

## 3-3 量子情報処理を目指したイオン蓄積技術の開発

### 3-3 Trapping and Cooling of Ions for Quantum Information Processing

早坂和弘 植竹 智 今城秀司

HAYASAKA Kazuhiro, UETAKE Satoshi, and IMAJO Hidetsuka

#### 要旨

量子ネットワークでは複数の物理系で量子状態をやり取りして量子情報処理や量子通信を行う。原子と光子からなる量子ネットワークのプロトタイプを構築するために、量子情報処理に適したイオン蓄積技術の開発を行った。最適な量子ビットとして $^{43}\text{Ca}^+$ を見だし、これを用いた量子情報処理、量子状態転送のスキームを検討した。そのために必要とされるリング型イオントラップと紫色半導体レーザーからなる光源系を開発した。量子状態転送を実現する物理プロセスである共振器量子電磁力学を $^{40}\text{Ca}^+$ を用いて実験的に研究し、単一イオンと光の場との結合を決定論的に制御する技術を実現した。

In quantum networks quantum information is processed by exchanging quantum states between physical systems. We have studied trapping and cooling of ions for quantum information processing to build a prototype of the quantum network. We have found  $^{43}\text{Ca}^+$  as the best candidate for the qubit in the quantum network. The schemes for quantum gate operations and for quantum state transfer with the ion species are discussed. We have developed a ring ion trap and a light source consisting of violet diode lasers for realizing the schemes. We have achieved deterministic coupling of a single  $^{40}\text{Ca}^+$  to the optical field in a cavity.

#### [キーワード]

量子ネットワーク, 量子状態転送, イオントラップ, 紫色半導体レーザー, 共振器量子電磁力学  
Quantum network, Quantum state transfer, Ion trap, Violet diode laser, Cavity QED

## 1 はじめに

量子力学の特徴を生かして、現存する技術では原理的に到達できない安全性、高速性などの特色を持った通信を実現するためには、量子状態を通信ノード間で忠実に転送するシステムの実現が不可欠である。量子ネットワークでは複数の異なる物理系間で量子状態をやり取りし、それぞれの利点を生かして量子情報処理や量子通信を行う。原子と光子を用いて形成する量子ネットワークは、最も実現性の高いものとされ、様々な量子通信のスキームを実験・検証するためのプロトタイプとしてその実現が期待されている[1][2]。この量子ネットワークでは、原子系がノードを形成し、光子が通信チャネルを形成する。原子系がエラー訂正などを含む量子情報

処理を量子計算で行い、その結果として現れた量子状態を光子の量子状態に転送して通信を行う。

イオントラップ中に蓄積され、レーザー冷却により極低温まで制御された原子イオンは、最も早い時期から量子情報処理に適した原子系として提案され[3]、理論的にも実験的にも多くの研究グループによって研究が行われてきた。我々は情報通信研究機構(旧通信総合研究所)で研究が行われてきたイオン蓄積技術を基盤として、量子ネットワークのプロトタイプの構築に不可欠な諸技術の研究開発を行った。量子情報処理を行い、光子系に量子情報を転送する目的に適したイオン種として $^{43}\text{Ca}^+$ を選定し、このイオン種に特化した量子情報処理、量子状態転送のスキームを検討した。このスキームを実現さ

せるのに適したリング型イオントラップを開発、試作し、その特性評価を行った。 $^{43}\text{Ca}^+$ を生成、冷却するための光源系として、紫色半導体レーザーからなる簡便で高性能な光源系を構築して、その性能評価を行った。量子状態を原子と光子で交換する基礎的な物理プロセスとして共振器量子電磁力学(Cavity QED)に着目し、マックスプランク量子光学研究所(Max-Planck Institute for Quantum Optics)と協力して研究を進め、単一イオンと共振器モード間の結合を決定論的に制御する技術を実現した。本論文ではこれらの概要を述べる。

## 2 $^{43}\text{Ca}^+$ による量子情報処理と量子状態転送

冷却イオンによる量子情報処理においては、単一イオン内の二つのエネルギー準位を量子ビットに割り当て、位相回転ゲート、制御NOTゲートなどの量子ゲート動作を行う。制御NOTゲートは二つの量子ビットに対する量子ゲートであるが、これは二つのイオンを共通の振動運動のモード[3]や光の場のモード[4]に結合させることにより行う。量子ネットワーク中でのノードとしての単一イオンの持つ量子情報を、チャンネルとしての光子に転送するためには、単一イオンと光の場を微小共振器で結合させることにより行う。これはCavity QEDと呼ばれる手法である[2]。単一量子ビットを考えると、単一イオンと光の場の量子情報転送は、二つの固有状態の重ね合わせ状態を単一イオンと光の場でやり取りすることに相当する。すなわち、イオンの固有エネルギー準位を  $\{|0\rangle_{\text{ion}}, |1\rangle_{\text{ion}}\}$ 、光の場の光子数確定状態を  $\{|0\rangle_{\text{photon}}, |1\rangle_{\text{photon}}\}$  と書けば、

$$(\alpha|0\rangle_{\text{ion}} + \beta|1\rangle_{\text{ion}}) \otimes |0\rangle_{\text{photon}} \leftrightarrow |0\rangle_{\text{ion}} \otimes (\alpha|1\rangle_{\text{photon}} + \beta|0\rangle_{\text{photon}}) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで光の場の固有状態は例えば右回り、左回りの偏光状態と置き換えてもよい。この転送過程は観測を伴わないので、複数の量子ビットからなる量子もつれ(entanglement)を持った状態でも、個々の量子ビットを順次転写することによって系全体の量子状態を転送することができる[2]。以上より、量子ネット

