

NEWS LETTER

Vol. 11

2013年11月29日

文部科学省科学研究費補助金
新学術領域研究（領域提案型）
領域代表者／独立行政法人 理化学研究所
蔡 兆申（ツァイ ツァオシェン）

QUANTUM CYBERNETICS

量子サイバネティクス

[量子制御の融合的研究と量子計算への展開]

<http://www.riken.jp/Qcybernetics/index.html>



QUANTUM
CYBERNETICS

目次

文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究
「量子サイバネティクス - 量子制御の融合的研究と量子計算への展開」

研究項目

<超電導系>	研究代表者: 蔡 兆申 独立行政法人理化学研究所	2
<半導体系>	研究代表者: 都倉 康弘 筑波大学	3
<分子スピン系>	研究代表者: 北川 勝浩 大阪大学	4
<冷却原子系>	研究代表者: 高橋 義朗 京都大学	5
<イオントラップ系>	研究代表者: 占部 伸二 大阪大学	5
<光子量子回路系I>	研究代表者: 竹内 繁樹 北海道大学	6
<光子量子回路系II>	研究代表者: 小芦 雅斗 東京大学	7

2012年度公募研究採択課題

<トポロジ符号化された量子計算のためのコンパイラ>		8
	研究代表者: デビット サイモン 国立情報学研究所	
<電子スピンのコヒーレント初期化の研究>		8
	研究代表者: 舩本 泰章 筑波大学	
<シリコン量子ビット実現に向けた要素技術の開発と関連物理の解明>		9
	研究代表者: 小寺 哲夫 東京工業大学	
<量子コヒーレント状態の制御検出における非平衡量子統計熱力学の理論研究>		9
	研究代表者: 内海 裕洋 三重大学	
<長距離電子スピン状態転送を実現する荷電状態制御単一光子素子の研究>		10
	研究代表者: 中岡 俊裕 上智大学	
<光合成蛋白における生体分子スピン系の量子情報操作に向けた研究>		11
	研究代表者: 松岡 秀人 ボン大学	
<ダイヤモンドNV中心における量子情報の電氣的制御に向けた研究>		12
	研究代表者: 水落 憲和 大阪大学	

<研究項目A: 固体素子系量子サイバネティクス>

計画研究 A01: 超伝導量子サイバネティクスの研究

研究代表者 / 蔡 兆申 (独立行政法人理化学研究所・チームリーダー 及びNECスマートエネルギー研究所・
主席研究員)

ZcQED: a scalable architecture for superconducting qubits

So far, circuit QED has been dealing with artificial atoms coupled transversely (ie. *via* s_x) to one or few bosonic modes: we introduce a new paradigm wherein an artificial atom is coupled longitudinally (ie. *via* s_z) to a quantum harmonic oscillator which we call ZcQED, akin to trapped ions systems in atomic physics. We find that this system is free of dispersive shift when the qubit is operated at its symmetry point, and we reveal the possibility to perform single-qubit operations and sideband transitions at any order when the qubit is driven transversely, with the same nonlinearity of the matrix elements as a function of the photon states which is found in ion-traps [1]: a main difference however is the presence of a fixed coupling between the qubit and the resonator which introduces some static residual interactions between physical qubits ($s_z s_z$ type). We devise an architecture to process quantum information based on this new layout, inspired by the ideas developed in trapped ions experiments: a noticeable difference in ZcQED is the possibility to achieve rather strong atom-photon coupling. This naturally brings us to operate such system out of the Lamb-Dicke regime, and to look for ways to overcome the limitations imposed by the nonlinearity of the Jaynes-Cummings model in this configuration [1].

We are considering a 2D array of qubits with nearest-neighbor interactions, motivated by the possibility to use the surface code to realize error correction. In order to cancel the residual interactions between each pair of neighboring physical qubits, we couple them *via* two resonators fixedly coupled in series. This extra degree of freedom in the system allows to realize sideband transitions while ensuring an intrinsic protection against the leakage of information out of the computational subspace, even though we are working out of the Lamb-Dicke regime. It also brings the possibility to readout the state of the qubits following the proposal by Englert *et al.* inspired from electron shelving [2].

