

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05200

研究課題名(和文)メゾスコピック系における非平衡輸送現象の熱力学の構築と熱機関の設計

研究課題名(英文)Thermodynamics of Non-Equilibrium Transport in Mesoscopic Systems and Quantum Nano-Scale Heat Engine

研究代表者

羽田野 直道 (Hatano, Naomichi)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：70251402

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：メゾスコピック系の量子非平衡輸送においては、熱と仕事を定義するのが一般に困難です。我々は非平衡定常状態を考えることによってこの困難を克服しました。このとき、熱と仕事は、両側に接続されている熱浴が失う熱と仕事から定義できます。この手法により、量子熱電効果の一般論を構築し、どのような場合に熱効率や仕事率が高くなるかを議論できました。

カルノー効率が熱効率の上限であることを証明し、メゾスコピック系が特定のエネルギーだけを透過する透過率の際に実現されることを示しました。これは古典熱力学の準静的課程に相当しています。次に、磁場とフォノン散乱の両方で時間反転対称性を破ることが仕事率を上げることを示しました。

研究成果の概要(英文)：It is generally difficult to define heat and work in nonequilibrium transport in quantum mesoscopic systems. We succeeded in defining them by considering the nonequilibrium stationary state. There we can heat and work from those that the heat baths on the both sides lose. Using this formulation, we construct the general theory of quantum thermoelectricity and found in what situations we have higher heat efficiency and power.

We proved that the upper limit of the heat efficiency is the Carnot efficiency and showed that it is realized only when the mesoscopic system transmits particles at a certain fixed energy. This corresponds to the quasi-stationary process of classical thermodynamics. We also showed that by braking the time-reversal symmetry both by a magnetic field and an inelastic scattering, we can increase the power.

研究分野：統計物理学

キーワード：量子熱電効果 量子熱力学 非平衡定常状態 熱効率 仕事率

1. 研究開始当初の背景

量子系の熱力学を議論するに当たって、熱と仕事の定義に曖昧さがあることを認識し、それに対して、非平衡定常状態なら問題が簡単になり、厳密に話を進められることに気づきました。

2. 研究の目的

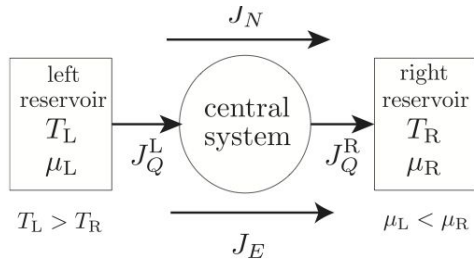
量子非平衡定常状態において熱と仕事を、両側に接続されている熱浴の失う熱と仕事によって厳密に定義します。その定義を利用して、どのようにすれば熱効率や仕事率を向上できるかを議論します。

3. 研究の方法

まず、相互作用のない場合を考え、厳密な議論を行います。次にフォノン散乱を導入して時間反転対称性を破ります。時間反転対称性を破れば仕事率が上がるという先行研究があったからです。

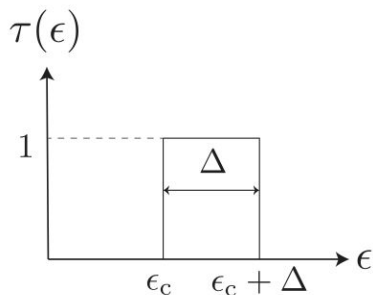
4. 研究成果

下図の状況を設定し、それによって中央のメゾスコピック系を通る熱流・電流・エネルギー流を厳密に定義しました[1]。電流とエ

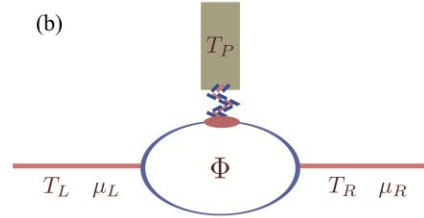


ネルギー流は保存するため、左右で同じですが、熱流は非保存のため、左から入る熱流と右に出る熱流を区別しなければいけないことに注意が必要です。この点が過去の研究で混乱していたことを指摘しました。それを修正したのが出発点として最大の成果です。