ワーク中でノードを形成するためのイオン種は、量子ゲート動作に適したエネルギー準位構造を持ち、かつ、Cavity QEDで量子状態の転送を行うために必要な光学遷移を持ったイオン種であることが望ましい。

任意の量子計算は単一量子ビットに対する位相回転ゲートと2量子ビットに対する制御NOTゲートを組み合わせることにより実現可能である。冷却イオンによる量子計算の場合、レーザーパルスの制御で比較的簡単に実現できる位相回転ゲートに対して、制御NOTゲートは多くの技術的困難を伴う。実際、最初の提案に沿ったフォノンモードをバスビットとして用いる制御NOTを実現するのに8年を要した。この時、用いられたイオン種は $\text{Ca}^+$ であった[5]。ほぼ同時期に、 $\text{Be}^+$ を用いた幾何位相を用いる制御NOTゲートが実現された[6]。一方、量子状態転送に必要な単一イオンと光の場のCavity QEDについては、 $\text{Ca}^+$ を用いた実験例が二つのグループにより報告されている[7][8]。量子情報の実験に用いられているイオン種としては $\text{Be}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Cd}^+$ などがあるが、上述の実験の報告例からは $\text{Ca}^+$ が有利であることが分かる。これまで用いられてきた $\text{Ca}^+$ は質量数40の同位体 $^{40}\text{Ca}^+$ であるが、核スピンの0であるために残留磁場によってエネルギー準位のシフトが生じてコヒーレンス時間が制限されるという欠点を持っている[5]。また、量子ビットを可視域の遷移を持つ2準位に取るのではなく、マイクロ波領域の遷移を持つ2準位に取る方法もあり、その優劣はまだ明らかになっていない。しかしながら $^{40}\text{Ca}^+$ には超微細構造がなく、マイクロ波領域の遷移を量子ビットとして取ることはできない。これらの問題を一度に解決するイオン種として、 $\text{Ca}^+$ の質量43の同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ がある。

図1に $^{43}\text{Ca}^+$ のエネルギー準位図を示す。 $^2\text{S}_{1/2}$  ( $F=4, m_F=0$ )と $^2\text{D}_{5/2}$  ( $F=6, m_F=0$ )を量子ビットに割り当てることにより、残留磁場に影響されない可視光領域の量子ビットが実現できる。また、 $^2\text{S}_{1/2}$   $F=3, F=4$ を量子ビットに割り当てることにより、マイクロ波に遷移を持つ量子ビットを使うこともできる。Cavity QEDによる量子状態転送に関しては、 $^2\text{D}_{5/2} - ^2\text{P}_{3/2}$ 遷移に対して光共振器を使って $^{43}\text{Ca}^+$ を結合させることで可能になる。

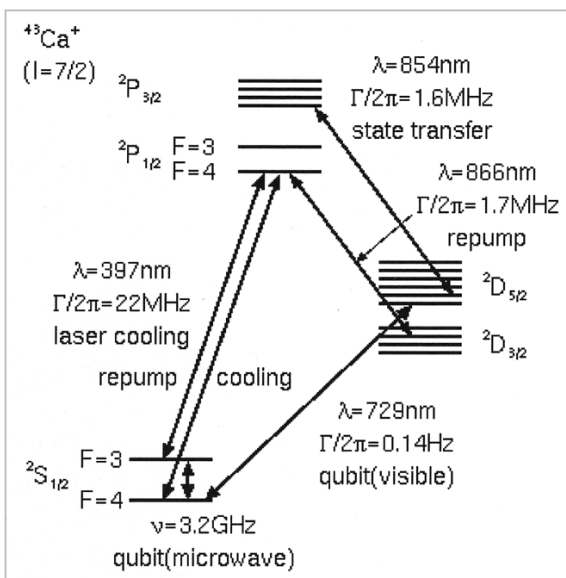


図1  $^{43}\text{Ca}^+$ のエネルギー準位図

波長854nmの光子が $^{43}\text{Ca}^+$ の量子状態を運ぶチャネルとなる。マイクロ波量子ビットを用いる際には、初めにマイクロ波量子ビットから可視域の量子ビットに $\pi$ パルスを用いて状態を転送し、そこから波長854nmの光の場への転送を行えばよい。

こうした $^{43}\text{Ca}^+$ の利点にもかかわらず、単一の $^{43}\text{Ca}^+$ のトラッピング、レーザー冷却の実験例は報告されていなかった。これには主に二つの理由があった。その一つは $^{43}\text{Ca}$ の自然存在比が0.135%と小さく、一般的に用いられる熱電子によるイオンの生成法では、最も比率の高い $^{40}\text{Ca}^+$ に対して1/1000程度の確率でしか生成できないことである。二つ目の理由は、 $^{40}\text{Ca}^+$ が核スピン値0であったのに対し、 $^{43}\text{Ca}^+$ の核スピン値が7/2であることにより、エネルギー準位構造の違いから $^{43}\text{Ca}^+$ では単純なレーザー冷却法が不可能になることである。すなわち、 $^{43}\text{Ca}^+$ においてはレーザー冷却のために照射したレーザーが基底状態のみからなる重ね合わせの状態 (dark state) を形成する。Dark stateはレーザー光を吸収しないのでレーザー冷却が行えない。しかしながら、最近になってこの二つの問題を解決できる見込みが出てきた。存在比の問題については、光共鳴イオン化により $^{43}\text{Ca}^+$ のみを生成できる可能性がある。この方法では波長423nmと波長390nmの二つのレーザー光でCaから $\text{Ca}^+$ を生成するが、波長423nmの吸収線の周波数が $^{43}\text{Ca}$ と $^{40}\text{Ca}$ で

