

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域
「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」
研究課題
「冷却イオンを用いた量子情報処理基礎技術」

研究終了報告書

研究期間 平成16年10月～平成22年3月

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)

§ 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行った。

大阪大学グループでは、研究課題「Ca⁺イオンの振動基底状態までの冷却と量子ゲート基礎実験」を実施した。振動基底状態までの冷却技術の確立と準安定準位間のテラヘルツ遷移を用いた量子ゲート技術の開発を中心に研究を進めた。振動基底状態までの冷却については、Ca⁺イオンの電気四重極遷移を励起する狭スペクトル高安定チタンサファイアレーザーを開発し、Paul トラップおよびリニアトラップ中の1個、2個のCa⁺イオンのサイドバンド冷却を行い、振動量子数 $n=0, 1$ 以下という量子ゲートの初期化に十分な量子状態までの冷却を達成した。

Ca⁺イオンの準安定準位を用いた新しい量子ゲートの開発については、ゲート操作光源として、1.8THz離れた2台のレーザー(850nmおよび854nm)の位相同期システムを光周波数コムを用いて開発した。この光源を用いて、テラヘルツ領域の超高分解能分光測定を行った。ラマン遷移を励起することにより、Ca⁺イオンの1.8THz離れた準安定準位 $D_{5/2}-D_{3/2}$ 間の周波数間隔を、11桁の精度で測定した。この周波数領域の分光測定精度としては最高レベルである。二つの準安定準位(テラヘルツ遷移キュービット)を用いた新たな量子ゲートを開発するために、ラムゼイ共鳴法を用いてコヒーレンス時間の測定を行った。コヒーレンス時間として約5msが得られ、テラヘルツ遷移キュービットが量子ゲートに十分使えることを確認した。また、量子ゲートにおいて忠実度を劣化させる原因となる光シフトについて、ラムゼイ共鳴法を用いて測定し、レーザー光の強度比を調整することにより、高い精度でキャンセルすることが可能なことを示した。振動基底状態まで冷却した1個のCa⁺イオンを用いて、テラヘルツ遷移キュービットにおいて、ラマン遷移の $\pi/2$ パルスと電気四重極遷移のブルーサイドバンド 2π パルスを組み合わせることにより、Cirac-Zoller量子ゲート実証実験を行った。

Ca⁺イオンを用いた他の実験では、電気四重極遷移において、高速断熱通過(RAP)により、重ね合わせ状態がロバストに発生できることを実験的に初めて示した。これは量子ゲートの初期化などにおいて有望な方法である。また、Ca⁺イオンの極微量奇数同位体(存在比0.135%)を同位体選別励起と光イオン化を用いて選別捕獲した。イオントラップの集積化に向けて、プレーナイオントラップの設計・開発を行い、少数個のイオンを捕獲してトラップの特性測定を行った。

京都大学グループでは、研究課題「長寿命時計遷移を利用した量子ゲートの開発」を実施した。光周波数標準(光時計)の基準遷移として用いられる寿命の長い遷移をもつイッテルビウムイオン(Yb⁺)とバリウムイオン(Ba⁺)を用いて、コヒーレンス時間の長い量子ゲートを実現することを目指して研究を行った。両イオンとも、光イオン化によるイオンのトラップ、レーザー冷却、マイクロ運動の除去、および、波長サイズ以下の範囲(ラム・ディック領域)に閉じ込め可能な1mmサイズの小型イオントラップ、を実現した。これらの技術を先行して確立した大阪大学グループとの協力によって、これらの課題を着実に解決した。光イオン化が導入できたこともあり、後半は磁場のシフトが小さい奇数同位体を用いた光時計の研究を中心に進めた。両イオンとも、奇数同位体の選別導入に成功した。時計遷移を分光するレーザーの開発を平行して進め、両イオンとも時計遷移の励起を確認した。

情報通信研究機構グループでは「研究課題、協同冷却および光子-イオン相互作用に関する研究開発」を実施した。協同冷却では、量子ビットとして想定する⁴⁰Ca⁺配列に、冷媒イオンとしての¹¹⁵In⁺を埋め込む技術の開発を実施した。その結果、(1)光イオン化法とトラップ電場の制御により20個程度までの指定個数のCa⁺イオン列を生成する技術、(2)Ca⁺イオン列を破壊せずに光イオン化法でIn⁺を埋め込む技術、(3)埋め込んだIn⁺個数をトラップ電場制御で調整する技術、(4)Ca⁺イオンの微弱光イメージング技術により、不可視のIn⁺を観測する技術、(5)トラップ電場制御とリアルタイムイメージング技術により6個程度までのCa⁺とIn⁺配列のパターンを制御する方法、(6)Ca⁺に埋め込んだ不可視イオンがIn⁺であることを同定する技術、などの開発に成功し、量子ビットイオンを保ったまま冷媒イオンを指定場所に埋め込む方法を確立した。

光-イオン相互作用に関する研究では、数個レベルのCa⁺イオンからなる系の $^2P_{1/2}-^2D_{3/2}$ 遷移(波

長 866nm)に共鳴する光共振器に結合させる技術開発を実施した。その結果、(1)トラップ電極を内部に収めるための従来タイプより共振器長の長い(8mm)光共振器の開発、(2)共振器中に格納するための長さが従来タイプより短い(6mm)リニアトラップの開発、(3)そのトラップ中での 10 個程度までの Ca^+ の配列化、に成功した。これにより、既存技術で制作可能な光共振器、イオントラップの組み合わせにより複数イオンと光共振器の結合実験が可能となるであろう見通しを得た。

MIT グループでは「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」の研究を実施した。特に以下の三項目、大規模化に向けたプレーナー微細加工イオントラップの開発、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（耐故障性）量子計算のための理論的研究、を中心に実施した。その結果、プレーナートラップを極低温で動作することにより、従来の室温動作に比べてイオンの加熱を、3桁小さくするというトップデータの取得、電極中に埋め込まれた微小コイルによる磁場勾配を用いて個別に精度良くイオンをアドレスする技術の開発、量子計算中に量子非破壊でイオンを冷却する可能性のあるキャビティ冷却法の実証などに成功した。理論面ではフォールトトレラント量子計算のための新たな非加法的量子符号集合を発見する手順の確立、および二体系でギャップのあるハミルトニアンを持つ系の唯一の基底状態を用いた新たな one-way 万量子計算の新たな構成法を発見した。

§ 2 研究計画に対する成果

(1) 当初の研究構想

平成16年度のプロジェクト発足時の研究構想は以下のようにまとめられる。

イオントラップを用いた量子情報処理研究の発展の方向は、多数の量子ビットを用いる大規模な演算に向けたイオントラップ技術の開発、信頼性が高くコヒーレンス時間の長い量子ビットを用いた個々の量子ゲート技術の開発、誤りに強い量子計算システムの構築に向けたシステム化技術の開発などが考えられる。

本研究開発においてはイオントラップを用いて量子情報処理を行うための必須の前提条件であるイオンの振動基底状態への冷却技術をまず確立する。上に述べた発展方向を考慮して、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 Ba^+ イオンや Yb^+ イオン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。システム化の基盤技術として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集積型イオントラップ技術の研究を進める。また複数種イオンや複数同位体を用いた協同冷却法、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。さらにイオントラップを用いた誤りに強い量子計算システムの構成に関する理論的検討を進め、開発要素を適宜見直しながら研究を進め量子計算システムの構成に必要な基盤技術を開発する。具体的には以下の6項目を中心に研究開発を進める。

(1) 振動基底状態までの冷却

イオントラップを用いて量子情報処理を実験的に進めるための不可欠の技術であるイオンの振動基底状態までの初期化について、ドップラー冷却、さらにサイドバンド冷却法を行うことにより1個、2個、といったイオンを振動基底状態まで冷却する技術を確立する。

(2) 分割トラップの開発とイオンの空間操作

イオントラップを用いて量子計算を大規模化するためには、空間に分割された領域を持つトラップを用い、その間でイオンを輸送するなどの空間的な操作が必要になる。このためにリソグラフィ技術などを用いたマイクロトラップを開発し、冷却されたイオンをイオントラップ間で動かし輸送する技術の開発を行う。

(3) 新たな量子ビットの開発

- ・ $^{40}\text{Ca}^+$ イオンのラマン遷移を用いた量子ゲート

量子ゲートの高速化の可能性のある $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの準安定準位 $D_{3/2}$, $D_{5/2}$ 間のラマン遷移、すなわち 850, 854nm の二つのレーザーによる準安定状態間のラマン遷移を用いた量子ゲートの構成に関する研究を行う。このために 1.8 THz 程度はなれた二台のレーザーの位相ロック系を開発し、この光源を用いて準安定準位間のラマン遷移の周波数計測を行うとともにこの遷移を用いた量子ゲート基礎実験を行う。

・長寿命時計遷移を利用した量子ゲート

量子演算を長時間にわたって多数回行うためには、量子ビットのもつコヒーレンス時間が長いことが重要となる。ここでは、長寿命時計遷移を利用した量子情報処理技術の研究を行う。具体的には寿命の長い遷移として Ba^+ イオンの S-D 遷移 (寿命 約 10 秒)、さらには Yb^+ イオンの S-F 遷移 (寿命 約 10 年) を用いて量子ゲートを実現する。

(4) 協同冷却

単一ゲート毎の誤り確率を低く抑えることを目的に、ゲート動作中も量子ビットを冷却することが可能な協同冷却法を開発する。これにより量子ビットの外部自由度のヒーティングに由来する誤り率の低減を計ることができる。具体的には冷媒イオンとして In^+ イオンを用い、その冷却のための光源システムを開発を行うとともに Ca^+ イオンや Mg^+ イオンとの協同冷却実験を行う。

(5) 光とイオンの相互作用

大規模化したトラップ内で空間的に離れた量子ビット間の量子相関を生成する方法として、共振器電磁量子力学による光子-イオン間相互作用の技術を開発する。成功確率では有利であるが実験的には困難な強結合領域での方式と、成功確率では劣るが実験的には有利な弱結合領域での方式を比較して決定し、これに基づいて $^{40}\text{Ca}^+$ を用いた実験を行う。

(6) イオントラップ量子演算システムの理論検討

量子誤り訂正を含む誤りに強い量子計算システムの構成をイオントラップにおいて実際に実現していくためのシステム構成の理論的な検討を行うとともにシステム化に必要な各種の要素技術の解析を行う。

これらの研究項目を実施するために、4つの研究グループで以下のように研究課題を設定した。

○大阪大学グループ： Ca^+ イオンの振動基底状態までの冷却と量子ゲート基礎実験

上記の研究項目

(1) 振動基底状態までの冷却、

(2) 分割トラップの開発とイオンの空間操作

(3) 新たな量子ビットの開発： $^{40}\text{Ca}^+$ イオンのラマン遷移を用いた量子ゲート

Ca^+ イオンを用いて振動基底状態までの冷却を行うとともに、量子ゲート実現のための要素技術の開発を行う、特に、 Ca^+ イオンの準安定準位間のラマン遷移を用いた量子ゲートについて、位相同期レーザーシステムの開発も含めて研究を行う。

○京都大学グループ：長寿命時計遷移を利用した量子ゲートの開発

上記の研究項目

(3) 新たな量子ビットの開発：長寿命時計遷移を利用した量子ゲート

Yb^+ イオン Ba^+ イオンの寿命の長い時計遷移を用いて、コヒーレンス時間が長く、多数回の量子演算が可能な量子ゲートを実現するために、光源技術を含めた要素技術の研究開発を行う。

○情報通信研究機構グループ：協同冷却および光子-イオン相互作用に関する研究開発

上記の研究項目

(4) 協同冷却

(5) 光とイオンの相互作用

協同冷却では量子ビットとしての $^{40}\text{Ca}^+$ を $^{115}\text{In}^+$ を冷媒として冷却することで、振動自由度の加熱によるデコヒーレンスの消失を軽減することを目標に、また光-イオン相互作用に関する研究では、独立した

二つのイオントラップ内に配置した Ca^+ 間にエンタングルメント生成を可能とする単一イオンと光共振器の強結合系の実現を目標に研究開発を行う。

○MIT グループ：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
上記の研究項目

- (1) 振動基底状態までの冷却
- (2) 分割トラップの開発とイオンの空間操作、
- (6) イオントラップ量子演算システムの理論検討

Sr^+ イオンを用いた量子計算のための集積化の容易なプレーナートラップの開発、量子制御のためのレーザーパルス制御技術、フォールトトレラント計算のための理論解析を中心に研究を行う。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

○大阪大学グループで実施した Ca^+ イオンを用いた実験においては、準安定準位間のテラヘルツ遷移キュービットを用いた量子ゲート技術の開発に加え、当初は極微量奇数同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ の同位体選別捕獲とその超微細構造準位を用いた量子ゲートの開発を視野に入れていた。しかしながら、同位体選別捕獲にはかなりの労力が必要なこと、また多くのレーザーが必要なことなどにより、開発に時間がかかることが判明したので、平成 18 年度に開発を中断した。この間、MIT においてプレーナ型イオントラップの開発が進んだため、MIT の協力のもとにこの技術を導入し、19 年度よりこのトラップの開発を新たな項目に加え研究を進めた。

テラヘルツ遷移キュービットを用いた量子ゲートの開発を進める段階で、キュービットの初期化の一つの方法として高速断熱通過を用いる方法の検討を行った。検討を進めるうちに、高速断熱通過を用いて重ね合わせ状態を実験条件にロバストに生成できることが分かった。このため、この方法も実験項目に加え実験を行い、単一イオンの電気四重極遷移を用いて、実験的に重ね合わせ状態が生成されることを示した。高速断熱通過法については、多数個のイオンの量子もつれ状態のロバストな発生に用いることができるなど多くの利点があり、新たな研究への展開を視野に入れて研究を進めた。

○京都大学グループでは、光イオン化の導入により、磁場による周波数シフトが小さい奇数同位体のトラップの実現性が高まったこと、ならびに、中間評価でのご意見を受けて、後半は光時計の研究に重点を置いて研究を進めることとした。両イオンとも、奇数同位体を選択的にトラップすること、および、光ポンピングを避けてレーザー冷却を達成すること、が新たな課題となる。その後は偶数同位体と同様、単一イオン化し、小型イオントラップで時計遷移のスペクトルを検出する。

○情報通信研究機構で実施した協同冷却では、 Ca^+ のコヒーレンス時間を In^+ との協同冷却により延長することが当初の目的であった。2008 年に米国 NIST が Be^+ によって協同冷却した Al^+ を用いて「量子論理分光法」を行い不確かさ 10^{-17} 台の人類史上最も正確な周波数計測を実現すると、小規模量子計算の現実的な応用としてアルカリ土型電子配置イオン種の協同冷却が重要と認識されるようになった。本研究で冷媒として想定していた In^+ も Al^+ に匹敵する確度を実現するイオン種として注目されるようになった。そのため、H21 年度には Ca^+ に協同冷却された In^+ を光周波数標準として応用する観点での研究も実施した。

光-イオン相互作用に関する研究では当初、単一 Ca^+ と光共振器との強結合を目標として、共振器長 1mm の光共振器内に収納される「マイクロイオントラップ」の開発を試みた。GaAs 基板に金蒸着でトラップ電極を形成する技術を開発し、厚さ 2mm のイオントラップを完成させたが、駆動rf電圧による加熱により絶縁体として機能すべき GaAs 基板に電流が流れ、トラップ動作を行えないことが判明した。同じ原因により海外の研究グループが GaAs でのトラップ開発を断念したこと、また、世界的にマイクロイオントラップの材料、作製法に関する研究の進展が遅かったことから、マイクロイオントラップを用いずに強結合を達成可能な複数 Ca^+ イオンと光共振器の結合へと目標修正を H19 年度後半に行った。

§3 研究実施体制

(○：研究代表者または主たる共同研究者)

(1) 大阪大学グループ

① 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	占部 伸二	大阪大学	教授	H16.10～H22.3
	田中 歌子	大阪大学	講師	H16.10～H22.3
	豊田 健二	大阪大学	助教	H16.10～H22.3
	山崎 歴舟	大阪大学	博士研究員	H18.7～H21.3
	財津 慎一	大阪大学	博士研究員	H17.4～H17.9
	前田 華子	大阪大学	チーム事務員	H17.5～H22.3
	澤村 英幸	大阪大学	D1～3	H16.10～H20.3
	神田 憲一	大阪大学	M1～2	H18.4～H20.3
	椎原 秀行	大阪大学	M1～2	H18.4～H20.3
	岩田 史子	大阪大学	M1～2	H18.4～H20.3
	中 竜二	大阪大学	M1～2	H18.4～H20.3
	北池 亮平	大阪大学	M1～2	H18.4～H20.3
	井上 文彦	大阪大学	M1～2	H19.4～H21.3
	氏丸 智彰	大阪大学	M1～2	H19.4～H21.3
	長野 健史	大阪大学	M1～2	H19.4～H21.3
	土師 慎祐	大阪大学	M1～2	H19.4～H21.3
	畑 祐樹	大阪大学	M1～	H19.4～H22.3
	秋元 雄大	大阪大学	M1～2	H20.4～H22.3
	河野 星子	大阪大学	M1～2	H20.4～H22.3
	瀬ノ口 雄大	大阪大学	M1～2	H20.4～H22.3
	野村 真司	大阪大学	M1～2	H20.4～H22.3
	吉留 佑典	大阪大学	M1～2	H20.4～H22.3
	内田 健介	大阪大学	M1	H21.4～H22.3
	田村 健太郎	大阪大学	M1	H21.4～H22.3
	増田 和弘	大阪大学	M1	H21.4～H22.3
	渡辺 剛	大阪大学	M1	H21.4～H22.3
	和田 直久	大阪大学	M1	H21.4～H22.3

② 研究項目

・Ca イオンの振動基底状態までの冷却と量子ゲート基礎実験

(2) 「京都大学」グループ

① 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	杉山 和彦	京都大学	准教授	H16.10～H22.3
	池田 充彦	京都大学	博士課程	H16.10～H18.3
	竹下 健悟	京都大学	修士	H16.10～H17.3
	生田 力三	京都大学	修士	H16.10～H18.3
	三好 祐弥	京都大学	修士	H16.10～H18.3
	橋本 健太郎	京都大学	修士	H18.4～H19.3
	中村 泰裕	京都大学	修士	H18.4～H19.3
	吉武 惟之	京都大学	修士	H18.4～H20.3
	野呂 周一郎	京都大学	修士	H18.4～H20.3

	池田 浩司	京都大学	修士	H19.4~H20.3
	長田 大	京都大学	修士	H19.4~H21.3
	中嶋 一雄	京都大学	修士	H19.4~H21.3
	川尻 将	京都大学	修士	H19.4~H22.3
	小野田 有吾	京都大学	博士課程	H19.4~H22.3
	室木 佑斗	京都大学	修士	H19.10~H21.3
	西崎 公智	京都大学	修士	H19.10~H22.3
	守谷 隆司	京都大学	修士	H19.10~H22.3
	上原 知幸	京都大学	博士課程	H20.4~H22.3
	今井 康貴	京都大学	修士	H20.10~H22.3
	小泉 壮隆	京都大学	修士	H20.10~H21.3
	柴田 良平	京都大学	学士	H20.10~H21.3
	三瀧 雅俊	京都大学	修士	H21.4~H22.3
	浅井 陽介	京都大学	修士	H21.4~H22.3
	松本 海	京都大学	学士	H21.10~H22.3
	信岡 裕也	京都大学	学士	H21.10~H22.3

② 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

(3) 情報通信研究機構グループ

① 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	早坂 和弘	(独) 情報通信研究機構	主任研究員	H16.10~H22.3
	今城 秀司	(独) 情報通信研究機構	主任研究員	H16.10~H18.10
	松原 健祐	(独) 情報通信研究機構	主任研究員	H16.10~H19.3

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 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	Issac Chuang	MIT	Professor	H17~H22
	Kenneth Brown	MIT	Post-doctoral researcher	H17~H18
	Paul Antohi	MIT	Ph.D. student	H17~H22
	Xie Chen	MIT	Ph.D. student	H20~H22
	Robert Clark	MIT	Ph.D. student	H20~H21
	Andrew Cross	MIT	Ph.D. student	H18~H20
	Jaroslav Labaziewicz	MIT	Ph.D. student	H18~H20
	David Leibrandt	MIT	Ph.D. student	H20~H21
	Arghavan Safavi-Naini	MIT	Ph.D. student	H20~H21
	Shannon Wang	MIT	Ph.D. student	H20~H22
	Christopher Pearson	MIT	Master's student	H17~H18
	Ruth Shewmon	MIT	undergraduate	H18~H19

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 研究実施内容及び成果

4.1 Ca⁺イオンの振動基底状態までの冷却と量子ゲート基礎実験（大阪大学グループ）

(1)研究実施内容及び成果

Ca⁺イオンはイオントラップの実験では最もポピュラーなイオンの一つである。冷却や制御のためのレーザーが半導体レーザーのみで準備できること、準安定準位 $^2D_{5/2}$ 、 $^2D_{3/2}$ の寿命が約 1 秒と比較的長いことなどの利点がある。Ca⁺イオンについては、最も存在比の高い偶数同位体 $^{40}\text{Ca}^+$ (97%) の基底状態 $^2S_{1/2}$ と準安定状態 $^2D_{5/2}$ (S-D キュービット) を用いてインスブルック大学が、また基底状態 $^2S_{1/2}$ の二つのゼーマン準位 (ゼーマンキュービット) を用いてオックスフォード大学が量子ゲートに関する研究を行っている。本研究では、これまでに実験が全く行われていない $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの準安定準位間の 1.8THz 離れたテラヘルツ遷移を用いるキュービットを用いた量子ゲート構成に関する基礎技術を中心に研究を進めた。以下の研究項目について実施内容、成果について述べる。

- ・量子情報処理実験用イオントラップ実験系の開発
- ・振動基底状態の発生と S-D キュービットの操作
- ・テラヘルツ遷移キュービットの開発
- ・高速断熱通過 (RAP) による重ね合わせ状態の生成
- ・極微量同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ の選別捕獲
- ・プレーナートラップの開発

