

# NEWS LETTER

## Vol. 12

2014年2月28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	3
〈冷却原子系〉	研究代表者: 高橋 義朗	京都大学	4
〈イオントラップ系〉	研究代表者: 占部 伸二	大阪大学	4
〈光子量子回路系I〉	研究代表者: 竹内 繁樹	北海道大学	5
〈光子量子回路系II〉	研究代表者: 小芦 雅斗	東京大学	5

#### 2012年度公募研究採択課題

〈Heterogeneous Quantum Repeater Hardware〉			6
	研究代表者: バンミーター ロドニー	慶應義塾大学	
〈トポロジー符号化された量子計算のためのコンパイラ〉			6
	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〉			7
	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〉			7
	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〉			8
	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〉			8
	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〉			9
	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〉			9
	研究代表者: 水落 憲和	大阪大学	

## 5年間の研究成果のまとめ

### <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)

5年間の超伝導量子サイバネティクス分野での研究では、多くの重要な成果を生み出した。

超伝導量子ビットを人工原子として用いた量子光学の研究を飛躍的に進展させた。量子光学は現代社会に、レーザー光技術を基とするグローバル通信網や、原子時計技術に基づく量子時間標準などをすでにもたらしてくれている。しかし約100年間、量子光学の研究は自然原子と光の相互作用を基に限定され研究されてきた。超伝導コヒーレントデバイスは人工原子であり、自然原子に比べ設計性、集積性、光との強い結合などの多くの利点を持っている。我々はこの分野でレーザー発振 [*Nature*, 449, 588, 2007]、共鳴蛍光 [*Science*, 327, 840, 2010]、電磁誘導透明化 [*Phys. Rev. Lett.* 104, 193601, 2010]、単原子量子増幅器 [*Phys. Rev. Lett.* 104, 183603, 2010] などを実現していて、今後の更なる飛躍的進歩が期待される。

我々は長年探求されてきた「量子位相滑り」効果を、分光法により量子コヒーレンスの存在を示すことにより初めて実現した [*Nature*, doi:10.1038/nature10930, 2012]。これは超伝導細線を磁束がトンネルする現象で、ジョセフソン効果に対し量子力学的共役な関係にある重要な効果である。このトンネル効果のトンネル確立の指数関数的な細線幅依存性も検証した [*Phys. Rev. B* 88, 220506(R), 2013]。丁度ジョセフソン効果の提案の50年後に実現したこの成果は、この名高い効果と同じような幅広い科学技術での役割を果たすことが期待される。

我々は2008年以降、低雑音な磁束駆動型ジョセフソンパラメトリックアンプ (JPA) の研究開発を行ってきた。JPA の出力を2チャンネルヘテロダイン測定により評価し、スクィーズド真空状態の生成を検証した [*New J Phys.* 15, 125013 (2013)]。超伝導共振器と結合した磁束量子ビット [*New J Phys.* 16, 015017 (2014)] の状態読み出しにおける共振器の反射測定に JPA を適用し、SN比を向上させることで非破壊単一試行読み出しを実現した [*Appl. Phys. Lett.* 103, 132602 (2013)]。さらに JPA をパラメトリック発振モードで動作させることによりそのフィデリティを90%超まで向上した。このような技術がマイクロ波単一光子検出器にも適用可能であることも提案した。

超伝導量子ビットの理論的研究においても、数多くの成果が出た。中でも動のカシミール効果に関する研究は特記できる快挙であった [*Nature* 479, 276 (2011)]。論文数総計は約170件で、そのうちトップ1%論文は13件であった。

