

## 研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： 光を用いた量子情報システムの研究

2. 研究代表者名： 山本 喜久(スタンフォード大学 教授)

### 3. 研究概要：

本研究に先立つ ICORP において、InAs 単一量子ドットを含むポスト形マイクロキャビティから識別出来ない同一量子粒子としての単一光子を発生させることに成功した。本研究において、この素子を用いて、2 つの単一光子を発生し、一方の偏波を  $90^\circ$  回転させた後、2 つの単一光子を 50%–50%ビームスプリッタで衝突させた。この時、ビームスプリッタの出力は、50%の成功確率でベル状態(エンタングル光子対状態)となっていることが理論的に予測される。この原理を実験により実際に確認することが出来た。また、同じ単一光子光源を用いて、光子 qubit の量子テレポーテーションを実現した。この実験においては、1 つの光子で dual-rail qubit を形成し、その 1 つの(空間)モードをベル測定によって、離れた地点にレポートする。ベル測定に必要な ancilla qubit は、もう一つの光子をビームスプリッタでベル状態に変換したものを使用した。これら2つの実験により、エンタングルメントを用いた量子暗号通信(BBM92、Ekert91 プロトコル)や線形光学量子コンピュータ(KLM:Knill-Laflamme-Milburn プロトコル)などを、この単一光子光源を用いて実現出来ることを原理的に証明することが出来た。

本研究に先立ち提案した差動位相シフト(DPS:Differential Phase Shift プロトコル)量子暗号方式は、非常にシンプルな系であるため実用的な装置で実現出来る上、優れた性能を有している新しい量子暗号方式である。本研究において、このシステムの絶対安全性を数学的に証明することに成功した。また、この量子暗号方式を  $1.5\mu\text{m}$  帯光ファイバー方式で構成し、クロック周波数 1GHz、ファイバー長 105km、速度 200bit/s で絶対安全鍵を生成することに成功した。このシステムは現時点で実現されている量子暗号システムの中では最高性能を有している。

量子暗号システムを 300km 以上の長距離システムとするためには、いわゆる量子中継という技術を用いなければならない。そのためには、数十 km 離れた 2 点間に量子エンタングル状態を配信し、その後純粋化、スワッピングというステップ(nested purification protocol)を実現しなければならない。この 3 つの量子操作を可能とする方式として、3 準位原子(もしくは人工原子)1 個を閉じ込めた cavity QED システムをノードとし、これらのノードをコヒーレント状態にある光パルス(量子通信バス)でつなぐ方法を提案した。この提案した方式を用いれば、1000km 離れた 2 点間に毎秒 1 個のベル状態を 99%の fidelity で生成することが出来るはずである。このような量子中継方式を実現するためには、cavity QED ノードの開発が最重要課題である。その候補として、1 つの  $^{19}\text{F}$  を ZnSe 半導体中のドナー不純物として閉じ込めたフォトニック結晶マイクロキャビティが有力であるという結論に達した。この新しい材料系の結晶成長、微細加工、分光実験技術を立ち上げ、単一不純物を分離したデバイス作製にすでに成功した。また、このシステムは、いわゆる量子通信網で量子計算を

実現していく qubus 量子コンピュータの主要構成要素としても有望であることが分かった。また、代替技術として 1 つの  $^{31}\text{P}$  をドナー不純物として閉じ込めた Si フォトニック結晶キャビティをノードとして使う方式についても基礎検討を開始した。

本研究に先立ち、GaAs 多層量子井戸を含むプレーナマイクロキャビティにおいて、エキシトンポラリトンの過渡的な量子縮退現象の観測に成功していた。本研究において、この過渡的な現象を熱平衡ボーズ凝縮現象とするために、エキシトンの共鳴エネルギーに比べマイクロキャビティの共鳴エネルギーを高エネルギー側へシフトさせ(blue detuning)、これによりポラリトンのエキシトン成分を大きくし、冷却効率を上げることが出来た。その結果、ポラリトンの冷却時間をポラリトンの寿命よりも短くすることに成功した。こうして、熱平衡状態のポラリトンのボーズ凝縮の観測に初めて成功した。1960年代初頭から研究者たちは固体中のエキシトンのボーズ凝縮を観測すべく研究を続けてきたが、今回の実験はこれに一つの区切りをつけたものである。

