

領域略称名：量子サイバー
領域番号：2101

平成23年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る研究経過等の報告書

「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23年6月

領域代表者 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・蔡兆申

目次

3. 研究領域の目的及び概要	1
4. 研究の進展状況	2
5. 研究を推進する上での問題点と今後の対応策	4
6. 主な研究成果	
計画研究A01「超伝導量子サイバネティクス」	5
計画研究A02「半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送」	7
計画研究B01「分子スピン量子制御」	9
計画研究C01「冷却原子を用いた量子制御」	11
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」	13
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」	15
計画研究D02「光を基軸とした多キュビット量子制御」	17
公募研究 01「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」	18
公募研究 02「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」	19
公募研究 03「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」	20
公募研究 04「単一NV中心における他量子ビット化へ向けた研究」	21
公募研究 05「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」	22
7. 研究成果の公表の状況	
(1) 主な論文等一覧について	23
(2) ホームページについて	29
(3) 公開発表について	30
(4) 「国民との科学・技術対話」について	35
8. 研究組織と各研究項目の連携状況	36
9. 研究費の使用状況	39
10. 今後の研究領域の推進方針	40
11. 総括班評価者による評価の状況	41

3. 研究領域の目的及び概要

研究領域名：「量子サイバネティクス」

研究期間：2009年7月～2014年3月

研究代表者所属：理科学研究所 基幹研究所 チームリーダー

補助金交付額：（単位千円）

2009年：196,700円

2010年：225,500円

2011年：219,300円

2012年：213,400円

2013年：177,900円

目的と概要：

量子サイバネティクスの研究では、「量子力学」と「情報科学」という20世紀社会の枠組みを作り変えた2つの大きな科学的成果を融合させ、21世紀のための新規な基礎科学技術の基盤づくりを狙う。1940年代に提案された当時、サイバネティクスは高度な制御を通して、広範囲な複雑システム（自動機械や生命現象さえ含め）を理解しようとする学問であった。量子サイバネティクスでは、この用語本来の「状態制御」に特に集中して研究を進め、高度で複雑な量子状態制御に関する研究を行う。

量子サイバネティクスは、多様な物理系において、量子状態のコヒーレントな制御／保持／転送、そして検出の研究を統一的視野に立ち横断的な連携研究を行う。固体素子の超伝導や半導体デバイスや、微視的系の分子、原子／イオン、光などをでのコヒーレント操作の研究を進める。

固体素子は素子の制御性、設計の自由度、集積性等に優れているが、一方量子コヒーレンスは壊れやすい。原子や分子のような微視的量子ビットは、量子コヒーレンスを長く保つことができ、均一性的であるが、外部からのアクセスが比較的困難で、集積に難点がある。光はコヒーレンスを失わず遠方へ情報を運ぶが、光子同士の相互作用がなく、非線形素子が実現できない。どの量子系利点と弱点を持ち備えている。ある目的をもった量子システムを考えた場合、複数の異なった量子系を組み合わせ、複合量子システムを考える必要がある。

本領域では、微視的と巨視的量子系などが融合した混合量子系の研究を多分野の研究者の連携により進める。量子サイバネティクスは、情報処理に利用でき、古典計算機の原理的限界にはとらわれない画期的な性能を有する次世代の科学技術として期待されている。本研究領域では、量子計算を大きな目標の一つとし、同時に量子限界を超える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、幅広い応用分野も視野に入れ研究する。

研究期間内の具体的な目標は：

- (1) 新規な量子系の量子制御・検出を実現、多ビット化を目指す。
- (2) 多様な物理系において包括的な量子コヒーレント状態の制御・検出の理学の創造。
- (3) 量子コンピューティングなどの応用を視野に入れた、異種量子系の関与した混合量子系の研究。

上記目標は既に部分的に達成されていて、領域全般の進展は順調に進んでいる。

4. 研究の進展状況

計画研究 A01「超伝導量子サイバネティクス」：超伝導人工原子（量子ビット）と光子の介在した新規な混合量子系を実現した。この系を使った「量子光学」実験を行い、共鳴蛍光、電磁誘導透明化、レーザー発振などを実現した。また人工原子と機械振動子の結合した混合量子系や量子ビットの結合方式について研究を進め、スケーラブルな量子ビットを提案した。

計画研究 A02「半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送」：微小磁石法により初めて非破壊的スピン読み出しと2スピン量子ビット化に成功し、更なる多ビット化に向けて3重量子ドットを開発した。InAs量子ドットでのスピン軌道相互作用の同定と結合細線系における飛行電荷量子ビットの制御と、離れた量子ドット間の単一電子移送を実現した。二重量子ドットの量子キャパシタンス測定技術の開発、1電子状態を用いた電荷量子ビットの実証を行った。

計画研究 B01「分子スピン量子制御」：分子スピン量子サイバネティクス：分子の電子スピン・核スピンを初期化し、量子制御し、量子情報・量子光学実験を行い、測定するために、共振器内パルス磁場の補償、共振器と電子スピアンサンブルの強結合、スピンの高偏極化、スピン増幅、強い電磁波照射に耐える分子スピン量子ビット系および電子スピン・核スピン混在系の設計・合成の研究を行った。

計画研究 C01「冷却原子を用いた量子制御」：冷却原子を用いた量子制御：光格子中の冷却原子を用いて、超流動—モット絶縁体転移の高分解能線形・非線形分光、高いスピン対称性をもつフェルミ粒子系実現、ポメラチュク原子冷却の実証、異種電子構造を持つ原子混合量子系実現、スピン集団の量子フィードバック制御を実現した。また、超伝導マイクロディスクによる磁束量子の計測法の考案、量子化領域に迫る原子閉じ込めをマイクロ磁場トラップで実現。

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」：断熱的手法による量子状態制御の研究において、高速断熱通過法を用いた2個のイオンの量子もつれ状態の発生、および誘導ラマン断熱通過法を用いた幾何学的位相の制御による単一キュービットの回転を実験的に実現した。また、開放型の平面トラップを試作し、捕獲した単一イオンを用いて振動基底状態発生に不可欠な余剰マイクロ運動の新たな補正法を開発した。

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」：a. 光子量子回路を用いた量子制御の実現と応用、および b. 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を結合と制御の2つの項目について研究を進めている。これまでに、2001年に線形光学量子計算の基本となる光子量子回路の世界初の実現に成功、微小球共振器とテーパー光ファイバの極低温下での結合に可視域で初めて成功他、多数の成果があがっている。

光系量子サイバネティクス：

計画研究 D02「光を基軸とした多キュービット量子制御」：多体量子もつれ状態操作の基本となる拡張操作を提案、実現した。量子通信において雑音から量子状態を保護する手法について、効率を抜本的に改善する方法を提案、実現した。光を媒介として量子メモリ間の相互作用を制御する手法の研究を進めた。

公募研究 01「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」：研究代表者が先行研究で数学的に証明した適応的量子推定法の強一致性および漸近有効性（J. Phys. A: Math. Gen., 39 (2006) 12489）に対し、竹内グループ（北大/阪大）と共同で検証実験を行っており、現在、「光子の位相パラメータの推定実験」で得られたデータを解析している。

公募研究 02「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」： ^{171}Yb 原子の異重項間遷移に共鳴する微小共振器に、通信波長帯のレーザーを別途導入し、偏光に関する2mode-cavity QED系を構築することに成功した。核スピン状態を実時間で測定に成功した。 ^{174}Yb 原子集団を光トラップ内で蒸発冷却し、ボース凝縮をおこすことに成功した。今後凝縮した ^{174}Yb を冷媒として、 ^{171}Yb をフェルミ縮退させることで、クラスター計算を実現する予定である。

公募研究 03「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」：

超伝導と強磁性体の接合を用いることで、従来の精度をはるかに越えた高い精度で磁気励起を観測できる可能性を提案した。また、磁性体および超伝導体中の各素励起が結合した複合励起状態を見出した。これらの成果を量子ドット中のスピン自由度に発展させ、量子ドットと超伝導体の量子混合系におけるコヒーレンスの観測・制御、量子ビットの提案を目指して研究を進めている。

公募研究 04「単一 NV 中心における他量子ビット化へ向けた研究」：

我々はダイヤモンド中の NV 中心に着目し、固体で室温では初となる電流注入による単一光子発生に成功した。将来のスケラビリティ及び集積化に資する重要な基盤技術と考えている。現在 Science 誌に投稿して審査中で特許も出願予定である。また量子中継への応用のための単一スピンを用いた量子もつれ検出の研究を行い成功した。現在実験条件の最適化を行っている。

公募研究 05「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」：H23 年度に導入した 1.5K インサートを等からなる測定系整備はすでに終了し本研究に特化した冷凍機として稼働中である。2 重ゲートタイプ素子を用いた研究では、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、外部磁場に平行、反平行、に制御することに成功した。

5. 研究を推進する上での問題点と今後の対応策

本新領域のひとつの重要な目標は、量子コンピューティングなどの応用を視野に入れた、異種量子系の関与した混合量子系の研究を進めることである。これは異分野の融合を必要とする研究である。このような融合研究の必要性は、それぞれの個別な分野で自発的に出現する傾向にある。たとえば量子ビットそのものを考慮した場合、以下の例があげられる：

① 固体素子量子ビット (A01, A02) の立場からは、複数の量子ビットの結合に光子を使う手法が考えられている。また比較的短いデコヒーレンス時間を考慮すると、微視的量子ビットとの結合が考えられる。また量子状態の更なる巨視化の目指し、機械振動子との結合も研究されている。

② 光子量子ビット (D01, D02) の立場からは、光子をより効率的にエンタングルさせるには非線形エレメントを必要とするので、物理量子ビットとの結合が考えられている。

またシステム全体の性能をあげる必要性からも、異なった領域の技術を新たに取り入れる必要性があり、以下の例を挙げる：

③ 広がる極低温環境技術の必要性 (分子、イオン量子ビット B01)

④ 広がる超伝導技術の採用 (原子量子ビット C01)

⑤ 沢山の量子ビットを正確に制御するための、新たなスケーラブルな制御／測定回路技術。(全領域)

上記の融合的研究は、それぞれの研究項目内で独自に研究を進め、すでに多くの重要な成果を挙げている場合もある(次章参照)。しかし研究効率をさらに上げるには、研究項目間のさらなる協力が重要になってくる。すでに進行している研究項目間の直接の共同研究は以下のような例があげられる：

1. 計画研究 D01 (光子実験) と公募研究 01 (量子推定理論)。

2. 計画研究 A02 (量子ドット実験) と公募研究 05 (量子ドット実験)。

異なった背景を持つ各研究項目間の横断的連携研究を図るための対策として、これらの研究グループ間の融合研究を促進する目的の「領域融合ワークショップ」を企画してすでに多数か言いわたり開催している(第8章参照)。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設定した。また本領域内での連携を強化するため、「領域融合インターンシップ」制度を設けた。これは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る短期研修制度である。応募は研究代表者を通して行い、総括班の選考により人選を決める。また計画研究 C01 では、実験技術を共有し、研究の効率化を図るために、研究分担者のグループが研究代表者のグループを長期訪問する予定(2011年8月)である。

本領域が採択された時点は、内閣府「最先端研究」プロジェクトの発足とちょうど重なり、「重複研究」の判定が政府内で遅れたこともあり、研究の開始が数カ月遅れた。また公募研究のアナウンスも、同様な理由で積極的に行うことができなく、結果的には公募研究の規模が当初の計画の半分程度に減額された。後半の公募研究の公募時はこのような特殊な問題は起こりえないので、積極的な宣伝が可能になる。このようなハンディキャップにもかかわらず、研究はおおむね順調に進んでいる。

幸いにも東北大震災の影響も最小限であった。

6. 主な研究成果

計画研究 A01「超伝導量子サイバネティクス」：

微小な超電導ジョセフソン接合回路に現れる巨視的量子コヒーレンスの研究を行っている。以下に主な成果を挙げる：

○巨視的量子散乱

我々は人工原子を 1 次元伝送線の中に配置し実験を行った[*Science*, 327, 840, 2010]。実験には人工原子として磁束量子ビットを使った。開放系にある自然原子は共鳴散乱によって検出できる。これは共鳴蛍光と呼ばれる量子光学の基本原則である。我々は単一の巨大な人工原子により、同じような入射電磁場の散乱が起こることを観測した。人工原子のこのような振る舞いは、量子光学を使った一次元開放系中の点散乱源の予測と定量的に一致していた。このような現象は、巨視的量子散乱と呼ぶことができる。共鳴条件では入射電磁波がほぼ完全に反射されること（透過電磁波の消滅）が観測された。これは原子と場の相互作用が大変強いことを示し、このような制御性を備えた人工原子の量子光学やフォトニクスへの応用が期待される。

人工原子の 2 準位を使い、弱いマイクロ波を照射した場合、入射光の約 94%が反射される弾性散乱が観測された。更に強いマイクロ波を照射したときには、非弾性散乱（蛍光共鳴）が観測され、Mollow トリプレットが明確に観測された。

人工原子の 3 準位を使った実験も行った。 $|0\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 転移が抑制される縮退点にバイアスした場合、電磁誘導透明化(electromagnetically induced transparency、EIT) が観測され、Autler-Townes ダブルレットが明確に観測された[*Physical Review Letters*, 104, 193601, 2010]。縮退点から離れたバイアス点では $|0\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 転移が抑制されず、光学的ポンピングによる反転分布が実現し、マイクロ波光の誘導放出と増幅が観測された[*Physical Review Letters*, 104, 183603, 2010]。同様な系で、時間領域の実験も行うことに成功した。量子状態の制御や評価が、透過光の観測のみで実現できることを示した[*Physical Review Letters*, to be published]。

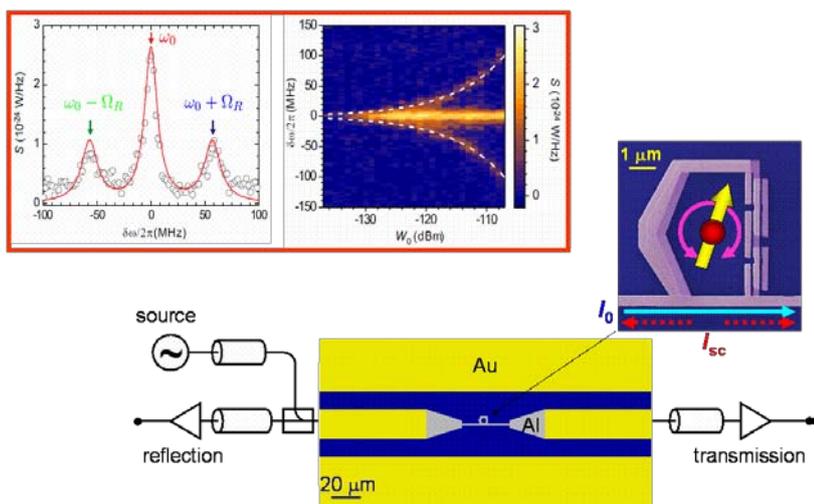


図1 伝送線（1次元開放系）中に配置された人工原子（磁束量子ビット）。挿入図（赤枠）：巨視的量子散乱の一例として非弾性散乱（蛍光共鳴）の実験結果をしめす。Mollow トリプレットが明確に観測されている。

○分散型量子ビット非破壊読み出し

ジョセフソン量子ビットをその最適動作点で量子非破壊的に読み出すことが可能な、分散型読み出し法の研究を行っている。この読み出し法の基本原理は、タンク回路中に置かれた量子ビットの 0 と 1 状態でのタンク回路の共振周波数は量子ビットが 0 状態と 1 状態の時で少し異なる値を持つことである。我々は線形なタンク回路を使った電荷量子ビットの読み出しと、ジョセフソン接合のバイファーケーション現象を利用した非線形タンク回路を使った研究を行った[*Physical Review B* 80, 174502, 2009]。ジョセフソン接合のバイファーケーション増幅器を使った量子非破壊読み出しを実現し、読み出し効率は、0 状態が約 90%で、1 状態が約 40%であった。この読み出し方法はエネルギー緩和時間より格段に高速であるので、量子フィードバック制御身将来は発展できる。

○量子ビットの結合

複数の量子ビットを、如何に結合させるかは、将来量子コンピュータを実現させるために大変重要な研究テーマである。そのため随時相互作用をオンオフできる可変結合の実現が強く望まれていた。結合オン時の結合の強さと、結合オフ時の残留結合の強さは、結合器のバイアス点に依存し、これは 3-量子ビットハミルトニアンで説明できることが分かった [*Physical Review B* 79, 020507(R), 2009]。このことにより、この結合器の最適化設計を行うことができるようになった。

この結合方式を発展させた研究を進展させている。磁束量子ビットを、そのデコヒーレンス時間を最大化できるバイアス点に保ったまま、正確な 1 ビット制御と、2 ビット制御（制御付き位相ゲート操作）が実現できる結合方式を提案した。この新たな結合方式は幾何学位相制御型のもので、正確な状態操作が期待できる。また 1 次元、または 2 次元にスケールできる特徴を持っている。他にも、マイクロ波共振器を介した結合方式なども研究している。

○デコヒーレンス、磁束雑音の研究

我々は結合した量子ビットのデコヒーレンスの研究を行った。この系では、二つの磁束量子ビットがそれらの超伝導ループの一部を共有することにより結合されている。量子ビットのバイアス点を変化させることにより、それぞれの量子ビットの磁束ノイズに対する感度を制御することができる。デコヒーレンス時間は、この感度の大きさや正負サインで促進または抑制される。磁束の $1/f$ 雑音とその相関効果を調べ、局所的な磁束ノイズがデコヒーレンスの要因であることを突き止めた [*Physical Review B* 81, 132502, 2010]。磁束量子ビットで 23 マイクロ秒のこれまでにない長いデコヒーレンス時間を達成した [*Nature Physics*, doi:10.1038/nphys1994, 2011]。

○超伝導電流ポンプ等超伝導ナノエレクトロニクスの研究

将来期待されている量子電量標準を実現するか目の研究に力を入れている。超伝導体と常伝導体からなるハイブリッド単電子ターンスタイルを作りその特性を調べた。この場合、素子の電荷エネルギーは超伝導エネルギーギャップより大きくする必要があり、このターンスタイルにより、160 pA というかつてない大きな電流ステップが実現できた [*Applied Physics Letters*, 94, 172108, 2009]。その後このターンスタイルを 10 個並列にして動作させることに成功し、さらに大きな量子化された電流を作り出すことに成功した。詳細に検討したところ、並列動作での電流レベルのランダム精度は、電荷ノイズや素子のばらつきに影響されにくいことが分かった [*New J. Phys.*, 11, 113057, 2009]。

同様な超伝導体/常伝導体ハイブリッド素子作成技術により、常伝導の島と超伝導のリードを有するハイブリッド単電子トランジスタを作った。このトランジスタのゲート電極に交流電圧を印加することにより、単電子トランジスタの島を冷却することができ、温度は交流信号により誘起された電流をモニターすることにより *in situ* に測定することができた [*Physical Review Letters*, 103, 120801, 2009]。また超伝導を介した輸送できわめて重要なアンデレーフ反射現象の、単事象観測に初めて成功した [*Physical Review Letters*, 106, 217003, 2011]。

○ナノ機械的共振器

超伝導人工原子と機械振動子を組み合わせた新たな混合量子系の研究を進めた。機械振動子は、超伝導よりもさらに巨視的な量子系であり、その実現には大きな意味がある。機械振動子の量子的ふるまいを観測するには、それを十分冷却することが重要になる。AuPd の振動子から超伝導電極へ準粒子を注入することにより、振動子を効率よく冷却することに成功し、約 2 倍程度の明白な冷却効果をサブミリケルビンの環境で示した [*Applied Physics Letters*, 94, 073101, 2009]。

また機械振動を簡便に直周信号で件注する新たな方式を実現した [*Applied Physics Letters*, 96, 263513, 2010]、機械共振器での損失の要因の解析を、Q 値の温度変化などから解析した [*Physical Review B* 81, 184112, 2010]。

機械的共振器に結合した電荷量子ビットに電流注入すると、反転分布が実現することが期待できる。我々は実際にこのような実験を行い、機械的振動モードのレーザー発振が実現していることを示唆している共鳴電流ピークを観察した[未発表]。

○超伝導材料表面状態

ジョセフソン量子ビットでは、超伝導トンネル接合は中心的役割を果たす。トンネル接合のサブギャップ抵抗は、量子ビットのデコヒーレンスの要因になるほか、トンネル接合に基づくエレクトロニクス全般の性能に重要な現象である。そのため、我々は通常使われる AlOx トンネル障壁の詳細な解析を行ってきた。このトンネル接合の輸送特性の温度依存性から、トンネル障壁のエネルギープロフィールが金属/絶縁体に形成される界面準位の影響を強く受けることが分かった。この界面準位は、金属/絶縁体材料やその成膜方法に依存性を持つ。実験的に得られたトンネル障壁のエネルギープロフィールを、第一原理計算により得られたものと比較すると、両者に定質的な一致が見られた[Physical Review B 80, 125413, 2009]。このことは、metal-induced gap states (MIG) がトンネル使用壁の形状に影響を及ぼすことが考えられる。

また、同様なサブギャップ抵抗が、環境からの光子介在トンネルに一部起因することを突き止め、その低減法も実現した[Physical Review Letters, 105, 026803, 2010]。

計画研究 A02「半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送」：

量子情報の制御

(1) 3量子ビット化に適合する3重量子ドット

3つの量子ドット(3重量子ドット)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を設計した。さらに同微小磁石と組み合わせることが可能な横型3重量子ドットを作製し、3ドットの電荷状態を確認した。また、同磁石法によって、設計上25ビット程度までビット数を拡張できる。現在、3ビットの実現に向けて実験を行っている。[Applied Physics Letters 97, 212104 (2010)].

