

NEWS LETTER

Vol. 09

2013年2月15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
〈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

〈Heterogeneous Quantum Repeater Hardware〉		8
	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〉		9
	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〉		10
	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〉		10
	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〉		11
	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〉		11
	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〉		12
	研究代表者: 松岡 秀人 東北大学	
〈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)

パラメトリック増幅器を用いた超伝導磁束量子ビット単一試行読出し

超伝導量子ビットを高速かつ非破壊で読出す方法として、共振器を用いた分散読出しが広く用いられている。これは量子ビットと分散的に結合した共振器の共振周波数が量子ビットの状態に依存することを利用するものであり、これまでに超伝導回路を用いた共振器量子電磁力学の実験等においてその有効性が確認されてきた。この方法の問題点の一つは、読出し信号の信号雑音比(SNR)が低いことである。分散読出しにおいては、量子ビットへの読出し反作用を抑えるため単一光子レベルの微弱な信号を、量子ビットの緩和時間(~ 1 us)よりも十分高速に読み出すことが要求される。従って低雑音・広帯域の増幅器が不可欠である。これまでは低温で動作する HEMT 増幅器が用いられてきたが、雑音温度 ~ 5 K という最高性能のものを用いても、SNR は通常 1 よりもかなり小さくなる。そのため量子ビットの状態を判別するために多数回の試行の平均を取る必要があった。一方で量子計算への応用を考えると、単一試行での読み出しができることが望ましい。

このような背景から近年、超伝導回路を用いた低雑音の増幅器の研究が盛んとなっている。我々のグループでも、数年前から磁束駆動型のジョセフソンパラメトリック増幅器の開発を行ってきた[1]。磁束駆動型のジョセフソンパラメトリック増幅器は、バンド中心周波数が外部磁場によって調節可能であることに加え、ポンプの周波数がシグナルの周波数と 2 倍異なるため両者の分離が容易で、従来の電流駆動型[2]において必要となるポンプ波キャンセル用のマイクロ波が不要というメリットがある。今回はこのパラメトリック増幅器を超伝導磁束量子ビットの分散読出しの測定系[3]における前置増幅器として実際に使用して SNR を劇的に改善し、量子ビットの単一試行読出しおよび量子跳躍の観測に成功した。

参考文献

- [1] T. Yamamoto *et al.*, Appl. Phys. Lett. **93** 042510 (2008).
- [2] R. Vijay *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** 110502 (2011).
- [3] K. Inomata *et al.*, Phys. Rev. B **86** 140508(R) (2012).

電子を含む二重量子ドットにおけるLandau-Zener遷移に伴う量子干渉

NTT 物性基礎研究所 太田剛

量子力学的に結合した二準位系において、エネルギー反交差領域では Landau-Zener 型の状態遷移が起こることが知られている [1]。始状態に電圧パルス印加して、エネルギー反交差を一定速度で通過させると、終状態は、Landau-Zener 遷移確率に依存した二準位を基底とする重ね合わせ状態となる。多数回繰り返して通過させると重ね合わせ状態同士の干渉が起こり、Landau-Zener 干渉パターンが観測される。このような Landau-Zener-Stückelberg(LZS)量子干渉は、これまでに超伝導量子二準位系 [1]や二重量子ドットの2電子2スピン系 [2]で観測されている。

今回は、二重ドットの一電子状態において、Landau-Zener 遷移に伴う電荷状態の量子干渉を観測した。図 1(a)は実験の模式図である。ドット内の電荷状態を掃引するために高速電圧パルス(矩形パルス)をドレイン電極に印加し、パルス印加後の電荷状態はドットを流れる電流量の変化として検出している。図 1(b)は観測した LZS 干渉パターンである。図におけるエネルギーオフセット $\epsilon=0$ はパルス電圧の振幅が最大の時に2つのドットの準位が一致する点であり、 >0 の領域で明瞭な振動パターンが見えていることが分かる。印加パルスの波形を考慮した数値計算を行い、実験結果との比較を行った。 >0 の領域において観測される振動パターンは、パルスの立下り領域において、エネルギー反交差を2回通過することによる LZS 量子干渉に起因することが分かった。パルス波形をなまらせて通過速度を遅くすることにより、Landau-Zener 遷移確率が 50:50 になるような状態にすると、振動パターンがさらに明瞭に見えることが分かった。

[1] For example, S.N. Shevchenko, et al., Physics Reports 492, 1 (2010).