[1] W. Vogel and R. L. de Matos Filho, Phys. Rev. A **52**, 4214 (1995).

[2] B. G. U. Englert, G. Mangano, M. Mariani, R. Gross, J. Siewert and E. Solano, Phys. Rev. B **81**, 134514 (2010).

近藤状態にある量子ドットを伝播する電子の精密位相測定

多体相関の代表例として知られる近藤効果は、局在スピンとそれを取り囲む伝導電子との間の相互作用によって生じ、多体のスピン一重項基底状態で特徴付けられる。近藤状態における散乱問題は、低エネルギー領域で成立する Nozières によるフェルミ液体理論[1]に集約される。すなわち、低温では局在スピンの伝導電子によって遮蔽され、近藤基底状態を介した散乱は、単一の電子から単一の準粒子へのスピン反転を伴わないコヒーレントな散乱となるが、スピンの遮蔽(スピン一重項)の形跡が電子の散乱位相 $\pi/2$ として残る。この位相の $\pi/2$ シフトは、近藤効果の最も本質的な性質を反映したものであるが、技術的な難しさから実験的な証明はなされていなかった。

アハロノフボームリングとトンネル結合量子細線によって形成される固体の 2 経路干渉計では、電子がどちらの細線に存在するかによって定義される飛行量子ビットの状態変化を通して、電子の伝播位相を直接、高精度で測定することが可能である[2]。それに加え、干渉計を用いた位相測定では、単一粒子のスピン反転を伴わない散乱に相当するコヒーレントな電流成分だけを集めることができる。エネルギーと位相の線形性から温度による寄与がキャンセルされ、低温極限で予測される $\pi/2$ シフトは近藤温度 T_K まで残る。我々は、位相の $\pi/2$ シフトと、それが温度 T_K まで残ることを初めて実験的に確認した。また、温度が T_K を超えると、各クーロンピークでの位相変化が $\pi/2$ を超え、フリーデルの総和則で記述される通常のクーロンピークでの振る舞いに近づいていくことを確認した。また、実験結果は数値繰り込み群による計算結果と非常に良い一致を示した。

この精密な位相測定の結果は、2 経路干渉計において飛行量子ビット状態が高い精度で制御されてことも同時に示している。

[1] P. Nozières, Journal of Low Temperature Physics **17**, 31 (1974).

[2] M. Yamamoto, S. Takada, C. Bäuerle, K. Watanabe, A. D. Wieck and S. Tarucha, Nature Nano. **7**, 247 (2012).

<研究項目 B: 分子スピン量子サイバネティクス>

計画研究 B01: 分子スピン量子制御

研究代表者 / 北川 勝浩 (大阪大学大学院基礎工学研究科・教授)

QC/QIP 及び DNP のための開殻系分子である弱交換相互作用系ピラジカルやトリラジカルの電子スピン物性評価のためのパルス電子スピンニューテーション分光学の確立、及び NMR paradigm based 電子スピン共鳴法の開発

発信者: 大阪市大・院・理 工位 武治

アンサンブル系分子スピン量子コンピュータの開拓には、分子内に g テンソルが異なる複数の電子スピン量子ビットをもち、かつ電子スピン間に働く交換相互作用を弱めた多電子スピン量子ビット系を新たに設計し、合成しなければならない。この分子設計アプローチを g テンソルエンジニアリングという。弱交換相互作用は、電子スピン量子ビットの状態操作に必要な電波分光技術であるパルスマイクロ波技術の制限による要請である。 g テンソルエンジニアリングは、高磁場溶液 NMR だけでなく著しい感度向上を目指す高磁場固体 NMR における DNP reagents の探索・開発では、molecular optimization の key concept である。今回、弱交換相互作用系で、電子スピン間の微細構造テンソルの主値 (微細構造定数: ゼロ磁場分裂定数) が小さな開殻系に対して、主値を実験的に決定できる一般的なアプローチを実験・理論の両面から初めて確立した。この方法は、単一マイクロ波周波数を用いるパルス電子スピン共鳴法の一つであるために、実験的セットアップは比較的容易であり、かつ系の配向状態に制限を受けない磁気共鳴分光法である。本研究では、核スピンによる超微細相互作用テンソルが複数電子スピンのニューテーション運動にどのように影響するかも、単結晶サンプルを用いて詳細に調べて、交換相互作用、微細構造相互作用、超微細構造葬儀作用の大きさが競走するケースの解析法も確立した[1]。