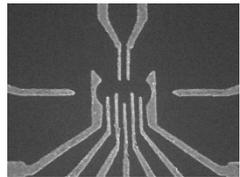


図 1: 3重量子ドットの SEM 写真。

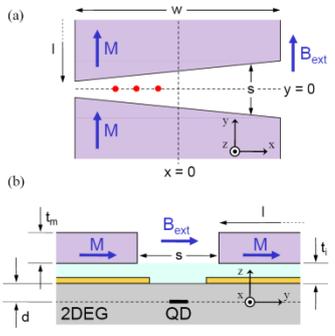


図 2: 微小磁石対の設計: 正面(a)と断面(b)。

(2) 非平行不均一磁場での共鳴トンネル電流

非平行かつ不均一な磁場が印可された直列2重量子ドットの共鳴トンネル電流をブロッホ方程式の方法で理論的に調べた。異なる(スカラー)g 因子 w 持つ場合にはクーロン相互作用とスピン選択則による相乗効果による「スピンボトルネック効果」が期待される。この現象を実験的に詳細に調べる事により二つの量子ドットが異なる g 因子(0.33, 0.89)を持つ事を確認した。[Physical Review Letters 104, 136801 (2010)]しかし、磁場の向きが非平行か系が g 因子テンソルで記述される場合はこのスピン選択則が破れる。これを調べた結果共鳴トンネル電流ピークの構造(数)が不均一磁場により系統的に変化することを見いだした。[Physica E 42, 994 (2010)]また印可電圧を周期的に矩形変化させた時の過渡電流は、スピン選択則を反映して分数電荷と電圧変化の周波数の積となる事を確認した。[J. Phys.: Conf. Ser. 193, 012046 (2009)]

(3) 量子ドット中のスピン・軌道相互作用(SOI)の制御

量子ドット中のスピンを振動電場により制御する為には、微小磁石や強いスピン・軌道相互作用(SOI)が必要である。今回 SOI の強い InAs 量子ドット素子に直接2端子電極をつけ、流れる電流の励起スペクトルを調べることにより、SOI が外部磁場の方向に対して大きな異方性を持つことを見出した。図の(a)-(d)に示したのは、基底状態(最も下の線)と第一励起状態(下から二番目の線)の面内磁場の強さ依存性である。φは面内での磁場の印加方向を表す(図(e))。基底状態の電子スピンの向きと第一励起状態のスピンの向きは外部磁場と平行で、それぞれ反対を向いている。矢印で示した磁場領域では二つの状態のエネルギーが接近し、「反交差」している様子が分かる。この反交差の幅がスピン・軌道相互作用の大きさを特徴づける。図(f)はその反交差の大きさを面内角度φの関数でプロットしたもので、実線は理論計算による結果で良い一致を示している。φ=60°で完全に反交差が消失している事が分かる。本研究により、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る事が可能になり、さらにこの相互作用の大きさを制御可能である事を示すことができた。[*Physical Review Letters* 104, 246801 (2010)]

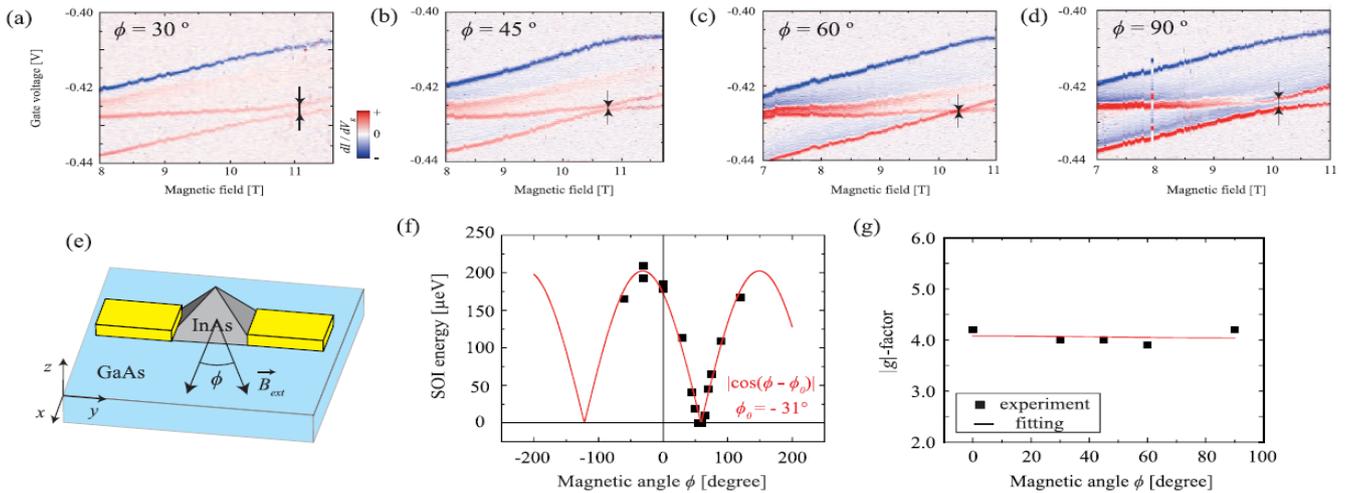


図3 (a)-(d) さまざまな印加角度 ϕ における InAs 量子ドットの電流の励起スペクトルの磁場依存性。矢印に挟まれた点が、スピン下向き基底状態とスピン上向き第一励起状態が反交差するところ。(e) 素子の概念図と磁場の方向 (f) 反交差の大きさの磁場の向き ϕ 依存性。(g) Lande g 因子の磁場の向き依存性。

(4) 微小磁石法による 2 スピン量子ビット制御

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。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い。今回制御 NOT ゲートを実現する為に必要な SWAP^{1/2} ゲートと電場駆動電子スピン共鳴 (EDSR) 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。2 量子ビット演算はバイアスパルスにより制御されたスピン間の交換相互作用 J_0 の印可時間で決定され、 π パルスでは SWAP 演算、 $\pi/2$ パルスでは SWAP^{1/2} ゲートが実現する。最初積状態であった 2 量子ビットが「量子もつれ」状態となる様子を近傍に設置した電荷計を用いて確認した。また Ramsey 法と Echo 法による位相緩和時間 T_2^* と T_2 を決定した。[未発表]

量子情報の観測

(1) 二重量子ドットを用いた量子キャパシタンス測定

半導体二重量子ドット中の軌道状態 (結合・反結合軌道) やスピン状態 (2 スピン系における一重項・三重項) を高感度に検出する手法として、広帯域キャパシタンス測定技術を開発した。二重量子ドット近傍に作りつけた量子ポイント接合 (QPC) において高周波の変調測定機能を付加することにより、量子ドット中の電荷移動に伴うキャパシタンス (インピーダンス) の変分を QPC で検出している。二重量子ドットのトンネル結合領域ではドット間の量子力学的なトンネル結合を反映した量子キャパシタンスを測定した。[*Applied Physics Letters* 96, 032104 (2010)]

(2) 二重量子ドットを用いた電荷量子ビット測定

二重量子ドットを用いた電荷量子ビットの確度を上げることを目指して、1 電子のみを含む二重量子ドットを作製し、パルス電圧を印加して 1 電子状態のコヒーレント振動を観測した。また、電荷量子ビットの測定手法に関して検討を行い、以前から行ってきた電流測定法に加えて、QPC による電荷測定法を新たな量子ビット測定技術として試みた。QPC による電荷測定

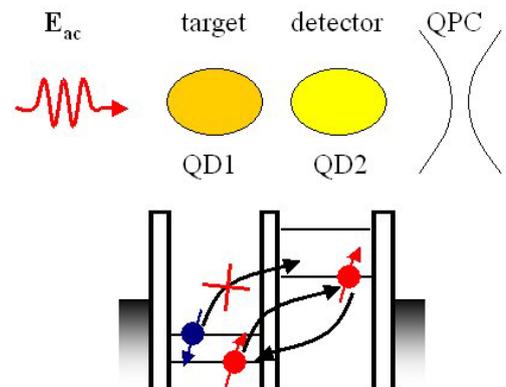


図4 傾斜磁場を用いたスピン検出系の概念図 左右のドットのゼーマン分離の大きさが異なる

を用いても明瞭なコヒーレント振動が観測できることを示した。[未発表]

(3) 傾斜磁場を用いた高性能スピン検出

単一電子スピンの検出はスピンの持つ磁気モーメントとプローブとの相互作用が極めて弱い為に技術的に困難だが、スピン状態を電荷状態に転写する事により、電荷計を用いて単一スピン状態の読み出しが可能である。これまでの検出方法は破壊測定である点やスピンの回転のみを検出して向きが決定できないなど問題があった。今回微小磁石を集積化した傾斜磁場下二重量子ドットで、マイクロ波と量子ポイントコンタクト(QPC)による電荷計を用いた非破壊スピン射影測定に初めて成功した。[*Physical Review Letters* 104, 046802 (2010)]

量子情報の伝送

(1) 飛行電荷量子ビット

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(図1)を実現し、伝播する電子がどちらの経路に存在するか、という量子情報をゲート電圧によって制御した。これは、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実験である。また、量子状態は、素早く(~100GHz)制御され、遠くまで(~100 μ m)コヒーレントに伝送されることを確認した。

(2) 量子ドット間の単一電子移送

遠く離れた量子ドット間で、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た。具体的には、図2のように二つの量子ドットを空乏化した一次元チャンネルで繋ぎ、左側から表面弾性波(SAW)を送った。その結果、左側の量子ドット中の単一電子がSAWによる“動く量子ドット”にトラップされ、空乏化した一次元チャンネルを通して右側の量子ドットまで運ばれることが確認できた。この方法によって、単一電子スピンをコヒーレントに長距離伝送することが可能になると考えられる。

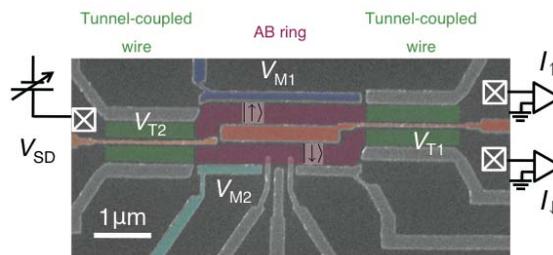


図5：電荷量子ビットの制御に用いた干渉計。トンネル結合 (V_{T1} , V_{T2}) と2経路間の相対的な伝播位相 (V_{M1} , V_{M2}) を制御することで、任意の最終状態が得られる。

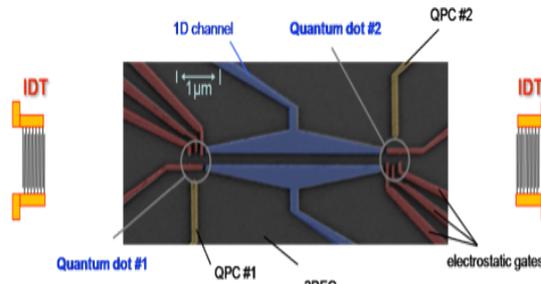


図6：遠く離れた量子ドット間での単一電子移送に用いられた試料。IDTは表面弾性波発生器。

計画研究 B01 「分子スピン量子制御」：

分子の電子スピン、核スピンを初期化して、磁気共鳴によって量子制御することによる、量子光学的効果と量子情報的機能、および、そのための分子系の研究を行っている。以下に研究項目毎に主な成果を挙げる：

○ 共振器ハミルトニアン工学

Q の高い共振器は、磁気共鳴によるスピン量子ビットの制御と観測、顕著な量子光学的効果の実現にとって魅力的である。一方、高Q共振器内部でスピンと結合している磁場波形は、外部から印加される信号波形とは異なるため、従来の磁気共鳴分光技術では精密な量子制御は困難である。そこで、共振器内部の磁場を精密に制御する方法と、共振器とスピンの高効率な結合を研究している。

▶パルス補償による共振器内での超精密磁場パルス磁場照射

図 B01-1 に示すように共振器内部の磁場を観測して入力信号からの応答関数を求めることによって、入力パルス波形を自動的に補償して、共振器内部に所望の磁場パルス波形を生成する方法を考案し、NMR 実験によってその効果を実証した。[*J. Magn. Reson.* 204, 327-332 (2010)]

▶共振器と電子スピンアンサンブルの強結合系

一つの電子スピンと共振器との結合は非常に弱い、電子スピン N 個のアンサンブルと共振器との結合は単一電子スピンの場合の $N^{1/2}$ 倍になる。誘電体共振器を用いて共振器の磁場と電子スピンとの結合効率を大きくし、電子スピンを極低温で高偏極化して有効なスピンの数 N を増大して、最大 700MHz 程度の非常に大きな結合を実現した。この系を使って、マイクロ波光子と電子スピンアンサンブルの量子光学的実験を開拓してゆく。

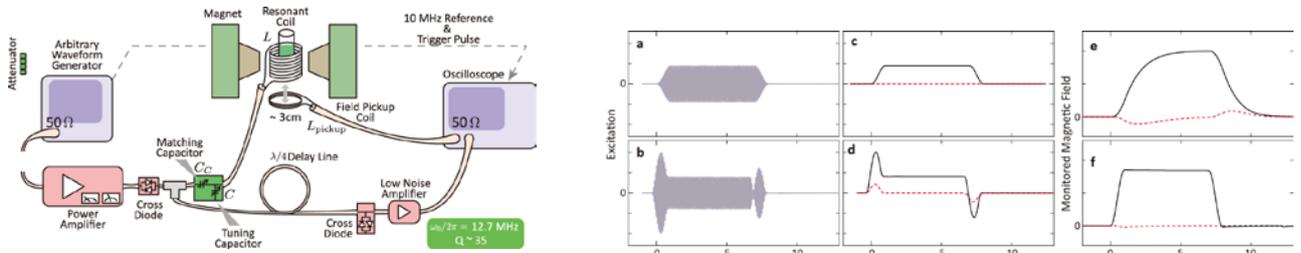


図 B01-1 パルス補償の実験配置と実験結果 a: cos 立上り・立下りパルス、b: 補償パルス、cd: ab の IQ 振幅、ef: ab 入力時の共振器内磁場 IQ 振幅実測値、e 補償無し (a)、f 補償有り (b)

○ 分子スピン系の初期化：光三重項電子スピンを用いた核スピンの高偏極化

核スピンの室温での偏極率は 10^{-5} 以下であり、希釈冷凍機で到達可能な 30mK まで温度を 4 桁下げたとしても、初期化できない。そこで、ナフタレンや p-テルフェニルの単結晶にドーブしたペンタセン分子の光励起三重項状態の高偏極電子スピンを用いて核スピンを動的核偏極によって高偏極化する研究を行っている。ホスト結晶を部分的に重水素化した方が熱容量が小さくなり短時間で高偏極化するが、逆に重水素によってプロトン間のスピン拡散が阻害されて遅くなる効果もある。そこで、重水素を RF デカップリングすることによって、スピン拡散係数を大きくし、さらに高速化が可能であることを実験的に示した。[*J. Chem. Phys.* 133, 155504 (2010)]

○ スピン測定・スピン増幅

スピンの最大の弱点である測定感度の低さを克服するためにスピン増幅の研究を行っている。スピン増幅は、図 B01-2 A のように被測定スピン (qubit) の 1 成分を多数のスピンにコピーすれば実現する。しかし、この量子回路で大利得を得るには、多数のスピンに対して選択的に制御 NOT 演算を行う必要があり、数倍の小利得しか実現していなかった。そこで、互いに識別可能な 2 つのスピンと、互いに識別可能でない多数のスピンを用いて、スケラブルなスピン増幅が実現可能な同図 D の方法を考案し、その核心部分である識別不可能な多数のスピンへの情報の転送・蓄積を同図 C で実験し、図 B01-3 に示すように利得 140 の広義のスピン増幅を実現した。[*quant-ph/1105.4740* (2011)]

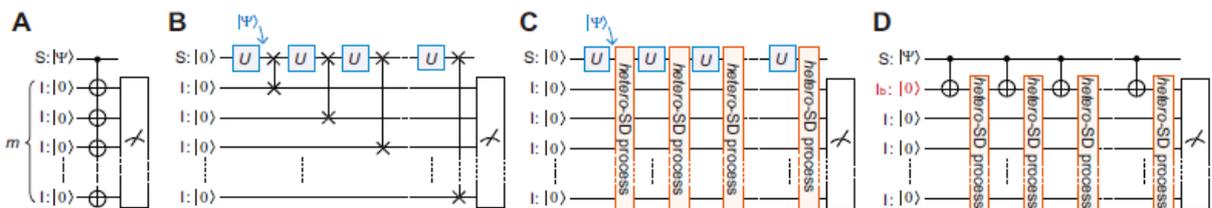


図 B01-2 A: スピン増幅量子回路, B: トモグラフィ, C: スケラブル版 B, D: スケラブル版 A

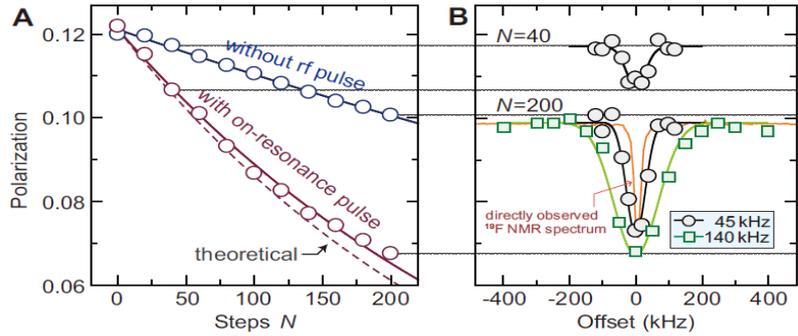
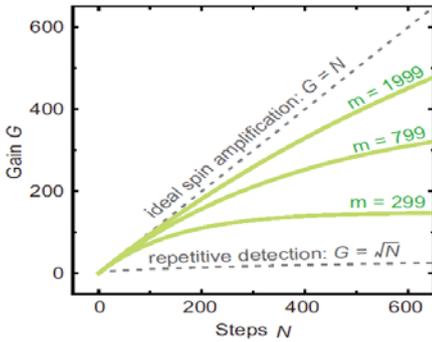


図 B01-3 スピン増幅の理論利得 (左) と実験結果 A: スピン増幅 B: スピン増幅分光

○分子スピン系の電子スピン・核スピン混在系の量子状態制御

分子スピン系については、超密度符号化などの量子情報処理を目指して量子状態制御が可能な量子ビット系（電子スピンバス系）として、1電子スピン+3核スピン（2水素核+1窒素核（ ^{15}N ））を持ち一部を重水素化した分子を設計・合成し、反磁性分子結晶格子中に、任意の濃度で磁氣的に希釈した単結晶アンサンブル系を実現した。この系に対して、コヒーレントなパルスマイクロ波及び複数のパルスラジオ波を共鳴条件下で用いる、電子-核-核多重共鳴スピントクノロジーを確立し、量子状態制御が可能であることを実験的に示した。この電子スピンバス系では、核スピンは client 量子ビットの役割を持つが、系のスピン状態の制御においては、バスビットと client ビットを等価に扱う技術を確立した [*Journal of Materials Chemistry*, 19, pp. 3739-3754, 2009; *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2, 449 - 453, 2011]。

○Lloyd 型 1次元周期スピン鎖モデルの電子スピン版の分子設計と合成

量子ビットの scalability を解決するモデルとして、Lloyd の 1次元周期スピン鎖が早くから提唱され、研究代表者（北川）らによって量子計算への実装の可能性などが理論的に示されてきたが、これまで物質開発の面からチャレンジされたことはなかった。この課題に対して、分子スピンの集積に関して tailor-made 的な分子設計を考察し、Lloyd モデルの電子スピン版を超分子化学の合成技術に駆使して実現した。現在、最小単位からの extension を行っている [*Journal of American Chemical Society*, 132, 6944-6946, 2010]。

○巨視的量子ビットと結合する、大きなゼロ磁場分裂テンソルを持つ安定な分子スピンの物質開発

巨視的量子ビットである超伝導量子ビットと原子・分子由来の量子ビットのアンサンブル系（微視的ビット）との結合の試みは始まったばかりであるが、物質として軌道角運動量がほとんど消失した分子スピンを微視的ビットとして試みられたことはない。微視的ビットが持つべきスピン物性や特性としては、高スピン状態が電子的な基底状態であること、交換相互作用の大きさに決まる、電子的励起状態がエネルギー的に離れていること、ゼロ磁場分裂定数が sizable であること（あるいは tunable であること）、サンプル作成過程において化学的に安定であること、テンソル異方性を同定できることが挙げられる。この新しい試みに適した基底三重項有機分子スピンの設計を、量子化学的考察によって行い、実際に新規な物質として合成・単離し、ゼロ磁場分裂テンソルをはじめ、X線構造解析による分子構造、スピン物性を明らかにした [*Physical Chemistry Chemical Physics*, 13, 6970-6980, 2011; *Journal of American Chemical Society*, 132, 15908-15910, 2010; *ChemPhysChem*, 11, 3146-3151, 2010]。合成された三重項分子は、これまで合成されてきた類似の diradical 分子種のうちで、最大のゼロ磁場分裂定数を持ち、その特異な電子構造を、高精度の量子化学計算によって理論的にも明らかにすることができた [to be submitted]。

計画研究 C01 「冷却原子を用いた量子制御」:

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。以下に主な成果を挙げる:

○光格子を用いた量子計算機実現にむけた超狭線幅遷移を用いた研究[未発表]

薄型ガラスセル領域にて生成したイッテルビウム原子のボース・アインシュタイン凝縮体を、1次元および3次元光格子に導入し、超流動—モット絶縁体転移を 1S_0 - 3P_2 超狭線幅遷移を用いた高分解能分光により詳しく調べることに成功した。特に、モット状態では、1格子点に2個の原子が存在するサイトと1個の原子が存在するサイトの信号を明瞭に分離して観測することに成功し、その結果が、磁気量子数に大きく依存することを見出した。これは、準安定状態 3P_2 と基底状態 1S_0 の間の原子間相互作用が磁気量子数により大きく変わることを意味している。さらに、磁場によってもこの原子間相互作用が大きく変わることを見出した。これは、これまで知られているフェシュバツハ共鳴とは異なるメカニズムによるものであり、新規性が高い。

また、超流動状態やモット状態の動的振る舞いを研究するために、非線形分光として、ホールバーニング分光を行い、モット領域では、レーザー線幅で決まる鋭いスペクトルを得ることに成功し、超流動状態およびボース凝縮体では、スペクトルの動的なシフトおよび広がりを観測した。

さらに、単一原子観測に向けて、少数個の原子を高感度に検出する方法を開発した。特に、原子だけでなく、光会合によって生成した2原子分子を高感度に観測することに成功した。

また、磁場勾配を印加して、ほぼ格子間隔の空間分解能で磁気共鳴イメージングの信号を得ることに成功した。

○光格子中の冷却原子を用いた量子シミュレーション研究

まず、超低温のイッテルビウム (Yb) 原子量子気体、およびその混合系を生成することに成功した。特に、自然存在比が、0.13%と最も低い同位体 ^{168}Yb のボース・アインシュタイン凝縮の生成に成功し、さらに ^{168}Yb と ^{174}Yb 原子による混合ボース凝縮体の生成に成功した。[未発表]

ボース同位体やフェルミ同位体などさまざまなYb原子量子気体を3次元光格子に導入して、強相関係の量子シミュレーション研究を行った。まず、スピン自由度SU(6)とSU(2)を持つフェルミ粒子混合系を実現した[*Physical Review Letters*, 105, 190401, 2010, Editor's Suggestion]。また、スピン自由度SU(6)に由来する冷却法であるポメラランチュク冷却を原子系で初めて実証することに成功した[未発表]。さらに、ボース・フェルミ混合系のモット絶縁体状態を実現した[*Nature Physics*, 掲載予定 2011]。

