

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」
平成 16 年度採択研究代表者

占部 伸二

大阪大学大学院基礎工学研究科・教授

冷却イオンを用いた量子情報処理基礎技術

1. 研究実施の概要

冷却イオンを用いた量子情報処理の基礎技術を確立するために、イオンの振動基底状態までの冷却、 Ca^+ イオンの準安定準位や Yb^+ および Ba^+ イオンの長寿命時計遷移を用いた新しい量子ゲート、協同冷却、イオンと光の相互作用、大規模化に向けたイオントラップ技術の開発を進めている。

Ca^+ イオンの振動基底状態までの冷却については Paul トラップ中の 1 個のイオンおよびリニアトラップ中の 2 個のイオンについて、量子ゲートの初期化に十分な振動基底状態近くまでの冷却を達成した。 Ca^+ イオンを用いた新たな量子ゲートの開発として、1.8THz 離れたレーザーの位相同期システムを開発してきた。本年度は Ca^+ イオンの準安定準位間のラマン遷移の観測とコヒーレンス時間の測定を行いこの遷移が量子ゲートに使えることを確認した。また、量子ゲート初期化の方法として高速断熱通過法についての実験を行い、初期化がほぼ 100%に近い確率で行えることを確認した。今後は光源の性能向上、リニアトラップの導入により量子ゲート実験へ進む予定である。 Ca^+ イオンの奇数同位体の選別捕獲法についての検討を行い偶数イオンの除去の純化が必須であることを明らかにした。新たなイオントラップとして平面型イオントラップの設計・試作を行うとともにイオンを捕獲してマイクロ運動の補正に関する実験を行った。

光周波数標準の基準遷移として用いられる寿命の長い遷移を量子ビットに利用することにより、コヒーレンス時間の長い量子ゲートの実現を目指して研究を進めている。 Yb^+ では、補正電圧を印加してマイクロモーションの除去を行い、数個のイオンがトラップされた状態で冷却遷移の自然幅の 2 倍程度のスペクトルが観測できるまでレーザー冷却を進めた。また、光イオン化法を用いて、イオンを 1 個ずつトラップする技術を確立した。 Ba^+ では、光イオン化によるイオンの生成・トラップに成功した。これによりトラップするイオン数を減少させることが可能となり、トラップ数約 400 個、到達温度 6K まで到達した。時計遷移を励起するレーザーの整備は両イオンとも継続して行い、

Yb⁺では光共振器の性能を含めた評価を可能とするために2台目のシステムを構築した。今後はより小型のトラップでレーザー冷却を行い、マイクロモーションの除去をより正確に行って、ラム・ディッケ領域への閉じこめを実現する。時計遷移の分光を開始する。また、時計遷移励起用レーザーをはじめ、必要な光源の開発と性能向上を継続する。光周波数コムを用いた評価も取り入れていく。光周波数標準に重点を置いて研究を進めることとする。

協同冷却の研究では、量子ビットを担うイオンを冷媒イオンとのクーロン相互作用により継続的に冷却し、高い忠実度でのゲート動作を可能にする技術の開発を行う。これまでに量子ビットとしてのCa⁺に対してIn⁺を選出し、Ca⁺配列を保ったままIn⁺を埋め込み、指定した個数のIn⁺を指定した場所に高い確率で配置する技術を開発した。冷媒としてのIn⁺をレーザー冷却すれば、Ca⁺の内部量子状態を保持したままCa⁺/In⁺配列を低温に保つことが可能であり、イオントラップ量子計算の根本的問題である外部自由度の過熱を克服する方法となることが期待される。

光-イオン相互作用の研究では、共振器量子電磁力学的方法により空間的に離れたイオン間に量子状態の配線を実現する方法を開発する。これまでにユニタリーな量子状態転送を用いる決定論的方法と、イオン間の量子もつれを用いたテレポーションによる確率論的方法が有力であることを明らかにし、実現に必要な条件を解析した。フィネス約250,000の超低損失微小光共振器の製作、評価を完了した。この共振器を長さ6mmで配置した際に、その内部に配置するトラップ装置の製作とトラップ動作確認を完了した。このトラップ装置のサイズを更に縮小して、長さ4mmの共振器中に配置して単一イオンと共振器の結合系を形成すれば約17%の確率でCa⁺の量子状態を反映した単一光子が生成されると試算される。

