

「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

本研究開発では冷却イオンを用いた量子情報処理のための基礎技術の開発を行う。イオントラップを用いて量子情報処理を行うために必須な技術であるイオンの振動基底状態への冷却技術を確立する。新たな量子ビットとしての Ca^+ の準安定状態間のラマン遷移を用いた量子ゲート、および Ba^+ や Yb^+ などの長寿命時計遷移を用いた量子ゲートの構成に関する研究開発を行う。また複数種イオンや複数同位体を用いた協同冷却、および空間的に離れたトラップ中のイオンの量子状態を結合するために光子とイオンの相互作用に関する研究を行う。さらに空間分割型トラップを用いたイオンの移動・輸送技術、さらにはリソグラフィ技術を使ったプラナー型イオントラップなどの集積化の研究を進める。

振動基底状態までの冷却については、単一 Ca^+ を用いてドップラー冷却限界(約 $500 \mu\text{K}$)までの冷却、さらにサイドバンド冷却を行い振動基底状態に近い振動量子数 0.2 までの冷却を達成した。2個、3個の配列イオンについてはリニアトラップ中の余剰マイクロ運動を低減できる条件を実験的に明らかにした。次の段階は単一イオンの振動量子数の低減と量子ゲート操作、複数個イオンのサイドバンド冷却に進む。 Ca^+ の準安定状態間のラマン遷移を用いた量子ゲートの開発については光コム発生器を用いて 2 台の赤外レーザーの位相ロックが可能になった。今後は光源の改良、一個のイオンのラマン遷移の観測に進む予定である。

長寿命時計遷移を用いた量子ゲートの構成に関する研究については、 Yb^+ では、共鳴イオン化によるイオン生成法を確立し、冷却光源の半導体レーザー化、サイドバンド検出・冷却レーザー、及びゲート操作用レーザーの開発を進めた。 Ba^+ では、リニアトラップ中でのレーザー冷却に成功した。1 オクターブ光周波数コムを狭線幅レーザーに位相同期することに成功し、コムの各モードの線幅を狭窄化した。今後は両者のイオンを単一にし、ラムディック領域へのレーザー冷却を目指す。

複数種イオンや複数同位体を用いた協同冷却の研究については微量奇数同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ を光イオン化法により選別捕獲するとともに冷却することに成功した。今後は捕獲の純化、微量イオンの捕獲、協同冷却の実験を進める。また、 In^+ を用いた協同冷却のための実験装置の立ち上げを行った。また空間的に離れたトラップ中のイオンの量子状態を結合するた

めの光子とイオンの相互作用に関する研究については遠隔地イオン間の量子状態転送を行うためのプロトコルの理論的検討と実験装置の立ち上げを行った。

トラップの集積化を目指したプラナー型イオントラップの開発については試作したプラナー型トラップに Sr^+ を捕獲することに成功し、余剰マイクロ運動の補正に関する解析をおこなった。

2. 研究実施内容

冷却イオンによる量子情報処理の実現ためには、イオン配列の集団振動モードを基底状態に初期化することなどが要件となるが、イオン配列の冷却は単一イオンの振動状態の冷却の単純な拡張により実現可能である。ここでは単一イオンの振動基底状態への冷却を行い、さらに振動基底状態からの加熱効果などについて定性的、定量的な知見を得ることを目指した。サイドバンド冷却による振動基底状態への冷却に関しては、まずドップラー冷却法によりドップラー冷却限界付近 (Ca^+ の場合 $500\mu\text{K}$ 程度) まで冷却を行い、光ポンピングにより基底状態のスピン偏極を行い閉サイクルを形成する準備を行ったうえで、 729nm 遷移のレッドサイドバンドの励起および 854nm の照射によりサイクルを形成して振動量子数を減少させてゆく。成果として、まずドップラー冷却に関しては、サイドバンドの高さから温度の評価を行い、温度にして $600\mu\text{K}$ という値を得た。これは上記のドップラー冷却限界に十分近くまた十分 Lamb-Dicke 領域に入っている。光ポンピングによるスピン偏極においては 99% 以上の占有数を単一の磁気副準位に集められた。その上で 729nm レッドサイドバンド遷移および 854nm 遷移の励起を行い、再現性に改善の余地はあるものの、軸方向運動の平均振動量子数を最低で約 0.2 まで冷却することに成功した。このほか、効率よくサイドバンド冷却を行うため、また効率よい 2 イオン間ゲートを実現するために必要となるチタンサファイアレーザーを用いた量子ビット遷移 (729nm) 用の高出力高安定光源の開発を行った。これに関しては現時点で出力 800mW 、短期揺らぎとして約 2kHz という値を得ている。さらにこれを用いて単一イオンのドップラーサイドバンドを既に取り得している。

