

機関番号：12601
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2009～2010
課題番号：21740288
研究課題名（和文） メゾスコピック量子輸送系における平均流と揺らぎの統計力学的研究
研究課題名（英文） Study on average current and current fluctuation in mesoscopic Quantum transport
研究代表者
齊藤 圭司（SAITO KEIJI）
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：90312983

研究成果の概要（和文）：

フェルミ-パスター-ウラムモデルといわれる、調和的なバネと4次の非線形バネで最近接格子がつながれた系を用いて、熱伝導現象の次元依存性の研究を行った。熱伝導度は1, 2次元では系のサイズに関してベキ発散をするのに対し、3次元では収束していく様子が観測された。

流れの揺らぎを系統立てて調べるために、調和格子上での熱流揺らぎの情報をすべて内在するカレントキュムラント生成関数の一般公式を導出した。

また、アハロノフ-ボーム干渉計を用いて、世界で初めて揺らぎの定理の検証実験を行うことに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We theoretically studied dimensional crossover of heat conduction phenomena in Fermi-Pasta-Ulam lattices. We also studied current fluctuations in quantum charge transport. We found nontrivial relationships among nonlinear transport coefficients and demonstrated them experimentally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理、物性基礎

キーワード：非平衡・非線形物理学

1. 研究開始当初の背景

近年メゾスコピックスケールでの輸送において、統計力学的動機に基づいた実験が盛んに行われるようになってきている。例えば低次元系でのフーリエ則の破れを示したカーボンナノチューブの熱伝導実験、熱ダイオードの実験、拡張オンサーガー関係式に関する実験などである。また理論面でも「揺らぎの定理」に代表されるような、平衡から遠い領域における普遍的性質の研究の進歩は目覚ましく、歴史的にみても大きな局面を見せているとあってよい。このような背景において、輸送現象の普遍的側面の深い理解が迫られている。

2. 研究の目的

熱伝導現象における最も基本的な法則は、熱流が温度勾配に比例しその係数である熱伝導度が物質特有の値になることである。物質特有というのは、系のサイズに依ってしまったり熱浴の性質に依ってしまったりということである。しかしながら、近年低次元熱伝導現象においては、一般的にフーリエ則が破れるという理論的予言と実験による検証がおこなわれた。これは非平衡統計力学における大きな話題の一つである。このテーマにおける最も重要な問題は、フーリエ則の破れにおける理論的なメカニズムを探ることである。本研究課題では、特に系の次元性に着目し熱伝導特性の次元依存性を明らかにする。また流れの平均だけでなく、流れの揺らぎの研究も非常に大事な研究テーマの一つである。我々は、流れの揺らぎを系統立てて調べるために、調和格子での熱流揺らぎの情報をすべて内在するカレントキュムラント生成関数の一般公式を導出する。また実験と協力することで、電流揺らぎにおける揺らぎの定理を反映した非線形輸送係数間の普遍的な関係式を検証する。

3. 研究の方法

熱伝導現象における次元依存性においては、大規模な数値計算を行う。熱浴をランジェバンノイズで表現し、系の熱流を測る。また熱揺らぎの計算は、調和格子を考え解析計算により揺らぎのキュムラントを生成する生成関数を導出する。電子輸送現象の実験では京大のグループと協力し、自身は理論的側面を担当することで行う。系としてはアハロノフ-ボーム干渉計を用いる。

4. 研究成果

カーボンナノチューブやグラフェンなどの低次元系で熱伝導現象を見ると、フーリエの法則が成立しない異常輸送

現象を示すことが理論的に予想されてきた。どのようなメカニズムでフーリエの法則が成立するかという問題は、非平衡統計力学における最も重要な課題の一つである。その一つとして次元の重要性がこれまで指摘されてきた。次元の重要性を示すために、フェルミ-パスター-ウラム格子に対して大規模な数値計算を行い、熱伝導現象の次元クロスオーバー現象を考えた。その結果2次元系では、熱流は発散を示すが3次元系では、フーリエの法則が成立する兆候が見えた。3次元での収束の様子は理論の計算とは異なる収束を示す。

最近グラフェンシートを用いた熱伝導現象の次元クロスオーバー現象が実験でも確認され、我々の数値計算と整合した実験結果が報告されている。

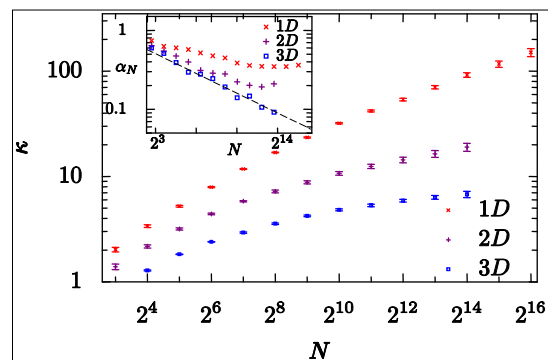


図1: 熱伝導度の次元依存性。

また平均カレントだけでなく、熱流揺らぎの研究も行った。揺らぎの特徴を調べるために、すべてのオーダーのカレント揺らぎ（キュムラント）を生成する生成関数に注目した研究を行った。系統的な研究を可能にするために、3次元調和格子を考え生成関数の一般的な表式を導出し研究の基盤を作った。以前1次元量子調和格子を考え生成関数の導出を行っているが、今回の表式はこれを含む任意次元の調和格子に適用可能な表式である。これにより今後の広範囲なカレント揺らぎの研究が可能となる。

