

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21102006

研究課題名(和文)開放型イオントラップ系による量子情報処理

研究課題名(英文)Quantum information processing using an ion trap system

研究代表者

占部 伸二(Urabe, Shinji)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：20304040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 84,100,000円、(間接経費) 25,230,000円

研究成果の概要(和文)：多領域からなるプレーナートラップを開発し、イオンの移動実験に成功した。さらに微小な永久磁石をトラップ基板の裏面に配置し、量子状態制御が可能な高い磁場勾配を発生させた。誘導ラマン断熱通過を用いて、幾何学的位相因子のみによるユニバーサルな単一量子ビットゲート操作を初めて実現した。デコヒーレンスフリーな2イオンの量子もつれ状態の生成、および多準位誘導ラマン断熱通過の原理を用いて、4イオンのディッケ状態の高忠実度生成に成功した。正三角形に配置した極低温状態の3イオンからなる量子回転子を実現し、そのトンネル効果によるアハラノフ・ボーム効果の観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：Multi-zone planar traps have been developed and transporting ions has been succeeded. By placing small magnets on the back side of the trap substrate, a high magnetic field gradient that is sufficient for quantum state manipulation has been generated. Using the stimulated Raman adiabatic passage, a universal single-qubit gate based on the geometric phase factor has been realized. The decoherence-free two-partite entangled state has been generated successfully, and using the multi-level stimulated Raman adiabatic passage method, the four-partite Dicke state has been generated with high fidelity. We have succeeded in realizing a quantum rotor, in which three ultracold calcium ions arrange themselves in a triangular shape in a linear Paul trap, and demonstrated the Aharonov-Bohm effect with quantum tunneling.

研究分野：複合新領域、数物系科学

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロナノデバイス：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：イオントラップ 量子情報処理 量子エレクトロニクス レーザー冷却

1. 研究開始当初の背景

レーザー冷却されたイオンは孤立した理想的な物理系であるため、量子情報処理の物理的な実現の方法として有力な候補の一つとされている。これまでに少数個のイオンを用いて量子計算の基本的なアルゴリズムが実証されている。今後は大規模化を目指したトラップの集積化技術、耐故障性を持つ計算を目指した量子ゲートの高忠実度化、他の量子系との結合などが中心的な研究課題となる。我々はこれまでイオンの振動基底状態までの冷却技術を開発し、新しい量子ビットとしての Ca イオンの二つの準安定状態を用いたテラヘルツ遷移の量子ビットの開発を進め、必要なレーザー技術を開発するとともに、量子ゲート実証実験を行い、必要な基盤技術の確立を図ってきた。

2. 研究の目的

本研究では、大規模化および他の量子系との結合が容易なトラップ技術の開発、および高忠実度化を目指した断熱過程に基づく量子ゲート技術の開発を行う。前者についてはプレーナートラップの開発を行う。このトラップは電気回路基板のように電極を配置することから集積化が容易であり、また開放型のトラップであることから他の量子系との結合にも適している。このオントラップ系を用いて、トラップ間のイオンの空間制御技術を開発し量子ゲート実験を行う。後者については、レーザー強度揺らぎや周波数変動に対してロバストな、高速断熱通過や誘導ラマン断熱通過などを用いた量子ゲートや、複数イオンを用いた対称なエンタングル状態の生成などを行う。最終的には二つの手法を組み合わせ合わせた拡張可能で外部と結合が容易、かつロバストなイオントラップ系を用いた量子情報処理技術を目指す。また、これらの研究を通して他の量子系との結合の可能性を探索する。

3. 研究の方法

プレーナートラップについては、電極パターンの作製、動作確認実験、イオンのドップラー冷却、マイクロ運動の補正法の開発、サイドバンド冷却による単一イオンの振動基底状態の発生という順で開発を進める。特に多数の領域からなるトラップ電極を開発し、捕獲実験、異なる領域間の移動実験を行う。さらに、レーザー技術だけでなく他の手法を用いた、プレーナートラップに適したイオンの量子状態制御法を検討し、これによる実験を行うとともに、開放型のトラップの特徴である他の量子系との結合について、関連分野の研究グループと連携して検討を進める