[2] J. R. Petta, et al., Science 327, 669 (2010).

図1(a)

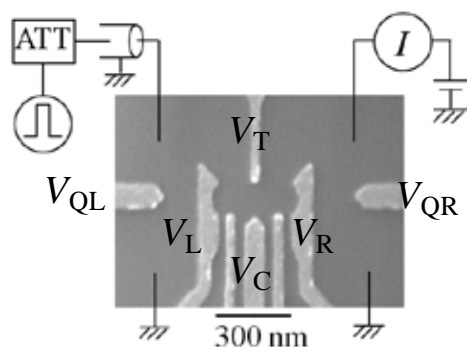


図1(b)

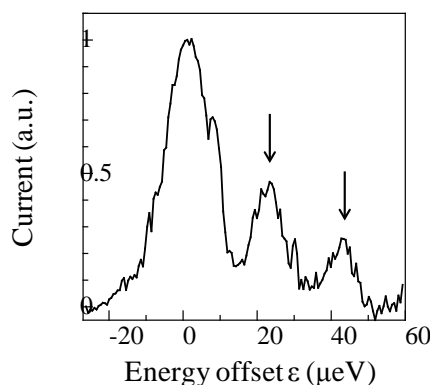


図 1(a) 実験の模式図、(b) 320 psec のパルスを印加した時の、ドット電流のエネルギーオフセット 依存性。矢印は振動ピークの位置を示す。

<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)

2 電子量子ビット分子スピンのアンサンブル系で初の制御NOTゲート

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。このような分子スピン量子ビット系では、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。今回、大阪市大と大阪大の共同研究で、これらの条件を満足する2電子量子ビット系分子スピン(2電子量子ビットピラジカル)1を設計・合成し、1を反磁性結晶格子中に任意の濃度で希釈した単結晶を作製することに成功し、分子スピン系で2量子ビット演算である制御NOTゲート操作を初めて実行し、最小の分子スピン量子コンピュータを動作させた[1]。量子演算実験に先立ち、ピラジカル1の微細構造磁気テンソルは、Q - バンド(35 GHz)単結晶パルス電子 - 電子二重共鳴法(ELDOR)によって精密に決定した。これは、単結晶ELDORの初めての実験例である。ピラジカル1では、個々の電子スピンのマイクロ波によって選択的に励起されるように、不対電子はNOサイトに局在化し異なるgテンソルを有するが、さらに選択励起が効果的に行えるように分子設計されている。分子スピン1は、その超微細・微細構造スペクトルの線幅を尖鋭化させるために、二つのNOサイトは¹⁵N核で標識化されているだけでなく水素原子も重水素化された新規な分子である。本研究では、すべての核スピン副準位を含む複雑な磁気異方的なスピン副準位を完全解析し、制御NOTゲート操作が可能な静磁場方向を同定した。

[1] Shigeaki Nakazawa,* Shinsuke Nishida, Tomoaki Ise, Tomohiro Yoshino, Nobuyuki Mori, Robabeh D. Rahimi, Kazunobu Sato,* Yasushi Morita,* Kazuo Toyota, Daisuke Shiomi, Masahiro Kitagawa, Hideyuki Hara, Patrick Carl, Peter Hoefer, and Takeji Takui* "A Synthetic Two-Spin Quantum Bit: g-Engineered Exchange-Coupled Biradical Designed for Controlled-NOT Gate Operations", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 51, 9860 – 9864 (2012).
DOI: 10.1002/anie.201204489

<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、光格子中の単一サイトの原子の観測および制御は、量子シミュレーションにおいて全く新しい可能性をもたらす。その実現に向けて装置の開発を行った。まず、対物レンズをこれまでの $NA=0.5$ のものから $NA=0.75$ のものに交換し、倍率も200倍の拡大率のイメージング系を構築し、発光の集光効率を向上させることに成功した。また、532nmの光格子と556nmのモラセス光によるモアレパターンを観測することに成功し、あと一步のところまで来た。