分子スピン量子ビット系では、global control のスピントクノロジーは未成熟である現在、個々のビット操作には異なるパルスマイクロ波共鳴周波数を用いることが、分子スピン系の QC/QIP にはふかいつであるので、これまで開発してきた、dual coherent ELDOR (ELectron-Electron DOuble Resonance) を、電子スピン bus qubit と核スピン client qubits を等価に、NMR 並みのスピン制御ができる実験方式を完成させた。

[1] Kazuki Ayabe, Kazunobu Sato,* Shigeaki Nakazawa, Shinsuke Nishida, Kenji Sugisaki, Tomoaki Ise, Yasushi Morita,* Kazuo Toyota, Daisuke Shiomi, Masahiro Kitagawa, Shuichi Suzuki, Keiji Okada* and Takeji Takui*, "Pulsed electron spin nutation spectroscopy for weakly exchange-coupled multi-spin molecular systems with nuclear hyperfine couplings: A general approach to bi- and tri-radicals and determination of their spin dipolar and exchange interactions", *Mol. Phys.*, **111**, 2767-2787 (2013).

<http://dx.doi.org/10.1080/00268976.2013.811304>

<研究項目C：原子イオン系量子サイバネティクス>

計画研究 C01：冷却原子を用いた量子制御

研究代表者 / 高橋 義朗 (京都大学大学院・教授・原子物理学)

本研究では、レーザー冷却された中性原子を光格子に導入した系を用いた量子計算や量子シミュレーション、量子計測、および核スピン集団を用いた量子フィードバック等の量子系の制御技術の開発を目指している。研究の進捗状況は以下の通りである。

まず、超低温原子に対する、究極の量子計測や量子状態制御および高分解能プローブとして注目されている、イッテルビウム原子の超狭線幅遷移の分光用光源の開発に成功した。2つの同様に開発したレーザー光源のビートを測定することにより、約3 Hz程度の線幅まで安定化できていることを確認した。これにより、これまでの光源と比べて、約300倍だけ分解能を向上させることが可能になり、今後、様々な研究に用いることができる。

また、光格子中の超低温原子集団に関する観測法について、我々はこれまで高い空間分解能を持ったイメージング技術の開発と、高い周波数分解能を持ったスペクトロスコピー技術の開発を独立に行ってきたが、今回、この二つの究極の計測技術を組み合わせ、「スペクトラルイメージング法」を、単一の層の2次元量子気体に対して開発することに成功した。光格子を形成するポテンシャルのわずかな空間不均一性を、超狭線幅光学遷移を用いた高分解能分光により明らかにすることに成功するとともに、2次元面内に磁場勾配を加えて、量子気体の磁気共鳴イメージングを行うことに成功した。この手法を用いて、トポロジカル超流動体のエッジ状態などの観測に威力を発揮すると考えている。

計画研究 C02：開放型イオントラップ系による量子情報処理

研究代表者 / 占部 伸二 (大阪大学大学院基礎工学研究科・教授)

量子ビット制御用レーザーの線幅の改良

多粒子エンタングルメントは量子力学を特徴づけるものであるとともに、量子情報処理においては資源とも考えられるものである。イオン系では最大14個の粒子のエンタングル状態(GHZ状態)が生成されている。我々のグループではGHZ状態とは異なるクラスのエンタングル状態(Dicke状態)の生成を過去に試み、最大4粒子のエンタングルメントの生成に成功した。このエンタングル状態の生成においては、外界との結合によるデコヒーレンスや外部パラメータの変動によるディフェイジングが生成のフィデリティを下げてしまう。我々はそれらの抑制に継続的に取り組んできたが、今回特にカルシウムイオン量子ビット遷移励起用のレーザーのコヒーレンス時間を向上させることに成功した。具体的には、リングチタンサファイアレーザーの出力周波数を、超低膨張率のガラス素材をスペーサーとして用いたファブリーペロー共振器の共鳴周波数にデジタル信号処理技術を利用して安定化した。単一カルシウムイオンへの照射によるラムゼイ干渉実験を行ったところ、20ms程度のコヒーレンス時間が得られた。これは線幅にして8Hzに相当する。複数のゼーマン成分に対する測定から、この線幅の大部分は磁場によって決定されていることがわかり、レーザー自体の寄与は1Hzのオーダーとなっていると見積られる。今後このレーザー光源を用いて多粒子エンタングル状態の生成に取り組む予定である。この高安定レーザー光源は、エンタングル状態生成以外に量子シミュレーション実験や光周波数標準の研究にも効力を発揮することが期待される。