大規模化に向けたイオントラップ技術については、極低温で動作する平面型トラップを開発し、単一Sr⁺イオンを振動基底状態付近まで冷却することにより運動加熱レートの測定を行い、従来の報告より桁低い値を得た。今後はイオンの移動や量子ゲートに関する実験を行う。

2. 研究実施内容

大阪大学グループ

大阪大学グループでは、Ca⁺イオンを用いて量子情報処理の基礎技術の開発を進めている。イオンの振動基底状態までの冷却、高速ゲートが可能になる準安定準位間のラマン遷移を用いた量子ゲートの開発、奇数同位体の選別捕獲と量子ゲートへの検討、大規模集積化に最適な、操作性の良いシステムの構築のための平面トラップの開発などを進めている。

冷却イオンを用いた量子ゲートを実現するためには、イオンの振動状態を基底状態まで冷却することが前提条件である。これまでマイクロ運動の補正、閉じた冷却サイクルに必要な光ポンピングなどを確立し、サイドバンド冷却実験を行ってきたが、振動量子数が0.2以下まで下がらない、あるいは再現性が悪いなどの問題があった。これはイオントラップ

を駆動する rf 電源の付加雑音によることが判明し、これを除去することで解決することができた。現在、単一イオンの振動量子数として 0.02 までの冷却を実現している。また、開発した小型のリニア型イオントラップに 2 個の Ca^+ イオンを捕獲・冷却し、サイドバンド冷却を行うことにより、重心運動モード、ストレッチモードをそれぞれ振動量子数として 0.1 以下までの冷却に成功した。

準安定準位間誘導ラマン遷移を用いた量子ゲートの開発においては、励起光源のコヒーレンスを確保するために、850nm および 854nm の 1.8THz 離れた二台の近赤外波長のレーザーを GPS 基準に安定化した光周波数コムを用いて位相ロックした。これまでに開発した基本的な分光・冷却用光源、分光計測システムと上記の位相同期レーザーシステムを用いて、一個の Ca^+ イオンの準安定準位間のラマン遷移の直接観測を行った。その結果、計算から予測される遷移を観測するとともに、共鳴スペクトルの線幅として 500Hz 程度の狭い線幅を得た。これまで精密に測定された例のない Ca^+ イオンの準安定準位間のエネルギー差の精密測定を行い、光シフト等を補正することにより周波数差を 30Hz 程度の不確かさで同定した。またラムゼイ干渉法により 1 個の Ca^+ イオンの準安定準位量子ビット遷移の時間領域でのコヒーレンスの測定を行った。ラムゼイ共鳴曲線の可視度の変化を求めることにより、1.7ms 程度のコヒーレンス時間が得られた。磁場感度の異なる副準位間のコヒーレンス時間を比較することにより、コヒーレンス時間を主に制限しているのは外部磁場の変動によることが判明した。不均一な緩和による影響を取り除くため、さらにスピンエコー法を用いてラムゼイ共鳴の観測を行った。これにより、コヒーレンス時間として約 5ms を得ることができた。今後量子ゲート操作を行う上で十分な値であるといえる。

量子ゲートを実現するためには、準安定状態の特定の副準位に占有数を準備する初期化が必要となるため、高速断熱通過法を用いたゲート初期化の実験を行った。ガウス型のレーザーパルスと周波数掃引を用いて基底状態の副準位から準安定準位の副準位に 100% に近い確率で占有数を移せることを確認した。さらに、高速断熱通過法を用いたロバストな重ね合わせ状態の生成も試みた。ラムゼイ共鳴により生成された状態を診断した結果、非常に高い確率で重ね合わせ状態が生成されていることを確認した。20 年度はこれらの技術をもとに準安定準位間誘導ラマン遷移を用いた量子ゲートの実現を目指す予定である。