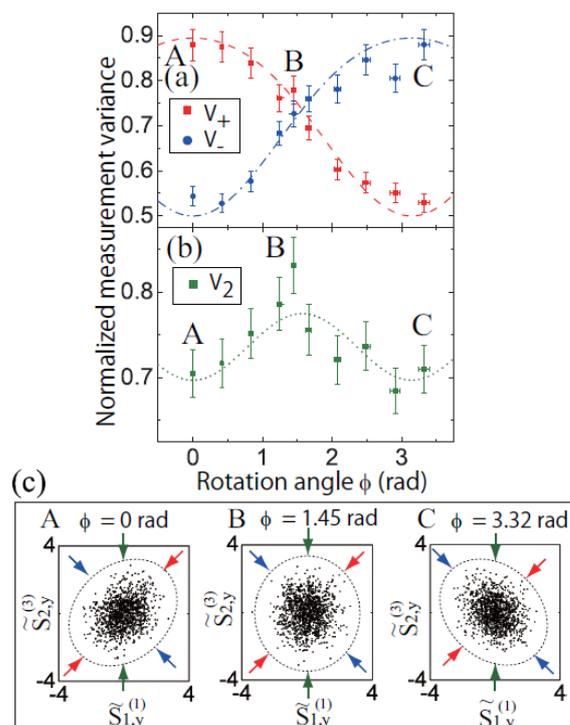
さらに、アルカリ原子 ^6Li とイッテルビウム原子の混合量子縮退系を新たに実現した。 ^6Li 原子と ^{174}Yb 原子のフェルミ縮退—BEC混合、 ^6Li 原子と ^{173}Yb 原子のフェルミ縮退混合をそれぞれ実現し、今後、不純物問題の量子シミュレーターへの応用や、量子磁性実現も含めた新しい方向性を見出した[*Physical Review Letters*, 106, 205304, 2011, Editor's Suggestion]。

一方、量子シミュレーションの重要な手法である、原子間相互作用の制御について、光で高速にかつ局所的に制御できる光フェシュバツハ共鳴法をボース凝縮体に適用して、明瞭な相互作用の空間変調の信号を得ることに成功した[*Physical Review Letters*, 105, 050405, 2010, Editor's Suggestion]。

○核スピン集団の量子制御

一方、レーザー冷却によって準備した低温の核スピン集団に対して、量子非破壊測定によりスピンスクイズド状態を生成し、その非古典的なスピン状態に対して、デコヒーレンスのないまま、回転操作を施すことに成功した[*Physical Review Letters*, 104, 013602, 2010]

(右図参照)。



これをさらに発展させて、FPGAを用いた実時間フィードバック制御を行い、測定過程を用いていながら、決定論的にスクイズドスピン状態を生成することに成功した。さらに、この過程の、量子情報論的意義を深く掘り下げて議論した[未発表]。

○超伝導マイクロディスクによる磁束量子計測

冷却原子と超伝導磁束との直接的な相互作用を利用した量子制御に向けて、第2種超伝導のマイクロディスクに磁束が量子的に侵入する状態を作り、これを冷却原子集団によって計測する方法を考案した。現在までにこの計測を実証する超伝導チップの開発までを行った[論文未発表、関連出願：特願 2009-015252、特願 2010-027350]。

○超伝導アトムチップによる原子の量子化レベルへの閉じ込め

マイクロ磁場トラップにより外部自由度を量子化し、全量子的な原子の制御を目指す試みでは、超伝導アトムチップの高い安定性を背景に、4.4 A の永久電流から 27 マイクロメートルの位置に極小点を持つ磁場トラップに原子を捕捉し、原子の温度をあと一桁冷却することで量子化領域に到達する数百 kHz の強い閉じ込めに成功した[ICOLS 2011, Poster T12]。

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」：

本研究では、(1)高忠実度化を目指した断熱的な手法に基づく量子状態制御技術、(2)大規模化および他の量子系との結合が容易な平面型トラップ技術、の研究を行っている。以下、各項目の成果を述べる。

(1) 本研究では、断熱的なパラメータ変化を用いたエンタングル状態生成、暗状態を用いた純粋に幾何学的な位相因子による量子ゲートの実現を行っている。この手法は、ラビ振動に代表される系のハミルトニアンによる動力学的時間発展をもとに行われてきた従来の量子ゲート技術に比べ、技術的なノイズ要因に対するロバスト性を持ち、また大規模な状態準備や、多粒子のエンタングル状態の効率の良い生成などを容易にすると期待される。

まず、高速断熱通過法を2個の40Ca+イオンのサイドバンド遷移に適用することで、ディック状態を生成する実験を行った。この実験においては、軸方向重心振動モード振動状態におけるフォック状態 ($|gg\rangle \otimes |1\rangle$) を生成し、これをレッドサイドバンド遷移における高速断熱通過により内部状態の励起に変換するという手順により、ディック状態 ($|ge\rangle + |eg\rangle)/\sqrt{2} \otimes |0\rangle$ を生成する。図1はその直後および $\pi/2$ パルス照射後のパリティの測定結果であり、それぞれ1付近で一定である、あるいは2周期の振動をしているところから、エンタングル状態が生成されていることが確認できる。この結果より、ディック状態のフィデリティ 0.66 が得られた。さらに、パラメータの変化に対するロバスト性を立証した(図2)。ディック状態生成に用いる光パルスの時間幅を40マイクロ秒から230マイクロ秒まで変えた実験、また最大ラビ周波数を60kHzから200kHzまで変えた実験のいずれにおいても、フィデリティ(図2白丸)の変化は10%以内にとどまり、また分離不可能条件が常に満たされイオンがエンタングルしていたことが確かめられた(*Physical Review A*, 83, 022315, 2011)。

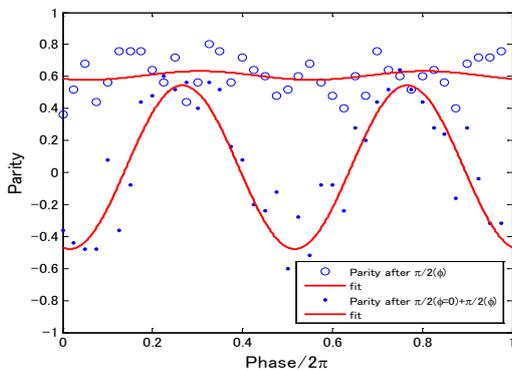


図1: ディック状態生成後のパリティ測定

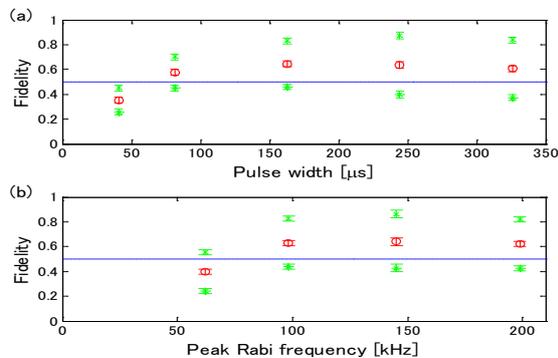


図2: パラメータ変化におけるディック状態生成のロバストネスの確認

また、原子多準位系の複数の暗状態を用いることで、動力的な時間発展によらず、純粋に幾何学的な位相因子のみによって非可換なユニタリ演算を実現することが可能となる。ここでは、 40Ca^+ 一つの下準位と三つの上準位からなる tripod 系における 2 つの暗状態を用い、二つの STIRAP (Stimulated Raman Adiabatic Passage) を組み合わせることで、単一量子ビットゲート操作を実現した。図 3(a), (b) はそれぞれ σ_x , σ_x ゲートの結果であり、1 に近い高コントラストでの占有数変化が確認されたことから、高忠実度でゲート操作が実現されていると結論付けられる。

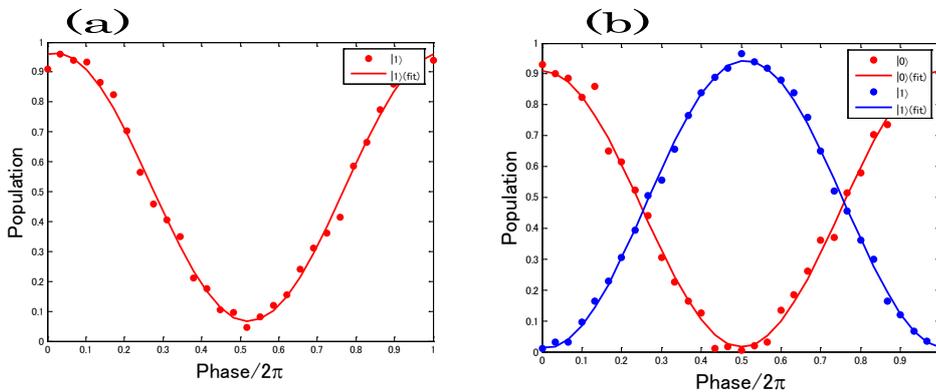


図 3: tripod 系における STIRAP による 1 量子ビット演算の結果

(2) 開放型プレーナートラップについては、単一トラップ領域の電極の設計と作製、冷却カルシウムイオンによる特性評価、プレーナートラップにおける余剰マイクロ運動の低減法の開発、多領域トラップの設計を行った。

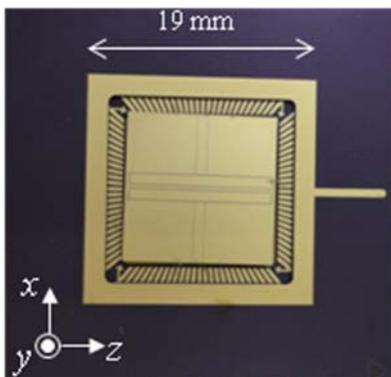


図 4 開放型プレーナートラップ電極。電極中央の $400\mu\text{m}$ 上方にイオンが捕獲される。

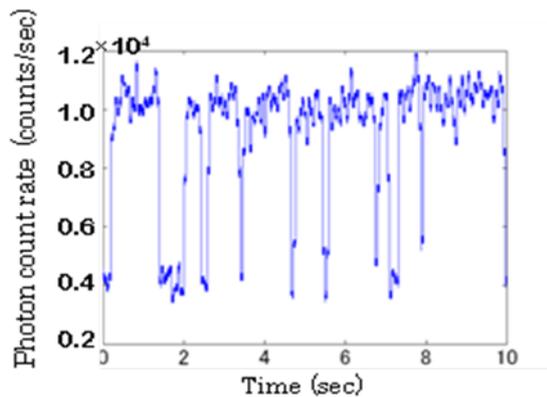


図 5 単一カルシウムイオンからの量子跳躍信号。

電極設計では捕獲されるイオンの高さ、トラップポテンシャルの深さ、永年周波数などを設定する。イオンの高さを決めれば rf 電極の大きさと配置が決まるが、その他の dc 電極については最適化が必要である。特にプレーナートラップは従

来型に比べてトラップポテンシャルの深さが 1 桁以上小さくこのことが捕獲実験を難しくしている。そこでトラップポテンシャルができるだけ深く (1.0 eV 程度) なるように数値計算によって電極のレイアウトの最適化を行った。図 4 が作製したトラップ電極の写真である。電極には金 (厚さ約 $5\ \mu\text{m}$)、基板にはアルミナを使用している。

このトラップ電極でカルシウムイオンを捕獲し、蛍光強度が最大になるレーザー光の位置から、イオンはほぼ数値計算のとおりの高さで捕獲されていることが確認できた。図 5 は単一カルシウムイオンからの、 $S_{1/2}$ 状態と $D_{5/2}$ 状態間の量子跳躍をあらわす蛍光信号である。このように冷却した単一カルシウムイオンを用いてトラップの永年周波数を測定したところ、 z 方向でほぼ設計どおりの値が得られた。

一般にイオントラップでは浮遊電場によって生じるイオンの余剰マイクロ運動をいかに排除するかが大きな問題である。マイクロ運動の検出で既存の技術としてよく使われる rf-光子相関法はドップラーシフトを利用しており、レーザー光の進行方向の運動成分しか検出できない。しかしプレーナートラップでは電極平面に

垂直な方向（図1のy方向）にレーザー光を照射すると散乱光が増大しイオンが検出できなくなるため、y方向にはこの方法が使えないという問題があった。そこで我々はトラップポテンシャルに振幅変調をかけて、パラメトリック共鳴を利用して浮遊電場を検出する方法を提案した。トラップポテンシャルの変調周波数が永年周波数に共鳴すると、浮遊電場が存在するときのみイオンが加熱される。それに伴い蛍光強度が変化するので浮遊電場の有無を検出できる。パラメトリック共鳴法の利点はレーザーの進行方向に関係なく浮遊電場、ひいてはマイクロ運動が検出可能なことである。

我々はまず通常のリニア型のトラップを用いて2つの方法を比較し、パラメトリック共鳴法でマイクロ運動が検出でき、さらに rf-光子相関法よりも感度が高いことを示した。*(Appl. Phys. B, Online First)*。そこでこの方法をプレーナトラップに適用し、全方向のマイクロ運動を低減できることを実験で示した。プレーナトラップを用いた冷却実験に不可欠な技術を確立したといえる。

現在、大規模集積化のための多数のトラップ領域から成る電極の設計・試作を行い、多領域トラップの実験に着手している。

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」：

これまでに、2001年に Knill, Laflamme, Milburn によって提案された、制御ノット操作を行う光子量子回路の世界初の実現に成功 [*PNAS*, 2011] したほか、量子ゲートにおけるエラー原因の解明 [*New J. Phys.* 2010], 光子量子もつれ状態の光子数の拡張方法の実現 [*JOSA-B*, 2010]、多値量子ビットとして有力な、光子の軌道角運動量の重ね合わせ状態の新しい検出方法 [*JOSA-B*, 2010] などの成果を得ることができた。

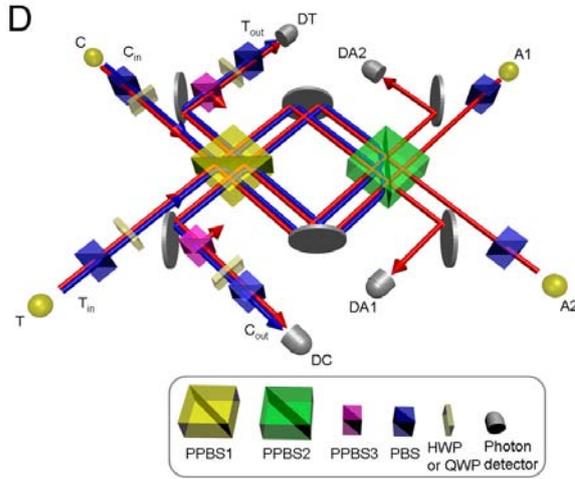
また、微小球共振器とテーパ光ファイバの極低温下での結合に可視域で初めて成功 (*Opt. Exp.* 2010) するとともに、ファイバ結合微小球の共鳴による位相シフトスペクトルを、単一光子レベルの微弱なプローブ光を用いて成功 [*Opt. Exp.* 2011] した。さらに、従来広く問題とされてきたテーパ光ファイバの透過率減少の原因を定量的に解明、ナノ発光体との高い結合効率が見込まれる、直径 300nm の極細テーパファイバを、大気中で1週間以上透過率を劣化せず維持することに成功 [*Opt. Exp.* 2011] した。また、異種量子ビットとして、ダイヤモンド中の窒素欠陥中心 (NV) に着目、すでに極低温での単一 NV からのゼロフォノン線を観測するとともに、そのフォノンサイドバンドの抑制にも成功しつつある。

また、公募班の藤原彰夫教授と共同で、現在、フィードバックの一種であるアダプティブ測定による、光子の量子状態の新しい推定方法の実現に取り組み、その初期的な実装に成功した。これは、数学分野と物理学・電子工学分野という、異分野融合研究成果である。

以上のように、計画は順調に推移している。以下、特筆すべき成果について詳細を述べる。

○ Knill, Laflamme, Milburn によって提案された、制御ノット操作を行う光子量子回路の世界初の実現に成功 (*Proceedings of the National Academy of Sciences*, published on line on June 6 ahead of print, 2011)

光子は、量子情報の伝達媒体として有力だが、2つの光子を相互作用させる方法の実現が困難であった。この問題に対し、Knill, Laflamme, Milburn (KLM) は、半透鏡で生じる量子干渉を利用して、光子1個レベルで動作する「非線形スイッチ」が実現できること、またそのようなスイッチを組み合わせることで、光子量子コンピュータが実現できることを2011年に理論的に示した。この提案は大変注目され、これまでに1500以上の引用を受けている。しかし、その技術的な困難さから、提案後10年間実現されていなかった。



KLM-CNOT 光子量子回路。PPBS は部分偏光ビームスプリッター、PBS は偏光ビームスプリッター、HWP は半波長板、QWP は1/4波長板、Photon detector は光子検出器。

我々は、光子源を改良することで、半透鏡上で良質な量子干渉(90%)を実現、また、これまで開発した特殊な半透鏡を3種類利用、さらに光の干渉装置を工夫することで、コンパクトで非常に安定した実装を実現、その結果として、Knillらの提案した、光子1個レベルで動作する「非線形スイッチ」を組み合わせ、光子量子コンピュータの基本となる光子回路(伝令付き制御ノット操作)を実現することに、初めて成功した。

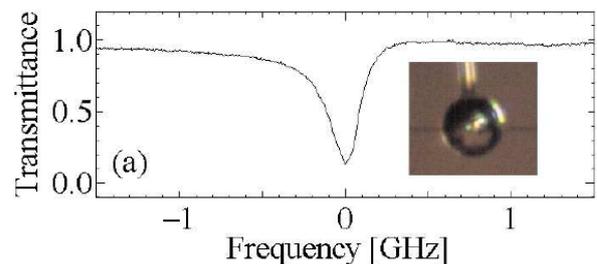
図に実験装置を示す。入力光子(CとT)は、PPBS1で最初に量子干渉した後、PPBS2において、補助光子A1、A2とさらに量子干渉を行う。この部分が、2つの非線形光スイッチに相当する。その後、結果の状態は再度PPBS1で量子干渉したのち、出力分(CoutおよびTout)で結果が解析・検出される。得られた平均ゲート忠実度は0.82と、十分高い量子性を示した。

この成果は、2000年にKnillらによって提案された光子量子計算の可能性を実証するとともに、将来の量子コンピューターや超長距離の量子暗号の実現、低エネルギー通信としての量子情報通信などの実現へと繋がる成果である。

○微小球共振器とテーパファイバの極低温下での結合に可視域で初めて成功[*Optics Express*, 2010]

単一発光体のコヒーレンス時間を、量子位相ゲートに必要なだけ増大させるためには、一般に極低温(10K以下)環境が必要となる。しかし、直径1 μm 以下のテーパファイバと微小球を、10ナノメートル程度の精度で光学的に結合させる実験は困難と考えられてきた。今回我々は、高いQ値を持つ微小球共振器とテーパファイバの極低温下での結合に、自作の特殊クライオスタットを用い可視光域で初めて成功した。

図に、極低温下での、テーパファイバと結合した微小球共振器の透過率スペクトルを示す。波長可変半導体レーザーからの光をテーパファイバに導入し、その透過光強度をフォトダイオードで計測した。グラフの横軸は、入射光の相対振動数を、縦軸はフォトダイオードの出力電圧を示している。実験は8Kで行っている。透過スペクトルには微小球の共鳴によるディップが生じており、その線幅は40MHzとなっている。これは、 5×10^6 のQ値に対応しており、Wangらによる、ファーフィールド光による微小球共振器とダイヤモンドナノクリスタル中NV欠陥との強結合実験でのQ値($\sim 10^7$)にほぼ匹敵している。このことから、今回実現したこのファイバ結合微小球系は、光子と、ダイヤモンドNV結晶欠陥という異種量子ビット間結合に適した系であることが示唆される。



極低温下(8K)での、テーパファイバと結合した微小球共振器の透過率スペクトル。インセットは、8Kにおいてカップリングしている様子の光学顕微鏡像。

○アダプティブ測定による、光子の量子状態の新しい推定方法の実現

公募班の藤原彰夫教授と共同で、現在、フィードバックの一種であるアダプティブ測定による、光子の量子状態の新しい推定方法の実現に取り組み、その初期的な実装に成功した。これは、数学分野と物理学・電子工学分野という、異分野融合研究成果である。

光子などの量子状態として、たとえば直線偏光の偏角を推定する場合を考える。古典的には、偏光ビームスプリッターで分割し、それぞれの出力からの連続量としての光量を解析することで偏角は求まる。しかし、光子の偏光について測定する場合には、光子は分割されないため、偏光ビームスプリッターのどちらから出力されるかは、推定対象である偏角に応じて、確率的に決まることになる。公募研究代表者の藤原彰夫教授は、その一度一度の測定結果に応じて、一回ごとアダプティブに最適な方法で射影測定を行うことで、測定精度を飛躍的に向上できる方法を提案した[A. Fujiwara J. Phys. A: *Math. Gen.*, 39, (2006) 12489]。今回、我々は提案された手法を実際に実装、光子の直線方向の偏角の推定を試みた。その結果、理論とほぼ同じ狭い分散(よい精度)での推定を行うことに成功している。ただ、今のところ推定値と真値に最大0.5度程度の系統誤差的な不一致がみられるため、その原因の解明にあたっている。また、実験を進める中で、実験回数に対する推定値のダイナミクスに、数学的な理論の段階では予期していなかった興味深い振る舞いが観測され、数学理論の

発展にも、よいフィードバックが得られつつある。

このように、本新学術領域研究によって初めて可能になった融合領域研究も、順調に展開している状況である。

計画研究 D02 「光を基軸とした多キュービット量子制御」：

○多体量子もつれ状態の拡張操作

多数の光子にまたがる量子もつれには、光子どうしの相関の様子が異なる多くの種類がある。ある量子もつれ状態では、光子の全てにまたがる相関を通じて強い量子もつれを保持しており、また別の量子もつれ状態は、少数の光子間の相関に分割された形で量子もつれを持つことで、光子の損失に対する耐性を示す。「W状態」は、後者の最も極端な場合で、光子損失に最も強い量子もつれ状態である。我々は、このW状態のサイズを拡張する手法として、量子もつれ状態を担う光子の数を2個ずつ増やす簡単な方法(図1)を提案し、実証実験を行った[Physical Review Letters, 105, 210503, 2010]。この方法によって、3光子および4光子W状態を生成し、W状態の特徴である光子対間量子もつれが全ての対に存在することを観測した。この方法は、初期状態のW状態のサイズに依らず適用可能で、しかも1個の光子だけにしかアクセスする必要がないため、多くの粒子にまたがる量子もつれを生成するための有用なツールであると考えられる。また、線形光学素子を用いるこの種の拡張法の中で原理的に最適な方法について一般的に明らかにした[Physical Review A 83, 012314, 2011]。

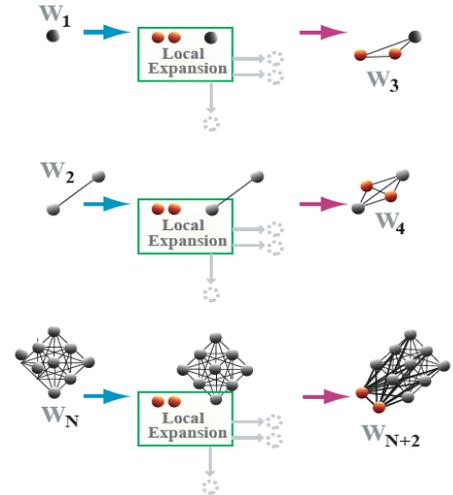


図1: 2光子付加による W 状態の拡張

○雑音耐性を持つ量子通信の高効率化

量子通信の様々なタスクを行うには、遠く離れた場所に量子もつれを配信することが必要であり、雑音のある現実的な量子通信路での配信技術が重要となる。ゆっくり変化する雑音に対しては、量子情報を複数の光子に書き込むことで利用できるデコヒーレンスフリー部分空間(DFS)を用いた保護法が知られている。しかし、透過率Tの通信路でn個の光子のDFSを利用すると、全ての光子が届く必要性から効率がTのn乗に比例して著しく低下してしまう欠点がある。我々は、2光子DFSを用いながら、Tの2乗ではなくTに比例した効率を達成できる新しい手法を提案し、実証実験を行った[Physical Review Letters, 106, 110503, 2011]。この手法では、量子もつれ状態の持つ対称性を利用して、雑音を受けた光子と送信者のもとに留まる光子を実効的に入れ替えることにより、参照パルスを単一光子から損失に強いコヒーレント状態に置き換えることを可能にしている。その結果、忠実度約0.8で透過率に比例した成功確率を達成することが出来た。

