

「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、昨年までに 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。また 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。昨年度の Ca^+ イオンの準安定準位間のラマン遷移のコヒーレンス時間の測定により、磁場の変動によるデコヒーレンスが大きな制限要因であることが分かった。このため今年度は磁気シールドの導入が可能な真空チャンバーの開発、リニアトラップの導入、イオントラップの操作制御の自動化など実験装置の大幅な改造を実施した。また、位相同期レーザーシステムの改良、電気四重極遷移観測用レーザーの安定化共振器の温度特性の大幅改良、新たな冷却光源の開発を行った。これらの改良された装置を用いて、単一イオンのサイドバンド冷却、電気四重極遷移及びラマン遷移のラビ振動の観測、及び量子ゲート予備実験を実施した。また高速断熱通過法を用いた重ね合わせ状態の生成について実証実験および解析を行った。新たに開発した平面型イオントラップを用いて単一イオンの捕獲実験を行った。

長寿命時計遷移を用いた研究では、長寿命で周波数シフトの小さい遷移をもつ Yb^+ と Ba^+ について、光周波数標準や量子ゲートの実現を目指している。これまで光イオン化法によるイオン生成技術とレーザー冷却技術を両イオンに対して確立した。今年度は波長サイズ、いわゆるラム・ディッケ領域への閉じ込めに必要な、トラップ領域 1mm 以下の小型トラップでのレーザー冷却に、 Yb^+ では通常型、 Ba^+ はリニア型の RF トラップで成功した。時計遷移用レーザーは、 Yb^+ では狭線幅レーザーに位相同期させたオフセットレーザーによる周波数掃引機構を組み込み、最低限の分光システムを完成させた。 Ba^+ では、時計遷移を励起する波長 $1.76\mu\text{m}$ 光をパラメトリック発振器 (OPO) で発生させ、時計遷移の励起を確認した。今後は、マイクロモーションの除

去を正確に行いつつ、時計遷移の分光を行い、遷移周波数を光周波数コムで測定する。磁場によるシフトが小さい、奇数同位体での分光を目指す。 $^{171}\text{Yb}^+$ についてはトラップの確認に成功した。

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^+ 配列に冷媒としての In^+ を指定個数だけ指定した場所に高い確率で配置する技術を開発した。 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。H20 年度には In^+ のレーザー冷却と Ca^+ の振動温度測定を行うための光源の整備、真空装置と検出光学系の改造を実施した。

光子-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 Ca^+ 微小共振器系による単一光子生成実験の文献を基に、 Ca^+ と単一光子間での量子状態の転写を可能にする実験条件を明らかにした。この条件であるミラー間隔 1 mm 以下の微小共振器中に収納されるイオントラップの製作が困難であるため、多くの研究グループが試行錯誤的に様々な方法での単一イオン-共振器強結合系を試みているが、我々は複数イオンと共振器の結合系の実現を追及している。H20 年度には 10 個程度の Ca^+ を同時に共振器軸上に配置するための「薄い」リニアトラップと、ミラー間隔 8 mm の低損失共振器の開発を実施した。

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の開発、 Sr^+ イオンを用いた振動基底状態付近の冷却実験を進めた。平面トラップの電極付近に作った微小コイルによる磁場勾配を利用することにより、イオン配列中の個々のキュービットの個別アドレッシングが可能なことを実験的に示した。また、単一ストロンチウムイオンを極低温環境で動作するイオントラップで捕獲することにより、従来の室温で動作するトラップに比べ加熱レートが 3 桁小さくなることを示した。さらに大規模計算アーキテクチャーに向けた、フォールトトレラントな量子計算のための非付加的な量子コードの理論的な解析を進めた。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

大阪大学グループ

Ca イオンを用いた実験については、冷却された単一イオンを用いて、高速断熱通過の原理を応用し、二準位系状態の重ね合わせ状態を、パルス面積や離調などのパラメータに関して敏感に依存せずにロバストに生成する手法について、実証実験を行った(図 1)。また三準位系イオンのサイドバンド冷却について、レーザー線幅や加熱レートなどに関して現実的な条件を仮定した上で、到達温度や冷却レートを最適化するようなパラメータをシミュレーションにより導出し、実験結果との比較を行った。新たに改良したイオントラップ装置を用いてレーザー冷却実験を行い、改良されたイオンの観測系の評価を行った。図 2 に示すように 7μ 程度離れた 2 個のイオンが明瞭に分離され、量子状態のトモグラフィーなどに使用できる性能が得られた。また周波数ドリフトを大幅に改良した 729nm レーザー

