

論文内容の要旨

論文題目 **Interaction effects in semiconductor coupled quantum wires**
(半導体結合量子細線のクーロン相互作用)

氏名 山本倫久

一次元電子系は、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。このような系は朝永 - ラッティンジャー液体 (TLL) と呼ばれ、近年活発に研究が行われているが、その性質を実験的に検証した例はほとんどなかった。これは、通常の量子細線では、その有限長さの効果のために相互作用の効果が電気的な特性に反映されにくいからである。本研究では、長さ $1 \sim 4 \mu\text{m}$ の量子細線をふたつ平行に近接して並べた結合量子細線 (図 1) を半導体中に作成し、その電気伝導特性から一次元電子系の相互作用効果を研究した。特に、二つの量子細線間のトンネル電流 (図 2(a)) と二つの細線間のクーロンドラッグ (クーロン相互作用による電子の運動量の遷移) (図 2(b)) に着目して実験を行った。

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。また、トンネル電流が十分に小さい領域 (一度トンネルしたら再び元の細線に戻りにくい領域) では、その電圧微

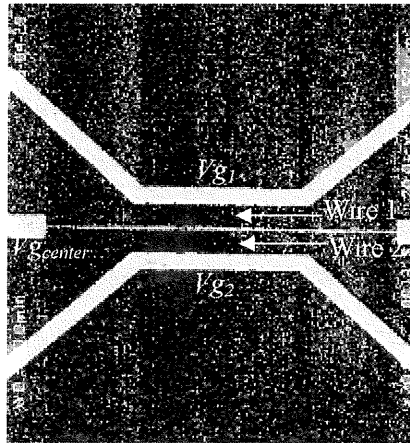


図 1 ; 結合量子細線の SEM 写真 (長さ $2 \mu\text{m}$)。二次元電子系をもつ GaAs 半導体の表面にショットキーゲートを配することによって作成した。ゲート (金属) に負の電圧をかけることによってその下の二次元電子系が空乏化し、結合細線が形成される。センターゲートの電圧 $V_{g_{center}}$ によって細線間のトンネル電流を調整しサイドのゲートの電圧 V_{g1}, V_{g2} によって細線内の電子密度やフェルミ波数などを自由に変えることができる。

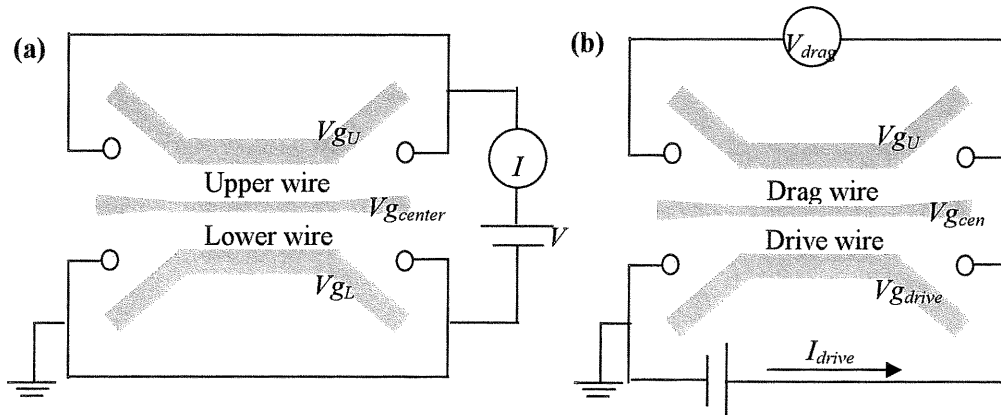


図2 (a); トンネル電流測定の測定系。一方の細線はグラウンドに落とされている。(b); クーロンドラッグの測定系。クーロンドラッグの強さは、 $R_D \equiv -V_{drag}/I_{drive}$ で定義されるドラッグ抵抗によって表される。

