

NEWS LETTER

Vol. 10

2013年8月30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	6
<光子量子回路系I>	研究代表者: 竹内 繁樹 北海道大学	7
<光子量子回路系II>	研究代表者: 小芦 雅斗 東京大学	8

2012年度公募研究採択課題

<Heterogeneous Quantum Repeater Hardware>	研究代表者: バンミーター ロドニー 慶應義塾大学	9
<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	9
<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	10
<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	10
<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	11
<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	11
<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	12
<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	13

<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）

—コヒーレント量子位相滑り: 新たな証拠

ジョセフソン効果と完全に量子力学的に共役なコヒーレント量子位相スリップ(CQPS)効果の研究を進めている。これは磁束が細い超伝導細線をコヒーレントにトンネルして横切り現象であり、クーパー対が絶縁障壁をトンネルするジョセフソン効果と完全に共役的な関係にある効果である。したがってCQPS を利用すると、これまで開発されたジョセフソン効果を使った量子電圧標準や量子磁束系(SQUID)と完全に共役な、量子電流標準や量子電荷系の実現が期待される。

我々はCQPS 効果の観測をInO_x細線で実現した[1]。その後、NbNとTiNの細線を使い、磁束トンネルの確率と線幅の関係を詳細に調べた[2]。線幅の範囲は10から50ナノメートル程度である。実験は超伝導ループに細線組み込んだ回路においての光子励起分光を行った。分光の結果現れるエネルギーギャップはトンネル確率を反映している。実験の結果、CQPSの確率は理論の予想通り、細線幅に指数関数数的に依存していることが示された。

[1] O. V. Astafiev et al., Nature 484, 355 (2012).

[2] J. T. Peltonen et al., arXiv:1305.6692 (2013).

—ノリフランコのグループの研究成果はこちらをご参照下さい。⇒ [click here](#)

—マイクロ波振幅に対して非線形なラビ周波数

我々はマイクロ波の振動電場と微小磁石を用いた電子スピンのコヒーレント制御（電気双極子スピン共鳴 EDSR）の研究を行っている。当初は電子スピンのラビ振動の周波数はせいぜい数 MHz であったが、最近東大のグループは微小磁石のデザインを改良し、印可マイクロ波の振幅を大きくする事により、100MHz を超えるラビ振動が得られる様になって来ている。EDSR の理論研究では、振動電場や磁場勾配に対する摂動近似が用いられ、ラビ振動数はマイクロ波の振幅に比例する事が示された。最近量子ドットの閉じ込めポテンシャルが放物型の場合には、回転波近似の条件下で軌道の実励起が無視できる条件でこの比例関係は厳密に成り立つ事が示された。今回量子ドットが二重井戸構造となる様な非放物性の高いポテンシャルの場合には、マイクロ波振幅の大きな条件ではラビ振動数が比例関係から外れ飽和傾向を示す事を明らかにした。

Y. Tokura, T. Kubo and W. J. Munro, arXiv:1308.0071.

—複数電子スピンの初期化の可能性

パウリスピン閉塞現象は非平衡条件の直列二重量子ドットで2電子スピンをスピン3重項状態に無条件に初期化する事ができる。これはスピン状態の読み出しとしても有用である。バイアスを印可された二つの電極に繋がれた三重量子ドットでスピン等に起因した電流閉塞現象とその場合の電子スピンの初期化の可能性について検討した。特にソース電極に一つの量子ドット(QD)、ドレイン電極に二つの QD がトンネル接続された(1,2)配置、その逆の(2,1)配置について検討した。伝導のプロセスが1電子と2電子により担われる場合、並列した二つの QD のエネルギーが等しい場合に電流閉塞が期待される。(1,2)配置の場合の電流閉塞条件ではスピン3重項に初期化されるが、(2,1)配置では特定のスピン状態に初期化されない。その理由は、スピンによらないコヒーレントポピュレーショントラッピング(CPT)過程による電流閉塞が起こるからである。伝導が2電子と3電子で担われる場合、(1,2)配置ではスピン4重項状態に初期化される事が分かった。

