

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 箱嶋 秀昭

本論文は4章と付録からなり、第1章は序論、第2章は粒子溜が絶対零度の場合についての論文提出者の研究成果、第3章は粒子溜が有限温度の場合についての論文提出者の研究成果、第4章で結論を述べている。

非平衡定常状態 (Nonequilibrium Steady States、以降NESSと略記する) は、非平衡統計力学の基礎研究としてこれまでに様々な研究がなされてきた。NESSは日常的に見られる現象であり、応用上でも重要であるため、非平衡の研究の中でも長い歴史があり、非常に多くの研究がなされてきた。しかし、完成された理論が存在する平衡状態とは違って、NESSの一般論は現時点では存在しない。

箱嶋氏は、メゾスコピック伝導体におけるNESSのモデルを用いて、NESSが実現している部分系のフォン・ノイマンエントロピー S_L と、局所物理量の空間相関を詳しく調べた。メゾスコピック系の研究範囲は幅広いが、その中でも本研究におけるNESSの研究対象となるのは、量子細線 (Quantum Wire、以下QWRと略記する) が2つの粒子溜に接合されていて、2つの粒子溜の化学ポテンシャル差 $\Delta\mu$ によりQWR内部に定常電流が生じるような伝導体である。この系は、QWR内部にのみ不純物が存在しており、2つの粒子溜には不純物は存在しないという1次元系でモデル化できることが知られている。NESSの先行研究は膨大であり、様々なNESSが調べられているが、メゾスコピック伝導体のNESSには、(i) 確率過程モデルより基本的な力学である、量子力学で記述するモデルが確立している、(ii) 様々な物理量が実験と整合するような良い理論的枠組みが確立している、(iii) 定義が曖昧な「熱流」のある系のNESSとは異なり、mass flow (電流) のあるNESSである、(iv) 不純物散乱により空間並進対称性のない系になっており、非自明なNESSが実現する、(v) 平衡から遠く離れた非線形非平衡領域まで調べることができる、という利点がある。これらの長所を全て備えていて、NESSの量子状態があらわに知られているのは、メゾスコピック伝導体のみである。

粒子溜が絶対零度の場合、粒子溜を含めた全系が量子純粋状態となるので、着目系の S_L はエンタングルメントエントロピーに一致する。一般にエンタングルメントエントロピーとは、着目領域とそれ以外との間のエンタングルメントを測る尺度であり、近年様々な分野で研究されている。NESSのエンタングルメントエントロピーを調べた先行研究は存在するが、これらはすべて空間並進対称性のある系のNESSである。そのために、これらのNESSは実質的に平衡状態を並進運動させたものに過ぎなかった。

それに対して本研究のNESSは、不純物による多重散乱により系の並進対称性が破れているために、平衡状態を並進運動させた状態とは大きく異なっている。このようなNESSのことを、本研究では「非自明なNESS」と呼んでいる。また、非平衡度の大小については、共鳴トンネルリングに着目する。多重散乱のために、電子の波動関数にはQWRをほぼ確率1で透過するような共鳴状態が非常に多く現れる。このような共鳴状態を多数含むぐらいに $|\Delta\mu|$ を大きくしたときのNESSを本研究では「平衡から遠く離れたNESS」と呼んでいる。平衡から遠く離れた非自明なNESSで S_L を求めることが、本研究の目的である。

粒子溜が絶対零度の場合については、箱嶋氏は以下のことを示した。粒子溜が絶対零度の場合、平衡状態 ($\Delta\mu = 0$) では、 $S_L^{\text{eq}} = O(\ln L)$ となる。それに対して、平衡から遠く離れた非自明な NESS では、「準体積則」と名付けた

$$S_L = \eta(L)L|\Delta k_F| + O(\ln L)$$

のような振る舞いになる。ただし、 Δk_F は電子溜のフェルミ波数の差であり、 $\eta(L)$ は L が増加するにつれて徐々に減少する関数で、 $a \leq \eta(L) \lesssim 2a$ を満たす。ここで、 a は L と Δk_F に依存しない正の定数である。平衡状態の場合の結果 $S_L^{\text{eq}} = O(\ln L)$ と比べると、 $S_L > O(\sum_{\nu} S_L^{\text{eq}})$ となっていることが分かる (ν は粒子溜のラベルであり、 \sum_{ν} はそのすべてについての和を意味する)。先行研究の NESS は完全な並進対称性を持つために、平衡状態と本質的に同じであり、 $S_L = O(\sum_{\nu} S_L^{\text{eq}})$ という結果が得られていたが、本研究の結果はこれらの先行研究とは定性的にも異なっていることが分かる。

粒子溜が有限温度の場合については、以下のことを示した。平衡状態 ($\Delta\mu = 0$) では、 $S_L^{\text{eq}} = O(L)$ のように熱力学に整合的な結果が得られる。それに対して、平衡状態から遠く離れた非自明な NESS では、

$$S_L = \eta(L)L \int_{-\pi}^{\pi} f_{\beta}(\varepsilon_k - \mu^+) [1 - f_{\beta}(\varepsilon_k - \mu^-)] dk + O(L)$$

のような振る舞いになる。ただし、 $\eta(L)$ は絶対零度の結果に出てくるものと同じものである。 $f_{\beta}(\varepsilon_k - \mu^{\pm})$ は、それぞれ左右の粒子溜のフェルミ分布関数である。絶対零度の場合とは違って有限温度の場合は、全系の状態が混合状態であるために、フォン・ノイマンエントロピー S_L はエンタングルメントエントロピーではなくなるが、部分系 A で利用されているマイクロ状態の個数という意味は変わらず持っている。有限温度の平衡状態では、 $S_L = O(L)$ (示量的) であることと比較すると、 $\eta(L)$ の項は S_L に対する補正項を与える。

さらに、物理量の相関関数について、以下のことを示した。この系では、2点までの局所物理量で互いに独立なものは、電子密度、局所エネルギー、電流密度、の3つだけである。これら3つ全ての空間相関関数を調べ、平衡から遠く離れた非自明な NESS では、平衡状態のときに比べて、相関関数の減衰の仕方が異常に遅くなり、小さなべきでしか減衰しなくなることを見いだした。これは、 S_L の振る舞いと整合している。

以上のように、本論文はメゾスコピック伝導体における NESS のモデルを用いて、NESS が実現している部分系のフォン・ノイマンエントロピー S_L と、局所物理量の空間相関を詳しく調べたものであり、統計物理学の進展に寄与をした論文であると認められる。

なお、本論文は、清水明氏との共同研究であるが、論文提出者が主体になって分析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、本審査委員会は博士 (学術) の学位を授与するにふさわしいものと認定する。