

京都大学	博士（理学）	氏名	知田健作
論文題目	電流雑音測定による非平衡整数量子ホール系に関する研究		
(論文内容の要旨)			
本研究は非平衡整数量子ホール系について行われたものである。非平衡整数量子ホール系における端状態電子伝導は指向性が有り、単色で高コヒーレンスを有することから、光子系におけるレーザー光に対応付けることが出来る。端状態を伝導する電子を用い、「電子系における量子光学」の実現を目指す研究が精力的に成されているが、電子系であるが故の、電子間の多彩な相互作用が問題となっている。従って、電子を用いた量子光学を実現するにあたり、端状態を伝導する電子の振る舞いの詳細の理解が必須である。本研究では、電流雑音測定を行い、通常の電気伝導度測定では時間平均の中に埋もれてしまう様な、伝導電子の動的な情報を得ることに成功している。それを基に、非平衡整数量子ホール系における伝導電子とその周辺環境との相互作用について考察している。 整数量子ホール系に形成された長さ 1 μm の量子細線にて、電流雑音測定に併せて抵抗検出型核磁気共鳴測定を行った結果、動的核スピン偏極がショット雑音の発生に伴って生成することが明らかとなった。また、測定されたショット雑音を解析した結果、原子核のスピン偏極生成に伴って伝導電子のスピン偏極率が約 30 %減少していることが分かった。更に、量子細線幅の増大に伴う電子スピン減極率の増大が観測され、これより、量子細線内に存在する空の局在準位が電子散乱過程に寄与していることが示唆された。電子のスピン偏極率は抵抗検出型核磁気共鳴測定によるナイトシフト測定からも求められ、電流雑音測定から得られたものと同様の値が得られており、電流雑音測定による見積もりの正当性が確認された。本研究により、ショット雑音、核スピン偏極および電子スピン減極が同時に観測されたことから、「核によるスピンスピン電子散乱」が動的核スピン偏極の生成機構であることが明らかとなった。 本研究では量子ホール効果ブレイクダウンに伴って発生する電流雑音の観測も行われた。その結果、「量子ホール効果ブレイクダウンに伴う電子有効温度の上昇」を雑音温度の上昇として観測することに成功している。得られた電子有効温度の上昇量は、ランダウ準位間のエネルギー程度であり、これは、雪崩的電子散乱を仮定した量子ホール効果ブレイクダウン発生機構と矛盾しない。更に、量子ホール効果ブレイクダウンが起こるよりも小さなソースドレインバイアス電圧のもとで数分の時間スケールで経時変化する有限の電流雑音が観測された。この電流雑音は核磁気共鳴周波数にあたる電磁波照射に応答を示さない。また、決まったエネルギースケールを有さず、量子ホール効果ブレイクダウンが発生するよりも小さなソースドレインバイアス電圧のもとで普遍的に存在する。以上のことより、この電流雑音が量子ホール系において普遍的に存在する端状態およびバルク局在状態の間の電子交換過程に基づく「量子ホール効果ブレイクダウン前駆現象」であると結論付けた。本成果は、非平衡整数量子ホール系において、これまで無散逸であると考えられてきた領域においても散逸が存在することを示しており、端状態における電子のコヒーレンスを考察するにあたり考慮すべき新しい問題を提示するものである。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、「核によるスピントリップ電子散乱の観測」および「量子ホール効果ブレイクダウン前駆現象の観測」の2つの内容から構成されている。

まず、「核によるスピントリップ電子散乱の観測」では、電流雑音測定に併せて抵抗検出核磁気共鳴測定を行うことを通し、端状態を伝導する電子の散乱過程の有無と核スピンの偏極状態が調べられた。その結果、電子散乱の発生に伴って核スピンが偏極し、電子スピンが減極することが明らかとなった。これは動的核スピン偏極の生成機構が原子核によるスピントリップ電子散乱であることを明示するものである。さらに、電子スピン減極の細線幅依存性から、原子核によるスピントリップ電子散乱によって電子は細線内に存在する局在準位へ散乱されることが示唆された。本研究成果は、動的核スピン偏極の生成機構が原子核によるスピントリップ電子散乱であることを示した点、その散乱過程に局在準位が寄与することを示した点の2つの点に於いて学術的に大きな意義を持つ。更に、量子細線という非常に簡便な素子において核スピン偏極の生成と検出が実現されたことは、量子情報素子実現の観点からみて有益である。

次に、「量子ホール効果ブレイクダウン前駆現象の観測」では、電流雑音測定を通じた量子ホール効果ブレイクダウンに伴う電子有効温度の上昇の観測、および量子ホール効果ブレイクダウンの前駆現象の観測について報告された。電流雑音を雑音温度として評価することで、量子ホール効果ブレイクダウンに伴う有効温度の上昇がランダウ準位間のエネルギーギャップの程度であることが示された。また、量子ホール効果ブレイクダウン前駆現象とみられる電流雑音の電磁波照射に対する応答や周波数依存性などの傍証より、この電流雑音が端状態と局在準位の間の微小なカップリングに基づく電子交換過程に起因する端状態を伝導する電子の有効温度の上昇によるものであると結論付けられた。本研究成果は、これまで無散逸と考えられてきた領域における端状態を伝導する電子の散逸過程を提示するものであり、学術的に非常に有意義である。また、将来の量子情報素子や高精度の抵抗標準素子の実現を目指す上で考慮すべき問題を示した点で応用の観点においても深い意義を有する。

以上のように、本研究の成果は電流雑音測定によって非平衡整数量子ホール系における電子の振る舞いの詳細を解明した点で学術的に大きな意味を持っており、非平衡整数量子ホール系を用いた量子情報や抵抗標準の研究に大きく貢献するものである。よって、本論文を博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25年1月15日に論文内容とそれに関連した事項について試問を行ない、その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降