

領域略称名：量子サイバー  
領域番号：2101

平成26年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「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」

(領域設定期間)

平成21年度～平成25年度

平成26年6月

領域代表者 蔡 兆申 (独立行政法人理化学研究所・巨視的量子コヒーレンス  
研究チーム・チームリーダー)

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	2
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	4
3. 研究領域の設定目的の達成度	7
4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	11
5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	12
6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	13
7. 総括班評価者による評価	14
8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	16
9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	20
10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	25

## 1. 研究領域の目的及び概要（2ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

### ① どのような点が、「わが国の学術水準の向上・強化につながる新たな研究領域」であるか

#### A. 高度で複雑な量子操作科学技術の確立

従来、量子力学があらわに表れる科学技術は、量子ドット、ジョセフソン接合、超伝導量子干渉計、核磁気共鳴、光技術など存在していた。しかし近年、量子重ね合わせや量子非局在性を示すエンタングルメントのような、古典力学を逸脱した現象を、人工的に制御・操作できる技術が生まれ始めた。イオントラップや核磁気共鳴などの技術が先行していたが、同様な量子制御は、他の多くの物理系でも実現し始めていて、超伝導や半導体に基づく巨視的な固体素子を含む幅広い物理系においても、量子状態制御が可能になっている。この二つの先行技術での単一量子系の状態制御の科学技術に対する重要性が評価され、本領域発足後の2012年にノーベル物理学賞が与えられた。本領域の目的は、このような量子状態操作の更なる高度化、複雑化である。単一量子系にとどまらず、より複雑な量子系を、さらに高精度で、高速に、量子状態の制御や観測を行うことを目指している。より複雑で自由度の高い大きな量子系の研究は、これまでは仮想実験であったシュレーディンガーの猫を実現することでもある。本領域は、古典論と量子論の境界にあるデコヒーレンス現象の詳細な研究や、超伝導の巨視的な系で生ずる量子コヒーレンス現象のより深い理解を可能とする、科学的に大変重要なものである。巨視的量子系での量子状態の非局在性の実験（ベル不等式実験）も視野に研究を進めるが、このような実験成果は、古典実在論を根底から否定し、社会的影響も大変大きい。

#### B. 混合量子系の実現

本新領域は、複数の科学上の概念を、融合・連携した新学術領域である。本領域の一つの大きな特徴は、原子、光、分子（所謂 AOM）の微視的量子系から、半導体、超伝導体の固体素子までを含める、極めて幅広い物理系を研究対象としていることである。固体素子で実現する巨視的な量子系はといえば人工量子である。これは量子力学とナノサイエンス・ナノテクノロジーの融合の結果生まれたものである。人工量子と自然量子（原子、分子、光など）のコヒーレントに融合した、ハイブリッド的な混合量子系もすでに誕生し始めている。このようなコヒーレントな混合量子系では、自然量子の普遍的均一性や長いコヒーレンス状態の寿命、そして人工量子の幅広い設計性と豊富な制御手段、集積性などの長所を生かし、その逆である短所を補うことが可能になる。したがって多種多様な新規な発展につながることを期待される。そして、このように急速に研究が発展するなか、すべての物理系を含めた量子コヒーレント制御や検出の物理的、新規な概念的融合を図る。巨視的系も含め、幅広い分野での量子制御の研究を通して、統一的視点に立った、新たな物理的見地を得ることを目指す。

#### C. 従来の科学技術の各種限界を打ち破る革新的学術領域の創出

直接的な社会貢献においても、量子コヒーレンスの利用範囲は広い。古典状態を正確に制御することにより、これまで科学技術文明は築き上げられてきた。同様に、量子状態の制御も、これから大きく社会に貢献してゆくことが可能だ。従来の科学技術は様々な「限界」が存在していた。例えば、古典波の回折限界、電子デバイスのエネルギー散逸限界指標であるランダウー・フォンノイマン限界、集積回路の性能の進展を律速するムーアの限界、またこのスケーリング則自体の限界（ムーアの法則の限界）などの制約は、本領域の研究により乗り越えられるものと考えている。量子エンタングルメントを応用した各種計測装置は、計測器本来の量子限界を超える性能を発揮できる。同様に、エンタングルした光子を使い、本来の回折限界を超える光学機器が実現する。量子限界を超える分解能を持つ各種量子ディテクターや量子光源、量子限界を超える時計同期化など、幅広い応用分野がある。また情報処理技術の進歩は、ムーアの法則の限界、情報処理のためのエネルギーリソースの限界、古典計算機の情報処理能力の原理的限界などの多くの限界をじきに迎えることになる。量子情報技術はこれらの限界にはとらわれず、計算速度の指数関数的加速や計算に必要なエネルギーの桁違いな削減が可能になる、注目すべき科学技術である。本研究領域では、これら応用の可能性を念頭に、その基礎的な科学技術の確立を目指す。

以上の3点が、提案している本研究領域が、わが国の学術水準の向上・強化につながる所以である。

② 研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を発展させる場合にはその内容等）。

近年、幅広い分野の多様な物理系において、量子コヒーレンス状態の制御や検出が可能になってきている。このような量子操作は、従来では微視的系の光や核・電子スピン以外では例がなかったが、超伝導や半導体の固体素子でのコヒーレント量子状態操作が可能になったことで、全く新たな研究領域が開きつつある。元祖サイバネティクスは、古典状態の複雑な制御を横断的に研究し、古典状態を操る機械文明を作り出し、大きな成果を上げた。この成功例に倣い、量子状態の制御を、統一的視野に立ち、横断的な連携研究を行う、量子サイバネティクスを立ち上げる。量子状態をコヒーレントに自由に操ることで、「未知の大陸」状の全く新たな科学技術分野の可能性が、現在見え始めている。微視的系を含め、超伝導や半導体デバイスの巨視的量子系においてもコヒーレント操作は、技術的に可能になっていて、現在このような研究を本格的に進める機運がめぐって来ている。

新規な研究方向として、異種量子がコヒーレントに結合した混合量子系の実現がすでに始まっている。これまでこのような系の典型例は、原子と光子の相互作用する空洞共振器の実験（cavity QED と呼ばれる）であり、単原子に基づくレーザー発光や、光子の2量子ビットゲートなどが実現している。しかし近年の固体素子に基づく人工原子の研究は目覚しく、上記のような実験を人工原子と共振器で行うことにより、「人工原子量子光学」とも呼べる全く新たな量子制御の研究が展開する。その特徴は、人工原子は自然原子より格段大きいゆえ、格段と強く共振器に結合し、いわゆる強結合領域が簡便に実現され（結合エネルギーが人工原子や共振器の緩和時間に比べはるかに大きい）、また自然原子と違い動き回ることはない。このような特徴を生かし、単一人工原子のレーザー発振（本提案理研グループの成果、Nature 2007）や共振器を介した複数の人工原子（量子ビット）の結合などが実現している。人工原子の電子状態と、共振器の光子状態がコヒーレント介在する混合量子系は、回路設計に自由度があるため、その研究はこれから大きく発展する余地が十分ある。例えば研究期間内に、ゲート制御による光子数の正確な操作、単光子の随意的な生成が可能な単光子源などの成果が期待できる。また光子の2量子ビットゲート、光子共振器を使った大規模な集積固体量子ビット回路、などなどの多様で新規な発展が見込まれる。

人工原子を光子共振器と結合させる代わりに、ナノスケールの機械共振器と結合させ、「人工原子量子音響学」なるものも研究を始めている。機械自由度は、「巨視的度」が大きく、その量子化やコヒーレント操作は、実現すれば画期的な成果となる。研究期間内に、音子のレーザー発振、単音子源、などの実現に結びつく研究を目指す。その他にも、自然原子と固体人工原子と組み合わせる混合量子システムの実現など、多様な融合的量子系の研究も本領域は目指す。原子が集合して固体材料を形成するように、人工原子を並べ、「量子メタ材料」を実現する研究にも期待ができる。

## 2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

【計画研究の代表者と分担者を以下に示す】：

「超伝導量子サイバネティクスの研究」、代表：蔡兆申（理研） 分担：ノリ フランコ（理研）

「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」

代表：都倉康弘（筑波大） 分担：樽茶清悟（東大）；太田剛（NTT）

「分子スピン量子制御」、代表：北川勝浩（阪大） 分担：工位武治（大阪市立大）

「冷却原子を用いた量子制御」、代表：高橋義朗（京大） 分担：向井哲哉（NTT）

「開放型イオントラップ系による量子情報処理」、代表：占部伸二（阪大）

「光子量子回路による量子サイバネティクスの実現」、代表：竹内繁樹（北大）

「光を基軸とした多キュビット量子制御」、代表：小芦雅斗（東大） 分担：山本俊（阪大）

【公募研究と代表を以下に示す】：

「Heterogeneous Quantum Repeater Hardware」バンミーター ロドニー（慶應大学）

「トポロジー符号化された量子計算のためのコンパイラ」デビット サイモン（NII）

「電子スピンのコヒーレント初期化の研究」舛本泰章（筑波大）

「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」小寺哲夫（東工大）

「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」内海裕洋（三重大）

「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」中岡俊裕（上智大）

「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」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」水落憲和（阪大）、1 期目

「量子サイバネティクスにおける量子推定理論の新たな展開」藤原彰夫（阪大）

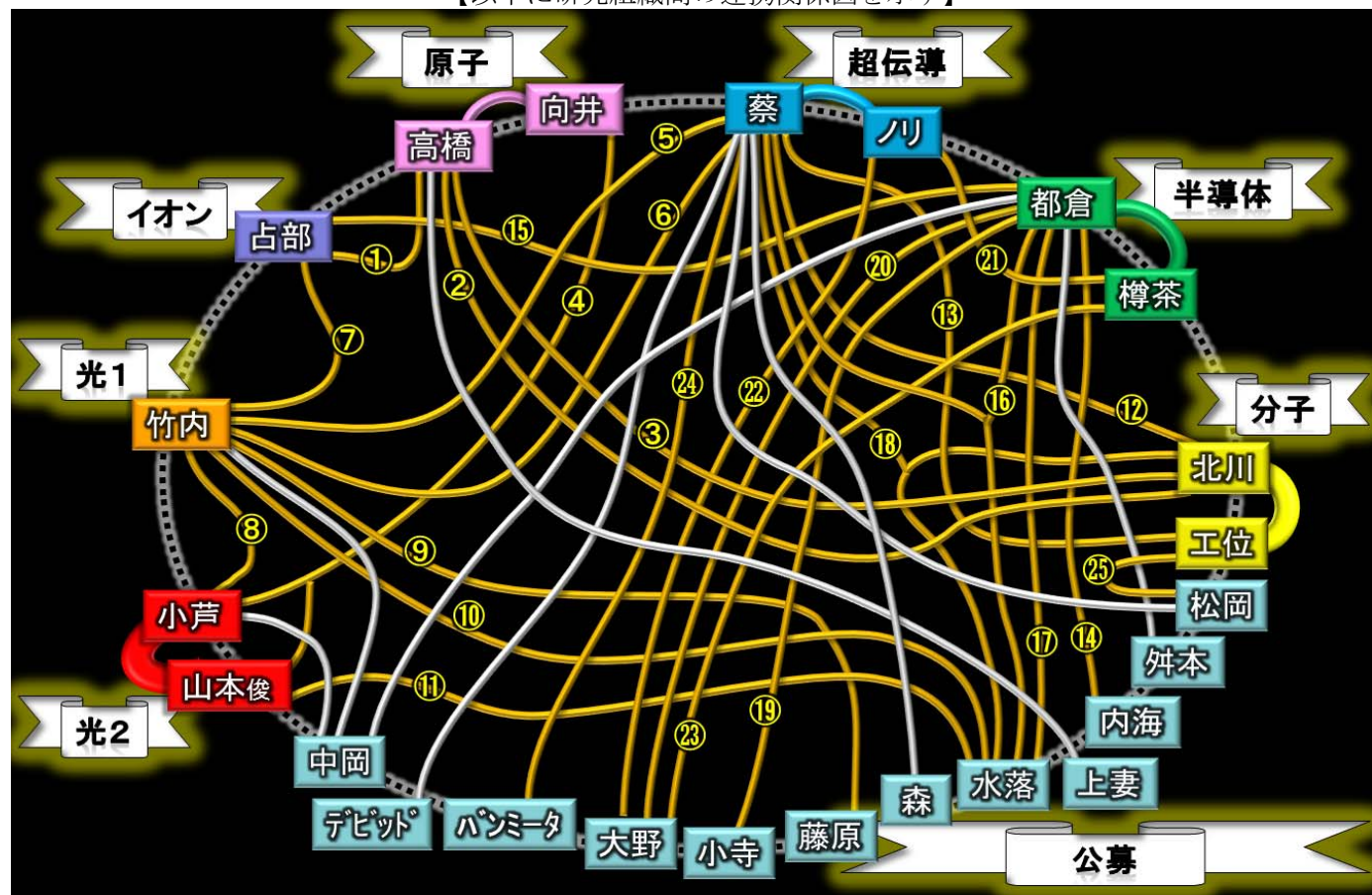
「縮退イッテルビウム原子集団を用いたクラスター量子計算の実現」上妻幹男（東工大）、中途辞退

「量子ドットと超伝導体の混合量子系における量子コヒーレンス理論」森道康（日本原研）

「単一NV中心における多量子ビット化へ向けた研究」水落憲和（阪大）、2 期目

「異種 g 因子 2 重量子ドットを用いた電子スピン・核スピン制御の研究」大野圭司（理研）

【以下に研究組織間の連携関係図を示す】



図中、研究機関間を結ぶ黄線は共同研究を遂行した連携関係で、白線は情報交換や議論を中心とした連携関係の主なものである。以下に黄線で表示されている領域内の共同研究について、線上の番号順に説明する。

### **1: イオン/原子の光によるローカルアドレッシング技術の研究** (高橋—占部)

不均一な光ビームによるライトシフトを利用して、イオントラップ中のイオンの個別アドレッシングを行うことが、本新学術領域研究において開発された。この技術を、中性原子の個別アドレッシングに応用することに成功した。高い空間分解能を有する光イメージング技術と相補的な本技術により、冷却原子の操作性の幅を広げることができた。

### **2: 光格子中冷却原子を用いた磁気相転移の研究の可能性研究** (北川—高橋)

NMRの系で過去に行われた回転系断熱消磁の実験手法を使い、磁氣的相互作用する冷却原子系の磁気相転移実験の可能性を追求した。光格子中の長距離相互作用する系に応用し、NMRとは大きく異なるユニークな操作が可能になることを着想し、その妥当性を検討し、現在、実験の第一段階に進んでいる。

### **3: 核スピン系を用いた磁気相転移の量子シミュレーションの研究** (北川—高橋)

NMRの系の回転系断熱消磁と高偏極化技術を適用することにより、量子アニーリング・量子断熱計算と同等の操作を実現することを目指し、共同で研究を進めている。この断熱消磁を光格子中冷却原子の磁気相転移の量子シミュレーション実験にも適用できることを見出した。

### **4: 原子系と通信波長帯光子の結合に向けた研究** (向井—小芦)

光の周波数をその量子状態を変えずに周波数を変換する新しい周波数変換器の研究を行い、可視光域から通信波長域へ変換することがエンタングルメントを保持したまま可能になった。Rb原子の発光波長である780nmと通信波長との変換を実現。この周波数変換器を利用し、異種原子系との結合を図るために共同研究を促進し、Rb原子に関しては実験系の構築までこぎつけた。

### **5: マイクロ波光子量子光学の研究** (蔡—竹内)

マイクロ波領域での量子光学は、超伝導人工原子を使って目覚ましく進歩している。この研究では、光学専門の研究室と超伝導回路専門の研究室との連携で、さらなる分野の進展を図ってきた。