分割型リニアトラップを用いた実験では、複数個イオンのドップラー冷却限界までの冷却をめざし、冷却の妨げとなる余剰マイクロ運動の低減を行った。余剰マイクロ運動はトラップ電極の付着物によって生じる接触電位、トラップの機械的な非対称性などが原因と考えられており、補正用の DC 電圧を加えて低減させる。余剰マイクロ運動が大きいとイオンの蛍光スペクトルのピークが共鳴周波数からずれるので、ピークが共鳴周波数付近にくるよう補正電圧を調整する。この方法でリニアトラップに捕獲された 2 個および 3 個のイオンのトラップの動径方向の直交する 2 成分について余剰マイクロ運動の低減を行った。更に感度良く余剰マイクロ運動を観測するため光子とマイクロ運動周波数との相関を観測した。その結果、リニアトラップの軸方向にもマイクロ運動が観測され、これも考慮した補正電圧が必要なことが判明した。また個々のトラップによって特性が大きく異なること

から、トラップの機械精度や表面の状態も影響があることも判明した。トラップの表面精度、組み立て精度の向上を行いドップラー限界近くまでの冷却実験を行った。

1.8THz 離れたカルシウムイオンの二つの準安定 D 状態間の誘導ラマン遷移を、850, 854nm のレーザーを用いて励起し、量子ビットを構成する研究については、光源の性能として 2 台のレーザーの位相がロックされていることが必要である。このため光コム発生器を利用して 854nm のチタンサファイアレーザーから 1.8THz 離れたサイドバンドを発生し、850nm の高出力半導体レーザーとの位相比較を行い位相ロック系を構成する。現時点では 850nm の高出力半導体レーザーと 854nm のチタンサファイアレーザーの位相ロックが可能になっている。

量子ビットに基底状態の超微細構造が利用できるイオンとして奇数核同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ は有望な候補であるが、天然同位体ではその存在比が 0.135% しかないのが問題である。本研究では、同位体シフトによって目的の同位体を選択的にイオン化する光イオン化の手法を用い、 $^{43}\text{Ca}^+$ の捕獲を行った。その際、光イオン化における 2 段階目のイオン化レベルまでの励起にインコヒーレントな発光ダイオードを用いても、微量同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ の捕獲ができることを示した。さらに $^{43}\text{Ca}^+$ のレーザー冷却のためのリポンピング用の光源を整備・改良した結果、 $^{43}\text{Ca}^+$ の冷却に成功した。また、Rb 原子の吸収線に周波数安定化した半導体レーザーを開発し、冷却、リポンピング光源の周波数安定性の更なる改良を進めている。

Yb^+ については、冷却レーザーの改良を進め、2 台の和周波混合光で $60\mu\text{W}$ を得、また、波長 370 nm 紫外半導体レーザーを回折格子による外部共振器構造とすることにより、線幅 2 MHz 程度の波長同調可能な光源を実現した。レーザー共鳴イオン化による Yb^+ 生成実験を行い、中性原子の第 1 励起光だけではイオン化率は非常に小さいこと、波長 370 nm の冷却レーザーが第 2 励起光の代用として充分使えること、さらに、第 2 励起光をイオン化レベルに接近させるとイオン化率が非常に大きくなることが分かった。サイドバンド検出・冷却用レーザーとして S-D 遷移励起用レーザーを開発し、低熱膨張率ガラス製高フイネス光共振器に対して線幅 100 Hz を得た。また、S-F 長寿命時計遷移ゲート操作用レーザーの開発に着手した。波長 934 nm の半導体レーザーの第二高調波を、外部共振器内に設置した位相整合温度 180 °C の KNbO_3 結晶で発生させ、40 mW の入力で 1 mW の出力を得た。テーパー半導体レーザーを外部共振器構造で発振させ、単一周波数発振で 400 mW の出力を得た。両者を組み合わせると 100 mW の 467 nm 光が得られる計算になる。今後線幅を 100 Hz 以下に狭窄化することを目指す。

Ba^+ については、昨年度開発した半導体レーザーベースの冷却光源とリニアトラップを用いて、レーザー冷却に成功した。撮像装置で冷却したイオンの像を観測し、イオン集団の中央に、速度選択、あるいはダークレゾナンスのために生じたと考えられる暗部が観測された。