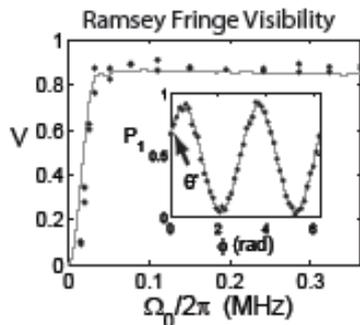


図 1.高速断熱通過法で得られた重ね合わせの状態のラムゼイ法による測定結果（可視度の評価結果）。

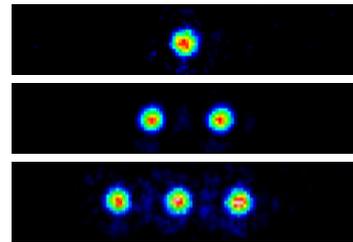


図 2 1 個、2 個、3 個のイオンの高解像画像

光源を用いて 1 個のイオンのサイドバンド冷却を行い、軸方向の振動に対し振動量子数が 0.1 以下まで冷却されたことを確認した。この状態のイオンを用いてキャリア遷移のラビ振動、及び振動量子数を 1 個増やすブルーサイドバンドのラビ振動を明瞭に観測することに成功した。この結果、振動状態と内部状態の量子もつれを利用したゲート操作を行う上で大きな前進となった。

Ca イオン準安定状態間誘導ラマン遷移を用いた量子ゲート実験を実現する際に、位相ロッキングにおける残留位相ノイズによる忠実度の低下を抑えるために、2 台のチタンサファイアレーザーによる位相ロックレーザー系を開発した。結果として、99.94%の光パワーをマスターレーザーにロックすることに成功した。この光源を用いて単一 Ca イオンの準安定状態間のラマン遷移の観測を行ったところ、光コム発生器に寄生するスプリアス成分が分光スペクトル形状に大きな影響を与えていることが判明した。スプリアス成分を除去することにより、ラマン遷移の明瞭なラビ振動を観測することが可能になった。この遷移のラムゼイ共鳴の観測により、磁気シールド導入によるコヒーレンス時間の増加の確認、及び光シフト評価の実験を行った。さらにラマン遷移のラムゼイ共鳴と電気四重極遷移のキャリア遷移またはブルーサイドバンド遷移とを組み合わせることにより、1 キュービット及び内部状態と振動状態を用いた 2 キュービットの量子ゲート実験を行った。まだ忠実度は低い状態であるが動作が確認された。今後、細部を改良し、忠実度を高めていく予定である。

平面型トラップについては、新しくアルミナ基板上に金で電極パターンを作成したトラップ電極を用いてカルシウムイオンの冷却実験を行った。複数個のイオンの結晶化、単一イオンの捕獲を確認した。平面型トラップでは冷却光は電極表面に平行に入射させなければならないため、トラップの主軸が表面に対して平行な電極では、表面に垂直な運動成分の冷却が効率良く行われな。そこでトラップ表面に対して主軸を回転した型で、かつ小型化を念頭においた電極を設計し、シミュレーションによるパラメータの最適化を行った。

京都大学グループ

京都大学グループの平成 20 年度の大きな課題の一つは、イオンを波長サイズ以下、いわゆるラム・ディッケ領域に閉じ込め可能な小型トラップを立ち上げることである。Yb⁺については、リング電極内径 0.8 mm の通常型 RF トラップで、Ba⁺ではトラップ領域 0.8 mm × 0.7 mm のリニア RF トラップでレーザー冷却に成功した。図 3、図 4 にそれぞれ小型トラップに閉じ込めた少数個 Yb⁺、Ba⁺の蛍光像を示す。リニア RF トラップの電極形状は、大阪大学グループのものをもとに、NICT グループとともに電界計算を行なって最適化したものである。

