

論文審査の結果の要旨

氏名 後藤隼人

本論文は、結晶中の希土類イオンを用いた誘導ラマン断熱通過法(STRAP)による量子状態制御および共振器量子電磁気学の実験的および理論的研究であり、全9章からなる。第1章から第3章まではイントロダクションであり、第1章は全体の総覧、第2章は量子計算に関するイントロダクション、第3章は結晶中の希土類イオンの特性に関するイントロダクションとなっている。第4章から第8章が本論文の主な研究成果であり、第4章が結晶中の希土類イオンを用いた量子計算機の実現方法についての理論的提案、第5章が Λ 型の3準位系 STIRAP による高効率な状態遷移の実験報告、第6章が三脚型 STIRAP における4準位系の状態遷移についての実験報告、第7章が結晶中の希土類イオンと光共振器との結合についての実験報告、第8章が共振器電磁気学における光子統計の推定方法に関する理論的提案である。第9章が全体の概要となっている。

第4章では、希土類イオン分散結晶である $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5(\text{Pr}:\text{YSO})$ を用いた誘導ラマン断熱通過法を用いた1量子ビットゲートの説明に加えて、論文提出者らが新たに提案した2量子ビットゲートについての理論が述べられている。この方法は、光共振器を利用しイオンの状態と共振器モードの光子の状態を含む暗状態を使った断熱通過法に基づくものであり、従来提案されていた2量子ビットに比べて単純な方法での実現が可能である。また、この方法を用いれば、多量子ビットゲートを基本ゲートに分解することなく直接実行することができるため、より量子計算機の効率が上がると考えられる。

第5章では、まず $\text{Pr}:\text{YSO}$ を用いて最も単純な Λ 型の3準位系における STIRAP における高効率の状態遷移の実験結果が示されており、量子計算機の基本ゲートとして最小限満たすべき性質の確認がされている。 $\text{Pr}:\text{YSO}$ においてはこれまでに電磁誘導透過現象(EIT)などの現象が確認されているが、固体を用いた Λ 型 STIRAP による状態遷移を確認したのは、本研究成果が初めてであり、希土類イオン分散結晶の量子計算機への利用の今後の発展可能性について重要な意義がある重要な結果であると考えられる。

第6章では、1量子ビット実現のために必要となる三脚型4準位 STIRAP による状態遷移の実験的研究が示されている。この状態遷移の実験結果は、数値シミュレーションに基づいた詳細な解析結果により、光学ポンピングではなく STIRAP によるものである、ということが確認された。この結果、結晶中希土

類イオンの微細構造の基底状態を量子ビットとした 1 量子ビット回転に STIRAP の方法が適用できることが示された。一方、この実験における回転の忠実度は低いため、より精度の高い回転を行うためには、外部磁場をかけるなどのさらなる改良が必要であるとの重要な知見を得ることができた点も高く評価する。

第 7 章では、2 量子ビットゲート実現に関係する基礎実験として、Pr:YSO 結晶の向かい合った 2 面を球面ミラー加工した一体型共振器を用い、それに共鳴するレーザーを外部から照射して、そのレーザー周波数を掃引しながら透過光強度を測定した実験報告が示されている。その結果、光双安定および共振器の共鳴周波数のシフトを観測し、理論解析の結果、共振器量子電磁力学における基本的な無次元パラメータである cooperativity については、従来研究の結果と比べて 2 桁の向上を得た。この結果は、2 量子ビットゲート実現において必要とされる結晶中の希土類イオンと共振器の強結合の実現には及ばなかったものの、結晶中の希土類イオンを用いた共振器量子電磁力学の発展に貢献するものである。

第 8 章では、結晶中希土類イオンと共振器との強結合を目指した実験を解析するために、演算子の期待値の方程式を用いて共振器からの透過光の光学統計を評価する理論提案を行っている。この方法は、原子の位相緩和がある場合にも適用が可能であり、結晶中の希土類イオンを用いた共振器量子電磁力学の解析に有用であると考えられる。

本論文は、結晶中の希土類イオンを用いた量子計算機を目指した基礎要素の開発という挑戦的なテーマを扱っている。この系における量子計算機の提案は比較的新しく、イオントラップによる量子計算機等とは異なり先行研究が少ない。この状況で本論文では、基礎理論の定式化から基本要素実現のための予備実験までの、幅広く独創的な研究成果を出しており、この分野の今後の研究発展に対して大きな貢献を行うものであると考える。

なお、本論文の第 4 章から第 8 章までは市川厚一との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析および検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。