**計画研究 A02: 半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送に関する研究**  
**研究代表者 / 都倉 康弘 (筑波大学数理物質系物理学専攻・教授)**

本研究チームは、高い設計自由度をもつ半導体ナノ集積構造を用い、量子情報に関する制御工学・通信工学・観測問題の研究を行って来た。制御に関しては、量子ドット中の電子スピンの注目し、スピン・軌道相互作用の詳細な解明とゲート電極等による高い制御性を実証した。また微小磁石で作られられた不均一磁場でのスピンのゲートによるコヒーレント制御においては、1量子ビット操作と2量子ビット操作を組み合わせた操作を報告し、3量子ビット以上の結合に関しても着実に研究を進めている。また電子スピンのコヒーレンスの障害要因である核スピンのダイナミクスに関する研究を進め、動的スピン偏極の基礎方程式や実験で見られる漏れ電流のヒステリシス構造の定量的議論を展開した。量子状態の「通信」に関しては、一次元導波路を組み合わせた電子波の位相の干渉系を実現し、飛行軌道量子ビットの普遍的操作を実証した。また表面弾性波により他の電子との相互作用によるデコヒーレンスを抑制した飛行量子ビットを実現し、空間的に離れた2つの量子ドット間で電子をやり取りする事が可能となった。量子状態の読み出しには電荷計による電荷測定が高速かつ高感度である。電荷計とシステムに印可する信号を同期して得られる量子容量測定実験では Landau-Zener 効果に加え、電子スピンと核スピンとの混成過程に起因する特徴的な周波数構造を始めて見いだした。また電荷測定は必然的にシステムの電荷状態に測定の反作用を及ぼす。従来は量子ポイントコンタクト(QPC)を用いた電荷計の反作用が研究されてきたが、量子ドット電荷計による反作用を詳しく調べ、QPC 電荷計とは異なる挙動を示す事を明らかにした。この5年間の計画研究において、チーム内での共同研究はもとより、他の計画研究、公募研究のグループと総括班会議や直接の議論などにより非常に有益な研究活動を進める事ができました。関係者各位に感謝いたします。

**<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)**

分子スピン量子制御では、分子の核スピンや電子スピンを制御して、量子サイバネティクスという新しい学術領域を開拓することを目指して5年間研究を行って来た。分子や超分子を設計・合成することによってスピン系のハミルトニアンを「設計」し、スピン系に照射する共鳴磁場を設計することによってスピン系のハミルトニアンを「改造」する、これら二つのアプローチを研究した。後者のために、スピン系に共鳴磁場を強く正確に照射する方法と照射する共鳴磁場波形の設計法を研究した。また、スピン系を制御して実現すべき機能として、初期化、増幅、デカップリング、選択平均、他の量子系との結合、量子シミュレーション、トポロジカル量子誤り訂正、スピンスクイジングなどを研究した。以下、本研究を通して得られた方法論にあたるものを挙げる。

平均ハミルトニアン法と最適制御理論を統合しパルス波形の数値最適化を効率的に行う方法を開発し、高性能なデカップリングおよび選択平均パルス波形を設計した。分子結晶中の多数のスピンを包括的に制御してスケラブルなスピン増幅を実現し、分子を設計・合成して量子非破壊的なスピン増幅も実現した。光励起三重項状態を用いた動的核偏極において、分子の位置選択的重水素化によって緩和を抑制し、室温で最高の偏極率を達成した。超伝導量子ビットと結合可能な基底三重項分子を設計・合成した。射影測定なしで表面符号による量子誤り訂正を行う方法を考案した。

## <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研究を進めた。その結果、イッテルビウム(Yb)原子の単層 2次元量子気体の実現とその 2次元および 3次元光格子への導入、ほぼ単一原子を検出できる高感度蛍光検出系の開発、ほぼ光格子間隔の空間分解能を持った磁場共鳴イメージング系の構築、2次元量子気体に対するスペクトル情報と空間情報を兼ね備えたスペクトラルイメージング法の開発、およびそのための 3Hz 程度の安定な励起光源系の開発、などに成功した。

