

VII-5. 量子輸送研究

教授：都倉康弘

助教：吉田恭

大学院生：博士後期課程 1 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（中嶋、都倉、論文 3, 5、国際講演 2, 3、国内講演 3, 10）

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。熱浴の温度や科学ポテンシャルをゆっくり変動させた時の、過剰エントロピー生成に関して古典系では活発に議論されている。今回量子系での扱いについて、新しい方法を提案し、いくつかの極限条件で従来研究と整合していることを確かめた。ベクトルポテンシャルやスピン・軌道相互作用の強さを周期的に変動させた量子ポンプについて理論的に考察を加えた。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。三重大、ベングリオン大との共同研究である。

(2) メゾスコピック系の物性と伝導現象（都倉 論文 1、国内講演 18）

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。またエッジの非平衡励起のダイナミクスを朝永・ラッティンジャーモデルを用いて解析を進めた。擬二次元量子ドットに閉じ込められた電子スピンに様々なスピン・軌道相互作用がスペクトルに与える影響について検討を加え、摂動展開の一般項とその近似の精度に関する知見を得た。

(3) 光格子中の冷却原子のダイナミクス（都倉 論文 6）

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。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の解析により、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ンネ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) 高感度電荷測定（都倉 国内会議 8）

超伝導接合で有名なジョセフソン効果と双対の関係にある量子位相滑りに関する研究を継続している。今回これ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。産総研との共同研究の成果である。

(5) 一次元トポロジカル物質の端状態（武井、都倉 国内講演 7, 9）

古くから知られている、AB 副格子一次元鎖はトポロジカル的な性質を持ち、端に現れる局在状態で特徴付けられる。今回そのモデルを拡張した次々近接相互作用を入れたモデルを考察し、そのトポロジカルな性質を明らかにし、さらに従来モデルとの接合界面に現れる局在状態の性質について詳しく解析を行った。

【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（浅井、都倉 国内講演 21）

また量子測定理論における、弱値とその測定過程である弱測定は量子力学の特徴が明瞭に現れる研究課題である。弱値は量子力学的平均を一般化したものであり、量子測定の感度向上や通常測りにくい物理量へアクセスできる可能性から注目を集めている。今回、この弱値を混合状態へ拡張する方法について検討を開始した。独自の視点として、量子力学的平均という見方を一般化するアプローチを提案し、その物理的実現可能性を調べた。

(2) 量子ビットと光子場の相互作用 (都倉、大山 国際講演 4, 6, 国内講演 1, 5, 11, 12, 19)

半導体スピン量子ビットのコヒーレント制御について研究を継続している。今回スピン・軌道相互作用を用いた電場誘起スピン共鳴のマイクロ波強度依存性を詳しく調べ、いわゆる 3 次ドレッセルハウス項の寄与によりラビ振動数が飽和傾向を示すことを理論的に明らかにした。一方、光子場と結合した二準位系の緩和過程について擬モードを用いて解析を加え、non-Markov 的な環境の特徴を明らかにした。また、量子ビットのコヒーレンスを保つためにしばしば実行される動的ディカップリングについて考察を加えた。これは連続して π パルスで量子ビット系に加えることによりデコヒーレンスを抑制するというものだが、 π パルスとなる光子系が量子性を持っている場合には、その量子揺らぎに起因する別のデコヒーレンス過程を無視することができない。量子的な光子場を用いた動的ディカップリングにおいて最適なパルス間隔と光子数を初めて理論的に明らかにした。

(3) エンタングルメントの生成と制御 (古谷、都倉 論文 2, 4, 国際会議 1, 5, 国内会議 6, 13, 17, 20)

相互作用する一次元スピン系の量子相転移を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、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。また、この逆過程としてエンタングルした 2 量子ビットのベル状態測定を二つの電子スピンを相互させてそのスピンを射影測定することにより実現することを試みた。従来方法に比べ、より多くのベル基底を識別することが可能であることがわかったが、その忠実度は 1 以下の一定値を超えることができないことを明らかにした。

【3】統計力学と乱流の物理

(1) 古典場の系の典型性 (吉田 国内講演 [2])

近年、典型性の概念を用いて統計力学のアンサンブル描像の基礎付けが量子系を中心に試みられている。本研究では、昨年度に引続き、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。量子場への応用を意識して、生成消滅演算子に対応する場で議論を再構成し、対応するミクロ状態量としてのエントロピーの表現を得た。