ロバストな量子ゲート技術開発については、リニアパウルトラップ中でドップラー冷却法およびサイドバンド冷却法により振動基底状態付近まで冷却されたカルシウムイオンを、また、量子ビット遷移として、基底

状態および準安定状態間の遷移を用いて実験を行う。これまで開発した高速断熱通過のためのレーザー制御技術を用いて、誘導ラマン断熱通過を用いた幾何学的位相に基づいた量子ゲートを実現する。さらに順次個数を増やし、断熱的な手法を用いた対称的なエンタングル状態(ディッケ状態)の生成を行う。また、振動基底状態発生方法や断熱的手法を用いた応用実験、例えば量子シミュレーション実験など、を行う。

4. 研究成果

(1) 開放型多領域プレーナートラップの開発

量子情報処理において大量のイオンを量子ビットとして扱うには、ゲート操作やメモリ蓄積など個別の役割を持った領域を多数用意し、それらの領域間でイオンを移動させる方法が提案されている。プレーナートラップは集積回路のように多数の電極の自由なレイアウトが可能であるためこうした応用に適している。

我々はイオンの捕獲される高さが電極表面から 200 μm で、1mm \times 1mm の 9 対の DC 電極を持つプレーナートラップを開発した。

トラップポテンシャルの形状を一定に保ちながらポテンシャル最小点が移動するような印加電圧をシミュレーションによって求め、複数の DC 電極の電圧を操作することによって図 1 に示すようにカルシウムイオンの移動実験に成功した。

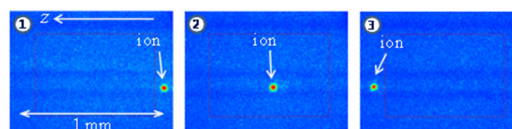


図 1. カルシウムイオンの移動する様子を示す画像

(2) プレーナートラップ中での高磁場勾配の生成

開放型プレーナートラップは、その構造から従来のトラップでは実現し得ない環境を創成することができる。高磁場勾配中の冷却イオンは、光ではなく RF を用いた拡張性の良い安定な量子ゲート操作や、スピン-スピン相互作用の量子シミュレーションなどに幅広く応用できる実験系である。そこで微小強磁性体による磁場勾配を利用した量子演算を行っている筑波大学の都倉康弘教授との共同研究として、イオントラップ中での高磁場勾配の発生を試みた。目下の課題はより大きな相互作用の実現であるが、先行研究の電磁石型では電流による発熱の問題、リニアトラップと永久磁石の組み込みではイオンとの距離の問題があった。しかし開放型プレーナートラップならば永久磁石とイオンとの距離を数百 μm のオーダーに近づけることができる。

我々は微小な永久磁石をプレーナートラ

ップの裏面に接着し、イオンの位置に強い磁場勾配を発生させる方法を考案し、トラップの実装と磁場勾配の測定を行った。図2に示すようにプレーナートラップ電極、高さ調整用のスペーサー、永久磁石を組み合わせた磁石層を互いに接着する。永久磁石は磁場の向きが x 軸方向で、かつトラップ軸方向 (z 軸) 方向に沿って大きさが変化するように設計した。イオンとの距離を $300 \mu\text{m}$ に調整すれば、 180 T/m の磁場勾配が生成できる配置で、これは相互作用の強さ約 12 kHz が実現できる値である。