600MHz程の差を持っているために、十分スペクトルが狭く、周波数安定化されているレーザーを用いれば $^{43}\text{Ca}^+$ を高い確率で生成することが可能であることが実験によって示された[9]。また、dark stateでレーザー冷却ができない問題に関しては、3本の偏光方向、周波数の異なったレーザー光を同時に照射する方法を考案した。この方法ではdark stateが追従できない速さでレーザー系の偏光が回転するので、レーザー冷却が可能になる。これによりdark stateを生じうる $^{43}\text{Ca}^+$ でもdark stateを持たない $^{40}\text{Ca}^+$ と同様にドップラー冷却限界温度までレーザー冷却できることが理論的に明らかになった[10]。

以上の議論を踏まえると、 $^{43}\text{Ca}^+$ を用いて実際に量子ネットワークのノードを構成するために、以下の三つの技術を実現させることが非常に重要であると考えられる。第1に、 $^{43}\text{Ca}^+$ のみを選択的に蓄積して、レーザー冷却するためのイオントラップの開発である。上述のように $^{43}\text{Ca}$ は本来1/1000程度の比率でのみ存在する同位体なので、レーザーの周波数で選択的に生成したとしてもその純度がそのまま100%になることは期待できない。レーザー周波数を調整して高感度カメラで観測すれば個々の $^{43}\text{Ca}^+$ と $^{40}\text{Ca}^+$ は識別できるので、 $^{43}\text{Ca}^+$ のみを選択的に運び出せる構造を持ったイオントラップを開発できれば確実に $^{43}\text{Ca}^+$ のみを配置して純粋な量子ビット列として用いることができる。第2に、 $^{43}\text{Ca}^+$ を光イオン化により生成し、レーザー冷却するための光源系の開発である。複数の光源を同時に稼働させることが必要になるので、安定に動作し、スペクトルの高度な制御ができる光源系が利用できれば実験が容易になる。そのため、半導体レーザーのみで構成される簡便な光源系が実現することが望ましい。第3に、単一イオンの量子状態と光の場の量子状態を相互に交換するCavity QED系の構築である。理論で提案されている量子状態転送を実現するためには、単一イオンと高ファイネス光共振器の結合を光の波長よりも十分小さな分解能で確実に制御しなければならない。これらの三つの課題について実験的な研究を行い、解決する見通しを得ることができたので、以下にその概要を述べる。



### 3 $^{43}\text{Ca}^+$ による量子情報処理に適したイオントラップ

イオントラップは電磁場を用いて荷電粒子を空間中に保持するデバイスである。量子情報処理に適しているとされるのは4本のロッド型電極に交流電場を印加することにより動作するリニアトラップ(linear trap)と呼ばれる種類のものである[3]。リニアトラップ中に蓄積した複数個のイオンをレーザー冷却すると、トラップ電極とイオン間のクーロン力によるエネルギーが運動エネルギーよりも大きくなり、イオンはトラップの軸上に1列に配列する。量子化されたイオン集団のトラップ軸方向の並進運動が基底状態まで冷却されると、そのフォノンモードの基底状態  $|0\rangle$  と第一励起状態  $|1\rangle$  を量子ビットとすることができる。このフォノンモードをバスビットとして用い、配列したイオン列内の任意の二イオン間で制御NOTゲートを実現し、配列するイオン数を増やすことでスケラブルな量子計算を行うというのが1995年のCiracとZollerによる最初の提案であった[3]。この制御NOTゲートは、2個の $^{40}\text{Ca}^+$ に対して、2003年インスブルック大学の研究グループにより初めて実現された[5]。また、幾何位相を用いた制御NOTゲートも2個の $\text{Be}^+$ を用いてほぼ同時期に実現されている[6]。光共振器との結合を通じて行う制御NOTゲートも理論的に提案されている[4]。量子計算を構成する任意のアルゴリズムは位相回転ゲートと制御NOTゲートに還元される[3]。冷却イオンによる量子計算では長い間課題とされてきた制御NOTゲートが実現したことで、最初に提案された冷却イオンによるスケラブルな量子計算[3]も実現に一歩近づいた。

最初の提案で想定されたイオントラップは単純な構成のリニアトラップであったが、もともと質量分析や精密分光等の実験用途にデザインされたものであり、量子情報処理に最適なものではない。量子ゲートや量子メモリなど、量子情報処理の用途に適したイオントラップをデザインする研究が近年始められている[11]。これらのトラップでは量子ゲート動作を行う領域や量子状態を保持する領域などが分割されており、イオンをそれらの領域を順次通過させることに

より量子状態の制御を行う。我々はイオンが軌道上を周回できるリングトラップに着目し、イオンの運動を制御する研究を行った。

開発したリング型イオントラップの概略を図2に示す。原子ビームからイオンを生成するための生成領域(Generation region)と、イオンの内部及び外部自由度の量子状態を操作、観測するための量子ゲート動作領域(Gate operation region)からなっており、トラップの中心に沿って配置されたDC電極でイオンの運動を能動的に制御して領域間の移動を行う構成になっている。イオン生成の際に電極に付着する原子により接触電位差が発生し、トラップ電場を乱してイオンの量子状態を壊すことが知られており[12]、イオンの生成領域を量子ゲート動作領域を空間的に分離すれば、これがある程度回避できる。また、 $^{43}\text{Ca}^+$ の実験では生成した $^{43}\text{Ca}^+$ と原子ビーム中の中性原子 $^{40}\text{Ca}$ と電荷交換を行って $^{43}\text{Ca}^+$ がトラップから失われることが知られており[9]、生成された $^{43}\text{Ca}^+$ を迅速に量子ゲート動作領域に移動させることが可能であれば、純粋な量子ビット列を生成する目的には有利だと考えられる。