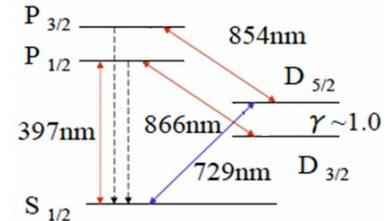


図 4.1.1 Ca⁺イオンのエネルギー準位

①量子情報処理実験用イオントラップ実験系の開発

量子情報処理に用いられるイオントラップは、振動基底状態の発生のため、ドップラー冷却時に Lamb-Dicke 領域に入るように十分小型であり、また永年運動の振動周波数が 1MHz 以上になることなどが条件となる。本研究で用いたイオントラップは、球形の Paul トラップ ($r_0=0.6\text{mm}$) とリニア型 rf トラップである。Paul トラップは研究開発の前半の単一イオンの実験に用いられた。リニアトラップは厚さ 1mm のステンレス板 4 枚で構成され、先端部分の表面は半円柱形に加工されている。対称軸と最も近い電極間の距離は約 0.6mm である。シンセサイザーからの出力を増幅し、ヘリカル共振器を介して、対向する一対の電極に rf 電圧を加える。残りの一対の電極はそれぞれ 5 つに分割され、イオンを軸方向に閉じ込めるために DC 電圧を加える。トラップの動作の典型的な値は、rf 周波数 24MHz、rf 電圧 400V、電極 U_2, U_2', U_4, U_4' (図 4.1.2) に約 40V 加えたとき、r 方向のイオンの振動の永年周波数が約 1.8MHz、軸方向の永年振動周波数が約 700kHz である。イオントラップはイオンポンプ、チタンサブリメーションポンプで排気された真空槽内に設置され、到達真空度は $5 \times 10^{-11}\text{torr}$ である。また、磁場変動によるデコヒーレンス対策として、真空槽全体がパーマロイ層の磁気シールドで覆われている (図 4.1.3)。

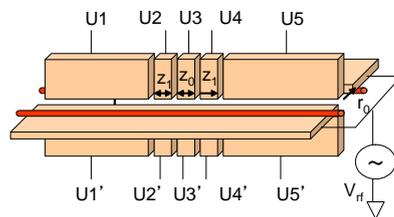
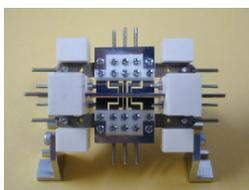


図 4.1.2 リニアトラップ

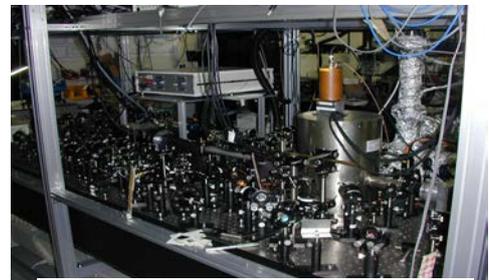


図 4.1.3 イオントラップ装置

Ca⁺イオンのドップラー冷却には S-P 遷移励起用の 397 nm レーザー光、 $^2D_{3/2}$ 準位からの再励起用の 866 nm レーザー光、また、サイドバンド冷却や電気四重極スペクトル測定には $^2D_{5/2}$ 準位からの脱励起用の 854 nm 光が必要になる。これらのレーザーは LD 素子と回折格子を用い

た外部共振器型の構成になっている。これらのレーザーは、Rb 原子の飽和吸収を用いて絶対安定化された 780nm レーザーとトランスファー共振器を用いて周波数安定化される。397 nm 光は 3 つに分割され、3 つの方向からイオンに照射する。それぞれのビームに対するイオンからの蛍光を光子 rf 相関検出することにより、その方向のイオンの余剰マイクロ運動の成分を検出し、それらが最小になるように補正電圧を加えてドップラー冷却の最適化する。

イオンからの 397 nm 光の蛍光検出には、光電子増倍管を用いた光子計数とイメージインテンシファイア付 CCD カメラによる画像計測を用いた。光子計数には、真空槽外に置いたレンズ系を用いて、イオンの蛍光を光電子増倍管の前に置いたピンホールに結像させた。図 4.1.4 はドップラー冷却された単一イオンの蛍光測定を行うとともに、イオンに 729 nm 光をあてて $^2D_{5/2}$ 準位へシエルピングを行い、量子跳躍を観測した測定例である。1 個のイオンからの検出光子数は最大 30,000 個/秒であり、量子情報処理に十分な S/N が得られた。CCD カメラ用の光学系は光電子増倍管側と反対に置かれたレンズ系を用いてイオンの蛍光像を拡大（倍率約 49 倍）し、カメラの入射面に結像させた。図 4.1.5 は 1 個、2 個、3 個のイオンの蛍光画像である。2 個のイオンの間隔は約 $7\mu\text{m}$ であり、イオンを個別に観測することが十分可能である。

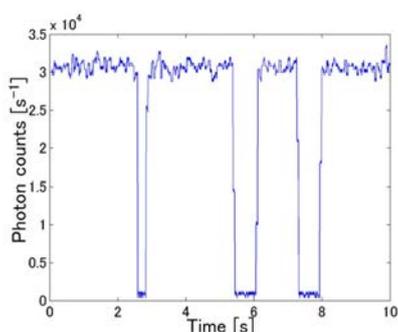


図 4.1.4 単一イオンの量子跳躍測定例

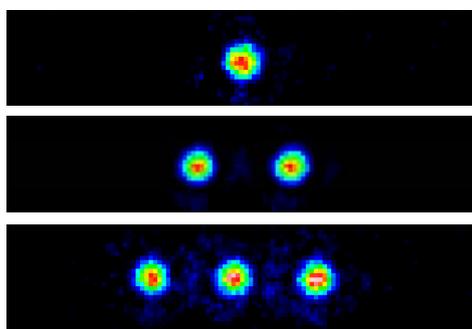


図 4.1.5 リニアトラップ中の一個、二個、三個の Ca^+ イオンの画像

イオンを振動基底状態まで冷却するためには、 $^2S_{1/2}$ 準位と $^2D_{5/2}$ 準位間の電気四重極遷移を用いてサイドバンド冷却を行う必要がある。このためには、周波数が安定でスペクトル線幅が数 kHz 程度の 729 nm の狭スペクトル高安定レーザーが必要である。本実験では、図 4.1.6 に示すように、ULE 共振器（フィネス約 10000）を用いて高安定化したチタンサファイアレーザー（コヒーレント社 899-21）を用いた。ULE 共振器は温度安定化した真空槽の中に設置した。Pound-Drever 法を用いて、周波数の誤差信号を検出し、レーザー共振器内に設置した電気光学変調器にフィードバックすることにより周波数を安定化した。得られた性能は周波数ドリフト、3 kHz/時間、またスペクトル幅は約 2kHz 以下である。729 nm レーザーの周波数制御およびパルス制御は音響光学変調器 (AOM) を用いて行った。他のレーザー光 (397nm、866nm、854nm) の制御も AOM を用いた。これらのレーザー光は FPGA とパソコンを用いたパルス制御系で制御される。FPGA を用いたシステムは MIT の協力により開発されたものである。

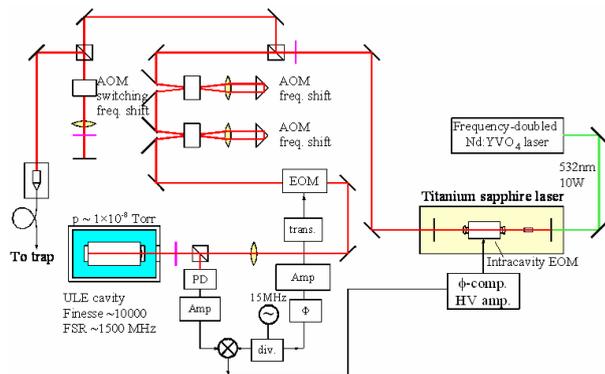


図 4.1.6 729 nm 光用チタンサファイアレーザーシステム

②振動基底状態の発生と S-D キュービットの操作

トラップ中のイオン配列の運動状態は、ポテンシャルおよびクーロン相互作用により定義される量子化された集団振動モードによって記述される。このうち重心運動モードは、今日よく用いられる実験条件において典型的に数百 kHz から数 MHz の振動周波数を持ち、したがってそれよりも十分狭い励起線幅を持つ光学遷移を用いることにより調和振動の量子状態を直接光により操作することが可能となる。これら集団振動モードの量子状態は、複数のイオンに共有されイオン間の演算に用いることのできるいわゆる量子データベースの役割を果たし、イオン配列を用いた量子情報処理において欠かすことのできない資源である。

1995年にCiracおよびZollerはイオン配列を用いてスケラブルに量子演算を行う方法を初めて提案したが、そこでは集団振動量子状態が基底状態まで冷却され純粋状態に準備されていることが要件となっている。また Molmer, Sorensen によって 1999 年に提案された量子ゲート法においては、振動基底状態までの冷却は必須ではなく、イオンが Lamb-Dicke 領域 (イオンの運動の波長が波長以下の領域に局在している状態) まで冷却されていればよかった。ただしこの場合にも、高いフィデリティでゲート演算を行うには Lamb-Dicke 領域の十分深くまで冷却されていることが必要である。Lamb-Dicke 領域の境界は典型的な実験条件において数量子程度であり、したがってこの場合にもイオンの運動が振動基底状態付近まで冷却されていることが実質的に必要である。

イオンを振動基底状態に冷却するためには、基本的にはサイドバンド冷却法を用いるが、サイドバンド冷却法の冷却レートは比較的遅いため、ドップラー冷却により予備冷却を行ったうえでサイドバンド冷却を行う。たとえば Cirac-Zoller 法において軸方向の重心振動量子状態をイオン間の演算に用いる場合に、その運動自由度のみを冷却する以外に、それ以外の運動モード (息継ぎモードや動径方向の振動モード) も冷却する必要が生じる。これは、高次の効果 (Lamb-Dicke 因子 η の 2 乗に比例する項) により他の方向の運動もラビ振動励起のフィデリティに影響を与えるためである。

まず 3 次元的に単一イオンを冷却した結果について述べる。図 4.1.7 は電気四重極子遷移のレッドサイドバンド励起によりリニアトラップ中の単一 Ca^+ イオンの全ての運動自由度を振動基底状態付近まで冷却した結果である。サイドバンド冷却は、リニアトラップの動径方向の 2 軸 (x, y 軸とする)、軸方向 (z 軸方向) の順番で各レッドサイドバンドに共鳴する光パルスを数 ms 程度の幅で照射することを数回繰り返して行っている。到達平均振動量子数は $(\overline{n_x}, \overline{n_y}, \overline{n_z}) \sim (1, 1.5, 0.1)$ であった。

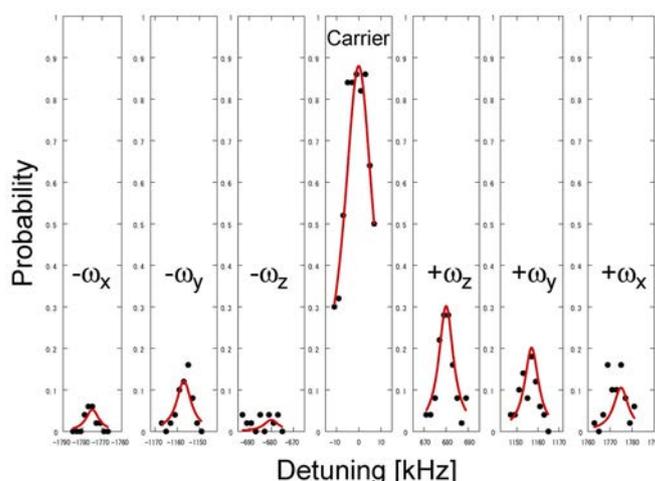


図 4.1.7 3次元サイドバンド冷却結果

3次元サイドバンド冷却では各次元を交互に冷却していたために、それぞれの次元について十分に低い温度まで冷却することはできなかったが、たとえば軸方向のみ冷却することによりさらに低い平均振動量子数まで冷却することが可能である。図 4.1.8 は z 軸方向のみサイ

ドバンド冷却を行った結果である。これにより $\langle \bar{n}_z \rangle \sim (0.01)$ が得られている [1]。

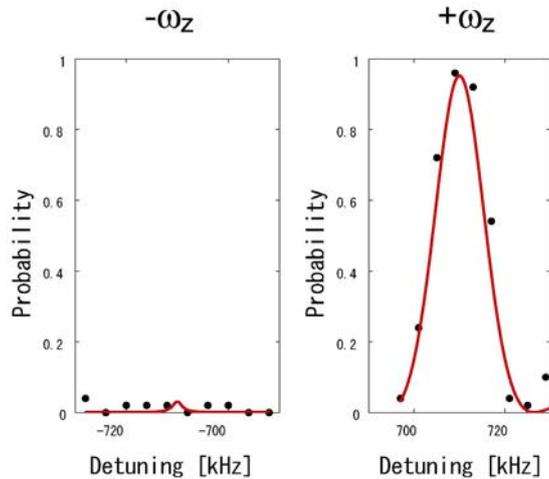


図 4. 1. 8 軸方向運動のサイドバンド冷却結果

サイドバンド冷却を行い振動基底状態付近までイオンを冷却することで、振動量子状態の統計的な不確定性を排除することができ、ラビ振動励起を高いフィデリティで行うことが可能となる。これは量子ゲート実験を行ううえで重要である。図 4. 1. 9 は単一 Ca^+ の $S_{1/2}-D_{5/2}$ 電気四重極遷移のキャリア遷移のラビ振動 (左図)、ブルーサイドバンド遷移 ($n_z \rightarrow n_z + 1$) のラビ振動 (右図) である。前者は 1 キュービット演算、後者は 2 キュービット演算に用いられるものであるが、いずれも十分なフィデリティで励起が行われている。

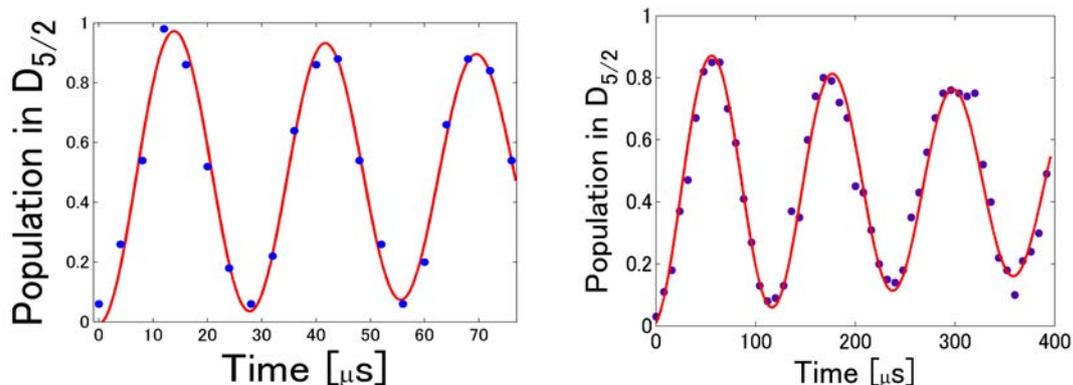


図 4. 1. 9 四重極遷移のラビ振動観測結果 左：キャリア遷移、右：ブルーサイドバンド遷移 [1] H. Sawamura, K. Kanda, R. Yamazaki, K. Toyoda, S. Urabe, Optimum parameters for sideband cooling of a $^{40}\text{Ca}^+$ ion, Applied Physics B Lasers and Optics, Vol. 93, 381–388 (2008).

③テラヘルツ遷移キュービットの開発

これまでのイオンを用いた量子情報処理の実験においては、RF・マイクロ波ないしは光周波数に対応するエネルギー差をもつ二準位がキュービットとして用いられてきた。原理的には、これら以外のエネルギー差を持つ二準位も、その差が十分確定しており寿命が十分長い場合にはキュービットとして用いることができるはずであるが、技術的な困難等の理由により研究は行われていなかった。しかし近年の光コム技術の発展により、従来難しかった周波数差のレーザーを位相同期しキュービットの励起に用いる実験が考えられるようになり、これまでに用いられたことの無かった原子遷移や分子の振動回転準位間遷移をキュービット遷移として用いる研究が視野に入ってきた。

ここではそのような光コムにより位相同期した 2 台のレーザーを用いてキュービット遷移

を励起する初めての試みとして、Ca⁺イオンの準安定状態 $D_{3/2}$, $D_{5/2}$ をキュービットとして用い、その間を光コムを用いて位相同期した 2 台の近赤外レーザーによる誘導ラマン遷移により結ぶ実験について述べる。

①位相同期レーザーシステム[1]

テラヘルツ遷移キュービットの励起のためには、準安定状態間の周波数差 1.8THz を橋渡しする光コムの技術、およびそれにレーザーを安定化する位相ロックの技術が不可欠である。光コムにはフェムト秒レーザーを用いたもの、光共振器および共振器内電気光学変調器を用いたものなどがあるが、ここでは後者を用いた[2]。図 4.1.10 が二つのチタンサファイアレーザーを位相ロックするシステムである。それぞれ波長 850, 854 nm で発振している。通常チタンサファイアなどのレーザーの発振周波数を高速に制御する場合には、レーザー共振器内に電気光学変調器を入れて共振器の光路長を変調する方法が用いられることが多い。しかし今回用いたチタンサファイアレーザー (Coherent 社 MBR-110) は一体成型共振器を用いており共振器内部に電気光学変調器を入れることが非常に困難であったため、外部に設置した音響光学変調器と電気光学変調器を用いる方法[3]により、位相ロックを行った。

[1]Rekishu Yamazaki, Toshiki Iwai, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe, Phase-locked laser system for a metastable states qubit in 40Ca⁺, Optics Letters, Vol. 32, No. 5, (2007) 2085

[2]M. Kourogi, K. Nakagawa, and M. Ohtsu, IEEE J. Quantum Electron. 29, 2693 (1993) [3]J. L. Hall and T. W. Hansch, Opt. Lett. 9, 502 (1984)

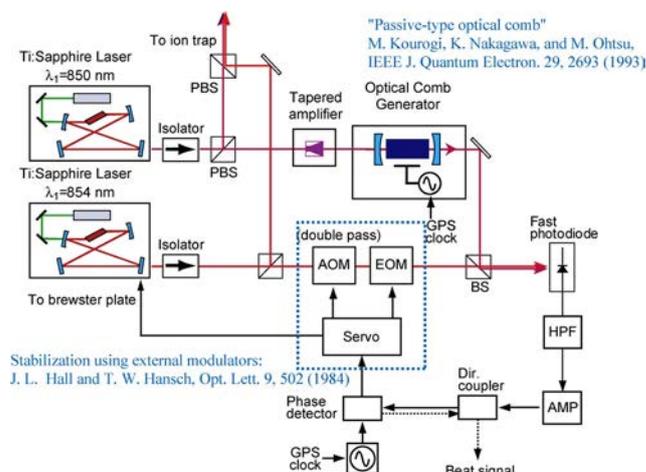


図 4.1.10 位相同期レーザーシステム

②テラヘルツ遷移キュービット遷移の精密分光

捕獲された Ca⁺イオンに、先に述べたキュービット間の遷移を励起する位相同期レーザーシステムを照射することにより、新しいタイプのキュービットとして用いる二つの D 準安定状態間の精密分光を行った。精密分光から得られる情報として、位相同期レーザーの位相や周波数揺らぎといったレーザー自体のパフォーマンス、トラップされたイオンの磁場環境、キュービットとしてのイオン内の量子情報の寿命などがあり、キュービット自体とそれを操作する手法・道具の総合的な評価が得られる実験である。また二つの $D_{3/2}$ と $D_{5/2}$ 準安定状態間には磁場によって分かれるそれぞれ 4 個と 6 個の磁気副準位が存在するが異なる準位間の遷移をそれぞれ観測することによって、どの副準位がキュービットにとって望ましいかも確認可能である。

実験では図 4.1.11 に示されるように、まず (a) $D_{3/2}$ 準位に用意されたイオンに、(b) 位相同期させたレーザーを照射する。このレーザーが $D_{3/2} - D_{5/2}$ 間の遷移に共鳴した周波数のときに電子は、(c) $D_{5/2}$ まで遷移を起し、その確率をレーザーの周波数を変えながら計測した。

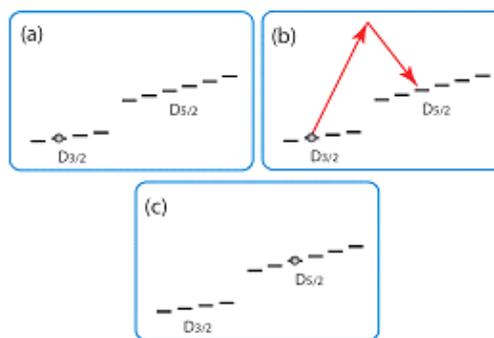


図 4.1.11 D 準位間のラマン遷移

主要な実験結果を図 4.1.12 に示す。図(a)の上を示される線は実験に使用された条件で観測されるべき遷移の周波数の位置を表しており、その下に見られる実験データで分かるよう

にすべての予測された遷移が観測された。レーザー光の偏光方向を変えることにより、 D 状態副磁気準位間の全ての遷移がきれいに分裂された形で観測された。この結果は個々の遷移を選択的に励起できること、それに要求されるレーザーの線幅の細さとイオンのいる磁場環境が時間的に揺らぎの小さいものであることを同時に示している。同図(b)は一つの遷移に注目し詳細なスキャンを行った結果で非常に狭い約 500Hz の線幅の遷移が観測された。この二つの観測からキュービットに必要な長い寿命と、そのキュービットを正確に操作できるレーザーのパフォーマンスが実証された。またどのコンビネーションの磁気副準位も操作が可能でキュービットとしての柔軟性の高い準位間であることがわかった。

実証された観測精度を利用して、 D 状態間の周波数差を精密分光によって測定した。レーザーの周波数がイオンの準位間に共鳴しているときに位相同期されたレーザーの周波数差を測定することで状態間の周波数を直接測ることができるが、実際の測定ではレーザーの強度による周波数のずれ、(Stark Shift と呼ばれる)が生じる。このずれを補正するために幾つかのレーザーの強度比で共鳴周波数を測り、レーザーの強度が 0 となる時の周波数差を外挿で求めた (図(c)参照 : $P_{854}:P_{850}$ の値は、二つのレーザーの強度比を表す)。今回の測定で D 準位間の周波数差は $1,819,599,021.50 \pm 0.03\text{kHz}$ と求められた[1]。周波数差が約 1.8THz という、狭線幅な光源の無い周波数帯域にあるこの状態間の周波数差測定は困難であり、異なる原子でも Ba^+ で 1992 年に 1 度しか測定されていなかった[2]。今回の測定により、過去の測定の精度を約 6 桁も上回る精度で周波数差を測定することができ、開発されたレーザーの測定精度の高さがうかがえる結果となった。