〈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）

—Ku帯ストリップライン共振器による電子スピンへの強照射

フォールトトレラントでスケーラブルな量子コンピュータを実現するには精密なキュービット制御が求められる。電子スピンを用いた量子コンピュータにおいて、そのような制御を達成するにはデコヒーレンス時間に比べて十分短いスピン回転や系統誤差を抑えるためのパルス設計が必要である。我々が開発した任意なマイクロ波パルスを発生できるKu帯で動作する電子スピン共鳴分光計を用いれば系統誤差を抑えることができる。

高速なスピン回転を行うには、共振器を用いて強いマイクロ波パルスを照射する必要がある。また電子スピン間の結合強度を考慮すると、広帯域の共振器が必要である。そこで、広帯域かつ強照射が可能な17 GHzのストリップライン共振器を開発した。ストリップラインの中心に微小なU字を作ることでその部分に磁束を集中し強照射を可能にした(図1.(a))。その結果、1 Wの入力に対して210 MHzのラビ周波数が得られた(図1.(b))。Q値は85であり200 MHzの帯域がある。

分子中の不對電子スピンをキュービットとして用いる場合には、極低温下で高偏極化した状態を作り出す必要がある。我々が開発した共振器は小電力で高速なスピン回転が実現できるため、そのような環境下での実験にも有効である。

[1] Y. S. Yap, H. Yamamoto, Y. Tabuchi, M. Negoro, A. Kagawa, M. Kitagawa, J. Magn. Reson., 232, 62–67 (2013).