これまで光イオン化による同位体シフトを利用した選別の手法を用いて、天然同位体から、微量奇数同位体の $^{43}\text{Ca}^+$ を選別して捕獲し、冷却を行う実験を進めてきた。この実験において、 $^1\text{S}_0\text{-}^1\text{P}_1$ 遷移を利用した光イオン化の選択性を検討したところ、ドップラー広がりや強度広がりを理想的に抑えることができたとしても、イオン捕獲の際には偶数核の同位体を完全には排除できないことがわかった。選択性の不完全さを補うためには、選別捕獲の後に他の同位体を追い出す純化のプロセスが重要であることを明確にした。

大規模化に向けた新規トラップの開発では、共同研究先の MIT のグループが作製した平面型トラップを用いて昨年度に引き続き実験を行った。光イオン化法を用いて捕獲した $^{40}\text{Ca}^+$ の個数を減らすことにより単一イオンの捕獲を確認した。捕獲イオンのマイクロ運動

の補正についての実験を行った。また、アルミナ基板に金コートで新たに平面トラップを作成した。様々なサイズの平面型トラップや格子状の平面型トラップのポテンシャルのシミュレーションを行った。

京都大学グループ

Yb^+ については、レーザー冷却実験をすすめた。2つの補正電極とエンドキャップ電極の1つに DC 電圧を与えて不要な静電場を打ち消し、マイクロモーションの除去を試みた。まだ完全ではないが、イオン数個をトラップした場合で冷却遷移の自然幅の 2 倍程度のスペクトルが観測できるまで冷却を可能にした。また、オープンの温度をさらに下げることにより、光イオン化でイオンを 1 個ずつトラップに導入する技術を確認した。ラムーディック領域へイオンを閉じ込めるための小型イオントラップ装置の製作に着手した。15 MHz で $Q=250$ のヘリカル共振器を作製し、トラップに十分な大きさの rf 電圧を印加することができた。S-D 遷移分光用レーザーは同等の 2 台目のシステムを完成させ絶対線幅を評価し、短時間では 10 kHz 以下であることが分かった。また、外部共振器型第 2 高調波発生部を改良し、最大 1.6 mW の波長 411 nm 光を得た。S-F 時計遷移操作レーザーの開発では、外部共振器型テーパー半導体レーザーの外部共振器型第 2 高調波発生により 16 mW の波長 467 nm 光を得た。

Ba^+ については、光イオン化を導入した。 Ba 原子の波長 553 nm $^1\text{S}_0\text{-}^1\text{P}_1$ 遷移を励起する光源を半導体レーザーの第 2 高調波で発生させた。イオン化ポテンシャル以上へ励起する第 2 励起光は波長 396nm の半導体レーザーを用いた。 Ba 原子源としてゲッターを利用しているが、これまで蒸発する Ba の量を制御できない欠点がありイオンの少数個化の妨げになっていた。光イオン化法の導入により、第 1 励起光の蛍光強度から Ba 量の制御が可能となり、個数約 400 個、到達温度 6 K までレーザー冷却を進めることができた。また、ラムーディック領域への閉じ込めのための小型リニアトラップを、占部グループの形状をもとに NICT グループにて電界を数値計算して設計した。S-D 時計遷移操作レーザーの波長 1.06 μm ネオジウム YAG レーザー励起パラメトリック発振器(OPO)では、シグナル光波長 1.76 μm に対して共鳴する光共振器で、アイドラー光 13 mW を確認した。

NICT グループ

In^+ による Ca^+ の協同冷却実験では、リニアトラップ内で配列した Ca^+ に In^+ を個数と位置を指定して配置するための研究開発を実施した。まず光イオン化により Ca^+ 配列を生成し(図 1(a))、トラップ rf 電圧の減少と冷却レーザーの遮断を同時に加えることで Ca^+ を 1 個ずつ取り除き(図 1(b))、指定した数の量子ビット列を配列する技術を開発した。続いてオープンから蒸発する In 原子を Ca^+ 配列に導き、411nm の GaN 紫外半導体レーザーで光イオン化することにより Ca^+ 配列を破壊することなく、冷媒としての In^+ を埋め込むことに成功した。 In^+ は Ca^+ 配列内を動き回る蛍光を発しないサイトとして識別した。さらに、rf 電圧を短時間のみ減少させることにより In^+ のみを 1 個ずつ取り除く手法(図 2(a))、DC 電圧を下げて In^+ を徘徊させて所望の配列が現れた際に DC 電圧を上