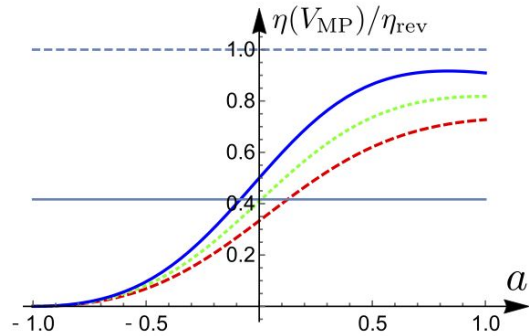
この成果に基づき、カルノー効率が熱効率の上限であることを証明しました。この上限は、メゾスコピック系が特定のエネルギーだけを透過する透過率の際に実現されることを示しました(下図)。これは古典熱力学の準静的課程に相当しています。



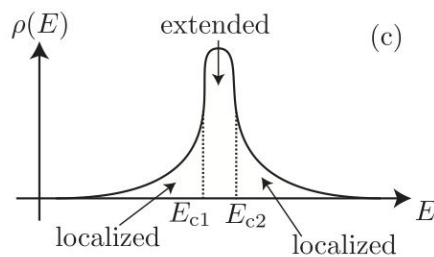
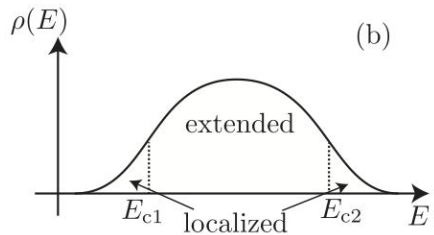
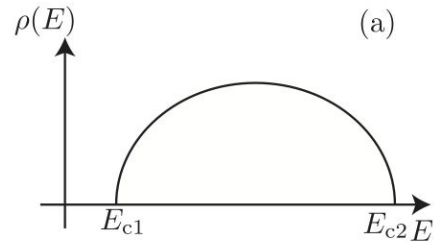
次に、磁場とフォノン散乱の両方で時間反転対称性を破る設定(下図)が仕事率を上げることを示しました[2]。時間反転対称性が保たれた系では CA 効率という上限が提案さ



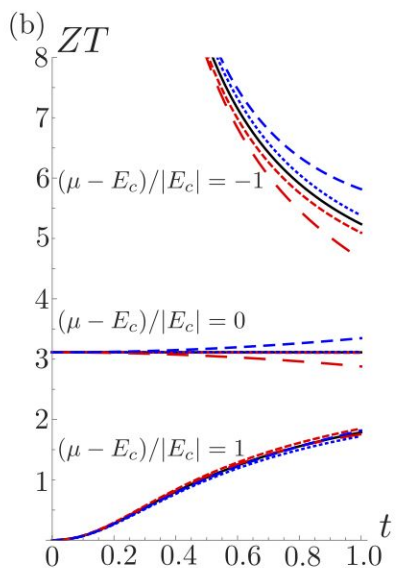
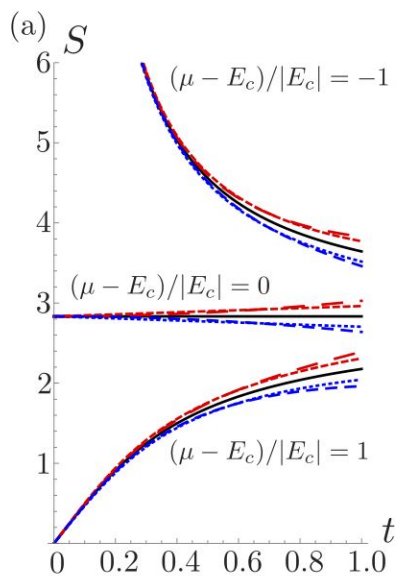
れています。そのため、熱効率をさらに上げるためには時間反転対称性を破ることが必要です。我々は、磁場によって時間反転対称性を破るだけでは不足で、フォノン散乱を加えるのが必要であることを示しました。その結果、下図のようなカルノー効率にも迫るような改善が見られました