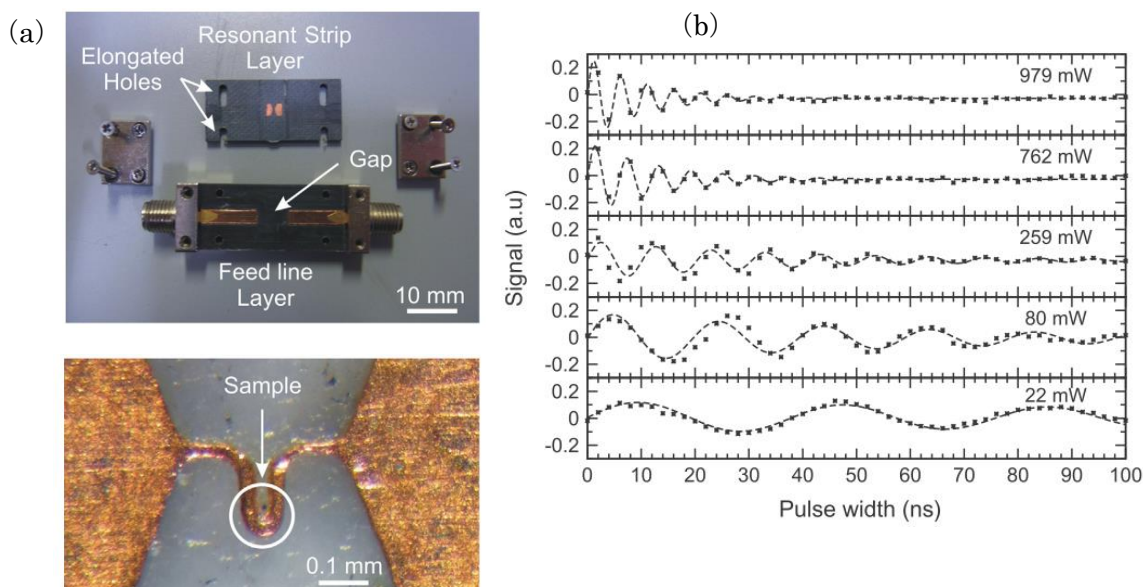


図1: (a) ストリップライン共振器、(b) ラビ振動。

<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、原子間相互作用を自由にコントロールすることは、量子シミュレーションや量子計算にとって必須の技術といっている。我々が対象としているイッテルビウム原子のような2電子系原子の基底状態には超微細構造がないため、いわゆる磁場フェッシュバハ共鳴現象は期待できなかった。最近、我々は、質量数170と174の二つのボース同位体について、異方的相互作用に起因する磁場フェッシュバハ共鳴現象が、基底状態と準安定励起状態の間に働くことを見出したが、フェルミオン ^{171}Yb についても、緩和レートを測定することにより3Gおよび6G付近にフェッシュバハ共鳴が存在することを確認した。今後、これを用いたBCS-BECクロスオーバーの研究を行いたいと考えている。

一方、これまで光格子の量子シミュレーション実験は、スタンダードな立方格子について行ってきたが、最近、Lieb格子と呼ばれる非標準型の2次元光格子を実装することに成功した。Lieb格子が形成されていることは、ボース・アインシュタイン凝縮体の干渉の振る舞いから確認した。さらに、フェルミ同位体を用いたLieb格子の実験を行い、そのバンドの占有数の測定から、いわゆる平坦バンドに冷却SU(6)フェルミ気体を導入することに成功したことを確認した。今後、平坦バンド強磁性や超固体などの様々な研究に応用したいと考えている。

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）

—JCH モデルの実験的な実現とナノ光ファイバーとの結合実験の開始

Jaynes-Cummings-Hubbard (JCH) 模型を初めて実験的に実現し、ポラリトニック励起の量子相転移を観測した。二準位原子と光電場モードからなる Jaynes-Cummings 系を相互接続した JCH 模型が近年理論的に注目されている。これは固体物理学における強相関系に類似したものを光共振器等を用いて人工的に実現しようという試みと関連している。JCH 系は、Bose-Hubbard 系などと同様に、ある条件のもとで相互作用と量子揺らぎとの兼ね合いによる超流動-モット絶縁体転移を起こすことが期待される。今回、二個のイオンの内部状態と動径方向振動モードを用いて、JCH 模型を実験的に実現した。この系では、内部状態の励起とフォノンが JC 相互作用を介して互いに移り変わるために、それらの結合したポラリトニック励起が系において安定に存在できる励起となる。このポラリトニック励起が各サイトに局在化した絶縁体相から二つのサイトに非局在化した超流動相への量子相転移（多体系の基底状態間の転移）の観測に今回成功した[1]。

冷却イオンと光子とを融合した系は量子ネットワークを構築する系として有望である。そこで我々は冷却イオンとナノ光ファイバーのエバネッセント波との結合を試みている。このような系ではイオンとナノ光ファイバーとの距離が重要なパラメータとなるが、この距離はナノ光ファイバーの帯電状況に影響を受ける。そこで帯電状況を知るために、我々は大気中で直径 $3 \mu\text{m}$ の帯電した微小球をリニアトラップに捕獲してナノ光ファイバーに接近させ、微小球の平衡位置からナノ光ファイバーの帯電量を見積もる手法を考案し、デモンストレーションを行った。この研究は北海道大学の竹内研究室との共同研究として進めている。

[1] Kenji Toyoda, Yuta Matsuno, Atsushi Noguchi, Shinsuke Haze, Shinji Urabe, 'Experimental realization of a quantum phase transition of polaritonic excitations', arXiv:1308.3295

<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。

私たちは異種量子間量子状態制御の実現に向けダイヤモンド中の単一窒素欠陥(NV)中心と微小共振器を結合させたシステムを研究しています。ナノファイバ結合微小球共振器(図)は 10^8 を超える Q 値と高効率光入出力が可能な優れた特徴を持つ微小共振器です。今回、私たちは、極低温(7 K)においてナノファイバ結合微小球を制御し、カップリング状態の変化による位相シフトの転移の観測や0.8 GHzにわたる共鳴周波数のチューニングに成功しました[1]。

