

「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の確立、新たな量子ビットとしての Ca イオンを用いた準安定状態間のラマン遷移を用いた量子ゲートの構成、および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。さらにトラップ間のイオンの移動・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 イオンを用いて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 までの冷却を達成するとともに、Rabi 振動の観測を行った。複数の配列イオンについてはリニアトラップ中の 2 個のイオンの運動サイドバンドの観測、さらにサイドバンド冷却実験を行い、振動量子数 0.7 までの冷却を達成した。今後は振動量子数の低減と量子ゲート操作に進む予定である。Ca イオン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をロックする光源を開発した。この光源を用いて単一イオンの準安定準位間のラマン遷移を初めて観測することに成功した。観測されたスペクトル幅は約 1kHz と狭く、今後はコヒーレント制御実験を行う。

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では Yb⁺ と Ba⁺ について研究を進めている。Yb⁺ では、レーザー共鳴イオン化法を確立し、この方法で生成・トラップした Yb⁺ のレーザー冷却に成功した。Ba⁺ では、リニアトラップ中でのレーザー冷却に成功し、ゲート操作用レーザーを実現するパラメトリック発振器の発振を確認した。また、1 オクターブ光周波数コムの安定化レーザーへの位相同期に成功し、コムの各モードの線幅狭窄化と光分周を確認した。今後は両者のイオンを単一にし、ラム・ディッケ領域へのレーザー冷却を、とくに量子ゲート実現で重要なリニアトラップ中で実現させる。また、ゲート操作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。

共同冷却の研究では、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、その光イオン化および Ca^+ との同時トラップを達成した。波長 230 nm の光源で In^+ をレーザ冷却すれば、 Ca^+ の内部量子状態を保ったまま低温に保持することが可能になると期待される。

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テ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。長さ 1.5mm の超低損失微小光共振器を試作、評価を完了し、その間に収納されるトラップが完成すると、数 10% の高確率で Ca^+ の量子状態を持つ単一光子が生成されると期待される。

大規模集積化に向けたイオントラップ要素技術の開発については、極低温で動作する平面型トラップ中に捕獲した単一 Sr イオンを振動基底状態付近まで冷却するとともに、過熱レートの測定に成功した。この成果は今後の集積イオントラップ開発に向けての大きな前進である。

2. 研究実施内容

冷却イオンによる量子情報処理の実現に向けて単一 Ca イオンの振動基底状態までの冷却実験を行った。特に単一イオンの振動基底状態への冷却を行うとともに、コヒーレント制御のための問題点について定性的、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、昨年度に開発したサイドバンド冷却用光源、制御システムを用いて単一イオンの到達振動量子数として 0.18 を得た。現在、さらに低い量子数を実現するため各種パラメーターを変えて実験を進めている。また、コヒーレント制御実験として、ドップラー冷却限界近くでの電気四重極遷移におけるキャリア遷移のラビ振動の観測を行い、光源の振幅変動によるデコヒーレンスの評価を行った。

分割型リニアトラップを用いた実験では、複数個イオンの振動基底状態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。昨年度までの実験で余剰マイクロ運動には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ため、トラップの表面精度、組み立て精度の向上を図った。1 個および 2 個のイオンの蛍光光子とマイクロ運動周波数との相関を、直交する 3 成分について観測した。補正電圧を調整することにより 3 方向成分すべての余剰マイクロ運動の補正が可能になった。この条件で、配列した 2 個のイオンに 729nm 光を照射して電気四重極遷移のスペクトルを観測した。その結果、キャリア遷移に比べ高さの低い 1 次の運動サイドバンドが観測され Lamb-Dicke 領域に入っていることが確認された。また、重心運動モードに加え、伸縮モード、ロッキングモードによるサイドバンドが明瞭に観測された。さらに光ポンピングを用いて閉じたサイクルを構成することによりサイドバンド冷却実験を行い、2 個のイオンの軸方向重心運動モードについて量子数 0.7 までの冷却が可能になった。

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、必要な光源の性能として 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。光コム発生器を利用して 850nm 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、854nm 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するレーザーシステムを開発した。この光源を用いて冷却された単一イオンの準安定準位間のラマン遷移をシェリング法により観測した。選択則から予想される 10 本のゼーマン成分を分離して観測することに成功した。1 成分のスペクトル幅として約 1kHz と十分狭いスペクトルが得られたため、今後の量子ビットの開発に向けて大きく前進したといえる。現在、 D 準位間の遷移周波数の精密計測を進めており、さらにコヒーレント操作実験の検討を開始している。