また、量子シミュレーション研究として、引力および斥力相互作用するボース・フェルミ混合モット絶縁体状態の生成、SU(6)Mott 絶縁体のポメランチュク冷却機構による生成、超流動 モット絶縁体転移に対するサイト数分解レーザー分光法の開発、アルカリ原子と Yb 原子の混合量子縮退系の実現およびその 3次元光格子への導入による不純物量子シミュレーターへの展開、異なる電子軌道状態の間の磁気フェッシュバツハ共鳴の発見とフェッシュバツハ分子の直接光会合、s波およびp-波原子間相互作用の光フェッシュバツハ共鳴制御法の開発、スピン軌道相互作用の導入、リープ型光格子の実現、Yb 原子準安定状態の衝突安定性の精密測定、3次元光格子中の長寿命分子の生成と観測、などに成功した。

さらに、冷却 Yb 原子の核スピン集団について量子非破壊測定によるスピンスクイズド状態の生成と、その高速量子フィードバック制御を実現した。

### 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)

開放型プレーナートラップの開発においては、多領域から成るプレーナートラップを開発し、印加電圧の制御によって異なる領域間のイオンの輸送の手法を確立した。この技術はそれぞれの役割をもつ実験領域でイオンをやりとりするために必要で、イオンを用いた量子情報処理の大規模集積化においても重要である。この電極を基盤として、ゲート操作や量子シミュレーションのための疑似的スピン間相互作用を生成できるプレーナートラップを作製した。トラップ電極に微小な永久磁石を組み込み、従来の方法では難しい数十 T/m の磁場勾配をイオンの位置に発生させて強い相互作用を実現する。現在、カルシウムイオンのスペクトル観測により磁場を測定している。また冷却イオンと光との結合系として、光ナノファイバーのエバネッセント波をイオンと結合させることを提案し、トラップされた微粒子を用いて光ナノファイバーの電気的な特性の評価を行っている。

制御パラメタの変動に対してロバストな量子ゲート構成や量子状態生成を行うことを目的に、断熱的手法(系の固有状態を保ったまま制御する方法)や幾何学的位相を用いた手法の開発を進めた。この結果、断熱的手法を用いて 2個から 4個のイオンのエンタングル状態の生成に成功した。また、幾何学的位相のみによる単一量子ビットゲートを断熱的手法を用いて初めて実現した。後者は、幾何学的位相のみによる量子計算(ホロノミック量子計算)の基礎となるものである。また、量子シミュレーションに関する取り組みとして、Jaynes-Cummings-Hubbard(JCH)模型を、2個のイオンを用いてシミュレートすることに成功した。さらに、正三角形に配置した 3個のイオンの回転運動を基底状態まで冷却して量子回転子を実現し、巨視的に区別可能な二つの配置の間をトンネル現象により移り替わること、印加磁場由来の Aharonov-Bohm 効果によりそのトンネル現象を制御可能なことを示した。上記のような量子情報処理実験を支える技術である励起レーザーの線幅狭窄化などにも取り組み、729nm で発振するリングチタンサファイアレーザーをヘルツオーダーの線幅まで安定化することに成功した。

## <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。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や、異種量子間量子状態制御の実現を目ざし研究を行いました。

まず、まったく新しい異分野融合研究として、公募研究の藤原グループが数学的に提唱した、「適応量子推定」を、光子を用いた実証実験に世界に先駆けて成功しました[1]。この方法は、微弱な光の偏光状態を最も精度よく推定できるため、細胞内の一分子計測など、生命科学などより広範な分野への波及が期待できる研究成果です。また、大阪大学の鷲尾教授と共同で、コンピュータサイエンス分野で発展しているデータマイニングの技術を用い、量子状態のもつ本質的な揺らぎと、状態自身のわずかな変位を区別する新手法を提案、実験的に検証しました[2]。さらに、量子制御用光子量子回路の実現に関し、2001年に提案された、伝令付き制御ノットを実現する線形光学光子量子回路を、世界で初めて実現しました[3]。

また、人工原子等と光子との量子インターフェイスに関しては、ナノフォトニクス技術を駆使し、ナノ光ファイバと単一量子ドット[4]、およびダイヤモンドの窒素欠陥中心のハイブリッド単一光子源の実現[5]に成功しました。また、計画研究の占部グループのイオンや、公募研究の水落グループのダイヤモンド窒素欠陥中スピンと光子の結合に関する研究も推進しました。

これらの研究に対する、日本学術振興会ならびに関係の皆様、共同研究者のご支援に心より感謝申し上げます。

[1] R. Okamoto, M. Iefuji, S. Oyama, K. Yamagata, H. Imai, A. Fujiwara, S. Takeuchi: Phys. Rev. Lett. 109, 130404 (2012).