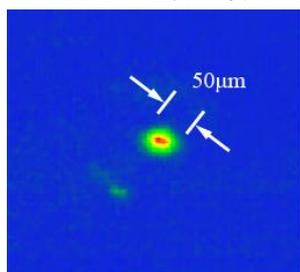


図 3 Yb⁺の蛍光像

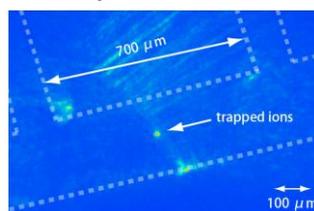


図 4 Ba⁺の蛍光像

その他 Yb⁺については、磁場によるシフトが小さい同位体 171 のレーザー冷却を目指して、超微細構造間の光ポンピングを避けるための 2 系統目の波長 370 nm 光を、紫外半導体レーザーを外部共振器構造にして立ち上げた。この光源で同位体 174 をレーザー冷却し、単独の冷却光源として使用可能であることを確かめた。さらに、従来の半導体レーザーの和周波光と両方を利用して、まださして冷却されてはいないものの、同位体 171 のトラップの確認に成功した。イオン生成に用いる光イオン化で使用する波長 399 nm 光は 798 nm 光の第 2 高調波を外部共振器で発生させているが、第 2 高調波発生用結晶の温度制御により、結晶端面の残留反射で外部共振器での増倍率が低下する問題を解決した⁴⁾。S-D 遷移分光用レーザーは線幅狭窄化レーザーと第 2 高調波発生用レーザーの位相同期によるオフセットロック部を構築し、分光用レーザーとして最低限のセットアップを完成させた。オフセット周波数を変えて周波数掃引を行う。Ba⁺については、波長 1.76 μm S-D 時計遷移励起用レーザーを波長 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) のシグナル光で得る実験を進めた。OPO 共振器はポンプ光とシグナル光に共鳴し、ポンプ光周波数にその共鳴をロックして、シグナル光パワー 3 mW を定常的に得られるようにした。共振器内にエタロンを挿入して周波数の設定を細かくし、Ba⁺の時計遷移の励起を確認した。

NICT グループ

協同冷却では最終年度に実施する波長 230 nm で行う In⁺レーザー冷却、波長 729 nm で行う Ca⁺振動温度測定に向けて、トラップ電極、真空装置と検出光学系の改造および光源の改善を実施した。具体的には、(a)絶縁体の電位変化がイオンに及ばない形状へのトラップ電極設計変更、(b)In⁺の波長 230 nm 蛍光が透過する真空窓の導入、(c)In⁺蛍光が 20 倍程度の倍率でイメージインテンシファイアーに結像する光学系の導入、(d)周波数変調を必要としない光フィードバックによる狭スペクトル制御法の開発、を実施した。特に(d)では、空間モードの位相干渉を用いて周波数離

調の誤差信号を取り出す tilt lock を初めて光フィードバックに適用することで、周波数変調を必要としない半導体レーザー線幅狭窄化を実現し、波長 397nm でのテストでは観測時間 200ms で半値全幅 900Hz の狭線幅を実測した。これにより In^+ 冷却レーザー、 Ca^+ 振動温度測定レーザーのスペクトル制御を実現する見通しがあった。

光子-イオン相互作用では複数イオンと共振器結合系の実現に向けて、10 個程度の Ca^+ を同時に共振器軸上に配置するための「薄い」リニアトラップと、そのトラップを内部に収納するための低損失共振器の開発を実施した。従来のリニアトラップと比較すると軸方向の長さが極端に短いトラップ電極を製作し(図 5)、電極の表面精度や組合せ精度の改善、電極駆動 rf 電圧対称性の調整等を繰り返したところ、10 個前後の直線状に配置した Ca^+ を数時間に渡って安定にトラップさせることに成功した(図 5)。低損失共振器として、従来の Cavity QED 実験用共振器に比べるとミラー間隔の大きな共振器を製作した(図 6)。光フィードバックによって線幅 1kHz 以下に狭窄化した波長 866nm の半導体レーザーをプローブ光として、共振器長を基底次モードの共鳴周波数にロックすることが出来た。フィネスは 60,000 程度であった。複数個イオンと共振器の結合実験を実施する準備が整った。

