

1. 研究課題・実施機関・研究開発期間・研究開発予算

- ◆課題名 : 量子もつれ中継技術の研究開発
- ◆個別課題名 : 課題イ 遠隔ノード間での量子もつれ純粋化技術
- ◆副題 : ハイブリッド量子中継器へ向けた研究開発
- ◆実施機関 : 横浜国立大学(幹事者)、大阪大学、日本電信電話株式会社、情報・システム研究機構
- ◆研究開発期間 : 平成23年度から平成27年度(5年間)
- ◆研究開発予算 : 総額198百万円(平成27年度35百万円)

2. 研究開発の目標

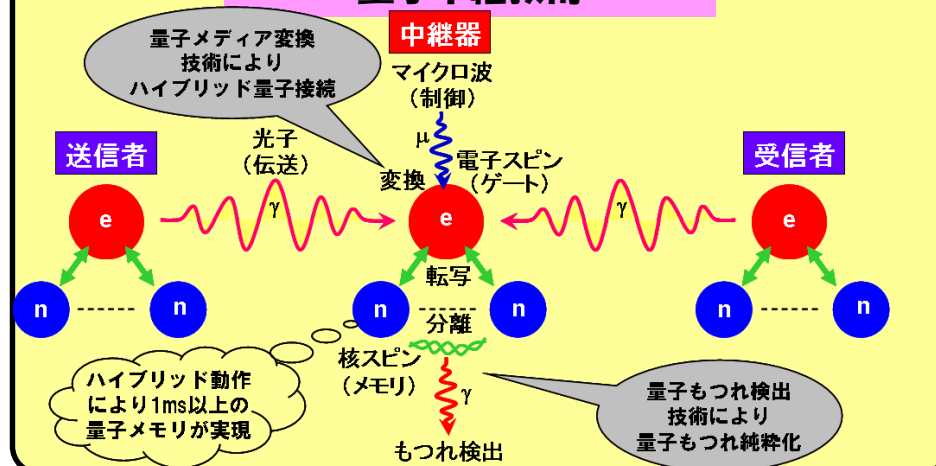
広域量子通信ネットワークの中核となる量子中継システムの構成に必要な、遠隔ノード間での量子もつれの全量子的な純粋化を行うため、量子メディア変換の技術を核としてハイブリッド構成の量子中継システムを構築するための基盤技術を確認する。

3. 研究開発の成果

研究開発目標

研究開発成果

量子中継技術



研究開発成果:ハイブリッド量子中継基幹技術の開発(横浜国大)

・ダイヤモンドのNV中心の縮退スピン系を用い、単一光子から単一核スピンへの量子テレポーテーション原理による量子メディア変換に90%以上の忠実度で成功した。また量子メモリを7ms以上維持しながら幾何学的量子ゲート操作を同時に行う幾何学的スピンエコーの技術を開発した。これにより、決定論的な量子中継に不可欠な量子メディア変換、量子ゲート、量子メモリの複合システム動作に目途をつけた。

研究開発成果:ハイブリッド量子中継純粋化技術の開発(大阪大学)

・NV中心の量子メモリの寿命時間内に10万回程度のゲート操作を実現した。また、単一核スピン状態のシングルショット測定装置を立ち上げて検出技術を確認した。さらに、NV-電荷状態のほぼ100%の安定化に成功し、完全ベル測定のための量子非破壊測定の高忠実度化に道筋を付けた。シングルショット完全ベル測定が今後の課題である。

研究開発成果:ハイブリッドゲート操作設計(NTT)

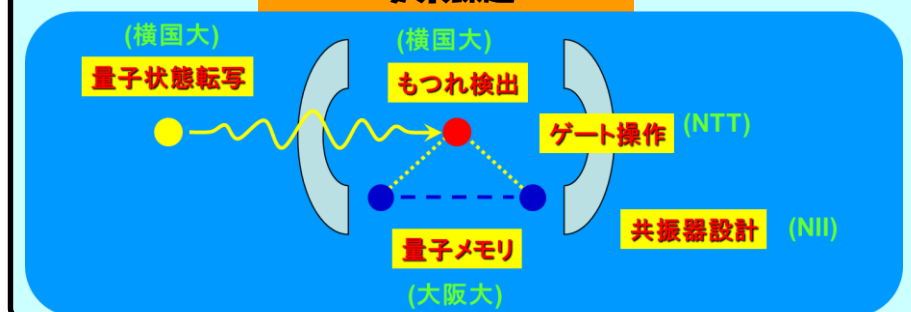
・NV中心による制御された光子吸収過程は、量子中継にとって重要な量子もつれ純粋化と量子もつれスワップ操作に適用可能であることを示した。これにより、規模に対する時間リソースの増大を多項式時間内に抑えられた。