## 4. 中間評価結果

### 4-1 研究の進捗状況と今後の見込み

単一光子光源を用いたエンタングルメント操作、DPS量子暗号の実装、新しい量子中継スキームの提案など、世界をリードする優れた研究成果が得られており、順調に研究が進んでいるものと高く評価する。量子ドット中の励起子や固体NMRなどの核スピンを用いる方法の限界を見極め、ドナー不純物の核スピン緩和時間の長さを生かした束縛励起子を用いる方法に舵を切り直している。この手法が正解かどうかはまだ判断出来ないが、トライする価値は大いにあると思える。光を利用した量子情報処理のターゲットとして量子中継は重要であり、量子コンピュータよりも早期の実現が期待出来るため、この方向に注力するのは理にかなっている。フォトニック結晶マイクロキャビティでの強結合実現、量子中継スキームの原理実証など、強力な理論グループと実験グループの両方をもつグループならではの成果が期待出来る。研究代表者のリーダーシップは十分に発揮されており、実験研究者との協調性は問題ない。さらに、数学寄りの研究者も含め理論研究者との十分な対話を期待する。しかしENS (Ecole Normale Supérieure) の研究グループとの連携による効果については、やや疑問が残るという意見もあった。

### 4-2 研究成果の現状と今後の見込み

差動位相シフト量子鍵配送システムを構築し、105km の伝送距離を実現したこと、また、エンタングル光子対の変換過程、量子テレポーテーションゲートを構築したことなど、世界のトップレベルでの成果が出ており高く評価出来る。フォトニック結晶を用いた単一光子の発生・捕獲手法のアイデア、qubus 量子コンピュータの提案とそれを応用した量子中継スキームの提案、ドナー束縛励起子を量子中継に用いるアイデアなど、これらは実証途上にあるが、実現されたら非常に大きなインパクトを与えるであろう。現状、量子中継のための舞台設定として、GaAs系で Impurity Bound Exciton の準位が atom のそれと同様な線幅でミリ秒オーダーの T2-time になっていることが確認された点など、特筆に値する成果が出ている。量子シミュレーションについてもボーズ・アインシュタ

イン分布の熱平衡状態の測定、2次元電子ガスの相転移シミュレーションなど、興味ある成果が得られている。しかし、コヒーレントラマン過程の光子捕獲・発生や光学格子を用いた量子シミュレーションは他の類似研究でもほぼ同じアイデアが提案され研究が推進されており、アイデアとして新しいわけではない。「量子情報システムの構築のため」という観点から、それらがきちんと実現・実証出来るかどうかは鍵である。

#### 4-3 総合的評価

全体としては非常に優れた研究成果を生み出していて、高く評価出来る。当グループの総合力を生かした先行的な研究は、量子情報技術の発展に大きく寄与するものと考えられる。本研究の位置付けとしては、実用開発よりも先行的な概念提案・技術開発に重点をおくべきであろう。研究テーマの中で、量子中継に重点を移したことは評価出来る。残り2年間の研究目標としての最重要課題は、ドナー不純物に束縛された励起子を用いた量子中継の具体的実現であり、これに精力を集中することを期待する。また一般に、個々の要素をシステムとしてインプリメントしたとき、個々の要素への要求が矛盾することがありがちだが、そのようなトレードオフについても他グループに先行して検討されていくことを望む。加えて、量子シミュレーションの研究については量子情報システム構築への道順の多様性や相補性を鑑み、それが量子情報システムの研究に対してどのような意義や価値があるのか、どのような位置付けなのかを明示して研究を進めることを期待する。