奇数核同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ は、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有望である。このイオンを光イオン化の手法を用いて選択的に捕獲する実験を進めた。この実験で目的のイオンだけでなく他の同位体も同時にイオン化され捕獲されていることが判明した。トラップ条件や冷却レーザーの離調を変えることにより、他の同位体を追い出して目的のイオンのみを残す純化を試みることにより、 $^{43}\text{Ca}^+$ のみのレーザー冷却が可能になった。また、MIT との共同実験として、MIT で開発した平面型イオントラップに Ca^+ を光イオン化により捕獲する実験を開始した。現在まで複数個のイオンの結晶化、1 個のイオンの捕獲が実現している。今後 1 個のイオンのマイクロ運動の補正を行い、イオンの移動による過熱を運動サイドバンドの変化により計測する実験を計画している。

Yb^+ については、レーザー共鳴イオン化法によってイオントラップ内で Yb^+ イオンを生成し、イオンを生成しながら蛍光を観測できるように装置を改良してレーザー冷却実験を進めた。蛍光検出は微弱光撮像装置を用い、イオン集団の像を観測した。このような方法を導入したことによって複数波長あるレーザー光とトラップとの位置あわせが格段に容易となり、温度が数 1000 K と高い状態であったにもかかわらず、 Yb^+ イオンのトラップを確認した。この状態では閉じ込め寿命が 1 分程度と短く、より強い冷却の必要性が示唆されたため、冷却光のさらなる高出力化に取り組んだ。波長 370 nm の冷却光は 2 台の外部共振器型半導体レーザーの和周波混合光で発生させているが、この出力光を 100 μW まで増強させた。この光源の利用により、 Yb^+ イオンを長時間トラップできるレベルまで冷却することに成功した。

S-F 長寿命時計遷移ゲート操作レーザーの開発では、高出力化のキーポイントである外部共振器型テーパー半導体レーザーの開発を進めた。このレーザーに周波数掃引機能を付加できると全体のシステム構成が簡素化される。この目的のために、連続周波数掃引範囲を常時 600 MHz となるように改善した。

Ba^+ については、S-D 長寿命時計遷移ゲート操作レーザーの開発に着手した。波長 1.06 μm ネオジウム YAG レーザーを励起光とするパラメトリック発振 (OPO) で得ることとした。非線形光学結晶の片方の端面を鏡とするセミモノリシック型とし、シグナル光波長 1.76 μm に対して共鳴する光共振器を構成した。非線形光学結晶は、周期反転ニオブ酸リチウム (PPLN) 結晶である。励起

光に対してもフィネス 80 の共振器になっていることを確認し、さらに、励起光パワー 200 mW をこえるとアイドラー光が検出され、OPO が確認された。

また、昨年度開発した周波数安定化レーザーに 1 オクターブ光周波数コムモードの 1 つを位相同期させる技術と、低熱膨張率ガラス製高フィネス光共振器の共鳴へ安定化した半導体レーザーを組み合わせ、30 分以上連続動作可能な光分周器を実現した。光分周器とは、周波数安定化レーザーの周波数を、コムモード次数で正確に分周するもので、コムパルス繰り返し周波数が分周された値となっている。

In⁺による Ca⁺の共同冷却実験では、リニアトラップ内でレーザー冷却した Ca⁺に、光イオン化で生成した In⁺を混合し、同時に蓄積するための研究開発を実施した。(図 1 の様に)、光イオン化により、純粋な ⁴⁰Ca⁺からなるクーロン結晶を数時間にわたり安定に保持するリニアトラップ装置を開発した。このようにして生成した ⁴⁰Ca⁺結晶を保持した状態で、オープンから発生する In 原子に In ホロカソードランプで周波数安定化した波長 411nm の紫色半導体レーザーを照射すると、(図 2 の様に)クーロン結晶中に ⁴⁰Ca⁺励起用レーザーでは蛍光を発しないイオン種が出現した。振動の周波数の質量依存性を用いて、蛍光を発しないイオンが ¹¹⁵In⁺であることを確認した。開発中の波長 230nm の光源が完成して ¹¹⁵In⁺をレーザー冷却すると、⁴⁰Ca⁺の内部量子状態を破壊することなく長時間に渡り保持することが期待される。