また、メゾスコピックスケールにおける、量子電子輸送現象のカレント揺らぎも研究した。以前理論的に任意の次数のカレント揺らぎを生成する生成関数に対して、一般的な対称性を導出し、輸

送係数間に普遍的な関係式が導けることを示した。この関係式が、実際の実験でどう見えるかを、理論的にアハロノフ-ボーム干渉系のセットアップで実演して見せた。また、実験家と協力して、これらの関係式の検証実験も行った。その結果、磁場に関して対称成分と反対称成分の関係式は、定性的には理論と整合する結果を得た。

また、ナノスケールでの冷却メカニズムの研究も行った。特に分子ナノワイヤを電流で冷却するメカニズムを提唱した。

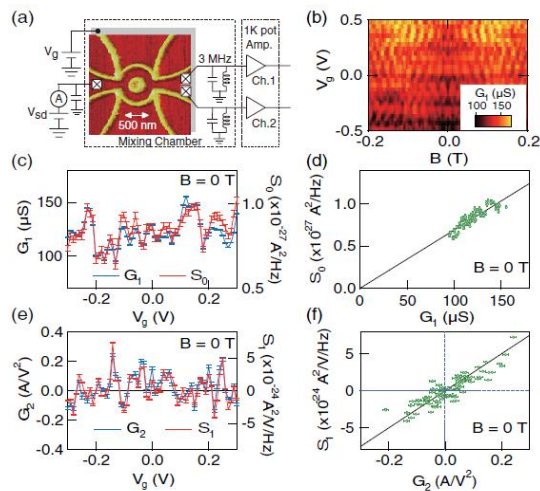


図 2: 揺らぎの定理を反映した非線形輸送関係式を検証するための実験。(a) アハロノフ-ボーム系の写真 (b) 磁場 (横軸)、バックゲート電圧 (縦軸) に対する電流のパターン。(c)-(f): 非線形輸送関係式を検証した図。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. Linear response formula for finite frequency thermal conductance of open systems
Abhishek Dhar, Onuttom Narayan, Anupam Kundu, and Keiji Saito
Phys. Rev. E vol.83 011101 (2011) 査読有
2. Chaotic Transport in the Symmetry Crossover regime with Spin-Orbit

interaction

Keiji Saito and Taro Nagao

Phys. Rev. B vol. 82, 125322 (2010) 査読有

3. Non-equilibrium Fluctuation Relation in a Quantum Coherent Conductor
S. Nakamura, Y. Yamauchi, M. Hashisaka, K. Chida, K. Kobayashi, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, Keiji Saito, Y. Utsumi, A. C. Gossard
Phys. Rev. Lett. vol.104, 080602 (2010) 査読有
4. Bidirectional Single-Electron Counting and the Fluctuation Theorem
Y. Utsumi, D.S. Golubev, M. Marthaler, Keiji Saito, T. Fujisawa, Gerd Schon
Phys. Rev. B vol. 81, 125331 (2010) 査読有
5. Heat conduction in a three dimensional anharmonic crystal
Keiji Saito and Abhishek Dhar
Phys. Rev. Lett. vol.104, 040601 (2010) 査読有
6. Semiclassical Theory for Universality in Quantum Chaos with Symmetry Crossover
Keiji Saito, Taro Nagao, Sebastian Muller, Petr Braun
Journal of Phys. A: Math. Theor. vol.42, 495101 (2009) 査読有
7. Cooling mechanisms in molecular conduction junctions
Michael Galperin, Keiji Saito, Alexander V. Balatsky, and Abraham Nitzan
Phys. Rev. B vol.80,115427 (2009) 査読有
8. Fluctuation Theorem in a Quantum-Dot Aharonov-Bohm Interferometer
Yasuhiro Utsumi and Keiji Saito
Phys. Rev. B vol. 79, 235311 (2009) 査読有

[学会発表] (計 2 件)

1. Generating Function Formula of Heat Transfer in Harmonic Networks
齊藤圭司, 日本物理学会 年次大会, 2011/3/26, 新潟大学

2. 3次元 FPU 格子の熱伝導
齊藤圭司, 日本物理学会 秋季大会,
2009/9/25, 熊本大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 圭司 (SAITO KEIJI)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号: 90312983