一方、これまで光格子の量子シミュレーション実験では、原子間のオンサイト相互作用のみを独立に変えることはできなかったが、フェルミ粒子に対して、準安定状態と基底状態との間での磁気フェッシュバツハ共鳴の兆候をとらえることに成功した。また、基底状態と準安定状態との間に、実効的なスピン軌道相互作用を実装することに成功した。

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に向けて、これまで磁器光学トラップのみを用いていた装置の大幅な改良を行い、超高真空下において長寿命の光トラップを行うことのできる新しいチャンバーを組み上げ、実際に光トラップに成功した。また、実際、スクイーミング実験で用いる ^{171}Yb 原子についても光トラップに成功した。

<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)

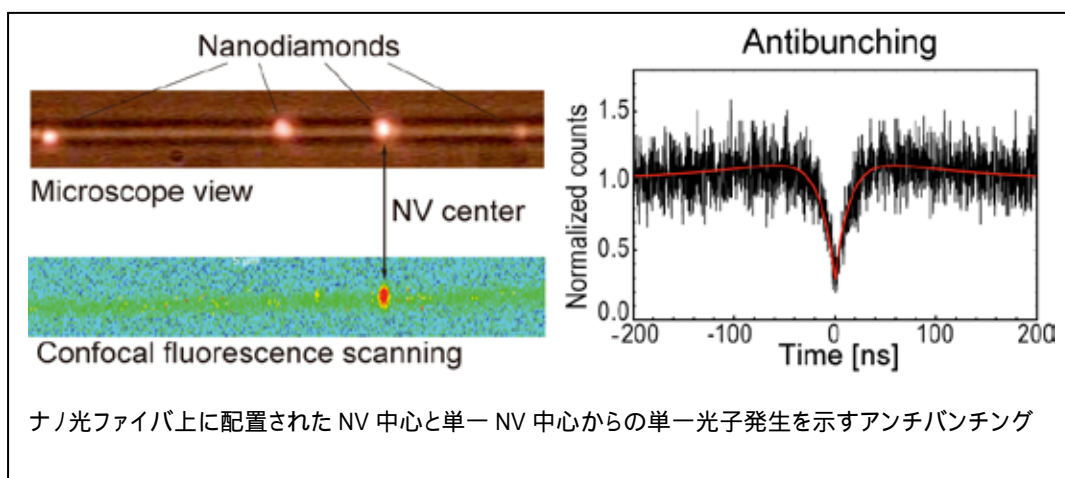
光子は、すぐれた制御性を持ち、また自然原子や分子、人工原子とのインターフェイスが容易です。また、これまでに線形光学素子と射影測定を組み合わせた最大規模の量子回路を実現されています。私たちの計画班では、量子サイバネティクスの概念に基づく量子制御複合テストベッドを実際に構築、最適な量子情報制御の創出とともに、異種量子間量子状態制御の実現や、量子制御内蔵光デバイスの創成も目指しています。

光子と半導体量子ドットなどの異種量子を強く結合させるためのデバイスとして、直径が光の波長以下になるまでテーパ状に引き延ばした光ファイバ(ナノ光ファイバ)があります。ナノ光ファイバは単一発光体と強く結合するため、例えば、これら単一発光体からの発光を非常に効率よくシングルモード光ファイバネットワークに導くことが可能となり、光量子情報通信における光源の役割を担う単一光子源デバイスへと応用可能です。

これまでに私達は、このナノ光ファイバを用いて、その上に配置された単一の量子ドットからの全発光量の7.4%もの発光を光ファイバに結合可能な事を示してきました[1]。しかしながら、この実験に用いられたコロイド型量子ドットは顕著な蛍光の明滅(ブリンキング)や広い発光線波長幅のために、現実の光量子回路に組み込むことは困難でした。今回、我々はこれらの問題を持たない有望な単一発光体として、単一窒素欠陥(NV)中心を含むダイヤモンドナノ結晶とナノ光ファイバの結合に成功しました。その結果、単一 NV 中心から毎秒 689,000 個の光子をシングルモード光ファイバに結合する事に成功しました。これは単一 NV 中心から光ファイバに結合した値として世界最大の値です[2]。

[1] M. Fujiwara, K. Toubaru, T. Noda, H.-Q. Zhao, S. Takeuchi, Nano Lett. 11, 4362-4365 (2011).