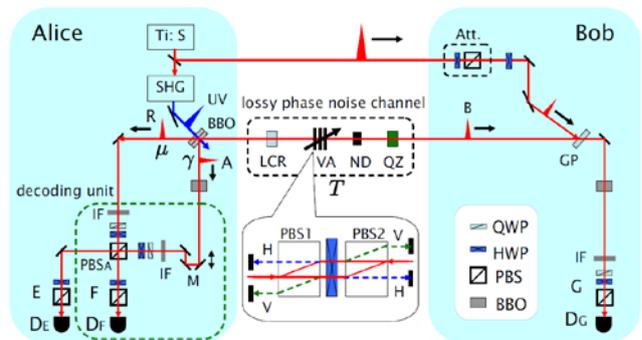


図2: DFSによる雑音保護を用いた量子もつれ配信

○パリティ測定を用いた非局所ゲート操作

量子力学の性質を通信に広く応用するためには、離れた2地点に置かれた量子メモリの間、光を媒介として量子もつれを作ることが重要である。この際、距離に応じて光ファイバの損失が増加するため、その影響をなるべく避けて生成効率と忠実度を高める工夫が重ねられている。我々は、空間的に離れた量子ビットに対する新たな二量子ビット演算方式「遠隔非破壊パリティ測定」を提案した。この方式はレーザー光と物質量子ビットの基本的な非共鳴相互作用に立脚しており、様々なタイプの量子メモリに対して適用可能である。この方

式によって、量子情報処理に用いられる様々な二量子ビット操作（量子もつれ生成、ベル測定、パリティ検知測定など）が可能となる。現実的な装置に基づく遠隔非破壊パリティ測定を仮定したとしても、長距離量子通信（量子中継）が実行可能であることを示した。量子ビット間の距離は自由に選べるので、遠く離れた送信者と受信者の持つ量子ビット間のゲート操作だけでなく、チップ上に配置された量子ビット間距離を大きくしてデコヒーレンスを防ぐのにも利用できる。また、この方式が、非共鳴相互作用と透過率 T の光ファイバを用いる方式の中で原理的に最適な手法であることを見出した [*Physical Review A* 80, 060303 (R), 2009; 81, 022325, 2010]。

公募研究 01 「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」：

本研究では、適応的最尤推定法の強一致性および漸近有効性の検証実験を竹内グループ（北大/阪大）と共同で行っており、現在、「光子の位相パラメタの推定実験」で得られたデータを解析している。これまでに得られた成果は以下の通りである。1) 実験室で行う量子光学実験に先立ち、数値実験に基づく様々な予備検討を行った。特に、光子数 $n=3000$ までの適応的推定を $r=500$ 回繰り返す大規模なシミュレーションを行い、理論的に予測される強一致性が確かに成立していることをまず確認した。引き続き漸近有効性をチェックするために、得られた推定値の頻度分布に対して χ^2 検定を行ったところ、 $n=300$ ですでに理論的に予測されるガウス分布に有意水準 90%（すなわち理論からたった 10% ずれただけで棄却）という極端に厳しい基準でも適合していることが確認できた（図 1：左）。これは理論的に予測される漸近有効性がかなり早い段階で機能していることを意味する。さらにこの結果に基づき、推定値のリストからパラメタの期待値と分散の区間推定を行ったところ、 $n=300$ の段階ですでに信頼水準 70%（=有意水準 30%）の信頼区間に真値が入っていることが確認できた。以上の結果、および実験系の時間的安定性を考慮し、実験室で行う適応的推定実験のサイズを $(n, r) = (300, 500)$ に定めた。2) 1) で設計した実験に基づき、竹内研究グループにおいて、真のパラメタ値 $\phi_0 = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 78.3^\circ$ に対する適応的推定実験が行われた。現在、ここで得られた実験データを詳しく分析しているところであるが、暫定的分析結果は以下の通り：まず、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 Fisher 情報量の逆数を分散とするガウス分布にかなり近づいていることが確認できた。具体的には $\phi_0 = 78.3^\circ$ の場合を除き、いずれも有意水準 10% の χ^2 検定に合格した（図 1：右）。引き続き、パラメタの期待値と分散の区間推定を行ったところ、分散については、いずれのパラメタ値においても理論値と良い一致を見た。具体的には $\phi_0 = 30^\circ$ の場合を除き、信頼水準 70% という厳しい基準の下で、信頼区間に理論値（Fisher 情報量の逆数）が入っていることが確認できた。一方、期待値については、各パラメタ値において、推定値が真値から $\pm 0.17 \sim 0.43$ の範囲でずれていた。信頼水準 99% の信頼区間はいずれも ± 0.1 より狭いので、この結果は何らかの系統誤差の存在を示唆しており、現在、この理由について検討を進めている。

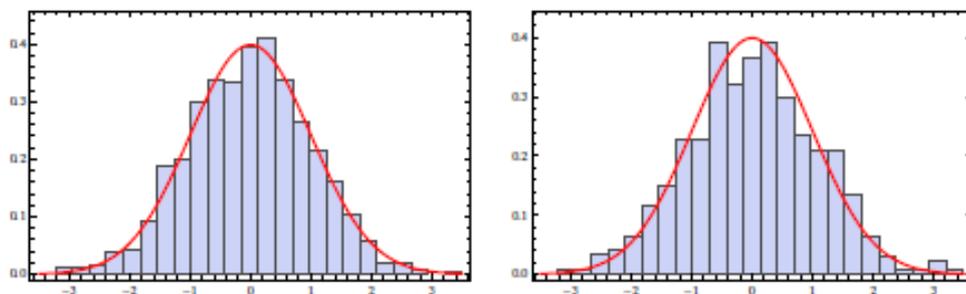


図 1：漸近有効性の検定：真値 $\phi_0 = 30^\circ$ に対するサイズ $(n, r) = (300, 500)$ の正規化された推定値データ（ヒストグラム）が、理論が予測する標準ガウス分布（赤い曲線）にどのくらい適合しているかを χ^2 検定した。左図は(期待値, 分散)=(真値, Fisher 情報量の逆数)で正規化した数値シミュレーション・データの検定であり、有意水準 90% でも棄却できないほど理論分布に適合している。一方、右図は(期待値, 分散)=(標本平均, Fisher 情報量の逆数)で正規化した実験データの検定であり、やはり有意水準 15% でも棄却できないほど適合している。

公募研究 02：「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」：

ここでは紙面の都合上、単一 Yb 原子に対する新しいタイプの射影測定技術を確立した実験成果について報告をしたいと思う。Yb 原子のボース凝縮体を生成した実験成果については割愛をする。Yb 原子の最大の特徴は、基底状態が 1/2 核スピンをもち、電子スピンの比べて、原理的には 1000 倍以上のコヒーレンス時間を獲得できる可能性を有する点にある。核スピンを用いて量子情報処理を行うためには、単一核スピンに対する射影測定が実行できることが不可欠となる。これまで我々は、

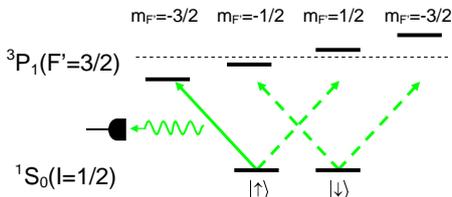


図 1 励起状態のゼーマンシフトを利用した単一核スピン射影測定

バイアス磁場をかけることで、3P1 励起状態にゼーマンシフトを誘起し、特定の遷移にのみ励起光が共鳴する状況を作ること、射影測定を実現していた(図 1)。

しかしこの方法は、核スピンのダウンのときにのみ蛍光が得られる方法であり、蛍光が得られなかったとき、核スピンのアップであったのか、それとも原子がそもそも共振器内に存在していなかったのかを弁別することが出来ない。射影測定量子効率はずでに 98%に至っており、蛍光観察の時間を増やすなどの単純な方法でこれを 100%までひきあげることも可能であろう。しかし量子効率が 100%に至ったとしても、上記の問題を回避することは出来ない。この問題は深刻で、例えばクラスター量子計算を遂行しようとした場合、あるサイトにたまたま欠陥があり、量子ビットに相当する原子が存在しなかったとしても、それを見抜くことができないことになってしまう。

我々は、アップ、ダウン、原子不在の 3つの状況を一度に弁別することが可能な新しい射影測定技術を確立すべく、以下のような実験を試みた(図 2)。

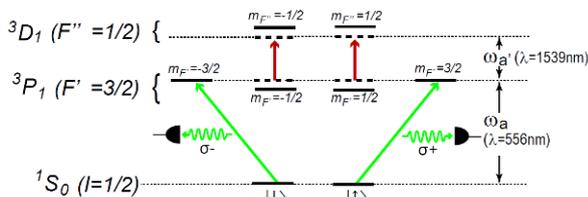


図 2 光シフトを利用した 2 mode cavity QED

Yb 原子の $^3P_1 \rightarrow ^3D_1$ 遷移から 200MHz 程度の離調をとったレーザーを、微小共振器中の原子に照射する。 3P_1 と 3D_1 の二つのエネルギー状態は、ともに GHz オーダーの超微細構造を有しているため、200MHz 程度の離調であれば、光シフトの核スピン依存性が残る。それゆえ図 2 のように、 3P_1 励起状態の特定のゼーマンサブレベルだけが光シフトを誘起することになり、基底状態のダウン、アップのそれぞれに対して、独立した cyclic な光学遷移を人工的に構築することができる。すなわち、

周波数が縮退し、偏光状態が分離した 2 mode の cavity QED を行うことが可能となるのである。

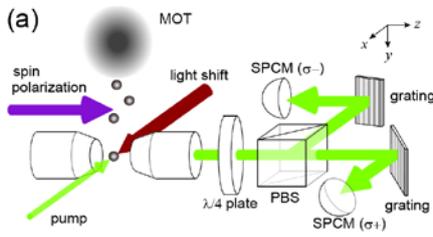


図 3 2 mode cavity QED の模式図

図 4 は、一回の測定につき、平均 1 個の原子が共振器と結合する状況で、蛍光カウントのヒストグラムをとった結果である。青と赤は、それぞれ互いに直交する円偏光基底に対する光子カウントに対応している。(a)と(b)は、それぞれ共振器に原子がはいる直前に、 $1S_0 \rightarrow ^1P_1$ 遷移と共鳴する円偏光の光 (399nm) を用いて、原子のスピンをそれぞれアップ、ダウンに準備した場合の結果である。毎回の測定ごとに、原子はランダムに共振器を通過するため、蛍光カウントに揺らぎが発生するが、その揺らぎ幅に埋もれない、明確なスピン依存性があらわれていることが理解される。光シフトを誘起するために使用したレーザーのパワーが、15mW と比較的低パワーであったため、十分な光シフトが得られず、大きな S/N を得るには至らなかったが、我々が発案した手法が実際に有効であることが実験的に示されたといつてよいだろう。

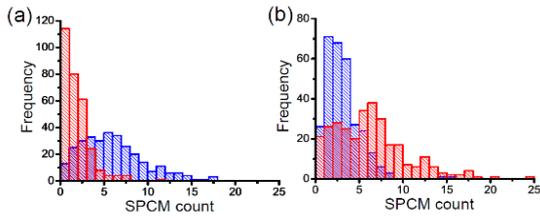


図4 単一核スピン射影測定の結果
 (a) アップに準備、(b) ダウンに準備
 赤と青は、直交する円偏光基底での測定結果に対応している。

公募研究 03：「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」：

○超伝導体と強磁性体の接合によるスピン励起の高精度測定の可能性

本研究では、量子ドットと超伝導体の混合量子系による量子ビットの提案を目指して、量子コヒーレンス観測の可能性を理論的に研究してきた。特に、電子のスピン状態と超伝導体の位相との結合から生まれる量子状態の活用が重要だと考えている。この観点から、超伝導体を強磁性体で隔てた「強磁性ジョセフソン接合」の研究を進めてきた。超伝導体の量子コヒーレンスが現れる電流電圧特性を記述するために、ジョセフソン電流、抵抗、コンデンサーからなる等価回路モデルが用いられる。強磁性ジョセフソン接合では帯電効果を無視し、電子スピンのコヒーレンスの観測に重点を置いた。

ジョセフソン接合にマイクロ波を照射すると、電流電圧特性にシャピロステップと呼ばれる構造が現われる。ステップが現われる電圧 V_n ($n=1, 2, 3, \dots$) は、外部から与えたマイクロ波の周波数 ω と $V_n = n(\hbar/2e)\omega$ で結ばれている。 \hbar はプランク定数、 e は電荷素量を表し、各々基本定数であり、電圧がマイクロ波の周波数のみで決まることになる。この関係を利用して世界の電圧標準が決められており、マイクロ波の周波数が 12 桁以上の高精度で制御が可能のため、電圧は 9 桁という驚異的な精度で規定することが出来る。同様な測定を、超伝導体を隔てている絶縁体（もしくは金属）を強磁性体で置き換えた系に適用すると、強磁性体に固有の共鳴周波数（強磁性共鳴） Ω_0 によって、 $V_n = (2n) (\hbar/2e) \Omega_0$ で決まる特徴的な電圧が現れる [Supercond. Sci. Technol. 24, 024008 (2011)] (図 1 (a))。

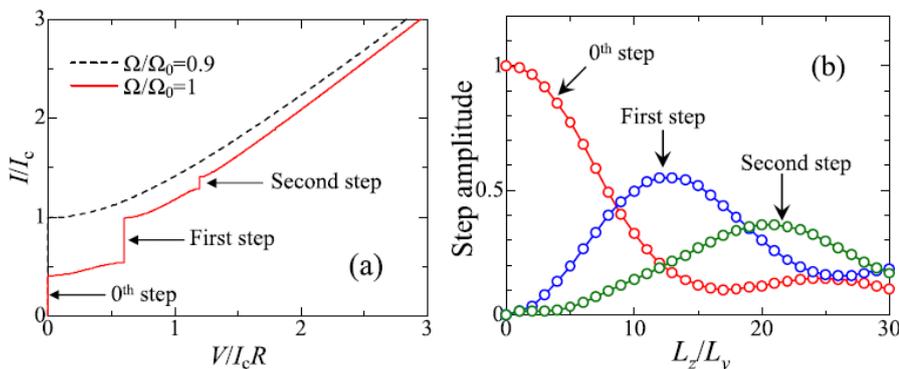


図 1

(a)の赤線は外場の周波数が強磁性共鳴周波数に一致した場合。ずれると点線のように、通常のジョセフソン接合で見られる電流電圧特性になる。(b)各ステップの大きさの接合形状への依存性。接合の断面が $L_z \times L_y$ で与えられるとし、その比の関数としてプロットしている。

各ステップではジョセフソン電流の直流成分が誘起され、その大きさは接合の形状に依存する(図 1 (b))。接合形状を上手く選ぶことで、原理的に強磁性共鳴を高精度で観測できることになる。これまでは、強磁性体は単一磁区で構成されていると考えたが、磁壁が入った場合についても類似の観測が可能であり、磁壁のダイナミクスを高精度で観測できる可能性がある。

一方、強磁性絶縁体を挟んだ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。接合は共振器として振舞い、共振モードと交流ジョセフソン電流の周波数が一致するとき、各共振モードに対してジョセフソン電流の直流成分が現れる(Fiske 共鳴)。強磁性絶縁体の場合は、接合内に励起された電磁場が磁化に作用しスピン波が励起されるため、複数の共鳴状態が現れる。図 2 に示すように、スピンのコヒーレンスはこの共鳴状態に反映される [J. Phys. Soc. Jpn. 80 Vol. 7 (2011) in

press]。強磁性金属の場合は、スピンの緩和が大き過ぎて共鳴状態が観測されないため、接合界面に絶縁層を挟んで間接的に観測しなければならない。この結果は、単一スピンつまり量子ドットの場合に発展させることができ、帯電効果も含めてスピンと超伝導のコヒーレンスの観測・制御の可能性を理論的に研究し、最終目標である量子ドットと超伝導体の混合量子系による量子ビットの提案を目指して研究を進めている。

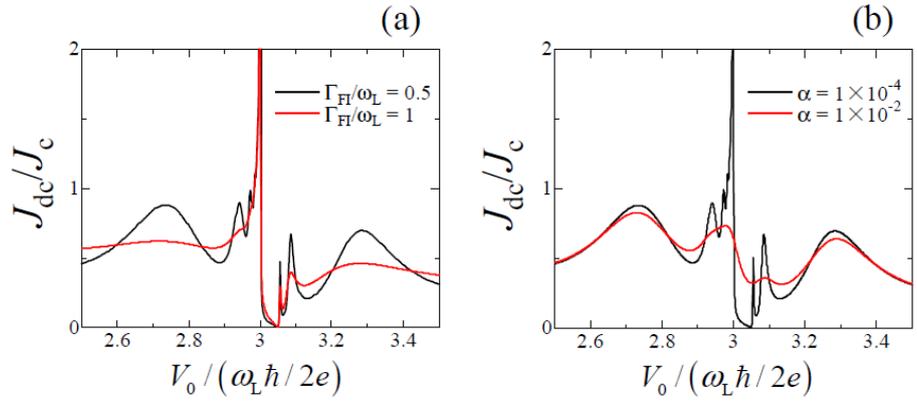


図 2

共鳴状態が現れる電圧 V_0 で観測される直流ジョセフソン電流 J_{dc} 。(a)の赤線は準粒子電流による緩和が大きい場合。(b)の赤線はスピンの回転緩和が大きい場合。

公募研究 04 「単一 NV 中心における他量子ビット化へ向けた研究」:

本研究ではダイヤモンド中の NV 中心を用いた多量子ビット化へ向けた研究を行っている。NV 中心の持つスピンは固体中のものとしては優れたスピンコヒーレンス特性を持つ。共焦点レーザー掃引顕微鏡と磁気共鳴装置を組み合わせたシステムを用いることにより、その単一スピンの操作と光学検出を室温で行うことができ、有力な量子ビット系として期待されている。

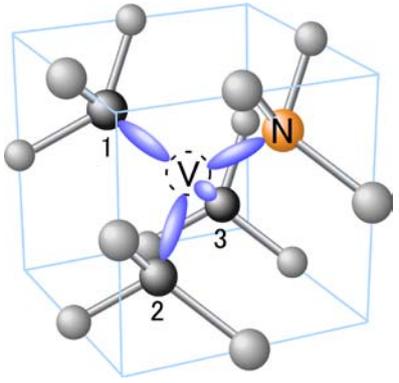


図 1、ダイヤモンド中の NV 中心. N は窒素原子でダイヤモンド格子中の炭素原子の置換位置に入っている. V は炭素原子が抜けた空孔 (V) である. 1-3 でラベルされた炭素原子が空孔からの最近接炭素原子と呼ばれている。

これまで我々は複数個の核スピンと NV 中心の持つ電子スピンによる複数量子ビット系において量子情報処理の実証研究を行ってきた。最近、図 1、ダイヤモンド中の複数の核スピンと電子スピンからなる単一 NV 中心の系において量子中継への応用のための単一スピンを用いた量子もつれ検出の研究を行い、量子もつれ検出に成功した。光子の干渉に基づく量子もつれ相関検出では部分的なベル測定が一般的であるが、一つのすべての状態を測定するベル測定が可能であることが示された。現在実験条件の最適化を行っている。

NV 中心の特徴として光によるスピンへのアクセシビリティを有する点も挙げられる。これから NV 中心が単一光子と単一スピンのインターフェースとしての役割を担う重要な素子源であると期待されている。我々は更なる展開として電荷と光のインターフェースとしての機能を NV 中心に新たに持たせることができるのではないかと考え、電流注入による単一光子発生の研究を行っている。最近、固体で室温では初となる電流注入による単一光子発生に成功した。図 2 に素子の模式図を示した。ダイヤモンド半導体を用いた試料は研究連携者である産業技術総合研究所のグループが研究代表者と議論を重ね試作を繰り返しながら作製したものである。単一の NV 中心を観測するには他に発光中心がない高品質な資料

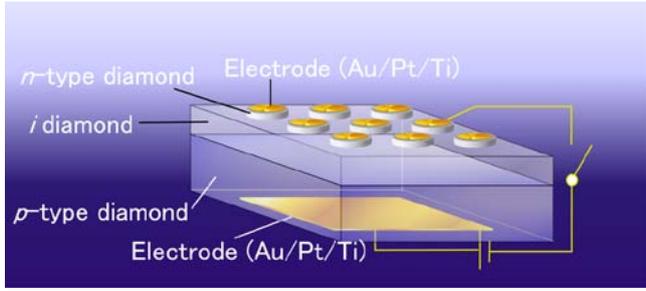


図 2 電流注入型ダイヤモンド単一光子発生素子

必要があり、不純物をドーピングした n, p 層においては測定が不可能であった。今回 p-i-n 構造を用い、高品質なアンドープ層(i 層)に NV 中心を生成させて、単一中心からの発光に成功した。単一中心からの発光であることは Hanbury-Brown-Twiss 干渉計による $\cdot \cdot$ 次相関関数の測定から決定した。

今回の成功は学術的な関心に加え、単一光子源としての期待や将来のスケールビリティ及び集積化に資する基盤技術として重要と考えている。現在 Science 誌に投稿して審査中で特許も出願予定である。

公募研究 05「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」:

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ている。我々は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、外部磁場に平行、あるいは反平行、に制御することに成功した。偏極方向は DC 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ことになる。この成果をまとめた論文は *Physical Review Letters* 誌に受理され出版の準備が進んでいる。また国内外において招待講演を受けた。

具体的には、2 重量子ドットのスピントロケード状態で観測されるリーク電流を検出プローブとし、特定の電子スピン核スピン散乱の時間的繰返しによりドット内の核スピンを一方方向へ偏極させ、さらに試料近傍に設置したコイルにより rf 帯の交流磁場を印加することで NMR の手法により偏極核スピンをコヒーレントに制御した。リーク電流が核スピン偏極に依存し変化することを利用し、NMR 制御の後、核スピン状態が再び初期化されるまでの時間を測定することで核スピン状態の検出を行う。電子スピン核スピン散乱に関わる電子スピン状態として、従来から可能であった $T+3$ 重項状態から 1 重項状態へのスピン散乱に加え、新たに $T-3$ 重項状態から 1 重項状態へのスピン散乱が可能になった。2 種の散乱を電圧で選択的に誘起することにより、核スピンの偏極方向を制御することが可能となった。