### **6: 異なる物理系による実装の比較を元にした、新規光子量子情報処理の研究** (蔡—竹内)

超伝導人工原子と光子のハイブリッド混合量子系の成功例を参考に、異なる物理系による実装の比較を元にした、新規光子量子情報処理の開拓に関し共同研究を推進した。

### **7: テーパーファイバー表面の電荷状態の研究** (占部—竹内)

イオン量子ビットと光量子ビットとの結合の可能性を探るために、テーパーファイバーとイオンの結合に関しての実験を行った。ナノ光ファイバーを用い、イオンから出力される光子の高効率捕集を目ざし、ファイバー表面の電荷分布情報を、荷電粒子トラップを用いて得ることに成功した(物理学会発表予定)。

### **8: 伝令付き単一光子源の研究** (竹内—小芦)

世界最高の2光子干渉性(96%)をもつ伝令付き単一光子源を実現[Opt. Exp.20, 15275, 2012]、この良質な単一光子源を用い、Knillらの提案した、光量子コンピュータの基本となる光量子回路を実現することに、初めて成功した[PNAS 108, 10067, 2011]。

### **9: 量子状態推定の研究** (竹内—藤原)

数学と実験物理学という異なる分野にまたがる学際的な共同研究により、限られた光量を用いて、最も精度良く光の状態を推定する新しい方法である、適応量子状態推定の実証実験に成功した[PRL 109, 130404, 2012]。この量子推定法は、生体中に導入した単一蛍光蛋白質分子の方向を、できるだけ正確に逐次同定することへの応用も可能であるなど、今後、量子情報処理に限らず、生命科学など広い領域に適応が期待される。

### **10: ダイヤモンド中の窒素欠陥を使ったナノデバイスの開発** (竹内—水落)

ダイヤモンド中の窒素欠陥とナノ光ファイバーの結合に関する研究を実施、単一の窒素欠陥の光検出磁気共鳴のナノ光ファイバーを用いた検出に成功するなどの成果を得た。

### **11: 量子光波長変換のNV中心への適用の研究** (山本俊—水落)

項目4と同様な周波数変換の共同研究を進め、ダイヤモンドのNVセンターの発光波長である637nmと通信波長帯の変換を実現した。

### **12: 動的デカップリングパルス設計法の研究** (蔡—北川)

最適制御理論による数値的設計法と平均ハミルトニアン理論による系統的設計法を融合した新しいパルス設計法を考案し、既存のパルス系列より優れた動的デカップリングが行えることを見いだした。

### **13: 磁束量子ビット回路に適した量子メモリ分子の合成と物性の研究** (蔡—工位)

超伝導量子演算回路の量子メモリーに適した分子スピンアンサンブル系を設計するために、ゼロ磁場分裂磁気テンソルの精密な量子化学計算法を開発し、実装可能な大きさのテンソル量をもつ、安定な基底三重項分子スピン系を合成して単結晶を作製した、メモリ効果の実験を進めている。

### **14: スピン量子コンピュータに関する研究** (都倉—内海)

量子ドットを介した伝導において、浮遊電極は位相緩和をもたらす事が知られている。浮遊電極が電流相関（キュムラント）にどのような影響を与えるかについて系統的に調べた。特に電流端子間に温度差がある場合の熱伝導において普遍的な「ゆらぎの定理」が成立する事を示した。[PRB 89, 205314-1, 2014]

#### **15: 磁場勾配中のイオンの量子状態制御** (都倉一占部)

冷却イオンを高磁場勾配中に置くと、光ではなく RF を用いた拡張性の良い安定な量子ゲート操作や、スピン-スピン相互作用の量子シミュレーションなどに幅広く応用することができる。イオンの位置に強い磁場勾配を発生させる方法を考案し、量子状態制御に十分な 30T/m の磁場勾配を得た。さらに装置の改良で大きな磁場勾配の発生が可能である。[平成 26 年度春の物理学会]

#### **16: ダイヤモンド NV 中心と超伝導量子ビットの結合の研究** (蔡一都倉一水落)

異種の量子系の特徴を生かしたハイブリッド系は量子サイバネティクスの大きな特徴となる分野である。ダイヤモンド NV 中心は光学的特性と室温においても高いコヒーレントを保つ電子スピン・核スピン量子状態を持つため注目されている。一方超伝導量子ビットは高い制御性が実現されている。半導体と本公募研究及び超伝導グループは超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド NV 中心のアンサンブル系を結合させる事により、量子状態の SWAP 操作を初めて示した。[Nature, 478, 221, 2011]

#### **17: 磁気センサの研究** (都倉一水落)

ダイヤモンド NV 中心を用いた磁気センサに関して検討を開始し、核スピンの SWAP を用いて感度を向上させる機構を提案した[平成 25 年秋の物理学会]。

#### **18: ハミルトニアン工学** (蔡一北川一水落)

最適制御理論と平均ハミルトニアン理論を融合した新しいパルス設計法を選択平均でハミルトニアンを自在に加工するように拡張し、超伝導や NV センターなど領域内の他の系の精密制御への応用を可能にした。

#### **19: スピン量子コンピュータに関する研究** (都倉一小寺)

グローバルトップゲート電極を付加したシリコン系量子ドット素子の作製と評価を推進した。素子作製とノイズ評価を行い、適切なトップゲート電圧を印加することによりノイズを低減できることを明らかにした。共著の論文も出版された。[J. Appl. Phys. 115, 203709, 2014]

#### **20: スピン量子コンピュータに関する研究** (都倉一大野)

g-因子を制御した量子ドット系を実現し、新しい機構でのスピン閉塞電流効果を初めて確認した。またこの効果の元でゲートパルス制御による過渡電流を調べる事により、スピン選択則を確認する事ができた。その成果を国際会議で報告した [J. Phys: Conf. Ser. 193, 012102, 2009]。また超微細相互作用により電流により核スピンを偏極させる動的核スピンポンプの機構を 2 重量子ドット 6 電子系で調べ、新しいメカニズムを提案した[J. Phys. Soc. Jpn. 80, 023701, 2011]。

#### **21: 回路 QED での光子介在電子輸送の研究** (ノリー樽茶)

超伝導共振器中で量子ドット間の結合を共振器光子で制御する方法は、多量子ビット間の結合を可能にし、また、光子-ドット電子状態（電荷、スピン）の量子結合の物理を調べるうえで有用である。半導体（樽茶）は実験的に、超伝導は理論的に、そのための具体的な構造と方法を議論した。[EPL 103, 17005, 2013]

#### **22: 光子と固体素子中の電子とのコヒーレントな結合** (ノリー大野)

光子と固体素子中の電子とのコヒーレントな結合を念頭に、量子ドット準位と電磁場との結合に結果あらわれる暗黒状態の理論的解析を進めた。二重ドット系で暗黒状態の出現する条件を数値的に再現した。[JJAP 52, 102801, 2013]

#### **23: スピン量子コンピュータに関する研究** (樽茶一大野)

直列 3 重ドットの電子状態について共同実験を行い、ドット間の分子的結合が重要な役割を果たすこと、その結合が電氣的に制御可能であることを示した。多ビット化の指針を与える重要な成果である。[JJAP 51, 02BJ06, 2012]

#### **24: ヘテロジニアス量子リピータネットワークの研究** (蔡一バンミーター)

異なる量子系を組み合わせることにより、量子リピータネットワークの可能性を検証を目指す。超伝導量子ビットによる論理演算、NV センターによる送信とシリコン中の Bi 原子のメモリを考慮する。現実的パラメータを使ったシステムのシミュレーションを目指し、ハードウェアの浄化プロトコルを作成した。

#### **25: 光合成系の時間分解 EPR 研究** (工位一松岡)

光合成や色素増感太陽電池などで重要な金属錯体の光励起状態に着目し、その電子状態を高時間分解多周波 EPR および分子グループによる量子化学計算から明らかにした。[J. Phys. Chem. A 116, 9662, 2012]。

**結論:** 以上のような、多種多様な異なる分野間の連携、共同研究がすすめられ、すでに多くの実りある成果を生じ、すでにその一部は Nature、PRL、PNAS などの高インパクトファクター誌にも掲載された。このような連携研究は、本新学術領域研究があつてこそ、初めて実現することが可能になったものであり、これら連携を通じて新たな学術領域が形成され発展を遂げた。

### 3. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目毎の状況も記述してください。

量子サイバネティクス領域は、高度で複雑な量子状態制御を目指している。応募時には、①新規な量子制御・検出の実現と、②多様な物理系における包括的な量子制御の理解、を領域の目標として挙げた。（量子コンピューティングに関しては、次章「研究推進時の問題点」で説明）。また応募時の研究期間内の成果の一例として、混合量子系での単量子の操作や検出の目覚ましい進展を挙げた。数多くの混合量子系の可能性の中で、特に人工原子量子光学での飛躍的発展や、人工原子と機械振動の結合、微視量子系と固体素子量子系の結合の実現などに言及した。

5年の研究の結果、領域内の全ての物理系で、量子状態制御の科学技術大きく進展し、設定目標はほぼ達成された。「①新規な量子制御・検出」に関しては、超伝導人工原子での高忠実度状態制御や量子非破壊・単事象観測などをはじめ、すべての物理系で目覚ましく進展を遂げた。「②多様な物理系における包括的な量子制御の理解」に関しては、例えば超伝導人工原子量子光学と、従来の自然原子の量子光学との比較より、特に「単原子」量子光学に関する新規な知見を得、より包括的な理解を確立した。また他の多くの新規な混合量子系を実現した成果から、より包括的な理学が生まれた。

また目標には当初なかった、新規な量子効果である超伝導細線でのコヒーレント量子位相滑りの実現などの成果も達成した。全論文数 372 件、内トップ 1% 引用論文は 20 件あることから、遥かに標準を超えた成果が生み出されたことが分かる。（2014 年 6 月集計、すべて量子サイバネティクス謝辞あり）

また既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成という目標に対し、数々の学際的な研究成果を達成した。例えば光学と固体素子を融合した超伝導人工原子量子光学（*Science* 2010, *PRL* 4 編など）；原子と固体素子を融合したハイブリッド量子メモリ（*Nature* 2011）；固体素子と機械振動を融合した表面弾性波による単電子伝送制御（*Nature* 2011, *Nature Nanotech* 2012）；光学と数学の融合による適応量子推定（*PRL* 2012）；光学と固体素子を融合した量子ドットハイブリッド単光子源（*Nano Lett.* 2011）；光学と原子を融合した NV センターハイブリッド単光子源（*Opt. Exp.* 2012）；量子物理と有機合成を融合した室温長偏極技術（*PNAS* 2014）など実り多い成果を上げ、新領域創出の目的を達成した。

以下に各研究項目の状況を記述する：

「超伝導量子サイバネティクスの研究」 代表：蔡兆申（理研） 分担：ノリ フランコ（理研）

新規な量子制御・検出の実現に関して、高忠実度な超伝導人工原子の量子状態制御や、量子非破壊、単事象観測などに成功した。11.5 マイクロ秒のエネルギー緩和時間を持つ長寿命な磁束型人工原子を実現し [*Nature Phys.* doi: 10.1038/nphys1994, 2011]、そしてこのデバイスを使い 99.8% の高忠実度量子状態制御を達成した [*PRL* 110, 040502, 2013]。磁束量子ビットの寿命にかかわる磁束ノイズの研究も多く進めた、その理解を深めた [*PRB* 81, 132502, 2010, *PRB* 89, 020503(R), 2014, *PRB* 85, 174521, 2012, *PRA* 87, 022324, 2013]。超伝導人工原子の制御・結合・観測に関しての研究では、磁束量子ビットと共振器をキャパシタンスで結合した分散読み出し回路を新規に開発 [*PRB* 86, 140508(R), 2012; *New J. Phys.* 16, 015017, 2014]、そしてこの結合方式と、磁束駆動型ジョセフソンパラメトリック増幅器（JPA）を使い単事象量子非破壊観測を達成した [*Appl. Phys. Lett.* 103, 132602, 2013]。

多様な物理系における包括的な量子制御の理解に関しては、多様な混合量子系を実現し、複雑な大型量子システムを可能とする超伝導人工原子の結合方式の開発に成功した。混合量子系の研究では、超伝導人工原子量子光学では数多くの成果を上げた。例えば、磁束型人工原子と 1 次元共振器を結合させた系での共鳴蛍光 [*Science*, 327, 840, 2010]、電磁誘導透明化現象 [*PRL* 104, 193601, 2010]、量子増幅 [*PRL* 104, 183603, 2010]、解放量子系の動的制御 [*PRL* 107, 043604, 2011] などに成功した。また共振器に結合した人工原子で真空揺らぎのスクイーミングを観測 [*New J Phys.* 15, 125013, 2013]、また固体素子を介した光子のエンタングルメント創生した [*PRL* 109, 250502, 2012]。さらに真空のゆらぎの中での仮想粒子の生成・消滅による「動的カシミール効果」の観測に成功した [*Nature* 479, 376, 2011, *PRA* 87, 043804, 2013; *PRA*, 82, 052509, 2010; *PRA*, 82, 032511, 2010]（これは *Physics World* 誌 2011 年の物理学世界 5 大成果の一つ）。単光子と人工原子の決定論的に相互作用する回路方式提案した [*PRL* 111, 153601, 2013, *New J. Phys.* 15, 125013 2013]。超伝導人工原子量子光学と、従来の自然原子の量子光学との比較より、量子光学の範疇を大きく広げ、さらに包括的な学理を確立した。

領域内の共同研究の一環として、別種の混合量子系の研究を進め、固体素子（超伝導磁束型人工原子）と微視的なスピン（ダイヤモンド NV）のアンサンブルとのコヒーレント結合が実現した [*Nature* 478, 221, 2011]。これは超伝導計画研究と、半導体計画研究、そしてダイヤモンド NV 中心公募研究の三研究グループが共同で行ったものであり、新学術領域研究の幅広い研究の枠組みで初めて可能になった。また超伝導人工原子と異種の量子系の結合した混合量子系に関するレビュー論文をまとめた [*Rev. Mod. Phys.* 85, 623, 2013, トップ 0.02% 論文]。

超伝導人工原子の結合方式の開発に関しては、イオントラップ系の量子操作に発想を得た、隣接する人工原子を 2 つの直列した電磁共振器で接続する結合方式や、更にコンパクトな非線形結合器を用いる結合方式も提案した。また多数の量子ビットを一括したエンタグルを可能とする回路も提案した [*PRB* 85, 024537, 2012]。

新たな発展とし、「量子位相滑り」効果を分光実験により実証し [*Nature*, doi:10.1038/nature10930, 2012,]



そのトンネル確率の指数関数的細線幅依存性を検証した[PRB 88, 220506(R), 2013].

