

学 位 論 文 題 名

Fully quantum-mechanical analysis of the nonlinear response  
of a one-dimensional atom to photon pulses and  
application to an optical quantum phase gate

(光子パルスに対する一次元原子非線形応答の全量子力学的解析と  
量子位相ゲートへの応用)

学位論文内容の要旨

原子の双極子モーメントは、個々の光子にたいして敏感に反応し、入射光子数に応じてその応答を変える。近年、単一原子のこのような非線形応答特性を、光子を用いた量子情報通信および量子情報処理に応用するための研究が盛んに行われている。

単一原子の非線形応答特性の実験的研究は、主に、共振器電磁気学の分野においてなされており、単一光子レベルでの非線形性は、Kimble らの実験によって、例証されている。この実験では、共焦点型両側共振器を用い、入射光の焦点を共振器内のセシウム原子に絞るとともに、パーセル効果を活用することによって、共振器軸方向に光を集めている。その結果、透過光を観測することによって、単一光子レベルの光吸収飽和を観測した。

最近、われわれの研究グループは、彼らの実験系を片側共振器に変更し、放出光を入射光側に集めるとともに、入射光の周波数を原子共鳴周波数に変更することによって、単一光子レベルの非線形性が促進できるという予測を、半古典的な解析に基づいて与えた。

しかしながら、量子情報通信および量子情報処理への応用のためには、その非線形性が単一光子レベルであることを実験的に検証または理論的に解析するだけでは不十分であるだろう。なぜなら、これらの情報通信および情報処理では、光子数だけでなく、個々の光子の量子状態にまで注意を払う必要があるからである。たとえば、原子の吸収放出過程のために、入射光子波束と出力光子波束とでは波束形状が異なることが想像できよう。そのうえ、2光子波束が単一2準位原子に入射するならば、2光子吸収の抑制によって誘発される非線形応答のために、出力2光子波束が1光子の場合よりも複雑な形状になるかもしれない。以上のような形状変化は、光子波束間の重なり具合に依存する干渉効果を破壊しかねない。このことは、正確な量子コヒーレンス制御が要求される量子

情報通信および量子情報処理において、重大な問題となる。その反面、非線形応答による2光子波束の形状変化は、2光子間において量子相関が生じることを含意するため、非常に興味深い内容でもある。

この学位論文では、単一2準位原子に対する光子波束入出力理論が提出され、この理論を用いて、単一2準位原子非線形応答の2光子波束への影響が解析される。さらに、この解析結果から、量子位相ゲートへの応用における問題点が検討され、ゲート効率が解析される。

この理論によって、出力2光子波束が3つの出力成分の量子干渉として特徴づけられることを明らかにした。これらの出力成分は、3つの相互作用過程：2光子透過過程、1光子吸収過程、2光子吸収過程にそれぞれ対応している。そして、2光子吸収の抑制によって誘発される原子の非線形応答がどのように波束形状変化に影響するのかを個々の出力成分を解析することにより明らかにした。

さらに、この解析結果を下に、原子デバイスの非線形位相シフトゲート効率が入力波束幅と、1光子出力波束と2光子出力波束の間の遅延時間とに強く依存することを明らかにした。また、この論文で扱う理論モデルが、上で述べた片側共振器を用いた原子—共振器系によって、実現できることを指摘した。

# 学位論文審査の要旨

|     |     |         |
|-----|-----|---------|
| 主 査 | 教 授 | 笹 木 敬 司 |
| 副 査 | 教 授 | 末 宗 幾 夫 |
| 副 査 | 教 授 | 武 藤 俊 一 |
| 副 査 | 助教授 | 竹 内 繁 樹 |

## 学 位 論 文 題 名

### Fully quantum-mechanical analysis of the nonlinear response of a one-dimensional atom to photon pulses and application to an optical quantum phase gate

(光子パルスに対する一次元原子非線形応答の全量子力学的解析と  
量子位相ゲートへの応用)

原子の双極子モーメントは、個々の光子にたいして敏感に反応し、入射光子数に応じてその応答を変える。近年、単一原子のこのような非線形応答特性を、光子を用いた量子情報通信および量子情報処理に応用するための研究が盛んに行われている。

単一原子の非線形応答特性の実験的研究は、主に、共振器電磁気学の分野においてなされており、単一光子レベルでの非線形性は、Kimble らの実験によって、例証されている。この実験では、共焦点型両側共振器を用い、入射光の焦点を共振器内のセシウム原子に絞るとともに、パーセル効果を活用することによって、共振器軸方向に光を集めている。その結果、透過光を観測することによって、単一光子レベルの光吸収飽和を観測した。

最近、われわれの研究グループは、彼らの実験系を片側共振器に変更し、放出光を入射光側に集めるとともに、入射光の周波数を原子共鳴周波数に変更することによって、単一光子レベルの非線形性が促進できるという予測を、半古典的な解析に基づいて与えた。しかしながら、量子情報通信および量子情報処理への応用のためには、その非線形性が単一光子レベルであることを実験的に検証または理論的に解析するだけでは不十分であるだろう。なぜなら、これらの情報通信および情報処理では、光子数だけでなく、個々の光子の量子状態にまで注意を払う必要があるからである。たとえば、原子の吸収放出過程のために、入射光子波束と出力光子波束とは波束形状が異なることが想像できよう。そのうえ、2光子波束が単一2準位原子に入射するならば、2光子吸収の抑制によって誘発される非線形応答のために、出力2光子波束が1光子の場合よりも複雑な形状になるかもしれない。以上のような形状変化は、光子波束間の重なり具合に依存する干

渉効果を破壊しかねない。このことは、正確な量子コヒーレンス制御が要求される量子情報通信および量子情報処理において、重大な問題となる。その反面、非線形応答による2光子波束の形状変化は、2光子間において量子相関が生じることを含意するため、非常に興味深い内容でもある。

本論文では、単一2準位原子に対する光子波束入出力理論が提出され、この理論を用いて、単一2準位原子非線形応答の2光子波束への影響が解析されている。さらに、この解析結果から、量子位相ゲートへの応用における問題点が検討され、ゲート効率が解析されている。

この理論によって、出力2光子波束が3つの出力成分の量子干渉として特徴づけられることを明らかにしている。これらの出力成分は、3つの相互作用過程：2光子透過過程、1光子吸収過程、2光子吸収過程にそれぞれ対応している。そして、2光子吸収の抑制によって誘発される原子の非線形応答がどのように波束形状変化に影響するのかを個々の出力成分を解析することにより明らかにしている。

さらに、この解析結果を下に、原子デバイスの非線形位相シフトゲート効率が入力波束幅と、1光子出力波束と2光子出力波束の間の遅延時間とに強く依存することを明らかにしている。また、この論文で扱う理論モデルが、上で述べた片側共振器を用いた原子―共振器系によって、実現できることを指摘している。

これを要するに、著者は全量子力学的な解析により光子波束に対する単一原子の非線形応答特性を明らかにし、光量子情報処理に必須の単一光子デバイスに関する有益な知見を得たものであり、著者は光量子エレクトロニクス分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。