げて固定する手法(図 2(b))を開発した。このようにして生成した任意の Ca^+/In^+ 配列で冷媒としての In^+ をレーザー冷却すれば、 Ca^+ の内部量子状態を保持したまま低温に保つことが可能であり、イオントラップ量子計算の根本的問題である外部自由度の過熱を克服する方法となることが期待される。

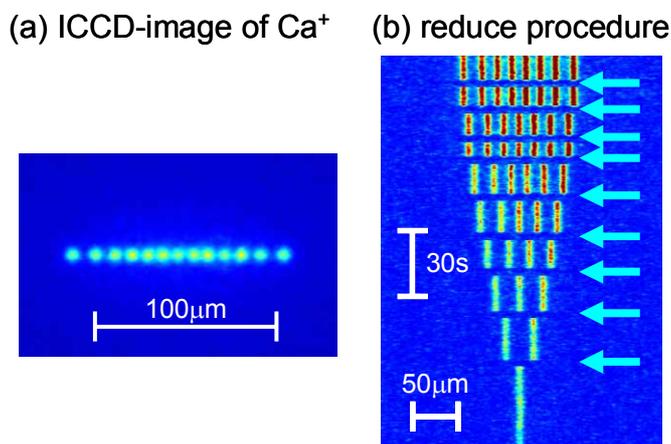


図 1 量子ビット列としての Ca^+ 配列の生成

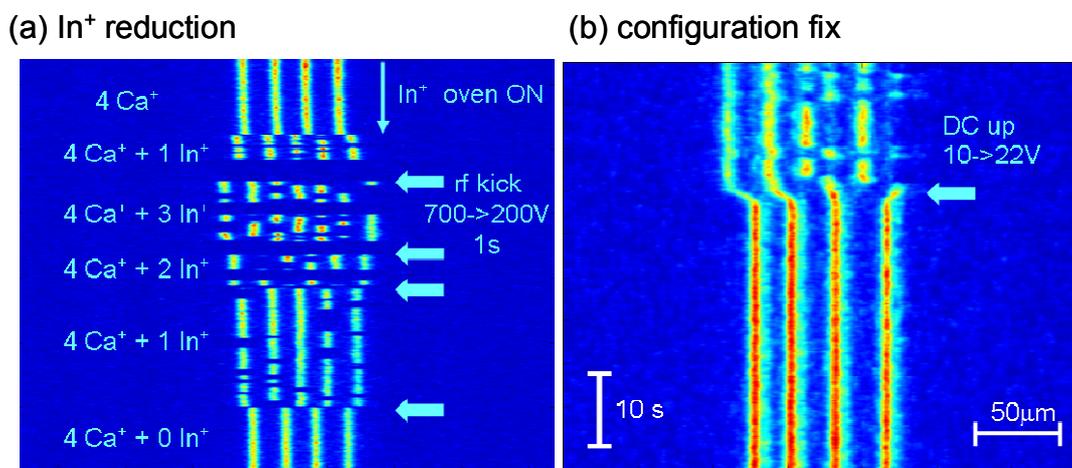


図 2 (a) In^+ 個数の調整、(b)配列の固定

光子-イオン相互作用に関しては、既に確立した技術である金属加工電極を用いて、単一イオンと共振器のより強い結合を実現するイオントラップ装置の開発を行った。従来報告されてきた動径方向に共振器の配置される構成に替えて、軸上に共振器が配置されるトラップ装置を考案し、試作と動作確認実験を行った。この装置では共振器長を 4mm まで小さくすることが可能であり、また、軸上に複数のイオンを配置してイオン集団と共振器との強結合を得ることが可能である。トラップ単体での動作確認実験で 8 個までの Ca^+ が安定してトラップされるのを確認した。すでに完成