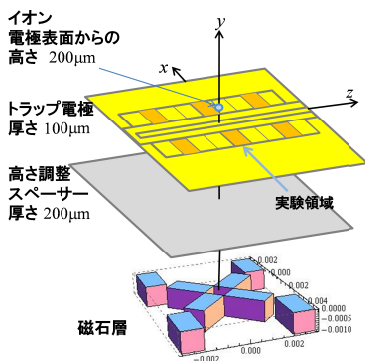


図2. 永久磁石を装着したプレーナートラップの構成図

今回はイオンと磁石層との距離が $500 \mu\text{m}$ のものを作製した。カルシウムイオンを捕獲し、自然幅約 1Hz の電気四重極遷移を観測し、Zeeman 副準位の分裂幅からイオンの位置での磁場の値を測定した。さらに DC 電圧の操作により z 軸上にイオンを移動させて、各点での磁場の値を測定したところ、 30 T/m の磁場勾配が確認できた。これは先行研究と比較しても高い値である。さらにスペーサーを取り除きイオンと磁石層との距離を近づけることによって 180 T/m の磁場勾配の実現が期待できる。

(3) ナノ光ファイバーと冷却イオンとの結合系構築

開放型プレーナートラップは、従来のイオントラップの理想的な孤立系という性質を保ちつつ、冷却イオンと他の物理系とを効率よく結合させられる可能性をもつ。そこで、ナノ光ファイバー作製技術を確立し物質との高結合を実現している京都大学の竹内繁樹教授、北海道大学の藤原正澄助教との共同研究として、ナノ光ファイバーのエバネッセント波と開放型プレーナートラップ中のイオンとの結合系の構築を検討し、予備実験を行った。このような結合はかつてないユニークな系であるが、中性原子や量子ドットでナノ光ファイバーとの結合の試みがなされているのに対し、イオンについての報告はない。これは誘電体である光ファイバーの電気的特性やトラップポテンシャルへの影響が未

解明なためである。

そこで我々は最も問題となると予想されるナノ光ファイバーの帯電状況について、帯電したポリスチレン微粒子を用いて測定する方法を考案した。帯電測定では従来型リニアトラップにナノ光ファイバーを組み込み大気中で実験を行う。ポリスチレン微粒子をトラップしファイバーに近づけてその平衡位置からファイバーの表面電荷密度を求める。この方法は微粒子の帯電量がわからなくても、ナノ光ファイバーの帯電量が求められるのが利点である。

(4) 幾何学的位相を用いた量子ゲート

単一カルシウムイオンの電気四重極遷移の一つの下準位と三つの上準位からなる tripod 系における 2 つの暗状態を用い、STIRAP(Stimulated Raman Adiabatic Passage)により断熱的操作を行うことにより、幾何学的位相因子のみによるユニバーサルな単一量子ビットゲート操作を初めて実現した。 Z, X 回転において可視度 0.9 以上で占有数が増えることを確認した(図3)。また強度やパルス印加時間に対するロバスト性を確認した。この成果は、幾何学的位相のみによる量子計算(ホロノミック量子計算)の実現への大きなステップとなるものである。

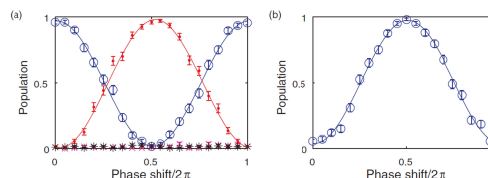


図3: STIRAPによる単一量子ビット X, Z ゲート

(5) 断熱的手法によるエンタングル状態生成

高速断熱通過を用いた方法により、2 個のイオンのエンタングル状態を生成することに成功した。また、高速断熱通過を用いることにより、振動自由度に関する個数状態をロバストに生成することにも成功した。さらに、2 個のイオンのディッケ状態の生成において、パラメーターの変化に対するロバスト性を立証した。

さらに高速断熱通過法により、3 個のイオンのディッケ状態の生成にも成功した。グローバルな観測のみを用いて 3 粒子系のディッケ状態 (W 状態) のフィデリティの上限・下限を表す不等式を導出し、これを用いて実際に実験的に得られた 3 イオン系のディッケ状態の評価を行い、結果として、ディッケ状態が生成されたことを証明することに成功した。