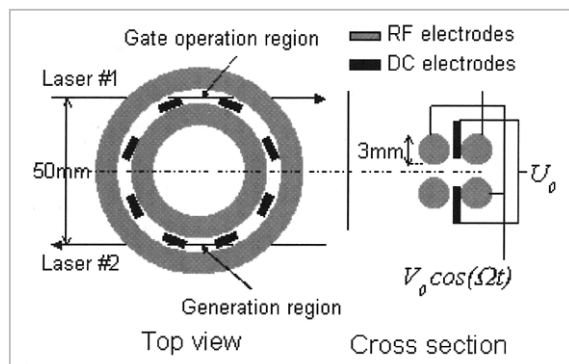


図2  $^{43}\text{Ca}^+$ 用に開発したリングトラップ

開発したリング型トラップで、DC電極の配列を用いてイオンの運動が制御できることを確認するために、 $\text{Mg}^+$ を用いて実証実験を行った。生成領域で原子ビームを熱電子でイオン化することにより $\text{Mg}^+$ を生成し、波長280nmのコヒーレント光(色素レーザーの第2高調波)を用いて $\text{Mg}^+$ の蛍光からその生成を確認した。DC電極に順次電圧を印加することにより、イオンを観測領域に移動させることができた。図3に観測領域まで移動され1列に配列した $\text{Mg}^+$ の像を示す。撮

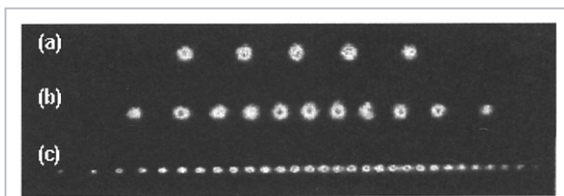


図3 リングトラップ内で一列に配置した  $Mg^+$

影はイメージインテンシファイア付き CCD カメラで行った。配列イオン数が異なる像を (a) - (c) に列挙している。

1 個のイオンが1量子ビットに対応するので、(a), (b) ではそれぞれ5, 11、(c) では29以上の量子ビットを1列に配置したことになる。このときのトラップ動作条件は、rf電圧の振幅  $V_0 = 150V$ 、DC電極の電圧は  $U_0 = 200V$  程度であった。今後、生成領域からのイオン移動効率や移動に要する時間といったトラップ特性を詳細に測定し、更なる電極構造の最適化を図る予定である。

DC電極の配列と組み合わせたリングトラップを用いた実証実験を行い、イオンの運動を制御できることが確認できた。コンピューター制御でDC電極へ印可する電圧を高度に制御することで、レーザー光や光共振器との相互作用領域を一定の時間で通過させることができれば、量子ゲート動作やCavity QEDによる量子状態の転送などにそのまま応用することができる。また、量子計算では量子状態がコヒーレントに保たれる間に何ステップの量子ゲート動作ができるかが大規模化への一つの鍵となるので、コヒーレンスを保ったままでどれだけ高速に量子ビット列をリング電極の軌道に沿って回転させられるかなどの研究も今後重要になってくると思われる。

#### 4 $^{43}Ca^+$ による量子情報処理のための半導体レーザー光源

$^{43}Ca^+$  は量子ネットワークのノードを担う量子ビットに適したイオン種であるが、その生成とレーザー冷却には複数台の周波数安定化されたレーザーを必要とする。表1に最も基本的な実験である量子ビットの位相回転ゲートを行うまでに必要な光源を列挙した。広く用いられてきた色素レーザーやチタンサファイアレーザー等の

表1  $^{43}Ca^+$  による位相回転ゲート動作に必要なとされる光源

波長(台数)	用途
390nm(1), 423nm(1)	光共鳴イオン化
397nm(3)	レーザー冷却
405nm(1)	紫色レーザーの周波数基準
866nm(1)	レーザー冷却のリポンプ
895nm(1)	近赤外レーザーの周波数基準
729nm(1)	量子ビット操作

大掛かりな光源でこの数の波長を同時に発生させるのは困難を伴う。アルカリ金属型の電子配置を持つ他のイオン種でも、 $^{43}Ca^+$  と同様の超微細構造を持つ同位体を用いた場合には、波長の違いこそあれ同程度の数の光源を必要とする。そうしたイオン種の中で $^{43}Ca^+$  を用いることの現実的な利点は、必要な光源がすべて半導体レーザー(LD, laser diode)で構成可能なことである。表1で、800nm台の近赤外光源、729nmの赤色光源は既に製品として入手できる外部共振器型半導体レーザー(ECDL, extended-cavity diode laser)をベースとして構成することができる。波長390nmから423nmの紫色の波長域に関しては、近赤外高出力半導体レーザーの第二高調波(SHG, second harmonic generation)により構成することが一般的に行われてきた。近年入手可能になってきたGaN系の紫色半導体レーザーをベースとしてこれらの光源を構成することができる。しかしながら、紫色半導体レーザーを用いてレーザー冷却や量子状態の制御に耐える性能を持った光源を構成した研究例は報告されていなかった。そこで、実際に紫色半導体レーザーのスペクトル狭さく化と周波数安定化を行い、複数の紫色光源を同時に稼働させるための研究を行った。