[2] T. Schröder, M. Fujiwara, T. Noda, H.-Q. Zhao, O. Benson and S. Takeuchi, Opt. Express 20, 10490-10497 (2012).



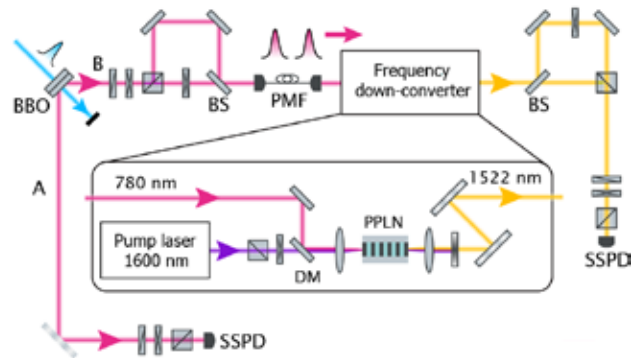
計画研究 D02: 光を基軸とした多キュビット量子制御

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)

高忠実度な光波長変換量子インターフェースの実現

量子情報を保った光波長変換は、原子やトラップイオン、あるいは固体で構成される物質系量子ビットを光でつなぐ際に有用であり、盛んに研究がおこなわれている。最近、我々はそのような量子インターフェースとして、周期分極反転二オブ酸リチウム(PPLN)を用いた差周波発生により可視域の光子を通信波長帯へ変換する実験を行ったが、変換後に得られた2光子状態の最大エンタングル状態との忠実度は 0.75 程度のものであった。忠実度の低下の原因は主に強い励起光からのラマン散乱による背景光子と検出器のダークカウントであった。これらを抑制するため

に、新規に開発された超伝導単一光子検出器(SSPD)を用い、更に励起光強度を適切に調整して実験を行った。結果として得られた SN 比の向上により変換後の忠実度は 0.93 ± 0.04 と非常に高いものが得られた。このような高性能な量子インターフェースは長距離量子情報通信を実現するために有用であると考えられる。



<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)

This project is focusing on complex, realistic hardware models for quantum repeaters. We are developing detailed simulations of networks of repeater nodes, simulating both the physical node design and the communication protocols used. We will use the specific design of superconducting qubits coupled to nitrogen-vacancy diamond ensembles, and simulate the rate of generation of usable entangled links within the network for a range of parameters. The results of the simulation will enable us to evaluate the medium-scale performance of these existing small-scale technologies, laying out a specific roadmap for experimental improvement that will lead to network deployment.

Our initial step in this project has been studying entanglement purification protocols adapted for the proposed hardware scheme. We found the double-selection purification scheme of Fujii and Yamamoto [PRA 80, 2009] to be an attractive fit due to its robustness against local gate errors, which are expected to be common in early experimental demonstrations. Our detailed simulations, however, have found that operation of the protocol is not robust; it is very sensitive to conditions on the network. If one communication session is forced to wait due to the activity of another, the throughput of double-selection fares poorly. Moreover, double-selection is very sensitive to the availability of resources. Thus, although it is attractive, it must be used with care in order to benefit the network performance

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)

- Developments in Resource optimisation for topological quantum computing

Resource optimisation in large scale quantum computing is of huge importance to the construction of a large-scale, commercially viable quantum computer. Solving quantum problems, intractable to classical supercomputers, requires a very large number of physical qubits and a large amount of computational time. Coupled with the necessity of quantum error correction, the number of qubits necessary to factor large prime numbers or simulate classically intractable quantum systems could easily reach one billion.

Recent results (Devitt et. al. arXiv:1212.4934) has illustrated that the biggest hurdle to reducing the total number of physical resources for a large scale architecture may have little to do with the actual quantum hardware and more to do with exactly how we compile and execute fault-tolerant quantum algorithms. The *classical* problem of quantum circuit compilation and compactification has the potential to reduce physical demands on large scale computer significantly. More importantly, the manner in which we implement large scale computation (namely through the model of topological computation) divorces the classical problem of circuit compilation from the underlying physics of a quantum computer.