<研究項目D：光系量子サイバネティクス>

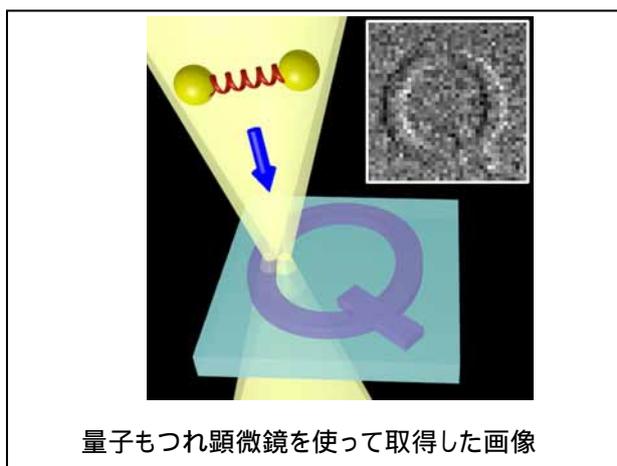
計画研究 D01：光子量子回路による量子サイバネティクスの実現
研究代表者 / 竹内 繁樹 (北海道大学電子科学研究所・教授)

光子は、すぐれた制御性を持ち、また自然原子や分子、人工原子とのインターフェイスが容易です。また、これまでに線形光学素子と射影測定を組み合わせた最大規模の量子回路を実現されています。私たちの計画班では、量子サイバネティクスの概念に基づく量子制御複合テストベッドを実際に構築、最適な量子情報制御の創出とともに、異種量子間量子状態制御の実現や、量子制御内蔵光デバイスの創成も目指しています。

これまで光学顕微鏡の深さ方向分解能や計測精度は、標準量子限界と呼ばれる、光の古典理論によって決まる信号雑音比で決まっていた。その限界の下では、より高い深さの分解能や計測精度を得るためには、より強い光を当てるしか方法がありません。しかし、強い光を照射すると、対象サンプルの損傷などの影響を与えるため、重大な問題となっていました。

私たちのグループは、もつれ光子を微分干渉顕微鏡の照明光として利用することで、標準量子限界を突破することを発案しました。私たちは、光量子コンピュータの研究で培った、良質な量子もつれ光子対源などの技術を用い、「量子もつれ顕微鏡」を世界で初めて実現しました。その顕微鏡を用い、ガラス基盤の表面に、原子 100 個程度の厚みで浮き彫りされた「Q」という文字の観察を行った結果、通常の光を用いた観察(標準量子限界)に比べ、1.35 倍の信号雑音比を達成しました。今後、より多数の光子のもつれ状態を実現することで、微分干渉顕微鏡の「感度」を、標準量子限界を大きく超えていくことが可能です。本研究の成果により、生体細胞などをより高い精度で観測することが可能になり、生物学、医学などをはじめ幅広い分野への応用が期待されます。

[1] T. Ono, R. Okamoto, S. Takeuchi, An entanglement-enhanced microscope. *Nat. Commun.*4, 2426 (2013).