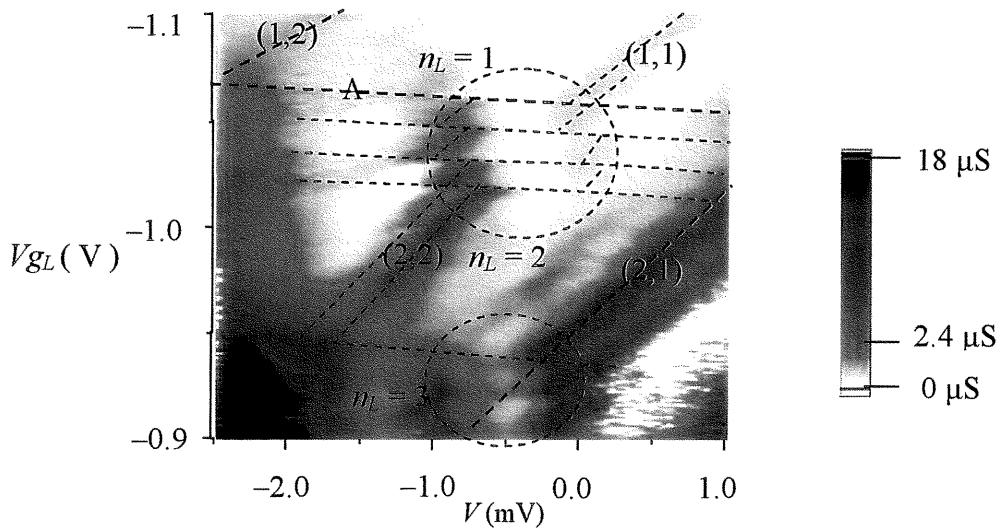


図3 ; 長さ $4 \mu\text{m}$ の結合量子細線において、 $V_{g_{center}} = -0.75 \text{ V}$ 、 $V_{g_U} = -0.95 \text{ V}$ で観測された微分トンネルコンダクタンス。測定温度は 10 mK 。

分 $dI/dV(V)$ は、二つの細線内の一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。図3は測定結果の一例である。この測定では、Upper wire は接地されていて、二つの占有サブバンドを持っている。そして、 dI/dV が細線間の電圧 V と Lower wire のサイドゲート電圧 V_{gL} の関数として測定されている。図3の (n,m) は、Lower wire の n 番目のサブバンドと Upper wire の m 番目のサブバンドの間での共鳴ピークを表している。 (n,m) と $(n,m-1)$ とのピーク間隔は Upper wire のサブバンド間隔（=閉じ込めエネルギー）に対応する。また、これらの共鳴ピーク列とは別

に、水平に近い方向に細いピークが見られる（図中 A）。これらは、Lower wire 内の状態密度が高い場所に対応する。一次元電子系の状態密度は、サブバンドの底で発散するので、これらのピーク位置から Lower wire の占有サブバンド数が変わるゲート電圧を決めることができる。図中の n_L は、Lower wire の占有サブバンド数である。

図 3 で $V \approx 0$ でフェルミ面が Lower wire のサブバンドの底に近づく位置では、特異な構造（ジャンプ構造）が見られる。その詳しいメカニズムは未解明であるが、この構造は二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考えられる。実際に、後から述べるクーロンドラッグによってこの領域での density locking が確認された。また、量子細線の電子密度を低くしていくと、共鳴ピーク構造が徐々になだらかになっていき、最後には消えてしまう。このような低電子密度の領域では、運動量がいい量子数ではなくなり、電子の粒子としての性質が支配的になる。

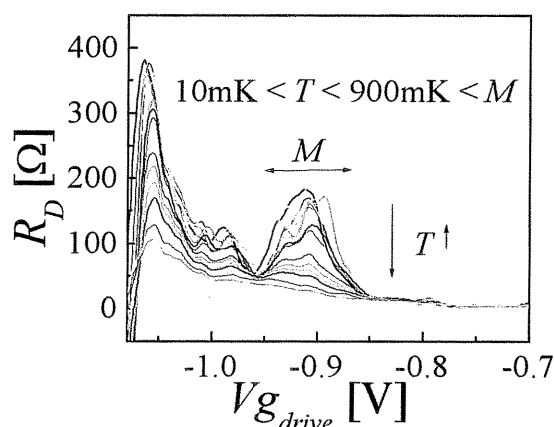


図 4； 長さ $4 \mu\text{m}$ の結合量子細線において測定されたドラッグ抵抗とその温度依存性。 $V_{g_{center}} = -0.95\text{V}$, $V_{g_{drag}} = -0.95\text{V}$ に固定されている。温度の上昇とともにドラッグ抵抗が減少する。