核の偏極方向は DC ソース・ドレイン電圧を変えるだけで選択可能であるため、前号で報告した秒オーダーの電圧スイッチによる核の偏極・検出に代わり、ミリ秒からナノ秒オーダーまでの短時間 DC パルス電圧を印加した場合に起こる偏極核スピンのダイナミクスに注目した研究を進めている。ある特定の条件の下では、素子に印加するソース・ドレイン電圧 V_p においてドット内の核スピンは外部磁場と同じ(平行)方向に偏極し、別の電圧 V_{ap} においては逆の(反平行)方向に偏極することがわかっている。そこでまず V_p を十分長い時間印加した、偏極が飽和した状態を初期状態とし、極短い時間 V_{ap} を印加した後で初期状態がどのように変化したかを調べた。 V_{ap} パルス印加時間を増やすと共に、核の偏極度が最大値から徐々に小さくなりやがて反平行方向へ反転するという一般的な予想に反し、初期状態にミリ秒程度の V_{ap} 電圧パルスを印加した場合において核の偏極度が 2 つの異なる値のいずれかを stochastic にとるという興味深い振る舞いを見いだした。現在詳細な解析を進めている。

素子作製に関して、本研究で調べる核スピン効果の試料依存性をさらに詳細に確認するため引き続き同様な試料の作成を行った。素子は従来作成してきた 2 つの独立ゲート電極を持つ素子のほか、4 つ独立ゲート電極を有しドットエネルギーの変調自由度がさらに高い素子の作成を行い、現在素子の基礎特定を評価している。

測定計の整備に関して、H23 年度設備備品費で導入した 1.5K インサート、温度コントローラーおよび DC 電圧キャリブレーター等からなる測定系を整備し、本研究に特化した冷凍機として稼働させた。

7. 研究成果の公表の状況

(1) 主な論文等一覧について 計 220 件 (Nature 系誌—4 件、Science—3 件、Physical Review Letters—26 件、Physical Review A—E—81 件、Proceedings of the National Academy of Science—1 件、New Journal of Physics—8 件、その他—97 件)

1. “Noise spectroscopy through dynamical decoupling with a superconducting flux qubit”, J. Bylander*, J.S. Tsai, et al, Nature Physics (2011) doi:10.1039/nphys1994
2. “Read-Time Observation of Discrete Andreev Tunneling Events”, V.F. Maisi*, J.S. Tsai, et al, Phys. Review Lett. 106, 217003(2011)
3. “Charge Transport through ultrasmall single and double Josephson junctions coupled to resonant modes of the electromagnetic”, Y.A. Pashkin*, J.S. Tsai, et al, Physical Review B83.020502(R). (2011)
4. “Observation of the Dynamical Casimir Effect in a Superconducting Circuit”, C.M. Wilson*, F. Nori, et al, (2011). [arXiv]
5. “Electrostatic models of electron-driven proton transfer across a lipid membrane”, A.Yu.* F. Nori, et al, Phys.: Condens. Matter 23, 234101 (2011)Invited article for a special issue
6. “Relativistic electron vortex beams: Angular momentum and spin-orbit interaction”, K.Y. Bliokh*, F. Nori, et al, (2011). [arXiv]
7. “Spatial Landau-Zener-Stückelberg interference in spinor Bose-Einstein condensates”, J.-N. Zhang*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 83, 033614 (2011)
8. “Quantum algorithm for simulating the dynamics of an open quantum system”, H. Wang*, F. Nori, et al, (2011). [arXiv]
9. “Stimulating uncertainty: Amplifying the quantum vacuum with superconducting circuits”, P.D. Nation*, F. Nori, et al, (2011). [arXiv]
10. “Dirac gap-induced graphene quantum dot in an electrostatic potential”, G. Giavaras*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B 83, 165427 (2011)
11. “Quantum noise in photothermal cooling”, S. De Liberato*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 83, 033809 (2011)
12. “Electronic properties of mesoscopic graphene structures: Charge confinement and control of spin and charge transport”, A.V. Rozhkov*, F. Nori, et al, Phys. Reports 503, 77 (2011)
13. “Sudden vanishing and reappearance of nonclassical effects: General occurrence of finite-time decays and periodic vanishings of nonclassicality and entanglement witnesses”, M. Bartkowiak*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 83, 053814 (2011)
14. “Excitation spectrum for an inhomogeneously dipole-field-coupled superconducting spin chain”, I. Hou*, F. Nori, et al, (2011). [arXiv]
15. “Indirect quantum tomography of quadratic Hamiltonians”, D. Burgarth*, F. Nori, et al, New J. Phys. 13, 013019 (2011)
16. “Characterizing optical chirality”, K.Y. Bliokh*, F. Nori, Phys. Rev. A 83, 021803 (2011)
17. “Geometric blockade in a quantum dot coupled to two-dimensional and three-dimensional and three-dimensional electron gases”, K. Yamada*, T. Ota, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Phys. Rev. B(RC) (accepted)
18. “Multiple two-qubit operations for a coupled semiconductor charge qubit”, T. Fujisawa*, T. Ota, et al, Physica E 43 (2011) 730.
19. “Control over single electron spins in quantum dots”, S. Tarucha*, Y. Tokura, Comprehensive Semiconductor Science and Technology (SEST), ed. Pallab Bhattacharya, Roberto Fornari and Hiroshi Kamimura, Elsevier (2011 Feb.).
20. “Level broadening effect in electron tunneling through double quantum dots with different g factors”, S.-M. Huang*, Y. Tokura, S. Tarucha, K. Ono, et al, Jpn J. Appl. Phys. 50 (2011) 04DJ02.
21. “Aluminum oxide for an effective gate in Si/SiGe two-dimensional electron gas system”, Y.-S. Shin*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Semicond. Sci. Technol. 26 (2011) 055004.
22. “Kondo effects and shot noise enhancement in a laterally coupled double quantum dot”, T. Kubo*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Phys. Rev. B. 83, 115310 (2011).
23. “Pauli Spin Blockade and Influence of Hyperfine Interaction in Vertical Quantum Dot Molecule with Six-electrons”, S. Amaha*, K. Ono, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, James A. GUPTA and David Guy AUSTING, J. Phys. Soc. Jpn. 80, (2011) 023701.
24. “Aharonov-Bohm oscillations changed by indirect interdot tunneling via electrons in parallel-coupled vertical double quantum dots”, T. Hatano*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Phys. Rev. Lett. 106, 076801 (2011).
25. “Phase and amplitude of Aharonov-Bohm oscillations in nonlinear three-terminal transport through a double quantum dot”, T. Kubo*, Y. Tokura, et al, Phys. Rev. B 83, (2011) 235310.
26. “Electrically tuned spin-orbit interaction in an InAs self-assembled quantum dot”, Y. Kanai*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, accepted for publication to Nature Nanotechnology.
27. “Electrically tuned g-tensor in an InAs self-assembled quantum dot”, R. S. Deacon*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, accepted for publication to Phys. Rev. B Rapid Commun.
28. “Indistinguishable photon pair generation using two independent silicon wire waveguide”, K. Harada*, Y. Tokura, et al, accepted for publication to New J. Phys.
29. “Electronic Stabilization Effect of a Spin-Delocalized Neutral Radical: Synthesis of an 8-Cyano-6-oxophenalenoxyl Derivative and Quantitative Evaluation of the Electronic Spin Structure in terms of Resonance Structures”, I. Takui, K. Nakasuji*, et al, 6, 1188-1196 (2011). (DOI: 10.1002/asia.201000793)
30. “Synthetic Organic Spin Chemistry for Structurally Well-Defined Open-Shell Graphene Fragments”, S. Suzuki*, I. Takui, et al, Nature Chemistry, 3, 197 - 2004 (2011). (DOI: 10.1038/NCHEM.985)

31. "Ab initio and DFT Studies of the Spin-Orbit and Spin-Spin Contributions to the Zero-Field Splitting Tensors of Triplet Nitrenes with Aryl Scaffolds" , K. Sato*, M. Kitagawa, T. Takui, et al, Phys. Chem. Chem. Phys., 13, 6970-6980 (2011). (DOI: 10.1039/c0cp02809f)
32. "ESR and H-, 19F-ENDOR/TRIPLE Study of Fluorinated Diphenylnitroxides as Synthetic Bus Spin-Qubit Radicals with Client Qubits in Solution" , S. Nakazawa*, M. Kitagawa, T. Takui, et al, J. Phys. Chem. Lett., 2, 449 - 453 (2011). (DOI:10.1021/jz101650z)
33. "Synthesis and Magnetic Properties of Dimethylmethylenbis(iminonitroxide) Diradical" , S. Suzuki*, T. Takui, et al, Chem. Lett., 40, pp.22-24 (2011). (DOI:10.1246/cl.2011.22)
34. "Organic Polyanionic High-Spin Molecular Clusters: Topological-Symmetry Controlled Models for Organic Ferromagnetic Metals" , S. Nakazawa*, T. Takui, et al, Phys. Chem. Chem. Phys., 13, 1424-1433 (2011). (DOI:10.1039/C0CP00730G)
35. "Quantum Degenerate Mixtures of Alkali and Alkaline-Earth-Like Atoms" , H. Hara*, Y. Takahashi, et al, Phys. Rev. Lett 106, 205304-1-4(2011)
36. "Generation of Dicke states using adiabatic passage" , K. Toyoda*, S. Urabe, et al, Physical Review A, 83, 022315, 2011.
37. "Detection of parametric resonance of trapped ions for micromotion compensation" , Y. Ibaraki*, S. Urabe, et al, Applied Physics B, to be published (online first).
38. "Measurement of the coherence time of the ground-state Zeeman states in 40Ca^+ " , S. Haze*, S. Urabe, et al, Appl. Phys. B to be published (online first).
39. "Phase shift spectra of a fiber-microsphere system at the single photon level" , S. Takeuchi*, et al, OPTICS EXPRESS, vol.19, no. 3, pp.422-431 (2011)
40. "Quantum lithography under imperfect conditions: effects of loss and dephasing on two-photon interference fringes" , S. Takeuchi, K. Sasaki*, et al, Journal of the Optical Society of America B, vol.28, no.3, pp422-431 (2011)
41. "Optical transmittance degradation in tapered fibers" , S. Takeuchi*, et al, OPTICS EXPRESS(OSA), vol.19, no.9, pp8596-8601 (2011)
42. "Detection of superposition in the orbital angular momentum of photons without excess components and its application in the verification of non-classical correlation" , Y. Miyamoto*, S. Takeuchi, et al, Journal of Optics, vol.13 (2011)
43. "Realization of a Knill-Laflamme-Milburn controlled-NOT photonic quantum circuit combining effective optical nonlinearities" , S. Takeuchi*, et al, Proceedings of the National Academy of Sciences, in press (2011)
44. "Efficient decoherence-free entanglement distribution over lossy quantum channels" , R. Ikuta*, T. Yamamoto, M. Koashi, et al, Phys. Rev. Lett. Vol.106, 110503 (2011)
45. "Optimal local expansion of W states using linear optics and Fock states" , R. Ikuta*, T. Yamamoto, M. Koashi, et al, Phys. Rev. A Vol.83, 012314 (2011)
46. "Microwave-induced supercurrent in a ferromagnetic Josephson junction" , S. Hikino*, M. Mori, et al, Supercond. Sci. Technol. 24, 024008 (2011).
47. "Voltage-Selective Bidirectional Polarization and Coherent Rotation of Nuclear Spins in Quantum Dots" , R. Takahashi*, S. Tarucha, K. Ono, et al, Phys. Rev. Lett. In press.
48. "Enhancement of Rashba coupling in vertical In_{0.05}Ga_{0.95}As/GaAs quantum dots" , T. Koderama*, K. Ono, et al, Phys. Rev. B. In press.
49. "Singlet-triplet mixing due to g-factor mismatch in double quantum dot" , R. Takahashi*, S. Tarucha, K. Ono, et al, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 04DJ03 (2011).
50. "Level broadening effect in electron tunneling through double quantum dots with different g factors" , S.M. Huang*, Y. Tokura, S. Tarucha, K. Ono, et al, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 04DJ02 (2011).
51. "Deterministic photon-photon $\sqrt{\text{SWAP}}$ gate using a Λ system" , K. Koshino*, et al, Phys. Rev. A. 82, 010301(R) (2010).
52. "Environment-assisted tunneling as an origin of the dynes density of states" , J.P. Pekola*, J.S. Tsai, et al, Phys. Rev. Lett. 105, 026803(2010)
53. "Detection of mechanical resonance of a single-electron transistor by direct current" , Y.A. Pashkin*, J.S. Tsai, et al, Applied Physics Letters 96, 263513(2010). [arXiv]
54. "Damping in high-frequency metallic nanomechanical resonators" , F. Hoehne*, J.S. Tsai, et al, Phys. Rev. B. 81, 184112 (2010). [arXiv]
55. "Electromagnetically induced transparency on a single artificial atom" , A.A. Abdumalikov*, J.S. Tsai, et al, Phys. Rev. Lett. 104, 193601 (2010)
56. "Ultimate On-Chip Quantum Amplifier" , O. Astafiev*, J.S. Tsai, et al, Phys. Rev. Lett. 104, 183603 (2010)
57. "Correlated flux noise and decoherence in two inductively coupled flux qubits" , F. Yoshihara*, J.S. Tsai, et al, Phys. Rev. B. 81, 132502 (2010)
58. "Toward a superconducting quantum computer Harnessing macroscopic quantum coherence" , J.S. Tsai*, Proceedings of the Japan Academy Series B vol.86 No.4 (2010)
59. "Quantum Computers" , J. L. O'Brian*, et al, Nature, vol. 464 (2010)
60. "Resonance Fluorescence of a Single Artificial Atom" , O.V. Astafiev*, J.S. Tsai, et al, Science, vol. 327 (2010)
61. "Preferential diagonal penetration of vortices into square superconducting networks" , T. Tamegai*, J.S. Tsai, et al, Physica C (2010).
62. "Multiqubit tunable phase gate of one qubit simultaneously controlling n qubits in a cavity" , C.-P Yang*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 82, 062326 (2010)
63. "Graphene quantum dots formed by a spatial modulation of the Dirac gap" , G. Giavaras*, F. Nori, Applied

- Physics Letters 97, 243106 (2010)
64. "Electrostatic models of electron-driven proton transfer across a lipid membrane", A.Yu. Smirnov*, F. Nori, et al, (2010). [arXiv]
 65. "Quantum dynamics of spatial decoherence of two atoms in a ring cavity", L. Zheng*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 82, 062106 (2010)
 66. "Measurement-based quantum phase estimation algorithm for finding eigenvalues of non-unitary matrices", H. Wang*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 82, 062303 (2010)
 67. "Control-free control: manipulating a quantum system using only a limited set of measurements", S. Ashhab*, F. Nori, Phys. Rev. A 82, 062103 (2010)
 68. "The transition from Quantum Zeno to anti-Zeno effects of a qubit in a cavity by modulating the cavity frequency", X. Gao*, F. Nori, et al, (2010). [arXiv]
 69. "Quantum spin squeezing", J. Ma*, F. Nori, et al, (2010). [arXiv]
 70. "Linear-time approach for quantum factoring, searching and NP-complete problems", H.T. Ng*, F. Nori, (2010). [arXiv]
 71. "Artificial photosynthetic reaction centers coupled to light-harvesting antennas", P.K. Ghosh*, F. Nori, et al, (2010). [arXiv]
 72. "Enhancing the critical current in quasiperiodic pinning arrays below and above the matching magnetic flux", Misko VR*, et al., PHYSICAL REVIEW B, 82, 18, 184512, 2010
 73. "Dynamical Casimir effect in superconducting microwave circuits", Johansson JR*, et al., Phys. Rev. A, 82, 5, 052509, 2010
 74. "Using superconducting qubit circuits to engineer exotic lattice systems", Tsomokos DI*, Nori F, et al, Phys. Rev. A, 82, 5, 052311 2010
 75. "Distinguishing Quantum and Classical Transport through Nanostructures", Lambert N*, et al., Phys. Rev. Lett. 105, 17, 176801, 2010
 76. "Self-induced tunable transparency in layered superconductors", Apostolov SS*, et al., Phys. Rev. B. 82, 14, 144521, 2010
 77. "Quantum phase measurement and Gauss sum factorization of large integers in a superconducting circuit", Ng HT*, Nori F, Phys. Rev. A, 82, 4, 042317, 2010
 78. "Arbitrary control of coherent dynamics for distant qubits in a quantum network", Zheng SB*, Nori F, et al, Phys. Rev. A, 82, 4, 042327, 2010
 79. "Noise-spectroscopy of multiqubit systems: Determining all their parameters by applying an external classical noise", Savel'ev S*, et al., Chem. Phys. 375, 2-3, 180-183, 2010
 80. "Qubit-induced phonon blockade as a signature of quantum behavior in nanomechanical resonators", Liu YX*, et al., Phys. Rev. A, 82, 3, 032101, 2010
 81. "Dynamics and quantum Zeno effect for a qubit in either a low- or high-frequency bath beyond the rotating-wave approximation", Cao XF*, et al., Phys. Rev. A, 82, 2, 022119, 2010
 82. "Testing nonclassicality in multimode fields: A unified derivation of classical inequalities", Miranowicz A*, et al., Phys. Rev. A, 82, 1, 013824, 2010
 83. "Landau-Zener-Stueckelberg interferometry", Shevchenko SN*, Nori F, et al, PHYSICS REPORTS-REVIEW SECTION OF PHYSICS LETTERS, 492, 1, 1-30, 2010
 84. "Tunable electromagnetically induced transparency and absorption with dressed superconducting qubits", Ian H*, Nori F, et al, Phys. Rev. A, 81, 6, 063823, 2010
 85. "Phase gate of one qubit simultaneously controlling n qubits in a cavity", Yang CP*, Nori F, et al, Phys. Rev. A, 81, 6, 062323, 2010
 86. "Testing quantum contextuality with macroscopic superconducting circuits", Wei LF*, et al., Phys. Rev. B, 81, 17, 174513, 2010
 87. "Robust and scalable optical one-way quantum computation", Wang HF*, Nori F, et al, Phys. Rev. A, 81, 5, 052332, 2010
 88. "Scalable quantum computation via local control of only two qubits", Burgarth D*, et al., Phys. Rev. A, 81, 4, 040303, 2010
 89. "Controlling the transport of single photons by tuning the frequency of either one or two cavities in an array of coupled cavities", Liao JQ*, et al., Phys. Rev. A, 81, 4, 042304, 2010
 90. "Qubit-oscillator systems in the ultrastrong-coupling regime and their potential for preparing nonclassical states", Ashhab S*, Nori F, Phys. Rev. A, 81, 4, 042311, 2010
 91. "Using Superconducting Qubit Circuits to Engineer Exotic Lattice Systems", D. I. Tsomokos*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 82, 052311 (2010)
 92. "Enhancing the critical current in quasiperiodic pinning arrays below and above the matching magnetic flux", V.R. Misko*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B 82, 184512 (2010)
 93. "Dynamical Casimir effect in superconducting microwave circuits", J.R. Johansson*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 82, 052509 (2010)
 94. "Equivalence condition for the canonical and microcanonical ensembles in coupled spin systems", W. Zhang*, F. Nori, et al, Phys. Rev. E 82, 041127 (2010)
 95. "Arbitrary control of coherent dynamics for distant qubits in a quantum network", S.-B. Zheng*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 82, 042327 (2010)
 96. "Self-induced tunable transparency in layered superconductors", S.S. Apostolov*, F. Nori, et al, Phys. Rev. E 82, 041127 (2010)
 97. "Spin Oscillations in Antiferromagnetic NiO Triggered by Circularly", T. Satoh*, F. Nori, et al, Phys. Rev. Lett. 105, 077402 (2010)
 98. "Testing nonclassicality in multimode fields: a unified derivation of classical inequalities", A.

- Miranowicz*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 82, 013824 (2010)
99. "Tunable electromagnetically induced transparency and absorption with dressed superconducting qubits", H. Ian*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 81, 063823 (2010). [arXiv]
 100. "Phase gate of one qubit simultaneously controlling n qubits in a cavity or coupled to a resonator", C.P Yang*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 81, 062323 (2010)
 101. "Robust and scalable optical one-way quantum computation", H. Wang*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 81, 052332 (2010)
 102. "Testing quantum contextuality with macroscopic superconducting circuits", L.F. Wei*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B 81, 174513 (2010)
 103. "Surface Josephson Plasma Waves in Layered Superconductors above the Plasma Frequency: Evidence for a Negative Index of Refraction", V.A. Golick*, F. Nori, et al, Phys. Rev. Lett. 104, 187003 (2010)
 104. "Scalable quantum computation via local control of only two qubits", D. Burgarth*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 81, 040303(R) (2010)
 105. "Qubit-oscillator systems in the ultrastrong-coupling regime and their potential for preparing nonclassical states", S. Ashhab*, F. Nori, Phys. Rev. A 81, 042311 (2010)
 106. "Controlling the transport of single photons by tuning the frequency of either one or two cavities in an array of coupled cavities", J.Q. Liao*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 81, 042304 (2010)
 107. "Landau-Zener-Stueckelberg interferometry", S.N. Shevchenko*, F. Nori, et al, Phys. Reports 492, 1 (2010). [arXiv]
 108. "Tunable electronic transport and unidirectional quantum wires in graphene subjected to electric and magnetic fields", Y. P. Bliokh*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B 81, 075410 (2010) [arXiv]
 109. "Sudden vanishing of spin squeezing under decoherence", X. Wang*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A 81, 022106 (2010) [arXiv]
 110. "Layered superconductors as negative-refractive-index metamaterials", A.L. Rakhmanov*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B 81, 075101 (2010) [arXiv]
 111. "Quantum emulation of a spin system with topologically protected ground states using superconducting quantum circuits", J.Q. You*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B 81, 014505 (2010) [arXiv]
 112. "Terahertz Josephson plasma waves in layered superconductors: spectrum, generation, nonlinear, and quantum phenomena", S. Savel'ev*, F. Nori, et al, Rep. Prog. Phys. 73, 026501 (2010) [arXiv]
 113. "Geometric Stochastic Resonance", S.E. Savel'ev*, F. Nori, et al, Phys. Rev. Lett. 104, 020601 (2010)
 114. "Single-photon detection using magnesium diboride superconducting nanowires", H. Shibata*, Y. Tokura, et al, Appl. Phys. Lett. 97, 212504 (2010).
 115. "Nano-fabrication processes for magnesium diboride", H. Shibata*, Y. Tokura, et al, Physica C 470, 51005-51006 (2010).
 116. "Anisotropy of the spin-orbit interaction in a single InAs self-assembled quantum dot", S. Takahashi*, S. Tarucha, Y. Tokura, et al, Kotaibutsuri (Solid State Physics) 45 (9), 41 (2010) (in Japanese).
 117. "Electrical control of spin qubits in quantum dots", Y. Tokura*, Kotaibutsuri (Solid State Physics) 45 (9), 29 (2010) (in Japanese).
 118. "Comparison of timing jitter between NbN superconducting single-photon detector and avalanche photodiode", H. Shibata*, Y. Tokura et al, Physica C 470 (2010) 1534-1537.
 119. "Dephasing in an Aharonov-Bohm interferometer containing a lateral double quantum dot induced by coupling with a quantum dot charge sensor", T. Kubo*, Y. Tokura, S. Tarucha, J. Phys. A:Math. Theor. 43, 354020 (2010).
 120. "Transport properties of two laterally coupled vertical quantum dots in series with tunable inter-dot coupling", T. Hatano*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Appl. Phys. Lett. 97, 062108 (2010).
 121. "Triple quantum dot device specially designed for implementing three spin qubits", T. Takakura*, S. Tarucha, et al, Appl. Phys. Lett. (2010).
 122. "Large anisotropy of spin-orbit interaction in a single InAs self-assembled quantum dot", S. Takahashi*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Phys. Rev. Lett. 104, 246801 (2010)
 123. "Coherent level mixing in dot energy spectra measured by magnetoresonant tunneling spectroscopy of vertical quantum dot molecules", C. Payette*, S. Tarucha, et al, Phys. Rev. B 81, 245310 (2010)
 124. "Voltage Switching Technique for Detecting Nuclear Spin Polarization in a Quantum Dot", R. Takahashi*, S. Tarucha, K. Ono, et al, Japanese J. Appl. Phys. 49, 04DJ07 (2010)
 125. "Slow and Fast Electron Channels in a Coherent quantum Dot Mixer", G. Austing*, S. Tarucha, et al, Japanese J. Appl. Phys. 49, 04DJ03 (2010)
 126. "Spin bottleneck in resonant tunneling through double quantum dots with different Zeeman splitting", S. M. Huang*, Y. Tokura, S. Tarucha, K. Ono, et al, Phys. Rev. Lett. 104, 136801 (2010)
 127. "Entanglement generation using silicon photonic wire waveguide", H. Takesue*, Y. Tokura, et al, Nanotechnol. Vol. 10, 1814-1818 (2010) (invited paper).
 128. "Entanglement generation using silicon wire waveguide", H. Takesue*, Y. Tokura, et al, Optics and Spectroscopy, vol. 108, 160 (2010)
 129. "Quantum interference and Kondo effects in an Aharonov-Bohm-Casher interferometer containing a laterally coupled double quantum dot", T. Kubo*, Y. Tokura, S. Tarucha, Physics Procedia vol. 3, 1225 (2010).
 130. "Wide-band capacitance measurement on a semiconductor double quantum dot for studying tunneling dynamics", T. Ota*, K. Muraki, et al, Appl. Phys. Lett. 96, 032104 (2010)
 131. "Frequency and Polarization Characteristics of Correlated Photon-Pair Generation Using a Silicon Wire Waveguide", H. Takesue*, Y. Tokura, et al, IEEE J. Selected : Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 16, 325 (2010).
 132. "Spin-polarized electric currents in quantum transport", O. Entin-Wohlman*, Y. Tokura, et al, Phys. Rev.

