

VII-5. 量子輸送研究

教授：都倉康弘

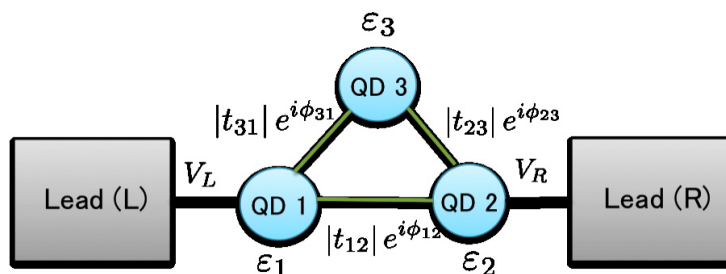
助教：久保敏弘

大学院生：博士後期課程3名、前期課程3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 (論文[5], 国際会議[1, 4], 国内会議[4, 12])

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。周期的に変化する外部パラメタによる「ポンプ現象」は原理的に重要な物理を含むだけでなく電流標準などの応用面でも重要な課題である。量子コヒーレンスが重要となる「量子ポンプ」について、量子ドット間のトンネル位相 (図の ϕ_{12}) を変調するモデルを提案し、これによる量子ポンプ電流を計算した。この解析は、「散乱理論」を用いていたため、相互作用が無い条件に限定されるが、計数統計を取り入れた量子マスター方程式を用いる方法では、相互作用の効果もトンネルの最低次で取り入れる事が可能である。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。



(2) メゾスコピック系の物性と伝導現象 (論文[1, 2, 4, 6], 国内会議[2, 6, 11])

近接した二つの量子細線系はクーロンドラッグと呼ばれる電子相関や、静電誘起 Aharonov-Bohm (AB) 干渉効果など興味深い現象が報告されている。量子細線は一次元状態密度の特殊性から静電結合の効果自体が非自明な物理を含んでいる。今回それぞれの量子細線の伝導を独立に調べる事により、一次元状態密度に起因する特異な静電特性を実験的に調べ理論モデルと比較する事により、その物理を明らかにした。また純粋な二次元系である Graphene では電子スピンの自由度に加え、谷間自由度が重要である。今回 Graphene の動的応答を理論的に調べた結果、系のトポロジーに起因する Berry 位相 (ベクトルポテンシャル) に加え、擬スカラーポテンシャルの効果が期待される事を明らかにした。この効果は、フォノンのダイナミクスに現れる事が期待される。また量子ドット中の電子スピンを用いた量子情報処理について近年の研究の進展に関してレビューした。

(3) 光格子中の冷却原子のダイナミクス (国内会議[3, 9, 14, 16])

光格子中の冷却原子系は、良く制御された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可能である。今期は一次元 Bose-Hubbard モデルを舞台として、トンネル結合が時間的に変化する場合のボゾン粒子の量子ウォーク現象を議論した。また、スピン1のボゾン系ではスピン無依存の相互作用とスピンに依存する相互作用があるため、より多彩な量子ダイナミクスが期

待される。今回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詳しく調べ、その特徴を明らかにした。

(4) 量子位相滑り (国際会議[2, 3], 国内会議[1, 8])

超伝導接合におけるトンネル現象において、クーパー対の位相コヒーレンスが保たれる場合はジョセフソン効果が現れ、これまで詳しく調べられて来た。クーパー対の電荷が良い量子数である場合は、ジョセフソン効果と双対の関係にある磁束のコヒーレントなトンネルである量子位相滑りが予言され、電流標準や高感度電荷計としての展望が理論的に議論されている。しかしながらその実験的実現の為に、散逸の少ない大きなインダクタンスを接合に付与する事が有効である。このインダクタンスを含む電磁場環境を人為的に制御する事により素子の性能改善が可能であることを理論的に示した。