さらに、アンダーソン局在で移動度端が2つあるとき、不純物を入れて局在を強くする(下図)ほど熱電性能指数が上がることを示



しました[3]。これはに入っているゼーベック係数の表式において、状態密度が非対称であることが必要であることを利用したものです。数値計算の結果、ゼーベック係数と性能指数に改善が見られました(下図)。



参考文献

[1] K. Yamamoto and N. Hatano, Thermodynamics of the mesoscopic thermoelectric heat engine beyond the linear-response regime, *Phys. Rev. E* **92** (2015) 042165
 [2] K. Yamamoto, O. Entin-Wohlman, A. Aharony and N. Hatano, Efficiency bounds on thermoelectric transport in magnetic fields: The role of inelastic processes, *Phys. Rev. B* **94** (2016) 121402(R)
 [3] K. Yamamoto, A. Aharony, O. Entin-Wohlman, and N. Hatano, Thermoelectricity near Anderson localization transitions, *Phys. Rev. B* **96** (2017) 155201

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 1 1 件)

1. Kaoru Yamamoto, Naomichi Hatano, *Physical Review E* **92** (2015) 042165
2. A. Amir, N. Hatano, D.R. Nelson, *Phys. Rev. E* **93** (2016) 042310
3. K. Yamamoto, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, N. Hatano, *Phys. Rev. B* **94** (2016) 121402(R)
4. A. Nishino, N. Hatano, G. Ordóñez, *J. Phys. Conf. Ser.* **670** (2016) 012038
5. Y. Morikuni, H. Tajima, N. Hatano, *Phys. Rev. E* **95** (2017) 032147
6. N. Hatano, J. Feinberg, *Phys. Rev. E* **94** (2016) 063305
7. G. Ordóñez, N. Hatano, *J Phys. A: Math. Theor.* **50** (2017) 405304
8. G. Ordóñez, N. Hatano, *Chaos* **27** (2017) 104608
9. K. Yamamoto, A. Aharony, O. Entin-Wohlman, N. Hatano, *Phys. Rev. B* **96** (2017) 155201
10. C. Uchiyama, Y. Miyadera, Y. Hayashi, F. Yakushiji, *ChemistrySelect* **2** (2017) 3794
11. K. Hashimoto, G. Tatara, C. Uchiyama, *Phys. Rev. B* **96** (2017) 064429

〔学会発表〕(計 4 3 4 3 件)

1. K. Yamamoto, N. Hatano, *New Perspectives in Spintronics and Mesoscopic Physics*, 2015.6.11, 東京大学物性研究所
2. Y. Morikuni, H. Tajima, N. Hatano, *New Frontiers in Non-equilibrium Statistical Physics 2015*, 2015.7.28, 京都大学基礎物理学研究所
3. K. Yamamoto, N. Hatano, *New Frontiers in Non-equilibrium Statistical Physics 2015*, 2015.7.28, 京都大学基礎物理学研究所
4. Y. Morikuni, H. Tajima, N. Hatano, *Yukawa International Seminar 2015*, 2015.8.18, 京都大学基礎物理学研究所

