

論文の内容の要旨

論文題目 核スピン偏極をプローブとする
量子ホール系エッジ状態の研究

氏名 中島 峻

概要

GaAs/AlGaAs ヘテロ接合界面に生じる二次元電子系に強磁場を印加し整数量子ホール効果を起こすと、試料端に沿って一次元状の電子状態が形成される。この状態は“エッジ状態”と呼ばれ、優れたコヒーレンスと制御性を兼ね備えているため、さまざまな量子デバイスへの将来的な応用が期待されている。さらに基礎物性物理の観点からも、近年、量子スピンホール効果やトポロジカル絶縁体といった広範な現象において類似のエッジ状態が本質的な役割を果たしていることが認識され、整数量子ホール効果の枠組みを越えてエッジ状態の基礎的な理解の重要性が増してきている。

エッジ状態の重要性が広く知られてから既に20年以上が経つが、一般的にエッジにおける電子状態は、交換相互作用を無視した一電子モデルで成功裡に理解されてきた。しかし近年、エッジ状態の干渉実験やエネルギー緩和の測定を通じて、エッジ状態においても多体効果が顕在化することが明らかになりつつあり、伝統的な描像の見直しがせまられている[1,2]。理論的には、交換相互作用を取り入れることによって“spin-textured edge”と呼ばれる状態が実現されるということが既に予想されていたが[3-6]、既存の実験方法ではこれを検証することができなかった。エッジ状態は試料の端に沿ってわずか数百ナノメートルの領域にしか存在せず、この微小な領域で電子スピンの空間分布を検出することは非常に困難だったのである。

筆者らはこれまでの研究で、エッジチャンネル間の電子散乱を利用することにより、エッジ近傍の核スピン偏極を生成し、 ~ 30 nm の分解能で核スピン偏極の空間分布を測定する技術を開発した[7,8]。本研究ではこの技術を応用し、核スピン偏極をプローブとして用いることにより、エッジにおける電子

スピンの状態をナノメートルスケールの空間分解能で検出することに成功した。核スピン偏極がエッジ状態と特定の条件下で接触した際に、その緩和時間が劇的に促進されることを見出され、これは spin-textured edge 状態の形成を示唆している。さらにエッジの閉じ込めポテンシャルをゲート電圧によって制御すると、ポテンシャル勾配が緩やかになるにつれて緩和が促進することが明らかになった。この振る舞いは spin-textured edge 状態に期待される性質と定量的に一致しており、エッジの基底状態が spin-textured edge 状態であることを示す極めて有力な証拠が得られた。

実験方法

図 1 a) のように 2 つのフロントゲートとそれらに挟まれた 1 つのサイドゲートを備えたホールバー形状の試料を作製し、 $T = 30\text{mK}$ の極低温で $B = 4.2\text{T}$ の磁場をかけ、占有率 $\nu = 2$ の整数量子ホール効果状態とした。フロントゲート電圧を調節し、アップスピンを持った外側のエッジチャンネルとダウンスピンを持った内側のエッジチャンネルの化学ポテンシャルを個別に制御・検出できるようにした。このときサイドゲートに沿った領域では図 1 b) のようなエッジチャンネル間の電子散乱が起き、その際に超微細相互作用を通じてこの領域での核スピン偏極を生成・検出することができる。すなわち、エッジチャンネル間に電圧をかけて電子スピンの非平衡分布を作ることにより動的核偏極を起こし、核スピン偏極の作る有効磁場によるエッジチャンネル間散乱頻度の変化をホール抵抗測定で検出する。

このとき、サイドゲート電圧によってエッジ付近の局所的な電子濃度 $n(x)$ が図 2 に示すように変化するので、エッジチャンネルの位置 ($\nu = 1$ となる位置 X) と局所的な閉じ込めポテンシャルの勾配 ($\partial n/\partial x$ に比例) の両方を任意に制御することができる。したがって、エッジチャンネルの位置を変えながらホール抵抗を測定することにより、ほぼ磁気長で決まる $\sim 30\text{nm}$ の分解能で核スピン偏極の空間分布を得ることができた[7,8]。核スピン偏極の生成後エッジ状態をある位置 X_R に移動し、エッジ状態と核スピンを相互作用させることによって核スピン偏極は緩和する。この緩和させる時間 t を様々に変えて時刻 t での核スピン偏極分布の“スナップショット”を記録し、緩和時間の変化を調べた。