[2] Satoshi Hara, Takafumi Ono, Ryo Okamoto, Takashi Washio, and Shigeki Takeuchi: Phys. Rev. A 89, 022104 (2014).

[3] R. Okamoto, J. L. O'Brien, H. F. Hofmann, S. Takeuchi: Proc. Natl. Acad. Sci. 108, 10067 (2011). [4] M. Fujiwara,

K. Toubaru, T. Noda, H. Q. Zhao and S. Takeuchi: Nano Lett. 11 (10), 4362(2011). [5] T. Schröder, M. Fujiwara, T. Noda, H.

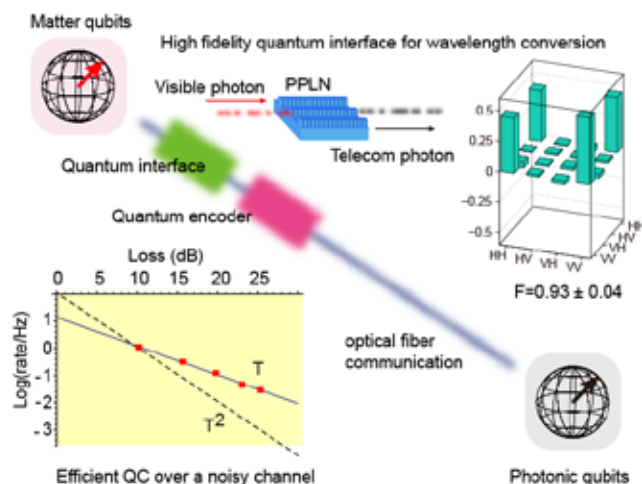
Q. Zhao, O. Benson, S. Takeuchi: Opt. Express 20(10), 10490-10497 (2012)

### 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)

#### - 通信媒体としての光を量子レベルで操る

様々な物理系の中で、光は、遠く離れた二地点間で量子状態をやりとりするための通信媒体として使える唯一の物理系である、という独特の役割を担っている。従って、あらゆる物理系は、通信に利用する際には光系とコヒーレントに接続しなければならない。また、通信の途上で生じる問題への対処は、光系のもつ性質を使って解決する必要がある。このような問題意識のもとで、我々は、光の量子的な特性や、エンコードされた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イスを開発し、変換時の忠実度90%以上を達成した。これは、様々な物質系の量子情報を、通信用光ファイバを用いて遠くへ伝送する際に重要となる技術である。また、我々は、通信路におけるコレクティブな雑音から量子情報を保護する技術として、ボース粒子としての光子の性質を利用した高効率な方法を開発した。実証実験により、この方式は、従来の方式に比べて効率が2桁向上することが明らかになった。