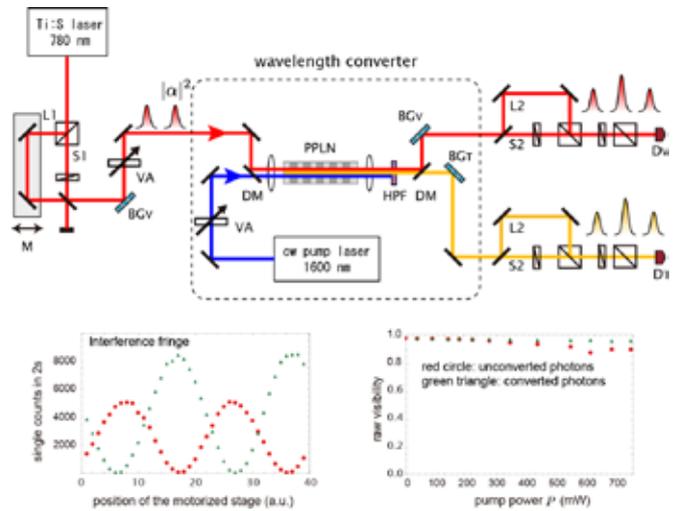


計画研究 D02: 光を基軸とした多キュービット量子制御

研究代表者 / 小芦 雅斗 (東京大学大学院工学系研究科付属光量子科学研究センター・教授)

光子レベルで動作するコヒーレントな部分波長変換装置

量子情報を保存したまま光子の波長を変える量子インターフェースが最近注目されている。十分に強い光で励起された非線形光学媒質を介して2つの光モード間で波長変換が起こる過程は、実効的に周波数領域におけるビームスプリッターのハミルトニアンによって記述される。量子レベルで動作する新しいタイプのビームスプリッターに向けて、今回、平均光子数約 0.1 の波長 780 nm の入力光パルスを二つ用意し、1600 nm の光で励起された周期分極反転ニオブ酸リチウムによって 1522 nm へと部分波長変換を行った。そして、出力された二つの波長、780 nm と 1522 nm のいずれも、入力光の位相情報を高い明瞭度で保持していることを観測した。様々な変換効率 R において観測された明瞭度は、いずれの波長でも、0.88 を越えていた。とくに、 $R=1/2$ では、0.98 以上の高い明瞭度が観測された。このような波長変換装置は、周波数領域の自由度に載せた量子情報の制御に役立つと考えられる。[R. Ikuta, et. al., Opt. Express 21, 27865 (2013).]



<2012年度公募研究採択課題>

研究課題 02: トポロジック符号化された量子計算のためのコンパイラ

研究代表者 / デビット サイモン (国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系・特任助教)

Our recent work into circuit optimisation and compilation for large-scale, topological quantum computation has allowed us to perform a detailed and fully complete resource estimate for a large quantum algorithm. The results of the study, published in the journal Nature Communications, reveal the number of physical devices and the amount of time required to execute Shor's algorithm for factoring numbers on a quantum computer built from realistic hardware. We illustrate what a complete resource analysis for a quantum computation requires and explicitly take into account all aspects of an error corrected computation. We show that classical circuit optimisation, rather than more accurate quantum hardware has the greatest potential to minimise resources for large quantum algorithms.

研究課題 03: 電子スピンのコヒーレント初期化の研究

研究代表者 / 舩本 泰章 (筑波大学数理物質系物理学域・教授)

ZnO:Ga のトリオン共鳴カー回転

量子通信の媒体となる偏光との整合性が良いスピン量子メモリーとして期待される半導体中の局在電子スピンの集団の緩和時間は核磁場分布の分散により律速される。核スピンのゼロになる核の自然存在比が大きい長いスピン緩和時間 $T_2^* = 12\text{ns}$ を持つ ZnO 薄膜中の Ga ドナー (濃度 $6 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$) により与えられた局在電子からトリオンを生成する共鳴励起によるスピン初期化の過程を調べている。

すでにフェムト秒時間分解カー回転測定法では共鳴スピン増幅を用いて長い緩和時間 $T_2^* = 12\text{ns}$ を精度よく求めたが、フェムト秒時間分解カー回転測定法ではエネルギー分解能が足りないため、スペクトル幅が 0.2meV と狭いピコ秒パルス (2ps) を使った時間分解カー回転測定法を用いて、A 励起子の低エネルギー側の裾でレーザーエネルギーを変えてカー回転を調べると、A 励起子と D⁰X 共鳴エネルギー近傍で電子のカー回転信号 (磁場 0.5T のとき周期 74ps) が符号を変えながら増強される。特に D⁰X 共鳴エネルギー近傍では、D⁰X の発光ピークおよびその $2\text{meV} - 4\text{meV}$ ほど低エネルギーでも電子のカー回転信号が増強される。