- B, vol. 81, 075439 (2010). [arXiv]
133. "Selective Addressing of Single Electron Spins in a Semiconductor Double Quantum Dot Integrated with a Micro-Magnet", T. Obata*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, AIP Conf. Proc., 1199, 381 (2010).
 134. "Coherent manipulation of individual electron spin in a double quantum dot integrated with a micromagnet", T. Obata*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Phys. Rev. B, vol. 81 085317 (2010).
 135. "Single-spin readout in a double quantum dot integrated with a micromagnet", Y. -S. Shin*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Phys. Rev. Lett., vol. 104, 046802 (2010).
 136. "Kondo effect in a semiconductor quantum dot with a spin-accumulated lead", T. Kobayashi*, Y. Tokura, et al, Phys. Rev. Lett. 104, 036804 (2010).
 137. "Quantum spin transport in magnetic-field-engineered nano-structures", Y. Tokura*, S. Tarucha, et al, Physica E 42, 994-998 (2010)
 138. "Single Electron Addressing by using Photon-assisted-tunneling in a Double Quantum Dot including a Micro-Magnet", Y. -S. Shin*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Physica E 42, 825-829 (2010)
 139. "Effects of observation on quantum interference in a laterally coupled double quantum dot using a quantum dot charge sensor", T. Kubo*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Physica E 42 852-855 (2010)
 140. "Charge States of a Collinearly and Laterally Coupled Vertical Triple Quantum Dot Device", S. Amaha*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, Physica E 42, 899-901 (2010).
 141. "Spin filtering due to quantum interference in periodic mesoscopic networks", A. Aharony*, Y. Tokura, et al, Physica E 42, 629-833 (2010). (special volume as the proceedings from the FQMT08 conference). [arXiv]
 142. "Total compensation of pulse transients inside a resonator", Y. Tabuchi*, M. Kitagawa, et al, J. Magn. Reson. 204, 327-332 (2010).
 143. "2H-decoupling-accelerated 1H spin diffusion in dynamic nuclear polarization with photoexcited triplet electrons", M. Negoro*, M. Kitagawa, et al, J. Chem. Phys. 133, 155504 (2010).
 144. "Air-stable Curved pi-Radical Based on Corannulene: Dynamic Electronic-spin Structure Induced by Temperature-dependent Conformational Changes", T. Takui, K. Nakasuji*, et al, Chem., 63, 1627-1633 (2010). (DOI: 10.1071/CH10280)
 145. "Nitroxide-Substituted Nitronyl Nitroxide and Iminonitroxide", S. Suzuki*, T. Takui, et al, J. Am. Chem. Soc., 132, 15908-15910 (2010). (DOI:10.1021/ja107769z)
 146. "Hexaazaphenylene Derivatives: One-Pot Synthesis, Hydrogen-Bonded Chiral Helix, and Fluorescence Properties", S. Suzuki*, T. Takui, et al, Org. Lett., 12, 5036-5039 (2010). (DOI: 10.1021/ol102200v)
 147. "Alternating Covalent Bonding Interactions in a One-Dimensional Chain of a Phenalenyl-Based Singlet Biradical Molecule Having Kekule Structures", M. Uruichi*, T. Takui, et al, J. Am. Chem. Soc., 132, 14421-14428 (2010). (DOI:10.1021/ja1037287)
 148. "Spin-Orbit Contributions in High-Spin Nitrenes/Carbenes: A Hybrid CASSCF/MRMP2 Study of Zero-Field Splitting Tensors", K. Sato*, M. Kitagawa, T. Takui, et al, Chem. Phys. Chem., 11, 3146-3151(2010). (DOI: 10.1002/cphc.201000492)
 149. "A Bowl-Shaped ortho-Semiquinone Radical Anion: Quantitative Evaluation of the Dynamic Behavior of Structural and Electronic Features", T. Takui, K. Nakasuji*, et al, Angew. Chem. Int. Ed., 49, 6333-6337 (2010). (DOI:10.1002/anie.201002626)
 150. "Synthesis and Characterization of Teranthene: A Singlet Biradical Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Having Kekule Structures", D. Shiomi*, T. Takui, et al, J. Am. Chem. Soc., 132, 11021-11023 (2010). (DOI:10.1021/ja1049737)
 151. "Triple-Stranded Metallo-Helicates Addressable as Lloyd's Electron Spin Qubits", Y. Yakiyama*, M. Kitagawa, T. Takui, et al, Am. Chem. Soc., 132, 6944-6946 (2010). (DOI:10.1021/ja102030w)
 152. "Noncovalent Assembly of TEMPO Radicals Pair-wise Embedded on a DNA Duplex", H. Atsumi*, M. Kitagawa, T. Takui, et al, Chem. Lett., 39, 556-557 (2010). (DOI:10.1246/cl.2010.556). Editor's Choice in Chemistry Letters
 153. "Three-Dimensional Intramolecular Exchange Interaction in a Curved and Nonalternant π -Conjugated System: Corannulene with Two Phenoxy Radicals", T. Takui, K. Nakasuji*, et al, Angew. Chem. Int. Ed., 49, pp.1678-1682 (2010). (DOI:10.1002/anie.200906666)
 154. "Programmed Assembly of Organic Radicals on DNA", K. Maekawa*, M. Kitagawa, T. Takui, et al, Chem. Commun., 46, pp.1247-1249 (2010). (DOI:10.1039/b913061f)
 155. "Radical-substituted dihydrophenazine radical cation salts: Molecular packing structure and bulk magnetic property", Y. Masuda*, T. Takui, et al, Pure Appl. Chem., 82, 1025-1032 (2010). (DOI: 10.1351/PAC-CON-09-10-04)
 156. "Synthesis and Identification of A Trimethylenemethane Derivative π -Extended with Three Pyridinyl Radicals", K. Matsumoto*, T. Takui, et al, Organic Letters, 12, pp.836-839 (2010). (DOI:10.1021/ol902937k)
 157. "Realization of a SU(2)*SU(6) System of Fermions in a Cold Atomic Gas", S. Taie*, Y. Takahashi, et al, Phys. Rev. Lett 105, 190401-1-4 (2010. 11. 10)
 158. "Non-Abelian topological orders and Majorana fermions in spin-singlet superconductors", M. Sato*, Y. Takahashi, et al, Phys. Rev. B 82, 134521-1-28 (2010. 10. 18)
 159. "High-resolution laser spectroscopy of a Bose-Einstein condensate using the ultranarrow magnetic quadrupole transition", A. Yamaguchi*, Y. Takahashi, et al, New J. Phys. 12 103001-1-13 (2010. 10)
 160. "Submicron Spatial Modulation of an Interatomic Interaction in a Bose-Einstein Condensate", R. Yamazaki*, Y. Takahashi, et al, Phys. Rev. Lett 105, 050405-1-4 (2010. 7. 30)
 161. "Manipulation of Nonclassical Atomic Spin States", T. Takano*, Y. Takahashi, et al, Phys. Rev. Lett 104, 013602-1-4 (2010. 1. 5)
 162. "Quantum gate using qubit states separated by terahertz", K. Toyoda*, S. Urabe, et al, Physical Review A 81, 032322 (2010)

163. 「単一 40Ca^+ の準安定状態間の量子状態制御」, 土師慎介*, 占部伸二, et al, レーザー研究, Vol. 38, No. 8, pp. 512–516, 2010.
164. “Phase-locked light source with low-phase noise for manipulating terahertz-separated metastable states in 40Ca^+ ”, S. Haze*, S. Urabe, et al, Applied Physics B, Vol. 101, 547–552, 2010.
165. “Fiber-microsphere system at cryogenic temperatures toward cavity QED using diamond NV centers”, S. Takeuchi*, et al, Optics Express, vol. 18, No. 14, 15169 (2010)
166. “Nonlinear optical phase shift obtained from two-level atoms confined in a planar microcavity”, S. Takeuchi, K. Sasaki*, et al, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, vol. 107, 5, pp. 054310/1–054310/6 (2010)
167. “Analysis of experimental error sources in a linear-optics quantum gate”, S. Takeuchi*, et al, New Journal of Physics, vol. 12, pp. 43053–1–43053–17 (2010)
168. “Simple scheme for expanding photonic cluster states for quantum information”, S. Takeuchi, J.L. O’Brien*, et al, Journal of the Optical Society of America B, vol. 27, no. 6, pp. A181–A184 (2010)
169. “Demonstration of Local Expansion Toward Large-Scale Entangled Webs”, T. Tashima*, T. Yamamoto, M. Koashi, et al, Phys. Rev. Lett. Vol. 105, 210503 (2010)
170. “Tight bound on coherent-state-based entanglement generation over lossy channels”, K. Azuma*, M. Koashi, et al, Phys. Rev. A 81, 022325 (2010)
171. “Optimal entanglement generation for efficient hybrid quantum repeaters”, K. Azuma*, T. Yamamoto, M. Koashi, et al, Phys. Rev. A 80, 060303(R) (2009)
172. “Boosting up quantum key distribution by learning statistics of practical single-photon sources”, Y. Adachi*, T. Yamamoto, M. Koashi, et al, New J. Phys. 11, 113033 (2009)
173. “Quantum State Engineering using Single Nuclear Spin Qubit of Optically Manipulated Ytterbium Atom”, M. Kozuma*, et al, arXiv:1005.3584 (2010).
174. “Projective Measurement of a Single Nuclear Spin Qubit by Using Two-Mode Cavity QED”, M. Kozuma*, et al, Phys. Rev. Lett. 106, 160501 (2010).
175. “Single-nuclear-spin cavity QED”, M. Kozuma*, et al, Phys. Rev. A 81, 062308 (2010).
176. “Faraday rotation with a single-nuclear-spin qubit in a high-finesse optical cavity”, M. Kozuma*, et al, Phys. Rev. A 81, 042331 (2010).
177. “Enhanced pairing correlations near oxygen dopants in cuprate superconductors”, G. Khaliullin*, M. Mori, et al, Phys. Rev. Lett. 105, 257005 (2010)
178. “Voltage-Switching Technique for Detecting Nuclear Spins Polarization in a Quantum Dot, Jpn.”, S. Tarucha, K. Ono, et al, J. Appl. Phys. 49 04DJ07 (2010).
179. “Single charge detection of an electron created by a photon in a g-factor engineered quantum dot”, M. Kuwahara*, K. Ono et al, Appl. Phys. Lett. 96, 163107 (2010).
180. “Spin bottleneck in resonant tunneling through double quantum dots with different Zeeman splitting”, S.M. Huang*, Y. Tokura, S. Tarucha, K. Ono, et al, Phys. Rev. Lett. 104, 136801 (2010).
181. “Quantum spin transport in magnetic-field-engineered nano-structures”, Y. Tokura*, K. Ono, S. Tarucha, et al, Physica E 42, 994–998 (2010).
182. “Spin blockade and nuclear spin effect in a g-factor modulated vertical double quantum dot”, R. Takahashi*, S. Tarucha, K. Ono, et al, Physica E 42, 833–836 (2010).
183. “Single-electron spin resonance in a g-factor-controlled semiconductor quantum dot”, T. Kutsuwa*, K. Ono, et al, Physica E 42, 821–824 (2010).
184. “Single-Electronic Radio-Frequency Refrigerator”, S. Kafanov*, J.S. Tsai, et al, Phys. Rev. Lett., vol. 103 (2009)
185. “Power-dependent internal loss in Josephson bifurcation amplifiers”, M. Watanabe*, J.S. Tsai, et al, Phys. Rev. B., vol. 80 (2009)
186. “Potential barrier modification and interface states formation in metal-oxide-metal tunnel junctions”, H. Im*, J.S. Tsai, et al, Phys. Rev. B., vol. 80 (2009).
187. “Ultrastrong coupling regime of cavity QED with phase-biased flux qubits”, J. Bourassa*, et al, Phys. Rev. A., Vol. 80 (2009). [arXiv]
188. “Parallel pumping of electrons”, V.F. Maisi*, J.S. Tsai, et al, New J. Phys., Vol. 11 (2009). [arXiv]
189. “Noise-induced quantum coherence and persistent Rabi oscillations in a Josephson flux qubit”, A.N. Omelyanchouk*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B 80, 212503 (2009)
190. “Effective Hamiltonian approach to the Kerr nonlinearity in an optomechanical system”, Z.R. Gong*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A, vol. 80, 065801 (2009) [arXiv]
191. “Quantum Zeno switch for single-photon coherent transport”, L. Zhou*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A, vol. 80, 062109 (2009) [arXiv]
192. “Bell’s experiment with intra- and inter-pair entanglement: Single-particle mode entanglement as a case study”, S. Ashhab*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A, vol. 80, 062106 (2009)
193. “Detecting Bose-Einstein condensation of exciton-polaritons via electron transport”, Y.-N. Chen*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B, vol. 80, 235335 (2009) [arXiv]
194. “Cooling a magnetic resonance force microscope via the dynamical back-action of nuclear spins”, Y.S. Greenberg*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B, vol. 80, 214423 (2009) [arXiv]
195. “The information about the state of a charge qubit gained by a weakly coupled quantum point contact”, S. Ashhab*, F. Nori, et al, Phys. Scr., vol. T137, 014005 (2009) [arXiv]
196. “Noise-induced quantum coherence and persistent Rabi oscillations in a Josephson flux qubit”, A.N. Omelyanchouk*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B, vol. 80, 212503 (2009) [arXiv]
197. “High-Efficiency Energy Conversion in a Molecular Triad Connected to Conducting Leads”, A.Y. Smirnov*, F. Nori, et al, J. Phys. Chem. C., vol. 113, 21218 (2009)
198. “Universal existence of exact quantum state transmissions in interacting media”, L.A. Wu*, F. Nori, et

- al, Phys. Rev. A, vol. 80, 042315 (2009) [arXiv]
199. "Quantum chaos and critical behavior on a chip", N. Lambert*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B, vol. 80, 165308 (2009) [arXiv]
 200. "Quantum Simulators", I. Buluta*, F. Nori, Science, vol. 326, 108 (2009)
 201. "Drastic change of the Casimir force at the metal-insulator transition", E.G. Galkina*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B, vol. 80, 125119 (2009) [arXiv]
 202. "Detecting Bose-Einstein condensation of exciton-polaritons via electron transport", Y.-N. Chen*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B, vol. 80, 235335 (2009) [arXiv]
 203. "The information about the state of a qubit gained by a weakly coupled detector", S. Ashhab*, F. Nori, et al, New J. Phys., vol. 11, 083017 (2009) [arXiv]
 204. "Shape and wobbling wave excitations in Josephson junctions: Exact solutions of the (2+1)- dimensional sine-Gordon model", D.R. Gulevich*, F. Nori, et al, Phys. Rev. B, vol. 80, 094509 (2009)
 205. "Quantum football", F. Nori*, Science, vol. 325, 689 (2009)
 206. "Perfect function transfer and interference effects in interacting boson lattices", L.A. Wu*, F. Nori, et al, Phys. Rev. A, vol. 80, 012332 (2009) [arXiv]
 207. "Dynamical Casimir Effect in a Superconducting Coplanar Waveguide", M. Wilson*, F. Nori, Phys. Rev. Lett., vol. 103, 147003 (2009)
 208. "Indirect Hamiltonian identification through a small gateway", D. Burgarth*, et al, New Journal of Physics, vol. 11, 103019 (2009)
 209. "Transient current in spin blockade condition", Y. Tokura*, K. Ono, S. Tarucha, J. Phys.: Conf. Ser. 193 (2009) 012102.
 210. "Dynamical polarization effect of nuclear spin bath dragged by electron spin resonance in double quantum dot integrated with micro-", T. Obata*, Y. Tokura, S. Tarucha, et al, J. Phys.: Conf. Ser., 193 (2009) 012046.
 211. "Electron spin manipulation in quantum dot systems", Y. Tokura*, S. Tarucha, et al, Electron Spin Resonance and Related Phenomena in Low-Dimensional Structures, chap. 2, in the Topic in Applied Physics, Springer Vol. 115 Ed. Marco Fanciulli, (2009 September) ISBN-13:978-3540793649.
 212. "Diaminotriazine-substituted nitronyl nitroxide: a novel building block for organic magnets having multiple hydrogen bonding substituents as structure-determining supramolecular synthons", S. Suzuki*, T. Takui, et al, Cryst. Eng. Comm., 12, pp. 526-531 (2009). (DOI:10.1039/b909757k)
 213. "High-Spin Nitrene Fine-Structure ESR Spectroscopy in Frozen Rigid Glasses: Exact Analytical Expressions for the Canonical Peaks and A D-Tensor Gradient Method for Line-Broadening", D. Shiomi*, T. Takui, et al, App. Magn. Reson., 37, pp. 703-736 (2009). (DOI:10.1007/s00723-009-0056-9)
 214. "Random-Orientation High-Spin Electron Spin Resonance Spectroscopy and Comprehensive Spectral Analyses of the Quintet Dicarbene and Dinitrene with Meta-Topological Linkers: Origins of Peculiar Line-Broadening in Fine-Structure ESR Spectra in Organic Rigid Glasses", D. Shiomi*, T. Takui, et al, J. Phys. Chem. A, 113, pp. 9521-9526 (2009). (DOI:10.1021/jp9042717)
 215. "Ab initio Calculations of Spin-Orbit Contribution to the Zero-Field Splitting Tensors of $n\pi^*$ Excited States by the CASSCF Method with MRMP2 Energy Correction", K. Sato*, M. Kitagawa, T. Takui, et al, Chem. Phys. Lett., 477, pp. 369-373 (2009). (DOI:10.1016/j.cplett.2009.07.007)
 216. "A scalable quantum computer with ultranarrow optical transition of ultracold neutral atoms in an optical lattice", K. Shibata*, Y. Takahashi, et al, Applied Physics B 97, 753 (2009.9.12)
 217. "Line shapes of optical Feshbach resonances near the intercombination transition of bosonic ytterbium", M. Borkowski*, Y. Takahashi, et al, Phys. Rev. A 80, 012715-1-14 (2009.7.29)
 218. "Simultaneous magneto-optical trapping of lithium and ytterbium atoms towards production of ultracold polar molecules", M. Okano*, Y. Takahashi et al, Applied Physics B 98, 691 (2009.9.11)
 219. "Design and characterization of a planer trap", U Tanaka*, S. Urabe, et al, J. Phys. B, Vol. 42, No. 15, 154006, 2009.
 220. "Measurement and compensation of optical Stark shift for manipulating the terahertz-separated states in 40Ca^+ ", S. Haze*, S. Urabe, et al, Physical Review A80, 053408, 2009.
- 著書
1. 竹内繁樹、「線形光学素子を用いた量子計算 —そのしくみと最新状況—」、基礎からの量子光学—基礎理論から実用化に向けた取り組みまで、p 386—397、2009
 2. 竹内繁樹、「光量子回路の現状と展望」、強光子場科学研究懇談会、p14、2009.
 3. 竹内繁樹、「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」、エヌ・イー・エス、pp. 331-339, 2011.
- 解説
1. 竹内繁樹、「光量子回路の現状と展望 =光子を用いた量子コンピュータ、量子メトロロジーの実現に向けて=」、光アライアンス光技術の融合と活用のための情報ガイドブック、日本工業出版、20巻、10号、p15-20、2009.
 2. 竹内繁樹、「専門外の学問を学ぶこつ—情報系で物理が必要になったとき—」、電子情報通信学会誌、92巻、12号、p1076-1078、2009.
 3. 竹内繁樹、岡本亮、「光量子回路の実現—量子もつれ合いフィルター—」、応用物理、79巻、2号、p125-129、2010.