(2) 壁乱流の統計法則 (吉田 国内講演 [5])

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に昨年度求めた完結近似(高次統計量を低次統計量で近似する方法)の表式を数値的に解析するコードを開発した。数値解析の実行は今後の課題である。

(3) 乱流中の慣性粒子分布に対する統計法則 (吉田 国内講演 [3])

大気中の雲粒、太陽系惑星形成時のダストの運動等は、乱流中の慣性粒子の運動でモデル化される。本研究では、有木健人研究員（名古屋大学）らとの共同研究で、乱流中の慣性粒子分布に対して、緩和時間をパラメタとする摂動解析で大スケールにおける相似則を導いた。また、完結近似による相似則の比例係数の見積もりも行った。

(4) 量子流体乱流の統計法則（吉田 国内講演 [1, 4]）

液体ヘリウムの超流動状態や Bose-Einstein 凝縮体 (BEC) 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。一方、近年の実験技術の進歩により、生成した BEC を磁場などで駆動して乱流を発生されるようになっている。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、他の研究者による数値シミュレーションと実験の結果との比較を行っている。

<論文>

1. Tatsuki Tojo, Masashi Inui, Ryo Ooi, Kyozauro Takeda, and Yasuhiro Tokura, “Effect of isotropy and anisotropy of the confinement potential on the Rashba spin-orbit interaction for an electron in two-dimensional quantum system”, Accepted for publication to JJAP.
2. T. Shimo-Oka, Y. Tokura, Y. Suzuki, and N. Mizuochi, “Fast Phase-manipulation of the Single Nuclear Spin Induced by an Electric Field”, Phys. Rev. A 95, 032316 (2017).
3. A. Ueda, Y. Utsumi, Y. Tokura, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, “AC transport and full-counting statistics of molecular junctions in the weak electron-vibration coupling regime”, J. Chem. Phys. 146, 092313 (2017).
4. Yuichiro Matsuzaki, Takaaki Shimooka, Hirotaka Tanaka, Yasuhiro Tokura, Kouichi Semba, Norikazu Mizuochi, “Hybrid quantum magnetic field sensor with an electron spin and a nuclear spin in diamond”, Phys. Rev. A, 94, 052330 (2016).
5. Masahiko Taguchi, Satoshi, Nakajima, Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Quantum adiabatic pumping by modulating tunnel phase in quantum dots”, J. Phys. Soc. Jpn, 85, 084704 (2016).
6. Daichi Morita, Toshihiro Kubo, Yasuhiro Tokura, Makoto Yamashita, “Spin-1 Quantum Walk”, Phys. Rev. A 96, 063625 (2016).

<書籍>

<講演：国際会議>

1. Yasuhiro Tokura, Yuta Ohyama and Taichi Furuya, “Coherence of the photo-generated spins and effective Bell measurement”, 2016 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), Hapuna Beach Prince Hotel, Kohala Coast, Hawaii, USA, Dec. 4-9 (2016) (invited).
2. Yasuhiro Tokura, “Dynamical quantum transport in nanostructures”, 6th Int. Quantum Science Symposium Europe-2016 Meeting, Peterhouse, Univ. Cambridge, UK, Nov.

1-2 (2016) (invited).

3. Yasuhiro Tokura, “Quantum adiabatic spin pump in Rashba-Aharonov-Bohm interferometer”, 9th Int. Conf. on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9), Kobe Int. Conf. Center, Kobe, Aug 8-11 (2016).
4. Y. Ohya and Y. Tokura, “Pseudomode quantum jump and memory effect of non-Markovian dynamics”, Resonance and Non-Hermitian Quantum Mechanics 2016, Arata Hall, Osaka University, Aug. 3-5 (2016).
5. T. Furuya and Y. Tokura, “Entanglement dynamics in simultaneously coupling system: Toward the Bell measurement”, The 9th Int. Conf. on Quantum Dot (QD2016), Jeju, Korea, May 22-27 (2016).
6. Yasuhiro Tokura, “Microwave amplitude dependence of electric dipole spin resonance”, China-Japan International Workshop on Quantum Technologies (QTech2016), May 13th-14th, 2016, Beijing (2016) (invited).

