論文内容の要旨

Transport Phenomena and Quantum Phase Transitions in Mesoscopic Systems

メゾスコピック系における輸送現象と量子相転移

濱本 雄治

微小な低次元構造中に閉じ込められた電子の様々な現象を扱う研究分野はメゾスコピック系の物理と呼ばれ、１９８０年代から実験・理論の両面で盛んに研究が行われてきた。微細加工技術の進歩によって実現可能な系のサイズが小さくなるにつれ、電子間相互作用が電子の輸送現象に及ぼす影響は無視でききなくなる。従来、メゾスコピック系における電子相関効果を解析的に扱う場合、摂動的な近似手法が用いられてきたが、例えば量子相転移が起こる場合などは非摂動領域での系の振る舞いが自明でなくなる。本論文では、ボソン化法による定式化および経路積分モンテカルロ法による数値シミュレーションを用いることにより、以下に示す３つの系について非摂動的な解析を行った。

（１）スピンを考慮した Tomonaga-Luttinger 液体の不純物問題

量子細線や量子 Hall 端、カーボンナノチューブのような系で理想的な一次元電子系の作成が可能となり、Tomonaga-Luttinger 液体（TLL）の観測を試みる実験が盛んに行われている。TLL の特異性が顕著になる例として、1 つの局所的な散乱体が伝導特性に及ぼす影響を扱う不純物問題が挙げられる。Kane と Fisher は不純物による後方散乱の弱い場合と強い場合の両極限で摂動繰り込み群による解析を行い、この系の基底状態が絶縁体と完全導体のいずれかであることを示した。しかし電子スピンを考慮した場合、

両極限で相境界の形状が異なるため、これまで非摂動領域で相境界がどのように振る舞うかよく分かっていなかった。我々は経路積分モンテカルロ法を用いて相転移の解析を行い、非摂動領域における数値的に厳密な相図を求めた（**図１**）。我々の結果によると、相境界の形状は(K_ρ, K_σ)の異方性が弱い領域では散乱の弱い場合の極限形に近いのに対し、異方性が強い領域では散乱の強い場合の極限形に近い、というように(K_ρ, K_σ)平面で非一様な振る舞いを見せることが分かる。異方性の強い領域における相図の振る舞いは、電荷またはスピンの自由度をピン留めした有効模型で理解することができる。

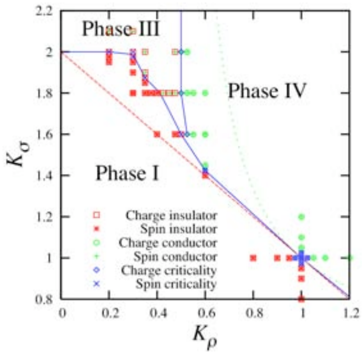

図 1　絶縁体-完全導体転移の相図。K_ρ=K_σ に関して対称なので K_ρ<K_σ の領域のみを示した。青の実線は非摂動領域での相境界であり、赤の破線と緑の点線はそれぞれ不純物による後方散乱の弱い極限と強い極限に対応する。相境界は K_ρ~K_σ のときほぼ赤線と重なるのに対し、K_ρ<<K_σ ではずれが顕著になる。

（２）量子ドット系における擬スピンの２チャンネル近藤効果

量子ドットは Kondo 効果が起きる系として実験・理論両面からよく調べられているが、ドット内の準位間隔が温度に比べて小さい場合、縮退した２つの電荷状態を擬スピンとみなすことで別の Kondo 効果が現れる。Matveev によると、このとき電子スピンは軌道自由度としてとみなせるため２チャンネル近藤効果が現れ、低温でキャパシタンスが対数発散する。ただし Matveev の予言は、電極・ドット間の結合が弱い極限と強い極限における解析計算の結果からの類推であり、任意の結合強度で２チャンネル近藤効果が現れるか確証は得られていなかった。我々は経路積分モンテカルロ法で強結合側から解析を行い、結合強度の広い範囲でキャパシタンスが対数発散することを示した（**図２**）。さらに対数発散の係数は強結合と弱結合の両極限で得られた解析計算の振る舞いとよく一致し、結合強度の全領域で２チャンネル近藤効果が現れることがわかった。

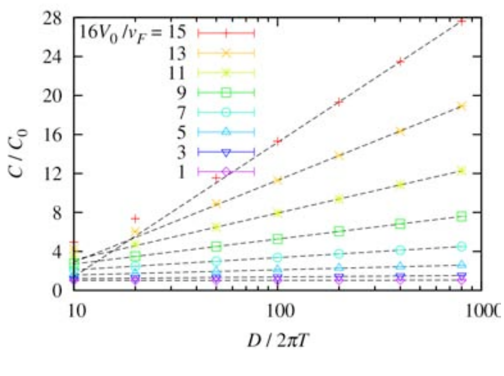

図２　キャパシタンスの対数発散。V_0 はポイントコンタクトの反射強度。対数の係数の V_0 依存性は V_0 の小さい領域では~ V_0^2、大きい領域では~exp(-const.× V_0)であり、これは両極限での解析計算と一致する。

（３）ユニバーサルな緩和抵抗に対する相互作用の影響

量子ドット系は RC 回路の量子版と見なすことができ、ドット内で電荷が緩和する時間スケールは RC 時間で表される。Büttiker らによると、低周波領域 $\omega<<1/RC$ における交流抵抗（緩和抵抗）は T=0K で整数量子 Hall 端状態 1 チャンネル当り $h/2e^2$ に量子化され、ポイントコンタクトの反射強度 V に依らない。我々は Tomonaga-Luttinger 模型を用いて相互作用が電荷緩和抵抗に及ぼす影響を調べた。以下は電荷状態の縮退点 $Q=(n+1/2)e$ （n は整数)における結果である。摂動繰り込み群の解析から、バルクの相互作用パラメータが $K>1/2$ の場合、擬スピンによる近藤効果のため低温で系はユニタリー極限に到達し、緩和抵抗は $h/2e^2K$ に量子化されることが分かった。これは Büttiker らの結果（K=1）と矛盾しない。一方 $K<1/2$ では Kosterlitz-Thouless 転移により RC 時間が発散し、ドット内での伝導は電荷が緩和する前にコヒーレンスが失われるため、ドットは有効的に電子溜めとして振る舞う。後者の場合、反射強度 V の大きな領域ではユニバーサルな緩和抵抗の代わりに V に強く依存した Landauer 的な直流抵抗が現れる。**図３**に経路積分モンテカルロ法で求めた交流抵抗の低周波極限の V 依存性を示す。我々の結果は K=1/(奇数)を分数量子 Hall 系の充填率と読み替えることで、実験的に確認することができる。**図３**は充填率 K が小さいほどユニバーサルな緩和抵抗からずれる領域が広がることを示している。

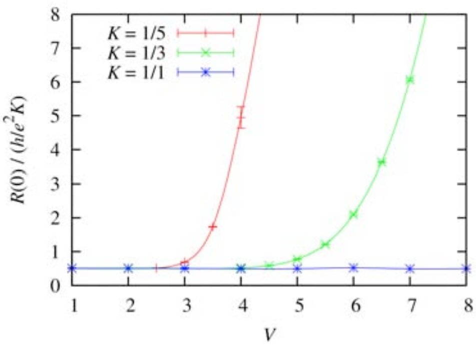

図３　交流抵抗の低周波極限の V 依存性。充填率 K=1 のとき常に電荷緩和抵抗が $h/2e^2K$ に量子化されるが、$K<1/2$ では V の大きな領域で KT 転移が起こり、V に依存しない緩和抵抗から V に依存する直流抵抗への転移が観測される。