まず手始めに、そのままではマルチモードで発振するGaN系LDを外部共振器構成とすることにより縦横単一モードで動作させた。さらに共焦点共振器を用いた光フィードバックによりスペクトル幅の狭さく化を行った。周波数安定化のために波長405nmに約200kHzの自然幅の遷移を持つK原子のドップラーフリー分光を行い、この遷移を用いた周波数基準レーザーの周波数安定化を行った。この波長405nmのレーザーを基準として複数の紫色LDの周波数を同時に安定

化するため、繰り返し周波数掃引する光共振器とコンピューター制御を組み合わせた簡便な周波数安定化方式を開発し、1時間当たりの周波数変動を1MHz以下に押さえることができた。以下にこれらの詳細を述べる。

ECDLは、回折格子からの一次回折光の波長選択性を利用して単純な構成でLDの単一モード動作を得る方法であり、分光用LDのスペクトル制御法として赤色や近赤外域のLDに広く用いられてきた。我々は紫色LDにこの方法をいち早く適応して、波長397nm、出力3mW、スペクトル幅2MHz以下の紫色ECDLを構成した[13]。このECDLを用いて、 $^{40}\text{Ca}^+$ のレーザー冷却を行ったところ、半径5mmのイオントラップに蓄積させた30個程度の $^{40}\text{Ca}^+$ が規則的な配列を形成する温度まで冷却できることが確認された[13]。紫色LDでもスペクトルに制御を施すことでレーザー冷却が可能であることが実証された。 $^{43}\text{Ca}^+$ の自然幅が約22MHzであるので、LDに関しては1MHz以下のスペクトル幅、周波数安定度があることが安定した実験をするためには望ましい。しかしながら、紫色ECDLのスペクトルを詳細に観測すると1秒当たり5MHz程度の周波数ジッターが観測され、更なるスペクトル制御が必要であることが分かった。

紫色ECDLの短期的なスペクトル幅を1MHz以下とするために、光フィードバックを用いて狭く化を行った。光フィードバックは赤色、近赤外域で単体のLDに適用してスペクトル狭く化を行う方法として知られてきたが、ECDLに適用した例はほとんどなかった。ECDLに適用した場合にはロッキングレンジが小さくなるので、結果として周波数掃引幅が狭くなり、また、ロックの持続時間が短くなるという問題点があった。我々は二つの低速な電氣的フィードバックを補助的に併用するという独自の拡張法を採用することで、周波数掃引幅とロックの持続時間を保ったまま紫色ECDLのスペクトル狭く化を行うことができた[14]。その構成を図4に示す。これにより一秒間の周波数変動は300kHz以内に抑えられ、スペクトル幅も観測用の光共振器の線幅で制限される270kHz以下に狭く化することができた[14]。

スペクトルの狭く化には光共振器を用いた

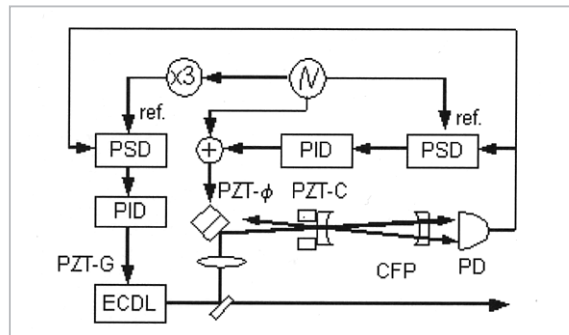


図4 光フィードバックによる紫色半導体レーザーのスペクトル狭く化

が、その際の紫色ECDL周波数は光共振器に応じて変動する。長時間にわたる周波数安定化を行うためには安定した絶対周波数を持つ基準が必要とされる。近赤外域ではCs原子(D1 895nm, D2 852nm)やRb原子(D1 795nm, D2 780nm)の吸収線がこの基準としてしばしば用いられる。アルカリ金属原子は蒸気圧が高いのでガスセルを用意すればこの基準が利用できるという手軽さもあり、これらの遷移は標準的な周波数基準として用いられている。紫色LDに関しては、これらに相当する遷移が知られていなかった。我々はK原子が405nmに持つ自然幅200kHzの遷移に着目し、ガスセルを用いてドップラーフリー分光を行った。光フィードバックでスペクトル狭く化した紫色ECLDを用いて、半値全幅3.6 MHz、S/N 17程度のスペクトルを測定することができた[15]。これを誤差信号として紫色ECLDの周波数をロックしたところ4時間以上安定に動作することを確認できた。この時の周波数安定度は200 kHz程度以内に収まっていると推定された。

表1の光源のうち、390nm、423nm、397nm(3台)計5台の光源の周波数安定化を同時に行うために、周波数を繰り返し掃引する光共振器とコンピューター制御を組み合わせた簡単な方法を開発した。概略を図5に示す。図は3台のECDL(397nm)について示してあるが、入射ポートを二つ追加することで423nmと390nmのECDLも同時に周波数安定化できる。光共振器(transfer cavity)は鋸波で繰り返し掃引され、光スペクトラムアナライザーとして動作している。これに周波数基準となる405nm ECLDと、光チョッパーで選択した対象の397nm ECLDの一本