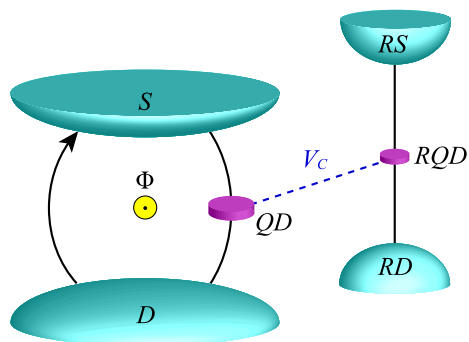
(5) 多分岐量子鍵配送 (国内会議[7])

従来の量子鍵配送はビットエラーに対して脆弱であるが、最近提案された光子の位相変調を信号として使う方法はエラー耐性が高い為注目されている。しかしながら、その為に100以上の長いパルス列に渡って位相情報を保持する必要がある。今回従来の二分岐干渉計を拡張し、三分岐以上の干渉計を使う事を提案し、その基本性能を理論的に解析した。ただその安全性解析には一部不備がある事が判明し、検討を加えているところである。

【2】環境が量子系にもたらすデコヒーレンスと量子統計

(1) 相互作用誘起 AB 振動 (国際会議[5], 国内会議[5])

近年、半導体微細加工技術・低温技術の進展に伴い、量子力学における基本概念が半導体メソスコピック系においても議論されるようになってきた。我々は特にハイゼンベルグの不確定性原理や粒子・波動二重性と深く関係した測定の反作用という概念について、図に示すようなAB干渉計の片方の経路に量子ドット(QD)が1つ埋め込まれた系を想定して議論してきた。今回、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(RQD)における伝導現象に、干渉計を貫く磁束の影響が現れることを理論的に明らかにした。静電相互作用(V_c)が弱い場合は二次摂動論を用い、強い場合は運動方程式と断裂近似を用いて解析した。特に相互作用が強い場合は、RQDのコンダクタンスの変調の可視率が100%となる条件がある事を明らかにした。これは、もとのAB干渉計でのコンダクタンス変調の可視率が非常に小さいという結果と対照的である。



(2) 電圧端子を持つ系のゆらぎの定理 (論文[3])

ゆらぎの定理は、非平衡物理において見られる普遍性を示す重要な研究成果である。しかしながら、系の位相を緩和させる電圧プローブを含む系においてゆらぎの定理が成立するかどうかはまだ

だ明らかにされていなかった。今回、電圧プローブに関わる自由度の時間変化のスケールと、量子系を伝搬する伝導電子の時間スケールに大きな差がある事を用いて、ゆらぎの定理を証明した。その結果を用いて、線形、非線形の電気/熱伝導度、(熱)電流相関(ノイズ)の間に成立する普遍的な関係を求めた。

(3) 量子連続測定 (国内会議[10, 13, 15, 17])

量子連続測定を扱う手法の一つに、Mensky の制限経路積分がある。これは測定データに従って経路積分の積分範囲を制限するものである。我々は 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。更に、被測定系が開放系の場合へも拡張した。

<論文>

(査読論文)

1. Michihisa Yamamoto, Yasuhiro Tokura, Yoshiro Hirayama, and Seigo Tarucha, “Band Shift, Band Filling and Electron Localization in a Quantum Wire Detected by Tunneling between Parallel Quantum Wires”, J. Phys. Soc. Jpn. 84, 033710 (2015).
2. Ken-ichi Sasaki, Yasuhiro Tokura, and Hideki Gotoh, “Valley-asymmetric potential in graphene under dynamical deformation”, Physicsl Review B 90, 205402 (2014).
3. Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, T. Kubo and Y. Tokura, “Fluctuation theorem for heat transport probed by a thermal electrode”, Phys. Rev. B 89, 205314 (2014).
4. Ken-ichi Sasaki, Yasuhiro Tokura, and Tetsuomi Sogawa, “Mechanism of the Doping Dependence of Raman 2D Band - Dirac-Cone Migration -”, JPS Conf. Proc. 4, 012003 (2015).
5. Satoshi Nakajima, Masahiko Taguchi, Toshihiro Kubo, and Yasuhiro Tokura, “Interaction effect on adiabatic pump of charge and spin in quantum dot”, arXiv:1501.06181 [cond-mat] (Submitted to Phys. Rev. B).
6. Seigo Tarucha, Michihisa Yamamoto, Akira Oiwa, Byung-Soo Choi and Yasuhiro Tokura, “Spin qubits with semiconductor quantum dots”, Quantum Computing, Quantum Communication and Quantum Metrology, Lecture Notes in Physics, Springer, in press.