以上説明したように、この計画研究では十分設定目標を達成した。

#### 「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」

代表：都倉康弘（筑波大） 分担：樽茶清悟（東大）；太田剛（NTT）

高度で複雑な量子状態制御の為に1量子ビットのユニタリ演算と2量子ビット間の制御 NOT ゲート操作が実現できれば良い事が知られていた。このそれぞれの演算に関しては既に実験の報告があるが、スピン量子ビットにおいてこれを組み合わせた操作に成功した例は未だ無かった。本計画研究では制御 NOT ゲートを実現する為に必要な SWAP<sup>1/2</sup> ゲートと電場駆動電子スピン共鳴による1量子ビットを組み合わせたコヒーレント制御に初めて成功した。「量子もつれ」の出現も近傍に設置した電荷計を用いて確認した。この結果は、量子ビット系の初期化、普遍的コヒーレント操作、読み出しという一連の基本的構成要素を有機的に組み合わせて初めて実現できるものである。その意味で量子系のサイバネティクスの典型例と言って良い[PRL 107, 146801 2011]。3つ以上の量子ドット列中の電子に対しての拡張に関しても、25ビット程度までの個別に電子スピン共鳴型量子ビットを実現できる微小磁石対構造を設計し、3重量子ドットを作製しその電子状態の初期化および独立コヒーレント操作に初めて成功した[PRL 110, 016803, 2013]。また4重量子ドットを作製し、4ビット化の目処を付けている。以上の事から、半導体量子ビット制御に関してはほぼ設定目的を達成した。

一方量子ドット中のスピンを電場により制御する為には量子ドット中で g-因子やスピン・軌道相互作用の制御が必要である。半導体量子ドット中のスピン・軌道相互作用の大きさを正確に見積もり、さらにこの相互作用の大きさが制御可能である事を示した[PRL 104, 246801, 2010, Nature Nanotech. 6, 511, 2011]。さらに g-因子テンソルをゲートにより制御可能である事を示した[PRB 041302(R), 2011]。新しい方向として伝播電子によって量子情報が運ばれる“飛行量子ビット”の制御を固体中で実現した。量子細線で実現した2経路干渉計では電子経路の量子情報をゲート電圧等によって制御され、量子状態は素早く（～100GHz）、遠くまで（～100μm）コヒーレントに伝送される[Nature Nanotech. 7, 247, 2012]。さらに遠く離れた量子ドット間で、単一電子を表面弾性波により移送する技術を開発した[Nature 477, 435, 2011]。その結果、単一電子が量子ドット間をコヒーレントを保持したまま高い忠実度で運ばれることを確認した。この方法によって、導波路を介して量子ドット間を結ぶ量子ネットワークを形成する事が可能となる。これら半導体中の量子制御の課題も設定目的を達成した。

異種間のコヒーレンス転送を実現するハイブリッド系も量子サイバネティクスの重要な要素となる。領域内共同研究と実現した、ダイアモンド NV 中心によるアンサンブル・スピン量子ビット系と超伝導磁束量子ビットはその例である[Nature, 478, 221, 2011]。それぞれが持つ特長を生かした新しい機能を発現させるきっかけとなると考えられる。一方コヒーレント制御された量子系は典型的な非平衡量子系である。情報は物理状態（エントロピー）と深い関係にあり、量子統計の考え方を量子ビット系に適用する事は重要である。領域内連携研究により量子ドット系のエネルギー流のゆらぎに関する統一的な知見を得る事ができ、量子情報と散逸に関する議論が進んだ[PRB 89, 205314, 2014]。以上の様に計画班間、公募研究との連携により、設定目的以上の成果を達成する事ができた。

#### 「分子スピン量子制御」代表：北川勝浩（阪大） 分担：工位武治（大阪市立大）

(a)高忠実度な量子回路の実現を目指して、共振器中の分子スピンに所望の共鳴磁場波形を印加して時間発展を精密に制御する新規な方法論「共振器ハミルトニアン工学」を開拓する。これを用いて動的デカップリングなどの量子物理学的な誤り制御を行う。共振器中の過渡現象を事前に補償し、スピンに所望の磁場パルス照射する手法を開発し、1量子ビット回転での位相過渡歪の抑制を実験的に示した[J. Magn. Reson. 204, 327, 2010]。最適制御理論による数値的設計法と平均ハミルトニアン理論による系統的設計法を融合した新しいパルス設計法を提案し、既存の NMR パルス系列より高い忠実度でデカップリングが行えるパルスを作成した。

(b)それらを実験的に実現するための装置開発を行い、電子スピン系での高忠実度量子ゲートの実現を目指す。任意波形発生器を組み込んだ Ku 帯パルス ESR 分光計を構築し、これまでパルス ESR 実験では用いるのが困難であったコンポジットパルスを実現し、電子スピンのほぼ初期化された 150 mK 下で 99%という高い忠実度の1量子ビットゲートを実装した。さらに、低Qで広帯域な電子スピン操作ができるにもかかわらず、1 W 入力に対して 210 MHz という非常に強いマイクロ波磁場照射が可能で U 字型微小ストリップライン共振器の開発に成功した[J. Magn. Reson. 232, 62, 2013]。

(c)また高偏極化した核スピンを用いてスピン増幅を行い、測定の高感度化を行う。光励起三重項電子スピンを用いた動的核偏極に適したスピンハミルトニアンを実現するため位置選択的に重水素化した p-terphenyl を合成した。これに重水素化 pentacene をドーブした試料ではスピン格子緩和が抑制され、室温での世界記録である 34%の核スピン偏極を得た[PNAS 111, 7527, 2014]。120K 下での実験では2量子ビットのエンタングルメント閾値を超える 43%の偏極を得た。さらに同手法を用いたガラス状や薄膜状試料の高偏極化に成功した[Angew. Chem. Int. Ed., 52, 13307, 2013; J. Phys. Soc. Jpn., 82, 084005, 2013]。結晶中の少数の核スピンの情報をスピン拡散により高偏極化した多数の核スピンの移動して蓄積することによって広義のスピン増幅を実現し、140倍のゲインを得た[PRL 107, 050503, 2011]。また選択的に <sup>19</sup>F と <sup>13</sup>C スピンで修飾した p-terphenyl 分子を合成し量子非破壊測定を可能にする狭義のスピン増幅を実験的に実現した。また領域内の原子グループとの共同研究により回転座標系での断熱消磁を光格子系の量子シミュレーション実験にも適用できることを見出した。

(d)分子スピン系の量子制御に必要な電子-核スピン系の電子状態を、パルス ESR を用いて解明した[Mol. Phys. 111, 2767, 2013; Angew. Chem. Int. Ed. 52, 4795, 2013]。核スピンを直接制御することなく、電子スピン量子ビットのみを制御することによって間接的に核スピン量子ビットを制御するパルスマイクロ波スピン操作技術

が実在分子スピン系に適用できるか検討した。分子スピンの DNA 二重螺旋構造内に埋め込まれた 1 次元周期系は、有用な多量子ビット系の原型となる。これらの系の分子スピンの局所構造、及び螺旋構造の部分的弛緩などを解析する方法を提案した。領域内の超伝導磁束量子ビットグループとの連携では、超伝導量子演算回路の量子メモリーに適した新規な分子スピンアンサンブル系を設計するために、ゼロ磁場分裂磁気テンソルの精密な量子化学計算法を開発した。ゼロ磁場分裂磁気テンソルに寄与するスピン-軌道相互作用も考慮した汎用方法論である[Phys. Chem. Chem. Phys. 16, 9171, 2014]。

「冷却原子を用いた量子制御」代表：高橋義朗（京大） 分担：向井哲哉（NTT）

まず、「光格子」を用いたアプローチでは、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[J. Phys. Soc. Jpn. 83, pp.014301, 2014]、ほぼ単一原子を検出できる高感度蛍光検出系の開発[Appl. Phys. B 108, 2012]、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[PRA 89, 031601(R), 2014]、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。特に、量子シミュレーション研究として、SU(6)Mott 絶縁体のポメランチュク冷却機構による生成[Nature Physics 8, 825, 2012]、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[PRL 106, 205304, 2011]、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[J. Phys. Soc. Jpn. 83, 014003, 2014]、異なる電子軌道状態の間の磁気フェッシュバッハ共鳴の発見とフェッシュバッハ分子の直接光会合[PRL 110, 173201, 2013]、リープ型光格子の実現、3 次元光格子中の長寿命分子の生成と観測[PRA 86, 043411, 2012]、などに成功した。

以上の研究成果により、光格子中の冷却原子に関する極めて高度で複雑な量子状態制御を、かなり網羅的に開拓したと言える。

さらに、「アトムチップ」を用いたアプローチでは、固体表面近傍に捕捉した冷却原子を用いた量子制御の研究を行ない、超伝導永久電流が作る安定な磁場ポテンシャル中で、ルビジウム原子の BEC を生成し、ラジオ波 RF を照射することで、その内部状態をコヒーレントに制御することに成功し、超伝導永久電流アトムチップ上で長寿命なスピノル BEC をコヒーレントに生成することが可能になった[Appl. Phys. B DOI: 10.1007/s00340-014-5768-3]。その結果、単一の擬 1 次元ポテンシャルを実現できる超伝導永久電流アトムチップの特徴を利用する「高密度擬 1 次元量子多体系のシミュレーション」への道が拓けたと考えられる。

さらに、「スピン制御」によるアプローチでは、まず、光トラップ中の原子 BEC のスピンについて、エコー技術を用いて操作し、DC 的な変動磁場や磁場勾配の影響を低減可能な交流磁力計を開発した。この磁力計を用いて環境磁場ノイズを測定し、このノイズを打ち消す磁場を人為的に加え、環境磁場ノイズを 1nT 以下に低減することに成功した[PRA 88, 031602(R), 2013; Appl. Phys. Express 6, 052801, 2013]。また、冷却 171Yb 原子の核スピン集団について、ファラデー回転相互作用による、量子非破壊測定を実現し、その測定結果のスピン系への射影によるスピンスクイズド状態の生成に成功するとともに、その測定結果をもとにした回転操作を高速にスピン系に施すことにより、スピン集団に対する量子フィードバック制御を実現した[PRL 110, 163602, 2013]。

「開放型イオントラップ系による量子情報処理」代表：占部伸二（阪大）

本研究では、以下の三点を目標に設定した。(1)大規模化および他の量子系との結合が容易なトラップ技術の開発、(2)高忠実度化を目指した断熱過程に基づく量子ゲート技術の開発、(3)他の量子系との結合の可能性の探索。(1)については、開放型のトラップであり、他の量子系との結合にも適しているプレーナートラップの開発を行うことが主な目的である。プレーナートラップに捕獲されたイオンのレーザー冷却のためのマイクロ運動補正法の開発[Appl. Phys. B, 107, 907, 2012]、基板に配置された異なったトラップ間のイオンの輸送技術の開発を行い、基盤的な技術を確認することで目標を達成したといえる。さらに、領域内の「半導体」グループの協力のもとに、大きな磁場勾配の発生可能なプレーナートラップを開発し、実際にトラップしたイオンを用いてその特性を評価した。現在、これらの結果に基づいて、多量子ビットへの拡張の有利な磁場勾配を利用した量子ゲート実験を進めている。(2)については、レーザー強度揺らぎや周波数変動に対してロバストな、高速断熱通過や誘導ラマン断熱通過などを用いた量子ゲートや、複数イオンを用いた対称なエンタングル状態の生成などを行うのが目的である。高速断熱通過法を用いた2および3イオンのディッケ状態の生成[PRA 83, 022315, 2011]、デコヒーレンスフリーな2イオンのエンタングル状態の生成[PRL 108, 060503, 2012]、振動準位を仲介とした多準位誘導ラマン断熱通過を用いた4イオンのディッケ状態の生成[PRL 109, 260502, 2012]、誘導ラマン断熱通過を用いた幾何学的位相因子のみによるユニバーサルな単一量子ビットゲート操作の実現[PRA 87, 052307, 2013]など、新たな手法を用いて特徴的な成果を数多く上げ、十分に初期の目的を達成したといえる。さらに、イオンの振動基底状態への冷却技術を三角形に並んだイオンに適用することにより、量子回転子を実現し、そのトンネル効果によって引き起こされるAharonov-Bohm効果の観測にも成功している[Nature Comm. 5, 3868, 2014]。この研究は分子科学研究所との共同研究で実現したものであり、基礎物理分野など新たな領域の展開にも貢献するものである。(3)についてはイオントラップと他の量子系との量子インターフェースに関連するものである。本研究では、領域内の竹内グループと共同で、イオンとの結合を目的として、テーパーファイバーの表面の電荷密度をイオントラップ中の荷電粒子を用いて測定することに成功した。この研究については現在実験を継続中である。

「光子量子回路による量子サイバネティクスの実現」代表：竹内繁樹（北大）

計画研究班光1（竹内）は、「光子量子回路による量子サイバネティクスの実現」の課題名の元、(1)「フィードバック制御」を利用した量子状態の推定や制御、(2)制御における「入力状態」や「検出信号」のみならず、それらの「比較」デバイスまでも量子情報化した完全量子フィードバック制御にむけた光子量子回路の実現、(3)異種量子間状態制御の実現に向けた、光子と異種量子ビットを結合の学際融合研究を推進と量子メトロロジーへの展開などの項目について研究を推進した。その結果、項目(1)に関し、本新学術研究の公募研究班の藤原彰夫と共同研究により、限られた光量を用いて、最も精度良く光の状態を推定する新しい方法である、適応量子状態推定の実証実験に成功した[PRL 109, 130404, 2012]。また、その後、パラメータを3つに拡張、任意の光子の状態に対する適応量子状態推定にも成功、従来法の量子状態トモグラフィーよりも効率的な状態推定が可能なることの実証にも成功した[物理学会(2014)、論文準備中]。この適応量子状態推定は、光子に限らず他の量子に対して用いることができる。また、最近重要性の増している、生体中に導入した、単一蛍光蛋白質分子の方向を、できるだけ正確に逐次同定することへの応用も可能である。今後、量子情報処理に限らず、生命科学など広い領域に適応が期待される。

項目(2)に関しては、計画研究の小芦グループと連携し、世界最高の2光子干渉性(96%)をもつ伝令付き単一光子源を実現[Opt. Exp. 20, 15275, 2012]した。この良質な単一光子源を用い、Knillらの提案した、光量子コンピュータの基本となる光量子回路を実現することに、初めて成功した[PNAS 108, 10067, 2011]。

項目(3)に関してはナノ光ファイバを用いて量子ドットからの発光をこれまでにない高い効率で単一モード光ファイバに結合することに成功した[Nano Lett. 11, 4362, 2011]。さらに、ナノダイヤモンド中の窒素欠陥からの発光の結合にも成功した[Opt. Exp. 20, 10490, 2012]。さらに発展させ、公募研究班の水落グループと、ダイヤモンド中の窒素欠陥とナノ光ファイバの結合に関する共同研究を実施、単一の窒素欠陥の光検出磁気共鳴のナノ光ファイバを用いた検出に成功している。さらに、他のイオンから出力される光子の高効率捕集を旨とした共同研究を計画研究班の占部グループと共同で実施、ナノ光ファイバ表面の電荷分布情報を荷電粒子トラップを用いて得ることに成功した(物理学会発表予定)。また、を得るなど、異種間量子ビットの結合に向けて、学際的な共同研究の推進により、大きな成果を数多く得ることができた。

以上のように、学際的な共同研究の推進により、これら3つの項目に関し、当初予定していた以上の成果を得ることができた。

「光を基軸とした多キュービット量子制御」代表：小芦雅斗（東大） 分担：山本俊（阪大）

距離の離れた地点を結んで高度な量子制御を行うには、通信に適した光と、保存や複雑な状態操作に適した物質系を組み合わせる必要がある。光系と物質系をコヒーレントに結合する場合、物質系に固有の共鳴周波数に合った波長の光との相互作用が用いられる。しかし、光系の利点である長距離伝送に適した波長は、遠赤外の通信波長帯に限られる。光系と物質系の融合の際に障害となるこのような光の波長のギャップを埋める技術として、量子コヒーレンスを破壊することなく光の波長を変換する量子インターフェースが重要となる。本研究では、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より、可視域の光子を通信波長帯へ変換する広帯域量子インターフェースを開発し、入力光の持つ様々な量子的性質がこのインターフェースによって通信波長帯の出力光に受け継がれていることを確認する実験を行った[Nature Comm. 2, 537, 2011]。変換の忠実度の低下の原因が光子検出器の性能に起因することを突き止め、領域外部の情報通信研究機構に共同研究を依頼し、超電導光子検出器を導入した結果、非常に高い忠実度(0.93)の量子インターフェースを完成させることができた[PRA 87, 010301(R), 2013]。固体素子による量子インターフェースは、設計を変更することで入力光の波長を選択できる特長を持つ。本研究では Rb 原子の発光波長である波長 780nm と、ダイヤモンドの NV センターの発光波長である 637nm の量子インターフェースを開発した[Opt. Exp. 22, 11205, 2014]。いずれも、領域の計画研究や公募研究で注力されている物質系であり、共同研究として光系と物質系の融合を今後も進めていく予定である。