For this reason we have actively been engaging with the classical computer science community in an attempt to solve this problem. Not only have we found new methods for topological circuit compilation (Fowler and Devitt, arXiv:1209.0510, Fowler, Devitt and Jones, arXiv:1301.7107) but we have been actively engaging the computer science community by introducing these ideas within their community (Palar, Devitt, Nemoto, Polian, Proc. NanoArch'12), (Devitt and Nemoto, Proc. ATS'12), including a special session on programming quantum computers held this year at the Asian Test Symposium in Niigata (ATS'12).

We feel that continued engagement with classical computer scientists will open up a new range of possibility that will help reduce the resources for a large scale computer and bring quantum computing one step closer to reality.

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 中の電子スピンの長時間コヒーレンス

GaをドーブしたZnO薄膜中の電子スピンのスピンコヒーレンスを時間分解カー回転 (Time-Resolved Kerr Rotation: TRKR) 測定法を用いて研究した。量子情報処理において、光で書き込み、読み出しができる半導体中の電子スピンの要求されるのは、長時間スピンコヒーレンスである。半導体中の局在した電子スピンの横緩和時間(T_2)は核スピンとの超微細相互作用を通して働く核磁場の揺らぎに律速されるので、核スピンがゼロになる構成原子の原子番号が偶数の - 族半導体の中でも、ZnOは核スピンがゼロの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ドナーは結晶中に電子を1個放出し、電子はGa⁺イオンにゆるく束縛された状態ができる。この束縛励起子D⁰X(Ga⁺イオンと電子< >、光励起された電子< >と正孔< >からなる)を右円偏光共鳴励起すると、残された電子< >が横磁場中でスピン歳差運動を始める。ZnO:Ga薄膜(ドーブ濃度: $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)中のD⁰Xの共鳴励起下で電子スピンのTRKRはモード同期レーザーの繰り返し時間12.2nsに匹敵する緩和時間を示し、共鳴スピン増幅の手法を用いて $T_2^* = 12 \text{ns}$ の緩和時間が温度 $T = 1.8 \text{K}$ で得られた。温度上昇とともにTRKRの減衰は2成分からなり、遅い成分が生き残る。低温でも見られる長い電子スピン緩和は核スピンがもたらす核磁場の揺らぎに依ると考えられるが、縦磁場をゼロ磁場付近で掃引してカー回転を計測すると、カー回転の大きさはゼロ磁場において減少する。観測されたディップの半値半幅は核スピン磁場の揺らぎの大きさを示し、これが1.3mTと求まる。核スピン磁場の揺らぎ1.3mTからZnOにおける核磁場の揺らぎによる電子スピンの緩和時間は13nsと見積られ、12ns程度という遅い緩和時間と概ね一致する。観測された緩和時間は、- 族半導体量子ドット中の電子のスピンのコヒーレンス緩和時間と比べ1桁長い。

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)

量子ドット中の電子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、素子評価として電気伝導度測定により単一電子状態を検出する。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、単電子トランジスタ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進めた。トップゲートに正電圧を印加することによりシリコン層に電子を誘起し、2つのサイドゲートを掃引しながらソースドレイン電流を測定することで、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。また単電子トランジスタ電荷検出計を用いて2重量子ドット内の電子数変化を読みだすことに成功した。さらに、サイドゲート電圧を負方向に印加することにより、2重量子ドットの電子数をゼロまで減らすことに成功し、少数電子状態を達成した。これにより、電子状態を同定した上でスピンやバレーの関与する電気伝導特性を調べることが可能となり、GaAs量子ドットとの物理的な対比を行うことができると考えている。

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」に代表されるメゾ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。メゾ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。まず、量子導体を流れる電流分布の測定法を検討し、古典 LC 回路を用いて射影測定を連続的に行うことで、量子系の仕事を測定する方法を提案した。そして、ヒーティングの効果について知見を得るために、電子-フォノン相互作用の働く量子導体の完全計数統計を考察した。そしてフォノンが単一モードのときキュミュラント生成関数の解析的な性質を分析した。このモデルは環境効果を調べるには単純化されすぎているため、より汎用的なモデルを導入する必要がある。現在は音響フォノンを用いる方法、および電圧プローブを用いる方法を検討している。今後も環境効果を完全係数統計理論を用いて検討しつつ、揺らぎの定理を検証のセットアップを考察する。

