

論文審査の結果の要旨

氏名 安藤 正人

本論文では、GaAs/AlGaAs ヘテロ接合界面に形成された2次元電子系に対して空間変調磁場を加えたときの電気伝導を実験的に研究した。空間変調磁場は、試料表面に微細加工技術により分布を制御して配置された磁性体が磁化されることによって作られ、ランダム変調磁場、2次元周期的変調磁場、1次元変調磁場に対して測定が行われた。

ランダム変調磁場中の2次元電子系は、アンダーソン局在や複合フェルミオンとの関連からも、重要なテーマである。これまで、いくつかの研究グループによって実験が行われているが、(1) 磁場変調を特徴づける長さ ξ_B (0.5 μm ~1 μm) が電子の平均自由行程 (~10 μm) に比べて十分に短いこと、(2) 変調磁場の大きさが最大 0.1 テスラ程度と大きいこと、(3) 変調磁場の大きさを系統的に制御していること、これらの点において本研究は新しい試みである。特に、大きな飽和磁化を持ちつつ磁化曲線にヒステリシスを持たない磁性体として Dy と Cu の合金を試行錯誤によって見つけだし、(2) と (3) の条件を同時にクリアすることができたのは、すべて論文提出者本人の創意工夫によるものであり、高く評価できる。

電気抵抗の測定は、2次元面に垂直な方向に1テスラ、平行方向に6テスラまでかけることのできるクロスコイル超伝導マグネットの中で、1.5 ケルビン以上の低温領域で行われた。電子の運動にとって2次元面内に対して垂直な磁場成分のみが重要であり、2次元面に対して平行な外部磁場は、電子系から100 ナノメートル程度離れた表面におかれた磁性体を磁化させて2次元電子系に変調磁場を与える役割をする。これに対して2次元面に垂直な外部磁場は、一様な成分を与える。

ランダム変調磁場を一定に保ったまま、一様磁場成分を変化させたときの対角抵抗率の変化に、特徴的な振る舞いとして、ゼロ磁場近傍での対角抵抗率の下向きのくぼみ (本論文中では「cusp」)、およびそれよりも高い磁場での電気抵抗のゆるやかな折れ曲がり (本論文中では「shoulder」) が見られた。これらの特徴を持つ対角抵抗率の振る舞いは、移動度の高い2次元電子系のランダウ準位充填率 $\nu = 1/2$ 近傍で観測されているものとよく似ている。複合フェルミ

オン描像によると、 $\nu = 1/2$ の状態は、電子に磁束量子 ϕ_0 を 2 本貼り付けてできた複合粒子のゼロ磁場の状態に相当する。試料中の不規則ポテンシャル等によって電子密度 n_e が揺らいでいる場合、 $\nu = 1/2$ に相当する磁場 $B_{1/2} = 2n_e\phi_0$ が揺らぐことにより、複合フェルミオンの実効的な磁場がランダムな空間変調を受けることになる。本研究の結果は、 $\nu = 1/2$ 近傍での対角抵抗率の振る舞いが、複合フェルミオンに対する実効的な磁場のランダムな空間変調に起因するものであることを支持する。

上記の磁気抵抗曲線に現れる「cusp」や「shoulder」の原因については、完全には理解されていないが、ランダム変調磁場の振幅 $|\delta B|$ や特徴的な長さ ξ_B を変えた実験より、およそその傾向が示され、解釈が与えられている。まず、ゼロ磁場で対角抵抗率の極小を示す「cusp」に関しては、電子が $B = 0$ の等高線に沿ってうねりながら動く「Snake orbit」との関連が考察されている。もし、「cusp」が「Snake orbit」によるものだとすれば、「cusp」の幅は $B = 0$ の等高線が生き残る一様磁場の範囲に対応しており、変調磁場の振幅と等しくなるはずである。実験から決定される「cusp」の幅の誤差は小さくないが、変調磁場の振幅 $|\delta B|$ に対する依存性に関して矛盾しない結果が得られている。一方、「shoulder」に関しては、サイクロトロン半径がランダム変調磁場の特徴的な長さ ξ_B と同程度になる磁場として解釈されており、実験結果もこの解釈を支持する。また、本論文では、「shoulder」が現れる磁場よりもさらに高磁場側で観測されるシュブニコフ-ド・ハース振動の温度依存性から有効質量や緩和時間を求めている。ランダム磁場による有効質量の有意な変化は見られなかった。

変調ポテンシャルによって並進対称性が失われると、電子間散乱が電気抵抗に寄与するようになり、抵抗率の温度変化に T^2 -項が現れると考えられる。実際、電流方向に周期的な 1 次元変調磁場を与えた 2 次元電子系における大きな T^2 -項が、加藤らにより報告されている。本論文では、1 次元ランダム変調磁場、2 次元周期的変調磁場、2 次元ランダム変調磁場、に研究を拡張し、20 ケルビン以下の温度依存性の測定を行った。その結果、1 次元ランダム変調磁場においては周期的な場合と同様に大きな T^2 -項が観測されたが、2 次元変調磁場の場合には、周期的な場合でも、ランダムな場合でも、 T^2 -項は非常に小さくなった。2 次元変調磁場下の T^2 -項の消失の原因については、理解されていない。

以上、本論文では、微細加工技術等を用いて人工的に作られた空間変調磁

場中での2次元電子系の電気伝導の詳細な測定を行い、ランダム磁場がある場合の磁気抵抗効果、異なった種類の変調磁場下での抵抗率の温度変化を明らかにした。得られた実験結果は新しいものであり、重要な知見が得られた。同時に、多くの理論的課題および今後の実験への貴重なステップも提供している。

また、本論文は、家泰弘教授、勝本信吾助教授、遠藤彰助手などとの共同研究であり、共著の形で一部すでに公表されているが、論文提出者が主体となって研究計画の立案、試料作成および電気伝導測定の実行、実験結果の解析・考察を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、審査委員全員一致で、博士（理学）の学位を授与できると認める。

以上