また、量子力学的にもつれ合った光子は、光子量子回路などの基礎的なリソースです。今回私たちは、広い周波数にわたって相関を持つ光子対を発生する光子対光源を実現しました。まず、バルク非線形光学結晶を複数個組み合わせる方法を発案し、実際に2個の結晶を用い、帯域170 nm(中心波長808 nm)の蛍光対発生に成功しました[2]。次に、分極反転周期をチャープさせた擬似位相整合素子を用い、波長790 nmから1610 nmに渡る超広帯域(中心波長1064 nm)のもつれ光子対の発生に成功しました[3]。これは我々の知る限り世界最大の帯域です。これらの成果は、量子計測の高精度化や光子量子回路の高度化などへと応用が期待されます。

[1] M. Fujiwara, T. Noda, A. Tanaka, K. Toubaru, H. Zhao, and S. Takeuchi, *Opt. Express* 20, 19545 (2012).

[2] M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Subashchandran, and S. Takeuchi, *Opt. Express* 20, 13977 (2012).

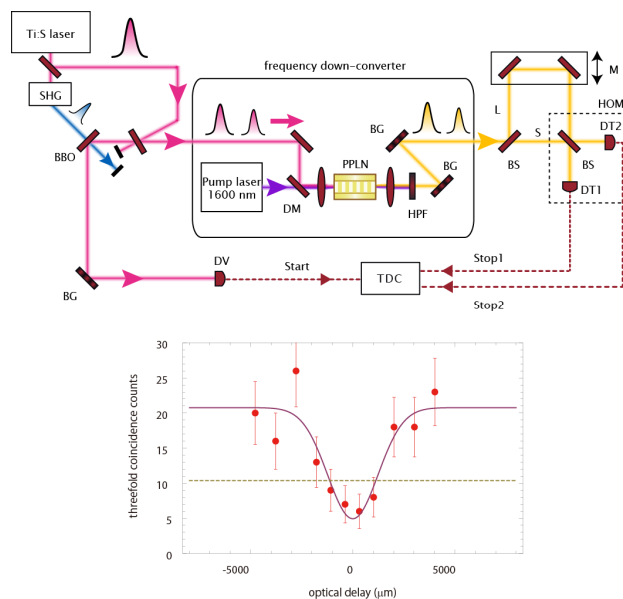
[3] A. Tanaka, R. Okamoto, H. H. Lim, S. Subashchandran, M. Okano, L. Zhang, L. Kang, J. Chen, P. Wu, T. Hirohata, S. Kurimura, and S. Takeuchi, *Opt. Express*, 20, 25228 (2012).



テーパファイバと微小球共振器との極低温下でのカップリング

—通信波長帯に変換した光子の2光子干渉を観測

光子の波長を変換する量子インターフェースは、原子やトラップイオン、固体などの物質系の量子情報を量子光通信によって結びつける際に重要となる技術である。量子中継では、中継器どうしの接続にしばしば2光子検出に基づくベル測定が用いられるので、可視域から通信波長帯に波長変換された2個の光子が非古典的な干渉を起こすことが量子インターフェースに求められる重要な条件となる。最近、我々は、周期分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN)を用いた差周波発生に基づく量子インターフェースによって通信波長帯へと変換した2個の光子のHong-Ou-Mandel(HOM)干渉を観測した。HOM干渉は、2光子が本質的に区別できないことに起因して、同時検出率にディップが現れるものである。観測されたディップの深さは、割合にして 0.76 ± 0.12 であり、古典限界の0.5を超えるものであった。高い明瞭度で干渉が観測されたことは、可視光とリンクした物質系素子を光ファイバによる量子光通信で結合するための重要なステップである。



<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／バンミーター ロドニー(慶應義塾大学・環境情報学部・准教授)

In this project, we are investigating heterogeneous hardware architectures for quantum repeaters. Two of the most promising quantum information technologies are superconducting flux qubits and nitrogen vacancy centers in diamond. A third promising technology is bismuth vacancy centers in silicon. Our proposed approach is to combine these three into a complete repeater system. The flux qubit provides the logic element and the tunable coupling between the other two types of qubits. The NV qubit provides the optical transceiver, while the Si:Bi qubit provides long-lived memory. Because the coupling of a single NV center to the flux qubit is weak, we propose using a small ensemble of NV centers. The principal challenge in this approach is to be able to reliably emit a useful quantum optical state using this ensemble.