量子コヒーレントな系は、環境の予期せぬ変化から量子コヒーレンスを保護する手法が不可欠となる。従来、1個の光子の情報を数個の光子の量子もつれ状態に載せ替える手法が広く知られているが、全ての光子が伝送される必要があるため、光ファイバ等の光通信路の光損失のために効率が犠牲になる問題があった。これに対し、本研究では、ボース粒子としての光子の性質を巧みに用いることで、保護に寄与する光子数を大幅に増やし、たとえ大多数の光子が失われても動作する手法を考案した。実際に、数百個の光子を用いることで、効率を100倍近く改善できることを実証実験により示した[PRL 106, 110503, 2011]。また、位相雑音に対して有効なこの手法を、偏光回転を伴う通常の光ファイバに適用する方法を考案した[PRA 87, 052325, 2013]。

この成果は、効率の改善という応用的な意義はもちろんであるが、その飛躍的な改善をもたらした背景に、量子的な性質と古典的な性質の融合が幾重にも織り込まれていることは特筆すべきである。コヒーレンスをもった状態にボース粒子である光子を多数用意することは、光の古典的な波動としての性格を利用していると解釈できる。従って、量子もつれと光の古典性の融合が改善の鍵となっている。また、同じ手法を通常の光ファイバに転用する際に鍵となったのは、波動としての光の伝搬に伴う相反性という性質と、量子テレポーテーションで本質的な役割を担う量子もつれ状態の対称性が、同じ変換則を持つというある種の偶然であった。ここでも、量子的な性質と古典的な性質の融合が登場している。このように、量子的な性質と古典的な性質の組み合わせが劇的な効果をもたらすという視点は、広い視野から新たな学理をもたらす可能性を秘めていると考えられる。

以上説明したように、すべての研究項目で、応募時に設定した目標は十分に達成された。

#### 4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

本新学術領域研究が発足して間もなく、最先端研究支援プログラム（FIRST）の「量子情報処理」も採択された。この二つのメンバーの重複もかなりあることで、研究内容の比重の見直しを行った。FIRST 量子情報処理プロジェクトが主に応用志向の強い研究であることを受け、本新学術領域は、主に基礎研究に軸足を移した研究に集中するように方針変更した。実際には、本来の研究提案時の研究内容には、基礎研究もさることながら、量子情報も含めた応用研究も視野に入れられていた。このような方針の多少の修正は、中間評価の時には支持された。

また平成 24 年 4 月 1 日発行の本領域の審査結果には：「最先端研究 FIRST でも十分サポートされている研究であるため、本経費の 10%以上を外部の人を取り込む人的ネットワーク形成および共同研究に使っていただきたい」とのコメントが一部の計画研究につけられた。それは超伝導（蔡）、分子（北川）、原子（高橋）、光 I（竹内）の 4 つの計画研究に対するものであった。このようなネットワーク形成に関与する経費の一部として、研究員招聘費用と学会参加等の旅費に絞り、集計を取った。この 4 つの計画研究の、5 年間の集計では、この二つの費目のみで、すでに全体予算の約 16.4%を占めていたことが分かった。以下にその詳細を示す。

	予算合計額	招聘費+旅費	割合	
超伝導	251,700千円	75,110千円	(内海外研究員招聘:60,930千円)	
分子	168,100千円	5,660千円		
原子	97,800千円	1,140千円		
光	90,500千円	18,000千円		
	608,100千円	99,910千円	16.4%	

外部との共同研究に直接使った費用を正確に算出することは難しいが、領域全体の 5 年間の論文発表に含まれる外部の共著者は約 150 名程度、外部研究機関は約 130 機関程度であった。以上を考慮すると、指摘された外部の人を取り込む人的ネットワーク形成および共同研究への研究資金の振り分けは達成された。

最先端研究支援プログラムの立ち上げのタイミングの遅れの関係上、第 1 回の公募研究の公募宣伝が遅れ、結果的には予算の約半数程度の件数の公募研究しか採用できなかった。また第 1 回に採択された東工大の妻幹男先生の課題「縮退イッテルビウム原子集団を用いたクラスター量子計算の実現」は、開始 1 年目で、新たに獲得された研究資金との重複制限により、ご自身で中途辞退された。

2011 年 3 月 11 日の大震災とその後の電力制限の影響で、つくばにある理研や産総研、厚木の NTT 研究所で一時的な研究の停滞は多少起こったが、本領域研究全体では幸いにもそれほど大きなダメージは受けなかった。

## 5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ程度）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

### ① プロモーション・転職

小芦雅斗： 阪大准教授 ⇒ 東大教授  
中村泰信： NEC 主席研究員 ⇒ 東大教授  
Pashkin Yuri： NEC/RIKEN 研究員 ⇒ ランカスター大学教授  
Astafiev Oleg： NEC/RIKEN 研究員 ⇒ ロイヤルホロウェイロンドン大学教授  
丸山耕司： RIKEN ASI 研究員 ⇒ 大阪市立大学大学院理学研究科准教授（客員）  
仙場浩一： NTT グループリーダー ⇒ 情報通信研究機構首席研究員  
都倉康弘： NTT 研究部長 ⇒ 筑波大学数理物質系物理学専攻教授  
水落憲和： 筑波大学講師 ⇒ 大阪大学大学院基礎工学研究科准教授  
松岡秀人： 東北大学助教 ⇒ ボン大学物理・理論化学研究科上席研究員  
山崎歴舟： 京都大学特定研究員 ⇒ 東京大学先端科学技術研究センター助教  
山本 俊： 大阪大学大学院基礎工学研究科助教 ⇒ 准教授  
小寺哲夫： 東京工業大学助教 ⇒ 准教授  
山本倫久： 東京大学助教 ⇒ 講師  
大岩 顕： 東京大学講師 ⇒ 大阪大学教授  
根来 誠： 大阪大学博士課程 ⇒ 助教  
生田力三： 大阪大学博士課程 ⇒ 大阪大学助教  
竹内繁樹： 北海道大学電子科学研究所教授 ⇒ 京都大学工学研究科教授  
趙 洪泉： 北海道大学博士研究員 ⇒ 中国科学院重慶研究院研究員  
土師慎祐： 大阪大学大学院生 ⇒ 電通大特任助教  
久保敏弘： NTT ポスドク ⇒ 筑波大学助教

### ② 領域融合インターンシップ企画

本領域内での連携を強化するための短期研修制度で量子サイバネティクスよりの支援がある。基本的には領域内の研究室に所属する学生・ポスドクなど若手研究者を、領域内の研究室が短期間受け入れたが、領域外への派遣、領域外からの受け入れも行った。以下にインターンシップ受け入れ実績を列挙する：

- 東京工業大学修士課程2年生⇒東京大学樽茶清悟研究室 2012-2013年(2年間)
- 大阪市立大学博士課程1年生⇒Weizmann Institute of Science, Israel/2013年(1ヶ月)
- 大阪大学産業技術研究所修士課程2年生⇒大阪大学理学研究科藤原彰夫研究室/ 2012年(2週間)
- 大阪大学産業技術研究所修士課程1年生⇒大阪大学基礎工学研究科鈴木・水落研究室/2012年(2週間)
- 大阪市立大学大学院理学研究科研究生⇒理化学研究所(NEC 研究所内)蔡兆申研究チーム 2012年(1ヶ月)
- 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程1年生⇒理化学研究所(NEC 研究所内)蔡兆申研究チーム/2012年(1ヶ月)
- University of Modena, Italy 博士課程2年生⇒大阪市立大学分子物理科学・QC/QIP 研究室/2012年(1週間)
- 大阪大学大学院博士課程2年生⇒理化学研究所(NEC 研究所内)蔡兆申研究チーム/2011年(1ヶ月)
- 大阪市立大学大学院博士課程3年生⇒京都大学大学院高橋義朗研究室/ 2010年(1ヶ月)
- 大阪市立大学大学院博士研究員⇒京都大学大学院高橋義朗研究室/ 2010年(1ヶ月)

### ③ 学生サポート

量子情報を中心とした量子物理に携わる学生・ポスドクなど若手研究者が主体となった集まり「量子情報学生チャプター」の支援を行ってきた。支援の内容は、会議での講義を含めた会議プラン支援、会議開催時の支援（会議共催、会場費・遠距離交通費等）などである。

369名の量子情報学生チャプターメンバーの就職等の追跡調査も行ない、以下の結果を得た（2013年3月集計）。

国内学生：57.4%、国外学生：0.5%、国内ポスドク：11.3%、国外ポスドク：0.8%、

助教・准教授：7.3%、公務員：2.4%、民間企業：16.4%

学生を除くと、正規雇用者約68%、ポスドク約32%であった。（計29名）

### ④ 受賞

高橋義朗： 2013 仁科記念賞  
竹内繁樹： 第6回（平成21年度）日本学術振興会賞、大和エイドリアン賞、北海道大学研究総長賞  
小寺哲夫： 第27回安藤博記念学術奨励賞、日本物理学会若手奨励賞、東工大挑戦的研究賞、  
INC8 Best Poster Award  
内海裕洋： 平成25年文部科学大臣表彰若手科学者賞  
山本 俊： 平成26年文部科学大臣表彰若手科学者賞  
生田力三： 第30回井上研究奨励賞受賞  
山本倫久： 平成25年度日本物理学会若手奨励賞、文部科学大臣表彰若手科学者賞

## 6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

本領域では、領域で共有する設備は特に設けていない。また理研、NTT、東大などでは、以前から存在していたクリーンルーム内の薄膜固体素子作成設備を利用して、本領域の研究で使う微細な固体素子の作成を行うことができた。いくつかの計画研究では、本領域の経費で、無冷媒型希釈冷凍機システムなどの大型でかつ主要な設備もそろえることができ、研究を大いに進展させることが可能になった。

また本報告書「研究推進時の問題点」項目で報告したように、平成 24 年 4 月 1 日発行の本領域の審査結果には：「最先端研究 FIRST でも十分サポートされている研究であるため、本経費の 10%以上を外部の人を取り込む人的ネットワーク形成および共同研究に使っていただきたい」とのコメントが一部の計画研究につけられた。それは超伝導（蔡）、分子（北川）、原子（高橋）、光 I（竹内）の 4 つの計画研究に対するものであった。このようなネットワーク形成に関与する経費の一部として、研究員招聘費用と学会参加等の旅費に絞り、集計を取った。この 4 つの計画研究の、5 年間の集計では、この二つの費目のみで、全体予算の約 16.4%を占めている。

総括班の活動に関して：総括班は総括班会議を年 2 回行い、新学術領域の形成に尽力した。また領域内共同研究を総括班の指導下での策定し、「異なる学問分野の研究者が連携して行う共同研究の推進」を目指し、多くの領域内共同研究を立ち上げた。その詳細は本報告書「研究組織」項目（P4~P6）に報告してある。これらの共同研究は、多くの成果を上げ、すでに論文化されているものも多くある。例えば「ダイヤモンド NV 中心と超伝導量子ビットの結合」の研究成果は、超伝導計画研究、半導体計画研究、そしてダイヤモンド NV 公募研究が共同で行い、その重要な成果は Nature 誌に掲載された[Nature 478, 221, 2011]。このようは複合領域にまたがる共同研究の成果は、新学術領域プロジェクトがあってはじめて可能になったものである。

また総括班では、新たな学術領域を創成し、それを更に発展させるため、異なった背景を持つ各研究項目(超伝導回路、半導体量子ドット、分子、原子、イオン、光等など研究グループ)間の横断的連携研究が必要である。これらの研究グループ間の融合研究を促進する目的で、一連の「領域融合ワークショップ」を随時開催した。ワークショップのテーマは、領域融合を念頭に、毎回様々な切り口で、計 13 回開催した。

本領域内での連携を強化するための短期研修制度「領域融合インターンシップ」を企画して、総括班が費用を含め支援した。基本的には領域内の研究室に所属する学生・ポスドクなど若手研究者を、領域内の研究室が短期間受け入れたが、領域外への派遣、領域外からの受け入れも行った。その詳細は、本報告書「若手の育成」に例挙した。

## 7. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

以下が総括班評価者である山本喜久教授（スタンフォード・NII・理研）とロイド・セス教授（MIT）の評価である。

山本喜久教授評：

新学術領域「量子サイバネティクス」は、非常にアクティビティの高い研究プロジェクトであり、多数の論文がいわゆる一流誌といわれる雑誌に掲載され、短期間ではあるがトップ1%以内の引用数を持つ論文を多数発表している。参加した研究者の方々の努力に敬意を表すると共に、この成功はプロジェクトを率いられた蔡兆申博士のリーダーシップによるものと判断する。

さて、中間評価時の指摘事項に照らし合わせて、本プロジェクトの総括を行なってみる。「既存の学問分野の枠に収まらない振興・融合領域の創成」に関しては、超伝導人工原子量子光学、ハイブリッド量子光学、表面弾性波による単一電子伝送制御、適応量子推定、ハイブリッド単光子源、など多岐にわたる成果が挙げられている。この多数創成されたテーマが、研究支援機関が意図している「融合領域の創成」に合致しているかどうか、評価者にはわからないが、“たった一つでよいから、もう少し骨太なもの”を研究支援側は意図していたのではないかと、という気もする。その批判に対しては、量子情報はそれ自体が生まれたばかりの融合領域であり、新たな融合領域を創るよりも内部で toolbox の拡充を図るタイミングにある、ということであるかもしれない。

次に「異なる学問分野の研究者が連携して行なう共同研究等の推進による当該研究領域の発展」と「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究などの推進による当該研究領域の新たな展開」に関しては、公募研究で参加した内海、水落、藤原、小寺、大野、バンミータ各氏と計画研究グループメンバーの各氏とが積極的に共同研究、人材交流を行なって優れた研究成果を上げ、当該研究領域の発展に寄与したと総括できる。

「当該領域の研究の進展が他の研究領域の発展に大きな波及効果をもたらす」に関しては、超伝導量子ビットと他の量子系のハイブリッド結合と冷却原子による量子シミュレーションの2つがクレームされている。前者に対しては、ここで言う“他の研究領域”が何をさすのかを明確にさせていただきたかった。また、後者については、“多体量子系を取り扱う計算機物理、様々な近似数値解法”が他の研究領域のことと拝察するが、具体的にどのような波及効果とその分野にもたらされるのか、を記述していただきたかった。

最後に「学術の国際的趨勢等の観点から見て重要であるが、我が国において立ち遅れており、当該研究の進展に格段の配慮を必要とするもの」に関しては、イオントラップと NV センターの2つの研究分野が指摘されている。いずれの研究テーマでも担当グループの並々ならぬ努力により世界レベルの成果が上げられた、ことに敬意を表する。

結論として、新学術領域「量子サイバネティクス」はプロジェクトリーダーをはじめとする参加研究者の努力により多くの研究成果と多数の論文を発表し、成功のうちに終了した、と結論づけられる。ただ、一点気になったのは（それは最近の傾向でもあるが）、研究成果を研究者の言葉で何が面白くて、どういう新しい知識が人類にもたらされたのか、を語る代わりに、どういう有名雑誌に論文が出て、引用数が何件あった、という書き方をされることが多い。これだと、折角の成果を感動をもって伝えることができないのではないかと感じられた。

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

77 MASSACHUSETTS AVENUE, ROOM 3-160

CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS, 02139, U.S.A.

**Seth Lloyd**

*Professor of Mechanical Engineering  
Director, W.M. Keck-MIT Center for Extreme  
Quantum Information Theory (xQIT)*

*Telephone: 617-252-1803  
Fax: 617-258-2802  
Email: slloyd@mit.edu*

Report on the Quantum Cybernetics Project

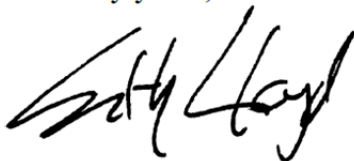
I am writing in my capacity as external advisor for The Quantum Cybernetics Project. This highly successful interdisciplinary project has focused on issues of quantum control and measurement, with emphasis on the interaction between optical, solid-state, and superconducting systems. The project has been highly productive and has produced a set of substantial breakthroughs and 'firsts.' Notable breakthroughs include

- The first devices integrating quantum optics with superconducting artificial atoms (papers in Science and Physical Review Letters)
- First hybrid quantum memory constructed from solid state devices coupled to nitrogen vacancy (NV) centers (Nature)
- Solid state and nano-mechanical structures to control single electrons coupled to surface acoustic waves (Nature, Nature Nanotech)
- Adaptive quantum state estimation in quantum optics (Physical Review Letters)
- Hybrid single photon source from quantum dots (Nano Letters)
- Hybrid single photon source from atom optics (Optics Express)

The project successfully created more than twenty interdisciplinary research collaborations. For example, the path-breaking work coupling NV centers to a superconducting qubit was performed in collaboration with the Semba lab at NTT, the Tokura lab at NTT, and the Mozouchi lab in Osaka. The project produced 318 papers, including 17 in the top 1% according to citation, with 13 papers in Nature, 1 in Science, 38 in Physical Review Letters, and 110 in PRA-X. This is a remarkable record of research collaboration and publication.