[1]Rekishu Yamazaki, Hideyuki Sawamura, Kenji Toyoda, Shinji Urabe, Stimulated Raman spectroscopy and the determination of the D-fine-structure level separation in 40Ca^+ , *Physical Review A* 77, 012508 (2008)

[2] Madej *et al.*, *PRA* 45, 1742 (1992)

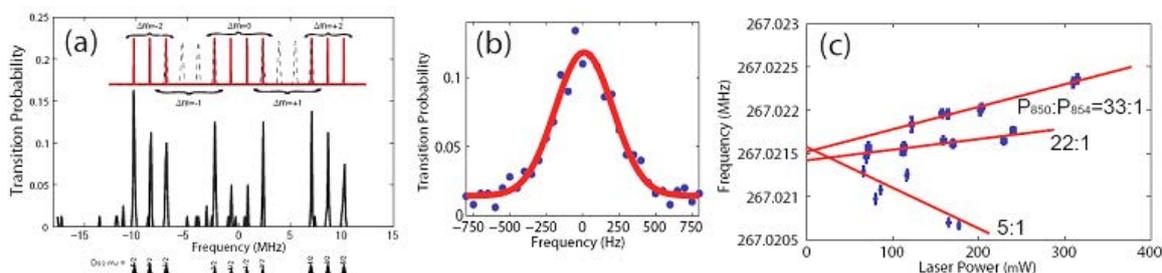


図 4.1.12 D 準位間のラマン遷移の分光結果

©コヒーレンス時間の測定とラビ振動の観測

前セクションで行った $D_{3/2}-D_{5/2}$ キュービット遷移の精密分光の結果は、間接的にキュービット遷移のコヒーレンスが得られていることを示すものであったが、このコヒーレンスをラムゼイ法により直接検証した結果についてここでは触れる。これまで原子系でテラヘルツに対応するエネルギー差の準位間のコヒーレンスが実験的に確認されたことはなく、したがってこれがはじめての試みとなる。

図 4.1.13(a) は磁場に対する依存性の異なる二つのゼーマン成分 ($m_j=1/2-m_j'=1/2$ および $m_j=3/2-m_j'=3/2$, それぞれ赤丸、青い三角印に対応) についてラムゼイ干渉の可視度をパルス間隔を横軸としてプロットしたものである。またそれらに対応するガウスフィットを赤および青のカーブで表した。磁場に対する依存性が小さいほうのデータの e^{-1} 減衰時間は 1.6ms 程度であった。このデータからコヒーレンスの減衰は主に磁場ゆらぎによっていることが予想され、その原因としては AC 電源ラインに同期した揺らぎなどが考えられる。ガウス関数でよくフィットできることから比較的遅い揺らぎによる統計的な遷移周波数の分布が干渉可視度の減衰に寄与していることが推測される。

この結果を受けて、スピンエコーのシーケンスを用いてラムゼイ干渉を行った。遷移周波

数が統計的に分布しているような場合にはスピネコーを用いることにより見かけ上のコヒーレンスの減衰をキャンセルすることが可能となる。図 4.1.13 (b) がその結果である ($m_j=1/2-m_j'=1/2$ に対して、赤はスピネコーを行った場合、青は行わない場合)。スピネコーを行った結果は 5.1ms と行わない場合に比べ 3 倍程度に伸びた[1]。この 5.1ms という結果より、単純な量子ゲートを行うのに十分なだけのコヒーレンスが得られたといえることができる。

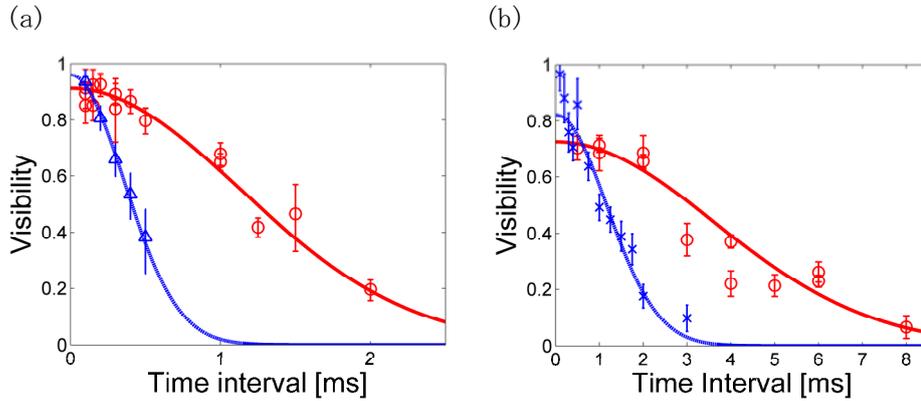


図 4.1.13 準安定状態間誘導ラマン遷移に対するラムゼイ干渉の実験結果。(a)磁場依存性の異なる 2 つゼーマン成分に対する可視度 (b)スピネコーを行った結果。

[1] 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 A79, 023419 (2009).

④光シフトの測定と補正

二つの準安定状態 $D_{3/2}, D_{5/2}$ をキュービットとした量子ゲートは位相同期した二つの光源により、二光子誘導ラマン遷移で操作されるが、操作時には励起光による光シフトが生じる。このようなシフトはゲート操作時には不要なシフトであり、本研究ではラムゼイ干渉法を用いて上記の光シフトの測定と補正を行った。図 4.1.14 に測定された光シフトとその補正結果を示す。

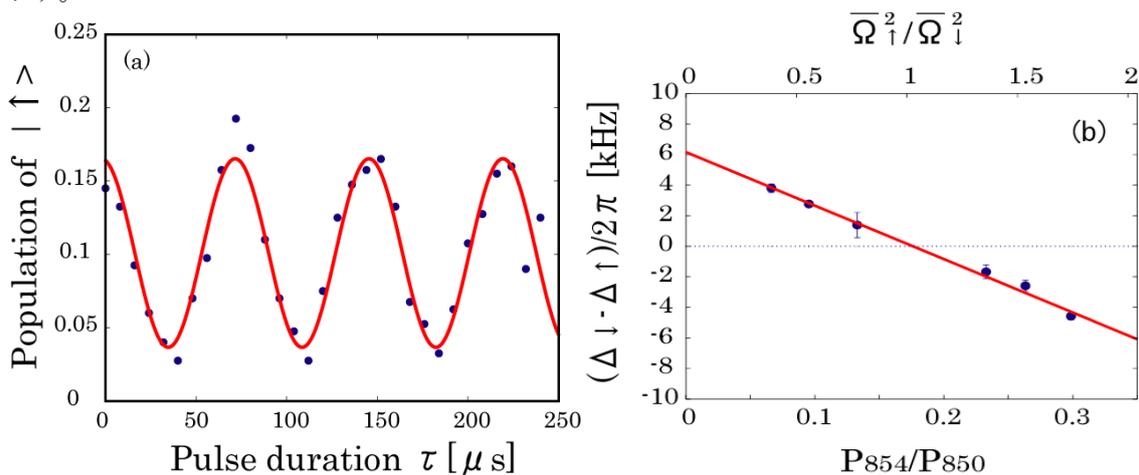


図 4.1.14 (a) 854nm のレーザー光 ($D_{5/2}-P_{3/2}$ 遷移) による光シフトの測定結果 (b) 光シフト補正結果

光シフト測定の際にはラムゼイパルス間に挿入されたシュタルクパルス(図(a))のパルス幅を掃引することで光シフト周波数で振動する干渉縞を得ることができる[1]。また、シュタルク

クパルスの直後に補正パルスを加え、ラマン光のパワー比を変化させながら光シフトの測定を行い、補正のためのパワー比を 0.176(4)と決定できた(図(b))。この結果より、ゲート操作におけるインフィデリティー ($\pi/2$ 回転操作時) は 7.6×10^{-4} と見積もられた[2]。

[1] H. Haeffner, S. Gulde, M. Riebe, G. Lancaster, C. Becher, J. Eschner, F. Schmidt-Kaler, and R. Blatt, Phys. Rev. Lett **90**, 143602 (2003)

[2] S. Haze, R. Yamazaki, K. Toyoda, S. Urabe, Measurement and compensation of optical Stark shift for manipulating the terahertz-separated states in $^{40}\text{Ca}^+$, to be published in Physical Review A.

◎単一イオンを用いた Cirac-Zoller ゲート実験

誘導ラマン遷移のコヒーレンスが確認できたこと、四重極遷移のラビ振動を高フィデリティで励起できたことにより、これらを組み合わせて量子ゲートを実現することが可能となる。ここでは単一 Ca^+ イオンを用い Cirac-Zoller 量子ゲートを実現した結果について触れる。Cirac-Zoller ゲートは 1995 年に提唱された、初めてのイオントラップを用いたスケラブルな量子計算の提案である。キュービットに用いる 2 準位のほかに付加的準位を必要とし、キュービット準位の片方とその付加的準位とのブルーサイドバンド遷移を用いることにより制御 NOT 演算を実現するものである。ここではこれを単純化したものとして単一 Ca^+ イオンの軸方向振動準位を制御ビット、 $D_{3/2}$ ($m_j=1/2$) および $D_{5/2}$ ($m_j=1/2$) をキュービット準位、 $S_{1/2}$ ($m_j=1/2$) を付加的準位として Cirac-Zoller ゲートを実現した結果について述べる。付加的準位との間の遷移の励起には 729nm の電気四重極遷移を用いた。付加的準位を D 状態のいずれかに設けることで、誘導ラマン遷移を用いてこの付加的準位との間の励起を行うことも可能であるが、ここでは誘導ラマン遷移のクロス配置による励起のフィデリティが十分ではなかったという技術的理由により電気四重極遷移を用いた。

図 4. 1. 15 は実験に用いたパルスシーケンスである。最初に四重極遷移に準備用のパルスを照射する。ラマン量子ビットは電子励起状態にキュービット準位を持つため、電子基底状態 $S_{1/2}$ からそれらに励起するためにこの準備用パルスは必須であるが、これを照射する際にキャリア遷移を用いるかブルーサイドバンド遷移を用いるかにより $n=0$, $n=1$ の振動準位を選択的に準備することが可能となる。その後、誘導ラマン遷移に $\pi/2$ パルスを照射し、電気四重極遷移にブルーサイドバンド 2π パルスを照射した上で、再び誘導ラマン遷移に $\pi/2$ パルスを位相ずれ ϕ_1 を与え照射する。この最後の 3 つのパルス列は一種のラムゼイ干渉を実現するものとなっており、電機四重極遷移のブルーサイドバンドパルスによって位相のずれが生ずるかどうかに依存して占有数反転が起こるかどうかが決められることとなる。制御ビットが $n=0$ 状態に準備されている場合には、ブルーサイドバンド遷移により遷移可能な振動量子状態が存在しないため 2π 回転は生じず、なにもパルスを照射しないのと同じ結果となる。 $\phi_1=\pi$ とした場合には、二つの $\pi/2$ パルスの照射で結局もとの状態に戻り占有数反転は起こらない。いっぽう制御ビットが $n=1$ 状態に準備されている場合には、ブルーサイドバンドの 2π 回転が起こることにより π 位相シフトが与えられることになり、占有数反転が生ずることとなる。結局振動準位の状態に依存して占有数反転が起こるかどうかが決定されることとなり、制御 NOT 演算を実現されることとなる。図 4. 1. 16 は Ca^+ のエネルギー準位およびこのパルスシーケンスの作用を示したものである。

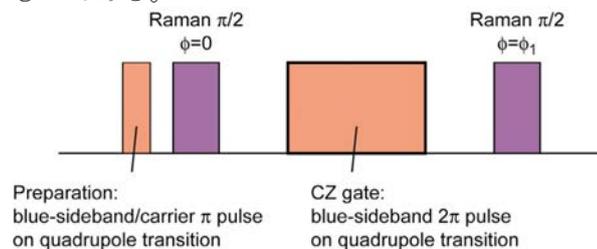


図 4. 1. 15 Cirac-Zoller ゲート実験のパルスシーケンス

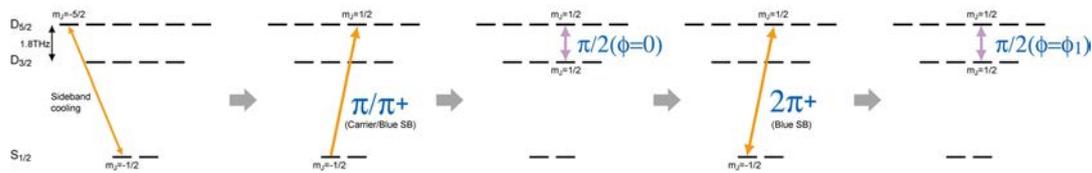


図 4.1.16 Cirac-Zoller ゲート実験の励起スキーム

図 4.1.17 はラムゼイ干渉の 2 つ目のパルスの位相を掃引しながら占有数を測定したものである。準備する状態が $n=0$ であるか $n=1$ であるかに依存して明らかに干渉フリンジの反転が起こっていることが示されており、量子ゲートとしての動作が確認できる [1]。

[1]K. Toypda, S. Haze, F. Inoue, R. Yamazaki, S. Urabe, Quantum Gate Experiments Using a Terahertz-Separated Metastable-States Qubit in $^{40}\text{Ca}^+$, in preparation.

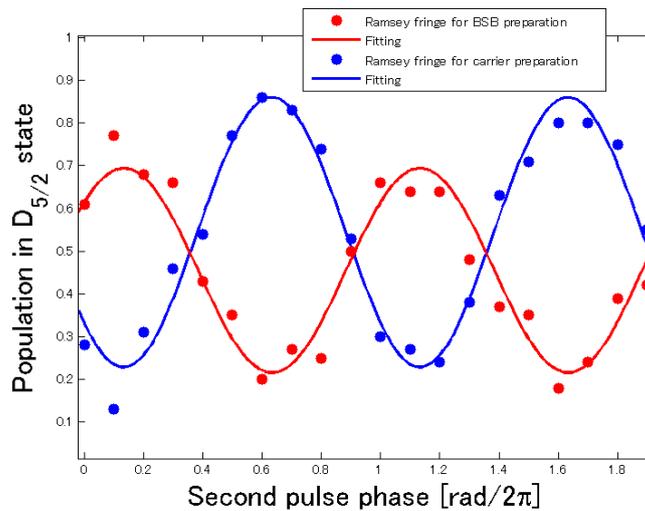


図 4.1.17 Cirac-Zoller ゲート実験の結果

④高速断熱通過 (RAP) による重ね合わせ状態の生成

イオントラップを用いた量子情報処理では既にキュービットの初期化、1 キュービットの任意な回転、2 キュービットゲートなど基本となる情報処理の操作は実現されており、近年は誤り訂正のアルゴリズムを用いるべく情報処理全体のフィデリティ (成功率、信頼度) を高める研究に力が入れている。本研究では量子情報特有の「重ね合わせ状態」を生成する際に、使われるレーザーの強度揺らぎに対して状態生成の効率が変化しないようなロバストな手法を確立した。

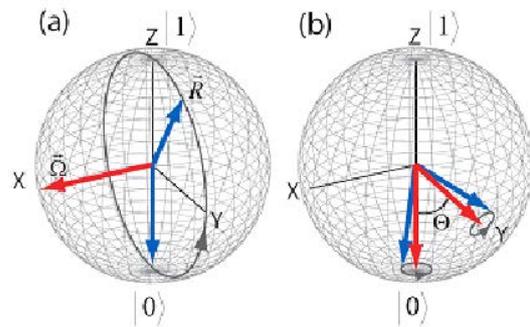


図 4.1.18 ブロッチ球とブロッチベクトル

図 4.1.8 で示すように、ブロッチ球上でキュービット状態 0 と 1 が球の南極と北極で表わされる時、重ね合わせ状態は北極と南極以外の表面上である。図 (a) は状態ベクトル \mathbf{R} のブロッチ球上での運動を表している。相互作用ベクトル $\mathbf{\Omega}$ の向きはレーザーの周波数と位相で任意に決められ、レーザー照射中 \mathbf{R} は $\mathbf{\Omega}$ の周りをレーザー強度と周波数によって決められる回転速度で歳差運動する。レーザーによってコントロール可能なこの回転を用いて量子情報操作をするのは、イオンを用いた量子情報処理では既存のスタンダードな手法である。例えば 0 と 1 が半分ずつの重ね合わせ状態 (Y 軸方向) に \mathbf{R} を向けたい場合、回転運動中 \mathbf{R} が Y 軸を向く瞬間にレーザー照射を止めればその方向で \mathbf{R} は止まる。しかしこの操作の時、レーザー強度の揺らぎにより回転速度が変化した場合、レーザー照射を止めた時に \mathbf{R} が Y 軸を通り過ぎ

てしまったり、また逆に手前で止まる場合もある。これはつまり操作するレーザーの特性の揺らぎにより目的としていた量子情報処理に誤差が生じることを意味する。

重ね合わせ状態の生成時にこの誤差を Rapid Adiabatic Passage (高速断熱通過、通称 RAP) を用いて回避するアプローチが Vitanov と Shore により 2006 年に提案されたが、その概要を図 (b) を使って説明する。彼らの提案ではまず相互作用ベクトルを状態ベクトルの向きに等しく用意する (共に 0 状態の方向)。レーザーを照射すると \mathbf{R} は平行に用意された $\mathbf{\Omega}$ の周りを細かく回転し始める。その後この回転運動をさせたまま、ゆっくりとレーザーの周波数を変化させることで $\mathbf{\Omega}$ を Y 軸の方向に向けていく。 $\mathbf{\Omega}$ の移動中 \mathbf{R} は $\mathbf{\Omega}$ に巻きつくように歳差運動を行い $\mathbf{\Omega}$ と共に Y 軸まで移動する。そして、 $\mathbf{\Omega}$ が Y 軸を向いた後にレーザーの照射を止めると状態ベクトルもまた Y 軸の方向で止まる。この手法の特長はレーザーの強度変化に対し高いロバスト性をもつことである。図 (a) において、レーザーの強度、つまり状態ベクトルの回転速度が変わるとレーザー照射を止めるタイミングに対して非常に敏感に \mathbf{R} の終状態が決まるが、(b) においては何周余分に歳差運動をしても \mathbf{R} は $\mathbf{\Omega}$ から離れていくことはないことがこの手法のロバスト性の起源である。

我々は RAP を用いてロバストな重ね合わせ状態の生成を、単一 Ca^+ イオンで実験的に行った。基底状態 $S_{1/2}$ と準安定状態 $D_{5/2}$ 間をキュービットとし、キュービット間を結合する四重極子遷移を励起する 729nm のレーザー光の周波数と強度をコントロールして RAP を試みた。図 4.1.19(a) に示される通り、ドップラー冷却されたイオンは $S_{1/2}$ 状態 (0 状態) に用意される。そのイオンに音響光学素子 (AOM) を用いて強度と周波数を任意の形に変えた RAP パルス照射することにより Y 軸方向を向く重ね合わせ状態を生成する。詳細は省くが、高速断熱通過を用いるのに必要である理想的なレーザーの周波数

(赤線) と強度 (青線) の関係は横軸を時間軸とし図 (b) のようになる。テクニカルな理由により実験では図 (c) のように線形に周波数を動かしたが、これが高速断熱通過の条件を満たしていることはシミュレーションで確認されて

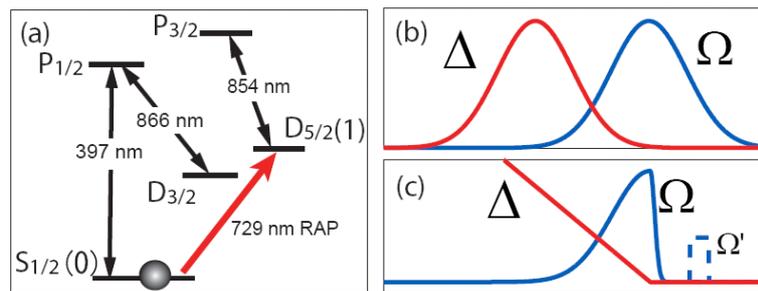


図 4.1.19 RAP による重ね合わせ状態発生の原理

いる。固定のレーザー周波数と強度を用いる既存の量子情報操作とは違い、このように時間的にレーザーパラメータを操りロバスト性を高めることが RAP の特徴であるが、AOM を駆動する RF を FPGA (Filed Programmable Gate Array) や DDS (Direct Digital Synthesis) 等を用い、正確にコントロールする技術を開発した。RAP パルスの後に入れられたもう一つのレーザーパルス ($\mathbf{\Omega}'$) は解析パルスといい、RAP によって作られた重ね合わせ状態を更にラムゼイ干渉を用いて解析するために使われる。RAP により正しく重ね合わせ状態ができた時には、この解析パルスにより 0-1 間を行ったり来たりするような歳差運動をするようになり、1 の状態の占有数 (P_1) はこのパルスの位相 (ϕ) に対して振動する。

実験結果を図 4.1.20 に示す [1]。黒点は実験データを灰色の線はシミュレーションの結果を表わしている。図 (a) は RAP パルス照射後の占有数 P_1 の $\mathbf{\Omega}_0$ (RAP パルスの最大ラビ周波数) に対する変化を表している。レーザー強度が極端に弱い時以外 ($\mathbf{\Omega}_0/2\pi > 0.05\text{MHz}$) は、占有数 ~ 0.5 という 0 と 1 の等しい重ね合わせ状態がレーザー強度の変化に依らずに生成されているのが分かる。しかし、この結果だけでは占有数が 0.5 というのは確認できるが、XY 平面上すべての状態は同じ占有数 0.5 という結果を出すため、毎 RAP パルスごとに XY 平面上で同じ方向を向く重ね合わせ状態が生成されているかの判別ができない。そこで先に述べた解析パルスを入れることにより、RAP で生成された状態を更に歳差運動させた。その結果を図 (b) のインセットに示す。ほぼ 0-1 状態間を歳差運動している状態が P_1 の上下で確認できる。この振幅が 1 に近ければ近いほど純度の高い同一の重ね合わせ状態が生成されていることを示し、