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)

—Compilation and Programming of quantum computers

In the past year we released a preliminary version of a game that will be used to "crowd-source" the optimisation of large scale quantum algorithm. Named *meQuantics: The Quantum Computer Game* (www.mequantics.com), we have converted the problem of algorithmic optimisation into a elegant three dimensional puzzle. This game, when initially released, generated great response in Japan, generating over hundreds of tweets on Twitter. Our goal for the next year is to convert this game into a popular piece of software for iOS and Android platforms with the aim of competing with serious puzzle games.

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)

—トリオン共鳴電子スピナー回転

長い緩和時間を持つ半導体中の局在電子スピンは、高速で多数回の量子演算を可能にし、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としても働く。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 Ga⁺イオンに束縛されたトリオン D⁰X (結晶中の Ga⁺イオンと電子 $\langle \uparrow \rangle$ 、光励起された電子 $\langle \downarrow \rangle$ と正孔 $\langle \uparrow \rangle$ からなる)を形成する。本研究は、超短パルス光によるトリオンの共鳴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のための電子スピンの初期化と操作の研究を格段に進展させることを狙ったものである。

フェムト秒パルスに比べて1桁スペクトル幅の狭いピコ秒パルスを用いてスペクトル分解能を持たせた時間分解力一回転測定法を用いて、D⁰X 共鳴エネルギー近傍でレーザーエネルギーを変えてカー回転を調べると、共鳴に応じてカー回転信号が増強されるが、初期のカー回転角はレーザーエネルギーを変えて共鳴エネルギーの近傍を掃引すると共鳴増強され、かつ符号を変える。カー回転角は左右円偏光に対する屈折率の差に比例しているため D⁰X 共鳴に対して分散的に振る舞う屈折率の微分(おおよそ吸収スペクトルの 2 階微分)で記述できると思われる。

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、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。

シリコン量子ドット中のホールスピンを利用すると、ホールは p-like な対称性のプロット波動関数を持つため、電子よりも超微細相互作用が小さく、長いコヒーレンス時間を持つ可能性がある。今回、p 型シリコンを用いた 2 重量子ドットにおける単一ホール輸送の観測に成功した。素子は、Silicon-on-insulator(SOI)基板を用いて、2 重量子ドットと電荷検出計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、ソースドレイン領域にボロンをイオン注入した構造になっている。4.2 K における電気伝導測定により、2 重量子ドットに特有なハニカム構造の電荷安定状態図を観測した。また、正のソースドレイン電圧を印加した際には電流が観測される電荷三重点において、負のソースドレイン電圧を印加すると、わずかな電流しか観測されないものがあることがわかった。この結果は、ホールスピンによるブロックードを観測できた可能性がある。

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。現在はフォノンをはじめとする外部環境の影響を考察している。とくに以前行った、フォノンが単一モードの場合の完全計数統計の研究を発展させ、外部環境を温度プローブでモデル化した場合の完全計数統計を検討している。いまのところ、温度プローブのエネルギーの揺らぎを取り入れることで揺らぎの定理が満たされることを示している。また、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。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(スピンスピン間)量子もつれを目指し、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。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むことに成功した。プロセスは $650\ \mu\text{m}$ 厚の GaAs 基板を $300\ \mu\text{m}$ まで素子を研磨した後に行なっている。この薄い本素子を専用の PLCC 型パッケージにマウントし、裏面からの反射率をマッピングすることで、低温(15K)、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。また、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。まず寿命の長い indirect-exciton をキャリア注入により生成し、発光寿命の短い direct-exciton 状態へ遷移させると、問題となる操作が電流駆動でなく電圧駆動であり、波動関数変調の時間だけで決まるので、問題となる jitter を回避できる。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、将来的には Landau-Zener 型の状態制御も可能と考えられる。

