

論文審査の結果の要旨

氏名 濱本 雄治

二次元電子系に作られた微小な構造を舞台として展開される物理はメソスコピック系と呼ばれ、基礎物理学と量子デバイスの接点として活発な研究がなされている。微細加工技術の進展により近藤効果のような多体効果が本質的な役割をはたしている量子現象が盛んに議論されるようになってきた。量子ドットやポイントコンタクトを介した伝導現象については、それに最も強く関与する伝導チャンネルを一つとりだすと伝導電子系については一次元的自由度として扱える場合がしばしば考えられる。一次元的自由度として取り扱う事が近似ではなく、ほぼ理想的な一次元系と考えられる量子ホール効果のエッジ状態のような例もある。この論文では、一次元系として取り扱うことができる伝導系と量子ドットやポイントコンタクトが結合した問題をボゾン化法を用いて定式化し、摂動論、くりこみ群そして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て研究をしている。

第1章では、導入部として研究の動機が述べられたのち、本論文で主たる研究対象とするメソスコピックキャパシターの交流伝導特性の問題が紹介されている。それに続き、この論文の議論で基本的な役割を果たす、朝永ラッティンジャー液体、クーロンブロケード現象および近藤効果の基本概念が紹介されている。

第2章では、ボゾン化法の説明がなされた後、それにもとづくモンテカルロシミュレーションにおいて状態のグローバルな更新を行う手法が紹介されている。その具体的な応用としてスピン自由度のある朝永ラッティンジャー液体における不純物問題が議論されている。伝導特性に関する相図に関して、摂動計算と双対性を用いて強い散乱極限と弱い散乱極限では解析的な結果が得られているが、それらの中間領域における相図が議論されている。この問題を通してモンテカルロシミュレーションのスキームが完成し以下の章で議論される問題に対する準備が整ったのみでなく、これ自体内容のあるオリジナルな研究といえることができる。

第3章では、二次元電子系につながれたドットにおけるクーロンブロケード現象を、一次元化されたモデルを用いて議論している。このさい、ドットは十分大きな自由度をもった系とし、一次元化されたモデルでは半無限の系として扱われている。ドット内の電子数 N_g が平均として $1/2$ で、 $N_g = 0$ と $N_g = 1$ の二つの電荷状態が縮退している場合を考える。今電子のスピン自由度を含めて考えると、局所的な電荷を遮蔽するチャンネルが二個

あることになり、2チャンネル近藤効果になることが予想される。実際、Matveev は弱いトンネル極限と、強い極限でそのことを示し全領域で2チャンネル近藤効果が起きることを予想している。当研究では経路積分モンテカルロ法を用いて、任意のトンネル接合の強さに対して2チャンネル近藤効果が起きていることを、キャパシタンスの対数発散を計算することによって示している。同様の結論は数値くりこみ群の計算でも得られているが、経路積分モンテカルロ法は効率の良いスキームになっている。

二次元電子系につながれたドットを交流ゲート電圧で駆動すると、一種のRC回路を形成する。Buettiker は相互作用のない場合を考察し、レジスタンスに相当する量がドットと電子だめとの結合の強さによらず $R_q = h/2e^2$ と量子化された値を取ることを示し、量子化レジスタンスと呼んだ。第3章では、この電荷緩和抵抗の問題を相互作用のある系に対して考察している。ここでは、分数量子ホール状態を念頭において、スピン自由度のない場合を考察している。まず摂動計算に基づき弱いポテンシャルバリアーの時には $R_q = h/2e^2$ に量子化されることを示している。つぎに、電荷状態が縮退した状態では異なる電荷状態に対する近藤効果を考慮する必要があるが、そのくりこみのフローは相互作用の強さによって変わることを示した。すなわち朝永ラッティンジャー液体の指数が $K > 1/2$ のときは、弱いポテンシャルバリアーの領域に漸近し、 $R_q = h/2e^2$ に量子化された緩和抵抗を示す。一方 $K < 1/2$ ではKosterlitz-Thouless 転移を示し緩和抵抗は発散的に増大する。これらの解析は、経路積分モンテカルロ法によって数値的にも確認されている。また、縮退点から外れた場合のクロスオーバー現象についても議論がされている。

以上見てきたように、本論文では一次元伝導系と結合した量子ドットについて、電荷緩和抵抗の問題を中心にしてボゾン化法に基づいた研究を展開している。とくに相互作用が強い場合には電荷緩和抵抗の値がユニバーサルな値から外れ発散的に増大し得ることを示した。1/3の分数量子ホール状態では、強い相互作用の条件を満たしており、当研究の成果は実験的な検証も可能であると考えられる。

本論文は指導教員である加藤岳生准教授その他との共同研究に基づいているが、本人の寄与は主体的で十分であると認められる。

よって論文審査委員会は全員一致で博士(理学)の学位を授与できると認めた。