

研究課題別 事後評価結果

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： 山本 喜久(スタンフォード大学 教授)

3. 研究内容及び成果：

3-1. 単一光子／エンタングル光子対光源

線形光学量子コンピュータ、非線形光学量子コンピュータ、量子鍵配送、量子中継等のシステムへ応用が期待される単一光子／エンタングル光子対に注目し、それらを固体素子の中で発生させることを目指した。発光波長の不均一拡がりの大きい量子ドットに代えて、不均一拡がりの狭いドナー不純物にトラップされた励起子を発光源とする単一光子光源を開発した。さらに、2つの独立した光源から識別できない単一光子を同時に発生させる実験を固体素子において初めて確認した。

単一量子ドットを含むポスト形マイクロキャビティ、ディスク形マイクロキャビティの共振器 Q 値を高め、キャビティ光子と単一量子ドット励起子の強結合状態を安定して実現出来るようになった。同時に、単一量子ドットへ電子1つを注入し、人工的な3準位原子を形成する技術を確認した。

3-2. 量子コンピュータ／量子中継の研究

ゼーマン分裂した2つの電子スピン状態と励起子状態で形成されるラムダ型3準位系を100フェムト秒から1ピコ秒程度の単一光パルスで励起し、電子スピンの1量子ビット制御を実現した。この系のラマン散乱過程を用いた電子スピンの光ポンピングによる初期化と T_1 スピン緩和時間の評価($\sim 4\text{ms}$)に成功した。さらに、スピンエコー法を利用して T_2 デコヒーレンス時間の評価を行い、 $\sim 2\mu\text{sec}$ という長い T_2 時間を達成した。

3-3. 励起子ポラリトンのボーズ凝縮／量子シミュレーション

キャビティ光子の共鳴エネルギーを、量子井戸励起子に比べ、高エネルギー側へシフトすると、低エネルギー側のポラリトンの減衰時間は長くなり、同時にバンド内のエネルギー緩和時間は短くなって、熱平衡状態へ到達しやすくなる。この原理を用いて、励起子ポラリトンのボーズ凝縮を実現し、ボーズ凝縮に伴って発生するポゴリューボフ励起スペクトルを観測することに成功した。

励起子ポラリトンのボーズ凝縮体が BKT(Berezinskii-Kosterlitz-Thouless) 相を示す証拠となる量子渦対が形成されていることを実験的に明らかにし、Gross-Pitaevskii 方程式の数値シミュレーションでこれを再現することに成功した。

3-4. 原子と光子を用いたエンタングLEMENTの制御

光子寿命数百 ms を持つ2個の高 Q 超伝導キャビティを製作し、これを用いて単一光子の量子非破壊測定を行い、ハイゼルベルグ限界を示す原子分光測定を実現した。また、アトムチップと呼ばれる集積回路デバイスに冷却原子をトラップし、ボーズ凝縮させることに成功した。

4. 事後評価結果

4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

4-1.1 外部発表、特許出願

期間中の外部発表、特許等の実績を示す。

発表論文: (邦文) 4件 / (英文) 71件

口頭発表: (国内) 29件 / (海外) 182件

特許出願: (国内) 0件 / (海外) 0件

多くの論文が Nature, Science, Physical Review Letters に掲載されており、高く評価出来る。口頭発表も多くの招待講演があり、量子情報分野での当該グループのプレゼンスを示すものになっている。SORSTの研究成果のアピールに大いに貢献した。

特許出願は課題が基礎的分野であること、あるいは実用化の時期を考えると特許化しにくいことは理解するが、単一光子発生等一部の技術を切り出して特許にする努力も必要であった。

4-1.2 研究成果

量子情報処理のハードウェア実現に向け、光と原子(人工原子)を舞台に、その物理的なインプリメンテーションでの基盤となる画期的な成果を数々上げた。単一光子の発生、量子もつれ光子対の発生、電子スピン(量子ビット)の光による制御、励起子ポラリトンのボーズ凝縮等、量子情報処理に必要な要素技術を半導体において実証するとともに、量子演算を実行する時に問題となる、T1 スピン緩和時間や T2 デコヒーレンス時間といった物性評価も並行して行い、その改善についても一定の指針を与えた。また、単一リドベルグ原子と超伝導共振器の強結合を利用したシステムにおいて、シュレディンガーの猫状態を実現することにも成功した。

当初構想していたフォトニック結晶を共振器に用いることを断念しているが、これはフォトニック結晶における光学損失が大きく、量子情報処理を行う上でデメリットが大きいとの判断によるものであり、プレーナキャビティへ集中することで素晴らしい成果が出ているので妥当な判断と言える。しかしながら、不純物にトラップされたキャリアは理想的な零次元系の振る舞いを示す一方で不純物の位置制御が大変難しいという問題もある。光との相互作用を考えた場合、位置制御は重要であり、将来に向けて、量子ドットか不純物かについて再度点検する必要がある。

励起子ポラリトンのボーズ凝縮系における超流動において、量子渦対を初めて観測する等、当初計画では予想出来なかった成果も上がっており、高く評価出来る。

量子情報システムという、将来大きく発展することが期待される分野であるが、現状ではこの分野自体がまだ原理検証とコンセプトの構築を行っている段階にある。このような状況において、量子暗号システムに使われる単一光子やエンタングル光子に関する実用化に向けた実験が成功を収めたことは高く評価される。また、励起子ポラリトンのボーズ凝縮を用いたシミュレータは課題も多いが、小規模な量子シミュレーションに使われる時期も意外に近いかもしれない。

4-1.3 研究遂行、研究予算

スタンフォード内ではサブグループ間の交流もあり、研究体制・遂行は適当であった。研究代表者のイニシアティブも十分に認められる。一方で、サブグループである ENS(Ecole Normale Supérieure)との間では相互交流は行われているものの、共著論文がないのは物足りない。

研究費のかなりの部分が人件費であるが、博士課程の学生に給料を支払う米国制度によるものであると思われる。年間一億円の額に見合う十分な成果が上がっていると判断する。

4-2. 成果の科学技術への貢献

最近のナノテク技術の進展によって単一電子・単一光子を制御出来るようになり、これまで理論が先行していた量子情報処理分野においてハード的な基盤が確実に築かれてきている。この時期に、本研究で得られたナノテクに関する極限技術を基盤とする研究成果は、量子情報分野へ大きなインパクトを与えただけでなく、他のより広い分野へも大きな波及効果を与えるものであった。

基礎研究の段階において世界最高レベルの成果を得た本研究の意義、かつ、背後にある技術基盤の高さを考慮すれば、数年のタイムスケールでの実用化をあまり意識することなく、世界最高レベルを維持しながら、さらなる発展研究を推進していくべきものであろう。

4-3. その他特記事項(受賞等)

2005: 日本応用物理学会 解説論文賞

2005: 紫綬褒章

2006: 志田林三郎賞

2007: 日本応用物理学会 フェロー受賞

2007: 米国物理学会 フェロー受賞