総電子密度が高い場合には40度付近で量子ホール状態は壊れる。総電子密度が低い場合には異なる横磁場依存性をもつ状態へ転移する。この振る舞いは、 $\nu=1$ 状態と極めて類似している。また、活性化エネルギーの測定からも同様な安定性の振る舞いを観測した [7]。

この転移は $\nu=1$ 状態において commensurate 相と incommensurate 相間の転移として説明されている [6]。「コヒーレント」 $\nu=2$ 量子ホール状態の、incommensurate 相のプラトー幅は角度とともに増大する特徴をもつ。これは「コヒーレント」 $\nu=1$ 状態と際だった相異である。これは、incommensurate 相へ転移することにより、エネルギーレベル交差が生じ、 $\nu=1$ 状態の場合にはスピン反転しない、 $\nu=2$ 状態の場合にはスピン反転する励起となることを示している。

6 結論

量子ホール状態の安定性の密度差依存性を調べる実験と横磁場依存性を調べる実験から、「コヒーレント」量子ホール状態は密度差と位相差に対して同時に任意の値をとれるコヒーレントな量子ホール状態であることを示唆している。特に $\nu=2$ 状態は、理論的予測さえ

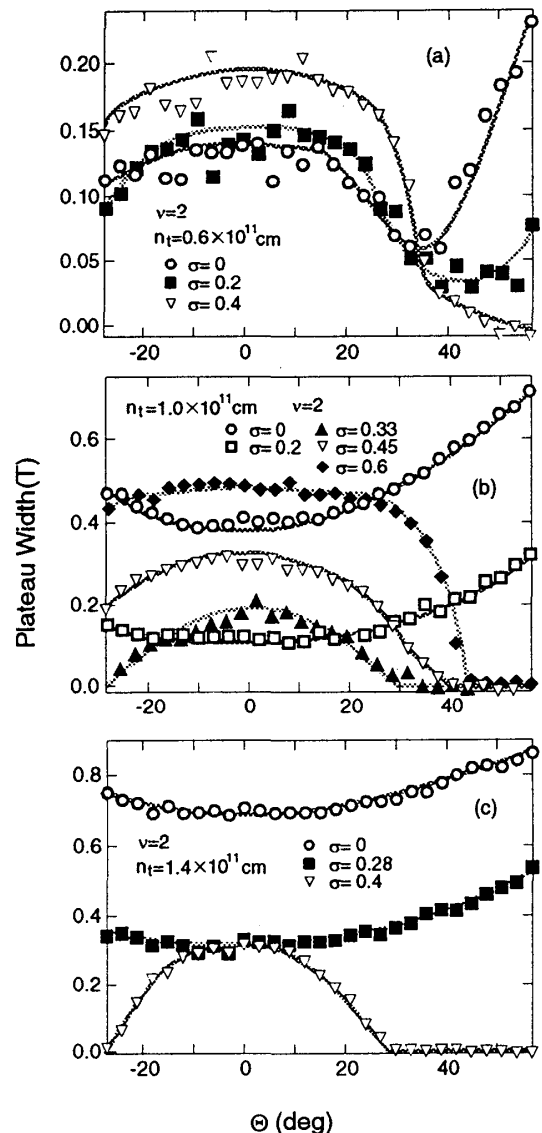


図3: 様々の総電子密度 n_t と電子密度差 σ における 50mK での $\nu=2$ 量子ホール状態のホールプラトー幅の角度依存性。線は単なるガイドラインである。

なかった全く新しい量子ホール状態である。

謝辞

本研究は、東北大学理学部、江澤潤一、浦山敦史、熊田倫雄、東北大学電気通信研究所、大野英男、松倉文礼、大野祐三、岸本修也、早稲田大学理工学部、堀越佳治氏らとの共同研究である。

参考文献

- [1] Z. F. Ezawa and A. Iwazaki, Int. J. Mod. Phys. B **6**(1992), 3205; Phys. Rev. B **47**(1993), 7295; *ibid.* **48**(1993), 15189.
- [2] 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.
- [3] A. Sawada, Z.F. Ezawa, H. Ohno, Y. Horikoshi, O. Sugie, S. Kishimoto, F. Matsukura, Y. Ohno and M.Yasumoto, Solid State Commun. **103**(1997), 447.
- [4] R.B. Laughlin, Phys. Rev. Lett. **50**(1983), 1395; B.I. Halperin, Helv. Phys. Acta **56**(1983), 75; F.D.M. Haldane and E.H. Rezayi Phys. Rev. Lett. **60**(1988), 956.
- [5] S.Q. Murphy, J.P. Eisenstein, G.S. Boebinger, L.N. Pfeiffer and K.W. West, Phys. Rev. Lett. **72**(1994), 728.
- [6] K. Yang, K. Moon, L. Zheng, A.H. MacDonald, S.M. Girvin, D. Yoshioka and S.C. Zhang, Phys. Rev. Lett. **72**(1994), 732; K. Moon, H. Mori, K. Yang, S.M. Girvin, A.H. MacDonald, L. Zheng, D. Yoshioka and S.C. Zhang, Phys. Rev. B **51**(1995), 5138.
- [7] A. Sawada, Z.F. Ezawa, H. Ohno, Y. Horikoshi, A. Urayama, Y. Ohno, S. Kishimoto, F. Matsukura and N. Kumada, preprint cond-mat/9812064.