した低損失共振器と組み合わせることで、約 17%の確率で単一 Ca^+ の量子状態を反映した単一光子が生成されると期待される。

MIT グループ

MIT では量子計算に用いる平面型の微小なイオントラップの開発、冷却イオンの量子制御のためのレーザーパルスシステムの開発、フォールト・トレラント・イオントラップ量子計算の理論的研究を中心に研究を進めている。これまでに平面型イオントラップを用いた Sr^+ イオンの捕獲、光フィードバック法で安定化されたモノシリック半導体光源の開発を行ってきたが、本年度は極低温で動作する平面型イオントラップを完成させて単一イオンの捕獲実験を行った。単一イオンに対してサイドバンド冷却を行うことにより振動量子数として 0.1 以下まで冷却した。この結果、キュービットの S-D 準位間でラビ振動の観測が可能になった。MIT において簡単な単一イオンのゲート動作が始めて達成されたといえる。さらにイオンの振動状態の極低温における過熱レートの測定を行った。測定された単一イオンの運動の加熱レートはこれまでに他で観測された同じサイズのトラップに比べ二桁小さいことが判明した。この結果は高い忠実度の多キュービットゲートを実現するのに十分な値となる。これはこのプロジェクトにおける大きな成果である。現在 ULE 共振器を用いて安定化された半導体光源が完成しており、今後はイオンの移動実験、量子ゲート実験に進む予定である。また、フォールトトレラント量子計算アーキテクチャーの理論限界についての検討を進めた。

3. 研究実施体制

(1)「大阪大学」グループ

① 研究者名: 占部 伸二(大阪大学)

② 研究項目

- ・ Ca イオンの振動基底状態への冷却と量子計算のための要素技術の開発

(2)「京都大学」グループ

① 研究者名: 杉山 和彦(京都大学)

② 研究項目

- ・ Yb^+ S-F 、及び、 Ba^+ S-D 長寿命時計遷移を利用した量子ゲートの開発

それぞれのイオンに対して、

(a) レーザー光源の開発(レーザー冷却用、サイドバンド検出・冷却用、量子ゲート操作
用)

(b) レーザー冷却技術(単一イオンのラムディッケ領域への冷却、マイクロモーションの補

正、サイドバンド冷却)

(c) イオントラップ技術(小型トラップ、リニアトラップ)

及び

(d) 光周波数コム技術(光周波数計測技術、レーザーの位相同期、光周波数標準)

そして、これらを全て組み合わせて

(e) 量子ゲート操作、平成 20 年度からは光周波数標準の研究に重点をおいて進める。

(3) 情報通信研究機構グループ

① 研究者名: 早坂 和弘 ((独)情報通信研究機構新世代ネットワーク研究センター)

② 研究項目

- ・ 協同冷却および光子-イオン相互作用に関する研究開発

(4) MIT グループ

① 研究者名: Isaac Chuang (マサチューセッツ工科大学)

② 研究項目

- ・ 量子計算に用いる平面型の微小なイオントラップの開発、冷却イオンの量子制御のためのレーザーパルスシステムの開発、フォールト・トレラント・イオントラップ
量子計算の理論的研究

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

1. 森田勇, 田中歌子, 占部伸二, 光イオン化による微量同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ イオンの選別捕獲, レーザー研究 Vol.35, No.4, (2007)246-251

2. Hideyuki Sawamura, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe, Optimization of Doppler Cooling of a Single $^{40}\text{Ca}^+$ Ion, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.46, No.4A, (2007)1713-1716

3. Rekishu Yamazaki, Toshiki Iwai, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe, Phase-locked laser system for a metastable states qubit in $^{40}\text{Ca}^+$, Optics Letters, Vol.32, No.5, (2007)2085

4. Utako Tanaka, Isamu Morita, and Shinji Urabe, Selective loading and laser cooling of rare calcium isotope $^{43}\text{Ca}^+$, Appl. Phys. B Vol. 89, (2007)195-200

5. Atsushi Mikata, Utako Tanaka, and Shinji Urabe, Thin-cell sub-Doppler spectroscopy by spatially separated beam method and pump-probe method, Applied Optics Vol. 47, No. 5 (2008) 639

6. Rekishu Yamazaki, Hideyuki Sawamura, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe,

Stimulated Raman spectroscopy and the determination of the D-fine-structure level separation in $^{40}\text{Ca}^+$, *Physical Review A* 77, 012508 (2008)

7. J.Labaziewicz, Y.Ge, P.Antohti, D.Leibrandt, K.Brown, I.L.Chuang, Suppression of Heating Rates in Cryogenic Surface-Electrode Ion Trap, *Phys. Rev. Lett.*, 100, 013001, 2008