・量子中継で必要とされる物質量子メモリや量子誤り訂正符号を一切用いず、光デバイスのみに基づく中間ノードたったひとつで、通信速度を落とすことなく、量子鍵配送の通信距離を2倍にする「全光都市間量子鍵配送」方式を提案した。これにより400km程度が限界だった既存の量子鍵配送の通信圏を800km程度まで拡大させた。

研究開発成果:ハイブリッド光モジュール設計(NII)

・ハイブリッド光モジュールにおけるキャビティの役割と条件を明らかにすべく、条件付き反射型モジュールと吸収型モジュールを提案し、拡張性(スケーラビリティ)と集積性を保証するようモジュール化した光デバイスの設計を行った。これらの光モジュールから量子中継システムへの拡張に必要なとされる物理パラメータを明示した。

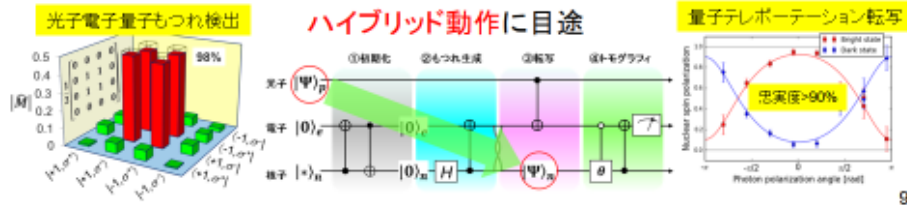
要素課題



ハイブリッド量子中継基幹技術の開発(横浜国大)

目標: 量子中継の要素機能となる量子トモグラフィ、量子もつれ検出、量子メディア変換を実現し、これらを組み合わせたハイブリッド動作を実証
成果:

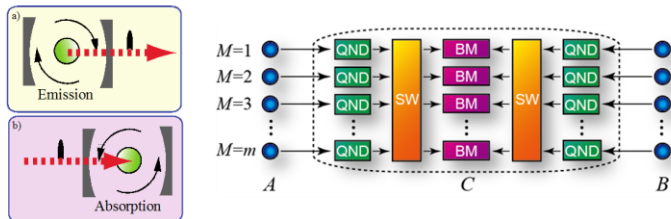
- ・光波、マイクロ波、ラジオ波による単一電子(核子)スピンの
量子トモグラフィに成功
- ・制御された吸収による単一光子と単一電子スピンの間の
量子もつれ検出に成功
- ・量子テレポーテーションを原理とする単一光子から単一核スピンへの
量子メディア変換に成功
- ・量子メディア変換、量子ゲート、量子メモリを組み合わせた



ハイブリッド量子中継デバイス設計技術の開発(NTT)

目標: 光子から電子スピンを介した核スピンへ量子状態転写を実現する具体的な物理系の提案と、転写の速度、精度を理論的に比較検討し、**中継ノードの設計指針**を得る。

- 成果:
- ・NV中心による制御された光子吸収過程は、量子中継にとって重要な量子もつれ純粋化と量子もつれスワップ操作に適用可能であることを示した。
 - ・規模に対する時間リソースの増大を多項式時間内に抑えられることを示した。
 - ・全光都市間量子鍵配送方式を提案した。



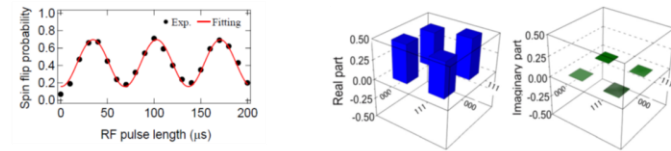
ハイブリッド量子中継純粋化技術の開発(大阪大学)

目標:

- ・電子スピンによる高速・高忠実度の**量子ゲート操作**技術を確立
(量子メモリ寿命時間内に10万回程度のゲート操作)
- ・核スピン量子メモリの高忠実度の**量子もつれ検出**技術を確立
(完全ベル測定をシングルショットで90%以上の忠実度)
- ・核スピン**量子メモリの長寿命化**
(デカップリング技術を確立し、1ms以上の量子メモリ時間(T_2)実現)

成果:

- ・NV中心の量子メモリの寿命時間内に**10万回程度のゲート操作**を実現
- ・単一核スピン状態の**シングルショット(量子非破壊)検出**技術を確立
- ・**量子もつれ測定(完全ベル測定)**の高忠実度化に向け、NV電荷状態のほぼ100%安定化に成功
- ・複数の核スピンにおける**量子もつれ制御**に成功