When the Quantum Cybernetics Project first began, it proposed to explore new territory in the ground between quantum control and quantum information processing. The novelty of the project implied that there was a substantial chance of failure: it could have been difficult or impossible to create the necessary collaborations, and the proposed work might have proved to be too ambitious. Now that it is complete, I am happy to report that the Quantum Cybernetics Project has been a resounding success. I do not know of any other project of similar scope worldwide that has produced such a series of breakthroughs and game-changing results. It has been an honor and a privilege to be associated with this remarkable scientific work.

Sincerely yours,



Seth Lloyd



## 8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）〔研究項目毎または計画研究毎に整理する〕

（3 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、現在から順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

「超伝導量子サイバネティクスの研究」代表：蔡兆申（理研） 分担：ノリ フランコ（理研）

磁束量子ビットと共振器をキャパシタンスで結合した分散読み出し回路を新規に開発[*New J. Phys.* 16, 015017, 2014; *PRB* 86, 140508(R), 2012]。磁束量子ビットの寿命にかかわる磁束ノイズの解析[*PRB* 81, 132502, 2010, *PRB* 89, 020503(R), 2014, *PRB* 85, 174521, 2012, *PRA* 87, 022324, 2013]。磁束駆動型ジョセフソンパラメトリック増幅器（JPA）を使い単事象量子非破壊観測を達成[*Appl. Phys. Lett.* 103, 132602, 2013]。コヒーレント量子位相滑りのトンネル確率の指数関数的細線幅依存性を検証[*PRB* 88, 220506(R), 2013]。共振器に結合した人工原子で真空揺らぎのスケーリングを観測 [*New J Phys.* 15, 125013, 2013]。磁束量子ビットで 99.8% の高忠実度量子状態制御を達成[*PRL* 110, 040502, 2013]。超伝導人工原子と異種の量子系の結合した混合量子系に関するレビュー論文[*Rev. Mod. Phys.* 85, 623, 2013, トップ 0.02% 論文]。「動的カシミール効果」理論解析[*PRA* 87, 043804, 2013; *PRA*, 82, 052509, 2010; *PRA*, 82, 032511, 2010]。単光子と人工原子の決定論的に相互作用する回路方式提案した[*PRL* 111, 153601, 2013, *New J. Phys.* 15, 125013 2013]。共振器に結合した人工原子を介した光子のエンタングルメント創生[*PRL* 109, 250502, 2012]。「量子位相滑り」効果を分光実験により実証[*Nature*, 484, 355, 2012]。多数の量子ビットを一括したエンタグルを可能とする回路も提案[*PRB* 85, 024537, 2012]。領域内の共同研究の一環として、固体素子（超伝導磁束型人工原子）と微視的なスピン（ダイヤモンド NV）のアンサンブルとのコヒーレント結合が実現[*Nature* 478, 221, 2011]。11.5 マイクロ秒のエネルギー緩和時間を持つ長寿命な磁束型人工原子を実現[*Nature Phys.* Vol. 7, 565, 2011]。動的カシミール効果」観測に成功[*Nature* 479, 376, 2011]（これは *Physics World* 誌 2011 年の物理学世界 5 大成果の一つ）。解放量子系の動的制御[*PRL* 107, 043604, 2011]。電磁誘導透明化現象[*PRL* 104, 193601, 2010]。量子増幅[*PRL* 104, 183603, 2010]。磁束型人工原子と 1 次元共振器を結合させた系での共鳴蛍光[*Science*, 327, 840, 2010]。

総論文数 187 件、内トップ 1% 論文 15 件（2014 年 6 月集計）。

「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」

代表：都倉康弘（筑波大） 分担：樽茶清悟（東大）；太田剛（NTT）

トンネル結合量子細線とアハロノフボームリングを結合させて純粋な 2 経路干渉計を実現し、伝播電子によって量子情報が運ばれる“飛行量子ビット”の制御を固体中で初めて実現した[*Nature Nanotech.* 7, 247, 2012]。また遠く離れた量子ドット間で、表面弾性波を用いて単一電子を周囲の電子から孤立させて移送する技術を開発し、量子ドット間の単一電子移送に約 90% の確率で成功した[*Nature*, 477, 435, 2011]。領域内の共同研究によりダイヤモンド NV 中心によるアンサンブル・スピン量子ビット系と超伝導磁束量子ビットの異種量子系間のコヒーレンス転送に成功[*Nature*, 478, 221, 2011]。任意の量子演算を行うには、1 量子ビットのユニタリ演算と 2 量子ビット間の制御 NOT ゲート操作が実現できれば良い。スピン量子ビットにおいてこれを組み合わせた操作に初めて成功した[*PRL* 107, 146801, 2011]。またスピン回転操作の高速化とゲート忠実度の改善を行い、全ての論理演算に使われる x, z 軸周りの回転について世界最高値を達成した（x 回転: 127 MHz, z 回転: 50 MHz, 忠実度 > 95%）。3 つ以上の量子ドット列中の電子に対して、個別に電子スピン共鳴型量子ビットを実現できる微小磁石対構造を設計し 3 スピンの独立コヒーレント操作に初めて成功した。4 ビット化の目処を付けた。InAs 量子ドット素子中のスピン・軌道相互作用と g-因子テンソルの大きさを正確に見積もる事が可能になり、さらにこの相互作用の大きさがゲートにより制御可能である事を示した[*PRL* 104, 246801, 2010, *Nature Nanotech.* 6, 511, 2011, *PRB* 84, 041302(R), 2011]。エネルギー分散の二階微分に対応する信号を検出できる広帯域キャパシタンス測定技術を開発し、二重量子ドットスピン三重項状態に起因する構造を得た。

「分子スピン量子制御」代表：北川勝浩（阪大） 分担：工位武治（大阪市立大）

光励起三重項状態を用いた動的核偏極に用いるホスト分子 *p*-terphenyl を位置選択的に重水素化し、重水素化 pentacene をドーピングすることで、<sup>1</sup>H スピンのスピン格子緩和を抑制し室温で初めて 34% の高偏極率を達成した[*PNAS* 111, 7527, 2014]。同手法でガラス状物質の高偏極化に初めて成功した[*Angew. Chem. Int. Ed.*, 52, 13307, 2013]。任意波形発生器を組み込んだ Ku 帯のパルス ESR 分光計を構築し、100mK の極低温下で Ku 帯パルス ESR 実験によって、偏極率 99.9% 以上に初期化された電子スピンの精密な量子制御が可能となった。また、高効率のストリップライン型 ESR プローブを開発した[*J. Magn. Reson.* 232, 62, 2013]。単一スピン測定を目指して、高利得までスケラブルなスピン増幅の実装を研究し、少数の核スピンの情報をスピン拡散を利用して分子の壁を越えて結晶中の高偏極化した多数の核スピンの移動して蓄積することによって、140 倍の広義のスピン増幅を実現した[*PRL* 107, 050503, 2011]。また選択的に <sup>19</sup>F と <sup>13</sup>C スピンでラベルした *p*-terphenyl を用いて量子非破壊測定が可能狭義のスピン増幅を実現し、初めて 10 倍を超える利得を達成した。最適制御理論による数値的設計法と平均ハミルトニアン理論による系統的設計法を融合した新しいパルス設計法により動的デカップリングパルスを作成し、従来の NMR 分光で用いられている多重パルス系列より高忠実度であることを示した。系の応答を測定して歪を予め補償し、所望のパルス磁場波形を共振器内に発生する方法を開発し、1 量子ビットの回転ゲートに相当するラビ振動を観測で、位相過渡歪の抑制を初めて示した[*J. Magn. Reson.* 204, 327, 2010]。

多量子ビット系の原型になる DNA 二重螺旋構造内の分子スピンの 1 次元周期系において、二重螺旋内にある分子スピンの局所分子構造及び螺旋構造の部分的弛緩などを解析する方法を実験・理論の両面から推定する方法を提案した。電子スピンのみを制御することによって間接的に核スピン量子ビットを制御するパルスマイクロ波スピン操作技術の実在分子スピン系への適用を検討した。電子スピン交換相互作用は出来るだけ弱め、かつ電子スピン間に働く小さな磁気双極子相互作用を精度よく設計した複数の電子スピンをもつ系に対する一般的電子スピンニューテーション法を初めて確立した。

「冷却原子を用いた量子制御」代表：高橋義朗（京大） 分担：向井哲哉（NTT）

2次元光格子中の冷却原子の高空間分解能のイメージングと高分解能分光を同時に実現する技術“スペクトラルイメージング”技術の開発に成功した[PRA 89, 031601(R), 2014]。永久電流超伝導アトムチップ上で Bose-Einstein condensate を実現した[Appl. Phys. B, Lasers and Optics 0946-2171, 2014]。YbLi 混合系を 3次元光格子に導入する技術の開発に成功した[J. Phys. Soc. Jpn. 83, pp.0143003, 2014]。スピノール BEC のスピンエコーによる磁力計の開発に成功した[PRA 88, 031602(R)]。異なる電子軌道間での相互作用を共鳴的に増大させる技術を開発した[PRL 110, 173201, 2013]。スピン集団の量子フィードバック制御技術を開発した[PRL 110, 163602, 2013]。SU(6)対称性をもったフェルミ粒子のモット絶縁体をポメラニチュク冷却技術を開発することに実現したことを報告した[Nature Physics 8, 825, 2012]。強相関ボースフェルミ混合モット絶縁体という新しい量子相を実現する技術を開発した[Nature Physics 8, 642, 2011]。YbLi 混合量子気体の系を初めて実現した[PRL 106, 205304, 2011]。光で原子間相互作用を、短時間に、かつ高い空間分解能で制御する技術を開発した[PRL 105, 050405, 2011]。

「開放型イオントラップ系による量子情報処理」代表：占部伸二（阪大）

正三角形に配置した極低温状態の 3 個のイオンからなる量子回転子を実現し、光学的に識別可能なマイクロサイズの二つの配置の間を量子トンネル効果により移り変わることを、およびトンネル効果によって引き起こされる Aharonov-Bohm 効果の観測に成功した[Nature Comm. 5, 3868, 2014]。さらに領域内の共同研究により微小な永久磁石をトラップ基板の裏面に配置した、磁場勾配による量子状態制御が可能なトラップを開発した。このトラップに捕獲されたイオンのゼーマン分離の観測により、量子状態制御が可能な高い磁場勾配が発生していることを確認した。誘導ラマン断熱通過を用いて、幾何学的位相因子のみによるユニバーサルな単一量子ビットゲート操作を初めて実験的に実現した[PRA 87, 052307, 2013]。振動準位を仲介とした多準位誘導ラマン断熱通過の原理を用いて、4 イオンのディック状態の高忠実度生成に成功した[PRL 109, 260502, 2012]。外部から rf 磁場を印加したドレスト状態を用いて、デコヒーレンスフリーな 2 イオンのエンタングル状態を生成し、コヒーレンス時間が一桁以上長くなることを示した[PRL 108, 060503, 2012]。多領域からなるプレーナー型イオントラップ系を開発し、捕獲されたイオンの移動実験に成功した[Appl. Phys. B, 107, 907, 2012]。高速断熱通過法を用いることにより、2 および 3 イオンのディック状態を実験パラメータに対しロバストに生成することに成功した[PRA 83, 022315, 2011]。また、領域内の竹内グループと共同でイオントラップを用いてテーパーファイバーの表面電荷密度の測定に成功した。

「光子量子回路による量子サイバネティクスの実現」代表：竹内繁樹（北大）

- (1) フィードバック制御を利用した量子状態推定の実現：限られた光量を用いて、最も精度良く光の状態を推定する新しい方法である、適応量子状態推定の実証実験に成功した[PRL 109, 130404, 2012]。できるだけ少ない個数の光子の測定で、その状態を正確に推定することは、量子情報技術の他、生体光計測などにおいても非常に重要である。藤原グループと領域内共同研究であり、適応量子状態推定の最適性を厳密に確認した。単一光子量子ビットの推定も実現、従来の量子状態トモグラフィーよりも効率的な状態推定が可能性実証 [物理学会(2014)]。
- (2) 完全量子フィードバックの実現に向けた光子量子回路の実現：光子 1 個レベルで動作する「非線形光スイッチ」を組み合わせ、光子量子情報処理の基本となる、成功信号付き量子ゲート操作により、光子量子コンピュータの基本となる光子量子回路を実現した[PNAS 108, 10067, 2011]。小芦グループ領域内共同研究で世界最高の 2 光子干渉性(96%)をもつ伝令付き単一光子源を実現した[Opt. Exp. 20, 15275, 2012]。
- (3) ナノフォトニクス技術を利用した光子と異種量子ビットの結合に関する研究：固体単一発光体からの光子を、シングルモード光ファイバに高効率で結合させる実験で、テーパー部直径 300nm の「ナノ光ファイバ」を実現[Opt. Exp. 19, 2278, 2011]。その上に単一の量子ドットを配置、量子ドットの全発光量の 7.4% を、直接シングルモード光ファイバに結合する事を見出した[Nano Lett. 11, 4362, 2011]。ダイヤモンド結晶欠陥からの光子の結合にも成功した[Opt. Exp. 20, 10490, 2012]。
- (4) 量子もつれ顕微鏡の実現：もつれあった光子対を用い、世界で初めて、古典理論の限界を超えた感度をもつ「量子もつれ顕微鏡」を実現した[Nature Comm. 4:2426,3426, 2013]。
- (5) その他の領域内共同研究成果： ナノ光ファイバを用い、イオンから出力される光子の高効率捕集を目ざした共同研究を占部グループと共同で実施、ナノ光ファイバ表面の電荷分布情報を荷電粒子トラップを用いて得ることに成功した。また、公募研究の水落グループとの共同研究では、ダイヤモンド中の窒素欠陥とナノ光ファイバの結合を実施、単一の窒素欠陥の光検出磁気共鳴のナノ光ファイバを用いた検出に成功するなどの成果を得た。

「光を基軸とした多キュービット量子制御」代表：小芦雅斗（東大） 分担：山本俊（阪大）

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。このような問題意識のもとで、本研究では、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ースを開発した[Nature Comm. 2, 537, 2011など]。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より、可視域の光子を通信波長帯へ変換する手法であり、ピコ秒程度の応答速度で変換時の忠実度90%以上を達成した。光の非古典的性質、量子もつれ、1次および2次のコヒーレンスなど、様々な指標について、入力光の性質がこの量子インターフェースによる波長変換後の主力光に受け継がれていることを確認した。本研究では、光ファイバーや地上-衛星間通信で想定されるようなゆっくり変化する雑音から量子情報を保護する技術として、非常に高効率な方法を開発した[PRL 106, 110503, 2011など]。従来のn光子を用いた状態保護手法では、全ての光子が届く必要性から効率がTのn乗で低下してしまう欠点があった。本研究では、2光子DFSを用いて位相雑音から保護する場合に、効率をTの2乗からTの1乗に改善する新しい手法を提案し、実証実験を行った。これは、ボース粒子としての光子の性質を利用して、多数の光子が状態保護に寄与できるようにすることにより効率を改善するもので、とくに通信路透過率が小さい場合には従来法の100倍に近い効率の改善が得られた。