## <2012年度公募研究採択課題>

### 研究課題 01: Heterogeneous Quantum Repeater Hardware

研究代表者 / パンミーター ロドニー (慶應義塾大学・環境情報学部・准教授) 研究課題

本プロジェクトでは量子中継器実現のために、現実的かつ複雑なハードウェアモデルの構築に主眼をおいたシステムを設計した。本方式では光子放出のためのダイヤモンド結晶窒素空孔(NV 中心)を用いた量子ビット、量子ゲート実行のための超電導量子ビット、長時間保持可能な量子メモリのためにシリコン結晶中のピスマス中心を用いた量子ビット、以上の三種類の量子ビットから構成される。関連研究として計算に主眼をおいた NV-flux を用いた異種のハードウェアが提案されているが、この方式では二量子ビット間での相互作用の成功確率が重要視されるため、結果として多数の NV 中心が必要となる。本プロジェクトによる中継器の設計の焦点は、想定しない熱励起を最小限に抑えることである。これにより、NV 中心の量子ビットによって放出される光子のフィデリティを高めることができる。相互作用の速度はフィデリティを高めることよりも重要ではないため、利用する NV 中心の数を減らすことが可能となる。完全なシミュレーションの設計はまだ完成されていない。また、ダブルセレクション方式による量子情報の精製をシミュレーションし、異種のハードウェアに合うものであると結論付けた。そして、古典ネットワークの概念を基にしてプロトコルの役割を明確に定義し、より完全なネットワークモデルを提案した。

### 研究課題 02: トポロジー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)

During the quantum cybernetics project we have made great advances in the development of classical optimisation and compilation techniques for large scale computation. This includes the first accurate resource estimation for topological quantum algorithms, published in Nature (Communications), the development of the framework for topological circuit synthesis and verification published in the IEEE conference on Nanotechnology and the IEEE conference on Design and Testing in Europe. We have successfully implemented an alpha version of a game called meQuanics to offer the general public the chance to help us optimise quantum algorithms and we have given numerous presentations, including a Google

TechTalk in 2013 and an invited special session on quantum compilation at the 2012 IEEE Asian Test Symposium. We have successfully laid the groundwork for significant advances in quantum compilation and optimisation which is desperately required given the accelerated advance of Hardware systems for quantum computation.

### 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)

集積性の高い固体量子ビットや量子通信の媒体となる光との整合性が良いスピン量子メモリーとして期待できる半導体中の電子スピンは、局在化すると量子ビットや量子メモリーとして必要な長い緩和時間を持つことが予想できる。本研究は、超短パルス光によるトリオンのコヒーレントスピン操作を通じて、スピン量子演算やスピン量子メモリーのための局在電子スピンの初期化と緩和の機構解明を行ったものである。

1 電子をドープした InP 量子ドットおよび Ga をドープした ZnO 薄膜のトリオンを対象として、電子スピンの集団の歳差運動を時間分解カー回転により研究することで、電子スピンのコヒーレント初期化、電子スピンの集団の横緩和の研究を行った。

1 電子をドープした InP 量子ドットのトリオン共鳴では長い電子スピンの横緩和時間は  $T_2^* = 2\text{ns}$  であり、この時間は  $^{115}\text{In}$  と  $^{31}\text{P}$  が持つ核スピンの作り出す核磁場のばらつきにより律速されている。弱い励起光強度では短い緩和時間成分が現れ、この成分は輻射減衰によるスピンコヒーレンスの緩和機構を新たに導入して説明できる。核スピンのゼロになる核の自然存在比が大きく、長い電子スピンの横緩和時間が期待される ZnO 薄膜中の Ga ドナーにより与えられた電子は光励起により生成される電子・正孔対と共に  $\text{Ga}^+$  イオンに束縛されたトリオン  $\text{D}^0\text{X}$  を形成する。Ga をドープした ZnO 薄膜のトリオンでは  $^{67}\text{Zn}$  が持つ核スピンの作り出すわずかな核磁場のばらつきに律速した長い緩和時間  $T_2^* = 12\text{ns}$  を得た。いずれの場合も電子スピンの初期化の機構は、電子 - トリオン遷移に共鳴したパルス光による電子 - トリオンコヒーレント重ね合わせの生成と思われる。