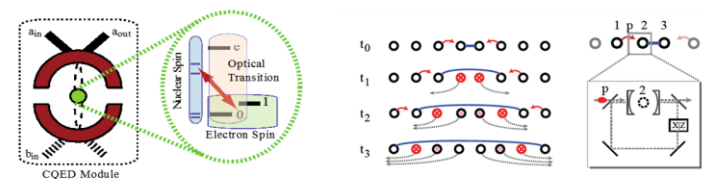


ハイブリッド量子中継基幹技術の開発(NII)

目標: 量子中継における**光モジュール**の提案と実現化評価を実験系に即し明確化。前半では、**光キャビティ構造**とダイヤモンド**NV中心のスピン物性**を解析。後半では、量子中継システムへの拡張を前提にした光モジュールと中継システムを提案。

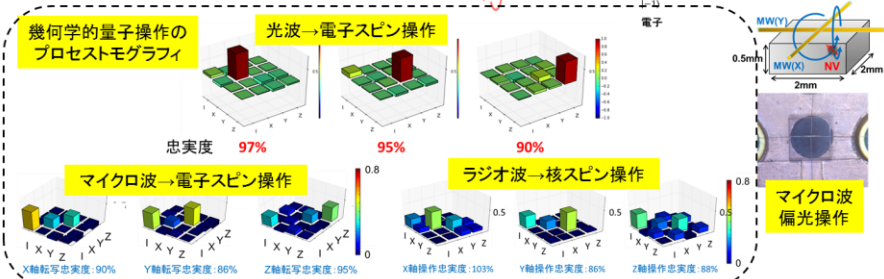
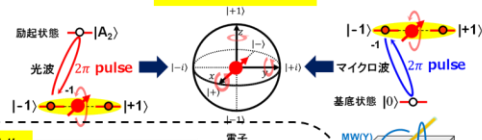
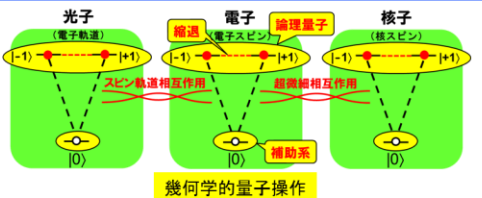
成果:

- ・**片面共振器**と両面共振器を用いた光モジュールで量子もつれ配信のプロトコル上の特徴を解析
- ・ダイヤモンドNV中心の核スピンを量子メモリとして用いるための**制御方法、制御精度**を解析
- ・量子中継モジュールの設計を3方式で比較検討
- ・ハイブリッド光モジュール特性を解析



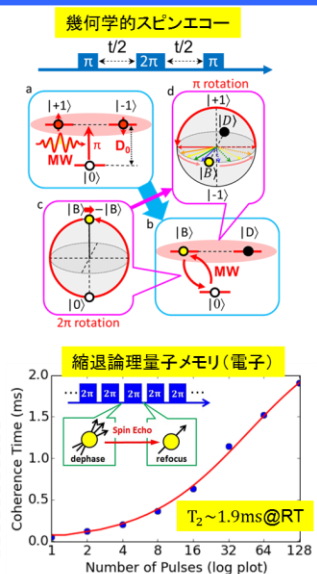
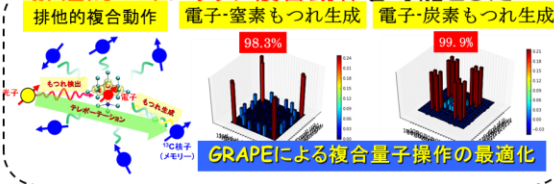
幾何学的量子任意操作 と 量子トモグラフィ

- 光子、電子、核子の縮退した論理キュービットを幾何学的に量子操作する手法を考案
- 電子(核子)スピンの光波(マイクロ波、ラジオ波)による任意の初期化、操作、読み出しを実現
- 状態トモグラフィならびにプロセストモグラフィの忠実度>90%



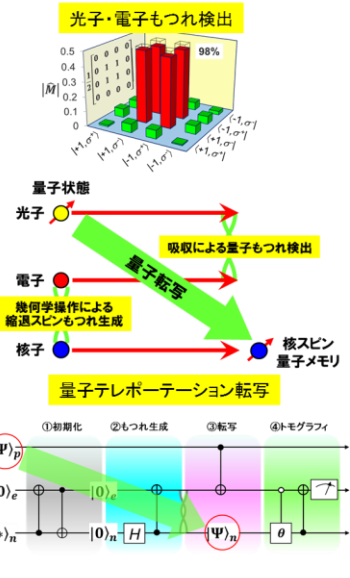
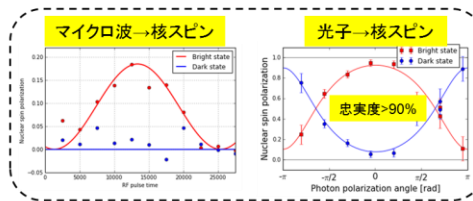
ハイブリッド量子複合システム動作