#### 【以下公募研究】

##### 「Heterogeneous Quantum Repeater Hardware」バンミーター ロドニー（慶應大学）

異なる量子系を組み合わせることにより、量子リピータネットワークの可能性を検証を目指す。超伝導量子ビットによる論理演算、NVセンターによる送信とシリコン中のBi原子のメモリを考慮する。現実的パラメータを使ったシステムのシミュレーションを目指し、ハードウェアの浄化プロトコルを作成した。著書[Quantum Networking] (ISTE/Wiley, 2014) を出版した。

##### 「トポロジー符号化された量子計算のためのコンパイラ」デビット サイモン（NII）

量子計算機に必要な量子ビット数などのリソースを正確に見積もった[Nature Comm. 4, 2524, 2013]。ポロジカル浄化回路での量子ビットと時間資源の大幅な削減を古典的最適化で達成できることを示した[Scientific Reports, 1939, 2013]。トポロジカル量子回路の幾何学構造を、量子コンピューター中の個々の量子ビットの操作への置き換える方法を示した。[Scientific Reports, 4657, 2013]

##### 「電子スピンのコヒーレント初期化の研究」舂本泰章（筑波大）

(1) 共鳴円偏光ピコ秒パルスによる量子ドット中の電子スピン緩和：1電子ドープInP/InGaP量子ドットで時間分解カー回転に電子の横磁場周りのスピン歳差運動を観測し、それが励起強度の増大によって位相が反転し、スピン緩和時間が長くなることを見いだした。この現象は自然放出光が電子・トリオン4準位系に及ぼす反作用により説明できる。(2) ZnO:Gaの励起子・トリオン共鳴カー回転：時間分解カー回転法により核スピンのゼロになる核の自然存在比が大きな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の横磁場周りのスピン歳差運動を観測し、長いスピン緩和時間 $T_2^* = 12 \text{ns}$ を持つことを見出した。A励起子と束縛励起子（トリオン） $D^0X$ の共鳴エネルギー近傍で電子のカー回転信号が符号を変えながら増強される共鳴を確認した。

##### 「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」小寺哲夫（東工大）

シリコン量子ドット中の電子スピンを量子ビットとして用いる量子情報素子に関連する物理の解明と要素技術の開発を行った。安定的に動作するシリコン量子ドットを作製技術確立。さらにスピンの操作シミュレーションによる評価や高周波電圧操作実験も進めた[Jpn. J. Appl. Phys. 52, 081301, 2013, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 04CJ01, 2013]。領域内の共同研究としては、領域融合インターンシップを利用し、東京工業大学修士学生を計画研究班の東京大学樽茶研究室に派遣した。「グローバルトップゲート電極を付加したシリコン系量子ドット素子の作製と評価」の研究を推進した。素子作製とノイズ評価を行い、適切なトップゲート電圧を印加することによりノイズを低減できることを明らかにした。共著の論文も出版された。[J. Appl. Phys. 115, 203709, 2014]

##### 「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」内海裕洋（三重大）

固体量子メゾスコピック量子系における非平衡統計熱力学の理論研究を行った。量子系における揺らぎの定理の検証に焦点をあて、外部環境の影響の評価や、量子系における熱力学量分布について研究を行った。外部環境効果については：①量子導体を流れる電流確率分布が、理想的な外部環境により受ける影響を、解析的に特徴づけた[PRB 87, 115407, 2013];②現実的な外部環境を考慮し、量子導体を流れる熱流確率分布をもとめた[PRB 89, 205314, 2014]。①と②より、量子導体と外部環境が定常状態にあると揺らぎの定理が成り立つことが明らかとなり、検証実験の手掛かりを与えた。また、量子系の熱力学量分布測定に関し、③外場で駆動された量子2準位系が、熱溜りに放出する熱量の条件付確率分布を計算した。そして熱溜りの温度を実時間測定することで、量子系の揺らぎの定理を実験的に検証できる可能性を議論している。②は領域内共同研究(都倉-内海)の成果である。

##### 「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」中岡俊裕（上智大）

量子伝送の担い手である“光子”をもちいて、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を行うためのサイドゲート型量子ドットLEDを開発した。素子作製と測定のための基盤技術開発、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の、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。高効率光取り出しのために、フリップチップ型の実装を行い、1.55 $\mu\text{m}$ 光の反射率をマッピングすることで、裏面からの高効率光子取り出し手法を確立した。

##### 「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」松岡秀人（ボン大学）

光合成反応で生成するスピン相関ラジカル対が、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、高時間分解 EPR 実験から明らかにした。対象とするラジカル対の周辺に存在する核スピン、電子伝達経路、および温度をコントロールすることで、コヒーレンスの長寿命化が可能であることを実験的に明らかにした。特に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 2 倍に伸びることを明らかにした。光合成の電子移動経路によって量子コヒーレンス時間が異なることを観測し、光合成で生物のコヒーレンス利用が示唆された。本研究ではまた工位グループとの領域内共同研究、光合成や色素増感太陽電池などで重要な金属錯体の光励起状態に着目し、その電子状態を我々の高時間分解多周波 EPR および量子化学計算から明らかにした [J. Phys. Chem. A 116, 9662, 2012]。

#### 「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」水落憲和（阪大）、1 期目

本研究では室温で固体初となる電氣的な単一光子発生成功[Nature Photonics 6, 299, 2012]や単一NV中心の電荷状態を電氣的に初めて制御することに成功した[PRX 4, 01107, 2014]。NV中心の電荷状態は光励起により Stochasticに変化することが知られており、量子情報処理中に電荷変化が起きることが問題視されている。一方で積極的に電荷変化を起こさせることで核スピンのコヒーレンス時間を室温で1秒以上に長時間化する事も報告され、安定化及び高速制御が重要である。電荷状態のシングルショット測定を行え、ほぼ100%の確率でNV<sup>-</sup>からNV<sup>0</sup>に制御したことを定量的に示し、更に0.72  $\mu\text{s}^{-1}$ と高速な制御、及び暗状態では0.45秒以上の安定性を示した。将来の量子ビットの速い電氣的制御、長いT2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。

#### 「量子サイバネティクスにおける量子推定理論の新たな展開」藤原彰夫（阪大）

本研究では、「光子量子回路による量子サイバネティクスの実現」の研究代表者である竹内繁樹氏と共同で、光子の偏光方向の適応的推定実験を系統的に行い、研究代表者の先行研究である適応的最尤推定法の強一貫性および漸近有効性を世界で初めて実験的に検証することに成功した[PRL 109, 130404, 2012]。まず、光子の偏光方向  $\theta$  を推定する適応的推定実験において、光子数  $n=300$  の段階で、推定値の分布が理論的に予測される正規分布に十分収束していることがカイ 2 乗検定により確認できた。引き続き、推定値の期待値と分散の区間推定を行い、分散については、信頼水準90%という厳しい水準の信頼区間に理論値が入っていること、期待値についても、信頼水準90%で真値に十分一致することが確認された。

#### 「縮退イッテルビウム原子集団を用いたクラスター量子計算の実現」上妻幹男（東工大）

研究開始1年目で、新たに獲得した研究資金（NEXTプロジェクト）との重複制限により中途辞退。

#### 「量子ドットと超伝導体の混合量子系における量子コヒーレンス理論」森道康（日本原研）

本計画では、電子スピンと超伝導秩序変数の位相との結合から生まれる量子状態の研究を、高精度電磁気測定への応用をも視野に入れ進めてきた。特に、超伝導体を強磁性体で隔てた強磁性ジョセフソン接合の研究を行った[Appl. Phys. Lett. 100, 152402, 2012]。強磁性ジョセフソン接合に直流電圧を印加すると、交流ジョセフソン電流が流れ、接合内に電磁場が誘起される。等価回路模型を用いて電流電圧特性を計算することで、強磁性ジョセフソン接合内に誘起される電磁場とスピン波との複合励起状態が可能であることを示した[J. Phys. Soc. Jpn. 80, 074707, 2011; Supercond. Sci. Technol. 24, 024008, 2011]。一方、強磁性体中の磁壁をメモリーへ応用する提案がなされている。強磁性ジョセフソン接合が、磁壁運動の高精度測定の新しい原理となりうるということが分かった。

#### 「単一NV中心における多量子ビット化へ向けた研究」水落憲和（阪大）、2 期目

本研究ではダイヤモンド中のNV中心による量子レジスタ内の多量子ビット化を目指し、更に量子レジスタの量子ビット間の結合にも発展する仕組み作りを目指した。量子レジスタ内での多量子ビット化ではNV中心の電子スピンと結合した核スピンによる4量子ビット以上のNV中心を探索し、量子状態制御を行うことができた。成果は論文発表準備中である。他材料との量子ビット間の結合の仕組みつくりに関しては、NV中心のスピンと超伝導量子ビットとの結合に成功した[Nature 478, 221, 2011]。本成果はNTT超伝導量子ビットグループと半導体量子ドットグループとの領域内共同研究成果で、超伝導素子による測定はNTTが行った。阪大グループは試料作製とスピン特性の評価、及び超伝導量子ビットとのスピンの結合に関する議論を行った。超伝導量子ビットは集積化に優位性を有するが、長いメモリ時間を有するNV中心のスピンを結合させた複合系の原理実験の成功は、集積化へ道を拓く点で非常に意義深いと言える。

#### 「異種 g 因子 2 重量子ドットを用いた電子スピン・核スピン制御の研究」大野圭司（理研）

量子ドット内の核スピン自由度をドットの電子スピン量子ビットに対する量子メモリとして利用することを目標に研究を進めた。大きく偏極した核スピンの偏極方向互いに反対向きの2つの方向に制御することに成功した。偏極方向は素子のソース・ドレイン電圧を変えるだけで選択可能で、さらにパルスRFを用いたNMR制御も可能である。偏極のコヒーレンス時間は1ミリ秒と長く、核スピン偏極は長寿命量子メモリとして機能しうることを示すことができた。異種 g 因子 2 重量子ドットで一方のドットにのみ少量含まれるIn原子のNMRシグナルを電氣的に検出することにも成功した。ドットに含まれるIn原子はわずか10,000個であり、この手法が従来のNMRにくらべ非常に高感度であることを示した。

## 9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、現在から順に発表年次をさかのぼり、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

—主な論文：合計 372 件(内 TOP 1%論文 20 件)、全て査読有。全て謝辞有。(2014 年 6 月集計)

計画研究 A01：(全 187 件、内 TOP 1%論文 15 件)

1. \*T. Yamamoto, K. Inomata, K. Koshino, P-M Billangeon, Y. Nakamura, J.S. Tsai, “Superconducting flux qubit capacitively coupled to an LC resonator”, New J. Phys. 16, 015017 (2014)
2. \*C. Emary, N. Lambert, F. Nori, “Leggett-Garg Inequalities”, Reports on Progress in Physics, 77, 016001 (2013)
3. \*L. Zhong, E.P. Menzell, R. Di Candia, P. Eder, M. Ihmig, A. Baust, M. Haeberlein, E. Hoffmann, K. Inomata, T. Yamamoto, Y. Nakamura, E. Solano, F. Deppe, A. Marx, R. Gross, “Squeezing with a flux-driven Josephson parametric amplifier”, New J. Phys. 15, 125013 (2013)
4. \*K. Koshino, K. Inomata, T. Yamamoto, Y. Nakamura, “Implementation of an Impedance-Matched  $\Lambda$  System by Dressed-State Engineering”, Phys. Rev. Lett., 111, 153601 (2013)
5. Z.R. Lin, K. Inomata, W.D. Oliver, K. Koshino, Y. Nakamura, J.S. Tsai, \*T. Yamamoto, “Single-shot readout of a superconducting flux qubit with a flux-driven Josephson parametric amplifier”, Appl. Phys. Lett. 103, 132602 (2013)
6. \*R. Li, J.Q. You, C.P. Sun, F. Nori, “Controlling a Nanowire Spin-Orbit Qubit via Electric-Dipole Spin Resonance”, Phys. Rev. Lett. 111, 086805 (2013)
7. \*P.K. Ghosh, V.R. Misko, F. Marchesoni, F. Nori, “Self-Propelled Janus Particles in a Ratchet: Numerical Simulations”, Phys. Rev. Lett. 110, 268301 (2013)(TOP 1%)
8. \*K.Y. Bliokh, A.Y. Bekshaev, F. Nori, “Dual electromagnetism: helicity, spin, momentum, and angular momentum”, New J. Phys. 15, 033026 (2013)(TOP 1%)
9. \*E.P. Menzel, R. Di Candia, F. Deppe, P. Eder, L. Zhong, M. Ihmig, M. Haeberlein, A. Baust, E. Hoffmann, D. Ballester, K. Inomata, T. Yamamoto, Y. Nakamura, E. Solano, A. Marx, R. Gross, “Path Entanglement of Continuous-Variable Quantum Microwaves”, Phys. Rev. Lett. 109, 250502 (2012)
10. \*N. Lambert, Y.N. Chen, Y.C. Chen, C.M. Li, G.Y. Chen, F. Nori, “Quantum biology”, Nature Physics 9, 10-18 (2013)(TOP 1%)
11. \*J. Stehlik, Y. Dovzhenko, J.R. Petta, J.R. Johansson, F. Nori, H. Lu, A.C. Gossard, “Landau-Zener-Stueckelberg interferometry of a single electron charge qubit”, Phys. Rev. B 86, 121303 (2012)(TOP 1%)
12. \*O. Astafiev, L.B. Ioffe, S. Kafanov, Yu.A. Pashkin, K.Yu. Arutyunov, D. Shahar, O. Cohen, J.S. Tsai, “Coherent quantum phase slip”, Nature, 484, 355, 10930 (2012)(TOP 1%)
13. \*Z.-L. Xiang, S. Ashhab, J.Q. You, F. Nori, “Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems”, Rev. Mod. Phys., 85, 623 (2012)(TOP 1%)
14. \*P.D. Nation, J.R. Johansson, M.P. Blencowe, F. Nori, “Colloquium: Stimulating uncertainty: Amplifying the quantum vacuum with superconducting circuits”, Rev. Mod. Phys. 84 (2012)(TOP 1%)
15. \*C.M. Wilson, G. Johansson, A. Pourkabirian, M. Simoen, J.R. Johansson, T. Duty, F. Nori, P. Delsing, “Observation of the Dynamical Casimir Effect in a superconducting circuit”, Nature 479, 376 (2011)(TOP 1%)
16. X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W. J. Munro, Y. Tokura, M. S. Everitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi, \*K. Semba, “Coherent coupling of a superconducting flux-qubit to an electron spin ensemble in diamond”, Nature, 478, 221 (2011)(TOP 1%)
17. I. Buluta, S. Ashhab, \*F. Nori, “Natural and artificial atoms for quantum computation”, Rep. Prog. Phys. 74, 104401 (2011)(TOP 1%)
18. \*J. Ma, X. Wang, C.P. Sun, F. Nori, “Quantum spin squeezing”, Physical Reports 509, 89 (2011)(TOP 1%)
19. \*A. A. Abdumalikov, Jr., O.V. Astafiev, Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, J.S. Tsai, “Dynamics of Coherent and Incoherent Emission from an Artificial Atom in a 1D Space”, Phys. Rev. Lett. 107, 043604 (2011)
20. J.Q. You, \*F. Nori, “Atomic physics and quantum optics using superconducting circuits”, Nature 474, 589 (2011)(TOP 1%)
21. \*V.F. Maisi, O.-P. Saira, Yu.A. Pashkin, J.S. Tsai, D.V. Averin, J.P. Pekola, “Real-Time Observation of Discrete Andreev Tunneling Events”, Phys. Rev. Lett. 106, 217003 (2011)
22. \*J. Bylander, S. Gustavsson, F. Yan, F. Yoshihara, K. Harrabi, G. Fitch, D.G. Cory, Y. Nakamura, J.S. Tsai, W.D. Oliver, “Noise spectroscopy through dynamical decoupling with a superconducting flux qubit”, Nature Physics, 7, 565 (2011)(TOP 1%)
23. \*A.V. Rozhkov, G. Giavaras, Y.P. Bliokh, V. Freilikher, F. Nori, “Electronic properties of mesoscopic graphene structures: Charge confinement and control of spin and charge transport”, Phys. Reports 503, 77 (2011)(TOP 1%)
24. \*J.P. Pekola, V.F. Maisi, S. Kafanov, N. Chekurov, A. Kemppinen, Yu.A. Pashkin, O.-P. Saira, M. Mottonen, J.S. Tsai, “Environment-Assisted Tunneling as an Origin of the Dynes Density of States”, Phys. Rev. Lett. 105, 026803 (2010)

