

論文内容の要旨

論文題目 Two-Dimensional Electron Systems in Inhomogeneous Magnetic Field Environment (不均一磁場環境における2次元電子系)

氏名 安藤正人

1 はじめに

本研究では半導体中の2次元電子系に空間変調磁場、とくにランダム磁場を人為的に加え、その電気伝導を実験的に研究した。空間変調磁場中の2次元電子系は幅広い観点から関心を集めている。1次元的な変調磁場においては変調周期 a と電子のサイクロトロン半径 R_c との整合効果による磁気抵抗振動や磁気超格子を介した電子間相互作用による電気抵抗成分などが観測されている。ランダム磁場中の2次元電子の問題は磁場変調の一種という以外にも、アンダーソン局在との関連、ランダウ準位占有率 $\nu = 1/2$ 状態の複合フェルミオン描像との関連、そして高温超電導体のゲージ理論との関連から特に理論的な関心を集めている。

2 試料の設計・作成および測定方法

半導体2次元電子に空間変調磁場を加える方法はいくつか考えられるが、系統的な測定を行うためには磁場を一様成分 \bar{B} と平均がゼロの変調成分 $\delta B(\mathbf{r})$ に分けたとき、変調成分の振幅だけをゼロから連続的に制御できるようにしたい。そのために2通りの手法を試みた。いずれの方法も変調磁場の素となるパターンを電子線描画によって作成する点は共通している。ひとつは2次元電子系のホールバー上に微細加工した磁性体を乗せる方法である。この方法は従来から1次元変調の系で用いられ、外部磁場の向きを2次元面内で回転させることによって $\delta B(\mathbf{r})$ の独立制御を実現していたが、2次元変調の場合は強磁性体を用いると同じ方法では $\delta B(\mathbf{r})$ の振幅の制御を十分にできない。そこで希土類の中でも最大の磁気モーメントを持つディスプレイシウムに銅を混ぜることによって大きな飽和磁化を持ちながらヒステリシスのほとんどない磁性合金 DyCu を作成し、これを2次元電子ホールバー上に微細加工することに成功した。本研究で用いた試料はランダム磁場の相関長 ξ_B が2次元

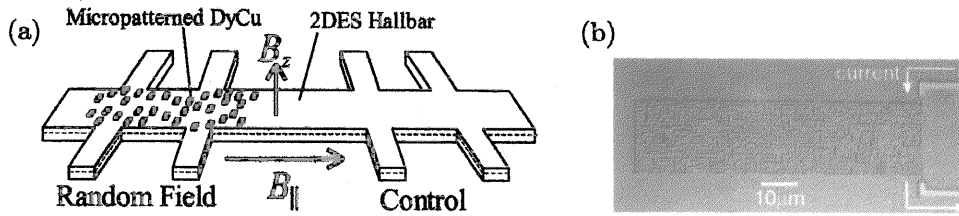


図 1: (a) DyCu 合金を用いたランダム磁場用サンプルの概念図, (b) 試作した超伝導細線の光学顕微鏡写真。

電子の平均自由行程よりも十分短いことも大きな特徴である。測定は 2 軸直交型マグネットを用いて行われた。図 1(a) において面内磁場 B_{\parallel} は磁性体を磁化して変調成分を作り出す役割, 垂直磁場 B_{\perp} は一様成分を与える役割を果たす。

もうひとつの方法は超伝導体の曲がりくねった細線に電流を流して変調磁場を作り出す方法である (図 1(b))。ニオブ合金には非常に大きな超伝導電流を流せるものがあるが, 作成したものに限っては測定に必要な変調磁場振幅を得るには不十分だった。3 章の測定はすべてひとつめの方法で作成した試料を用いている。

3 実験結果と考察

ゼロ平均のランダム磁場による抵抗増加 はじめに DyCu 合金を磁性体として用いたランダム磁場の試料を用いて 2 次元電子の抵抗の変調磁場振幅に対する依存性を調べた。試料に面内磁場 B_{\parallel} をかけることによって振幅ゼロのランダム磁場を発生させると 2 次元電子の抵抗は増加する (図 2(a))。この抵抗増加は DyCu 合金の磁化の 2 乗, すなわちランダム磁場の振幅の 2 乗にほぼ比例し (図 2(b)), 測定した範囲では抵抗増加はランダム磁場からの摂動的に扱える散乱によるものと考えられる。