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、二つの量子細線間で、フェルミ速度が一致するとき（サブバンドの底がそろうとき）に現れる。この場合、二つの細線間で $2k_F$ 散乱が可能になり、クーロンドラッグが増大する。さらに、細線間に強い相互作用効果がある場合、細線内の CDW が互いに強くロックされた状態が生じる。この場合、ドラッグ効果の温度依存性がフェルミ液体の場合と逆になる。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、その結果ドラッグ効果は急激に減少する。図 4 は、長さ $4 \mu\text{m}$ の結合量子細線で観測されたクーロンドラッグ抵抗とその温度変化の一例である。図中のピークは二つの細線

間でサブバンドの底がそろそろ位置に対応する。完全な **density locking** は、負のドラッグ（後述）との競争がない右側のピークにおいて実現され、温度の上昇とともにドラッグ抵抗が急激に減少する。この温度依存性は、強結合領域で理論的に予想される結果とよく合う。また、ドラッグ抵抗値の急激な変化にも関わらず、ロッキング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。二つの細線中の電子密度が低すぎる場合には、ゲート電極からの遮蔽効果により電子相関が逆に弱められる。この場合、図4のような幅広いピークは観測されなくなり、ピーク幅は狭くなる。

また、ドライブ細線の電子密度が非常に低い場合には、負のドラッグ抵抗が観測される。負のドラッグ抵抗は、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。この負のドラッグ効果は、二次元電子面に垂直な磁場を印加すると、より広い $V_{g_{drive}}$ 領域で観測されるようになる。特に、細線のコンダクタンスにスピン分離プラトーが観測されるような高磁場領域では、ドライブ細線の電子密度がファーストプラトーの下にある限り、適当な $V_{g_{drag}}$ に対して必ず負のドラッグ効果が観測される。磁場の印加は波動関数の広がり小さくし、実質的なクーロン相互作用を増大させる効果があるので、負のドラッグ効果は、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考えられる。また、実験結果によれば、ドラッグ細線中の電子密度もファーストプラトーの下にないと負のドラッグ効果は生じない。逆に、ドラッグ細線の電子密度が非常に低くなり、ゲート電極からの遮蔽によってクーロン相関がカットオフされる場合にも負のドラッグは消滅する。つまり、負のドラッグ効果が起こるためには、ドラッグ細線中にも、強いクーロン相関と、運動量保存を補償するための散乱ポテンシャル（不純物ポテンシャル）が必要である。特に、高磁場下では、ドラッグ細線中の電子もウィグナー結晶化していると考えられる。これらの電子は、いくつかの不純物ポテンシャルによってピン止めされており、その不純物ポテンシャルの近くにはトンネルバリアができる。負のドラッグ効果は、ドライブ細線中の電子（粒子）がこのバリアの近くを通過する際に、ドラッグ細線中の電子がドライブ細線中の電子とは逆向きにバリアを挟んで移動するというメカニズムで説明できる。

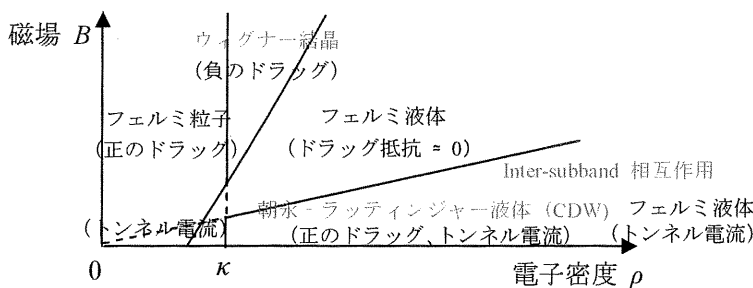


図5； 半導体量子細線の電子状態と相関効果

本研究では、図5に示すように、半導体量子細線内の電子状態とクーロン相互作用を結合量子細線を用いて調べた。その結果、TLL効果やウィグナー結晶化のような強い相関効果を捉えることに成功した。