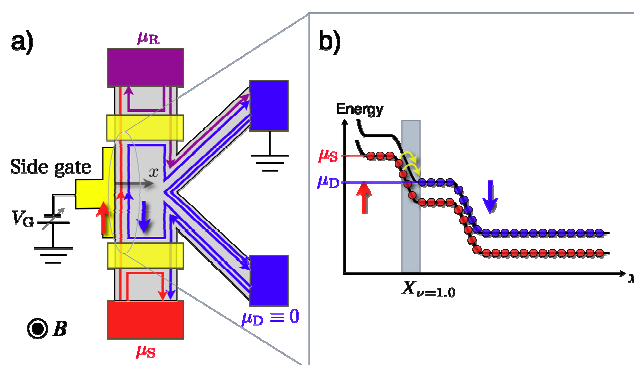


図 1 : 試料のセットアップ

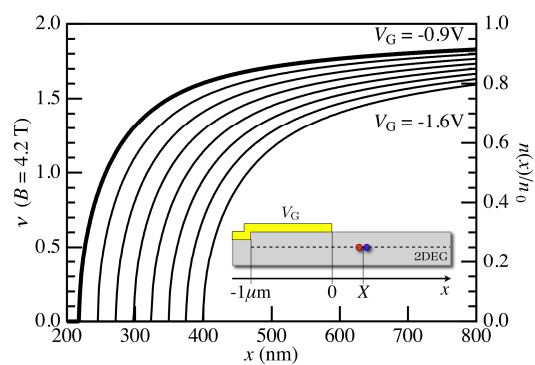


図 2 : 局所電子濃度のサイドゲート電圧依存性

結果と考察

核スピン偏極空間分布の $t=0$ から $t=512\text{s}$ までの時間変化の典型的な測定例を図3に示した。サイドゲートに $V_G = -2.5\text{V}$ の電圧をかけエッジ状態の電子を $x > 724\text{nm}$ の領域に追いやると、核スピン偏極は図3上のように減衰時間 $\tau_1 \sim 30\text{s}$ の比較的遅い減衰を示した。この減衰時間は位置 x に依らず、二次元電子面から垂直な方向に核スピンが拡散する効果であると理解することができる。次にエッジ状態を $X_R = 258\text{nm}$ に置き、 $x > X_R$ の領域でエッジ状態の電子と相互作用させながら核スピン偏極を緩和させると、図3下のように $\tau_1 \sim 1\text{s}$ のオーダーにまで緩和が劇的に促進されることわかった。さらに詳しく調べてみると、このような緩和の促進は単純に核スピン偏極に接するエッジ状態の電子濃度だけによって決まっているのではなく、図4に示すように局所的なポテンシャル勾配に強く依存することが明らかとなった。

そもそもこのような緩和の促進が測定された $\nu > 1$ のエッジ領域においては、一電子モデルに基づけばアップスピンの電子状態とダウンスピンの電子状態がゼーマンエネルギーによって完全に分離されており、核スピンとの相互作用は無視できる程小さいはずである。一方、バルクの二次元電子系では多体効果によって **spin texture** が形成されると電子スピンの揺らぎが生じ、これが核スピン偏極の緩和に寄与することが広く知られている[9-12]。本研究の結果はこの **spin texture** がエッジ領域で形成されることを示唆しており、特にポテンシャル勾配への強い依存性は **spin-textured edge** 状態に特有の性質である[3-6]。さらに、核スピン偏極の緩和促進が実験的に見られなくなったポテンシャル勾配及びゼーマンエネルギーの値は、**spin-textured edge** 状態が形成されなくなるとされる臨界値に良く一致することがわかった。

