

## VII-5. 量子輸送研究

教授：都倉康弘

助教：吉田恭

研究員：久保敏弘(〜H27. 12)

大学院生：博士後期課程2名、前期課程5名

### 【1】量子状態制御と非平衡統計物理

#### (1) 量子ポンプと時間依存伝導現象 (田口、中嶋 論文4, 11, 国際会議1, 5, 国内会議3)

時間依存するポテンシャルの下での量子伝導現象に継続して取り組んでいる。計数統計を取り入れた量子マスター方程式を用い相互作用の効果も考慮して、理論的な考察を加えた。電極/量子ドットの磁場とトンネル結合を変調した際に誘起される量子ポンプ電流、スピン流を調べた。また断熱的なポンプ電流だけでなく非断熱変調の効果を逐次的に評価した。一方有限バイアス下ではエントロピー生成が起こるが、さらに系のパラメタが時間的に変化する場合には、さらに過剰エントロピーの寄与が起こるとされる。従来古典系に対してこの解析が行われて来たが、今回物理的にもっともらしい量子的な取り扱い手法を提案した。また、時間的に変動する電圧が加えられた電極と結合し、フォノン系とも結合した単一分子接合の伝導を非平衡グリーン関数により解析した。特に加えた摂動の周波数がフォノンの周波数の2倍となる条件で交流コンダクタンスに構造が現れる事が分かった。

#### (2) メソスコピック系の物性と伝導現象 (都倉 論文2, 3, 5, 6, 13, 国内会議19)

金属に時間に依存する摂動が加わると、電荷の粗密波(プラズモン)が発生するが、その緩和過程の微視的な議論は不十分であった。今回特に磁場下のデバイス端に見られるエッジマグネトプラズモンの緩和を決める因子を明らかにした。また擬二次元量子ドットに閉じ込められた電子スピンの様々なスピン・軌道相互作用がスペクトルに与える影響について継続して検討を加えている。また継続して超伝導細線を用いた単一光子検出器の開発を進め、長距離量子通信実験に適用した。

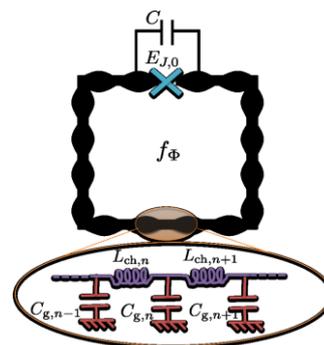
#### (3) 光格子中の冷却原子のダイナミクス (森田、都倉 論文1, 国際会議3, 8, 国内会議13)

光格子中の冷却原子系では、多彩な物理パラメタを制御しながら量子ダイナミクスを実験・理論を比較しながら研究することができる。昨年度に引き続き一次元 Bose-Hubbard モデルを舞台として、スピン1のボゾン系の量子ウォーク現象を理論的に解析した。2粒子系を厳密に解く事により、スピン混合ダイナミクスと遠距離スピン相関を明らかにした。特に相互作用の大きな極限ではコトネルリング過程が重要であることが分かった。NTT 物性科学基礎研究所との共同研究である。

#### (4) 量子位相滑りと高感度電荷測定 (田口 論文12, 国際会議2, 4, 10, 国内会議14, 18)

超伝導接合においてジョセフソン効果と双対の関係にある量子位相滑りが注目を集めている。その電磁場環境を人為的に制御する事により磁束のトンネルレート等性能改善が可能であることを理論的に示した。これは、フランス Grenoble LPMC/CNRS グループとの共同研究の成果である。また産総研との共同研究により、超伝導接合を用いた高感度電荷測定の実現の為の特性評価を行った。

図1 周期的に変調された超伝導ループとジョセフソン接合



(5) 熱伝導と揺らぎの定理 (安富、都倉 論文7, 10, 国内会議4, 16)