RAP パルスによりターゲットとしている重ね合わせ状態が生成されているのが確認された。重ね合わせ状態の純度を表す Visibility (V) をそれぞれのレーザー強度で測った値を図 (b) に示す。図 (a) に同じく非常に低いレーザー強度のとき以外ほどの強度においても高い Visibility が観測され、最高で $V=0.93$ という高純度の重ね合わせ状態の生成が確認された。簡単な比較をすると、既存の手法を用いて Y 軸方向の重ね合わせ状態を作る場合 $\Omega_0/2\pi$ が 0.1MHz から 0.2MHz に揺らいだ時 Visibility は $V=0$ となる。

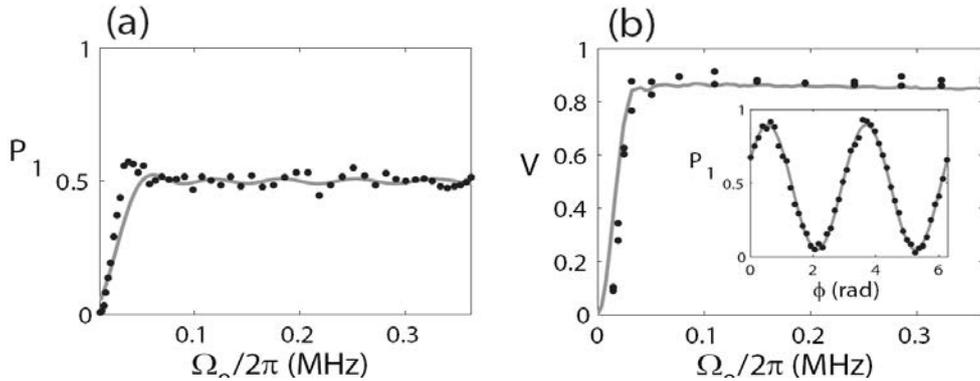


図 4.1.20 RAP による重ね合わせ状態の発生 (実験結果)

[1] Rekishu Yamazaki, Ken-ichi Kanda, Fumihiko Inoue, Kenji Toyoda, Shinji Urabe, Robust generation of superposition states, Physical Review A 78, 023808(2008)

⑤極微量同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ の選別捕獲

Ca^+ イオンはイオントラップを利用した量子情報処理や周波数標準のターゲットとして用いられている。Ca には6つの安定な同位体が存在するが、これらの実験に用いられているのは専ら偶数核同位体の $^{40}\text{Ca}^+$ である。その理由は表 4.1.1 に示すように、天然に存在する同位体の約 97% が ^{40}Ca だからである。しかしキュービットとして用いるには奇数核同位体を用いるのが望ましい。なぜなら外部磁場によるエネルギー準位の (1 次の) シフトが無い遷移をもつためである。ところが唯一の奇数核同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ の存在度は 0.135% しかなく、このことが $^{43}\text{Ca}^+$ を用いる実験の障壁のひとつといえる。

質量数	存在度 (%)
40	96.9
42	0.647
43	0.135
44	2.09
46	0.004
48	0.187

表 4.1.1 カルシウムの同位体存在度

そこで本研究では Ca 原子の同位体シフト (共鳴周波数が同位体によって異なること) を利用して、光イオン化によって選択的に $^{43}\text{Ca}^+$ をイオン化し捕獲することを試みた。光イオン化では最外殻電子を光で2段階に励起し

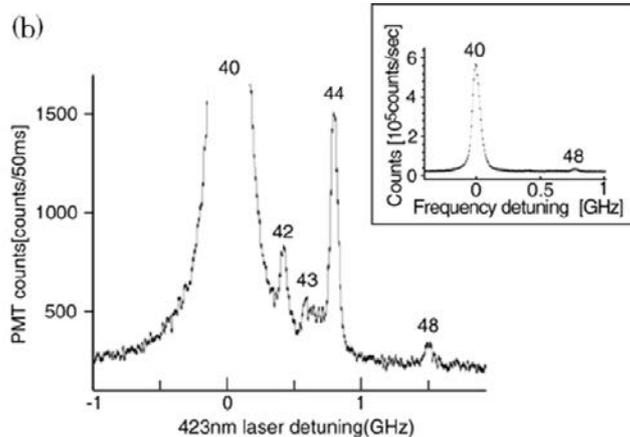
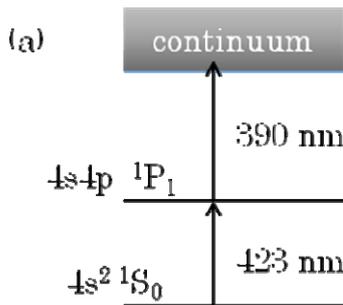


図 4.1.21 (a) カルシウム原子のエネルギー準位図。(b) 光イオン化の第1段階 (波長 423 nm) の励起による蛍光強度スペクトル。数字は質量数を表す。挿入図の縦軸を拡大したため ^{40}Ca からのスペクトルのピークは図の範囲外である。

イオン化エネルギーを与えている(図 4.1.21(a))。第1段階の励起で各々の同位体のスペクトルが分離できるように Ca の原子ビームのコリメーションを行った。その結果得られた蛍光スペクトルが図 4.1.21 (b)である。 ^{43}Ca の共鳴にレーザー周波数を同調することで励起される原子を選択し、さらに第2段階の光源によりイオン化を行う。しかしこのスペクトルから推察できるように、 $^{40}\text{Ca}^+$ のスペクトルのすそが $^{43}\text{Ca}^+$ のスペクトルに重なっているために、これだけで完全に $^{40}\text{Ca}^+$ を排除することは難しい。そこでレーザー冷却用の光源を $^{43}\text{Ca}^+$ に対しては冷却効果、 $^{40}\text{Ca}^+$ に対しては加熱効果があるように同調し、さらにトラップポテンシャルを操作することによって同位体の純化を行い、 $^{43}\text{Ca}^+$ のみの捕獲とレーザー冷却に成功した[1]。

$^{43}\text{Ca}^+$ の選別捕獲とレーザー冷却は英国 Oxford 大のグループによる報告があるが、我々は光イオン化の第2段階の光源がレーザーではなく発光ダイオードを用いても可能なことを示した[2]。また Oxford 大のグループとは異なる遷移やトラップポテンシャルの操作法で $^{43}\text{Ca}^+$ の捕獲と同位体の純化を実現した。本実験は発光ダイオードの特異な応用例として光源開発の方面からも注目されている。発光ダイオードはレーザーよりも短波長化の研究が進んでおり網羅されている波長帯が広いため、この方法のカルシウム以外のイオンへの適用が期待できる。 $^{43}\text{Ca}^+$ は基底状態の超微細構造間(3.2GHz)が量子ビットに利用できること、光周波数標準の候補となっていることから、極微量にもかかわらず選別捕獲と冷却が可能なことを示した本研究の波及効果は大きいと考えられる。

[1]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

[2]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.

⑥プレーナートラップの開発

冷却イオンを用いた量子情報処理では、少数個のイオンを用いた量子ゲート操作のデモンストレーションが数多く行われているが、多数の量子ビットにいかに拡張するかが目下克服すべき課題である。そこで従来のトラップ電極とは異なる平面型のトラップ電極、「プレーナートラップ」が注目されている。プレーナートラップは電気回路パターンと同様に作製できるうえ、トラップ領域が分岐したり交差したりするといった複雑な形のものも自由に設計できる。さらに、従来型ではイオンは電極で囲まれた領域に捕獲されるが、プレーナートラップでは基板表面から数十から数百マイクロメートル上方に捕獲されるため、イオンからの蛍光をさえぎるものが少ない。そこで光学系を工夫すれば集光効率が向上するという利点もある。反面、トラップポテンシャルの深さが従来型よりも1桁以上小さいのが難点である。

本研究ではまず MIT のグループとの連携によって、ストロンチウムイオンで捕獲の実績があったプレーナートラップを用い、光イオン化の手法を適用してカルシウムイオンの捕獲に成功した。その後、基板にアルミナ、電極に金を用いたトラップを作製し(図 4.1.22)、捕獲と冷却を行った[1]。捕獲されたイオンの固有振動を測定し、トラップポテンシャルのシミュレーションから得られる値と比較した。また画像計測によって簡便なマイクロ運動の補正を行ったところ、図 4.1.23 のようなイオン列を観測した。これはイオン間のクーロン力によるポテンシャルとトラップポテンシャルが釣り合ったときにみられるもので、プレーナートラップに

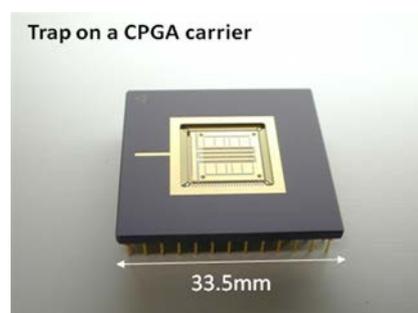


図 4.1.22 平面型イオントラップ

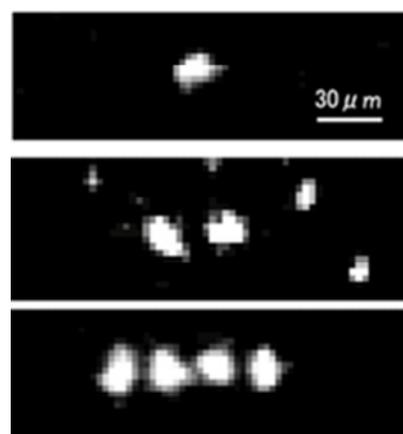


図 4.1.23 冷却されて整列したカルシウムイオン(上から1個、2個、4個)

においてもイオンが十分に冷却されていることを表す。

このような平面型のトラップの他研究機関での状況は、まず米国 NIST においてマグネシウムイオンを用いたデモンストレーションが行われた。その後 MIT のグループが液体ヘリウム温度下でのイオン加熱レートの低減を報告した。他にオーストリアの Innsbruck 大、英国 Oxford 大で捕獲に成功している。しかしその形状、作製方法、材質などはまだまだ試行錯誤の段階である。このような背景のもと、本研究は様々なトラップ形状のシミュレーションによる検討と、独自の材質で作製したトラップの特性評価を行ったという点で有意義であるといえる。

[1]U Tanaka, R Naka, F Iwata, T Ujamaru, K R Brown, I L Chuang, and S Urabe, Design and characterization of a planer trap, J. Phys. B, Vol.42, No.15, 154006, 2009.

(2) 研究成果の今後期待される効果

①振動基底状態の発生と SD キュービットの操作

イオンを用いた量子状態の制御においては、高いフィデリティで操作を行うために、各種デコヒーレンス要因や統計的不確定性を排除することが重要であるが、振動量子数の熱的な分布による影響はそのなかでも大きなものである。熱的な分布をあらかじめ除去しておくことが全ての操作を行う上での前提である。本研究ではサイドバンド冷却法による振動基底状態への冷却により、振動量子数として約 0.01 が得られた。さらにラビ振動の励起を行った結果、高いフィデリティでの励起が確認された。ラビ振動の明瞭な観測は、その他の不完全性の影響、例えば強度揺らぎやレーザーのコヒーレンス、磁場揺らぎ等などの影響も十分抑制されているということを示す。これにより、イオンを用いた量子情報処理における基本的な前提条件が満たされ、各種の高度な量子状態の制御を行う際のベースが確立された。

②テラヘルツ遷移キュービットの開発

近年の光コム技術の高まりにより、これまでにない精度と柔軟性が原子・分子・光物理の研究にもたらされたが、イオンを用いた量子情報処理の研究においてもこの利点を生かした研究が期待される。光コムと位相ロック技術を用いることによって、これまで用いられたことのなかった原子・分子中の遷移を用いた研究が可能となると考えられる。たとえば分子の長寿命の振動回転準位を用いた量子計算にここで達成されたことが応用可能であると考えられる。また近年盛んに研究が行われている冷却原子の会合により得られた分子にも応用可能であると考えられ、例えばフェッシュバハ共鳴により会合した直後の高い振動回転準位にある分子の操作などに用いることができると考えられる。

イオンの量子ビット選択の上でも、この光コムによりロックされた光源系による励起スキームにより、いろいろな可能性や柔軟性がもたらされる。カルシウムイオンについていえば、電気四重極遷移を用いる場合のように光周波数を高度に安定化せずとも高いコヒーレンスを得ることができ、また $^{43}\text{Ca}^+$ を用いる場合のように微量同位体を選別する必要がない。また高出力の近赤外の光源を用いることにより高いラビ周波数での励起が可能となり、これは高速な量子ゲートの実現への応用が期待できる。さらに、カルシウムイオンの準安定 D 状態は多くのゼーマン副準位を持つため、トライポッド系での STIRAP による幾何学的位相ゲートの実現などの実験に応用できる可能性がある。

③高速断熱通過 (RAP) による重ね合わせ状態の生成

量子情報処理においては、高いフィデリティの操作が求められているが、RAP の実験で得られたレーザー強度に対するロバスト性は将来的な可能性を高く持つ結果である。レーザー自体の強度の揺れ自体を取り除くのも簡単ではないが、イオンをトラップ中に配列した場合クーロン力により距離が離れるために各イオンの位置でレーザーの強度にばらつきがある。またそれ以外にもレーザーのポインティングの精度や実験環境の振動などがそれぞれのイオンが感じる強度に変化をもたらす。このようなテクニカルな理由による強度のばらつきに対

しても非常にロバストなこの手法は量子情報で即戦力と成り得る技術である。またイオンだけでなく冷却原子系で活発に研究されているボース=アインシュタイン凝縮体や固体など非常に高密度で光の吸収による減衰が無視できないような物質に対する操作にも応用が可能である。

この実験ではテクニカルな理由により周波数のコントロールが限定されたことを述べたが、近年のRF周辺機器の進歩は目まぐるしく、今後このようなレーザーの強度や周波数を任意に扱う手法は大きく進歩すると思われる。NMR等ではすでに多くの確立されてきた数々のパルス生成の手法をレーザー+原子系に応用できる可能性を秘めているが、今回のデモンストレーションはそのスタートとして位置づけられ、今後大きく期待される。

④極微量同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ の選別捕獲

自然同位体中に 1000 個に約 1 個という極微量の同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ を選別捕獲することが可能なことを示したことは大きな意義がある。奇数同位体を用いることで、コヒーレンス時間の長い基底状態の超微細構造間 (3.2GHz) をキュービットに利用できる。キュービットの制御方法として、ラマン遷移を用いる方法、高磁場勾配下でマイクロ波による直接遷移を用いる方法が考えられる。後者は電気回路との整合性がよく、制御系の簡便化と高性能化が期待できる。またイオンを用いた光周波数標準の候補としても $^{43}\text{Ca}^+$ は研究対象となっていることから、この分野への貢献も期待できる。

⑤プレーナートラップの開発

イオントラップを用いた量子情報処理の発展方向の一つは、大規模集積化である。プレーナートラップは複雑な構造が作製できることから、集積化や高度なゲート操作には欠かせない技術であり、また、他の物理系との結合が容易である。本研究開発で MIT からの協力のもとにプレーナートラップを導入できたことは、今後の研究を進展させる上で大きな資源となった。

4. 2 長寿命時計遷移を利用した量子ゲートの開発(京都大学グループ)

(1)研究実施内容及び成果

【研究実施内容】

Yb⁺、及び、Ba⁺ 長寿命時計遷移を利用した光時計、そして量子ゲートの開発を行う。両イオンともアルカリ金属様の準位構造をもっていて、それらの奇数同位体は核スピンによる超微細構造をもつ。このため奇数同位体は、偶数同位体よりもレーザー冷却が難しいが、磁場に対する周波数シフトが小さい $m_F=0-m_F=0$ 遷移をもつために、光時計への応用が期待できる。Yb⁺の奇数同位体 171 は、核スピン $I=1/2$ で超微細構造をもつなかでは準位構造が比較的簡単で、レーザー冷却遷移は1つだけである程度冷却サイクルがとじる。また、Ba⁺の奇数同位体 135、あるいは137は、 $I=3/2$ でレーザー冷却はずっと難しくなるが、²D_{3/2}準位に全角運動量 $F=0$ の準位をもち、この準位ではトラップの4重極電場による周波数シフトが発生しないという利点がある。このシフトはアルカリ金属様準位構造をもつイオンを用いた場合、周波数の不確かさを制限するもっとも大きな要因である。また、近傍にいるイオンの電場に対しても周波数がシフトしない可能性がある。複数個のイオンを利用できれば、イオントラップによる光時計の最大の欠点である、信号の SN 比の悪さを改善できる。¹⁷¹Yb⁺は、すでに波長 435 nm ²S_{1/2}-²D_{3/2}遷移が2次の周波数標準に勧告されている。我々はその遷移よりも寿命がやや短い但他的性能は差がなくあまり研究されていない波長 411 nm ²S_{1/2}-²D_{5/2}遷移で研究を進める。Ba⁺の奇数同位体は、我々とほぼ同時期に開始した米国の2グループが同様に注目しているが、まだ時計遷移の分光までは行われていない。

それぞれのイオンに対して次の技術を順次確立していく。

①レーザー冷却用光源の開発。

光時計で必要となる長時間連続運転を可能とするため、半導体レーザーを用いた光源を開発しレーザー冷却を実現する。

②レーザー冷却技術の確立。

高周波(RF)電場によるトラップでは、RF電場はトラップ中心では0で中心から離れるにしたがって大きくなる。この電場によるイオンの運動、すなわちマイクロ運動も、トラップ中心から離れるほど大きくなる。したがって、トラップに不要な静電場(電極に付着した中性原子や電極を支持する絶縁体の帯電などの理由で発生する)が存在すると、イオンがトラップ中心から動かされマイクロ運動が大きくなる。補正電圧を与えて不要な静電場を打ち消し、単一イオンをトラップ中心で冷却する技術を確立する。

③小型イオントラップの開発

光時計や量子計算への応用では、個々のイオンを波長サイズ以下の狭い領域、いわゆるラム・ディック領域へ閉じ込めることが必要である。ラム・ディック領域に閉じ込めたイオンは1次のドップラーシフトがなく、また、分かれて観測されるサイドバンドを利用した冷却により振動基底状態まで冷却が可能で、量子ビットに利用できるようになる。ラム・ディック領域に閉じ込めるには、より小さなトラップ電極のほうが、より小さなRF電圧で可能となり有利である。そのために1mmサイズの小型トラップを開発する。特にBa⁺では、奇数同位体を複数個トラップして光時計のSN比を改善する研究を可能とするため、複数個のイオンを中心軸上に並べてラム・ディック領域に閉じ込め可能な、小型のリニアRFトラップを開発する。

④光イオン化と単一イオンの導入、及び奇数同位体のトラップ

イオンの生成に光イオン化を導入する。光イオン化には、電子源を使用しないため絶縁体の帯電が発生しない、イオンを生成しながらトラップ中のイオンの蛍光が観測できる、特定の同位体を選別してトラップできる、といった利点がある。この方法を利用して、イオンを1個ずつトラップに導入する方法、そして、Yb⁺では同位体171、Ba⁺では奇数同位体135、137のトラップを実現する。

⑤時計遷移励起用レーザーの開発

サイドバンド検出、サイドバンド冷却、光時計、および、量子ゲート操作のために、狭い発振線幅の光源を開発する。

⑥光周波数コム技術

GPS時計を基準とした光周波数計測システムを構築し、不確かさ 10^{-11} でレーザー周波数を同調する。また、コムをレーザーに位相同期させ、波長の離れたレーザーで線幅を比較可能とする。

⑦単一イオンによる時計遷移分光

まず、多数個のイオンで時計遷移の励起を確認する。続いて単一イオンで量子跳躍信号を観測する。レーザー周波数を掃引し、量子跳躍の頻度を計測して、単一イオン分光を行う。これにより、イオンの永年運動によるサイドバンドを検出する。ここまで達成できると、奇数同位体でのスペクトル検出、そしてレーザーの安定化による光時計の開発、および、サイドバンド冷却、そして量子ゲート操作、が見えてくる。

【成果】

これまでの研究成果を以下にまとめる。Yb⁺についてやや詳しく記述し、Ba⁺については特徴的などころを中心にまとめる。

①Yb⁺イオントラップ

④ レーザー冷却光源の開発

Yb⁺のレーザー冷却遷移は波長 370 nm $^2S_{1/2} - ^2P_{1/2}$ 遷移である。 $^2P_{1/2}$ 準位からは $^2D_{3/2}$ 準安定準位への遷移があり、冷却サイクルをつくるために波長 935 nm $^2D_{3/2} - ^3D[3/2]_{1/2}$ 遷移を同時に励起する。波長 370 nm の冷却光源は、2 台の半導体レーザーの和周波混合の出力増強を進めて完成させ、後に、紫外 LD による外部共振器型半導体レーザー (ECLD) で実現した。和周波光源は我々独自の方法であり、紫外 ECLD はオーストラリアのグループが先に開発したが、我々の場合は室温からあまり冷却しなくても実用になる。半導体レーザーの和周波光源は、波長 822 nm と 671 nm の ECLD を両波長ともに共鳴する外部共振器を用いて発生させた。入力光パワーと共振器による増倍率は、それぞれの波長に対して 62 mW と 46、及び 8.3 mW と 37 で、和周波光 116 μ W を得た。和周波発生用外部共振器の共振器長をピエゾ素子で変化させることで、4 GHz 以上の連続掃引が可能である。紫外 ECLD は、波長 371.5 nm の LD チップとリトロー配置においた回折格子で外部共振器を構成したもので、回折格子の回転により ± 2 nm の波長可変範囲が得られ、室温から 3°C ほど冷却して冷却遷移に同調することができた。ピエゾ素子で共振器長を変化させるだけでは、連続掃引が 1 GHz 程度であったので、注入電流を同期して掃引するように工夫し、10 GHz の連続掃引を達成した。和周波と ECLD、両光源のビート信号の幅は 2 MHz 以下と、冷却光源の線幅として十分狭いことが分かった。冷却光源は、低熱膨張率ガラスをスペーサとし、ピエゾ素子で共鳴が掃引可能な光共振器に周波数安定化した。冷却光源は 2 系統となったが、同位体 171 を冷却する場合は、超微細構造間の光ポンピングを避けるため両者が必要である。同様に波長 935 nm リボンピング遷移も 2 系統の光源が必要のため、ECLD を 2 台構築した。