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)

絶え間ない分子運動と乱雑なゆらぎの中で、高効率に光を利用する生物機能の解明は、光合成研究における長年の課題であるが、そのメカニズムはいまだに解明されていない。近年、光合成の電子・エネルギー移動過程において、量子的な重ね合わせが利用されている可能性を、複数の研究グループが報告している。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、いかにして長時間、量子コヒーレンスを維持しているのか、いまだに不明な点が多い。本研究では、光照射後に生じる correlated spin pair (entangled state) を対象に、高時間分解 ESR (Electron Spin Resonance) 法による研究を行ってきた。correlated spin pair の固有状態間に生ずるコヒーレンスを量子ビットとして観測した。そのコヒーレンスは室温においてさえ観測された。コヒーレンス時間が何によって制御されているのかを明らかにするため、様々な実験環境下においてコヒーレンス時間の決定を行った。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、100K において 600 ns から 1.2 μs まで改善し、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った。100 K から室温まで昇温すると、コヒーレンス時間は短くなったが、それでも同位体化試料に対して 600 ns のコヒーレンス時間が保たれており、温度による影響はそれほど大きなものではないことがわかった。モデル化合物を対象にした実験も現在行っている。

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。

最近、我々は電氣的に単一 NV 中心の電荷状態の制御とリアルタイムでの測定に成功した。これまで NV 中心のアンサンブル系で電氣的に電荷を変えてスペクトルの変化を観測した報告はあったが、単一での成功、及びリアルタイムでの観測成功は初めてである。また、時間分解測定により、NV⁻から NV⁰へ高速に変化できていること、及び NV⁰状態が暗状態では変化後に 10ms 以上長く安定に存在できることを示すことができた。

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 中心に電流を注入し電荷状態を変化させる。電荷状態の変化に伴い、NV 中心からの PL 強度が変化するが、約 680nm より長波長の発光のみを観測することにより、図(a,b)に示すようにコントラストの良い結果が得られた。今回の電氣的制御技術は、今後、電荷状態を用いた量子情報処理への応用が期待される。また、昨年、ハーバード大の Lukin らは NV と NV⁰間の電荷状態を光励起により変化させることにより、室温で単一核スピンのコヒーレンス時間を1秒以上に伸ばすことを報告していた。今回の成果である電氣的制御では原理的に効率化と高速化が期待できるので、核スピンコヒーレンス時間の更なる長時間化につながることを期待される。成果は現在論文投稿中である。

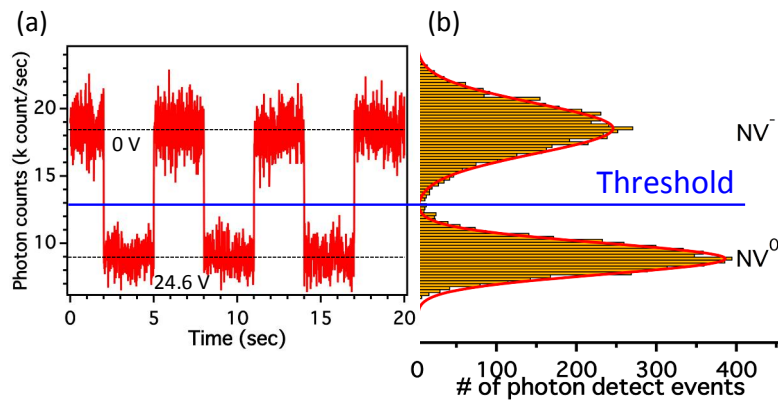


図 (a) 単一 NV 中心の PL 強度。電荷状態の変化に伴い、PL 強度が減少する。
(b) ヒストグラム。Threshold を境にほぼ 100%の確度で電荷状態の制御に成功している。