

論文審査の結果の要旨

氏名 山本 倫久

1次元電子系は、強い電子間相互作用のために非フェルミ液体的性質を示すことが知られており、理論的には朝永ラッティンジャー液体 (TLL) としてのふるまいが予言されている。本研究は、半導体量子細線の極低温における量子伝導特性を調べることによってこの問題に取り組んだものである。本論文は8章からなり、第1章では1次元電子系に関する基礎的事項、第2章では1次元系間の共鳴トンネル現象、第3章ではクーロンドラッグ現象に関するこれまでの研究の背景が述べられている。第4章で本研究における実験方法が述べられた後、第5章では共鳴トンネル現象、第6章ではクーロンドラッグ現象についての実験結果とそれに関する議論が展開されている。第7章に本研究のまとめが述べられ、第8章では今後の展望と研究の提案が述べられている。

本研究で対象とした系は、GaAs/AlGaAs 半導体2次元電子系試料表面に微細加工によって付けた複数のゲート電極のバイアス電圧を調整することによって実現した、結合量子細線構造である。1次元電子系の非フェルミ液体効果については、従来、量子ポイントコンタクトや量子細線の伝導を通じた研究が行われてきたが、その種の実験ではしばしばリード線の電子系 (フェルミ液体) の性質が系のふるまいを支配するため、非フェルミ液体効果の検出が困難であることが指摘されていた。本研究では結合量子細線における、(1)細線間トンネル伝導、および(2)クーロンドラッグ効果、の2点について詳しい実験および解析を行った。これらは量子細線部分に特化した現象であるため、そこでの非フェルミ効果を検出する上で有利であると考えられた。得られた主な知見は以下のとおりである。

(1) 量子細線間トンネル伝導

量子細線間のトンネルでは細線方向の運動量が保存される。トンネル電流が十分に小さい領域 (トンネルした電子が元の細線に戻りにくい領域) では、その微分伝導度 dI/dV (V) は2つの細線内の1次元サブバンドの底がそろうときにピークを持つ。電圧やゲート電圧 (量子細線の電子密度) の関数としてこの共鳴ピークの場所を追うことにより、細線内部の各サブバンドの運動量分布を決めることができる。実験ではトンネル伝導度のゲート電圧依存性を詳細に調べることでサブバンド準位を同定し、さらに、トンネルスペクトルにいくつかの興味深い構造を見出した。例えば、フェルミ面が一方の細線のサブバンドの底に近づくと特異な構造 (ジャンプ構造) が見られた。その詳しいメカニズムは未解明であるが、この構造は2つの共鳴ピーク列の組から成っており density locking (相互作用の効果によって二つのサブバンドの電子密度がそろう効果) に関係付けられると解釈された。

(2) クーロンドラッグ効果

クーロンドラッグ実験には低電子密度細線内の電子相関がより明確に反映される。特に TLL 効果は、2つの量子細線間でフェルミ速度が一致するとき（サブバンドの底がそろったとき）に現れる。この場合、2つの細線間で $2k_F$ 散乱が可能になり、クーロンドラッグが増大する。細線間に強い相互作用効果がある場合には、細線内の CDW が互いに強くロックされた状態が生じ、ドラッグ効果の温度依存性がフェルミ液体の場合とは逆になることが予想されている。すなわち、フェルミ液体では充分低温ではクーロンドラッグが温度の上昇とともに大きくなるが、TLL (CDW) では温度の上昇によってロックされた CDW が外れやすくなりドラッグ効果が急激に減少する。実験では、正のドラッグ抵抗のピークが温度の上昇とともにドラッグ抵抗が急激に減少するふるまいが見られ、非フェルミ液体効果と一致する結果が得られた。また、ドラッグ抵抗値の急激な変化にも関わらずロックの強さに対応するピーク幅は温度に対してほとんど変化しないという結果が得られた。

ドライブ細線の電子密度が非常に低い場合には、ドライブ細線中の電子がドラッグ細線中のホールをドラッグすることに対応する負のドラッグ抵抗が観測される。負のドラッグ効果の起源は必ずしも明らかでないが、ドライブ細線中の電子がウィグナー結晶化することに起因してドラッグ細線に相関ホールが誘起されるためであるとの解釈がなされている。

以上のように、本研究は結合量子細線というユニークな実験対象を用いて1次元電子系の非フェルミ液体的ふるまいに迫ったもので、1次元電子系の電子状態およびクーロン相互作用効果による強相関効果に関して重要な知見を得たものと認められる。本論文の中核をなす研究内容は指導教官らとの共著論文として学術誌に印刷公表ないしは公表予定であるが、実験の遂行および結果の解析の大部分は論文提出者が主体となって行なったものと判断される。

したがって、本論文は博士(理学)の学位授与に値するものと認める。