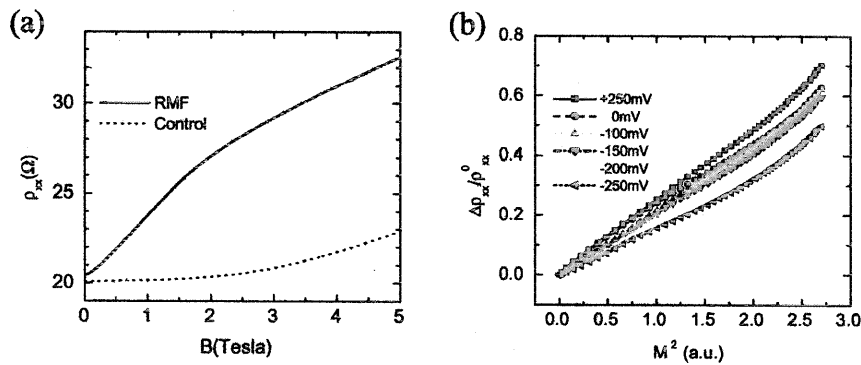


図 2: (a) ランダムな DyCu のある側とない側の 2 次元電子に面内磁場 B_{\parallel} を印加したときの抵抗, (b) ランダム磁場による抵抗の増加分を SQUID で測定した DyCu の磁化の 2 乗に対してプロットしたもの。

一定ランダム磁場中の磁気抵抗 次に強い面内磁場でランダム成分 $\delta B(\mathbf{r})$ を一定にしたまま、垂直方向の一様磁場成分 \bar{B} に対する磁気抵抗を測定した。2次元電子は大きな正の磁気抵抗を示し、 $\bar{B} = 0$ 付近の下向きカスプやなだらかな肩のような特徴的な構造が見られる (図 3(a))。高磁場側のシュブニコフド・ハース振動に比べ、これらの低磁場での構造は温度依存性も小さい。以上の性質は非常に高移動度の2次元電子系において $\nu = 1/2$ の周りで観測された磁気抵抗 (図 3(b)) と多くの共通点を持ち、 $\nu = 1/2$ 状態がランダム磁場中のフェルミオンと等価であるという描像を支持するものと考えられる。上述した肩のような構造が現れる磁場でのサイクロトロン半径をそれぞれの系について求めてみると図 3(a) では $R_c \approx 0.7\mu\text{m}$ 、図 3(b) では $R_c^{\text{CF}} \approx 160\text{nm}$ となり、それぞれの系でのランダムネスの特徴的な長さスケールと同程度となる。ゼロ磁場付近に見られる下向きカスプは1次元変調の系でも同様のものが見られており、Snake orbit と呼ばれるゼロ磁場の等高線に沿った古典軌道が関係していると考えられている。

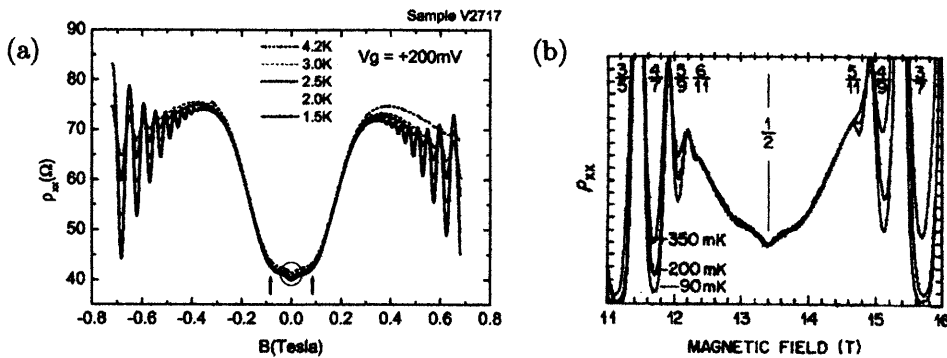


図 3: (a) ランダム磁場中の磁気抵抗, (b) Jiang らによる $\nu = 1/2$ 付近の磁気抵抗。

高磁場側のシュブニコフド・ハース振動の振幅を解析することにより電子の有効質量や緩和時間を求めることができる。ランダム磁場の系についてこの解析を行ったところ、変調のない2次元電子の有効質量との間に有意な差は見出せなかった。報告されている複合フェルミオンの有効質量の増大は本研究で用いた静的なランダム磁場によっては説明できず、むしろ電子間相互作用によるダイナミカルな揺らぎによるものと考えられる。