### 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、安定的に動作する素子の作製に成功した。さらにスピンの操作に向けて高周波電圧操作を行った。

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 重量子ドットに関するシミュレーション評価および電気伝導特性評価を行った。素子は、非ドープの 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。シミュレーションでは 2 重結合量子ドット中の電子スピンを制御するためにその近傍に集積した強磁性体微細構造による局所磁場を解析した。これまでに GaAs 系で実現されている、磁性体を用いた電子スピン共鳴に比べ、本構造では 10 倍程度の速度で電子スピンを回転できることが示された。強磁性体を集積した素子を測定したところ、ドット間トンネルのブロック現象が観測された。その磁場依存性や高周波応答により、バレーによるブロックであることが示唆された。更に特定の磁場印加によりバレーブロックを解除し、その磁場領域のみで電子スピン共鳴とみられる電流ピークを観測した。



**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、単一電子レベルで非平衡統計力学が研究できるようになった。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たときの仕事分布を用いて構築される。この操作と測定は、ナノスコピック固体素子をもちいて、量子系で実現できると期待される。

本プロジェクトでは、量子揺らぎの定理の検証を念頭に理論研究を進めた。揺らぎの定理は、非平衡分布における詳細釣り合いに過ぎないが、実験で検証するうえでは、確率分布をどのように測定するか、また外部環境がどのような形で揺らぎの定理に影響を与えるか、など解決すべき問題がある。本研究では、「1. 量子系における仕事分布の測定方法」、「2. 外部環境の影響」、「3. 量子系における揺らぎの定理の検証実験の方法の提案」、を中心にしらべた。

1. について、量子導体を流れる電流分布の測定法を検討し、古典 LC 回路を用いて、量子系の仕事を測定する方法を提案した。2. に関連して、単一モードのフォノンと結合した量子ドット、また、外部環境を温度プローブでモデル化して完全計数統計を検討した。これらの研究から、外部環境が存在していても、それが着目している系と定常状態になっているならば、揺らぎの定理が満たされることを明らかにした。3. について、理論モデルとして2準位系と結合した熱溜め発熱分布に関する完全計数統計理論を構築し、状態を選択した揺らぎ定理を検討している。また、 $1/f$  揺らぎなど遅い環境の揺らぎについてロバストな検証方法も検討している。

**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、自己形成量子ドットを含む p-i-n ダイオード構造に対して、高度な電子制御が可能な縦型単電子素子と同構造であるサイドゲート型ピラー構造を作りこみ、単一量子ドット EL (電流注入発光) を得ることに成功した。本素子は p-, n- 電極に加え、電子状態制御のためのサイドゲートを持つため、表面が金属でほぼ覆われ、従来の方法では、効率的な光取り出しは難しい。そこで今回、素子作製に加え、このためのフリップチップ型の実装を行い、裏面からの光子取り出し手法を開発し、低温(4K)、電流注入時においても、裏面から高解像度の素子像をえることができた。これにより、数百 nm の発光領域にアクセスすることができる。実際にこの手法により、電流注入による単一ドットからの EL 観測に成功した。本素子は、量子ドット中の電子状態制御と単一光子発生を両立することが可能であり、主要な量子伝送の担い手である“光子”をもちいて、主要な量子演算の担い手である“電子スピン”間の量子もつれ発生へ応用できる。本素子のゲート電圧印加により、スピン - 光子量子もつれした単一光子が発生する電子状態へ制御し、その光子を 2 素子から発生させ、2 光子干渉させると、理想的には  $1/4$  の確率でそれぞれの素子内の残存スピン間に量子もつれが生じると予想される。電流注入発光をもちいた量子もつれ生成の際、障害になるであろうジッター解決のため、二重量子ドットの direct-exciton, indirect-exciton を利用した手法を検討、提案した。この indirect-direct exciton の遷移はトンネル結合による典型的な反交差を示し、遷移に用いるパルスとトンネル結合のエネルギーのタイムスケールは近いいため、ツェナートンネルによる量子制御後の光子発生が期待でき、より複雑な複合量子系の実現にも貢献できると考えている。