さらに D⁰X 共鳴エネルギー近傍では、120fs の時間分解カー回転測定法で全く見えなかった電子の才差運動以外の微細な振動構造 (周期 19ps) がカー回転信号の立ち上がり部分に観測され、 0.2meV のエネルギー微細構造による量子ビートと推察している。

D⁰X 共鳴エネルギー近傍で見られるこれらのピコ秒パルス時間分解カー回転の振る舞いは ZnO 結晶中で Ga から供給された電子から光励起で形成された 2 電子と 1 正孔からなるトリオンの微細構造を考えると、トリオン近傍で激しく変化するカー回転信号を説明することができるのではないかと考えている。

研究課題 04: シリコン量子ビット実現に向けた要素技術の開発と関連物理の解明

研究代表者 / 小寺 哲夫 (東京工業大学量子ナノエレクトロニクス研究センター・助教)

量子ドット中のスピンを用いた量子計算の研究は、GaAs 系量子ドットを中心に盛んに進められてきた。しかし、核スピンによるデコヒーレンスの問題、エレクトロニクス技術との適合性を考慮すれば、将来的にはシリコン系量子ドットへの展開が必要と考えられる。この研究展開をより速やかに進めるためには、GaAs 量子ドットの技術や物理的知見をシリコン量子ドットに適用し、上手く融合させることが肝要である。本研究では、まずシリコン量子ドット素子の設計・作製を行い、さらに高周波電圧操作を用いてスピンの操作や読み出しを行う計画である。

今回、量子ドット電荷検出計を近傍に配置したシリコン直列 2 重量子ドットの電気伝導特性評価を行った。素子は、非ドーブの Silicon-on-insulator (SOI) 基板を用いて、2 重量子ドットと電荷検出計および複数のサイドゲートを電子線リソグラフィとドライエッチングにより作製した構造になっている。ポリシリコンのトップゲートを有しており、正の電圧を印加することにより、チャンネルに電子を誘起する。2 重量子ドットの 2 つのサイドゲートを掃引しながら、量子ドット電荷検出計の電流を測定することで、少数電子 2 重量子ドットに特有のハニカム状の電荷安定状態図を得ることができた。また、電圧パルス操作を行うことにより、2 電子スピン状態が関与する電気伝導特性(パウリスピンブロッケード)の観測に成功した。ある特定の電子数では、スピンとパレーの関与するトンネル現象が捉えられると考えられ、今後緩和時間の比較等の実験を進める。

研究課題 05: 量子コヒーレント状態の制御検出における非平衡量子統計熱力学の理論研究

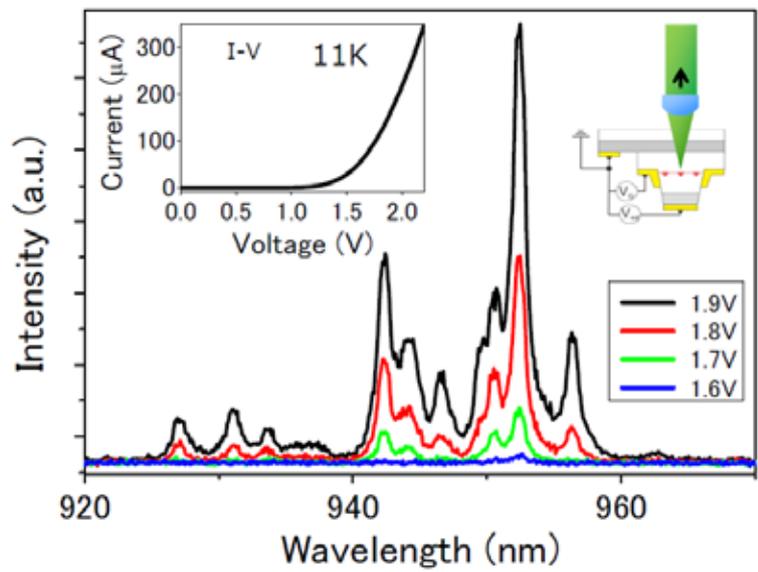
研究代表者 / 内海 裕洋 (三重大学工学部物理工学科・准教授)