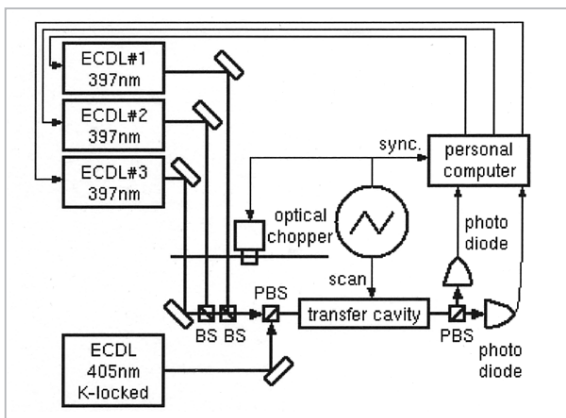


図5 複数半導体レーザーの同時周波数安定化

を偏光ビームスプリッター (PBS) で重ねて入射し、それぞれのフリンジの位置を計測する。397nm ECDL のフリンジと 405nm ECDL のフリンジの間隔が一定となるようにコンピュータで 397nm ECDL にフィードバックを行うことで、397nm ECDL の周波数安定化を行う。光チョッパーで 3 台の 397nm ECDL を 1 台ずつ選択することで複数 ECDL の周波数安定化を同時に行う。エラーシグナルの導出法などを理論的な考察により最適化して実際のシステムを構築し、3 台の ECDL を 1 時間以上にわたって安定化できることを確認した。波長 397nm ECDL の絶対安定度を評価するための装置が利用できなかったため、エミュレーターとして、He-Ne レーザーを基準に 866nm ECDL を同じ方法で安定化するシステムを構築し、フェムト秒レーザーをベースとする絶対安定度  $10^{-13}$  の光周波数コムを用いてこのエミュレーターの絶対周波数の安定度を測定した。エミュレーター自身の周波数揺らぎは 1000 秒当たり 100kHz であった。この結果と紫色 ECLD 周波数安定化システムの誤差信号から周波数変動の上限を理論的に評価したところ、1000 秒当たり 250kHz 以下であることが推定された。これは  $^{43}\text{Ca}^+$  のレーザー冷却を行う際の目安である 1MHz に収まっており、十分な周波数安定度だと考えられる。

$^{43}\text{Ca}^+$  による量子情報処理に必要な光源系のうち、紫色半導体レーザーの周波数安定化について述べた。紫色半導体レーザーをベースとして  $^{43}\text{Ca}^+$  のレーザー冷却や量子状態の観測を行う光源系を構成することができた。これらのほかに、表 1 に列挙された 866nm のリボン光源や、量

子ビット操作の波長 729nm の光源が必要である。前者については波長 895nm の Cs D1 線を基準とすることで、紫色半導体レーザーに用いた光フィードバック、transfer cavity による周波数安定化の手法がそのまま適用できた。後者については、対象とする遷移の線幅自体が 1Hz 以下の狭い遷移であるため、さらに高度な周波数制御の方法が要求される。既に波長 729nm の ECDL を構成し、光フィードバックによる周波数短期安定化が有効であることが確認できたので、さらに真空槽内に置かれた安定な基準共振器に周波数ロックすることで、十分な周波数安定度を得られると考えている。実際の量子ネットワークのプロトタイプで実験を行うためには、複数のノードが安価に構成できて安定に動作する必要があるため、本研究で行った半導体レーザーのみから光源系を構成するアプローチは非常に有効な方法だと考えられる。

## 5 量子情報転送のための Cavity QED

量子状態を原子系と光の場で交換する方法としては、Cavity QED による方法[2]と電磁波誘起透明化 (EIT) を用いた方法[16]がある。クーロン反発で原子系の密度が必然的に低くなるイオン集団には前者の方法が適している。Cavity QED による量子状態転送は、図 6 に示されるように 3 準位系イオンを、結合定数  $g$  で高フィネスの光共

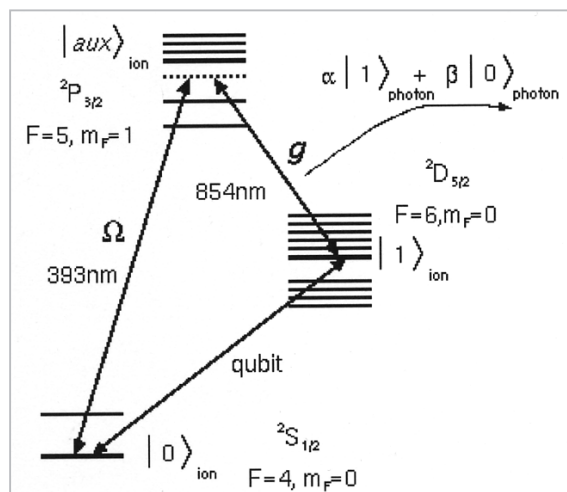


図6 Cavity QED による  $^{43}\text{Ca}^+$  から光の場への量子状態転送

共振器に結合させ、ラビ周波数  $\Omega(t)$  のレーザーパルスを照射することにより行われる。共振器の損失  $\kappa$  が十分に小さく、 $|aux\rangle_{ion}$  から  $|1\rangle_{ion}$  への減衰定数  $\Gamma$  に対して十分な大きさの  $g$  が実現できれば、 $\Omega(t)$  を調整することにより、式 (1) のように、単一イオンの量子状態を光の場の量子状態に転写することができる。また、時間発展が逆にたどるプロセスを用いれば、光の場の量子状態を単一イオンに転送することができる。

ここで最も重要なパラメーターは結合定数  $g$  であるが、これは共振器内の光の場とイオンが光子1個を交換する周波数である。結合定数  $g$  は、

$$g = \sqrt{\frac{\mu^2 \omega}{2\hbar \epsilon_0 V_m}} \psi(\mathbf{r}) \quad (2)$$