RF 遷移に直接エンタングル状態を生成する方法を提案し、また実験的に実演すること

に成功した。さらに、生成された状態がデコヒーレンスフリーである、つまり外界からのノイズに対してロバストであるという性質を持つことを示した。具体的には、生成したエンタングル状態のコヒーレンス時間がイオンの場合のコヒーレンス時間と比べ一桁以上長くなることを示した。

4 イオンのディック状態の生成に成功した。イオンのレッドサイドバンドおよびブルーサイドバンドに共鳴した二色光を用い、それらの二色光の強度を独立に変調することにより、多準位 STIRAP (誘導ラマン断熱通過) の原理を用いてディック状態の生成を行った(図4)。この方法は個々のイオンへのアクセスを必要とせず、また強度変調の詳細によらないというロバスト性も備える。

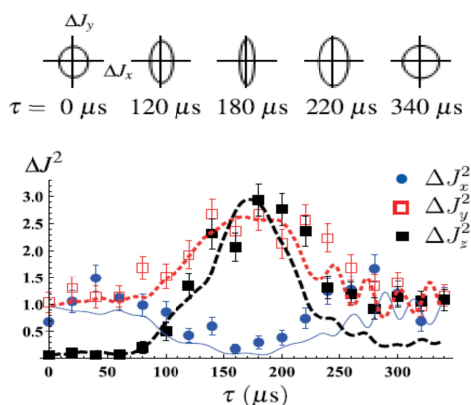


図4.多準位 STIRAP プロセスにおける4イオンのスピンノイズの時間発展の様子。170 μs あたりで擬スピンのx方向に最も大きくスクイズされ、半数励起のディック状態が生成されていることが分かる。

(6) 応用実験 (量子シミュレーション等)

リニアパウルトラップ中のカルシウムイオンを用いて Jaynes-Cummings-Hubbard (JCH) 模型を初めて実験的に実現し、ポラリトンの励起の量子相転移を観測した。二個のイオンの内部状態と動径方向振動モードを用い、ポラリトンの励起が各サイトに局在化した絶縁体相から二つのサイトに非局在化した超流動相への量子相転移 (多体系の基底状態間の転移) の観測に成功した。この成果は、量子情報処理の技術を固体物理の研究へ応用する先駆けとなるものである。

リニアパウルトラップ中に正三角形に配置した3個のイオンの回転運動を基底状態まで冷却して量子回転子を実現した。光学的に識別可能な二つの配置の間を量子トンネル現象により切り替わること、印加磁場由来の Aharonov-Bohm 効果によりそのトンネル現象を制御可能なことを示した。特に後者の Aharonov-Bohm 効果の観測は、分子科学研究所協奏分子システム研究センターの鹿野豊特任准教授と協力して行われたものである。この成果は、イオントラップ技術および量子

情報処理の技術を基礎物理学の問題である量子トンネル現象の理解に結びつけるものである。

上記のような量子情報処理実験を支える技術である励起レーザーの線幅狭窄化などにも継続して取り組み、729nm で発振するリングタンサファイアレーザーをヘルツオーダーの線幅まで安定化することに成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 16 件)

- (1) Atsushi Noguchi, Yutaka Shikano, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe, “Aharonov-Bohm effect in the tunneling of a quantum rotor in a linear trap”, Nature Commun. Vol.5, 3868, 2014. 査読有.
DOI:10.1038/ncomms4868
- (2) Utako Tanaka, Kensuke Suzuki, Yuki Ibaraki, and Shinji Urabe, “Design of a surface electrode trap for parallel ion strings”, J.Phys.B, 47, 035301,2014. 査読有,
doi:10.1088/0953-4075/47/3/035301
- (3) Kenji Toyoda, Yuta Matsuno, Atsushi Noguchi, Shinsuke Haze, and Shinji Urabe, “Experimental Realization of a Quantum Phase Transition of Polaritonic Excitations”, Phys. Rev. Lett. 111, 160501, 2013. 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.160501
- (4) K.Toyoda, K.Uchida, A.Noguchi, S.Haze, and S.Urabe, “Realization of holonomic single-qubit operations”, Phys. Rev. A 87, 052307, 2013. 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevA.87.052307
- (5) Atsushi Noguchi, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe, “Generation of Dicke States with Phonon-Mediated Multi-level Stimulated Raman Adiabatic Passage” Phys. Rev. Lett. 109, 260502,2012. 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.260502
- (6) U.Tanaka, K. Masuda, Y.Akimoto, K.Koda, Y.Ibaraki, and S.Urabe, “Micromotion compensation in a surface electrode trap by parametric excitation of trapped ions”, Appl. Phys. B, 107, 907-912, 2012. 査読有.
DOI 10.1007/s00340-011-4762-2
- (7) Atsushi Noguchi, shinsuke Haze, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe, “Generation of a Decoherence-Free Entangled State Using a Radio-Frequency Dressed State”, Phys. Rev. Lett. 108, 060503, 2012. 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.060503

