

論文の内容の要旨

論文題目 Quantum-state manipulation and cavity quantum electrodynamics with rare-earth ions in a crystal

(結晶中の希土類イオンを用いた量子状態制御および共振器量子電磁力学)

氏名 後藤隼人

この20年、重ね合わせの状態や非局所相関などに代表される量子力学特有の性質を情報科学へ応用する研究が幅広く行われてきた。この分野は量子情報科学と呼ばれている。量子情報科学のトピックスとしては、量子計算、量子暗号、量子情報理論などがある。特に、大型量子コンピュータの実現は、量子情報科学の中で最も大きな目標と言える。

本学位論文では、結晶中の希土類イオンを用いた量子コンピュータの実現を目指して我々が行ってきた、結晶中の希土類イオンを用いた量子状態制御および共振器量子電磁力学の理論的および実験的研究について発表する。

我々が結晶中の希土類イオンに着目した理由は、それが以下のような特長を有し、量子コンピュータに適しているからである。(1)光学的遷移および超微細遷移のコヒーレンス時間が非常に長い(半導体量子ドットや超伝導回路などの他の固体材料と比較して)。(2)核スピンを光で操作できる(NMR量子計算とは対照的に)。(3)イオンの位置制御が不要である(トラップしたイオンや中性原子を用いる量子計算とは対照的に)。

量子ゲート操作に対する我々のアプローチは、誘導ラマンアディアバティックパッセージ(stimulated Raman adiabatic passage、略してSTIRAP)およびそれと似たアディアバティックパッセージに基づいている。ここで、アディアバティックパッセージ(量子論的断熱過程)とは、ハミルトニアンが十分遅く、系が初めハミルトニアンの固有状態にあるとき、その系の状態がそのハミルトニアンの固有状態に留まり続ける過程のことをいう。また、STIRAPとは、複数のレーザーが2光子共鳴している原子系において現れるいわゆる暗状態(dark state)を使ったアディアバティックパッセージのことである。暗状態とは、励起状態を含まないこの系のハミルトニアンの固有状態のことである。暗状態を使うことで、STIRAPは励起状態に起因するデコヒーレンスの影響を受けにくいという特長を持つ。希土類イオン分散結晶を用いた量子計算において、STIRAPを利用することは次の意味で自然である。STIRAPは電磁誘導透過(electromagnetically induced transparency、略してEIT)と密接な関係がある。これらがともに同じ暗状態を利用するからである。そして、固体中のEITの観測は $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ (以下、Pr:YSO)という希土類イオン分散結晶を用いて初めて実現された。よって、希土類イオン分散結晶を用いて

STIRAP を実現できることが期待される。

そこで、我々は Pr:YSO を用いて STIRAP の実験的研究を行った。固体中の STIRAP の実験的研究は、我々の知る限りこれが初めてである。我々は Λ 型と三脚型の 2 種類の STIRAP について調べた。

最も単純な STIRAP は、 Λ 型の 3 準位系における STIRAP (Λ 型 STIRAP) によるポピュレーション移送である。我々は Pr:YSO を用いて、 Λ 型 STIRAP による高効率なポピュレーション移送の実現を実験で確認した。

我々の 1 量子ビットゲートの方法は三脚型 STIRAP (三脚型の 4 準位系における STIRAP) に基づいているため、三脚型 STIRAP は特に重要である。三脚型 STIRAP は、量子力学における非可換な幾何学的位相 (non-Abelian geometric phase) が現れる過程という観点からも、物理的にも興味深い。我々は Pr:YSO を用いて、三脚型の 4 準位系における様々なタイプのポピュレーション移送の実験を行った。定性的な議論および数値シミュレーションに基づいた詳しい解析の結果、我々はこれらのポピュレーション移送が主に STIRAP によるものだと結論した。

我々はまた、結晶中の希土類イオンを用いた量子コンピュータに適用できる、新しい 2 量子ビットゲート操作の方法を提案した。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アディアバティックパッセージに基づく。よって、この方法は STIRAP と同じく、励起状態に起因するデコヒーレンスの影響を受けにくいという特長を持つ。我々は新たな暗状態を発見することで、この方法により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できることも示した。

このように、2 量子ビットゲート操作に対する我々のアプローチは共振器量子電磁力学に基づく。そこで、我々は、結晶中の希土類イオンと光共振器の結合を実験的に調べた。Pr:YSO 結晶の向かい合った 2 面を球面ミラーに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、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。その結果、光双安定 (optical bistability) および共振器の共鳴周波数のシフトを観測した。我々は、これらの現象が、入射光によるイオンのポピュレーションの再分配を考慮した理論モデルでよく説明できることを示した。

上記の共振器を用いた実験では、イオンと共振器の結合は比較的弱い。我々の次のステップはイオンと共振器の強結合を実現することである。共振器からの透過光の光子統計の研究は、原子と共振器の強結合を確認するのに役立つ。この光子統計を計算する標準的な理論的手法としては、Fokker-Planck 方程式による方法と純粋状態の方法 (pure-state approach) がある。純粋状態の方法は、任意の原子数および任意の結合強度に対して適用できるという意味で、Fokker-Planck 方程式による方法よりも一般的である。しかし、純粋状態の方法は、原子の純粋な位相緩和がある場合には適用できない。ここで、結晶中の希土類イオンではイオンの状態の純粋な位相緩和が無視できないほど大きい、ということに注意すべきである。我々は、この光子統計を計算する新たな手法を提案した。我々の方

法は演算子の期待値の方程式を用いる。原子の純粋な位相緩和がない場合、この期待値の方法は純粋状態の方法と厳密に一致する。一方、期待値の方法は、原子の純粋な位相緩和がある場合にも比較的簡単に適用できる。よって、期待値の方法は、結晶中の希土類イオンを用いた共振器量子電磁力学において有用であると考えられる。