5. K. Yamamoto, N. Hatano, Yukawa International Seminar 2015, 2015.8.18, 京都大学基礎物理学研究所
6. K. Yamamoto, N. Hatano, International Symposium on Foundation of Quantum Transport in Nano Science, 2015.8.20, 山梨大学工学部
7. Y. Morikuni, H. Tajima, N. Hatano, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015, 2015.8.22, 京都大学基礎物理学研究所
8. K. Yamamoto, N. Hatano, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015, 2015.8.22, 京都大学基礎物理学研究所
9. K. Yamamoto, N. Hatano, Third Conference on Quantum Thermodynamics, 2015.10.13, Porquerolles, France
10. 山本薫, 羽田野直道, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015.9.17, 関西大学
11. 森國洋平, 田島裕康, 羽田野直道, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016.3.21, 東北学院大学
12. K. Yamamoto, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, N. Hatano, Fifth Conference on Quantum Thermodynamics, 2017.3.14, Oxford, UK
13. K. Yamamoto, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, N. Hatano, Israel Physical Society Meeting, 2016.12.25, Tel Aviv, Israel
14. K. Yamamoto, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, N. Hatano, STATPHYS26, 2016.7.19, Lyon, France
15. Y. Morikuni, H. Tajima, N. Hatano, STATPHYS26, 2016.7.19, Lyon, France
16. N. Hatano, PHHQP16, 2016.8.12, 京都大学 (招待講演)
17. A. Amir, N. Hatano, D.R. Nelson, 日本物理学会秋季大会, 2016.9.14, 金沢大学
18. K. Yamamoto, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, N. Hatano, 日本物理学会秋季大会, 2016.9.15, 金沢大学
19. 石井隆志, 桑原知剛, 森貴司, 羽田野直道, 日本物理学会年次大会, 2017.3.17, 大阪大学
20. G. Ordonez, N. Hatano, 日本物理学会年次大会, 2017.3.18, 大阪大学
21. 杉本健太郎, 羽田野直道, 日本物理学会年次大会, 2017.3.18, 大阪大学
22. K. Yamamoto, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, N. Hatano, 日本物理学会年次大会, 2017.3.18, 大阪大学
23. 西野晃徳, 羽田野直道, G. Ordonez, 日本物理学会年次大会, 2017.3.20, 大阪大学
24. 羽田野直道, Tomio Petrosky, 日本物理学会秋季大会, 2017, 岩手大学
25. K. Yamamoto, A. Aharony, O. Entin-Wohlman, N. Hatano, 日本物理学会秋季大会, 2017, 岩手大学
26. 西野晃徳, 羽田野直道, G. Ordonez, 日本物理学会年次大会, 2018, 東京理科大学
27. N. Hatano, A. Aharony, 日本物理学会年次大会, 2018, 東京理科大学
28. 橋本一成, 多々良源, 内山智香子, 日本物理学会秋季大会, 2017, 岩手大学
29. 手塚隆太, 橋本一成, 内山智香子, 日本物理学会秋季大会, 2017, 岩手大学
30. 橋本一成, 多々良源, 内山智香子, 日本物理学会年次大会, 2018, 東京理科大学
31. 手塚隆太, 橋本一成, 内山智香子, 日本物理学会年次大会, 2018, 東京理科大学
32. 内山智香子, W.J. Munro, 根本加絵, 日本物理学会年次大会, 2018, 東京理科大学
33. 今澤舜, 手塚隆太, 橋本一成, 内山智香子, 日本物理学会年次大会, 2018, 東京理科大学

34. 古屋雅涼橋本一成, 内山智香子, 日本物理学会年次大会, 2018, 東京理科大学
35. Naomichi Hatano, 2017, University of Firenze (招待講演)
36. Naomichi Hatano, 2017, University of Lecce (招待講演)
37. Naomichi Hatano, PHHQP17, 2017, Bad Hannof, Germany (招待講演)
38. 羽田野直道, 第46回数値解析シンポジウム, 2017, 滋賀県 (招待講演)
39. 羽田野直道, 第46回数値解析シンポジウム, 2017, 滋賀県
40. 羽田野直道, 日本応用数理学会 2017 年度年会, 2017, 武蔵野大学
41. Naomichi Hatano, META2017, 2017, Incheon, Korea (招待講演)
42. Naomichi Hatano, EAJSSP2017, 2017, 仲山大学, 台湾 (招待講演)
43. Naomichi Hatano, APTQS2017, 2017, 仲山大学, 中国 (招待講演)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
<http://hatano-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/hat-hat/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

羽田野直道 (Hatano, Naomichi)
 東京大学・生産技術研究所・准教授
 研究者番号：70251402

(2) 研究分担者

内山智香子 (Uchiyama, Chikako)
 山梨大学・大学院総合研究部・教授
 研究者番号：30221807

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()