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)

半導体電子デバイスによる離れた2素子間(スピン-スピン間)量子もつれの実現に必要な技術開拓を行っている。2素子間量子もつれを達成するには、まずスピンと量子もつれ状態にある単一光子の発生が必要がある。このスピン-光子量子もつれは、ごく最近 FIRST 量子情報処理プロジェクトの山本グループにより、レーザーによるコヒーレントな励起を用いて実証されている。本研究では、このスピン-光子量子もつれを、電流注入による発光素子、つまりコンパクトな半導体デバイスである新しいLEDとして達成することを目指している。

スピン-光子量子もつれの発生を実証するためにはスピンをコヒーレントに回転させる必要がある。レーザー光を用いた場合は、フォークト配置磁場によるスピン分裂と誘導ラマン散乱によるコヒーレントな状態励起により達成されているが、本電流注入デバイスでは異なる手法でスピン回転と単一光子発生を両立する必要がある。複数候補を検討した結果、ランダムな核スピン磁場と2重量子ドットをもちいた系が有望と考え、デバイスの試作を行なっている。本手法ではファラデー配置磁場を用いるためスピン初期化が容易であり、2重量子ドット的一方に2電子存在する状態と1電子ずつ存在する状態をゲートによりうまく遷移させることにより、スピン1重項-3重項状態を準備することができる。ランダムな核スピン磁場とゲート操作によりスピン1重項($|S\rangle$) - 3重項状態($|T_0\rangle$)間でコヒーレントな回転を実現できる。原理は横型単電子素子において実証されており、本研究ではこの状態からの単一光子発生を行う。この2電子スピン状態は2重ドットにおける X^2 -荷電励起子における発光終状態に対応し、発生した光子は終状態の2電子スピンと量子もつれ状態を形成する。適切なバンドアライメント、効果的なゲート制御と高い光取り出し効率を実現のため複数の素子の試作を進めている。

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 (東北大学多元物質科学研究所・助教)

光合成反応における光エネルギー変換の初期過程では、生体膜に特異的に結合したタンパク質(いわゆる反応中心と呼ばれるタンパク質)の中で、一連の光誘起電子移動が生じる。そして、その初期電荷分離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が生成される。そのラジカル対の固有状態間にコヒーレンスが存在し、それは適切な時間分解能をもつ EPR 実験において量子ビートとして観測することができる。そのコヒーレンスは室温においてさえ観測されることは特筆すべきである。光合成機能を実現する上で十分に長いコヒーレンスがいかんにして保たれるのか、多くの研究者が注目している。高周波(>94GHz)時間分解 EPR 法はエンタングルド状態にある電子スピンの検出に最も有用な実験手法の一つである。我々は高周波 EPR を用いて、光合成のユビキタス中間体でエンタングルド状態にあるスピン相関ラジカル対の観測を行ってきた。レーザー照射 10ns 秒後に、光合成タンパク中のスピン相関ラジカル対($P_{700}^+A_1^-$)から由来する速い振動、いわゆる量子ビートを観測した。本研究では、シアノバクテリアタンパク質中で置換可能な水素および窒素を、重水素化および ^{15}N 置換することで、数百 ns までコヒーレンス時間を改善した。我々はまた、生体分子スピン系の量子情報を検出および操作を可能とするため、電流検出型高時間分解高周波パルス EPR 装置の構築を行っている。

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。これまで我々は、核スピンによる多量子ビット化とその系における室温での量子もつれ生成の実証といった量子情報処理の実証研究を行っていた。最近ではこれまでよりも核スピンによる量子ビットを増やした系における研究を進めている。

更に我々は固体系であるという特徴を生かし、単一 NV 中心が量子インターフェースとしての役割を担えないかと考え研究を始めている。これまで我々はダイヤモンド半導体を用いた室温での電氣的単一光子発生の成功について発表した。最近では、電氣的に単一 NV 中心の電荷状態の制御に成功している。電荷状態が変化する機構について明らかにし、変化速度の高速化や効率化を実現してきている。これは電氣的なスピン状態の制御にもつながる結果と考え、研究を進めている。