と表される[17]。ここで、 $\mu$  : 双極子モーメント、 $\omega$  : 共鳴周波数、 $\epsilon_0$  : 真空の誘電率、 $V_m = \int |\psi(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}$  : 共振器のモード体積、 $\psi(\mathbf{r})$  : イオンの位置  $\mathbf{r}$  における共振器のモード関数である。ここで  $\mu$  と  $\omega$  はイオン種で決まってしまうので、 $g$  を十分大きくするにはモード体積を小さくするとともに、モード関数  $\psi(\mathbf{r})$  が大きくなるようにイオンと共振器の相対位置を制御しなければならない。共振器内の光電場は定在波であるから、共振器の軸方向を  $z$  座標にとり、 $w_0$  を基底モードのスポットサイズとすれば、 $\psi(\mathbf{r})$  は、

$$\psi(\mathbf{r}) = \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right) \quad (3)$$

と表される。 $\psi(\mathbf{r})$  を最大値で一定に保つことは (3) 式より、波長の1/2周期で変化する定在波の腹に単一イオンを止めて置くことに相当する。 $^{43}\text{Ca}^+$  を用いる際には波長が854nmとなるので、数10nmの精度でのイオン位置の制御が必要となる。個々の中性原子、イオンを空間中にこの分解能で静止させる技術は確立されていない。

単一イオンを可視光の波長以下の空間分解能で光共振器中に配置する技術を確立するため、マックスプランク量子光学研究所のH. Waltherのグループと協力して $^{40}\text{Ca}^+$ を用いた実験を行った。共振器内でより高い空間分解能での位置の制御性を確認する観点からは、より短波長での実験が望ましいので、波長397nmの光共振器に $^2\text{P}_{1/2} - ^2\text{S}_{1/2}$ 遷移を結合させ、その結合強度  $g$  を制

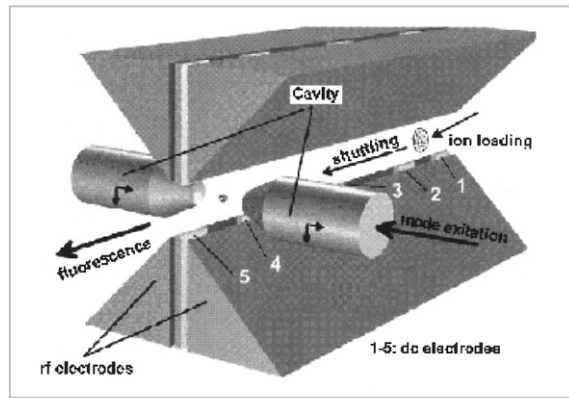


図7 Cavity QEDのためのイオントラップ装置

御する実験を行った[17]-[19]。図7に示す線形イオントラップに光共振器を組み合わせた装置を製作した。ミラーの直径は3mm、長さは10mmで、先端部を直径1mmまでテーパ状に削り込んであり、間隔6mmで共振器を形成してある。トラップ装置でイオン生成部が共振器とは距離を置いて設定されていて、生成時にオープンから出る原子でミラーが汚染されるのを防いでいる。生成されたイオンはdc電極に順次印可した電場によりトラップの軸上を進行して共振器内に挿入される。共振器内に置かれたイオンは波長397nmのレーザー光でドップラー限界まで冷却される。イオンが1個であることは、 $^2\text{D}_{5/2}$ にイオンを励起した際に波長397nmの共鳴蛍光の強度が個数に応じて階段状になることから確認した[18]。単一イオンが共振器中に配置した後、波長397nmの弱い励起光で共振器内のモードを励起し、イオンからの蛍光強度が(3)式の $\psi(\mathbf{r})$ に比例する事実を用いて共振器内でのイオンの座標の観測を行った。この時、イオンと共振器の相対位置をトラップのdc電極に印可する電圧、共振器を載せたピエゾ素子の変位の組合せにより走査した。測定された蛍光強度の空間分布から、イオンを共振器の縦、横モード内で任意の場所に局在させられることが確認できた。縦モード内でのイオンの座標の制御性を示す結果を図8に示す。縦モードは波長397nmの定在波パターンであるが、それよりも十分小さい分解能でイオンの位置が制御されている。ドップラー冷却限界で決まる温度での振動により、イオンはある程度の空間的広がりを持っているが、定在波パターンの明瞭度から推定して半値全幅で42nm程



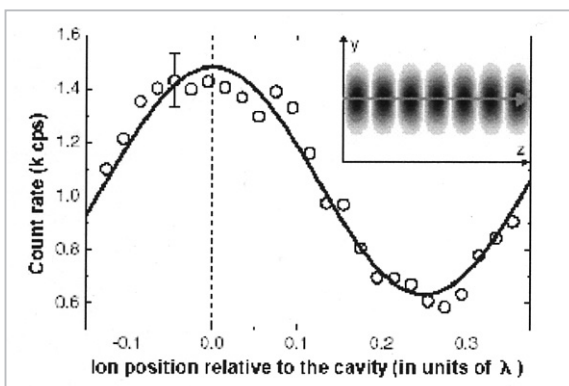


図8 単一 $^{40}\text{Ca}^+$ によって測定した波長397nm  
定在波の光強度分布

度であった。このようにしてドップラー冷却のみで単一イオンを共振器内で波長より十分小さい領域に局在させることができ、共振器モードとの相対位置の制御が可能だことが確認された。