(2) ホームページについて

1. 領域ホームページ： 量子サイバネティクス <http://www.riken.jp/Qcybernetics/>
公表内容は以下の通りです。

- 領域概要 : 研究の特徴、目標の紹介
- 研究内容 : 各研究項目の代表者プロフィール、研究内容の紹介
- 組織概要 : 領域代表者、事務担当者、総括班メンバー、計画研究メンバーの紹介

- 論文／出版物： 本研究の成果である論文、解説、著書等を公表、ニュースレターの発行
 - 公募研究： 平成22年度公募研究採択課題・研究代表者の紹介
 - 領域融合ワークショップ： 目的、意義と、開催スケジュールを公開
 - 領域融合インターンシップ： 目的、意義と実績の紹介
 - 量子情報学生チャプター： 目的、意義と開催スケジュール、開催後のレポート等
 - 国民との科学・技術対話： 目的、意義と実績の紹介
- アクセス数： 177,189 (2009.9-2011.3)

2. 領域関係ホームページ：

- <http://www.riken.jp/r-world/research/lab/frontier-rs/quantum/coherence/index.html>
- http://www.qc.ee.es.osaka-u.ac.jp/~qc/index_j.html
- <http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/>
- <http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qip/index.html>
- <http://www.math.sci.osaka-u.ac.jp/~fujiwara/>
- <http://www.phys.titech.ac.jp/laboratory/kozuma.html>
- <http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/>
- <http://ultracold.t.u-tokyo.ac.jp/uedaERATO/kozuma/index-j.html>

(3) 公開発表について

- ・領域主催シンポジウム及びセミナー、開催場所、開催日（参加者数）
 - 第1回ワークショップ「量子情報処理用マイクロ波測定装置の開発」、NEC 筑波研、2010/10/25 (31名)
 - 第2回ワークショップ「量子推定論の基礎と進展」、阪大、2011/01/18 (22名)
 - 第3回ワークショップ「Quantum transport in biological systems」, and 「Sending a photon backwards in time」、阪大、2011/01/28 (37名)
 - 第4回ワークショップ「Surface code 量子誤り訂正」、阪大、2011/02/23-24 (24名)
 - 第5回ワークショップ「多様な物理系の量子光学：原子-光子強結合系」、京都、2011/03/22-23 (26名)
 - 第6回ワークショップ「超伝導磁束で捕捉する原子・原子で見る超伝導磁束」、阪大、2011/04/12 (40名)
 - 第7回ワークショップ「New Experi. Techniques in Quantum Measurement」、阪大、2011/04/22 (60名)
 - 第1回総括班会議、熱海、2009/10/21-22 (16名)
 - 第2回総括班会議、京都、2010/3/11 (8名)
 - 第3回総括班会議、京都、2010/8/5 (12名)
 - 第4回総括班会議、熱海、2010/12.9 (13名) 最先端 STL & アドバイザー会議との合同会議
 - 第5回総括班会議、京都、2011/6/29-30 (50名)
 - 量子情報処理プロジェクト全体会議、熱海、2010/12/8-11 (189名)
 - 量子情報関東学生チャプター（第7回/第8回/第9回/第10回/第11回/第12回）（各回40名～60名）
 - 量子情報関西学生チャプター（第8回/第9回/第10回）、（各回40名～60名）
 - 関東・関西合同学生チャプター研究会／サマースクール、京都、2011/8/13-17 開催予定
- ・関連シンポジウム
 - 日本物理学会 2011 年秋季大会シンポジウム「多様な物理系の量子制御と量子情報処理の科学」開催予定
- ・国内外講演 招待講演 計 121 件 その他講演（国際会議－182 件、国内会議－224 件）

1. Y. Nakamura, "Artificial atom in 1D open space", 75th annual meeting of the DPG and DPG spring meeting, TU Dresden campus, Dresden, 2011.3.18
2. Y. Pashkin, "Electric current standard based of counting single electrons", XV International symposium "Nanophysics and nanoelectronics" 2011, Russia, 2011.3.14-18
3. P. Billangeon, "Towards the implementation of a scalable coupling circuit for superconducting qubits", The third International workshop on dynamics and manipulation of quantum, 東京大学、本郷, 2011.2.14
4. Y. Nakamura, "Superconducting qubit as an artificial atom", ISNTT2011, NTT 厚木 R&D センター, 2011.1.11
5. Y. Pashkin, "Nanomechanics of the charge qubit", An international workshop on Quantum Physics of Low-dimensional systems and materials, Stellenbosch Institute for Advanced study, Stellenbosch, SA, 2011.1.3
6. J. S. Tsai, "Flux qubit in open superconducting transmission line", IWSSQC-4, Fudan University in Shanghai, 2010.12.14
7. 蔡 兆申, "Superconducting quantum computing-Overall plan and challenges", 最先端研究開発支援プログラム 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010, 熱海 ニューフジヤホテル, 2010.12.9
8. 中村 泰信, "Towards high-fidelity control of superconducting flux qubits", 最先端研究開発支援プログラム 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010, 熱海 ニューフジヤホテル, 2010.12.9
9. O. Astafiev, "Quantum optical effects in artificial atoms built on superconducting quantum bits", 23rd International symposium on superconductivity, Epochal Tsukuba, 2010.11.2

10. 中村 泰信, “人工原子としての超伝導量子ビット”, 第18回渦糸物理国内会議, 日本原子力研究開発機構システム計算科学センター, 2010.12.1
11. 中村 泰信, “超伝導量子ビット-電気回路上の量子力学”, 防衛技術シンポジウム2010, ホテルグランドヒル市ヶ谷, 2011.11.9
12. 吉原 文樹, “磁束量子ビットのラビ振動の緩和率測定による時差億ノイズの評価”, 日本物理学会, 大阪府立大学, 010.9.23
13. Y. Nakamura, “Strong coupling of an artificial atom to a continuum of one-dimensional electromagnetic modes”, AQIS'10, 東京大学、本郷, 2010.8.29
14. O. Astafiev, “Quantum optics on artificial quantum systems”, Nano Peter 2010, HTL Rossiya in St. Petersburg, Russia, 2010.6.27
15. O. Astafiev, “Quantum optics with artificial quantum systems”, MSFA-2010, Novosibirsk State Technical Univ. (Russia), 2010.6.24
16. Y. Pashkin, “Nanomechanics of a single-electron transistor”, MSFA-2010, Novosibirsk State Technical Univ. (Russia), 2010.6.21
17. 中村 泰信, “超伝導量子ビット-電気回路上の量子力学”, 第4回稲盛フロンティア研究講演会, 九州大学伊都キャンパス 稲盛ホール、福岡市, 2010.6.11
18. J. S. Tsai, “Macroscopic quantum scattering - quantum optics with Josephson qubit”, HANDAI Global COE & ICNDR, Osaka Univ. convention center (Suita city), 2010.6.4
19. Y. Nakamura, “Artificial atom in 1D open space”, Quantum Information processing with Spins and Superconductors (QISS2010), University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2010.5.17
20. Y. Nakamura, “Decoherence in superconducting flux qubits”, Coherence in superconducting Qubits (CSQ2010), San Diego, California (the Westin Gaslamp Circle), 2010.4.26
21. J.S. Tsai, “Quantum coherent behavior in macroscopic objects via superconducting devices”, Aalto physics colloquium, Aalto University (Helsinki University of Technology), 2010.4.16
22. Y. Pashkin, “Metallic high-frequency nanomechanical resonators”, Quantum cavities workshop, Montreal, 2010.4.10
23. Y. Nakamura, “Josephson junction qubits”, Crest 2010 Int'l symposium on Physics of Quantum Technology Tokyo, Japan(4/06-9), Hitotsubashi Memorial Hall, 2010.4.6
24. Y. Pashkin, “Nanomechanics in single-electron transistor”, Symposium the Nanophysics and Nanoelectronics symposium, Russia, 2010.3.15-19
25. Y. Nakamura, “Tutorial #3 Advances in Josephson Quantum circuits”, APS Physics - March Meeting 2010, Convention Center, Portland, Oregon, 2010.3.14
26. O. Astafiev, “Quantum optics on superconducting quantum systems”, Workshop on Quantum Physics using Superconducting Artificial Atoms and Nanomechanics, NTT 厚木 R&D センター, 2010.3.4
27. Y. Pashkin, “Conventional single-electron transistor as a detector of its nanomechanical motion, ICONN 2010 (2010 Int'l Conference on Nanoscience and Nanotechnology, Sydney convention and exhibition center Darling Harbour, Sydney, 2010.2.24
28. Y. Nakamura, “Superconducting Qubit in 1D Electromagnetic Environment”, 応用物理学会量子エレクトロニクス研究会, 軽井沢, 2010.1.8
29. J.S. Tsai, “Quantum Optics with Josephson Qubits”, The 3rd Int'l Workshop on solid-state quantum computing & the Hong Kong Forum on quantum control, University Hong Kong, 2009.12.12
30. Y. Nakamura, “Quantum Technologies: Information and Communication”, Waseda meeting on “Quantum Technologies: Information and communication”, Tokyo, Waseda, 2009.12.11
31. Y. Nakamura, “Superconducting Qubit in 1D Electromagnetic environment”, Int'l conference on Quantum Information and Technology, Tokyo, NII, 2009.12.4
32. Y. Nakamura, “Superconducting Qubit in 1D Electromagnetic environment”, Int'l conference on Quantum Information and Technology, Tokyo, NII, 2009.12.4
33. J. S. Tsai, “Interface dependent transport in superconducting tunnel junction devices”, 2009 East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE2009), Nanjing (China), 2009.10.14
34. Y. Nakamura, “Superconducting quantum bits and circuits”, The 9th International conference conference on materials and mechanisms of superconductivity, Tokyo, Keio Plaza HTL, 2009.9.11
35. F. Nori, X. Hu, “Atomic physics and quantum optics using circuits: An overview of recent results on superconducting qubits”, International Conference on Quantum Effects in Solids of Today (I-ConQuEST), New Delhi, India, 2010.12.
36. F. Nori, X. Hu, “Atomic physics and quantum optics using circuits: An overview of recent results on superconducting qubits”, 5th Asia Pacific Conference on Quantum Information Science, Taiyuan, China, 2010.8.23
37. F. Nori, “Phonon squeezed states: Quantum noise reduction in solids”, ICREA Workshop on Phonon Engineering 2010, Girona, Spain, 2010.5.26
38. K. Maruyama, “スピンチェーン端部へのアクセスのみによる全スピンへのフル量子制御”, 物性研短期研究会「外部場の時間操作と実時間物理現象」, Kashiwa, 2010.6.23
39. S. Tarucha, “Semiconductor nanostructures for quantum information processing”, ISSMD2011 Symposium on Semiconductor Materials and Devices, The Maharaja Sayajirao, University of Baroda, India, 2011.1.29
40. S. Tarucha, “Single and two-qubit gates for manipulating and detecting electron spin in quantum dots”, SPIN2010, Sao Paulo School of Advanced Science: Spintronics and Quantum Computation, Quality Anaca Hotel, Brazil, 2010.11.4
41. S. Tarucha, “Electrical Control of Spin-Orbit Effects in InAs Quantum Dots”, QNANO2011, Clarion Hotel Wisby, 2011.6.14
42. S. Tarucha, “Micro-magnet techniques for implementing spin qubits with quantum dots”, EIPBN2011, The

- 55th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication, JW Marriott Resort Las Vegas, USA, 2011.6.3
43. T. Takui, "A chemists' materials challenge: A few steps towards molecular spin quantum computers and quantum information processing", 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PACIFICHEM2010), Honolulu, Hawaii, USA, 2010.12.15-20
 44. T. Takui, "Further Steps towards the Implementation of Molecular Spin Quantum Computers and Possible Molecular Quantum Simulators", The Asia-Pacific EPR/ESR Symposium (APES2010), Jeju, Republic of Korea, 2010.10.10-14
 45. T. Takui, "A few steps toward molecular spin quantum computing and quantum information processing: pulse-based electron magnetic resonance spin technology and a chemists' materials challenge for synthetic spin qubits", V International Conference on HIGH-SPIN MOLECULES AND MOLECULAR MAGNETS and IV Russian-Japanese Workshop on "Open Shell Compounds and Molecular Spin Devices", Nizhny Novgorod, Russian Federation, 2010.9.6
 46. M. Kitagawa, T. Takui, et al, "A Few Steps towards the Implementation of Molecular Spin Quantum Computers: Pulse-Based Electron Magnetic Resonance Spin Technology", Joint Euromar 2010 and 17th ISMAR Conference (A WorldWide Magnetic Resonance 2010), Palazzo dei Congressi and Palazzo degli Affari, Florence, Italy, 2010.7.8
 47. M. Kitagawa, T. Takui, et al, "A Few Steps toward Molecular Spin Quantum Computing and Quantum Information Processing: Pulse-Based Electron Magnetic Resonance Spin Technology and A Chemists' Materials Challenge", International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials (Global COE Program) & Third International Conference on Nanospintronics Design and Realization, Osaka University, Osaka, Japan, 2010.6.3
 48. M. Kitagawa, "Hyperpolarized Hyper-precision Magnetic Resonance towards Molecular Spin Quantum Computation", CREST 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Tokyo, Japan, 2010.4.6
 49. T. Takui, "Pulse-based electron magnetic resonance spin technology and a chemists' materials challenge: A few steps towards molecular spin quantum computers and quantum information processing", The 43rd Annual International Meeting of the ESR Group of the RSC, Cardiff, UK, 2010.3.25
 50. Y. Takahashi, "Realization of an enlarged spin Symmetry of fermions in an atomic gas", 20th International Conference on Laser Spectroscopy ICOLS 2011, Aachen, Germany, 2011.5.30
 51. Y. Takahashi, "SU(6) Fermi system in an optical lattice", Quantum Magnetism in Ultracold Atoms, Haifa, Israel, 2011.5.17
 52. Y. Takahashi, "Realization of an SU(6) invariant Fermi system", APS March Meeting, Dallas, USA, 2011.3.24
 53. Y. Takahashi, "Quantum Simulation With Ultracold Two-Electron Atoms in an Optical Lattice, UCAM2011 ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules", Tokyo, 2011.1.26
 54. 高橋義朗, "先端光源を用いた冷却原子気体の精密計測と量子制御", レーザー学会学術講演会第31回年次大会, 電気通信大学, 2011.1.10
 55. 高橋義朗, "光格子中イッテルビウム原子で探究する新しい物理", 応用物理学会 量子エレクトロニクス研究会, 上智大学軽井沢セミナーハウス (長野県), 2010.12.16
 56. 高橋義朗, "光格子量子シミュレーターの開発", FIRST 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010, 熱海, 2010.12.11
 57. Y. Takahashi, "Fundamental Physics using Cold Ytterbium Atoms", 9th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Seoul, Korea, 2010.10.7
 58. S. Uetake, Y. Takahashi, "High-resolution laser spectroscopy of quantum gases using an ultra-narrow linewidth transition", 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, A3b-4, Toyama, 2010.9.22-26
 59. Y. Takahashi, "Quantum Simulation of Hubbard Model Using Ultracold Atoms in an Optical Lattice", Quantum Information Processing Summer School 2010, Okinawa, 2010.08.25
 60. Y. Takahashi, "Quantum Simulator Using Ultracold Two-Electron Atoms In an Optical Lattice", Advanced Photons and Science Evolution 2010, Osaka, 2010.6.14
 61. Y. Takahashi, "Ultracold ytterbium atoms in an optical lattice", 41st Annual Meeting of the Division of Atomic Molecular and Optical Physics, Houston USA, 2010.5.26
 62. Y. Takahashi, "Ultracold Fermi Gas of Ytterbium in an Optical Lattice", Ultracold Fermi Gas: Superfluidity and Strong-Correlation (USS-2010), Japan Atomic Energy Agency, Tokyo, 2010.5.15
 63. 向井 哲哉, "超伝導アトムチップ", 応用物理学会 量子エレクトロニクス研究会「冷却原子系で探求する新しい物理と極限的技術」, 上智大学軽井沢セミナーハウス (長野県), 2010.12.18
 64. 向井 哲哉, "中性原子を用いた量子情報処理", 第7回原子・分子・光科学 (AMO) 討論会, 2010.6.11
 65. Y. Takahashi, "Ultracold ytterbium in an optical lattice", Physics and Chemistry of Coherently Controlled Quantum Systems, Inuyama Hotel, Inuyama City, 2010.3.19
 66. Y. Takahashi, "Quantum simulator Using ytterbium", International Conference on Cold Ions and Atoms 2010 (ICCIA10), Kolkata, India, 2010.1.18
 67. 高橋義朗, "冷却原子を用いた凝縮系の量子シミュレーション", 量子エレクトロニクス研究会, 上智大学軽井沢セミナーハウス, 2010.1.8
 68. Y. Takahashi, "Neutral Atom Quantum Simulator and Quantum Computer", Symposium on Physical Realizations of Quantum Information Processing and Quantum Computation, Kinki University, 2009.12.21
 69. 高橋義朗, "光格子中冷却原子を用いた量子シミュレーション", 久保記念シンポジウム, 東京お茶ノ水, 2009.10.17
 70. Y. Takahashi, "Quantum Simulation Using Ytterbium Atoms", International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems 2009, Univ. of Tokyo, 2009.10.16
 71. 高橋義朗, "量子スピン集団の量子ノイズ制御", 量子ICT会議, 東京・四谷, 2009.10.2
 72. Y. Takahashi, "Quantum Simulator Using Ytterbium", International Workshop on Ultracold Group II

- Atoms :Theory and Applications, Maryland, USA, 2009.9.18
73. Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Mixtures of Ytterbium Atoms”, LENS-Tokyo Joint Workshop, Firenze, Italy, 2009. 9. 14
 74. Y. Takahashi, “Ultracold Ytterbium Atoms in an Optical Lattice”, International Conference on Bose-Einstein Condensation (BEC2009), San Feliu, Spain, 2009. 9. 9
 75. S. Urabe, et al, “Trapping, cooling and quantum state manipulation of 40Ca^+ ”, International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials Center and Osaka University Convention Center, Life Science Center and Osaka University Convention Center, 2010. 5. 30-6. 4
 76. S. Urabe, “Terahertz-separated qubit in trapped Ca^+ ions and rapid adiabatic passage method for quantum state manipulation”, Proceedings of 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, 2010. 4. 6-9
 77. 竹内繁樹, “量子情報光学とその応用”, 2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 2011. 3. 24-27
 78. 竹内繁樹、藤原正澄, “光子とダイヤモンド NV の高効率結合実験”, 領域融合ワークショップ「多様な物理系の量子光学：’原子’-光子強結合系”, 京都ハイアットリージェンシーホテル, 2011. 3. 22-23
 79. S. Takeuchi, et al, “Superconducting Nanowire Single Photon Detector System: Evaluation and Applications with Entangled Photon Pairs”, International Workshop on Advanced Functional Nanomaterials, Anna University, 2011. 2. 21-24
 80. S. Takeuchi, et al, “Optical quantum circuit combining tailored optical nonlinearities”, SPIE Photonics West 2011, The Moscone Center, 2011. 1. 22-27
 81. 竹内繁樹, “光量子回路の実現とその応用”, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 電気通信大学, 2011. 1. 9-10
 82. 竹内繁樹, et al, “モノサイクル量子もつれ光の実現と量子非線形光学の創成”, CREST「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」領域 研究状況報告会, JST ホール, 2011. 12. 19
 83. 竹内 繁樹, “光量子回路の実現とその応用”, 文部科学省「物質・デバイス領域共同研究拠点」複雑系数理とその応用に関するシンポジウム、北海道大学北キャンパス電子科学研究所, 2010. 11. 9
 84. 竹内 繁樹, “光子を用いた量子回路の実現と展望”, フロンティア研究センター講演会、徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部, 2010. 11. 4
 85. 竹内繁樹, “光子を操る—光量子回路の実現とその未来”, 第 71 回応用物理学学会学術講演会, 長崎大学文教キャンパス, 2010. 9. 14
 86. S. Takeuchi, et al, “Linear optics quantum circuits”, International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/Lasers, Applications, and Technologies 2010, Hotel Korston, 2010. 8. 23-27
 87. S. Takeuchi, et al, “How can we minimize errors in a linear-optics quantum gate?”, SPIE Optics+Photonics 2010, San Diego Convention Center, 2010. 8. 1-5
 88. S. Takeuchi, “Photonic quantum circuits and its application”, SONDERSEMINAR, Fakultät für Physik/LMU (Ludwig-Maximilians-Universität) Schellingstraße, 2010. 5. 28
 89. S. Takeuchi, “Photonic quantum circuits and its application”, Quantum2010 5th Workshop and memorial of Carlo Novero Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons / 3rd Italian Quantum information Science Conference IQIS 2010, I. N. R. I. M. Conference Hall (formerly IEN Galileo Ferraris), 2010. 5. 23-29
 90. 岡本亮, “2 光子量子干渉に基づく光量子ゲートの実現と光量子回路への展開”, 日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学津島キャンパス, 2010. 3. 20-23
 91. 竹内繁樹, “古典限界をうち破る—量子もつれ合いの計測への応用—”, 電子情報通信学会大会 2010 年総合大会、東北大学 川内キャンパス, 2010. 3. 16-19. 2010
 92. 竹内繁樹, “光量子回路の実現とアライアンス連携による展開”, 特別教育研究経費「附置研究所間連携事業」最終補正か報告会「新産業創造物質基盤技術研究センター」「ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス」, 東京国際フォーラム、2010. 3. 10
 93. 竹内繁樹, “量子もつれ光による新しい計測の可能性について”, 第 2 回 超高速時間分解光計測研究会～量子ダイナミクスと制御～, 浜松名鉄ホテル, 2010. 3. 5. 2010
 94. S. Takeuchi, “Photonic Quantum Circuits and its application”, SPIE Photonics West, The Moscone Center, 2010. 1. 23-28
 95. 竹内繁樹, “光量子計算・量子リソグラフィ—”, 応用物理学学会・量子エレクトロニクス研究会「量子情報の最前線と今後 10 年の展開」, 上智大学軽井沢セミナーハウス, 2010. 1. 8-10
 96. S. Takeuchi, “Linear Optics Quantum Computer”, Symposium on Physical Realizations Quantum Information Processing and Quantum Computation, 近畿大学, 2009. 12. 21-22
 97. 竹内繁樹, “光子を用いた量子回路の実現と展望”, 連続講演会「ナノフォトニクスと量子情報」, 電気通信大学, 2009. 12. 16-18
 98. Takeuchi, et al, “Realization of optical quantum circuits: an entanglement filter”, SPIE Optics + Photonics Quantum Communications and Quantum Imaging VII, San Diego Convention Center, 2009. 8. 2-6
 99. S. Takeuchi, “Realization of optical quantum circuits – an entanglement filter –”, 18th INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP (LPHYS’09), World Trade Center Barcelona, 2009. 7. 13-17.
 100. 竹内繁樹, “光子を用いた量子回路の実現と展望” 第 32 回素粒子原子核研究所セミナー, K E K (高エネルギー加速器研究機構)素粒子原子核研究所. つくば市, 2009. 7. 1.
 101. M. Koashi, “Distribution and manipulation of photonic entanglement resources”, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules (UCAM2011), Koshiba Hall, Univ. of Tokyo, Japan, 2011. 1. 26
 102. T. Yamamoto, “Protection of photonic quantum states via decoherence-free subspaces”, International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials (Global COE Program), Osaka Univ., Japan, 2010. 6. 4