<講演：国際会議>

1. Masahiko Taguchi, Satoshi Nakajima, Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Quantum Adiabatic Pumping with Tunneling Phase in Quantum Dot System”, 32nd Int. Conf. Physics of Semiconductors, Austin, Texas, USA, Aug. 14, (2014).
2. M. Taguchi, D. M. Basko, F. W. J. Hekking, & Y. Tokura, “Quantum fluctuations of a superconducting loop embedded in an inhomogeneous electromagnetic environment”, Frontiers of Condensed Matter, San Sebastian/Spain, Aug 25 - Sep. 5 (2014).
3. M. Taguchi, D. M. Basko, F. W. J. Hekking, & Y. Tokura, “Mode engineering for quantum phase fluctuations of a thin superconducting loop closed by Josephson junction”, Tsukuba Nanotechnology Symposium, Tsukuba, Jul. 25-26 (2014).

4. S. Nakajima, M. Taguchi, T. Kubo and Y. Tokura, “The effect of Coulomb interaction of adiabatic pump in quantum dot”, Tsukuba Nanotechnology Symposium, Tsukuba, Jul. 25-26 (2014).
5. Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Non-local Aharonov-Bohm Effects in Transport through a Quantum Dot Capacitively Coupled to a Non-equilibrium Aharonov-Bohm Interferometer”, 8th International Conference on Quantum Dots (QD2014) Pisa, Italy, May 11-16(2014).

〈講演：国内会議〉

1. 田口真彦, Denis Basko, Frank Hekking, 都倉康弘, “不均一な電磁場中における超伝導リングの理論的解析”, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大, 7aBB-11 2014/9/7.
2. 佐々木健一, 都倉康弘, 後藤秀樹, “動的格子変形のあるグラフェンにおけるバレー非対称なポテンシャル”, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大, 8aAH-6 2014/9/8.
3. 森田大地, 久保敏弘, 都倉康弘, “ホッピングパラメタが振動する Bose Hubbard model のダイナミクス”, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大, 8aAW-7 2014/9/8.
4. 都倉康弘, 田口真彦, 中嶋慧, 久保敏弘, “トンネル結合の位相変調による定常ポンプ電流”, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大, 8pAV-8 2014/9/8.
5. 久保敏弘, 都倉康弘, “干渉計と静電的に結合した量子ドット系における非局所 Aharonov-Bohm 振動”, 日本物理学会 2014年秋季大会、中部大, 8pAV-9 2014/9/8.
6. 久保敏弘, 都倉康弘, “超伝導電極を用いた量子ドットスピン干渉計におけるスピン分極の検出”, 第75回 応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学 18a-A27-9, 札幌, 2014/9/18.
7. 酒井一樹, 吉田恭, 都倉康弘, “多分岐によるエラー耐性の高いラウンドロビン DPS-QKD”, 日本物理学会 第70回年次大会 21aAn-10, 早稲田大学, 2015/3/21.
8. 田口真彦, Denis M. Basko, Frank W. J. Hekking, 都倉康弘, “A 超伝導リングの荷電エネルギーとクーパー対密度を空間変調させた下での有効ジョセフソンエネルギーの解析”, 日本物理学会 第70回年次大会 21aBK-7, 早稲田大学, 2015/3/21.
9. 森田大地, 久保敏弘, 都倉康弘, 山下真, “スピン1 ボゾンの2粒子量子ウォーク”, 日本物理学会 第70回年次大会 21pAG-6, 早稲田大学, 2015/3/21.
10. 中嶋慧, 都倉康弘, “Mensky 制限経路積分の Non-Markov への応用: 量子連続測定へのアプローチ”, 日本物理学会 第70回年次大会 21pAN-2, 早稲田大学, 2015/3/21.
11. 柴田 浩行, 開 達郎, 土澤 泰, 武居 弘樹, 清水 薫, 山本 剛, 都倉 康弘, 山田 浩治, “Si 細線導波路結合型 SSPD の作製”, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 12p-A3-1, 東海大学, 2015/3/12.
12. Y. Tokura, M. Taguchi, S. Nakajima, and T. Kubo, “Current induced by time-dependent phase of tunnel coupling”, Nasu spin camp, Sep. 11, 2014.
13. 中嶋慧, “量子連続測定 of Mensky 制御経路積分による定式化: Non-Markov への拡張”, 第4回 quatuo 研究会、高知、2015/1/12.
14. 森田大地, “スピン1 ボゾンの2粒子量子ウォーク”, 第4回 quatuo 研究会、高知、2015/1/12.
15. 中嶋慧, 都倉康弘, “Mensky 制限経路積分の Non-Markov な場合への拡張”, 第31回量子情報技術研究会(QIT31)、東北大学片平キャンパス、仙台, 2014/11/17-18.
16. 森田大地, 久保敏弘, 都倉康弘, “ホッピングパラメタが振動する Bose Hubbard model のダイナミクス”, 若手のための量子情報基礎セミナー、京都大学、2014/8/8-10.
17. 中嶋慧, 都倉康弘, “弱い量子連続測定”, 若手のための量子情報基礎セミナー、京都大学、2014/8/8-10.