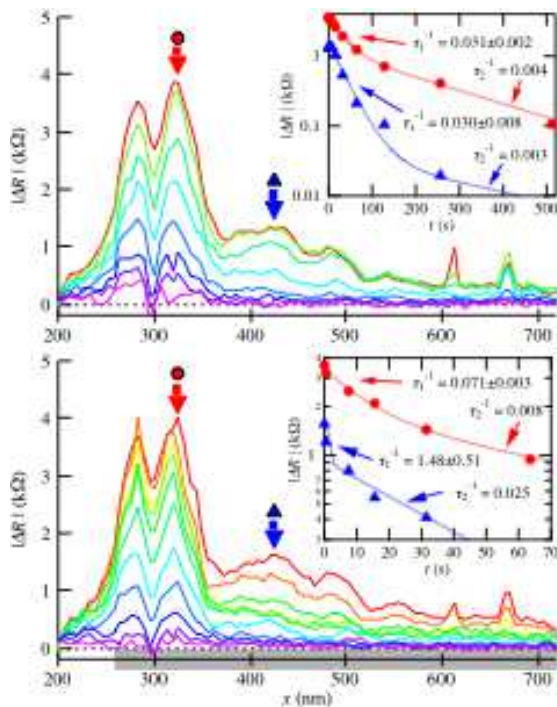


図3：核スピン偏極の緩和過程。

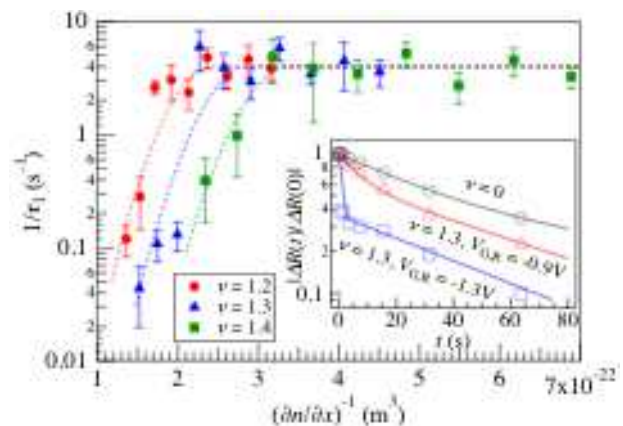


図4：緩和時間のポテンシャル勾配依存性。

このようにして、エッジの電子状態は一般的に仮定されているような一電子モデルでは説明ができず、交換相互作用を取り入れた **spin-textured edge** 状態になっていることを示す実験的な証拠を初めて得ることができた。また、本研究の結果はサイドゲート電圧によってエッジにおける電子状態を様々に変えることができることを意味しており、エッジ近傍での核スピンや電子スピンを制御する技術としても将来の応用が期待される。

参考文献

- [1] I. Neder, M. Heiblum, Y. Levinson, D. Mahalu, and V. Umansky, *Phys. Rev. Lett.* **96** 016804 (2006).
- [2] C. Altimiras, H. le Sueur, U. Gennser, A. Cavanna, D. Mailly, and F. Pierre, *Nature Physics* **6** 34 (2010).
- [3] J. H. Oaknin, L. Martín-Moreno, and C. Tejedor, *Phys. Rev. B* **54** 16850 (1996).
- [4] A. Karlhede, S. A. Kivelson, K. Lejnell, and S. L. Sondhi, *Phys. Rev. Lett.* **77** 2061 (1996).
- [5] M. Franco and L. Brey, *Phys. Rev. B* **56** 10383 (1997).
- [6] J. Sjöstrand, A. Eklund, and A. Karlhede, *Phys. Rev. B* **66** 165308 (2002).
- [7] 小林泰子, Master's thesis, 東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻相関基礎科学系 (2006).
- [8] T. Nakajima, Y. Kobayashi, S. Komiyama, M. Tsuboi, and T. Machida, *Phys. Rev. B* **81** 085322 (2010).
- [9] R. Côté, A. H. MacDonald, L. Brey, H. A. Fertig, S. M. Girvin, and H. T. C. Stoof, *Phys. Rev. Lett.* **78** 4825 (1997).
- [10] R. Tycko, S. E. Barrett, G. Dabbagh, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Science* **268** 1460 (1995).
- [11] K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, *Phys. Rev. Lett.* **88** 176601 (2002).
- [12] J. H. Smet, R. A. Deutschmann, F. Ertl, W. Wegscheider, G. Abstreiter, and K. von Klitzing, *Nature* **415** 281 (2002).