電圧プローブを含む系において電気伝導・熱伝導係数およびその揺らぎの間の普遍的な関係を導いた。また、量子極限のエッジ状態はカイラル朝永ラッティンジャー流体モデルで良く記述される事が知られている。複数のエッジ状態が平行して伝搬する場合には、エッジ間の相互作用が重要となる。特に特定のエッジのみに高温の分布の電子を注入した後の時間発展は「量子クエンチ」の問題として興味深い。朝永ラッティンジャー流体が可積分系である事を反映して、高温のエッジ状態と相互作用した低温エッジ状態の奇妙なエネルギー分布が非常に安定で緩和しにくい事を明らかにした。また、常伝導体/超伝導体接合では超伝導状態の状態密度を利用して電子冷却が提案されているが、Andreev 反射がその効率を阻害している事が知られている。最近活発に研究されているトポロジカル物質は軌道とスピンの結合が強く結合するため、Andreev 反射が抑えられ、冷却効率の向上が期待される。今回この系の熱伝導を理論的に調べたが、大幅な改善は得られなかった。その理由はフェルミ面近傍でトポロジカル物質の状態密度が小さい事ためである。

【2】量子測定と量子系のデコヒーレンス、エンタングルメント

(1) 測定理論と量子連続測定 (久保、中嶋、都倉 国際会議6, 7, 国内会議1, 9, 10, 13, 15, 17)

昨年に引き続き Aharonov-Bohm 干渉計中の量子ドットと静電的に結合したもう一つの量子ドットに現れる磁束の影響を理論的に調べた。これは電荷測定との反作用の定量的評価も可能なモデルである。また量子連続測定を扱う Mensky の制限経路積分の微視的な導出を行うとともに、測定装置が non-Markov な場合への拡張を行った。また量子測定理論における、弱値と Einselection についても検討を開始した。

(2) 量子ビットと光子場の相互作用 (都倉、大山 書籍1, 国内会議2, 5, 15)

半導体量子ビットの最近の東大・理研グループとの共同研究成果をまとめ出版した。一方、光子場と結合した二準位系の緩和過程について検討を加えた。特に外部測定系によって制限される条件付きの時間発展を調べる手法を開発した。本手法は、non-Markov 的な環境についても定量的な解析が可能である事が分かった。

(3) エンタングルメントの生成と制御 (古谷、都倉 論文9, 国際会議9, 国内会議17)

相互作用する一次元スピン系の量子相転移を量子エンタングルメントの観点から検討を加えている。二体のエンタングルメントを特徴付けるコンカレンスと量子的相関の重み関数の二つにより、量子相転移の挙動は完全に理解できる事を見いだした。また、近接した二つの局在スピンともう一つの電子スピンを一定時間相互作用させてエンタングルメントを生成させる過程を理論的に解析した。ゼロ磁場の条件では、最大エンタングルメント状態は実現可能であるがその生成確率は100%ではない。しかし適切な磁場を印加する事により100%とする事が可能である事を見いだした。

【3】統計力学と乱流の物理

(1) 古典場の系の典型性 (吉田 論文 [8], 国内講演 [8])

標準的な統計力学において、マクロな熱平衡状態はミクロな状態のアンサンブルで記述される。近年、典型性の概念を用いてこのアンサンブル描像の基礎付けが試みられている。アンサンブル内の殆ど全ての状態(典型的状態と呼ばれる)において、注目すべき物理量(状態の関数)が殆ど同じ値を持てば、アンサンブル平均または時間平均をとらずとも個々の典型的状態が熱平衡状態に対応している、という議論である。本研究では、古典系での典型性を、自由度が空間座標でラベルされる古典場の系の場合で考察した。ハミルトニアンが波数空間で互いに独立な調和振動子型

で表せる場合に、ある物理量が典型性を示すための十分条件を求めた。また、その条件を満たしかつ標準的なエントロピーの定義と整合する「マイクロ状態量としてのエントロピー」を構築した。

### (2) 壁乱流の統計法則 (吉田 国内講演 [12])

壁(境界)のある領域内の流体は、十分に発達した乱流状態で粘性底層から十分離れた領域では、平均流速が壁からの距離の対数に比例するという現象論が知られており、実験・数値シミュレーションによっても支持されている。本研究では、愛知工業大学金田行雄教授との共同研究で、対数則の比例係数である Kármán 定数および速度場相関関数の定量的見積もりを得るための完結近似(高次統計量を低次統計量で近似する方法)の手法開発を行った。数値解析を援用して具体的な見積もりを求めるのは今後の課題である。