超伝導量子素子や半導体量子ドットをもちいて、電荷・磁束・スピン量子ビットのコヒーレントな状態を、制御・検出する技術が発展している。一方で近年、「揺らぎの定理」に代表されるメソスコピック系の統計力学、熱力学が発展しており、固体素子を用いて、単一電子における非平衡統計力学が研究されるようになった。メソスコピック系の統計力学、熱力学は、系を外部から駆動して仕事をしたときの非平衡揺らぎの分布を用いて構築される。このような操作と測定は、ナノスコピック固体素子をもちいることで、量子系でも実現できると期待される。本プロジェクトの大きな目標は量子系において揺らぎの定理を検証する方法を理論的に提案することである。

現在まで、量子揺らぎの定理の検証のために必要な事項について分析を進めてきた。現在は揺らぎの定理を、固体量子ビットを用いることで検証する方法を検討している。理論モデルとして 2 準位系と結合した熱溜めのを考え、その発熱分布に関する完全計数統計理論を構築し、状態を選択した場合の揺らぎ定理を検討している。また、とくに $1/f$ 揺らぎについてロバストな検証方法を検討中である。

研究課題 06: 長距離電子スピン状態転送を実現する荷電状態制御単一光子素子の研究
研究代表者 / 中岡 俊裕 (上智大学理工学部・准教授)

本研究では、将来の半導体電子デバイスによる離れた2素子間量子もつれを目指したサイドゲート制御型量子ドット単一光子素子の作製、必要な技術開発を行っている。今回、サイドゲートを持つ電流注入型量子ドット LED 作製に成功した。下図に典型的な I-V 特性と開発した素子とスペクトルを示す。本素子表面はサイドゲート、ドレイン電極に覆われているため、測定は本研究で開発した裏面からの反射率マッピング手法を駆使しておこなった。良好なダイオード特性と単一量子ドットからの電流注入発光を観測できた。現在、素子の歩留まり向上のためのプロセス条件の最適化と単一光子発生確認のための光子相関測定の準備を進めている。



研究課題 07: 光合成蛋白における生体分子スピン系の量子情報操作に向けた研究
研究代表者 / 松岡 秀人 (ボン大学 物理・理論化学研究科・上席研究員)

光合成において常温でもエンタングルド状態を保持している分子の存在が、近年複数のグループによって示されてきた。我々もまた、光合成反応における光エネルギー変換の初期過程において、純粋な一重項状態をとるスピン相関ラジカル対 (correlated spin pair) が光誘起電子移動によって生成され、室温においても比較的長寿命のコヒーレンスを有していることを示してきた。ラジカル対の固有状態間に生ずるコヒーレンスは、高時間分解 EPR (Electron Paramagnetic Resonance) 法によって量子ビートとして観測される。熱的に常に揺らいでいる多数の水分子やアミノ酸分子などが存在する生物的環境において、いかにして長寿命の量子コヒーレンスを維持しているのか明らかにするため、本研究ではラジカル対を対象に高時間分解 EPR による研究を行ってきた。光合成の電子移動経路は各タンパク質中に 2 つあり、それぞれの経路上でラジカル対が生成される。本研究ではまず、一方のラジカル対のみを対象に実験を行った。その結果、コヒーレンス時間は主に、周辺の核スピンによって影響を受けていることが明らかとなり、シアノバクテリアタンパク質中の置換可能な水素および窒素を、重水素化および ^{15}N 置換すると、量子コヒーレンス時間は 600 ns から 1.2ms まで伸びた。しかし、もう一方のラジカル対は、同じような化学的環境下に置かれているにもかかわらず、量子コヒーレンス時間は半分であった。Q-band (34GHz, 1.2T) および W-band (94GHz, 3.4T) EPR 測定から、量子コヒーレンス時間に磁場依存性はないことがわかった。現在、化学的環境を更に変化させながら、量子コヒーレンス時間の解析を行っている。