25. \*A.A. Abdumalikov Jr., O.V. Astafiev, A.M. Zagoskin, Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, J.S. Tsai, “Electromagnetically Induced Transparency on a Single Artificial Atom”, Phys. Rev. Lett. 104, 193601 (2010)
26. \*O.V. Astafiev, A.A. Abdumalikov Jr., A.M. Zagoskin, Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, J.S. Tsai, “Ultimate On-Chip Quantum Amplifier”, Phys. Rev. Lett. 104, 183603 (2010)
27. \*O.V. Astafiev, A.M. Zagoskin, A.A. Abdumalikov Jr., Yu.A. Pashkin, T. Yamamoto, K. Inomata, Y. Nakamura, J.S. Tsai, “Resonance Fluorescence of a Single Artificial Atom”, Science, 327, 840 (2010)(TOP 1%)
- 計画研究 A02 : (全 40 件、内 TOP 1%論文 2 件)
1. \*T. Kubo, Y. Tokura, “Backaction dephasing by a quantum dot detector”, Phys. Rev. B 88, 155402 (2013)
  2. \*T. Hatano, Y. Tokura, T. Kubo, S. Amaha, S. Teraoka, S. Tarucha, “Excitation spectroscopy of few-electron states in artificial diatomic molecules”, Phys. Rev. B 87, 241414 (R) (2013)
  3. \*T. Fujita, H. Kiyama, K. Morimoto, S. Teraoka, G. Allison, A. Ludwig, A.D. Wieck, A. Oiwa, S. Tarucha, “Nondestructive Real-Time Measurement of Charge and Spin Dynamics of Photoelectrons in a Double Quantum Dot”, Phys. Rev. Lett., 110, 266803 (2013)
  4. \*S. Takahashi, R.S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Tarucha, “Electrically tunable three-dimensional g-factor anisotropy in single InAs self-assembled quantum dots”, Phys. Rev. B 87, 161302(R) (2013)
  5. \*S. Amaha, W. Izumida, T. Hatano, S. Teraoka, S. Tarucha, J.A. Gupta, D.G. Austing, “Two- and Three-Electron Pauli Spin Blockade in Series-Coupled Triple Quantum Dots”, Phys. Rev. Lett. 110, 016803 (2013)
  6. \*T. Obata, M. Pioro-Ladriere, Y. Tokura, S. Tarucha, “The photon-assisted dynamic nuclear polarization effect in a double quantum dot”, New J. Phys. 14, 123013 (2012)
  7. \*R. Sakano, Y. Nishikawa, A. Oguri, A.C. Hewson, S. Tarucha, “Full Counting Statistics for Orbital-Degenerate Impurity Anderson Model with Hund's Rule Exchange Coupling”, Phys. Rev. Lett. 108, 266401 (2012)
  8. \*M. Yamamoto, S. Takada, C. Bauerle, K. Watanabe, A.D. Wieck, S. Tarucha, “Electrical control of a solid-state flying qubit”, Nature Nanotechnology 7, 247 (2012)
  9. \*S. Amaha, T. Hatano, H. Tamura, S. Teraoka, T. Kubo, Y. Tokura, D.G. Austing, S. Tarucha, “Resonance-hybrid states in a triple quantum dot”, Phys. Rev. B 85, 081301(R) (2012)
  10. \*M. Yamamoto, H. Takagi, M. Stopa, S. Tarucha, “Hydrodynamic rectified drag current in a quantum wire induced by Wigner crystallization”, Phys. Rev. B 85, 041308 (R) (2012)
  11. \*R. Brunner, Y.-S. Shin, T. Obata, M. Pioro-Ladriere, Y. Tokura, T. Kubo, K. Yoshida, T. Taniyama, S. Tarucha, “Realizing of a spin two-qubit gate with semiconductor quantum dots using an inhomogeneous Zeeman field”, Phys. Rev. Lett. 107, 146801 (2011)(TOP 1%)
  12. S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A.D. Wieck, L. Saminadayar, \*C. Bauerle, T. Meunier, “Electron surfing on a sound wave as a platform for quantum optics with flying electrons”, Nature 477, 435 (2011)(TOP 1%)
  13. Y. Kanai, \*R.S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha, “Electrically tuned spin-orbit interaction in an InAs self-assembled quantum dot”, Nature Nanotechnology, Vol.6, 511 (2011)
  14. \*R.S. Deacon, Y. Kanai, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, S. Tarucha, “Electrically tuned g tensor in an InAs self-assembled quantum dot”, Phys. Rev. B 84, 041302(R) (2011)
  15. \*T. Kubo, Y. Ichigo, Y. Tokura, “Phase and amplitude of Aharonov-Bohm oscillations in nonlinear three-terminal transport through a double quantum dot”, Phys. Rev. B 83, 235310 (2011)
  16. \*T. Hatano, T. Kubo, Y. Tokura, S. Amaha, S. Teraoka, S. Tarucha, “Aharonov-Bohm Oscillations Changed by Indirect Interdot Tunneling via Electrons in Parallel-Coupled Vertical Double Quantum Dots”, Phys. Rev. Lett. 106, 076801 (2011)
  17. \*S. Takahashi, R.S. Deacon, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, S. Tarucha, “Large Anisotropy of the Spin-Orbit Interaction in a Single InAs Self-Assembled Quantum Dot”, Phys. Rev. Lett. 104, 246801 (2010)
  18. \*Y.-S. Shin, T. Obata, Y. Tokura, M. Pioro-Ladriere, R. Brunner, T. Kubo, K. Yoshida, S. Tarucha, “Single-Spin Readout in a Double Quantum Dot Including a Micromagnet”, Phys. Rev. Lett. 104, 046802 (2010)
- 計画研究 B01 : (全 51 件、内 TOP 1%論文 2 件)
1. K. Tateishi, \*M. Negoro, S. Nishida, A. Kagawa, Y. Morita, M. Kitagawa, “Room-temperature hyperpolarization of nuclear spins in bulk”, Proc. Natl. Acad. Sci., 111, 7527 (2014)
  2. K. Sugisaki, \*K. Toyota, K. Sato, D. Shiomi, M. Kitagawa, T. Takui, “An ab initio MO study of heavy atom effects on the zero-field splitting tensors of high-spin nitrenes: How the spin-orbit contributions affected”, Phys. Chem. Chem. Phys., 16, 9171 (2014)
  3. K. Tateishi, \*M. Negoro, A. Kagawa, M. Kitagawa, “Dynamic Nuclear Polarization with Photoexcited Triplet Electrons in a Glass Matrix”, Angew. Chem. 2013, 125, 13549 (2013)
  4. \*Y. S. Yap, H. Yamamoto, Y. Tabuchi, M. Negoro, A. Kagawa, M. Kitagawa, “Strongly driven electron spins using a Ku band stripline electron paramagnetic resonance resonator”, J. Magn. Reson., 232, 62 (2013)
  5. \*M. Negoro, K. Tateishi, A. Kagawa, M. Kitagawa, “Scalable Spin Amplification with a Gain over a

Hundred”, Phys. Rev. Lett., 107, 050503 (2011)

6. \*Y. Morita, S. Nishida, T. Murata, M. Moriguchi, A. Ueda, M. Satoh, K. Arifuku, K. Sato, T. Takui, “Organic tailored batteries materials using stable open-shell molecules with degenerate frontier orbitals”, Nature Materials, 10, 947 (2011)(TOP 1%)
7. \*Y. Morita, S. Suzuki, K. Sato, T. Takui, “Synthetic Organic Spin Chemistry for Structurally Well-Defined Open-Shell Graphene Fragments”, Nature Chemistry, 3, 197 (2011)(TOP 1%)
8. \*Y. Tabuchi, M. Negoro, K. Takeda, M. Kitagawa, “Total compensation of pulse transients inside a resonator”, J. Magn. Reson., 204, 327 (2010)

計画研究 C01 : (全 20 件、内 TOP 1%論文 1 件)

1. \*S. Kato, S. Sugawa, K. Shibata, R. Yamamoto, Y. Takahashi, “Control of Resonant Interaction between Electronic Ground and Excited States”, Phys. Rev. Lett. 110, 17, 173201 (2013)
2. \*R. Inoue, S. Tanaka, R. Namiki, T. Sagawa, Y. Takahashi, “Unconditional Quantum-Noise Suppression via Measurement-Based Quantum Feedback”, Phys. Rev. Lett. 110, 16, 163602 (2013)
3. \*S. Taie, S. Sugawa, R. Yamazaki, Y. Takahashi, “An SU(6) Mott insulator of an atomic Fermi gas realized by large-spin Pomeranchuk cooling”, Nature Physics 8, 825 (2012)
4. \*S. Sugawa, K. Inaba, S. Taie, R. Yamazaki, M. Yamashita, Y. Takahashi, “Interaction and fling-induced quantum phases of dual Mott insulators of bosons and fermions”, Nature Physics 7, 642 (2011)
5. \*H. Hara, Y. Takasu, Y. Yamaoka, J.M. Doyle, Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Mixtures of Alkali and Alkaline-Earth-Like Atoms”, Phys. Rev. Lett. 106, 205304 (2011)
6. \*S. Taie, Y. Takasu, S. Sugawa, R. Yamazaki, T. Tsujimoto, R. Murakami, Y. Takahashi, “Realization of a SU(2)\*SU(6) System of Fermions in a Cold Atomic Gas”, Phys. Rev. Lett. 105, 190401 (2010)(TOP 1%)
7. \*R. Yamazaki, S. Taie, S. Sugawa, Y. Takahashi, “Submicron Spatial Modulation of an Interatomic Interaction in a Bose-Einstein Condensate”, Phys. Rev. Lett. 105, 050405 (2010)

計画研究 C02 : (全 13 件)

1. \*A. Noguchi, Y. Shikano, K. Toyoda, S. Urabe, “Aharonov-Bohm effect in the tunneling of a quantum rotor in a linear trap”, Nature Comm., 5, 3868 (2014)
2. \*K. Toyoda, Y. Matsuno, A. Noguchi, S. Haze, S. Urabe, “Experimental realization of a quantum phase transition of polaritonic excitations”, Phys. Rev. Lett. 111, 160501 (2013)
3. \*K. Toyoda, K. Uchida, A. Noguchi, S. Haze, S. Urabe, “Realization of holonomic single-qubit operation”, Phys. Rev. A, 87, 052307 (2013)
4. \*A. Noguchi, K. Toyoda, S. Urabe, “Generation of Dicke States with Phonon-Mediated Multi-level Stimulated Raman Adiabatic Passage”, Phys. Rev. Lett. 109, 260502 (2012)
5. \*S. Haze, Y. Tateishi, A. Noguchi, K. Toyoda, S. Urabe, “Observation of phonon hopping in radial vibrational modes of trapped ions”, Phys. Rev. A 85, 031401(R) (2012)
6. \*A. Noguchi, S. Haze, K. Toyoda, S. Urabe, “Generation of a Decoherence-Free Entangled State Using a Radio-Frequency Dressed State”, Phys. Rev. Lett. 108, 060503 (2012)
7. \*T. Watanabe, S. Nomura, K. Toyoda, S. Urabe, “Sideband Excitation of Trapped Ions by Rapid Adiabatic Passage for Manipulation of Motional State”, Phys. Rev. A 84, 033412 (2011)
8. U. Tanaka, K. Masuda, Y. Akimoto, K. Koda, Y. Ibaraki, S. Urabe, “Micromotion compensation in a surface electrode trap by parametric excitation of trapped ions”, Appl. Phys. B, 107, 907(2012)

計画研究 D01 : (全 22 件)

1. S. Hara, T. Ono, R. Okamoto, \*T. Washio, S. Takeuchi, “Anomaly detection in reconstructed quantum states using a machine-learning technique”, Phys. Rev. A 89, 022104 (2014)
2. T. Ono, R. Okamoto, \*S. Takeuchi, “An Entanglement-enhanced Microscope”, Nature Communications, 4, 3426 (2013)
3. M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Ishida, N. Nishizawa, \*S. Takeuchi, “Dispersion cancellation in high-resolution two-photon interference”, Phys. Rev. A 88, 043845 (2013)
4. R. Okamoto, M. Iefuji, S. Oyama, K. Yamagata, H. Imai, \*A. Fujiwara, S. Takeuchi, “Experimental demonstration of adaptive quantum state estimation”, Phys. Rev. Lett. 109, 130404 (2012)
5. M. Tanida, R. Okamoto, \*S. Takeuchi, “Highly indistinguishable heralded single-photon sources using parametric down conversion”, Opt. Exp., 20, 14, 15275 (2012)
6. M. Fujiwara, K. Tobaru, T. Noda, H.Q. Zhao, \*S. Takeuchi, “Highly Efficient Coupling of Photons from Nanoemitters into Single-Mode Optical Fibers”, Nano Letters, 11, 4362 (2011)
7. R. Okamoto, J.L. O'Brien, H.F. Hofmann, \*S. Takeuchi, “Realization of a photonic quantum circuit combining effective optical nonlinearities into a Knill-Laflamme-Milburn C-NOT gate”, Proceedings of the National Academy of Science, 108, 10067 (2011)

計画研究 D02 : (全 17 件)

1. T. Sasaki, Y. Yamamoto, \*M. Koashi, “Practical quantum key distribution protocol without monitoring signal disturbance”, Nature Vol. 509, 475-478 (2014)
2. \*R. Ikuta, T. Kobayashi, S. Yasui, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, N. Imoto, “Frequency down-conversion of 637 nm light to the telecommunication band for

- non-classical light emitted from NV centers in diamond”, Optics Express Vol. 22, 11205-11214 (2014)
3. \*T. Kobayashi, R. Ikuta, S. K. Ozdemir, M. Tame, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, “Universal gates for transforming multipartite entangled Dicke states”, New Journal of Physics Vol. 16, 023005:1-9 (2014)
  4. \*R. Ikuta, T. Kobayashi, H. Kato, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, N. Imoto, “Observation of two output light pulses from a partial wavelength converter preserving phase of an input light at a single-photon level”, Optics Express Vol. 21, 27865-27872 (2013)
  5. \*H. Kumagai, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, “Robustness of quantum communication based on a decoherence-free subspace using a counter-propagating weak coherent light pulse”, Phys Rev. A 87, 052325 (2013)
  6. \*R. Ikuta, H. Kato, Y. Kusaka, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, N. Imoto, “High-fidelity conversion of photonic quantum information to telecommunication wavelength with superconducting single-photon detectors”, Phys. Rev. A 87, 010301(R) (2013)
  7. R. Ikuta, Y. Kusaka, T. Kitano, H. Kato, T. Yamamoto, M. Koashi, \*N. Imoto, “Wide-band quantum interface for visible-to-telecommunication wavelength conversion” Nature Communications 2, 537 (2011)
  8. \*S.K. Ozdemir, E. Matsunaga, T. Tashima, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, “An optical fusion gate for W-states”, New J. Phys., 13, 103003 (2011)
  9. \*R. Ikuta, Y. Ono, T. Tashima, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, “Efficient decoherence-free entanglement distribution over lossy quantum channels”, Phys. Rev. Lett., 106, 110503 (2011)
  10. \*T. Tashima, T. Kitano, S.K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, “Demonstration of Local Expansion Toward Large-Scale Entangled Webs”, Phys. Rev. Lett., 105, 210503 (2010)
  11. \*K. Azuma, N. Sota, R. Namiki, S.K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, “Optimal entanglement generation for efficient hybrid quantum repeaters”, Phys. Rev. A 80, 060303 (R) (2009)
  12. \*Y. Adachi, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, “Boosting up quantum key distribution by learning statistics of practical single-photon sources”, New J. Phys. 11, 113033 (2009)