### (3) 量子流体乱流の統計法則 (吉田 国内講演 [6])

液体ヘリウムの超流動状態や Bose-Einstein 凝縮体の流動などの量子流体の運動は、適切な近似のもと Gross-Pitaevskii (GP) 方程式により支配される。量子流体は、循環が量子化された渦糸が存在するなど、Navier-Stokes 方程式に従う古典流体とは異なる性質を有する。本研究は辻義之教授(名古屋大学)、三浦英昭准教授(核融合研)との共同研究で、GP 方程式に従う乱流の数値シミュレーションを行い、場のスペクトルを研究者自身による理論解析および他の研究者による数値計算の結果との比較を行っている。

## <論文>

(査読論文)

1. Daichi Morita, Toshihiro Kubo, Yasuhiro Tokura, Makoto Yamashita, “Spin-1 Quantum Walk”, accepted for publication to Phys. Rev. A.
2. Ken-ichi Sasaki, Shuichi Murakami, Yasuhiro Tokura, and Hideki Yamamoto, “Determination of intrinsic lifetime of edge magnetoplasmons”, Phys. Rev B **93**, 125402 (2016).
3. Evgenii Novoselov, Stella Bevilacqua, Sergey Cherednichenko, Hiroyuki Shibata, and Yasuhiro Tokura, “Effect of the Critical and Operational Temperatures on the Sensitivity of MgB<sub>2</sub> HEB Mixers”, IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol. **6**, issue 2, 238-244, (2016)  
DOI:10.1109/TTHZ.2016.2520659.
4. Akiko Ueda, Yasuhiro Utsumi, Hiroshi Imamura, and Yasuhiro Tokura, “Phonon-Induced Electron-Hole Excitation and ac Conductance in Molecular Junction”, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 043703 (2016).
5. 柴田浩行、清水薫、本庄利守、武居弘樹、都倉康弘、「冷却フィルタを用いた超伝導単一光子検出器の性能指数向上 および長距離量子暗号通信への応用」電子情報通信学会論文誌エレクトロニクス Vol. **J99-C**No. 3, pp. 51-58, March 2016.
6. T. Yamaguchi, K. Ido, K. Takeda and Y. Tokura, “Reconsideration of the spin-orbit interaction for an electron confined in a quasi-two-dimensional quantum dot: II. Bulkiness and in-plane spin-orbit coupling”, Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 045201 (2016).
7. K. Washio, R. Nakazawa, M. Hashisaka, K. Muraki, Y. Tokura, and T. Fujisawa, “Long-lived binary tunneling spectrum in a quantum-Hall Tomonaga-Luttinger liquid”, Phys. Rev. B **93**, 075304 (2016).
8. Kyo Yoshida, “Typicality and statewise entropy for classical field systems”, EPL, **110**, 60001 (2015).
9. Kaoru Shimizu and Yasuhiro Tokura, “Identifying a correlated spin fluctuation in an entangled spin chain subject to a quantum phase transition”, Phys. Rev. E **92**, 062143 (2015).

10. Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, T. Kubo and Y. Tokura, “Fluctuation theorem for a two-terminal conductor connected to a thermal probe”, *Physica Scripta* **T165**, 014021 (2015).
11. Satoshi Nakajima, Masahiko Taguchi, Toshihiro Kubo, and Yasuhiro Tokura, “Interaction effect on adiabatic pump of charge and spin in quantum dot”, *Phys. Rev. B* **92**, 195420 (2015).
12. Masahiko Taguchi, Denis M. Basko, Frank W. J. Hekking, “Mode engineering with a one-dimensional superconducting metamaterial”, *Phys. Rev. B* **92**, 024507 (2015).
13. Hiroyuki Shibata, Kaoru Shimizu, Hiroki Takesue, and Yasuhiro Tokura, “Superconducting nanowire single-photon detector with ultimate low dark count rate”, *Optics Letters* **40**, 3428 (2015).