⑤ レーザー冷却技術の開発

リング電極の内径が 5 mm の RF トラップを用いて、超微細構造のない同位体 174 のレーザー冷却を行った。和周波光、ECLD とともにレーザー冷却に成功し、両光源とも冷却用光源として十分な性能をもつことがわかった。続いてマイクロ運動の補正を進めた。補正用の電極をリング電極の近くにほぼ直角に 2 つ配置し、エンドキャップ電極のひとつとあわせて 3 箇所補正用の静電圧を与え、3 次元とも補正を可能とした。まず、蛍光が強くなるように、続いて冷却光源を周波数掃引しスペクトルが狭くなるように補正電圧を変化させ、補正が可能であることを確認した。完全に不要静電場を打ち消すため、蛍光相関法を導入した。これは、RF 電場と蛍光との時間相関を測定してマイクロ運動によるドップラーシフトを検出し、これが無相関になるように補正電圧を調整する方法である。相関の検出には、大阪大学グループの方法を参考に、タイムインターバルカウンタを利用した。補正電圧を最適化した後に、冷却光源の周波数を掃引して得られた単一イオンのスペクトルを図 4.2.1 に示す。ほぼ自然幅のスペクトルが得られ、また、光電子増倍管による光子計数法で検出している蛍光強度も 10000 s⁻¹ と大きくなった。

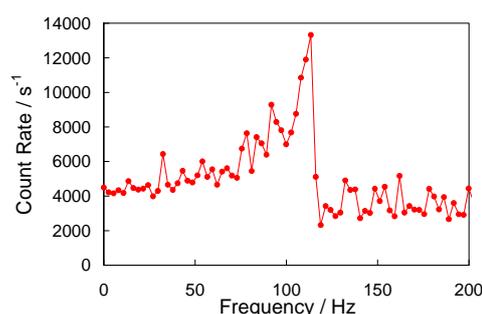


図 4.2.1 冷却光源の周波数を掃引して観測した単一 $^{174}\text{Yb}^+$ のスペクトル

©小型トラップの開発

ラム・ディック領域に閉じ込めるために、図 4.2.2(a) に示すリング電極内径 0.8mm の通常型 RF トラップを導入した。電極の材質はモリブデンで電極断面は三角形にカットしている。RF が高いため高電圧を印加することが難しいが、13.5MHzで Q 値 250 のヘリカル共振器を作製し、十分な大きさの RF 電圧を印加可能とした。図 (b) に少数個の同位体 $^{174}\text{Yb}^+$ を導入し、冷却光源の周波数を掃引

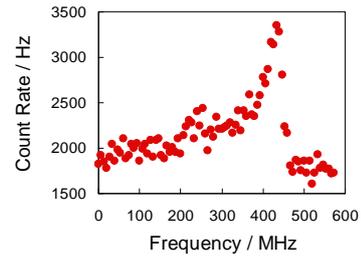


図 4.2.2 (a)小型イオントラップ、(b)小型イオントラップに閉じ込めた少数個 $^{174}\text{Yb}^+$ の冷却遷移のスペクトル

して得られたスペクトルを示す。ある程度のマイクロ運動除去は行っている。次項に述べる、イオンを 1 個ずつ導入する技術、及び、同位体 171 のレーザー冷却を、このトラップでも実現した。

④光イオン化と単一イオンの導入、同位体 171 のレーザー冷却

光イオン化は Yb 原子をレーザー光で 2 段階に励起して行った。第 1 励起は波長 399 nm $^1\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$ 遷移で、 $^1\text{P}_1$ 準位からの第 2 励起でイオン化ポテンシャル以上に励起しイオンを生成する。Yb⁺ の光イオン化によるイオンのトラップへの導入は 2 つのグループですすでに行われているが、その特性は詳細に調べられていない。そこで、リング電極内径 34 mm の大型のトラップを用いて、光イオン化の基本特性を調べた。このトラップではヘリウムを緩衝気体として導入し室温近くまでイオンを冷却することで、 10^6 個と大量のイオンをトラップできる。イオン数が多いため、イオンの永年運動と周波数が等しい電場との共鳴を検出することが可能で、その信号から個数を求めることができる。この特長を生かしてイオン生成速度を測定した。電気共鳴法を利用した光イオン化の特性測定は、他のイオンも含めて行われた例はない。イオン生成速度に対する第 2 励起の波長依存性について調べた結果を図 4.2.3 に示す。別の方法で測定されたイオン化断面積のデータと類似の特性が得られ、測定方法が信頼できることが確かめられた。第 2 励起の波長は、イオン化ポテンシャル近傍で高くなること、波長 370 nm のイオン冷却光によるイオン化速度はイオン化ポテンシャル近傍と大差がないこと、イオン化ポテンシャル以下でもトラップの RF 電圧のためにイオン化できること、第 1 励起用の波長 399nm 光だけではイオン生成速度は 3 桁程度遅いこと、第 2 励起光をリユードベリ準位に共鳴させるとイオン生成速度が上がること、が分かった。

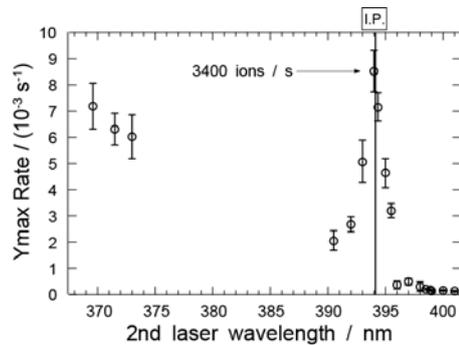


図 4.2.3 光イオン化による Yb⁺ のトラップにおける第 2 励起波長依存性

光イオン化の導入によって、Yb 原子を発生させるオープンを実作させてイオンを生成しながらも、トラップ中のイオンの蛍光が観測できるようになり、レーザー冷却実験が大きく加速した。オープンの温度を下げることにより、イオンを 1 個ずつトラップに導入する技術を確立した。リング電極内径 5 mm のトラップで得た結果を図 4.2.4 に示す。ステップ状に蛍光が増加し、導入した個数が判別できる。小型トラップでも同様の技術を獲得した。

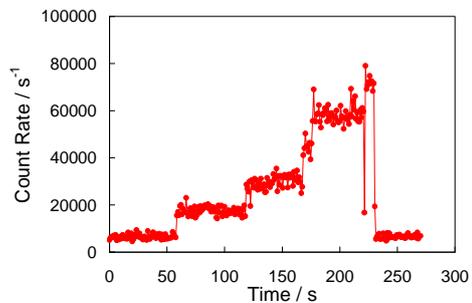


図 4.2.4 光イオン化により $^{174}\text{Yb}^+$ を 1 個ずつ導入したときの蛍光

リング電極内径 5 mm のトラップを用いて、特定の同位体を選別して導入する実験を試みた。オープンから放出される原子をある程度コリメートし、第 1 励起用レー

レーザーをこの原子線にほぼ垂直に照射し、ドップラー広がりを押さえた。第1励起の波長 399nm の蛍光から、周波数が近接した吸収線を除いて各同位体の蛍光を明瞭に分離でき、蛍光が分離されている同位体は 90%を超える割合で優先的にイオン化できることが推定された。多数個のイオンを導入した実験結果からは、主要な 3 つの偶数同位体 172、174、176 では他の同位体の混入を 10%程度に抑えられることがわかった。存在比が 3%と小さい同位体 170 も十分レーザー冷却できた。少数個の導入に関しては、上記の結果から 10 個程度までは特定の同位体のみをトラップできると考えられる。

主要な 3 つの偶数同位体を 5 個程度まで導入して他の同位体の存在を調べた結果、混入がないことを確認できた。

同様に同位体 171 を選択的に導入してレーザー冷却を確認した。図 4.2.5 にそのスペクトルを示す。前述のように、冷却光とリポンピング光を 2 系統照射した。さらに、特定の磁気副準位への光ポンピングを避けるために横磁場を印加し、冷却サイクルを形成するレーザーは磁場に対して偏光が 45 度になるように照射した。同位体 171 のレーザー冷却は、小型トラップでも確認した。

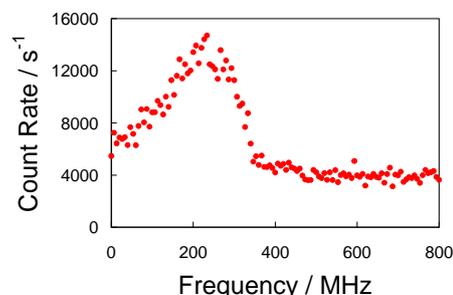


図 4.2.5 多数個 $^{171}\text{Yb}^+$ の冷却遷移スペクトル

㊦ 時計遷移用レーザーの開発

開発した $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移用レーザーのシステムを図 4.2.6 に示す。市販の波長 822 nm の半導体レーザーを外部共振器構造として発振線幅を 1 MHz 程度にした後、まずフィネス 100 程度の共焦点共振器の共鳴に高速制御し、主に高周波の周波数ゆらぎを低減させる(予備線幅狭窄化)。これを低熱膨張率ガラス製高フィネス光共振器の共鳴に FM サイドバンド法で制御して、さらに線幅を狭窄化する。線幅狭窄化したレーザー光に高出力 ECLD 光を位相同期し、第 2 高調波を発生させて波長 411 nm 光に変換し遷移を励起する。位相同期時に与えるオフセット周波数を掃引することで、レーザー周波数を正確に掃引する。高フィネス光共振器を用いた線幅狭窄化により、光共振器の共鳴に対する相対的な線幅は、誤差信号による評価で 100 Hz 以下になった。同等の線幅狭窄化システムを 2 台構築し、それらのビート信号から、光共振器の共鳴のゆらぎを含む、レーザー装置としての線幅を評価した。図 4.2.7 に示すビート信号のように、短時間では線幅は 3 kHz 以下であった。高出力 ECLD のオフセットロックと第 2 高調波発生部を構築し、時計遷移用レーザーとして最低限のセットアップを完成させた。第 2 高調波発生は外部共振器を用いて最大 1.6 mW の波長 411 nm 光を得た。

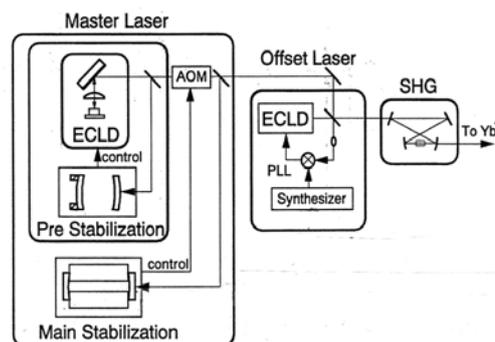


図 4.2.6 $\text{Yb}^+ ^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移用狭線幅レーザーシステム

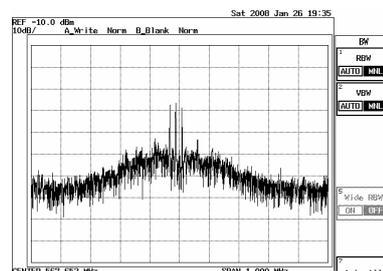


図 4.2.7 2 台の狭線幅レーザーのビート信号。X:10dB/div, Y:100kHz/div。測定時間が 670 ms と長いのでドリフトがみえている。

光共振器の共鳴周波数の経時変化を測定するために、 Yb^+ 時計遷移と 250 GHz 差にある波長 822 nm セシウム (Cs) 原子 $6\text{S} - 8\text{S}$ 2 光子吸収線に周波数安定化した ECLD を構築した。ガスセルをフィネス 80 の外部共振器に設置し、共振器の共鳴周波数に ECLD の周波数を安定化し、共振器長を変調して 2 光子吸収線の微分信号を検出し、共振器の共鳴周波数を吸収線に安定化した。安定化後の周波数ゆらぎは、誤差信号による評価で平均時間 100 秒で 7×10^{-14} が得られた。

寿命 10 年 ${}^2S_{1/2}-{}^2F_{7/2}$ 時計遷移用レーザーは、 ${}^2S_{1/2}-{}^2D_{5/2}$ 遷移用レーザーと類似のシステム、波長 934nm の狭線幅レーザーの第 2 高調波で実現する。こちらは寿命が極端に長いと、レーザーには高出力性も要求される。そこで第 2 高調波発生用の高出力レーザーとして、以前我々が開発した外部共振器型テーパー半導体レーザーの利用を進めた。今回立ち上げたものは、単一周波数発振で 400 mW の出力があり、連続掃引は 600 MHz であった。第 2 高調波は外部共振器内に設置した位相整合温度 170 °C の KNbO₃ 結晶で発生させた。190 mW を入力して第 2 高調波が最大で 19 mW 得られた。

なお、外部共振器を用いた第 2 高調波発生で端面に AR コートを施された垂直カットの非線形光学結晶を用いる場合、外部共振器のフィネスを上げて増倍率を大きくしようとすると、AR コート面のわずかな残留反射による損失が増倍率を制限する。しかし、両端面の反射を干渉させて反射損失を回避することで増倍率の低下を防ぐことができることを見出し、非線形光学結晶の温度制御によりこれを実現した。(光イオン化の第 1 励起のための波長 399 nm 光を発生させる、798 nm 光の第 2 高調波発生に利用している。)

① 単一イオン時計遷移分光の準備

${}^2S_{1/2}-{}^2D_{5/2}$ 遷移の単一イオン分光に取りかかった。 ${}^2D_{5/2}$ 準位からは ${}^2F_{7/2}$ 準安定準位への遷移が起きるため、 ${}^2F_{7/2}$ 準位を脱励起する必要がある。この目的のために、波長 638 nm ${}^2F_{7/2}-{}^1D[5/2]_{5/2}$ 遷移を ECLD で励起した。多数個のイオンを用いて、 ${}^2S_{1/2}-{}^2D_{5/2}$ 遷移への同調と、 ${}^2F_{7/2}$ 準位の脱励起を観測した。そして、単一イオンを導入して、量子跳躍信号の検出にも成功した。この実験はリング電極内径 5 mm のトラップを用いて行ったが、今後小型トラップで量子跳躍信号を検出し、レーザー周波数を掃引してサイドバンドが分離したスペクトルの検出を目指す。

② Ba⁺イオントラップ

Ba⁺のレーザー冷却は波長 493 nm ${}^2S_{1/2}-{}^2P_{1/2}$ 遷移で行い、 ${}^2P_{1/2}$ 準位から準安定準位 ${}^2D_{3/2}$ へ遷移する Ba⁺のリポンピングのために波長 650 nm ${}^2D_{3/2}-{}^2P_{1/2}$ 遷移を同時に励起する。冷却用光源は、波長 986nm の ECLD を作製し、外部共振器内に設置した KNbO₃ 結晶で第 2 高調波を発生させて実現した。基本波パワー 51 mW から、レーザー冷却に十分な 3 mW の第 2 高調波を得た。リポンピング用光源は ECLD を作製した。奇数同位体のレーザー冷却のために、それぞれ 2 系統の光源を作製した。

この光源を用いて、ロッド間距離 5.2 mm のリニア RF トラップでレーザー冷却に成功した。Ba⁺は空气中ですぐに反応し扱いにくいと、ゲッターを原子源として用いた。市販のゲッターをそのまま利用した Ba⁺のイオントラップは、我々が初めて行ったものである。

続いて光イオン化によるイオン生成法を導入した。Ba⁺のトラップとレーザー冷却は電子銃を用いたイオン化で成功していたが、ゲッターからの原子の放出量の制御が難しく、少数個の導入が困難だった。光イオン化を導入して Ba 原子の蛍光強度を観測して原子の量を調整し、さらにレーザー強度でイオン化速度を調節することを目指した。Yb⁺と同様に 2 段階励起でイオンを生成する。第 1 励起は波長 553 nm ${}^1S_0-{}^1P_1$ 遷移とし、波長 417 nm 以下の光を第 2 励起光としてイオン化ポテンシャル以上に励起しイオン化する。波長 553 nm の光源は、波長 1106 nm の ECLD を作成し、外部共振器内に設置した周期反転ニオブ酸リチウム (PPLN) 結晶で第 2 高調波を発生させて実現した。第 2 励起光は、Yb⁺の第 2 励起用 LD を流用した。

ラム-ディッケ領域への閉じ込めのための小型リニア RF トラップを、大阪大学グループの形状をもとに NICT グループのご協力で電界を数値計算して設計した。軸方向のマイクロ運動を低減するため、径方向を閉じ込めるためのロッド電極を 3 分割し、両端に電圧を与えて軸方向を閉じ込める。断面形状を三角形、半円形、および、台形で計算し、非線形成分が最も少なくミスアライメントに対する許容が大きい台形を選択した。トラップ領域は 0.8 mm × 1.0 mm である。作成したリニア RF トラップを図 4.2.8 に示す。光イオン化を組み合わせてレーザー冷却に成功した。イオン生成速度を落としてイオンを 1

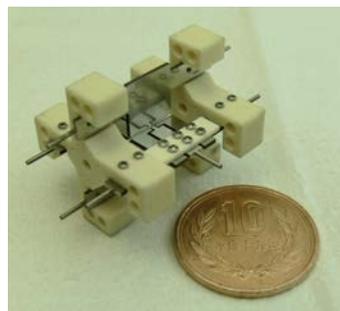


図 4.2.8 小型リニア RF トラップ電極。

個ずつ導入することにも成功した。このようにして導入した単一イオンで観測した量子跳躍信号を図 4.2.9 に示す。ここでは $^2S_{1/2}$ - $^2P_{3/2}$ 遷移を LED で励起して準安定準位 $^2D_{5/2}$ へのポンピングを行なった。 $^2D_{5/2}$ 準位へポンピングされると冷却サイクルから切り離されて蛍光が消える。 $^2D_{5/2}$ 準位から $^2S_{1/2}$ 準位へ自然放出で戻るときに蛍光強度が瞬時に回復していて、イオンが確かに 1 個であることが確認された。マイクロ運動の補正は、軸方向は分割されたロッド電極の軸方向間電圧のバランスを調整し、径方向は分割ロッド電極の中央部に静電圧を印加して行なった。この結果、少数個イオンが結晶化し配列を作るところまで冷却が進んだ。図 4.2.10 に 3 個のイオンが結晶化したときの蛍光像を示す。

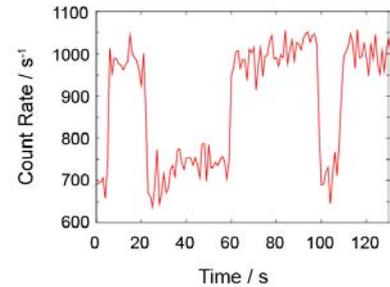


図 4.2.9 単一 $^{138}\text{Ba}^+$ の量子跳躍信号

イオン化の第 1 励起に用いている 1S_0 - 1P_1 遷移の同位体シフトを利用して、奇数同位体の選択的トラップを行なった。奇数同位体を選択的に励起するために、ゲッターとトラップの間に絞りを入れて、原子をある程度コリメートした。図 4.2.11 に同位体 137 の Ba^+ の蛍光像を示す。冷却用レーザーとリポンピングレーザーをそれぞれ 2 台用いて、超微細構造間に生じる光ポンピングを防いだ。リポンピングは正確には少なくとも 3 本必要になるが、今回は飽和広がりやすそを利用して省略している。 Ba^+ の奇数同位体の選択的導入は、我々が初めて行ったものである。ただし、区別できていない 2 つの奇数同位体 135 と 137 の分離が今後の課題である。

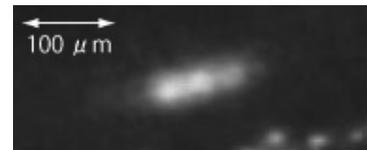


図 4.2.10 3 個の $^{138}\text{Ba}^+$ の結晶化

時計遷移励起用レーザーは、高出力化の可能性も考えて、光パラメトリック発振 (OPO) で実現することとした。ポンプ光を波長 $1.06\ \mu\text{m}$ ネオジウム YAG レーザーとし、波長 $1.76\ \mu\text{m}$ 光をシグナル光として得る。ポンプ光とシグナル光に対して共鳴する光共振器を構成した。機械的な安定度を高くしつつ、周波数掃引特性を確保することを意図して、共振器は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た。非線形光学結晶は、長さ $40\ \text{mm}$ の PPLN 結晶とした。共振器がポンプ光に対して共鳴を保つように、FM サイドバンド法で共振器の共鳴信号を検出し、OPO の共振器長をピエゾ素子で制御した。励起光に対してフィネス 60 の共振器が構成されていることを確認し、閾値励起光パワー $150\ \text{mW}$ で OPO が達成された。励起光パワー $600\ \text{mW}$ で、波長 $2.7\ \mu\text{m}$ のアイドラー光 $13\ \text{mW}$ が外部鏡を透過して観測され、シグナル光は結晶の入射面側から $3\ \text{mW}$ を得ることができた。結晶温度を変化させることにより発振波長を変化させることができ、 $163\ ^\circ\text{C}$ で必要な波長 $1.76\ \mu\text{m}$ の発振が確認された。また、単一周波数で発振していることを確かめた。発振周波数が飛び飛びで遷移への同調が不可能であったため、OPO 共振器内にエタロンを挿入して周波数の選定を細かくし、 $^2S_{1/2}$ - $^2D_{5/2}$ 時計遷移の励起を多数個のイオンに対して確認した。図 4.2.12 にその結果を示す。 $^2D_{5/2}$ 準位への励起により蛍光が消失し、励起光をきると $^2D_{5/2}$ 準位の寿命程度の 20 秒ほどで蛍光が回復した。

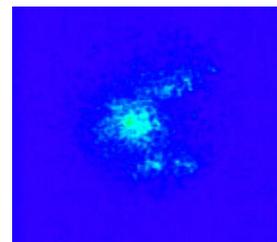


図 4.2.11 多数個 $^{137}\text{Ba}^+$ の蛍光像

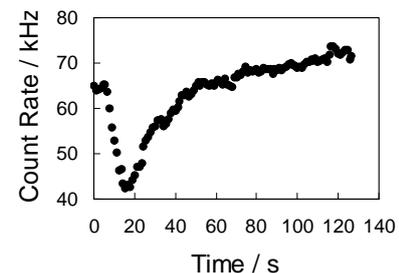


図 4.2.12 OPO 光源による $^2D_{5/2}$ 準位へ励起

③光周波数コム

本研究で必要となる光周波数コム技術は、狭線幅レーザーにコムを位相同期させて波長の離れた時計遷移用レーザーの線幅を比較可能とする技術、および、時計遷移への同調のために必要となる光周波数計測システムである。研究室に既存の、自作モード同期チタニウムサファイアレーザーを用いた 1 オクターブ周波数コムを改良し開発を進めた。