研究課題 08: ダイヤモンドNV中心における量子情報の電氣的制御に向けた研究
研究代表者 / 水落 憲和 (大阪大学基礎工学研究科・准教授)

我々はダイヤモンド中の単一窒素 空孔複合体(NV)中心に注目して研究している。NV 中心の特筆すべき点として、固体中のスピンにも関わらず気相中の原子/イオンや液相中の分子等の微視的系に匹敵する優れたスピンコヒーレンス特性を持ち、光により検出・操作することが可能な点が挙げられる。近年、NV 中心の電荷状態の制御について関心もたれている。NV 中心の電荷状態は光励起により Stochastic に変化し、その変化速度は励起波長に依存することが知られてきていた。例えば良く用いられる 532nm の光励起では、-1 価の電荷状態(NV⁻)と中性の電荷状態(NV⁰)の割合が、定常状態では NV⁻:NV⁰ = 3:1 であることが知られてきている。電荷状態の制御は量子情報やセンサーへの応用を考えた際に非常に重要である。

最近、我々は電氣的に単一 NV 中心の電荷状態の制御を行い、電荷状態のシングルショット測定により電荷状態がほぼ 100%の確率で、NV⁻から NV⁰に制御したことを定量的に示すことができた。今回の成果は Deterministic に純粋状態への生成を電氣的に制御できた点で重要である。

実験には p-i-n ダイヤモンド半導体を用いた。i 層に形成された単一 NV 中心に電圧を印可して電流を注入し電荷状態を変化させる。図(a)は 593 nm 励起により単一 NV 中心の電荷状態が、NV⁰と NV⁻の電荷状態間をジャンプしている様子を示している。図(b)は光子数をヒストグラムで表し、NV⁻と NV⁰の割合を定量的に示した図である。図(c)は電圧印可後のヒストグラムで、電荷状態がほぼ 100%の割合で NV⁰に変化した様子を示している。成果は他の結果と合わせ、現在論文投稿中である。

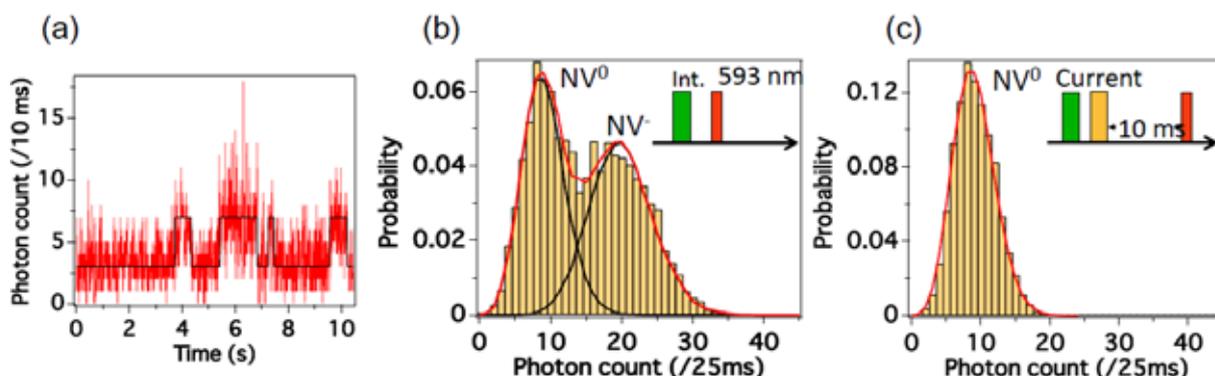


図 (a) 593 nm 励起による単一 NV 中心の発光の時間変化。電荷状態が、NV⁰と NV⁻の電荷状態間をジャンプしている様子を示している。(b)光子数をヒストグラムで表した図。532 nm 励起で定常状態にしたのちに 593 nm で検出している。NV⁻と NV⁰の割合を定量的に示した図である。(c)電圧印可後のヒストグラム。電荷状態がほぼ 100%の割合で NV⁰に変化した様子を示している。