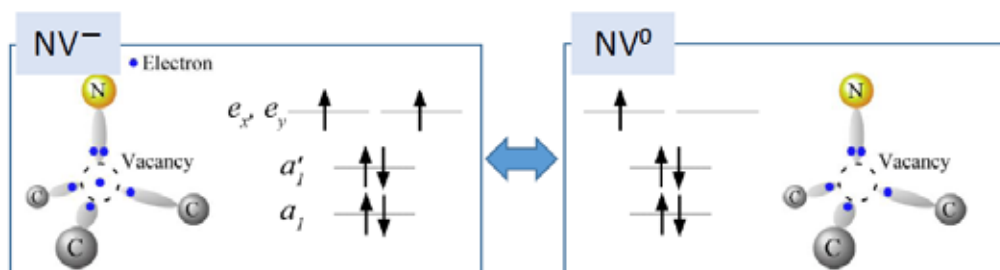
**研究課題 07: 光合成蛋白における生体分子スピン系の量子情報操作に向けた研究**  
**研究代表者 / 松岡 秀人 (ボン大学 物理・理論化学研究科・上席研究員)**

光合成における高効率なエネルギー変換プロセスが、長寿命の量子コヒーレンスに関連している可能性が、複数のグループによって示されてきた。さらに最近では光合成のモデル系として、室温においても光励起状態で量子コヒーレンスを示すヘテロダイマー型分子の合成が報告された。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。高時間分解 EPR (Electron Paramagnetic Resonance) 実験から、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を明らかにした。光合成の電子移動経路は各タンパク質中に 2 つあり、一方のラジカル対は、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  $^{15}\text{N}$  置換することで、量子コヒーレンス時間が 600ns 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り、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、長寿命の量子コヒーレンスを維持する別の要因も示唆された。現在、太陽電池に利用されるチオフェンオリゴマーを対象に、光合成のモデル分子の合成と高時間分解 EPR による特性化を行っている。

**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窒素-空孔複合体 (NV) 中心に注目して研究している。NV 中心は、固体系では唯一、室温でも単一スピンの観測及び操作が可能で、量子情報や磁気センサー等の分野で注目される。近年、NV 中心の電荷状態の制御について関心が持たれている。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報告された。例えば良く用いられる 532 nm の光励起では、-1 価の電荷状態 ( $\text{NV}^-$ ) と中性の電荷状態 ( $\text{NV}^0$ ) の割合が、定常状態では  $\text{NV}^- : \text{NV}^0 = 3:1$  である。光照射中の電荷状態の Stochastic な変化は光学特性やスピン特性に大きな影響を与えるため、そ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。

今回我々は単一  $\text{NV}^-$  の電荷状態を電氣的に初めて制御することに成功した (図) [1]。実験には p-i-n ダイアモンド半導体を用い、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。単一 NV での成功により、電荷状態のシングルショット測定を行うことができ、電荷状態がほぼ 100% の確率で、 $\text{NV}^-$  から  $\text{NV}^0$  に制御したことを定量的に示すことができた。これまで光照射と電氣的操作を同時に行いながら電荷を制御したという報告例はあったが、純粋に電氣的効果のみでの操作、及び定量的に電荷の変化量を明らかにした点も初めてで、また、deterministic に純粋状態への生成を電氣的に制御できた点も重要と考えている。電荷変化速度は  $0.72 \pm 0.10 \text{ms}^{-1}$  と見積もられ、遠い  $^{13}\text{C}$  の核スピンの電氣的でカップリングの観点からは十分速い変化が達成できたと考えられる。一方、暗状態では 0.45 秒以上安定であることが示された。今回の成果は、将来の量子ビットの速い電氣的制御、長い  $T_2$  を持つ量子メモリ、センサー、単電子デバイス等にとって、重要な結果と考えている。



図、-1 価の電荷状態 ( $\text{NV}^-$ ) と中性の電荷状態 ( $\text{NV}^0$ ) の模式図

[1] Y. Doi, T. Makino, H. Kato, D. Takeuchi, M. Ogura, H. Okushi, S. Miwa, S. Yamasaki, J. Wrachtrup, Y. Suzuki, N. Mizuochi, Phys. Rev. X. *accepted*.