前者に関しては、 $\text{Yb}^+ \ ^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移励起用に開発している波長 822 nm の狭線幅レーザーに、1 オクターブ光周波数コムモードの 1 つを位相同期させた。波長 1.06 μm ネオジウム YAG レーザーとのビート信号を観測して、非位相同期時のビート信号の幅 2 MHz が 50 kHz 程度に狭窄化されることが分かった。ビート信号の変化を図 4.2.13 に示す。これは直接位相同期されていない離れたモードも、線幅が狭窄化されていることを示す。コムオフセット周波数も同時に位相同期した状態で、30 分以上の連続位相同期を実現した。この構成では、位相同期に用いたレーザーの周波数をモード次数で正確に分周した値がコムのパルス繰り返し周波数になる、光分周器を実現したことになる。

後者に関しては、GPS 時計に位相同期させた RF 周波数シンセサイザの信号を用いて、コムのパルス繰り返し周波数とオフセット周波数を位相同期し、光周波数計測システムを完成させた。波長 822 nm Cs 2 光子吸収線安定化レーザーの周波数計測を行い、100 秒の計測時間で不確かさ 1×10^{-11} が得られた。このように、GPS 時計の不確かさで制限される光周波数計測システムが完成した。

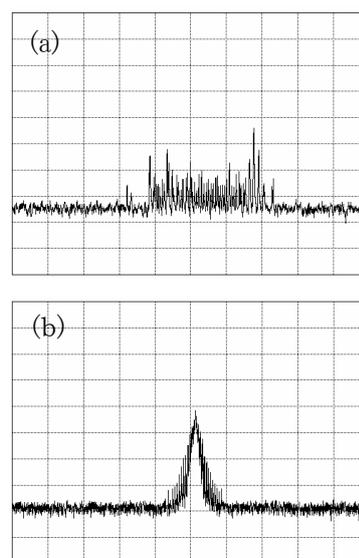


図 4.2.13 光周波数コムレーザーへの位相同期。(a) 非位相同期時、(b) 位相同期時。X:10d B/div、Y:200kHz/div。

(2) 研究成果の今後期待される効果

奇数同位体のトラップが可能になったので、不確かさの非常に小さい光時計の構築が期待される。特に Ba^+ の奇数同位体は、現状ではレーザー冷却も赤外の時計遷移励起用レーザーの開発もまだ不十分であるが、直接冷却可能なイオンであり、個数を増やしたときの不確かさが注目される。奇数同位体では Yb^+ 、 Ba^+ とも、不確かさ 10^{-17} 台以下が期待できるので、それぞれの時計の相対的な時間変化を測定することによる微細構造定数 α の時間変化の観測も視野に入ってくる。 Yb^+ 、 Ba^+ の時計遷移では、 α の時間変化に対する大きな感度が理論的に予測されていることも有利である。相対的な時間変化の計測は、光周波数コムを用いて行う。そのとき必要な、レーザーにコムを位相同期する技術はすでに獲得した。 10^{-17} 台での比較のために、長時間連続運転が課題である。

4. 3 協同冷却および光子-イオン相互作用 (情報通信研究機構グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

① 協同冷却

実施方法:

リニアトラップに Ca^+ をトラップし、ドップラー冷却により指定した個数の直線状の配列とし、微弱光撮像装置により観測する。この Ca^+ 配列に個数と位置を指定して In^+ を埋め込む手法の開発を行った。

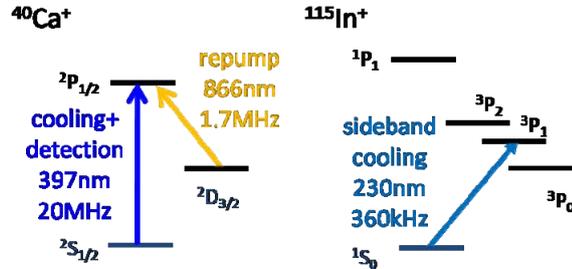


図 4. 3. 1 $^{40}\text{Ca}^+$ および $^{115}\text{In}^+$ のエネルギー準位図

実施内容:

図 4. 3. 1 に関連するエネルギー準位を示す $^{40}\text{Ca}^+$ 、 $^{115}\text{In}^+$ に関して、以下の研究開発を順次実施した: (a) 真空装置、リニアトラップ、光イオン化光源 (423nm, 390nm)、レーザ冷却光源 (397nm, 866nm)、イメージインテンシファイア付き CCD (ICCD) カメラ、コンピュータ制御系からなる基本的実験装置の立ち上げ、(b) 指定個数の Ca^+ 配列生成を、トラップ駆動電圧制御のコンピュータ制御と ICCD カメラによるリアルタイムイメージング技術によって行う手法の開発、(c) 生成した Ca^+ 配列を保ったまま、光イオン化 (411nm) により In^+ を導入する手法の開発、(d) In^+ の個数をトラップ電場制御で調整する技術の開発、(e) トラップ電場制御により、 In^+ の位置を調整する技術の開発、(f) In^+ を同定する技術開発。

成果:

② 基本的実験装置の立ち上げ

半導体レーザからなる光源系、コンピュータ制御などを特色とした実験系を立ち上げ、ソフトウェア操作主体で再現性良く冷却 Ca^+ 配列を生成できる実験装置を完成した。図 4. 3. 2 にトラップ装置と生成した Ca^+ 配列の蛍光像 (397nm) を示す。

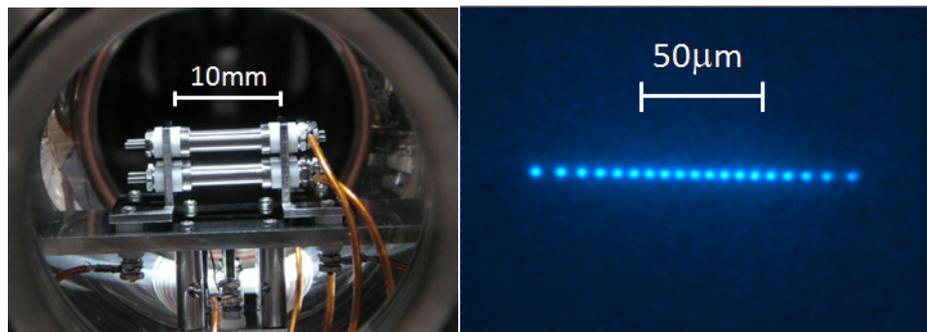


図 4. 3. 2 協同冷却用リニアトラップ と生成した Ca^+ 配列

③ 指定個数の Ca^+ 配列生成

ある程度の数の Ca^+ 配列を生成してから一個一個取り除く方法が、一個一個追加してロードするよりも確実であることが判った。トラップ駆動電圧を 1-5 秒間 15% 程度まで低下させることでほぼ 100% 近い確率で Ca^+ を一個ずつ取り除くことができた。図 4. 3. 3 に Ca^+ 配列の蛍光強度分布の時間発展を示す。矢印部分で駆動電圧を制御している。

④ In^+ の導入と個数調整

オープンからの中性 In ビームを波長 411nm の半導体レーザで光イオン化することにより Ca^+ 配列への In^+ ロードを試みた。このとき、 In オープン電流を十分低くし、411nm 光強度を十分強くすることで Ca^+ 配列を保ったまま In^+ をロードすることに成功した。図 4. 3. 4 では蛍光を

発する 4 個の Ca^+ の間で光らないサイトとして識別できるのが In^+ である。

In^+ が協同冷却により冷却される時間スケールが秒オーダーであるため、 In オープンを切った後に余剰の In^+ が配列内に現れる。図 4.3.4 では 1 個の In^+ 挿入を試みたが、3 個の In^+ が挿入された。(b) と同様にトラップ駆動 rf 電圧制御で In^+ のみを一個ずつ取り除くことに成功した。トラップ周波数は質量に反比例するので、 Ca^+ (質量数 40) を保ったまま In^+ (質量数 115) を取り除くトラップ電圧が存在するので、この電圧での動作を用いたのである。図 4.3.4 では矢印部分でトラップ電圧を 1 秒間、40% まで低下させることで In^+ 1 個を取り除いている。

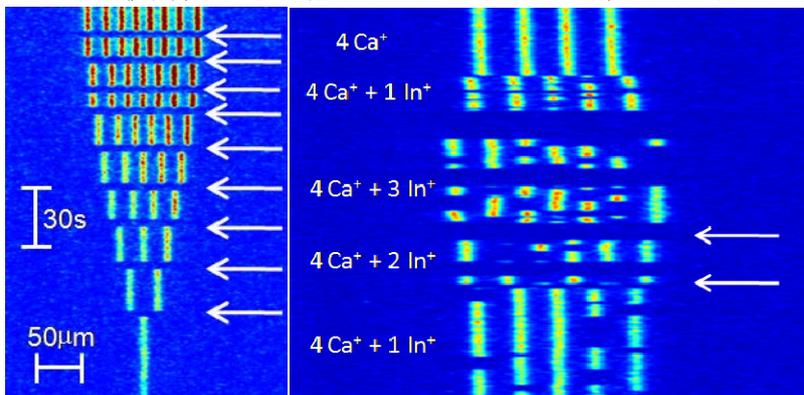


図 4.3.3 Ca^+ 配列の生成

図 4.3.4 In^+ の挿入と個数制御

㊦ In^+ 位置の調整

In^+ が配列内位置を移動する頻度をトラップ駆動 DC 電圧調整することが可能であった。移動頻度を ICCD 積算のフレームレート (8/30 秒) が捉えられる程度に設定し、所望の配置をとった際に DC 電圧を上げて移動を禁止することで、所望の配置で長時間保持することが可能であることが判った。図 4.3.5 では Ca^+ 4 個に挿入した In^+ 2 個が様々な配置をとるように DC 電圧を保ち、矢印の個所で電圧を 220% に上昇させることにより目的の配置に固定し、その後数 10 分オーダーで保持することが可能であった。

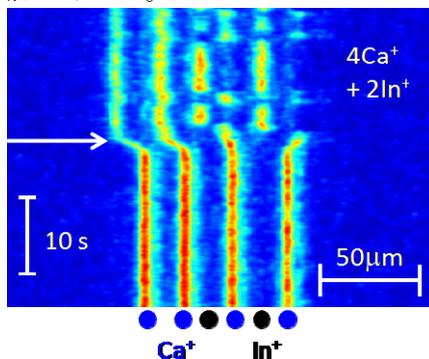


図 4.3.5 In^+ 位置の固定

㊦ 振動モード周波数計測による In^+ の同定

In^+ 以外の一価イオンが Ca^+ 配列内に導入された際にも同様に光らないサイトとして識別されるので、これを $^{115}\text{In}^+$ と特定する必要がある。そのため、DC 電極に弱い rf 電圧を印加して周波数掃引し、振動モードの共鳴周波数と光らないサイトの配置からその質量数を特定する手法を開発し、 $^{115}\text{In}^+$ であることを確認した。

成果の位置づけ:

(i) 加熱された振動モードを再冷却する手法として協同冷却は必須なものであると認識され始めたが、数個レベルでの任意の配置を生成する方法を示した実験は本研究が初めてである。
(ii) 量子ビットとしての $^{40}\text{Ca}^+$ は重要であることが知られているが、これを協同冷却するために異種冷媒イオンを挿入した実験は本研究が初めてである。

(iii) 光周波数標準としての $^{115}\text{In}^+$ は有望であることが最近認識され始めたが、これを用いて量子論理分光を行うために論理イオンを挿入した実験は本研究が初めてである。

②光子 - イオン相互作用

実施方法:

Ca⁺の $^2P_{1/2} - ^2D_{3/2}$ 遷移(図 4.3.1、波長 866nm)と微小光共振器の強結合した系を実現させるためのイオントラップ、光共振器、レーザーシステムの開発を実施した。

実施内容:

単一 Ca⁺と共振器の結合を目的として、厚みが 1mm 以下のマイクロイオントラップの試作を行った。複数 Ca⁺と共振器の結合を目的として、金属板の機械加工による厚みが 8mm 以下のトラップの開発と、これを内部に収納する微小光共振器の開発を行った。共振器周波数をロックするために半導体レーザーに光フィードバックを適用し、線幅が 1kHz 以下の低雑音狭線幅レーザーシステムの開発を行った。

成果:

①マイクロトラップ試作

GaAs 基板に金蒸着を施して作製した電極の組み合わせにより厚み 1mm 以下のイオントラップを試作した。しかしながら、駆動 rf による発熱で電極間の絶縁が破れ、トラップ動作には至らなかった。

②金属板加工による従来型より薄いトラップ開発

ステンレス加工による厚さが 8mm 以下のトラップ電極試作を繰り返し、図 4.3.6 に示す厚さ 6mm イオントラップを開発した。二対の rf 電極に位相同期した 2 台の rf シンセサイザーから逆位相の電圧を印可することにより 10 個までの Ca⁺を直線状に安定してトラップすることができた。

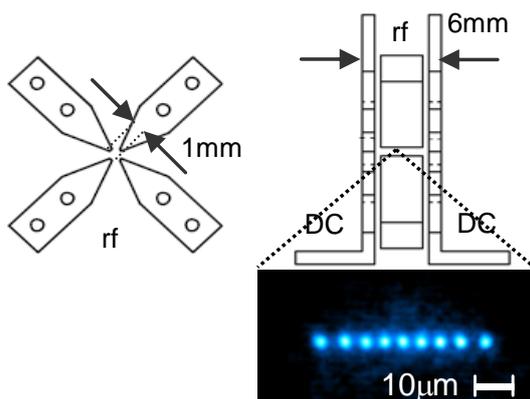


図 4.3.6 金属板加工による従来型より薄いイオントラップ

③従来型より長い光共振器の開発

通常は 1mm 以下である微小光共振器を、トラップ電極を収納するために 8mm まで長くする手法を開発した。特殊な固定具でミラーを固定し、透過光の共鳴を確認しながらシアー型ピエゾにミラーを接着する方法を開発し、図 4.3.7 に示すフィネス 60,000 程度の共振器を作製した。光フィードバックにより狭窄化した波長 866nm 半導体レーザーからのプローブビームを用い、Ca⁺の共鳴に共振器をロックすることができた。

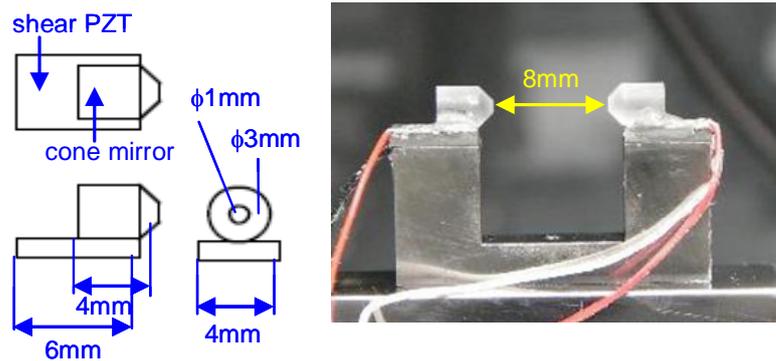


図 4.3.7 金属板加工による従来型より薄いイオントラップ

④Ca⁺集団と共振器の結合制御と測定

開発したトラップと共振器を組み合わせて真空槽に設置し、 10^{-10} Torr 台に入る真空度を得た(図 4.3.8)。時間的制約により Ca⁺のトラップには至らなかった。

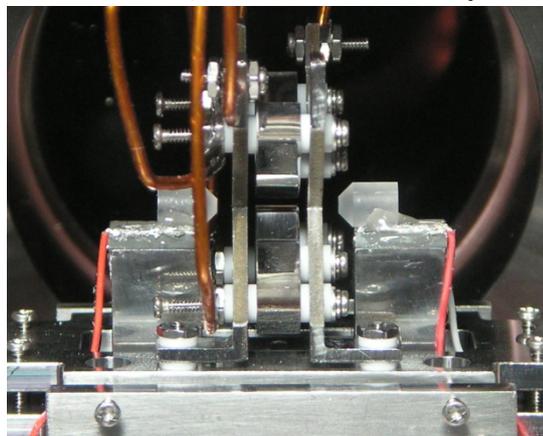


図 4.3.8 真空槽中に設置したトラップと光共振器

⑤狭線幅半導体レーザーの開発

進行波型のフィルター共振器に半導体レーザー光を通し、その透過の一部を光フィードバックとして半導体レーザーを制御することで線幅 1kHz 以下の半導体レーザーを実現した。共振器ロックに十分な性能を示すのみならず、MIT グループに技術移転し量子ビット制御用レーザーとして十分な性能を有することが実証された。また、応用実験では強度ノイズがショットノイズレベルに達してスクイーズド光生成にも応用できることを実証した。

成果の位置づけ:

Maryland 大学のグループが異なるトラップ中の Yb⁺間にエンタングルメントを生成させることに 2009 年に成功したが、自由空間を通して二つの Yb⁺が結合されるために生成頻度が 7 分間に一度に止まり、実証より先に進むことができない。こうした状況を打開するためにもイオンと共振器の結合が急務であるが、単一イオンと共振器の結合に関しては 2004 年にマックスプランク量子光学研究所、Innsbruck 大学による弱結合の報告以降、発表例はない。そのため複数イオンによる集団的強結合を目指した試みが行われ、Aarhus 大学が 500 個のイオンと共振器の強結合を従来型のトラップを用いて 2009 年に報告している。本研究では数個レベルのイオンと共振器の強結合を目指した従来型より薄いトラップの動作に成功し、より少ない数のイオンでの強結合へ迫る実験的手法を示したと考えられる。

実用に近い光周波数標準の研究では光源の半導体レーザー化が進んでいるが、量子計算分野ではその動きは顕著でない。本研究で開発したフィルター共振器と光フィードバックによる狭線幅高安定半導体レーザーは、低消費電力、低コスト、小体積等の特色を持ち、大規模量子計算に適した光源系を実現する技術を提供すると考えられる。

(2) 研究成果の今後期待される効果

①協同冷却

本研究では光イオン化、微弱光イメージング、トラップ電場制御というイオントラップの標準的な技術の組み合わせにより二つのイオン種を一個レベルで混合し、配列させる技術を実証した。この技術により(1)量子ビット列の所望の場所に冷媒イオンを埋め込み、コヒーレンス時間を延長させること、(2)これまでレーザー冷却が困難、不可能であった分子イオンを含むイオン種の単一イオンレベルの分光、の二つが可能になると考えられる。特に(2)に関しては大阪大学グループが開発したサイドバンド冷却、量子ゲート技術と組み合わせ、量子論理分光法を行うことにより、これまで 10^{-18} レベルの周波数不確かさが期待されてきたが未だに実現されていない In^+ 光周波数標準が現実的になると考えられる。

②光子 - イオン相互作用

本研究では、数個レベルのイオンと共振器の強結合実現に不可欠な、従来型より薄いトラップの動作確認に成功した。このトラップと共振器系からなる装置に数個の Ca^+ をトラップして、微弱光イメージングと透過光スペクトル計測を行えば、共振器に結合したイオン個数とそれによる結合強度を評価する実験が初めて可能となる。マイクロイオントラップ技術が確立されて単一イオンによる強結合が可能になるまでに、既存技術によるトラップでの複数イオンの強結合を得るための基本的な手法を提供すると考えられる。

共振器ロックのために開発したフィルター共振器と光フィードバックにより半導体レーザーを狭線幅化する手法は、レーザー冷却や量子ビット操作レーザー、時計遷移レーザー等、各種のイオントラップ実験で用いられる狭線幅レーザーを置き換えるものとして広く使用されることが期待される。

4.4 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(MITグループ)

(1)研究実施内容及び成果

MIT では上記課題を行うために、以下の三つの項目を中心に研究を実施した。

- ・冷却イオンを用いた量子計算のためのプレーナー微細加工イオントラップの開発
- ・量子コントロール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（耐故障性）量子計算のための理論的研究

以下このプロジェクトで得られた、三つの実験的および二つの理論的な大きな成果を示す。

①単一イオンを用いたキャビティクーリング法の実証

効率的に量子情報処理を行うためには、キュービットをある知られた論理状態に初期化する必要がある。さらに、そのような状態準備はしばしば量子計算の途中に行う必要がある。例えば、量子誤り訂正、あるいは多キュービットゲートでは補助キュービットを準備する必要がある。イオントラップを用いた計算では、2キュービットゲートが高いフィデリティで動作するために、そのような状態準備が必要である。最初にイオンのキュービットはサイドバンド冷却により、振動基底状態へ冷却される。しかしながら、量子計算の途中で運動状態は通常は加熱され、必要な振動基底状態ではなく熱的な混合状態になる。量子計算の途中では、再冷却するためには通常のレーザー冷却は使うことができない。なぜなら、レーザー冷却ではキュービットに使われるものと同じ狭い遷移を含む閉サイクル遷移を用いるため、冷却の間にイオンのキュービットの状態を強く乱すかあるいは破壊してしまうからである。量子状態を非破壊で冷却する一つの解決策は、協同冷却を別種のイオンを用いて行うことである。しかしながら、このためには別種のイオンを計算イオンのすぐ隣まで動かしてこなくてはならず、また、そのイオンを冷やすための新たなレーザーシステムが必要になる。

量子非破壊的な冷却は、トラップされたイオンに対して、サイドバンド分離キャビティ冷却法といわれる方法を用いて達成することができる。この方法では、高フィネスの共振器と強く共同した結合によって、冷却は非共鳴的になされる。われわれは、この冷却のメカニズムの基本的な原理を実験的に初めて実証した。この実験では高フィネス共振器で囲まれたナイフエッジ型のリニアトラップ（大阪大学から提供）中の単一の Sr^+ イオンが用いられた。