- 量子メディア変換、量子ゲート、量子メモリを組み合わせたハイブリッド動作を行うため、幾何学的スピンエコーと呼ぶ新原理を導入
- 量子テレポーテーションに必要な量子もつれの生成と検出の時間を含めた量子メディア変換時間100 μ s以下と電子の量子メモリ時間1ms以上を室温で実現
- 量子メモリ状態を維持しながら量子メディア変換に必要な量子ゲート操作を同時に行う排他的ハイブリッド複合動作を可能とした



量子もつれ生成・検出 と 量子メディア変換

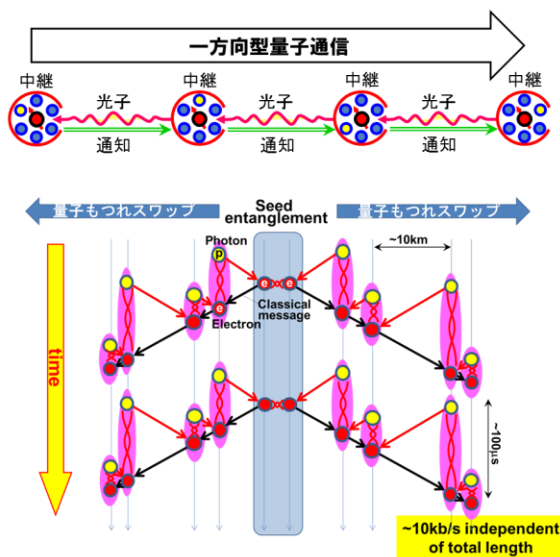
- 光吸収による縮退した電子と光子の量子もつれ検出に成功
- 縮退した電子と核子の量子もつれ生成と検出を実現
- 量子テレポーテーションの原理による光子から電子スピンを介した核スピンへの量子状態転写に成功
- ポストセクションによる決定論的な量子メディア変換(忠実度>90%)を達成
- 量子もつれの生成レート~10kHz



第三世代量子もつれ中継ネットワーク

- 第三世代量子中継を可能とする一方向型量子通信の実現に道を開いた
- バタフライ型のネットワーク構成により量子メモリ時間は1msで十分であることを示した
- 最長区間距離を100kmとすると量子中継レート10kb/sが可能となる

(課題イ-3との共同提案)



4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等)

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース 報道	展示会	標準化提案
量子もつれ中継技術 の研究開発	0 (0)	0 (0)	40 (16)	192 (53)	34 (6)	0 (0)	0 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1)産学官連携と学際的研究を加速・推進のため、連携によるシンポジウム、研究会を企画・運営

①第63回応用物理学会春季学術講演会 光・フォトンクス 分科会企画シンポジウム「cavity-QED, circuit-QED の進展 ～ 様々な系で何をどこまでできるようになったのか?～」

日時:2016年3月22日 場所:東京工業大学 大岡山キャンパス

主催:応用物理学会新領域グループ「量子情報研究」

(2)関東量子情報Student Chapterを横浜国立大学にて開催

①第23回関東量子情報Student Chapter研究会

日時:2015年12月4日

場所:横浜国立大学 総合研究棟

主催:関東量子情報Student Chapter運営委員会 <http://quangaroo.web.fc2.com/meetings/meeting.html>

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

本研究は量子通信の長距離化に欠かせない中継システムの実現を目指してその要素技術の開発を行った。製品化に向けてはダイヤモンド材料自体の性能向上が必要であるとともに、モジュール実装、制御系、アルゴリズムなど周辺システムの開発を含めて一貫した開発体制が必要である。標準化に向けては海外との共同研究をさらに活発化させ、デファクトスタンダード化を図る。今後5年程度で基礎研究から実用化に向けて大きな進展があるものと思われる。量子メディア変換は量子通信だけでなく、量子シミュレーションや量子計算機などの応用にも適用できる共通の要素技術であり、量子科学だけでなく工学全般に対する学術貢献も計り知れない。量子技術の分野はいまだ人材育成の途中過程にあり、量子インターフェース技術に関わる本プロジェクトの成果はこのような人材育成に絶大な波及効果がある。今後5年間で社会はますます秘匿性増強の必要性が増大するのは必至であり、量子中継技術による長距離量子暗号通信の可能性追求は通信技術全体の健全な発展に寄与するところが大きい。