光子-イオン相互作用に関しては、波長 866nm 低損失光共振器の試作と特性評価を行った。直径 3mm、長さ 4mm の円筒型のガラス基板の先端を直径 1mm までテーパ上に切削した基盤に、超低損失の多層膜を施したミラー 2 個を対向して間隔 1.5mm でピエゾ基板上に接着し、(図 3 に示す)光共振器を構成した。この光共振器を 1×10^{-9} Torr まで排気した真空中に設置し、動作確認と特性評価を行った。見積もられるフィネスは、評価に用いたレーザーの安定度で制限され、153,000 の下限値を得た。これより見積もられる共振器損失の上限値は 41ppm であり、これを厚さ 1mm 以下のイオントラップと組み合わせると、⁴⁰Ca⁺から単一光子への量子状態の成功率が 30%程度であると計算された。

単一イオンをレーザーで操作するための基盤技術として、光フィードバックを用いて半導体レーザーの高機能化する研究開発をグループで横断的に実施した。(独)情報通信機構で開発したフィルター共振器によるスペクトル制御方式を MIT で改善し、半導体レーザーの自然放出光抑圧比 90dBc、絶対線幅の上限値 35kHz を達成した。また、(独)情報通信機構ではこの方式で得られるレーザー光の強度雑音がショットノイズに達していることを確認し、スクイズド光の発生にも応用できることを示した。

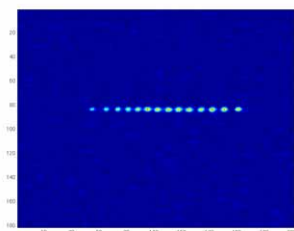


図 1: $^{40}\text{Ca}^+$ の純粋なクーロン結晶

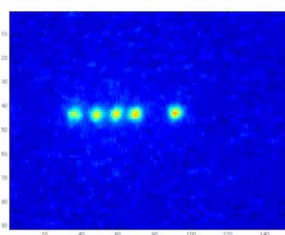


図 2: $^{40}\text{Ca}^+$ のクーロン結晶中に配置したイオン

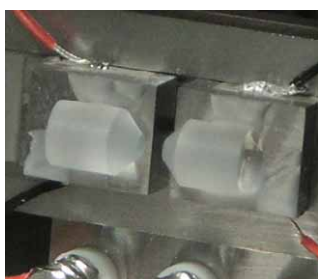


図 3: 試作した微小光共振器

大規模集積化に向けたイオントラップ要素技術の開発については4本ロッド型のリニアイオントラップを用いて Sr イオンのサイドバンド冷却に成功した。また、4K で動作する極低温平面型イオントラップを開発し、1 個の Sr イオンをサイドバンド冷却により振動量子数 $n=0.1$ まで冷却することに成功した。さらに極低温の 4K におけるイオンの振動状態の加熱レートを測定し、室温および 150K においてこれまでに報告されている加熱レートに比べ約 2 桁小さい過熱レートを得た。この成果は今後の量子計算用の集積化イオントラップの開発に向けて非常に大きな前進である。

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 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

(2)「京都大学」グループ

①研究者名

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

(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 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

(4)「MIT」グループ

①研究者名

Isaac L.Chuang(MIT 教授)

②研究項目

・大規模量子コンピューティングに向けた要素技術開発と実現性の評価

4. 研究成果の発表等

(1)論文発表(原著論文)

- Y. Zhang, K. Hayasaka, and K. Kasai, "Generation of two-mode bright squeezed light using a noise-suppressed amplified diode laser," *Optics Express*, **14**, 13083-13088 (2006)
- J. Labaziewicz, P. Richerme, K. R. Brown, I. L. Chuang, and K. Hayasaka, "Compact, filtered diode laser system for precision spectroscopy," *Optics Letters*, **32**, 572-574 (2007)
- Y. Zhang, K. Hayasaka, and K. Kasai, "Efficient noise suppression of an amplified diode-laser by optical filtering and resonant optical feedback," *Applied Physics B*, **86**, 643-646(2007)
- Kenneth R. Brown, Robert J. Clark, Jaroslaw Labaziewicz, Philip Richerme, David R.Leibbrandt, and Isaac L. Chuang, "Loading and characterization of a printed-circuit-board atomic ion

trap”, PHYSICAL REVIEW A, vol. 75, page 15401, 2007:

○H.Sawamura, K.Toyoda, S.Urabe, ”Optimization of Doppler Cooling of a Single $^{40}\text{Ca}^+$ Ion”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46, No.4A, 1713-1716 (2007).