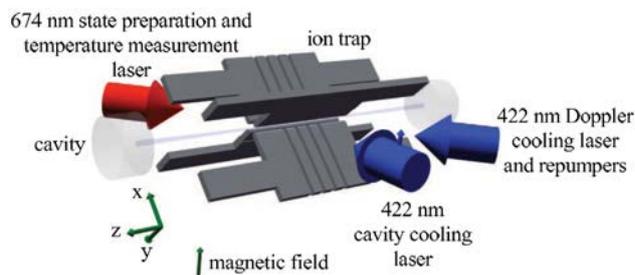


図 4.4.1(a) 実験装置

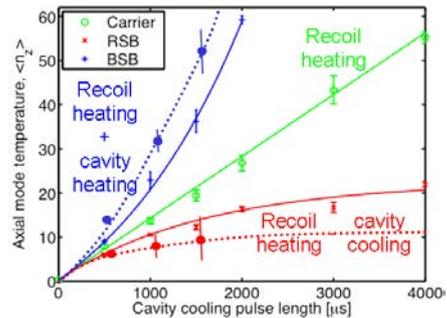


図 4.4.1(b) 測定結果

図で示すように、冷却レーザーが共振器と完全に共鳴している場合には冷却は起こらず、イオンは通常のプロセスにより加熱される（緑の線で示す）。レーザーが共振器のブルーサイド（高い周波数側）に同調されている場合は、入射光からよりブルー側の光子を散乱することにより、共振器との相互作用で更に加熱が加わる（青の線で示す）。レーザーが共振器のレッドサイド（低い周波数側）に同調されている場合は、冷却が観測される（赤い線で示す）。この冷却により、イオンの温度はドップラー限界の丁度下側で平衡になり、提案されているキャビティ冷却の理論で示す結果と一致することが明らかに示された。この結果はこのプロ

プロジェクトでの大きな成果であり、Physical Review Letters, volume 103, page 103001 (2009) に詳細が述べられる。

②イオンキュービットへの個別アドレッシングの高い選択性の実現

トラップイオンを用いたスケーラブルな量子計算のためには、配列したイオンの中の個別のキュービットへの選択的な個別アドレッシングが極めて重要な技術となる。従来のアドレッシングではレーザービームを操作する複雑な光学系が用いられてきたが、この方法を容易に個数の増加に拡張することは困難である。我々は、イオン配列に磁場勾配を加えるという微細加工と極低温動作の利点を使った、スケーラブルな別の方法を実現した。トラップの構造の中に埋め込まれ、トラップ電極と同時に作成されて配列したコイルにより、磁場は発生される。測定ではイオン間のクロストークは3%以下である。

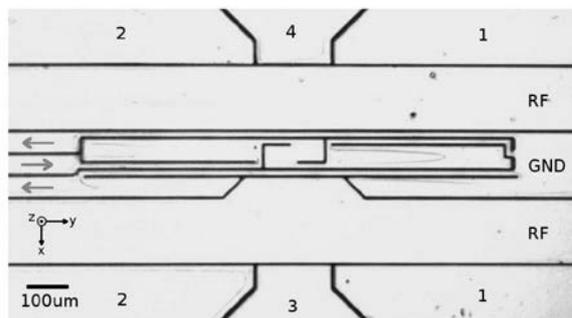
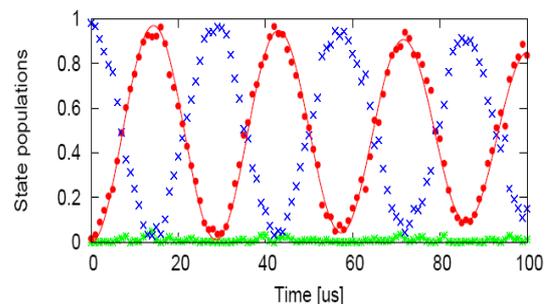


図 4. 4. 2(a) トラップの写真



4. 4. 2(b) 2 キュービットの選択的ラビ振動

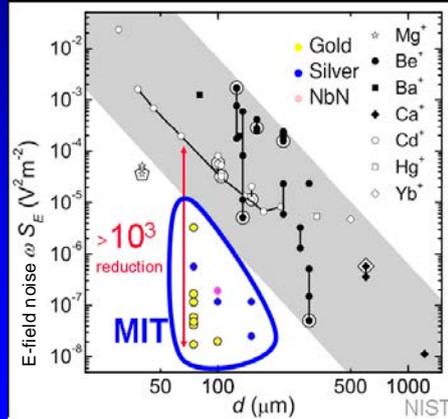
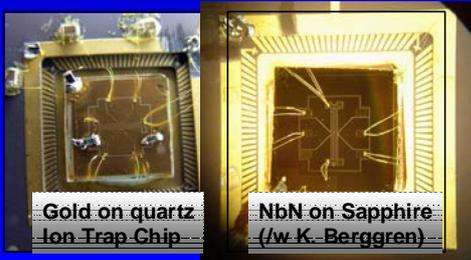
この実験結果により、イオンのキュービットのアドレッシングに、超伝導体の使用により永続電流を用いて磁場勾配を発生するという新たな方向を開いた。この結果はこのプロジェクトの大きな成果であり、Applied Physics Letters, volume 94, page 094103 (2009) に示される。

③イオンの運動状態のデコヒーレンスの3桁の低減

イオントラップが直面する大きな問題は、トラップのサイズ d に対し $1/d^4$ で増加する余剰雑音である。これはおそらく表面電荷の揺らぎによるものと思われる。この雑音は c-NOT ゲートのような 2 キュービット量子論理ゲートの性能を大きく劣化させる。トラップに要求される大きさである 10 ミクロンの大きさでは、この雑音によってフォールトトレラントな動作が不可能になる。我々は液体窒素や液体ヘリウム温度の極低温環境を用いて表面電荷の揺らぎを凍結することによって、この雑音を減少させる実験を実現した。トラップはサファイアや他の材料面に付けた金や NbN で作られた微細加工のマイクロチップトラップである。このチップの 75 ミクロン上にトラップされた単一ストロンチウムイオンの加熱レートは 1 量子/秒であり、この値は相当する最も良い室温トラップでの値に比べ 3 桁も低い。

Microfabricated Cryogenic Ion Trap

- Large-scale QC: need ion qubit distances $d \sim 10\mu\text{m}$
- Issue: decoherence $\sim 1/d^4$ observed in traditional ion traps; expected gate fidelity $< 0.01\%$ @ $10\mu\text{m}$
- New result: ion trap chip @ 6K, decoherence rate $> 10^3$ lower! expect $\sim 99.9\%$ fidelity @ $10\mu\text{m}$ – fault tolerance enabled!



Phys. Rev. Lett. **100**, 013001 (2008); Phys. Rev. Lett. **101**, 180602 (2008)

図 4.4.3 極低温プレーナートラップ

これは、非常に驚くべきまた顕著な結果である。温度依存性の測定の結果によるとこの電荷雑音は Boltzmann 活性ポテンシャルを持っていないことを示し、むしろ重力観測測定や磁力共鳴マイクロSCOPIE実験で見られる雑音源に関連していることを暗示している。これらの結果の一部は、イオンキュービットの忠実度の高いパルスコントロールに必要なレーザー開発により可能になった。すなわち、高安定、低雑音、光フィードバック安定化、モノリシックレーザーの設計や実装を NICT の早坂氏からの協力を得て行った。レーザーについては、Optics Letters, volume 32, page 572 (2007)、新しい実験結果については、Physical Review Letters volume 100, page 013001 (2008), and Physical Review Letters, volume 101, page 180602 (2008)に述べられる。

④非加法的量子符号

大規模量子計算のアーキテクチャーは、主に量子ノイズに対してロバストに量子データを符号化し演算する方法によって決定されると考えられる。その場合、符号の効率によって許容できるノイズの閾値が定まる。しかしながら、従来の加法スタビライザー符号はフォールトトレラント量子計算には不十分であることを我々は既に証明している。そこで、我々はより効率の高い符号を探索し、「符号語安定化量子符号(codeword stabilized quantum codes, CWS codes)」形式をベースとして新たな非加法的量子符号集合を発見する手順を確立した。

$((n, K, \delta))_d$ CWS code	Quantum Representation	Classical Representation
Basis State	State $ w_l\rangle$ stabilized by $\langle q_d^{l_1} g_1, \dots, q_d^{l_m} g_m \rangle$	Length m string over \mathbb{Z}_d $\mathbf{c}_l = (l_1, \dots, l_m)$
Error Pattern	Qudit Pauli Operator $E = \alpha_E Z^{\mathbf{v}} X^{\mathbf{u}}$	Length m string over \mathbb{Z}_d $Cl_S(E) = \sum_{l=1}^n v_l \mathbf{r}_l + u_l \mathbf{t}_l$
Error Detection Condition	$\langle w_i E w_j \rangle = c_E \delta_{ij}$ $\forall i, j$ and $\forall E$	$\{\mathbf{c}_l\}$ detects $\{Cl_S(E)\}$ and $\forall E, Cl_S(E) \neq 0$ or $\forall l, w_l E = E w_l$

TABLE I: Summary: Quantum and Classical representation of an $((n, K, \delta))_d$ CWS code. The classical representation is based on a particular choice of generating set (g_1, \dots, g_m) for the n -qudit stabilizer group S . $\alpha_E = q_d^k, k \in \mathbb{Z}_d$ and \mathbf{v}, \mathbf{u} are length n vectors over \mathbb{Z}_d . $Cl_S(E)$ is the classical representation of error E based on $S = \langle g_1, \dots, g_m \rangle$. \mathbf{r} and \mathbf{t} are matrices representing the X and Z part of S respectively and \mathbf{r}_l and \mathbf{t}_l are their l th column.

これらの新たな量子符号を操作するフォールトトレラントな量子ゲートは現在のところ判明していないが、これらの新たな量子符号の中には既知のスタビライザー符号より効率の高い例も存在する。これらの結果の詳細は [arXiv.org/quant-ph:0706.1382](https://arxiv.org/quant-ph/0706.1382) (IEEE Trans. on Info. Theory に掲載予定) および the Journal of Mathematical Physics, volume 50, page 042109 (2009) に記述してある。

⑤One-way 量子計算のベースとなる万能量子状態

伝統的な量子サーキットモデル以外で有望な量子計算のモデルは one-way 量子計算モデルである。このモデルは多数量子ビットの量子もつれ状態を初期状態とし、個々の量子ビットの単純な測定を基本としている。測定結果のフィードバックにより次の測定の射影軸を制御することで、あらゆる量子サーキットのシミュレーションが可能であり、あらゆる量子計算を効率良く実行可能である。したがって、主な課題は必要な量子もつれを持つ初期状態を実現することである。こうした量子状態の生成には従来、標準的クラスター状態の生成などに見られるように、多体間の非隣接個体間の相互作用が必要とされていた。

我々は二体系でギャップのあるハミルトニアンを持つ系の唯一の基底状態を用いた新たな one-way 万能量子計算の新たな構成法を発見した。したがって、基本的には必要な初期状態はこのハミルトニアンに支配されるような固体系を冷却するだけで自然に実現される可能性がある。

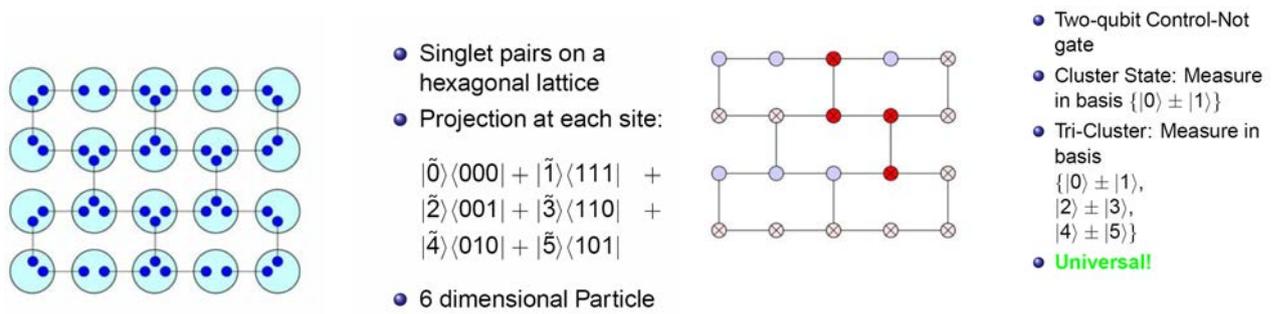


図 4.4.4 三体クラスター状態

「三体クラスター状態」として知られる基底状態は、上図に示すように六次元 qudit からなる二次元六方晶系格子となっている。制御 NOT や単一量子ビット回転などの量子ゲート操作は、標準的クラスター状態と同様に、特定の基底での計測とそれに基づいた測定基底の変更によって行われる。

この結果は、凝縮系へ適用可能であることを新たに示すのに加えて、イオンや中性原子で構成する格子が近接個体間の相互作用により構築されること、それが測定ベースの万能量子計算に利用可能であることも示唆している。測定ベース量子計算は能動的量子ゲートを必要としないので、フォールトトレラントな大規模量子計算への新たなアプローチでもある。この結果は Physical Review Letters volume 102, page 220501 (2009)に掲載され、その重要性から American Physical Society により Spotlight on Physics として取り上げられた。

(2)研究成果の今後期待される効果

①実験

- ・この研究プログラムで開発した極低温プレーナリーオントラップは加熱レートの最も低い記録を持っており、現在この分野の先進のグループによって導入されている。これはまた集積化された固体量子デバイス、例えば機械的なナノ共振器、超伝導キュービット、量子ドットなど、とイオンとの直接のインターフェースを可能にする大きなポテンシャルを持っている。
- ・この研究で開発された高安定モノリシック光フィードバックレーザーシステムは非常に安定で、1週間の間も手動の調整を必要としない。これは現在日本での研究に導入されている。

②理論

- ・我々が従来の加法的量子符号(スタビライザー符号)で万能量子計算を行う能力には限界があるという定理を発見したことにより、非加法的量子符号を探索する新たな研究の方向が拓かれ始めた。将来、この研究の方向性が極めて重要な研究の方向性になると考えられる。
- ・我々が構築したギャップのあるハミルトニアン of the 唯一の基底状態を用いた測定ベース量子計算モデルのような新たな量子計算モデルの発見により、従来の量子サーキット量子計算に必要とされる厳しい条件よりは緩い条件でフォールトトレラント量子計算を実現する新たな方法が見つかるかもしれない。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 2 件、国際 (欧文) 誌 32 件)

- 1.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.
- 2.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.
- 3.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.
- 4.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.
- 5.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.
- 6.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).
7. 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
- 8.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
- 9.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
- 10.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
- 11.Rekishu Yamazaki, Hideyuki Sawamura, Kenji Toyoda, 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)
12. Rekishu Yamazaki, Ken-ichi Kanda, Fumihiko Inoue, Kenji Toyoda, Shinji Urabe,
Robust generation of superposition states,
Physical Review A 78, 023808 (2008)
13. 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).
14. 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).
15. U Tanaka, R Naka, F Iwata, T Ujimar, K R Brown, I L Chuang, and S Urabe,
Design and characterization of a planer trap,
J. Phys. B, Vol. 42, No. 15, 154006, 2009.
16. S. Haze, R. Yamazaki, K. Toyoda, S. Urabe,
Measurement and compensation of optical Stark shift for manipulating the
terahertz-separated states in $^{40}\text{Ca}^+$,
Physical Review A 80, 053408 (2009).
17. 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).
18. 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)
19. 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)
20. 早坂 和弘、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
21. David R. Leibbrandt, Jaroslaw Labaziewicz, Vladan Vuletic, Isaac L. Chuang, Cavity
Sideband Cooling of a Single Trapped Ion
Phys. Rev. Lett., vol. 103, 103001 (2009)
22. 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., vol. 94, 094103 (2009)

23. P. B. Antohi, D. Schuster, G. M. Akselrod, J. Labaziewicz, Y. Ge, Z. Lin, W. S. Bakr, I. L. Chuang, Cryogenic Ion Trapping Systems with Surface-Electrode Traps
Rev. Sci. Instr., vol. 80, 013103 (2009)
24. Xie Chen, Bei Zeng, Zheng-Cheng Gu, Beni Yoshida, and Isaac L. Chuang
Gapped Two-Body Hamiltonian Whose Unique Ground State Is Universal for One-Way Quantum Computation
Phys. Rev. Lett, vol. 102, page 220501 (2009)
25. Isaac Chuang, Andrew Cross, Graeme Smith, John Smolin, and Bei Zeng
Codeword stabilized quantum codes: Algorithm and structure
J. Math. Phys. vol. 50, page 042109 (2009)
26. Jaroslaw Labaziewicz, Yufei Ge, David R. Leibbrandt, Shannon X. Wang, Ruth Shewmon, and Isaac L. Chuang
Temperature Dependence of Electric Field Noise above Gold Surfaces
Phys. Rev. Lett., vol. 101, 180602 (2008)
27. Jaroslaw Labaziewicz, Yufei Ge, Paul Antohi, David Leibbrandt, Kenneth R. Brown, and Isaac L. Chuang
Suppression of Heating Rates in Cryogenic Surface-Electrode Ion Traps
Phys. Rev. Lett., vol. 100, 013001 (2008)
28. Bei Zeng, Xie Chen, and Isaac L. Chuang
Semi-Clifford operations, structure of Ck hierarchy, and gate complexity for fault-tolerant quantum computation
Phys. Rev. A, vol. 77, page 042313 (2008)
29. 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
Phys. Rev. A, vol. 75, page 15401 (2007)
30. Jaroslaw Labaziewicz, Philip Richerme, Kenneth R. Brown, Isaac L. Chuang, and Kazuhiro Hayasaka
Compact, filtered diode laser system for precision spectroscopy
Optics Letters, vol. 32, page 572 (2007)
31. Bei Zeng, Hyeyoun Chung, Andrew W. Cross, and Isaac L. Chuang
Local unitary versus local Clifford equivalence of stabilizer and graph states
Phys. Rev. A, vol. 75, page 032325 (2007)
32. C. E. Pearson, D. R. Leibbrandt, W. S. Bakr, W. J. Mallard, K. R. Brown, and I. L. Chuang,
Experimental investigation of planar ion traps Physical Review A, vol. 73, page 32307 (2006)

33. [PhD Thesis] Jaroslaw Labaziewicz (2008)

High Fidelity Quantum Gates with Ions in Cryogenic Microfabricated Ion Traps

34. [PhD Thesis] David Leibbrandt (2009)

Integrated chips and optical cavities for trapped ion quantum information processing

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 占部伸二、レーザー冷却イオンの周辺技術と応用、J. Plasma Fusion Res. Vol81, 2005, 755-763.
2. 杉山和彦、モード同期レーザーによる光周波数計測技術ー原理と最近の動向ー、レーザー研究、第35巻、第4号、2007年4月
3. 早坂 和弘、”冷却イオン-光子ネットワーク”、オプトロニクス社刊「量子情報通信」(佐々木雅英・松岡正浩 監修)、p.p.411-417、2006年11月5日

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議5件、国際会議3件)

1. 杉山和彦(京都大学)、1 オクターブ光周波数コムを用いた光周波数計測、通研共同プロジェクト研究会、東北大学電気通信研究所、2005年11月21日
2. 杉山和彦(京都大学)、時計を変える光周波数コムとその未来、日本光学会、大阪大学、2007年11月26日
3. 杉山和彦(京都大学)、微細構造定数 α の時間変化(実験のコメント)、日本物理学会第64回年次大会、立教大学、2009年3月30日
4. 早坂 和弘(情報通信研究機構)、「蓄積イオンによる量子情報処理」、電気学会東海支部学術講演会、2005年11月18日 名古屋大学
5. K. Hayasaka(NICT), “Research activities towards quantum networks with ions and photons at NICT”, University of Sussex AMO seminar, 2007年4月23日, University of Sussex, Brighton, U.K,
6. K. Hayasaka(NICT), “Measurement and Control of Single Atomic Ions Stored in an Ion Trap”, Asian CORE Symposium on Advanced Laser Spectroscopy, 2007年9月26日 六甲山ホテル
7. K. Hayasaka(NICT), “Control on the Interaction of Photons and Trapped Ions toward Quantum Networks”, Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, 2007年9月28日 大阪大学
8. 早坂 和弘(情報通信研究機構)、「蓄積イオンによる量子情報とその応用」、大阪大学平成21年度G-COE若手秋の学校、2009年9月16日、休暇村近江八幡

② 口頭発表 (国内会議60件、国際会議5件)

1. U. Tanaka, K. Toyoda, H. Sawamura, and S. Urabe (Osaka University), Laser cooling of trapped Ca^+ ions toward quantum-state manipulation, International Workshop on “Materials Science and Nano-Engineering”, Osaka University Dec. 11, 2004.
2. 松島泰輔、澤村英幸、豊田健二、占部伸二:「振動基底状態実現に向けたドップラー冷却の最適化」、レーザー学会学術講演会第25回年次大会 けいはんなプラザ 05.1.20 20aVII.1
3. 澤村英幸、松嶋泰輔、豊田健二、占部伸二:「単一 Ca^+ イオンの振動基底状態までの冷却 I」、日本物理学会第60回年次大会 東京理科大学野田キャンパス 05.3.26、講演番号: 26pYE-15
4. U. Tanaka, H. Matsunishi, I. Morita, S. Urabe, “Isotope-selective ion-trapping and sympathetic cooling of rare calcium isotopes”, International Quantum Electronics Conference 2005 (IQEC2005), Tokyo, 2005年7月12日
5. 財津慎一、三島幹史、豊田健二、田中歌子、占部伸二、「冷却イオン量子状態制御のためのテラヘルツ帯位同期レーザーシステムの開発」、第66回応用物理学会学術講演会、2005年9月7