公募研究：(全 22 件)

1. J. Kamioka, \*T. Koder, K. Takeda, T. Obata, S. Tarucha, S. Oda, “Charge noise analysis of metal oxide semiconductor dual-gate Si/SiGe quantum point contacts”, J. Appl. Phys. 115, 203709 (2014)
2. Y. Doi, T. Makino, H. Kato, D. Takeuchi, M. Ogura, H. Okushi, S. Miwa, S. Yamasaki, J. Wrachtrup, Y. Suzuki, \*N. Mizuochi, “Deterministic electrical charge state initialization of single nitrogen-vacancy center in diamond”, Phys. Rev. X 4, 011057 (2014)
3. \*R. Van Meter, J. Touch, “Designing quantum repeater networks”, Communications Magazine, IEEE, 51, 8, 64 (2013)
4. M.A. Sulthoni, \*T. Koder, Y. Kawano, S. Oda, “Optimization and Tunnel Junction Parameters Extraction of Electro-statically Defined Silicon Double Quantum Dots Structure”, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 081301 (2013)
5. T. Kambara, \*T. Koder, Y. Arakawa, S. Oda, “Dual Function of Single Electron Transistor Coupled with Double Quantum Dot: Gating and Charge Sensing”, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 04CJ01 (2013)
6. \*Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Ueda, A. Aharony, “Full-counting statistics for molecular junctions: Fluctuation theorem and singularities”, Phys. Rev. B 87 115407 (2013)
7. T. Taniguchi, Y. Utsumi, M. Marthaler, D.S. Golubev, \*H. Imamura, “Spin torque switching of an in-plane magnetized system in a thermally activated region”, Phys. Rev. B 87 054406 (2013)
8. \*N. Mizuochi, T. Makino, H. Kato, D. Takeuchi, M. Ogura, H. Okushi, M. Nothhaft, P. Neumann, A. Gali, F. Jelezko, J. Wrachtrup, S. Yamasaki, “Electrically driven single photon source at room temperature in diamond”, Nature Photonics, 6, 299-303 (2012)
9. \*M. Matsuo, S. Okamoto, W. Koshibae, M. Mori, S. Maekawa, “Non-monotonic temperature dependence of thermopower in strongly correlated electron systems”, Phys. Rev. B 84, 153107 (2011)
10. \*G. Khaliullin, M. Mori, T. Tohyama, S. Maekawa, “Enhanced Pairing Correlations near Oxygen Dopants in Cuprate Superconductors”, Phys. Rev. Lett. 105, 257005 (2010)

—書籍：(計 11 件)

- ① Van Meter Rodney, Quantum Networking, Wiley, ISBN: 9781848215375, 2014. 4, 368p.
- ② 竹内繁樹、エヌ・ティー・エス、「第 2 編応用編 第 1 節 量子情報通信・処理の実現に向けた高効率固体量子位相ゲート」、2010, 440p
- ③ 竹内繁樹、強光子場科学研究懇談会 発行、「I-1-6 光量子回路の現状と展望」、2010, 272, p.14

—ホームページ情報：

量子サイバネティクス：<http://www.riken.jp/Qcybernetics/>  
 A01：[http://www.riken.jp/research/labs/cems/qtm\\_inf\\_electron/macro\\_qtm\\_coh/](http://www.riken.jp/research/labs/cems/qtm_inf_electron/macro_qtm_coh/)  
 A01：[http://www.riken.jp/research/labs/cems/qtm\\_inf\\_electron/qtm\\_condens\\_matter/](http://www.riken.jp/research/labs/cems/qtm_inf_electron/qtm_condens_matter/)  
 A02：<http://www.u.tsukuba.ac.jp/~tokura.yasuhiro.ft/>  
 B01：<http://www.qc.ee.es.osaka-u.ac.jp/~qc/>  
 B01：<http://www.qcqis.sci.osaka-cu.ac.jp/ms/jp/>



C01 : <http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/>  
C02 : <http://www.qe.ee.es.osaka-u.ac.jp/index-j.html>  
D01 : <http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qip/index.html>  
D02 : <http://www.qi.mp.es.osaka-u.ac.jp/index-j.html>

—主催シンポジウム：

- ① 2014/3/23-25, 量子情報の新展開, 京都大学基礎物理学研究所湯川記念館パナソニック国際交流ホール, 藤井啓祐、北川雅浩
- ② 2013/11/17-20, The Seventh Japanese-Russian Workshop on Open Shell Compounds and Molecular Spin devices, 淡路夢舞台国際会議場, 工位武治
- ③ 2013/6/16-18, The 1st Awaji International Workshop on Electron Spin Science & Technology: Biological and Materials Science Oriented Applications (1st AWEST 2013), 淡路夢舞台国際会議場, 工位武治
- ④ 2011/11/13-16, The Fifth Japanese-Russian Workshop on Open Shell Compounds and Molecular Spin devices, 淡路夢舞台国際会議場, 工位武治
- ⑤ 2011/11/21-22, 量子情報技術研究会 (QIT25), 大阪大学豊中キャンパス基礎工学研究科国際棟, 北川雅浩
- ⑥ 2009/11/15-18, The Third Japanese-Russian Workshop on Open Shell Compounds and Molecular Spin devices, 淡路夢舞台国際会議場, 工位武治

—プレスリリース情報：

- ① 2014/5/12, 「世界初、室温でNMR信号を1万倍以上に増大」日本経済新聞他2件、北川雅浩
- ② 2013/9/9, 「古典理論の限界を超えた感度をもつ光学顕微鏡を実現/光量子コンピュータの原理を応用」, 日経エレクトロニクス他4件, 竹内繁樹
- ③ 2012/4/19, 「超電導の新現象発見」日本経済新聞他2件, 蔡 兆申
- ④ 2011/11/16, 「量子メモリー読み書きのための光波長変換ラインナップ完成—実用量子計算や中継通信に道—」日刊工業新聞他8件, 小芦雅斗
- ⑤ 2011/6/7, 「光子1個で動作するスイッチの集積化に成功」, 日刊工業新聞他3件, 竹内繁樹
- ⑥ 2010/5/11, 「超電導人工原子組み込み光スイッチ、理研が開発」日刊工業新聞他3件, 蔡 兆申

—産業財産権取得状況：(計1件)

名称：テーパー光ファイバ、発明者：竹内繁樹、権利者：北海道大学、種類：特許、番号：第5354605  
取得年月日：2013年9月6日、国内外の別：国内

—アウトリーチ活動情報：

1. 2014/1/16, 出張授業, 藤井啓祐・根来誠, 青森県立三本木高等学校
2. 2013/12/13, 出張授業, 工位武治, 名古屋市立向陽高等学校
3. 2013/10/29, 出張授業, 竹内繁樹, 立命館慶祥高等学校(北海道札幌市)
4. 2013/9/19, 国立情報学研究所平成25年度市民講座, 蔡 兆申, 国立情報学研究所
5. 2013/7/12, 出張授業, 仙場浩二, 大分県立上野丘高等学校
6. 2012/12/18, 吉原文樹, 青森県立三本木高等学校附属中学校
7. 2012/12/7, 出張授業, 工位武治, 大阪府立大手前高等学校
8. 2012/11/19, 国際科学技術財団やさしい科学技術セミナー, 小寺哲夫, 東京工業大学
9. 2012/11/16, 出張授業, 竹内繁樹, 京都府南丹市立園部小学校
10. 2012/10/27, 科学ライブショー「ユニバース」ノーベル賞特別番組, 蔡 兆申, 科学技術館
11. 2012/8/22, 公開授業, 竹内繁樹, 大阪大学産業科学研究所
12. 2012/7/20, スーパーサイエンスハイスクール連携講座II, 向井哲哉, 長野県屋代高等学校
13. 2012/7/20, スーパーサイエンスハイスクール連携講座, 向井哲哉, 長野県屋代高等学校附属中学校
14. 2012/7/18, 出張授業, 大阪府立三国丘高等学校, 竹内繁樹
15. 2012/4/21, サイエンスレクチャー：理研一般公開講演, 蔡 兆申, 理化学研究所
16. 2012/3/8, 出張授業, 吉原文樹, 品川区立小中一貫校伊藤学園
17. 2011/12/7, 出張授業, 平野琢也・根来誠, 名古屋市立向陽高校
18. 2011/10/25, S S H先端科学講座, 蔡 兆申, 群馬県立高崎高校,
19. 2011/10/11, サイエンスアカデミー1, 向井哲也, 青森県立三本木高等学校附属中学校
20. 2011/10/20, 吉原文樹, 青森県立三本木高等学校
21. 2011/10/1, 出張授業, 竹内繁樹, 大阪府立三国丘高等学校
22. 2011/4/23, 市民講座：理研一般公開講演, 蔡 兆申, 理化学研究所
23. 2011/2/24, 連携授業, 竹内繁樹, 京都府南丹市立園部小学校
24. 2010/12/3, 出張授業, 工位武治, 長野県屋代高等学校
25. 2010/06/05, サイエンストーク(電子科学研究所一般公開), 竹内繁樹, 北海道大学 電子科学研究所

## 10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

全般的には372編の総論文数と、20編のトップ1%引用論文が示唆する平均を遥かに上回る引用件数から、本領域の成果がこの分野や関連分野に大きく影響を与えたことが推測できる。以下に、研究課題ごとに説明する：

超伝導分野では、一つの超伝導人工原子の高忠実度の制御や観測を達成した。これを受け、複数の人工原子を結合させて人工高分子や人工メタ物質の実験が世界中で進むであろう。人工原子量子光学の成果は、はこれに応用した量子ビットの結合法の研究を進展させ、量子情報処理回路の発展に寄与するであろう。観測実験用に開発してきたジョセフソンパラメトリック増幅器は、量子雑音限界を下回る極低雑音特性を待つ増幅器として、すでに幅広い応用が始まっていて、今後は物理実験以外の分野での応用も十分考えられる。このたび作成に初めて成功したコヒーレント量子位相滑り（CQPS）デバイスは、ジョセフソン効果と量子力学的に双対な素子である。したがって、ジョセフソン回路が作り出した幅広い応用分野と同様な活躍が期待できる。特にジョセフソン量子電圧標準に対応するCQHP量子電流標準は、実現すると幅広く科学技術・産業に影響を与えるであろう。

半導体分野では、固体中で運動する電子の持つ量子情報を転送し、さらにはその重ね合わせ状態を操作する事に成功した。これは量子光学で光子が「飛行量子ビット」としての役割を果たしたのと同様に、固体中の運動する電子を利用できる事が明らかとなった。これを用いて、遠隔地点間の量子コヒーレンスを確立し、非局所もつれ状態の生成などの興味深い展開が期待される。半導体の持つ制御可能な $g$ -因子テンソルやスピン・軌道相互作用の強さ、さらには微小磁石を適切に配置する事により、電子の感じる磁氣的ポテンシャルを、電場等により自由に、高速に制御する事が可能である事が明らかとなった。電子の静電ポテンシャルを制御した高度な電荷操作が半導体デバイスの基礎となった様に、磁氣的ポテンシャルエネルギーさらにはベクトルポテンシャルを制御した高度なスピン操作あるいは電荷とスピンの同時操作を利用した様々な可能性が開けたと言える。

分子分野では、光励起電子スピンを用いた動的核偏極により核スピン偏極を34%得たことで、室温での不安定原子核散乱実験への応用の可能性を示した。また同手法がガラスまたは薄膜物質中でも可能であることを示し、NMR分光への応用の道を拓いた。高利得でスケラブルなスピン増幅を実現し、核スピン検出の高感度化を行った。分子スピンアンサンブル系の量子サイバネティクス of the 課題で開拓した方法論や実験技術は、電子スピンの介在し、生体系もカバーする電子スピンサイエンス及び電子スピン磁気共鳴光学分野の研究手段としては最先端のマイクロ波スピン操作技術であり、これまで難しいとされてきたスピン物性、複雑な分子構造の同定に新しい視点を提供できる点で、波及効果は大きい。

原子分野では：1. スピン集団の量子フィードバック制御の実現について：原子スピンの集団に対して、量子非破壊測定を行い、かつその測定結果を原子スピン集団に高速フィードバック制御することにより、量子測定に伴う波束の収縮のランダムさを低減する技術を世界で初めて開発した。これは量子制御に必要な技術開発であるだけでなく、量子計測・非平衡量子統計力学などの分野に波及効果が期待できる。2. 高いスピン対称性SU(6)を有したフェルミ原子気体およびボース・フェルミ混合系の実現について量子シミュレーションは、固体系等で観測されているが、その発現機構等が未解明な現象について、別の量子系（この場合は光格子中の冷却原子）を用いて、様々なパラメーターを系統的に制御しつつ再現し、発現機構を解明する、ということが本来の目的であるが、本研究で実現した、SU(6)対称性を持つ系に関する現象は、これまで、理論的な考察があるだけで、固体系での実現例は皆無であった。本研究は、このように、ユニークな原子系でしかできない現象の研究に道を開いたという意味で、量子シミュレーションの領域を超えた、大きなインパクトおよび波及効果があると考えている。

イオン分野では：断熱過程を用いた量子状態制御に関する成果は、独自の新たな手法を用いて実現したものであり、更にこの手法を用いた量子シミュレーションの実験において、Jaynes-Cummings-Hubbardモデル（共振器電磁力学における結合共振器モデル）における量子相転移を冷却イオンを用いて初めて実証した。これらの成果により今後の一つの発展の方向性を示した。また、量子回転子の実現は、直線上に並ばないイオン配列も振動基底状態まで冷却可能であることを初めて実証したものであり、イオンを用いた量子情報処理の新たな可能性を示したものである。また、量子回転子を用いたAB効果の観測は、トンネル効果中に電荷を持った粒子が電磁ポテンシャルと結合していることを実証した初めての実験例で基礎物理の分野にも大きく貢献するものと期待される。

光(1)分野では、光子を用いた量子サイバネティクスの実現に向け研究を行った。領域内外との積極的な共同研究を推進した結果、フィードバック制御を利用した「適応量子状態推定」の実現、光量子情報の鍵となる光量子回路の実現、ナノ光ファイバによる、量子ドットやダイヤモンド結晶欠陥などの異種量子と光子の高効率インターフェースの実現、量子もつれ光を用い標準量子限界を超えた感度の顕微鏡の実現などの成果を得た。また、新しい新学術領域の創出を目指し、領域内外との共同研究も積極的に実施、数学（公募研究の藤原グループ）と実験物理学（竹内）、コンピュータサイエンス（領域外の鷲尾グループ）と実験物理学という全く異なる分野間という、これまで類例のない学際研究の実現の他、半導体工学（公募研究班水落グループ）と量子光学、原子物理学（占部グループ）とナノフォトニクス（竹内）などの学際研究も実現した。また、今回創出した、光子の状態

をもっとも精度良く推定する「適応量子状態推定」[PRL2012]や、量子もつれ顕微鏡[Nature Comm. 2013]などの全く新しい量子計測方法は、生命科学や材料科学など、より幅広い学問分野へ大きなインパクトと波及効果が期待できる。実際、量子もつれ顕微鏡は、日経エレクトロニクスで2頁にわたり大きくニュースとして取り上げられるだけでなく、国外でも様々なネットニュースや、IOPのトップページヘッドラインでも取り上げられるなどのインパクトを得た。

光(2)分野：単一光子領域の波長変換に関しては、我々の量子インターフェースの研究に刺激されて多くの研究が世界的に進められてきている。例えば、半導体量子ドット[NIST, Stuttgart大, Stanford大]、Rb原子から光子対発生[ICREAスペイン]、超電導回路QEDにおけるマイクロ波光子[NIST]などの実験のみならず、理論的にもさらに理解を深める研究が進んでいる。また、異なる共鳴周波数をもつ物理系をつなぐ量子ネットワークや光子の波形整形などの計測応用[NIST-Oregon大, Waterloo大]も含めた様々な角度から検討されており、今後の進展が期待される。