〈学位論文〉

(修士論文) 数理物質科学研究科

1. 酒井一樹

「Round-Robin 差動位相シフト量子鍵配送の改良プロトコルおよび鍵生成率への散逸の影響」

(学位論文)

1. 大山侑太

「Qubit としての NV 中心の近似的解析と数値計算による評価」

2. 武井阜

「量子ホール絶縁体におけるエッジ状態、及び散乱理論を用いた外因性スピンホール効果について」

3. 古谷太一

「光子における Berry 位相とそれに起因した物理現象の研究」

〈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ネルの非平衡電荷ダイナミクス」(分担) 平成26年度: 直接経費: 1,528 千円 (平成26年度~平成30年度、研究代表者: 藤澤利正)
2. 総務省戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE) 課題番号: 20393788 「集積化可能な電気制御スピン量子ビットで構成される量子インターフェースの研究開発」(分担) (研究代表者: 樽茶清悟) 「スピン量子コンピュータの理論研究」平成26年度: 273 千円 (平成26年度)
3. 科学研究費 若手研究(B) 課題番号: 26870080 「メソスコピック系における測定の反作用とトポロジカルな準粒子」(研究代表者: 久保敏弘) 平成26年度: 直接経費: 1,000 千円 (平成26年度~平成28年度)

〈社会還元等〉

1. 都倉康弘、国立情報学研究所 客員教授 2010年3月~2015年3月
2. 都倉康弘、東京工業大学 客員教授 2014年4月~2015年3月
3. 都倉康弘、茨城県科学研究コンテスト評価員 2015年3月

〈その他: セミナー〉

1. M. Taguchi, S. Nakajima, T. Kubo, & Y. Tokura, “Quantum adiabatic pumping with tunneling phase in quantum dot systems”, Seminar at LPMMC, Grenoble/France, May 19, 2014
2. Y. Tokura, “Control and detection of spins in quantum dot system”, Seminar talk at CEA Grenoble/France, Jan. 23, 2015.
3. M. Taguchi, Denis. M. Basko, Frank. W. J. Hekking, & Y. Tokura, “Mode engineering for quantum phase fluctuations of a thin superconducting loop closed by Josephson junction under periodically modulating charging energy and superfluid density”, Seminar at Institute Neel, Grenoble/France, Feb. 11, 2015
4. 中嶋慧, “Applications of the generalized quantum master equation to a quantum adiabatic pump and an excess entropy production”, 京都大学基礎物理学研究所、京都、2015/1/28.