困難な技術の一つと考えられていた単一イオンと光共振器の結合の制御技術を確立した。最も基本的な量子状態転送は式(1)で $\alpha = 1$ 、 $\beta = 0$ の場合であり、単一イオンから単一光子を発生させることに相当する。単一光子を決定論的に発生させる技術は量子暗号や線形光学素子を使った量子計算等の応用で実現が強く望まれている[17]。我々は光共振器に配置した単一 $^{40}\text{Ca}^+$ から単一光子列を発生させる予備的実験を行い、数%の効率でその発生を確認することができた。パラメータを最適化することで50%以上の効率で単一光子が発生できることが計算により予想されており[18][19]、単一光子発生源としての応用も重要であると考えられる。これまでの実験は比較的扱いが簡単な $^{40}\text{Ca}^+$ を用いて行ってきたが、 $^{43}\text{Ca}^+$ の使用を想定したリング型イオントラップと紫色半導体レーザー光源系を組み合わせるこ

とで、 $^{43}\text{Ca}^+$ でも同様の cavity QED による制御が可能だと考えている。

## 6 まとめ

原子と光子からなる量子ネットワークのプロトタイプを構築するために適したイオン種として $^{43}\text{Ca}^+$ を見だし、これを用いて量子情報処理、量子状態転送を行うためのスキームを検討した。実際のプロトタイプを構成するために必要なリング型イオントラップを開発してその特性評価を行うとともに、紫色半導体レーザーを中心とした光源系を開発した。マックスプランク量子光学研究所と協力して原子から光子への量子状態転送に不可欠なプロトコルである Cavity QED を理論的、実験的に研究し、単一イオンと光電場間の結合を波長よりも精密な分解能で制御する技術を確立した。これらの技術を統合することで、 $^{43}\text{Ca}^+$ を選択的に生成、レーザー冷却し量子ビット列として空間中に配置し、量子ゲート動作を行い、さらにその結果として現れた量子状態を光子の量子状態に乗せて転送する量子ネットワークの基礎的な物理過程が近い将来可能になってくると思われる。

## 謝辞

半導体レーザーの周波数安定度の測定で協力をしていただいた電磁波計測部門原子周波数標準グループの皆様に感謝します。単一 $^{40}\text{Ca}^+$ による Cavity QED 実験で協力して研究を行ったマックスプランク量子光学研究所の H. Walther, W. Lange, M. Keller, B. Lange 各氏に感謝します。

## 参考文献

- 1 C. Monroe, Nature 416, 238, 2003.
- 2 J. I. Cirac, P. Zoller, H. J. Kimble, H. Mabuchi, Phys. Rev. Lett. 78, 3221, 1997.
- 3 I. Cirac, P. Zoller, Phys. Rev. Lett. 74, 4091, 1995.
- 4 J. Pachos, H. Walther, Phys. Rev. Lett. 89, 187903, 2002.
- 5 F. Schmidt-Kaler, H. Häffner, M. Riebe, S. Gulde, G. P. T. Lancaster, T. Deuschle, Becher, C. F. Roos, J. Eschner, R. Blatt, Nature 422, 408, 2003.
- 6 D. Leibfried, B. DeMarco, V. Meyer, D. Lucas, M. Barrett, J. Britton, W. M. Itano, B. Jelenkovic, C. Langer, T. Rosenband, and D. J. Wineland, Nature 422, 412, 2003.

- 7 G. Guthörlein, M. Keller, K. Hayasaka, W. Lange, H. Walther, Nature 414, 49, 2001.
- 8 A. B. Mundt, A. Kreuter, C. Becher, D. Leibfried, J. Eschner, F. Schmidt-Kaler, R. Blatt, Phys. Rev. Lett. 89, 103001, 2002.
- 9 D. M. Lucas, A. Ramos, J. Home, M. McDonnell, S. Nakayama, J. Stacey, S. Webster, D. Stacey, A. Steane, Phys. Rev. A 69, 012711, 2004.
- 10 M. Kajita, K. Matsubara, Y. Li, K. Hayasaka, M. Hosokawa, to be published in Jpn. Jour. Appl. Phys.
- 11 D. Kielpinski, C.R. Monroe, and D.J. Wineland, Nature 417, 709, 2002.
- 12 Q.A. Turchette, D. Kielpinski, B.E. King, D. Leibfried, D.M. Meekhof, C.J. Myatt, M.A. Rowe, C.A. Sackett, C.S. Wood, W.M. Itano, C. Monroe, and D.J. Wineland, Phys. Rev. A 61, 063418, 2000.
- 13 K. Hayasaka, S. Urabe, M. Watanabe, Jpn. J. Appl. Phys. 39, L687, 2000.
- 14 K. Hayasaka, Opt. Commun. 206, 401, 2002.
- 15 S. Uetake, K. Hayasaka, M. Watanabe, Jpn. J. Appl. Phys. 42, L332, 2003.
- 16 M. Fleischhauer, M. D. Lukin, Phys. Rev. Lett. 84, 5094, 2000.
- 17 早坂和弘, レーザー研究, 31, 586, 2003.
- 18 M. Keller, B. Lange, K. Hayasaka, W. Lange, H. Walther, J. Phys. B, 36, 613, 2003.
- 19 M. Keller, B. Lange, K. Hayasaka, W. Lange, H. Walther, Appl. Phys. B 76, 125, 2003.



はやさか かずひろ  
**早坂和弘**

基礎先端部門量子情報技術グループ主  
任研究員  
量子光学

うゑ たけ  
**植竹 智**

基礎先端部門量子情報技術グループ専  
攻研究員 博士(理学)  
原子物理学



いま じゆ ひとし  
**今城秀司**

基礎先端部門量子情報技術グループ主  
任研究員 博士(工学)  
レーザー分光