<書籍>

1. Seigo Tarucha, Michihisa Yamamoto, Akira Oiwa, Byung-Soo Choi, and Yasuhiro Tokura, “Spin Qubits with Semiconductor Quantum Dots”, Chapter 25, “Principles and Methods of Quantum Information Technologies”, *Lecture Notes in Physics* **911** (2016), Y. Yamamoto, K. Semba (eds.), DOI 10.1007/978-4-431-55756-2\_25.

<講演：国際会議>

1. Yasuhiro Tokura, “Quantum pumping in mesoscopic systems”, *New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics*, Kashiwa, Japan, Jun. 3 (2015).
2. M. Taguchi, D. M. Basko, and F. W. J. Hekking, “Mode engineering with a one-dimensional superconducting metamaterial”, *New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics*, Kashiwa, Japan, Jun. (2015).
3. Daichi Morita, Toshihiro Kubo, Yasuhiro Tokura, and Makoto Yamashita, “Spin-1 Quantum Walk”, *Joint Quantum Center (JQC) Durham-Newcastle, Mini-conference, Non-equilibrium Quantum Dynamics in Low Dimensions*, Durham, UK, 20 July (2015).
4. M. Taguchi, D. M. Basko, and F. W. J. Hekking, “Normal mode engineering for quantum phase fluctuations of an inhomogeneous superconducting loop”, *Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics*, Prague, Czech Republic, Jul. (2015).
5. Satoshi Nakajima and Yasuhiro Tokura, “Quantum adiabatic and diabatic pump in quantum dot: quantum master approach”, *21<sup>st</sup> Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21)*, Sendai International Center, Sendai, Jul. 26 (2015).
6. Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Coulomb Interaction Induced Aharonov-Bohm Oscillations”, *21<sup>st</sup> Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21)*, Sendai, Jul. 27 (2015).
7. Satoshi Nakajima and Yasuhiro Tokura, “Formulation of non-Markovian time-continuous quantum measurement using the Mensky’s restricted path integral”, *15<sup>th</sup> Asian Quantum Information Science Conference (AQIS’ 15)*, PA27, Korea Institute for Advanced Study (KIAS), Seoul, Korea, Aug. 27 (2015).
8. D. Morita, T. Kubo, Y. Tokura and M. Yamashita, “Spin-1 Quantum Walks”, *Int. Symp. Nanoscale Transport and Technology (ISNTT-2015)*, NTT Atsugi R&D Center, Kanagawa, Nov. 18 (2015).
9. Taichi Furuya and Yasuhiro Tokura, “Entanglement dynamics in simultaneously coupling system”, *Int. Symp. Nanoscale Transport and Technology (ISNTT-2015)*, NTT Atsugi R&D Center, Kanagawa, Nov. 18 (2015).

10. Masahiko Taguchi, Denis M. Basko, Frank W. J. Hekking and Yasuhiro Tokura, “Quantum engineering with a one-dimensional superconducting system”, Int. Symp. Nanoscale Transport and Technology (ISNTT-2015), NTT Atsugi R&D Center, Kanagawa, Nov. 18 (2015).