103. 小芦雅斗, “量子暗号のセキュリティ理論”, 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「量子情報の最前線と今後10年の展開」, 上智大学軽井沢セミナーハウス, 2010.1.9
104. M. Koashi, “Security of Key Distribution and Complementarity in Quantum Mechanics”, The 4th International Conference on Information Theoretic Security (ICITS2009), Granship, Shizuoka, Japan, 2009.12.4
105. 小芦雅斗, “量子暗号理論から見た量子系の諸性質の定量的な理解”, 九州大学応用力学研究所平成21年度共同利用研究集会「非線形波動研究の現状と将来一次の10年への展望」, 九州大学, 2009.11.21
106. A. Fujiwara, “Toward experimental demonstration of adaptive quantum estimation”, University of Pavia, 2011.3.16
107. 上妻幹男, “軌道角運動量を利用した原子集団-単一光子間多次元エンタングルメント” 日立基礎研究所における個人講演会, 日立基礎研究所, 2011.3.9
108. M. Kozuma, et al, “Quantum State Engineering using Single Nuclear Spin Qubit of Optically Manipulated Ytterbium Atom”, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultra cold Atoms and Molecules (UCAM2011), Tokyo, 2011.1.24
109. 上妻幹男, “単一核スピン Cavity QED”, 量子エレクトロニクス研究会, 軽井沢, 2010.12.16
110. M. Kozuma, “Quantum information processing with single 1/2 nuclear spin of Yb atom in a high-finesse optical cavity”, 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Tokyo, 2010.4.8
111. M. Mori, “Possible mechanisms of enhanced pairing gap near apical and dopant oxygens in cuprate”, The 9th Asia Pacific Workshop on Materials Physics (APW2010), Hanoi, Vietnam, December. 2010.12.15
112. M. Mori, et al, “Enhanced pairing correlation near oxygens in cuprate”, Super-PIRE/REIMEI workshop, Knoxville, USA, 2010.10.28-31
113. M. Mori, et al, “Quantum transport in nano-structure of superconductor and ferromagnet”, ARW Workshop Hvar 2010, Hvar, Croatia, 2010.10.2-7
114. 水落憲和, “ダイヤモンドNV中心と量子情報”, ニューダイヤモンドフォーラム平成23年度第1回研究会, 東京大学駒場キャンパス, 2011.6.23
115. 水落憲和, “ダイヤモンド中の単一スピンコヒーレンス制御”, 2010年第32回スピンエレクトロニクス専門研究会「IV族スピントロニクス」, 京都大学, 2010.11.26
116. 水落憲和, “ダイヤモンド中の単一NV中心の高機能化・高特性化”, 第71回 応用物理学会学術講演会, 長崎大学, 2010.9.15
117. 水落憲和, “ダイヤモンドスピントロニクス”, 国際高等研究所 研究プロジェクト「ナノ物質量子相の科学」10年度第2回研究会, 京都, 2010.9.10-11
118. 水落憲和, “ダイヤモンド中の単一スピンコヒーレンス制御”, 東京大学物性研短期研究会「外部場の時間操作と実時間物理現象」, 東京大学物性研究所, 2010.6.22-23
119. K. Ono, “Voltage-selective bi-directional nuclear spin polarization in semiconductor quantum dot devices”, The 4th international workshop on solid state quantum computing, Fudan university, Shanghai, China, 2010.12.13-16
120. 大野圭司, “量子ドットにおける核スピン制御の進展”, 日本物理学会2010年秋期大会, 大阪府立大学, 2010.9.25
121. K. Ono, “Single electron spintronics with g-factor-tuned semiconductor”, 2010 HYU-RIKEN Collaboration Workshop, The Suites Hotel, Jeju, Korea, 2010.1.4-5

・新聞報道

- 2010.05.11 “量子工学素子を開発 超伝導の人工原子組み込む 理研・NEC 量子計算機へ応用” 日刊工業新聞
 2010.05.11 “超伝導人工原子組み込み光スイッチ 理研が開発” 化学工業日報
 2010.05.14 “量子の透過・捕獲 量子ドット制御し発見 理研” 日刊工業新聞

(4) 「国民との科学・技術対話」について

- (独)理化学研究所 和光研究所一般公開 於:(独)理化学研究所 鈴木梅太郎ホール
2011年4月23日(土)13:00~14:00
講演者:蔡 兆申 タイトル:量子の制御とコンピュータ
入場者数:140名、アンケート回答枚数:99枚(回収率70%)—男性89名、女性10名
アンケート結果:
①講演内容の理解 よく理解できた14人(14%)、普通50人(51%)
②講演の感想 面白かった49人(50%)、普通40人(40%)
③この講演で物理・科学への理解は深まった? はい64人(65%)、いいえ3人(3%)
④又このような講演を聞きたいですか? はい61人(62%)、いいえ2人(2%)
⑤コメント
—科学・物理が量子レベルまで、実際に実現できそうなことに大変驚いた (60代以上・男性)
—量子領域の可能性に触れた気がしました (2名:40代・男性、50代・男性)
—大変細かい作業(研究)の成果だと気づいた (40代・男性) ほか多数

- 連携特別授業 於:京都府南丹市立園部小学校 2011年2月24日(木)9:40~14:20
講演者:竹内 繁樹 タイトル:光のふしぎな性質をみつけよう
プログラム:2校時—6年2組26名、3校時—6年1組27名、4校時—6年3組27名
5校時—全体会 6年生80名、6校時—講演会
保護者へ資料配布:特別授業「光子のふしぎ」授業概要、講師プロフィール紹介、支援資金紹介
アンケート結果:(80名)
①授業はよくわかりましたか? よくわかった31人(39%)、だいたい分かった48人(60%)
②授業の感想 面白かった70人(88%)、普通10人(12%)
③理科にもっと興味が湧きましたか? はい56人(70%)、いいえ3人(4%)
④またこのような授業を受けたいですか? はい75人(94%)、いいえ3人(4%)
⑤児童のコメント
—将来研究してみたい
—光についてもっと知りたいと思った。今度は実験などもしてみたい。
園部小学校教諭のコメント:
—理科が面白い、楽しいと思える児童が増えた
—最先端の研究者と小学校の連携授業の足がかりとなった
—児童にとって身近なテーマ「光」で、興味、関心を持たせる事が出来た
*京都新聞(2月26日)関連記事掲載

- サイエンストーク(電子科学研究所一般公開) 於:北海道大学電子科学研究所
2010年6月5日(土)
講演者:竹内 繁樹 タイトル:光子の不思議と量子情報技術
アンケート結果(58名中)
①講演の感想 面白かった57人(98%)、どちらでもなし1人(2%)
②コメント
—初めてのことばかりでビックリビックリ!(50歳以上男性)
—身近な光の深さを知った。(10代男子中学生)
—大変刺激的でした。今後とも度々開いてください。(50代女性)

8. 研究組織と各研究項目の連携状況

本新学術領域の成功は、異なった物理系(超伝導回路、半導体量子ドット、分子、原子、イオン、光等)で出現する量子コヒーレンス状態制御の科学を融合的に進展させるかにかかわる。すでに研究項目間の直接の連携研究が進んでいる。例えば D01 班「光子量子回路による量子サイバネティクス」の竹内研究室グループと公募班 01「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」の藤原グループは共同で、適応的最尤推定法の強一致性と漸近有効性の検証実験を行っている。これは数学と物理学という異分野融合研究である光子の量子状態の新しい推定方法の実現も初期の実装に成功するなど、計画は極めて順調に推移している。また A02 班「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」の都倉研究チームと公募研究 05「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」の大野チームは連携し、半導体素子の低ノイズ・高速読み出し測定技術、高周波技術等を共有している。また 2 重ドット素子の電子状態等の数値計算を進めている。

C02 班「開放型イオントラップ系による量子情報処理」の占部グループは、D01 班「光子量子回路による量子サイバネティクス」の竹内研究室グループと、光ファイバーと開放型トラップとの結合の可能性を探るために、セミナーの実施や研究室訪問などを通じて情報交換を行っている。また C01 班「冷却原子を用いた量子制御」では、実験技術を共有し、研究の効率化を図るために、研究分担者のグループが研究代表者のグループを長期訪問する予定である。

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、光など研究グループ)間の横断的連携研究を図り、これらの研究グループ間の融合研究を促進する目的の「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設定した。以下がこれまでに開催したワークショップである。

第 1 回ワークショップ「量子情報処理用マイクロ波測定装置の開発」、NEC 筑波研 (2010/10/25)	31 名
第 2 回ワークショップ「量子推定論の基礎と進展」、阪大 (2011/01/18)	22 名
第 3 回ワークショップ「Quantum transport in biological systems」, and 「Sending a photon backwards in time」、阪大 (2011/01/28)	37 名
第 4 回ワークショップ「Surface code 量子誤り訂正」、阪大 (2011/02/23-24)	24 名
第 5 回ワークショップ「多様な物理系の量子光学：原子-光子強結合系」、京都 (2011/03/22-23)	26 名
第 6 回ワークショップ「超伝導磁束で捕捉する原子・原子で見る超伝導磁束」、阪大 (2011/04/12)	40 名
第 7 回ワークショップ「New Experi. Techniques in Quantum Measurement」、阪大 (2011/04/22)	60 名

また本領域内での連携を強化するため、「領域融合インターンシップ」制度を設けた。これは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る短期研修制度である。応募は研究代表者を通して行い、総括班の選考により人選を決める。これまでこの制度を使い交流したでインターンシップの実績をいかに示す：

<研修・派遣先：京都大学大学院理学研究科 高橋義朗研究室>

工位武治研究室、大阪市立大学大学院理学研究科博士課程 3 年生、野崎幹人 (2010/11/01~11/30)

工位武治研究室、大阪市立大学大学院理学研究科博士研究員、林信介 (2010/11/15~12/15)

<研修・派遣先：理化学研究所 (NEC グリーンイノベーション研究所内) 蔡 兆申研究チーム>

北川勝浩研究室、大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程 2 年生、田淵豊 (2011/2/1~3/18)

以下に各研究項目の研究題名と研究者の所属職氏名を示す：

計画研究

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)理化学研究所チームリーダー及び NEC 研究所 主席研究員

研究分担者 ノリ・フランコ、(独) 理化学研究所 チームリーダー
連携研究者

中村 泰信 (独) 理化学研究所 客員研究員及び NEC 研究所 主席研究員
山本 剛 (独) 理化学研究所 客員研究員
Pashkin Yuri (独) 理化学研究所、研究員
Astafiev Oleg (独) 理化学研究所、研究員
吉原 文樹 (独) 理化学研究所、基幹研究所研究員
猪股 邦宏 (独) 理化学研究所、基幹研究所研究員
Abdumalikov A. (独) 理化学研究所、基幹研究所研究員 2010.11 所属変更 (出国)
丸山 耕司 (独) 大阪市立大学大学院理学研究科、研究員 2011.4 所属変更
宮崎 利行 (独) 理化学研究所、基幹研究所研究員
Ng Ho-Tsang (独) 理化学研究所、客員研究員 2010.11 所属変更 (出国)
Sahel Ashhab (独) 理化学研究所、客員研究員
Billangeon P.M. (独) 理化学研究所、国際特別研究員
Sergey Kafanov (独) 理化学研究所、特別研究員
日高 睦夫 (財) 国際超伝導産業技術研究センター、室長
仙場 浩一 NTT 物性科学基礎研究所、チームリーダー

計画研究 A02 「半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送に関する研究」

研究代表者 都倉 康弘 NTT 物性科学基礎研究所、研究部長
研究分担者 樽茶 清悟 東京大学工学研究科、教授
太田 剛 NTT 物性科学基礎研究所、研究主任

連携研究者

山本 倫久 東京大学工学研究科、助教
藤澤 利正 東京工業大学 極低温物性研究センター、教授

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
研究分担者 工位 武治 大阪市立大学大学院理学研究科、特任教授

連携研究者

香川 晃徳 大阪大学大学院基礎工学研究科、助教
森田 靖 大阪大学大学院理学研究科、准教授
佐藤 和信 大阪市立大学大学院理学研究科、教授

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 京都大学大学院理学研究科、教授
研究分担者 向井 哲哉 NTT 物性科学基礎研究所、主任研究員

連携研究者

高須 洋介 京都大学大学院理学研究科、助教
平野 琢也 学習院大学理学部、教授

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

連携研究者

田中 歌子 大阪大学大学院基礎工学研究科、講師
豊田 健二 大阪大学大学院基礎工学研究科、助教
早坂 和弘 (独) 情報通信研究機構、主任研究員

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

連携研究者

岡本 亮 北海道大学電子科学研究所、助教

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附属光量子科学研究センター、教授

研究分担者 山本 俊 大阪大学基礎工学研究科、准教授 2011.4 より変更

平成22年度採択公募研究

研究項目 01：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 大阪大学理学研究科、教授

研究項目 02：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 東京工業大学大学院理工学研究科、准教授

(2011.4 で、JSPS 最先端次世代開発研究プログラムに採択された理由により終了)

研究項目課題 03：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 日本原子力研究開発機構、副主任研究員

研究項目 04：単一 NV 中心における他量子ビット化へ向けた研究

水落 憲和 大阪大学大学院基礎工学研究科、准教授

研究項目 05：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 独立行政法人理化学研究所、専任研究員

9. 研究費の使用状況

超伝導サイバネティクスでは、2009年に乾式希釈冷凍機を購入し、これを極低温でマイクロ波を導入できる実験に適用できるように整備し、研究を進めている。希釈冷凍機は超伝導量子ビットの研究には欠かせない環境を作り出す最も重要な設備である。この研究室ではすでに3代の希釈冷凍機を所有しているが、いずれも液体ヘリウムの注入を必要とする装置である。このたび購入した新型の乾式の装置は、その運用時に液体ヘリウムを注入する必要がなく、液体ヘリウムの購入費が大幅に節約でき、資源の節約にも寄与できているので、効率的に研究が進められている。また既存の素子作成設備等は十分活用して研究を進めている。

量子ドットの研究では、既存の設備を有効活用しつつ、量子もつれ光子対発生を利用した多体量子もつれ状態や雑音耐性を持つ量子通信に必要な光学部品等を購入し、実験に成功した。平成22年度には更なる多光子化を目指して高出力モードロックチタンサファイアレーザー及びビーム安定化システムを新規購入し、高効率かつ安定な光子対発生システムの構築を行った。これを利用して平成23年度より5光子以上を利用した量子情報処理実験を目指す。また、良質のPPLN導波路を購入し、これまでの可視光領域の光子対を通信波長領域で利用するための波長変換のシステムを構築した。

分子スピン量子サイバネティクスでは、量子化学計算の専門家を博士研究員として雇用することができ、日常的に精緻な分子設計やスピン物性の予測を合成実験に先行して行うことができ、研究推進に有効に働いている。

冷却原子の量子制御では、H21年度に、シングルモード直線偏光Ybファイバーレーザー（独国IPGLaser GmbH社製 YLR-100-LP）1台を、京都大学に配備し、これにより、加熱の効果を抑えて、長時間原子を閉じ込めることが可能になり、様々な量子相を実現するための超低温を生成するための準備が整い、実際、Yb原子とLi原子の同時量子縮退をこのレーザーを使って実現することに成功した。また、H21年度に、励起用全固体グリーンレーザ（米国Coherent Verdi-V10）1台をNTT物性科学基礎研究所に配備し、波長可変の高出力光源を生成する態勢を整い、様々な制御実験に現在、使用されている。

イオンとラップ研究では、H21年度、H22年度において主な実験設備として、連続発振チタンサファイアレーザー、EMCCD検出器、マイクロ波信号発生器を購入した。連続発振チタンサファイアレーザーはイオンのゲート操作の光源として、EMCCD検出器は微弱なイオンの蛍光画像撮像装置として、マイクロ波信号発生器はレーザーの位相同期用信号源として使用している。その他、平面イオントラップの試作開発、レーザー制御のための各種光学部品（ファラデーアイソレーター、AOM変調器、光検出器等）に研究費を使用している。

光系の研究（D01）では、現有設備であるフェムト秒レーザーシステム、フォトンカウンティングシステム等を最大限活用して実施している。また、寒剤（液体ヘリウム）の出費の削減を目ざし、大阪大学の液体ヘリウム回収システムを利用する際に規定上必要となる、使用後のヘリウムガスの純化設備の導入を進めている所である。

別の光の研究（D02）では、既存の設備を有効活用しつつ、量子もつれ光子対発生を利用した多体量子もつれ状態や雑音耐性を持つ量子通信に必要な光学部品等を購入し、実験に成功した。平成22年度には更なる多光子化を目指して高出力モードロックチタンサファイアレーザー及びビーム安定化システムを新規購入し、高効率かつ安定な光子対発生システムの構築を行った。これを利用して平成23年度より5光子以上を利用した量子情報処理実験を目指す。また、良質のPPLN導波路を購入し、これまでの可視光領域の光子対を通信波長領域で利用するための波長変換のシステムを構築した。

公募研究でも、光学素子、電子部品、光学顕微システム、各種部材、図書の購入、学会参加の旅費など、有効のそして順調に予算は使われている。

震災の影響でH24年度に繰越した予算が少額ながらある。

10. 今後の研究領域の推進方針

本領域では当初以下のような具体的な研究目標を掲げた：

- (1) 新規な量子系の量子制御・検出を実現、多ビット化を目指す。
- (2) 多様な物理系において包括的な量子コヒーレント状態の制御・検出の理学の創造。
- (3) 量子コンピューティングなどの応用を視野に入れた、異種量子系の関与した混合量子系の研究。

上記目標は既に部分的に達成されており、領域全般の進展は順調に進んでいる。超伝導サイバネティクスを例にとると、以下のように目標は達成された。(1)に関しては、複数の量子ビットを集積できる(スケーラブル)方式の提案、一次元空間におかれた量子ビットの状態の透過光による観測方法実現、量子非破壊読み出しの実現など。(2)に関しては、単一な人工原子(超伝導量子ビット)と共振器の強結合を実現し、新規な量子光学分野の開拓。(3)に関しては、超伝導量子ビットと光子の混合量子系を確立し、それと機械振動子と結合した系の研究を進めている。

また原子・イオン系の研究を例にとると、(1)に関しては、冷却原子スピン集団の量子非破壊測定の実現、およびその量子フィードバック制御による波束の収縮制御の実現。イオントラップでの高速断熱通過を用いた量子もつれ状態の発生、幾何学的位相制御による単一量子ビットの回転を実現。(2)に関しては、高いスピン自由度を持つ新規なフェルミ系を実現し、およびそれを駆使した新しい冷却法の開発。ボソンとフェルミオンからなる新規な2重モット絶縁体相の様々な量子相の生成。(3)に関しては、アルカリ原子とアルカリ土類系原子の混合量子系を世界で初めて実現し、その量子シミュレーションへの応用研究を進めている。また、超伝導アトムチップにより、超伝導と原子の混合量子系の研究を進めている。

光系の研究を例にとると、(1)に関しては、線形光学量子計算(Knill式)の基本となる光量子回路の世界初の実現に成功、微小球共振器とテーパー光ファイバの極低温下での結合に可視域で初めて成功。(2)に関連して、基本的な多体量子もつれ状態の制御法の提案と実証、一般的な量子情報を雑音から保護する手法の提案。(3)に関しては、光を媒介として多様な物質系 qubit を操作する汎用性の高い手法の研究を進めている。

上記のように、既に目標をいろいろ達成しつつ順調に研究は進んでいる。研究成果をさらに一歩進めるには、既に始まっている異分野連携研究をさらに進めることも重要である。そのために以下の活動を強化する：

○ 新学術領域内部での、連携、発展をより強化：

前記した「領域融合ワークショップ」、「領域融合インターンシップ」、総括班会議などの仕組みで更に連携を促進する。公募研究は、より分野を拡大し、「領域」としての拡がりをもたらし、かつ、計画研究、公募研究との連携が可能な研究を採択するように努力する。

より具体的には、分子スピン研究項目と超伝導研究項目の連携した、共振器と電子スピアンサンプルの強結合系の極低温実験、領域融合インターンシップで開始した超伝導と電子スピンの結合の研究を計画している。

○ 領域外の国内連携の強化：

国内学会でシンポジウムなどを企画し、研究交流を図る。既に今年の秋の物理学会で「多様な物理系の量子制御と量子情報処理の科学」と題したシンポジウムを企画した。

○ 国際的な連携の強化：

国際ワークショップの開催。これは類似分野のFIRSTプロジェクトなどとの共催を考えている。

1 1. 総括班評価者による評価の状況

2名の総括班評価者のコメントを以下に示す：

山本喜久教授（スタンフォード大学、NII）よりの評価：

本新学術領域研究は、超伝導回路素子、半導体量子ドット素子、合成分子スピン系、冷却中性原子、冷却トラップイオン、線形及び非線形光学素子にベースを置く我が国トップクラスの多分野の研究者がいわゆる“量子技術”の新しい融合領域の創成を目指して共同して研究にあたる挑戦的な試みである。領域代表者蔡兆申の目指す目標である、微視的量子系と巨視的量子系が融合した混合量子系の研究は的を射たものであり、量子力学と情報科学の境界領域で新たな科学基盤を作りだすものと期待される。

個々の研究グループのアクティビティーは高く、独創的な研究成果が得られている。今後、上記6つのハードウェアを融合した新たなアイデア、展開が実際に起こり、新しい科学分野が実際に誕生するかどうか、この領域の成功の鍵を握ると思われる。この点に関して、超伝導、半導体、光にそれぞれベースを置く3人の理論家の役割は大きい。実験の現状を熟知したこれら3人の理論家のリーダーシップに期待したい。

公募研究で、それぞれ特色のある5人の研究者が選ばれチームとして参加したことにより、領域の多様性は一層豊かになった。この領域の多様性を新学術領域への具体的な提案へと結びつける積極的な姿勢を参加研究者全員に期待したい。

Seth Lloyd 教授（MIT）よりの評価：

As an external advisor of the Quantum Cybernetics program, I was able to visit many of the participants in the program during my recent visit to NEC/Riken and other participating institutions. Quantum Cybernetics is an ambitious new field that aims to bring to the quantum realm the same highly effective control and sensing procedures that the classical field of cybernetics brought to engineering in the 1950s and 1960s. Cybernetics seeks to develop integrated control and sensing protocols to improve drastically the effectiveness of engineered systems. Control and sensing in the quantum realm poses novel challenges and opportunities for cybernetic techniques. As essentially all of our precision measurement and control systems at the smallest scales are quantum mechanical, quantum cybernetics represents a necessary step for taking our quantum technologies to the limit.

In my opinion, the Quantum Cybernetics program is doing a stellar job of bringing cybernetic techniques to the quantum realm. The program integrates four different quantum technologies — solid-state, spin, atomic and ionic physics, and quantum optics. Since its inception, the program has produced a series of ground-breaking scientific papers, as would be expected from the high quality of the participants. The superconducting systems program in particular continues to set the world standard for the manipulation of quantum coherence in superconducting devices. The molecular spin, atom and ion, and quantum optics programs are also world leaders, building on their powerful technical expertise and strong theory efforts. Most important, however, the Quantum Cybernetics program has undertaken an ambitious approach to interdisciplinary research, hosting a series of interdisciplinary workshops, and serving as a central meeting place for students and scientists from different disciplines. The importance of this interdisciplinary work cannot be overestimated: at the quantum scale, Nature does not divide up phenomena into the traditional areas of scientific inquiry. Consequently, a strong interdisciplinary program of research is essential for developing the novel techniques necessary to understand and to employ quantum phenomena.

Because of the obvious success of the Quantum Cybernetics program in the realm of science and precision engineering, I have few criticisms. Perhaps the only point where improvement could be suggested is that the successes of the program warrant taking it to a broader stage: Quantum Cybernetics should be a global field, and I suggest that additional efforts be made to advertise the successes of this program to the global scientific community. The scientific accomplishments of the individual researchers in the program are already world-recognized. I believe that the unique integrative and multi-disciplinary approach of the Quantum Cybernetics program also deserves global recognition. As with classical cybernetics, the success of Quantum Cybernetics will be measured by the extent to which its 'best practices' are adopted as the standards of quantum science and engineering worldwide.

Seth Lloyd

Professor of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology

Director, WM Keck Center for Extreme Quantum Information Theory at MIT

Director, Program on Quantum Information and Quantum Biology,

Institute for Scientific Interchange, Torino

Miller Fellow, Santa Fe Institute