〈講演：国内会議〉

1. 都倉康弘, 「Coherent control of single electron spin in a semiconductor quantum dot」, 第55回電子スピンサイエンス学会年会 (SEST2016) ミニシンポジウム, 大阪市立大学、大阪 2016. 11. 12, (招待講演) .
2. 吉田恭「外力・散逸の無い量子流体乱流のシミュレーション」、プラズマシミュレータシンポジウム 2016, ポスター発表、2016 年 9 月 7 日、核融合科学研究所、土岐。
3. 都倉康弘” Quantum adiabatic pumping with modulating phases in an interfereometer”、第6回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、2016 年 9 月 23 日、ホテルサンバレー那須、那須。
4. 吉田恭”Entropy as a function of microscopic state for classical free field systems”、第6回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ポスター発表、2016 年 9 月 22 日、ホテルサンバレー那須、那須。
5. 大山侑太” Bang-Bang control of a qubit with coherent field”、第6回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ポスター発表、2016 年 9 月 22 日、ホテルサンバレー那須、那須。
6. 古谷太一” Calculation of the heat current flowing into quantum dots measured by QPC with the finite temperature difference”、第6回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ポスター発表、2016 年 9 月 22 日、ホテルサンバレー那須、那須。
7. 武井皐” Topological properties of one-dimensional chain and edge states”、第6回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ポスター発表、2016 年 9 月 22 日、ホテルサンバレー那須、那須。
8. 川畑史郎, 田口真彦, 都倉康弘「電荷位相双対性に基づく超伝導ナノ細線電荷センサーの理論」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 13 日、金沢大学、金沢。
9. 武井皐, 都倉康弘「1次元鎖のトポロジカルな性質とエッジ状態」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 13 日、金沢大学、金沢。
10. 植田暁子, 内海裕洋, 今村裕志, 都倉康弘「分子接合におけるフォノンによる電子正孔励起と AC コンダクタンス」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 13 日、金沢大学、金沢。
11. 大山侑太, 都倉康弘「非マルコフ過程における pseudomode とメモリー効果について」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 14 日、金沢大学、金沢。
12. 都倉康弘「電場誘起電子スピン共鳴のマイクロ波振幅依存性」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 15 日、金沢大学、金沢。

13. 清水薫, 都倉康弘「一次元量子スピン系における隣接スピン間エンタングルメントと量子揺らぎ振幅との対応関係」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 16 日、金沢大学、金沢。
14. 有木健人、芳松克則、吉田恭「乱流中の慣性粒子分布に対する統計法則」、鳥取非線形研究会 2016、2016 年 11 月 16 日、鳥取大学、鳥取。
15. 吉田恭「電磁流体・量子流体乱流の統計法則」、第 12 回協定講座シンポジウム、招待講演、2016 年 12 月 6 日、神戸大学、神戸。
16. 吉田恭、金田行雄「壁乱流対数則領域の二点完結近似 II」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。
17. 古谷太一, 都倉康弘「交換相互作用を含む系における電荷/スピン輸送の完全計数統計」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。
18. 東条樹, 武田京三郎, 都倉康弘「二次元量子場における Rashba および Dresselhaus スピン軌道相互作用」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 18 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。
19. 大山侑太, 都倉康弘「量子化された外場による Qubit 操作の不完全性の解析」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 20 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。
20. 下岡孝明, 鈴木義茂, 都倉康弘, 水落憲和「回転場を用いたダイヤモンド中単一核スピンの高速位相制御」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 20 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。
21. 浅井海図, 都倉康弘「弱値における線形応答と感受率について」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 20 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。

<学位論文>

(博士論文) 数理物質科学研究科

1. 中島慧

“Theoretical studies on quantum pump and excess entropy production: Quantum master equation approach”

(修士論文) 数理物質科学研究科

1. 大山侑太

「Qubit 系における外場の影響についての研究」

2. 古谷太一

「1 次元トポロジカル絶縁体におけるゼロモードの研究」

3. 武井卓

「三体系での同時相互作用によるエンタングルメント生成」

(学位論文) 理工学群物理学類

1. 権俣権

「量子マスター方程式を用いた量子ドットと環境の間の電子ダイナミクスに関する研究」

<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ネルの非平衡電荷ダイナミクス」(分担) 平成 28 年度: 直接経費: 1,580 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: 大岩顕) 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28年度：6,500千円（平成27年12月1日～平成32年度）

〈社会還元等〉

1. 都倉康弘、日本物理学会 領域4代表 2016年4月～2017年3月