- (8) Shinsuke Haze, Yusuke Tateishi, Atsushi Noguchi, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe, “Observation of phonon hopping in radial vibrational modes of trapped ions”, Phys. Rev. A., Vol. 85, 031401(R), 2012. 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevA.85.031401
- (9) Y.Ibaraki, U.Tanaka, and S.Urabe, “Detection of parametric resonance of trapped ions for micromotion compensation”, Appl. Phys. B, Vol.105, pp.219-223, 2011. 査読有.
DOI 10.1007/s00340-011-4463-x
- (10) T. Watanabe, S. Nomura, K. Toyoda, and S.Urabe, “Sideband Excitation of Trapped Ions by Rapid Adiabatic Passage for Manipulation of Motional State”, Phys. Rev. A 84, 033412, 2011. 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevA.84.033412
- (11) K.Toyoda, T.Watanabe, K.Kimura, S.Nomura, S.Haze, and S.Urabe, “Generation of Dicke states using adiabatic passage”, Phys. Rev. A 83, 022315, 2011. 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevA.83.022315

〔学会発表〕(計 86 件)

- (1) 野口篤史、鹿野豊、豊田健二、占部伸二、“イオントラップ中の量子トンネル回転”基礎物理学研究所研究会 量子情報の新展開京都大学基礎物理学研究所湯川記念館 2014年3月25日
- (2) K. Toyoda, Y. Matsuno, A. Noguchi, S. Haze, S. Urabe, “Quantum Simulation of the Jaynes-Cummings-Hubbard Model Using Trapped Ions”, CLEO-PR & OECC/PS 2013, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, July 3, 2013
- (3) U. Tanaka, K. Suzuki, and S. Urabe, “Development of a Surface Electrode Trap for Two-Dimensional Ion Lattice”, CLEO-PR&OECC/PS 2013, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, July 3, 2013.
- (4) Atsushi Noguchi, Kenji Toyoda, Shinji Urabe, “Generation of Dicke States with Phonon-Mediated Multi-level Stimulated Raman Adiabatic Passage”, The 21st International Conference on Laser Spectroscopy, Claremont Hotel, Berkeley, California, USA. 2013. 6.10.
- (5) K. Toyoda, Y. Matsuno, A. Noguchi, S. Haze, S. Urabe, “Quantum Simulation of the Jaynes-Cummings-Hubbard Model

Using Trapped Ions”, The 21st International Conference on Laser Spectroscopy, Claremont Hotel, Berkeley, California, USA. 2013. 6.10.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

<http://www.ge.ee.es.osaka-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

占部 伸二 (Urabe Shinji)

大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

研究者番号：20304040

(3)連携研究者

田中 歌子 (Tanaka Utako)

大阪大学大学院基礎工学研究科 講師

研究者番号：20359087

豊田 健二 (Toyoda Kenji)

大阪大学大学院基礎工学研究科 助教

研究者番号：20314403

早坂 和弘 (Hayasaka Kazuhiro)

情報通信研究機構 研究マネージャー

研究者番号：10359086