磁気抵抗の振る舞いにおける次元性とランダムネスの役割を調べるために1次元変調磁場でランダムネスの異なる試料を比較した。ランダムネスの増大に伴って周期的磁場変調で見られる磁気 Weiss 振動が弱まり、2次元ランダム磁場と同様の正の磁気抵抗へと移り変わってゆく。変調磁場の次元性よりもむしろランダムネスが一連の磁気抵抗の主要な要因になっていると理解できる。

変調磁場中の抵抗の温度依存性 1次元周期磁場では温度の2乗 (T^2) に比例する抵抗成分が出るのが加藤・佐々木らによって調べられている。この T^2 -項は変調磁場によって系の並進対称性が失われることにより総運動量の変化を伴う電子・電子

散乱が可能になって生じると考えられている。本研究では1次元変調磁場でランダムネスを加えた場合、2次元変調磁場で周期的およびランダムな場合についてそのような抵抗成分の観測を試みた。

ランダムネスを加えた1次元変調磁場の場合、温度の2乗に比例する抵抗成分はランダムネスの増大に伴って大きくなった。 T^2 -項に大きく寄与する長波長のフーリエ成分がランダムネスとともに増えるのが原因かもしれない。

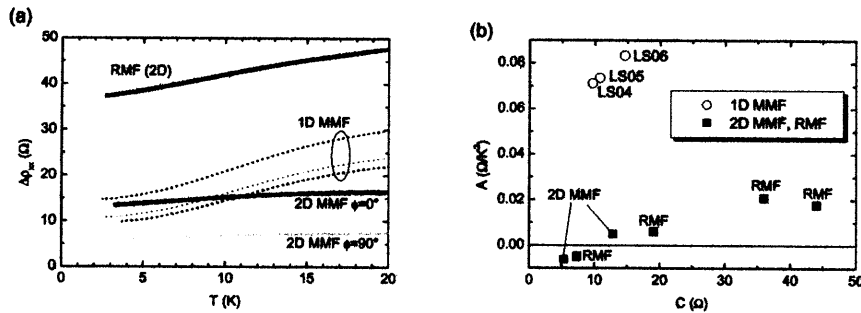


図 4: (a) 変調磁場による抵抗の増分の温度依存性。1次元変調 (1DMMF) で明確に見られる T^2 の依存性が2次元変調の場合には見られない。2次元変調はひとつの試料で磁場の向き ϕ を変えることによって別の変調パターンを作っている。(b) (a) の曲線を2次の多項式 $AT^2 + BT + C$ でフィットしたときの T^2 の係数 A を定数項 C に対してプロットしたもの。

一方、ランダム磁場を含む2次元磁気変調のある系でも抵抗の温度依存性を測定したところ、1次元変調の系で見られた T^2 -項が見られなかった。変調が2次元的になったことでその項が消失する理由は現在のところ不明であるが、系の異方性が T^2 -項に関係している可能性がある。

4 まとめ

1. 振幅の制御できるゼロ平均のランダム磁場を DyCu 合金を用いることにより作り出し、ランダム磁場によって2次元電子の抵抗が磁場振幅の2乗に比例した増加を示すことを見出した。
2. クロスコイルマグネットでランダム磁場成分を一定に保ったまま独立な一様磁場成分に対する磁気抵抗を測定し、 $\nu = 1/2$ 状態の振る舞いと多くの共通点を持つことを確認した。ゼロ磁場付近の下向きカスプや肩といった磁気抵抗の構造について Snake orbit や相関長と関連させて議論した。また、シュブニコフド・ハース振動の振幅解析から静的なランダム磁場では複合フェルミオンに見られたような電子の有効質量の顕著な変化は見られないことを確認した。
3. 変調磁場下の抵抗の温度依存性を測定したところ、1次元変調ではランダムネスの導入に伴い T^2 の係数が増大する一方、2次元変調では T^2 依存成分がほとんどなかった。