

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 冷却イオンを用いた量子情報処理基礎技術

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

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)

主たる共同研究者

杉山 和彦 (京都大学大学院工学研究科、准教授)

早坂 和弘 (情報通信研究機構新世代ネットワーク研究センター 主任研究員)

Isaac Chuang (MIT Associate professor)

3. 研究実施概要

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、プレナー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 1 mm 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並行して進め、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ッシングする技術の開発、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万能量子計算の新たな構成法を発見した。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

本研究テーマは、冷却イオンを用いた光周波数標準(光時計)の研究開発で世界をリードしている米国標準技術研究所(NIST)をはじめとする世界のトップグループに追いつくことを目指して行なわれた。冷却イオンを用いた光時計、量子情報処理技術は、多くの重要な基礎実験技術と基礎科学への貢献の可能性を内包しているため、その研究成果が広い分野に波及効果を及ぼすことに疑いはない。本チームは、大阪大学、京都大学、情報通信研究機構(NICT)、MITの4つのグループから構成され、それぞれ独自の手法により冷却イオンを用いた量子情報処理の基礎技術の確立を目指した。

大阪大学グループの主な研究成果を上げると、光周波数コムを用いた1.8THz離れた2台の量子制御用位相同期半導体レーザーの開発、このラマン光源を用いたCa⁺イオンのD_{5/2}-D_{3/2}間テラヘルツ遷移量子ビットのCirac-Zoller量子ゲートの実現、この量子ビットのラムゼー干渉実験とデコヒーレンス時間(5ms)の測定、量子ゲートのフィデリティを劣化させる光シフトのキャンセル法の開発、などである。

京都大学グループは、Yb⁺とBa⁺イオンの長寿命時計遷移を利用した量子ゲートの実現を目指して、両イオンの光イオン化によるトラップ、レーザー冷却、マイクロ運動の除去、ラム・ディッケ領域への閉じ込め、という基本技術を確立した。また、Yb⁺、Ba⁺イオンの奇数同位体の選別捕獲と時計遷移の励起に成功した。

NICTグループは、In⁺イオンを冷媒イオンとする⁴⁰Ca⁺イオンの共同冷却と共振器を用いた冷却イオンと光の相互作用制御について、基礎技術を開発した。

MITグループは、大規模な冷却イオン量子コンピューターの実現を目指したプレーナー型微細加工イオントラップを開発し、これを極低温で動作させることにより、イオンの加熱を3桁小さくすることに成功した。また、量子制御のためのレーザーパルスシステムの開発、磁場勾配を利用した個別イオンのアドレッシング技術の開発に取り組んだ。更に、故障耐性のある(フォールトトレラント)量子コンピューターのための理論研究においても優れた成果を上げた。

これらの研究成果を通じて、冷却イオンを用いた量子情報処理の分野で世界のトップグループに近づく実力を養った。外部発表に関しては、原著論文34件、招待講演8件、と適切に行なわれたと評価できる。特許出願は0であったが、研究開発が極めて基礎的なレベルにあったため、学術論文発表に重点が置かれたのはやむ

を得なかったと思われる。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

本研究が始まる以前は、我が国のこの分野における研究レベルは多少遅れていたが、本研究の成果を通して世界の一流レベルへの仲間入りが果たせたと思われる。とりわけ顕著な成果として、

- ・ 光周波数コムを用いた2台のテラヘルツ領域位相同期半導体レーザーシステムとテラヘルツ遷移量子ビットの量子制御技術の開発
- ・ 大規模化が可能なプレーナー型微細加工イオントラップの開発

が挙げられる。これらの世界的にも新しい研究成果の更なる展開が期待される。本研究成果は、量子情報処理への応用のみならず、次世代光時計の開発、基礎物理学実験(微細構造定数の時間変化など)への貢献も期待できるものである。

4-3. 総合的評価

本研究は、この分野の世界トップレベルへの仲間入りを目指して行なわれ、その目的は達成されたと思われる。今後は、蓄積された知識と技術に基づき、新しい量子情報処理のあり方を取り入れながら、更に独創的な研究へ発展していくことを期待する。代表研究者が、4つの研究グループの実質的な連携、協力体制に努力され、チーム全体としての実力アップに成功したことは評価できる。