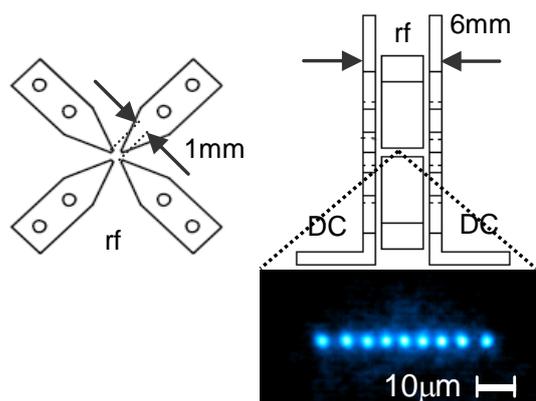


図 5. 光子 - イオン相互作用実験用リニアトラップと配列した 9 個の Ca^+

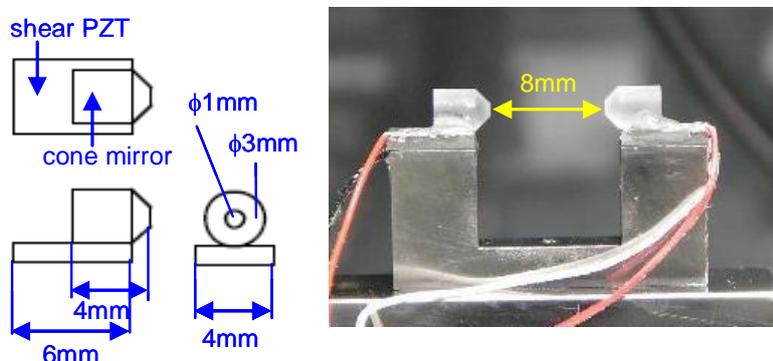


図 6. 光子 - イオン相互作用実験用低損失共振器

MIT グループ

MIT では以下の項目について主に研究を実施した。

① 高分解な個別イオンアドレッシング法の実現

イオン列のキュービットを個別にアドレッシングすることはスケーラブルな量子計算を実現するためには非常に重要である。従来はレーザービームを制御する複雑な光学系で行なわれていたが、この方法では数を拡張することは容易でなかった。MIT では別の方法として極低温微細加工トラップに適した磁場の勾配をつかう方法を開発した。磁場はトラップ電極に微細加工で組み込まれた微小コイルで発生する。測定ではイオン間のクロストークは 3% 以下であった。この結果は、個別アドレッシングに向けた、永続電流を使った磁場勾配の発生のために超伝導体の利用が可能であることを示す。

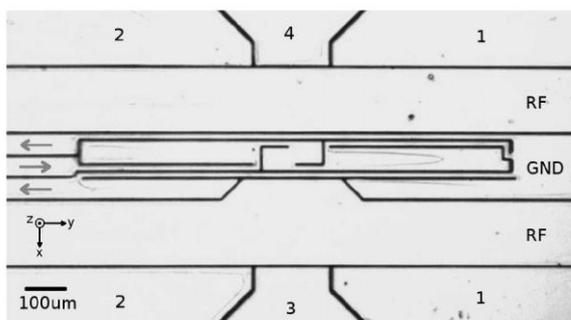


図 7 Microphotograph of trap

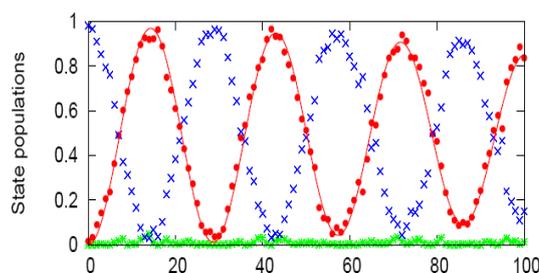


図 8 Selective Rabi Oscillations: Two qubits

② イオンの運動状態のデコヒーレンスの 3 桁の低減

イオントラップの大きな問題は表面電荷の揺らぎによる過剰雑音である。この雑音は c-NOT ゲートのような 2 キュービット量子ゲートの特性を劣化させ、10 ミクロンオーダーの距離のイオンを用いる場合には、フォールトトレラントな動作を不可能にする。MIT では液体窒素、液体ヘリウムのような低温環境を用いることによってこの雑音を低減することを実現した。トラップは石英上に金、サファイア上に NbN などを蒸着した微細加工トラップである。このチップ上の $75 \mu\text{m}$ 上方にトラップした単一ストロンチウムイオンの加熱レートは約 1 量子/秒であり、室温で動作する最も良いトラップに比べ、3 桁も小さいことが分かった。

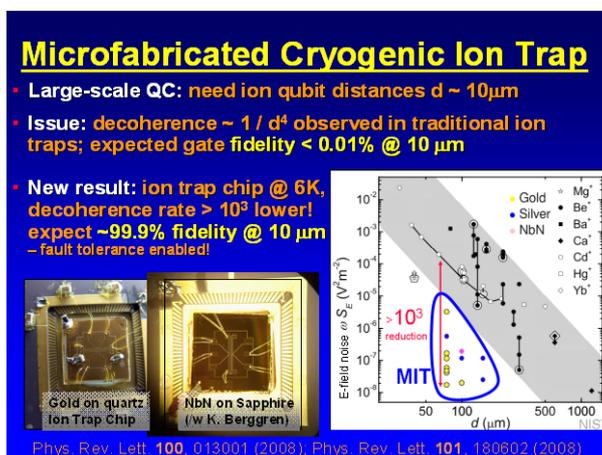


図 9 rates of ~ 1 quanta/second, which is better than three orders of magnitude lower than the best comparable room temperature traps.