また、時計遷移への同調のために必要となる、1 オクターブ光周波数コムによる光周波数計測システムの開発を進めた。レーザーに対して光周波数コムを位相同期できるように

なった。この方法により、光周波数コム各モードの線幅が 50 kHz 程度に狭窄化できることが分かった。

共同冷却に関しては、量子ビットである $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの量子ゲート動作中に起こるヒーティングを抑圧するための冷媒イオンとして In^+ を選択して、その共同冷却に関する理論的検討と実験装置の立ち上げを行った。 $^{40}\text{Ca}^+$ の同位体である $^{43}\text{Ca}^+$ の $^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{D}_{5/2}$ 遷移を量子ビットとして用いた際に生じる周波数シフトを理論的に検討した結果、 10^{-15} 程度の小さな値に留められることが明らかになった。実験装置としては 1.5 m x 1.2 m の小型光学定盤上に設置できる小型の真空装置と、その中に配置する線形イオントラップを設計、製作し、光共鳴イオン化により $^{40}\text{Ca}^+$ と $^{43}\text{Ca}^+$ を生成する予備的な実験までを実施した。

光子-イオン相互作用に関しては、共振器電磁量子力学による遠隔地イオン間の量子状態転送を行うためのプロトコルの理論的検討と実験装置の立ち上げを行った。量子状態転送のプロトコルとして、前年度に検討したユニタリーなイオンと光子間の量子状態転送 (プロトコル A) に加えて、ふたつのイオン-共振器系から生成されるイオン-光子量子もつれ交換による 2 イオン間の量子もつれ生成 (プロトコル B) を見出した。これらのプロトコル A、B に共通な最も基本的な実験要請は、ふたつの独立したイオン-共振器系から、量子力学的に区別できない光子が生成されることであるので、この条件を満たす微小光共振器、イオントラップの設計を実施、完了するとともに、それらを収納する二台の真空装置の整備を完了した。

集積化を目標としたプレーナ型イオントラップの開発については 5 分割型の平面基盤に蒸着した小型のイオントラップを試作した。 Sr^+ をこのトラップにロードして緩衝気体を用いた冷却法によりイオンを蓄積することに成功した。このトラップ中のイオンの余剰マイクロ運動を補正電圧により制御することにより振幅 $0.2 \mu\text{m}$ まで減少させることが可能になった。

3. 研究実施体制

大阪大学グループ

- ①研究分担グループ長：占部 伸二 (大阪大学、教授)
- 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

「京都大学」グループ

- ①研究分担グループ長：杉山 和彦 (京都大学、助教授)
- 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

「情報通信研究機構」グループ

- ①研究分担グループ長：早坂 和弘 (情報通信研究機構、主任研究員)
- 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

MIT グループ

①研究分担グループ長：Isaac Chuang（MIT、助教授）

②研究項目：大規模量子計算に向けた要素技術開発と実現性の評価、プランナー型イオントラップの開発

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文（原著論文）発表

- H. Sawamura, H. Kitamura, K. Toyoda, and S. Urabe, "Observation of motional sidebands in single $^{40}\text{Ca}^+$ ions with improved detection efficiency", Appl. Phys. B 80, 1011-1014, 2005.
- S. Imanishi, U. Tanaka, S. Urabe, "Frequency Stabilization of Diode Laser Using Dichroic-Atomic-Vapor Laser Lock Signals and Thin Rb Vapor Cell", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, pp. 6767-6771, 2005.
- T. Furukawa, J. Nishimura, U. Tanaka, S. Urabe, "Design and Characteristic Measurement of Miniature Three-Segment Linear Paul Trap", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, pp.7619-7624, 2005.
- U. Tanaka, H. Matsunishi, I. Morita, S. Urabe, "Isotope-selective trapping of rare calcium ions using high-power incoherent light sources for the second step of photo-ionization", Applied Physics B81, pp.795-799, 2005.
- K. Toyoda, Y. Kubota, T. Okano, S. Urabe, "Ultraviolet diode laser system based on the resonant optical feedback method with the capability of fast continuous sweep", Applied Physics B82, pp.25-29, 2006.
- M. Kajita, Y. Li, K. Matsubara, K. Hayasaka, M. Hosokawa, "Prospect of optical frequency standard based on a $^{43}\text{Ca}^+$ ion", Physical Review A 72, 043404(2005)