日

6. 森田勇、松西英恭、田中歌子、占部伸二、「高出力紫外 LED を用いた光イオン化による Ca^+ イオンの微量同位体選別捕獲」、日本物理学会 2005 年秋季大会、2005 年 9 月 20 日
7. 岡野俊紀、澤村英幸、豊田健二、占部伸二、「単一 Ca^+ イオンの振動基底状態までの冷却 II」、日本物理学会 2005 年秋季大会、2005 年 9 月 20 日
8. 追風寛歳、神田憲一、豊田健二、占部伸二、「 Ca^+ イオンの量子状態制御のための高安定・高出力チタンサファイアレーザーシステム」、第 53 回応用物理学関係連合講演会、26a-P8-8、2006 年 3 月 26 日
9. 道上彰、山崎愛乃、波部孝弘、田中歌子、占部伸二、「サイドバンド冷却に向けた多分割リニアトラップの特性評価」、日本物理学会第 61 回年次大会、27pTA13、2006 年 3 月 27 日
10. 澤村英幸、岡野俊紀、追風寛歳、豊田健二、占部伸二、「単一 Ca^+ イオンの振動基底状態までの冷却 III」、日本物理学会第 61 回年次大会、27pTA14、2006 年 3 月 27 日
11. 森田勇、西村信吾、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」、日本物理学会第 61 回年次大会、27pTA15、2006 年 3 月 27 日
12. 三方淳史、溝口拓偵、田中歌子、占部伸二、「薄いセルにおける Pump・Probe 光の空間分離を用いた Rb のサブドップラー分光」、日本物理学会第 61 回年次大会、29pTB1、2006 年 3 月 29 日
13. 森田勇、田中歌子、占部伸二: 「微量同位体 $^{43}\text{Ca}^+$ のレーザー冷却」、日本物理学会 2006 年秋季大会、千葉大学、2006 年 9 月 24 日
14. 道上彰、追風寛歳、豊田健二、田中歌子、占部伸二、「リニアトラップ中に捕獲された 2 個のイオンのサイドバンド観測」、日本物理学会 2006 年秋季大会、千葉大学、2006 年 9 月 24 日
15. 岩井俊樹、椎原秀行、澤村英幸、早坂和弘、田中歌子、豊田健二、占部伸二、「単一 Ca^+ イオンの $D_{3/2}-D_{5/2}$ 準位間誘導ラマン遷移の観測」、日本物理学会 2006 年秋季大会、千葉大学、2006 年 9 月 24 日
16. 澤村英幸、追風寛歳、豊田健二、占部伸二、「単一 Ca^+ イオンの振動基底状態への冷却および冷却過程の解析」、日本物理学会 2006 年秋季大会、千葉大学、2006 年 9 月 24 日
17. 北池亮平、道上彰、追風寛歳、豊田健二、田中歌子、占部伸二、「リニアトラップ中に捕獲された 2 個のイオンのサイドバンド冷却」、日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島大学、2007 年 3 月 18 日
18. 田中歌子、K.R.Brown, R.J.Clerk, J.Labaziewics, D.R.Leibrandt, 豊田健二、山崎歴舟、I.L.Chuang, 占部伸二、「大規模集積化に向けた平面型イオントラップの開発」、日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島大学、2007 年 3 月 18 日
19. 山崎歴舟、岩井俊樹、椎原秀行、澤村英幸、早坂和弘、田中歌子、豊田健二、占部伸二、「誘導ラマン遷移による Ca^+ イオンの $D_{3/2}-D_{5/2}$ 準位間の精密分光」、日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島大学、2007 年 3 月 18 日
20. 神田憲一、追風寛歳、澤村英幸、山崎歴舟、豊田健二、占部伸二、「量子ゲート実現に向けた単一 Ca^+ イオンの電気四重極子遷移の励起によるコヒーレントマニピュレーション」、日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島大学、2007 年 3 月 18 日
21. 山崎歴舟 (JST)、澤村英幸、豊田健二、占部伸二、「位相ロックされたレーザー光源による Ca^+ イオンの $D_{3/2}-D_{5/2}$ 遷移の精密ラマン分光」、日本物理学会第 62 回年次大会、北海道大学、H19.9.24
22. 椎原秀行、土師慎祐、山崎歴舟 (JST)、豊田健二、占部伸二、「 Ca^+ イオンの $D_{3/2}-D_{5/2}$ 準位間誘導ラマン遷移を用いたコヒーレント状態制御」、日本物理学会第 62 回年次大会、北海道大学、H19.9.24
23. 澤村英幸、神田憲一、山崎歴舟 (JST)、豊田健二、占部伸二、「単一 Ca^+ イオンの基底状態のゼーマン遷移の観測」、日本物理学会第 62 回年次大会、北海道大学、H19.9.24
24. 〇神田憲一、井上文彦、山崎歴舟 (JST)、豊田健二、占部伸二、「高速断熱通過を用いた Ca^+ イオンの $S_{1/2}-D_{5/2}$ 間電気四重極子遷移のロバストな励起の実現」、日本物理学会 第 63 回年次大会、近畿大学、H20.3.26
25. 澤村英幸、神田憲一、山崎歴舟 (JST)、豊田健二、占部伸二、「三準位系イオンのサイドバンド冷

- 却の最適化」, 日本物理学会 第 63 回年次大会、近畿大学、H20.3.26
26. 北池亮平, 畑祐樹, 神田憲一, 豊田健二, 田中歌子, 占部伸二, 「リニアトラップ中に捕獲された 2 個のイオンの振動基底状態までの冷却」, 日本物理学会 第 63 回年次大会、近畿大学、H20.3.26
 27. U.Tanaka, R.Naka, F.Iwata, T.Ujmaru, K.R.Brown, I.L.Chuang and S.Urabe
「Design and Characterization of a Planar Trap」
Modern Applications of Trapped Ions, Les Houches, Savoie France, 2008. 5. 20
 28. 土師慎祐, 井上文彦, 山崎歴舟(JST), 豊田健二, 占部伸二
「Ca⁺の THzキュービット励起のための高コヒーレント光源と励起実験」
日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学上田キャンパス, 2008.9.21
 29. 氏丸智彰, 秋元雄大, 河野星子, 田中歌子, 占部伸二, 「平面型イオントラップの開発と単一 40Ca⁺イオンの捕獲」, 日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月 28 日.
 30. 土師慎祐, 井上文彦, 山崎歴舟, 豊田健二, 占部伸二, 「Ca⁺のテラヘルツキュービットのコヒーレント励起」, 日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月 28 日.
 31. 井上文彦, 野村真司, 山崎歴舟, 豊田健二, 占部伸二, 「高速断熱通過を用いた重ね合わせ状態の生成」, 日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月 28 日.
 32. 野村真司, 瀬ノ口雄大, 木村友哉, 土師慎祐, 豊田健二, 占部伸二, 「高速断熱通過を用いた冷却イオンの運動サイドバンド励起」, 日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009 年 9 月 26 日
 33. 瀬ノ口雄大, 土師慎祐, 木村友哉, 野村真司, 豊田健二, 占部伸二, 「Ca⁺のテラヘルツキュービットを用いた量子ゲート実験 I」, 日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009 年 9 月 26 日
 34. 土師慎祐, 山崎歴舟, 豊田健二, 占部伸二, 「Ca⁺のテラヘルツキュービット状態操作における光シフトの測定と補正」, 日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009 年 9 月 26 日
 35. 杉山和彦(京都大学)、超短パルスモード同期レーザーによる光周波数の計測・分周技術、量子情報処理シンポジウム(第一回公開シンポジウム)、一橋記念講堂、2004 年 12 月 21 日
 36. 岩城吉剛、O. Kazharsky、北野正雄、杉山和彦(京都大学)、外部共振器型自励発振半導体モード同期レーザーの周波数制御、日本物理学会第 60 回年次大会、東京理科大学、2005 年 3 月 24 日
 37. S. Slyusarev、北野正雄、杉山和彦(京都大学)、J. Knight、W. Wadsworth、and P. Russell(U. Bath)、光分周のための 1 オクターブ光周波数コム周波数安定化、日本物理学会第 60 回年次大会、東京理科大学、2005 年 3 月 24 日
 38. 生田力三、北野正雄、杉山和彦(京都大学)、Yb⁺時計遷移用半導体レーザーの開発、電子通信情報学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会、金沢大学、2005 年 5 月 19 日
 39. S. Slyusarev、北野正雄、杉山和彦(京都大学) J. Knight、W. Wadsworth、and P. Russell(U. Bath)、1 オクターブ光周波数コムを用いた光分周、日本物理学会 2005 年秋季大会、同志社大学、2005 年 9 月 21 日
 40. 池田充彦、北野正雄、杉山和彦(京都大学)、レーザー共鳴イオン化法により生成された Yb⁺のトラップ、電子通信情報学会 2005 年ソサエティ大会、北海道大学、2005 年 9 月 23 日
 41. 吉武惟之、杉山和彦、竹下健悟、北野正雄(京都大学)、半導体レーザを用いたリニア RF イオントラップ中 Ba⁺イオンのレーザ冷却、電子通信情報学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会、福井大学、2006 年 6 月 2 日
 42. 中村泰裕、杉山和彦、岩城吉剛、北野正雄(京都大学)、外部共振器型モード同期自励発振半導体レーザのパルス繰り返し周波数安定化、電子通信情報学会 2006 年ソサエティ大会、金沢大学、2006 年 9 月 22 日
 43. 杉山和彦、橋本健太郎、生田力三、北野正雄(京都大学)、1 オクターブ光周波数コムを用いた光分周(II)、日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島大学、2007 年 3 月 19 日
 44. 吉武惟之、杉山和彦、北野正雄(京都大学)、半導体レーザーを用いたリニア RF イオントラップ中 Ba⁺のレーザ冷却、日本物理学会、北海道大学、2007 年 9 月 24 日
 45. 小野田有吾、池田充彦、杉山和彦、北野正雄(京都大学)、光イオン化法で生成した Yb⁺のイオントラップ、日本物理学会、近畿大学、2008 年 3 月 26 日

46. 杉山和彦、川尻将、小野田有吾、西崎公智、北野正雄(京都大学)、半導体レーザーの和周波光を冷却光源とするトラップされた Yb⁺ のレーザー冷却、日本物理学会、近畿大学、2008 年 3 月 26 日
47. 川尻将、西崎公智、小野田有吾、杉山和彦、北野正雄(京都大学)、光イオン化により生成した Yb⁺ の RF イオントラップレーザー冷却と単一イオンの捕捉、電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、福井大学、2008 年 5 月 23 日
48. 守谷隆司、吉武惟之、長田大、杉山和彦、北野正雄(京都大学)、光イオン化により生成した Ba⁺ のリニア RF トラップへの閉じ込めとレーザー冷却、電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、福井大学、2008 年 5 月 23 日
49. 杉山和彦(京都大学)、Yb⁺ と Ba⁺ のイオントラップを用いた光周波数標準の研究と微細構造定数の時間変化の検出、研究会「Fundamental Physics Using Atoms」、作並温泉、2008 年 8 月 18 日
50. 長田大、杉山和彦、守谷隆司、北野正雄(京都大学)、Ba⁺ ²S_{1/2} - ²D_{5/2} 時計遷移励起用光パラメトリック発振器、日本物理学会 2008 年秋季大会、岩手大学、2008 年 9 月 21 日
51. 室木佑斗、川尻将、西崎公智、杉山和彦、今井康貴、小野田有吾、北野正雄(京都大学)、紫外外部共振器型半導体レーザーによる Yb⁺ のレーザー冷却、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月 28 日
52. 柴田良平、守谷隆司、長田大、吉武惟之、杉山和彦、北野正雄(京都大学)、早坂和弘(NICT)、占部伸二(大阪大学)、小型リニア RF トラップに閉じ込めた Ba⁺ のレーザー冷却、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月 28 日
53. 西崎公智、室木佑斗、川尻将、杉山和彦、今井康貴、小野田有吾、北野正雄(京都大学)、小型 RF イオントラップに閉じ込めた Yb⁺ のレーザー冷却、電子通信情報学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会、金沢大学、2009 年 5 月 22 日
54. 上原知幸、杉山和彦、松下宏治、小泉壮隆、北野正雄(京都大学)、外部共振器内セルを用いたセシウム原子 6S-8S 二光子吸収線安定化半導体レーザー、電子通信情報学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会、金沢大学、2009 年 5 月 22 日
55. 杉山和彦(京都大学)、超微細構造定数 α の時間変化検出に向けた Yb⁺、Ba⁺ 単一イオントラップ、東京工業大学研究会「Fundamental Physics Using Atoms」、東京工業大学、2009 年 8 月 5 日
56. 西崎公智、川尻将、杉山和彦、今井康貴、小野田有吾、北野正雄(京都大学)、小型 RF イオントラップに閉じ込めた単一 Yb⁺ のレーザー冷却、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009 年 9 月 26 日
57. 川尻将、室木佑斗、杉山和彦、小野田有吾、西崎公智、今井康貴、北野正雄(京都大学)、光イオン化を用いて同位体を選択した Yb⁺ の RF トラップへの捕捉、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009 年 9 月 26 日
58. 守谷隆司、柴田良平、長田大、杉山和彦、北野正雄(京都大学)、リニア RF イオントラップを用いた少数個 Ba⁺ の捕捉と量子跳躍の観測、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009 年 9 月 26 日
59. 小野田有吾、杉山和彦、池田充彦、北野正雄(京都大学)、光イオン化法による Yb⁺ のトラップ速度評価、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学、2010 年 3 月
60. 早坂 和弘(情報通信研究機構)、「微小共振器に結合した Ca イオンから生成される単一光子のコヒーレンス」、第 53 回応用物理学会学術講演会、2006 年 03 月 24 日、武蔵工業大学
61. 早坂 和弘(情報通信研究機構)、「イオン集団と光子間の量子インタフェース」、第 68 回応用物理学会学術講演会、2007 年 9 月 7 日、北海道工業大学
62. K. Hayasaka(NICT), "Quantum network of ions and photons assisted by cavity quantum electrodynamics", SPIE Optics East 2007, 2007 年 9 月 11 日, Seaport trade center Boston, MA, USA
63. 早坂 和弘(情報通信研究機構)、「量子ビットイオン列への冷媒イオンの埋め込み」、2008 年春季第 55 回応用物理学関係連合講演会、2008 年 3 月 27 日、日本大学理工学部
64. 早坂 和弘(情報通信研究機構)、「量子論理分光法による In イオンの高分解能分光(I)」、第 56 回応用物理学関係連合講演会、2009 年 4 月 1 日、筑波大学

65.K. Hayasaka(NICT), “Preparation of an Ion Chain Consisting of Ca^+ and In^+ with a Specified Arrangement”, CLEO/Europe-EQEC 2009, 2009年6月15日, Munich ICM, Munich, Germany

③ ポスター発表 (国内会議0件、国際会議15件)

1. A. Yamasaki, T. Furukawa, A. Michigami, U. Tanaka, S. Urabe, “Development of a multi-segmented linear Paul trap and reduction of ion micromotion towards quantum-state manipulation”, International Quantum Electronics Conference 2005 (IQEC2005), Tokyo, 2005年7月13日
2. Hideyuki Sawamura, Kenji Toyoda, Utako Tanaka, and Shinji Urabe, “Laser cooling of a trapped single $^{40}\text{Ca}^+$ ion toward the motional ground state”, International Quantum Electronics Conference 2005 (IQEC2005), Tokyo, 2005年7月13日
3. U.Tanaka, K.Toyoda, S.Urabe, K.Hayasaka, K.Brown, R.Clark, J.Labaziewicz, P.Richerme, I.Chuang, “Experiments with trapped calcium ions towards quantum information processing”, Workshop on Trapped Ion Quantum Computing, NIST, Boulder, Feb.22-24, 2006.
4. H.Sawamura, H.Oikaze, K.Toyoda, S.Urabe;” Ground-State Cooling of a Single $^{40}\text{Ca}^+$ ion”, 20st International Conference on Atomic Physics, (ICAP 2006), University of Innsbruck, Innsbruck, Austria (Jul. 2006)
5. K.Toyoda, H.Sawamura, U.Tanaka, S.Urabe, “ Ca^+ ground-state cooling and further experimental study for realizing quantum information processing with trapped Ca^+ ”, Satellite meeting of ICAP on Atomic Physics with Trapped Ions, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria (Jul. 2006)
6. R.Yamazaki, H.Sawamura, K.Toyoda, U.Tanaka, S.Urabe, “High Resolution Stimulated Raman Spectroscopy for the $D_{3/2}$ and $D_{5/2}$ Metastable States Qubit in $^{40}\text{Ca}^+$ ”, ICOLS2007, Colorado, USA, H19.6.26
7. R.Yamazaki, K.Kanda, F.Inoue, K.Toyoda, S.Urabe, “Robust Generation of Superposition States”, ICAP2008, Storrs, CT, USA, 2008.7.28
8. K.Toyoda, S.Haze, R.Yamazaki, S.Urabe, “Coherence of the metastable qubit in $^{40}\text{Ca}^+$ ions”, ICAP2008, Storrs, CT, USA, 2008.7.31
9. Rekishu Yamazaki, Ken-ichi Kanda, Fumihiko Inoue, Kenji Toyoda, Shinji Urabe, “Robust Generation of Superposition States”, Proceedings of 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 奈良新公会堂, 2008.11.25-28
10. S.Haze, K.Toyoda, R.Yamazaki and S.Urabe, “Highly coherent phase-locked laser system with a pure spectrum for excitation of a Ca^+ terahertz qubit”, Proceedings of 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 奈良新公会堂, 2008.11.25-28
11. S.Haze, R.Yamazaki, K.Toyoda, S.Urabe, ”Measurement and Compensation of Optical Stark Shift Toward OIP Using Terahertz Qbit in $^{40}\text{Ca}^+$ ”, ICOLS2009, Hokkaido, Japan, H21.6
12. K.Toyoda, S.Haze, F.Inoue, Y.Yamazaki, S.Urabe, “Quantum Gate Experiment Using Terahertz-Separated Metastable-States Qbit in $^{40}\text{Ca}^+$ ”, ICOLS2009, Hokkaido, Japan, H21.6
13. D. Osada, K. Sugiyama, T. Moriya, R. Shibata, and M. Kitano, “Optical parametric oscillator for driving the $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ clock transition of Ba^+ ”, 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 奈良新公会堂, 2008.11.25-28.
14. Y. Muroki, M. Nishizaki, S. Kawajiri, Y. Imai, Y. Onoda, K. Sugiyama, S. Noro, and M. Kitano, “Progress towards single-ion spectroscopy of the $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ transition of trapped $^{171}\text{Yb}^+$ ”, Proceedings of 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 奈良新公会堂, 2008.11.25-28.
15. 早坂 和弘(情報通信研究機構), “Deterministic Coupling of Multiple Calcium Ions to a Cavity mode”, 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 2008年11月27日、奈良県新公会堂

(4)知財出願
なし

(5)受賞・報道等
なし

(6)成果展開事例
なし

§ 6 研究期間中の主な活動（ワークショップ・シンポジウム等）

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2005/5/27	占部チーム定例ミーティング	大阪大学	6名	CREST 初年度の研究の進め方について議論した
2005/8/30	占部チーム定例ミーティング	大阪大学	7名	MIT との研究協力方針についての議論（I. Chuang 参加）
2006/2//28	占部チーム定例ミーティング	京都大学桂	25名	京大グループの研究状況、実験施設見学を行った
2007/4/24	占部チーム定例ミーティング	大阪大学	12名	Innsbruck 大学滞在の報告会を行った
2007/5/24	占部チーム定例ミーティング	NICT 神戸	15名	NICT グループの研究状況、実験施設見学を行った
2007/9/19	MIT-NICT 打ち合わせ	MIT	6名	日本側、MIT 側の研究進捗の共有と、今後の研究協力に関する打ち合わせ
2007/10/16	占部チーム定例ミーティング	大阪大学	6名	研究進捗の共有と今後の方針に関する議論

§ 7 結び

本研究プロジェクトの研究開始時点では、イオントラップの研究はわが国において世界の最先端に比べると大きく遅れていた。したがって、本研究の大きな目標の一つは世界のトップレベルにできるだけ早く追いつき、肩を並べることであった。5年を経過した現在、参加した研究者の頑張りによって、イオンの量子状態制御や量子ゲート実験が可能になるなど、トップレベルに肩を並べるまでは行かなくても、かなり近いところまで近づけたのではないかと思われる。数個レベルの小規模量子計算では、例えば、量子論理分光による光周波数標準が実現する見通しがついた。また、プレーナートラップ、クライオジェニクトラップ等、大規模量子計算の可能性を探る技術基盤を確立することができた。今後は、多粒子の量子ゲートやエンタングルメント、集積化トラップの開発などを進めて行く必要があると思われる。

このプロジェクトの開始時に、総括の山本先生のお計らいでチームに MIT の Chuang さんのグループを加えて頂いた。成果を見ても分かるように、この間の MIT の成果は目を見張るものがある。いうまでもなく、Chuang さんというずば抜けて優秀な研究者の力によるものである。MIT が加わったことにより、我々の研究においても、プレーナートラップの立ち上げ、FPGA を用いたレーザーパルス制御系の導入など、相互交流を通じて大いに実りがあったと思う。また、NICT の半導体レーザー技術の MIT と阪大への提供、阪大からの MIT や京大へそれぞれリニアトラップおよびトラップ技術の提供など、それなりにチーム内の交流も進んだ。MIT との交流を通じて感じたことは、マンパワーの問題である。MIT では研究の担い手の主力が PhD の学生であるのに対し、我々の大学では修士課程の学生であ

る(人数は非常に多いが)。我々は教育にかなりの時間をかけながら研究を進めているのが現状であり、研究の質、特にスピードという観点から考えると大きな負荷を背負っているという感じである。同じ悩みは京大グループも抱えていると思う。

本プロジェクトを通して、通算 2 名の CREST 研究員に参加してもらった(H17.4-H17.9、および H18.7-H21.3)。二人とも非常に優秀な研究者であり、良い仕事をしてもらった。しかしながら、期間が限られ、不安定な身分ということもあり、プロジェクトを通して期間いっぱい全力で研究を行ってもらおうというわけにはいかなかったのは残念である。難しいのかもしれないが、人に関してはもう少し長期に支援があれば非常にありがたいという気がする。

今回の研究プロジェクトを通して、私にとって初めて「量子の世界」を実験的に体験することができたような気がする。イオンの量子状態を実際に準備し、量子状態を実際に制御し、最後に量子状態を実際に測定するという実験プロセスである。周波数標準の分野でも、従来から似たようなプロセスを用いるが、量子の世界を少し垣間見ているだけという感じである。この過程で、いかに量子の世界が壊れ易いものかということに改めて実感した。例えば、高純度にレーザーのスペクトルを制御したつもりでも、キャリア近傍に不純物成分が残っていると量子状態の制御に大きな乱れを生じさせてしまう。量子の世界の実験には、技術の改良の積み重ねによる極限的性能の装置が必要であり、技術の集積が非常に重要である。

最後に、本研究を遂行するにあたって終始適切な助言をいただいた研究総括の山本喜久先生、およびアドバイザーの先生方、MITとの契約などを含めサポートいただいたJSTの関係各位、研究全体をサポートしていただいた篠原技術参事をはじめとする量子情報事務所の皆様に深く感謝する次第である。



占部チームのメンバー
熱海にて (H19. 12)