③非付加的な量子コード

大規模量子計算のアーキテクチャーは、量子ノイズを許容するように、量子データをエンコードし、コード化された操作を行う必要性によって制限される。そのような枠組みで許容されるノイズの閾値はコードの効率で決定される。しかしながら、我々が証明したように、従来の付加的なスタビライザーコードのみではフォールトレラントな計算には不十分である。我々は高い効率を持つ新しいコードを探すとともに、“コードワード スタビライズド 量子コード”形式に基づいて、付加的でない量子コードを見つける手順を構成した。

3. 研究実施体制

(1)「大阪大学」グループ

①研究分担グループ長： 占部 伸二（大阪大学大学院、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

③研究分担グループ長： 杉山 和彦（京都大学大学院、准教授）

④研究項目

Yb⁺ 及び、Ba⁺ 長寿命時計遷移を利用した光時計、及び、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) 光時計の開発、そして量子ゲート操作。

(3)「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

(4)「MIT」グループ

①研究分担グループ長： Isaac Chuang（マサチューセッツ工科大学、教授）

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. Rekishu Yamazaki, Ken-ichi Kanda, Fumihiko Inoue, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe, "Robust generation of superposition states", *Physical Review A* 78,023808(2008)
2. H.Sawamura, K.Kanda, R.Yamazaki, K.Toyoda, S. Urabe, "Optimum parameters for sideband cooling of a $^{40}\text{Ca}^+$ ion", *Applied Physics B Lasers and Optics*, Vol.93, 381-388 (2008).
3. K. Toyoda, H. Shiibara, S. Haze, R. Yamazaki, S. Urabe, "Experimental study of the coherence of a terahertz-separated metastable-states qubit in $^{40}\text{Ca}^+$ ", *Physical Review A* 79, 023419(2009).
4. Y. Onoda, M. Ikeda, K. Sugiyama, H. Yokoyama, and M. Kitano, "Maximization of second-harmonic power using normal-cut nonlinear crystals in high-enhancement external cavity", *Applied Optics*, Vol. 48, No. 7, pp. 1366-1370 (2009).
5. 早坂 和弘(情報通信研究機構), 「単一光子とイオンの量子インタフェース」, レーザー研究 Vol.36, No8, pp.493-498,2008
6. J. Labaziewicz, Y. Ge, P. Antohi, D. Leibbrandt, K. Brown, and I. L. Chuang, 'Suppression of heating rates in cryogenic surface-electrode ion traps,' *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, page 13001, 2008.
7. X. Chen, H. Chung, A. W. Cross, B. Zeng, and I. L. Chuang, 'Subsystem stabilizer codes cannot have a universal set of transversal gates for even one encoded qudit,' *Phys. Rev. A*, vol. 78, p. 012353, 2008.
8. B. Zeng, X. Chen, and I. L. Chuang, 'Semi-Clifford operations, structure of Ck hierarchy, and gate complexity for fault-tolerant quantum computation,' *Phys. Rev. A*, vol. 77, p. 042313, 2008.
9. J. Labaziewicz, Y. Ge, D. Leibbrandt, S.X. Wang, R. Shewmon, and I.L. Chuang, 'Temperature dependence of Electric Field Noise Above Gold Surfaces,' *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, p. 180602, 2008.
10. Shannon X. Wang, Jaroslaw Labaziewicz, Yufei Ge, Ruth Shewmon, Isaac L. Chuang, 'Individual addressing of ions using magnetic field gradients in a surface-electrode ion trap,' *Appl. Phys. Lett.*, 94, 094103(2009).
11. Chuang, A.W. Cross, G. Smith, J. A. Smolin, and B. Zeng, 'Codeword stabilized quantum codes: algorithm and structure,' submitted to *IEEE Trans. on Info. Theory*, arXiv preprint quant-ph/0803.3232, 2008.
12. P.B. Antohi, D. Schuster, G.M. Akselrod, J. Labaziewicz, Y. Ge, Z. Lin, W.S. Bakr, and I.L. Chuang, 'Cryogenic ion trapping systems with surface-electrode traps,' *Rev. Sci. Instr.*,80

013103 (2009) .

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数：0 件 (CREST 研究期間累積件数：0 件)