<講演：国内会議>

1. 中嶋慧、都倉康弘「Mensky 制限経路積分による Non-Markov な量子連続測定の定式化」、第32回量子情報技術研究会(QIT32)、2015年5月25日、大阪大学豊中キャンパス基礎工学部国際棟シグマホール、大阪。
2. 大山侑太、都倉康弘「単一光子を用いた2つの物質量子ビット間のエンタングルメント生成」、量子制御技術の発展により拓かれる量子情報の新時代、2015年7月15日、京都大学、京都。
3. 中嶋慧、都倉康弘「Excess entropy の経路依存性」、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月17日、大阪市大、大阪。
4. 藤澤利正、鷲尾和久、中澤遼、橋坂昌幸、村木康二、都倉康弘「量子ホールエッジチャネルによる人工的朝永ラッティンジャー流体の準安定非平衡状態」、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月19日、大阪市大、大阪。
5. 大山侑太、都倉康弘「単一光子検出器によって制限される2準位系の条件付き時間発展」、第33回量子情報技術研究会(QIT33)、2015年11月24日、NTT厚木研究開発センタ、神奈川県。
6. 吉田恭「平衡系統計力学から乱流統計理論への道 -Bose 気体の場合-」、平成27年度物性研究所短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」、2016年1月7日、東京大学物性研究所、柏。
7. 中嶋慧「共変解析力学のDirac場と結合した重力場への適用」、第5回QUATUO研究会、2016年1月11日、高知工科大学、高知。
8. 吉田恭「古典自由場の典型性とマイクロ状態量としてのエントロピー」、QMKEK6「量子論の諸問題と今後の発展」、ポスター発表、2016年2月17日、高エネルギー加速器研究機構、つくば。
9. 浅井海図「Weak Values of Hardy’s Paradox with Several Post-Selections」、QMKEK6「量子論の諸問題と今後の発展」、ポスター発表、2016年2月17日、高エネルギー加速器研究機構、つくば。
10. 熊澤正浩「量子測定理論におけるEinselection及び測定器のオブザーバブルの選択則について」、QMKEK6「量子論の諸問題と今後の発展」、ポスター発表、2016年2月17日、高エネルギー加速器研究機構、つくば。
11. 中嶋慧「共変解析力学の基礎とDirac場と結合した重力場への応用」、QMKEK6「量子論の諸問題と今後の発展」、ポスター発表、2016年2月17日、高エネルギー加速器研究機構、つくば。
12. 吉田恭、金田行雄「壁乱流対数則領域の二点完結近似」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。
13. 森田大地、久保敏弘、都倉康弘「一次元光格子上でのspin-mixing dynamics」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。
14. 田口真彦、Denis M. Basko, Frank W. J. Hekking、都倉康弘「超伝導リングのキャパシタンスとインダクタンスを空間変調させた下での量子位相トンネルの解析」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。
15. 大山侑太、都倉康弘「外部測定系によって制限される量子系の条件付き時間発展の解析」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。
16. 安富幸輝、川畑史郎、都倉康弘「トポロジカル物質と超伝導体接合における熱流の理論」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。
17. 古谷太一、都倉康弘「同時に相互作用する系でのエンタングルメント生成と時間発展」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。

18. 田口真彦、都倉康弘、川畑史郎「超伝導ナノ細線の電場応答特性のシミュレーション」、応用物理学会春季学術講演会、2016年3月19日、東工大大岡山キャンパス、東京。
19. 柴田浩行、清水薫、武居弘樹、都倉康弘「究極的な極低暗計数率を有するSSPDの作製」、応用物理学会春季学術講演会、2016年3月21日、東工大大岡山キャンパス、東京。

<学位論文>

(博士論文) 数理物質科学研究科

1. 田口真彦

“Theory of quantum phase manipulation in semiconducting and superconducting nanostructures”

(修士論文) 数理物質科学研究科

1. 安富幸輝

「トポロジカル物質/超伝導体接合における熱輸送に関する理論」

2. 森田大地

「一次元光格子中のspin-1量子ウォークに関する研究」

(学位論文) 理工学群物理学類

1. 浅井海図

「量子測定論とHardyのパラドックスにおける弱値について」

2. 熊澤正浩

「量子測定理論におけるEinselectionについての研究」

<外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究(A) 課題番号: 26247051 「量子ホールエッジチャンネルの非平衡電荷ダイナミクス」(分担) 平成27年度: 直接経費: 965千円(平成26年度~平成30年度、研究代表者: 藤澤利正)
2. 国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業(チーム型研究(CREST))研究領域「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」(研究代表者: 大岩頭) 研究課題「電子フォトニクス融合によるポアンカレインターフェースの創製」研究題目「光子-電子スピン量子変換理論」平成27年度: 1,950千円(平成27年12月1日~平成32年度)
3. 物質・デバイス領域共同研究拠点 ナノサイエンス・デバイス研究領域(阪大)、研究課題「光-スピン量子インターフェースのための量子ドット設計と開発」共同研究先 第1研究部門(情報・量子科学系) 光・電子材料 大岩頭教授

<社会還元等>

1. 都倉康弘、東京工業大学 客員教授 2015年4月~2016年3月
2. 都倉康弘、茨城県高校生科学研究発表会審査員 2016年3月