

イオントラップを用いた量子情報処理



研究ノート

占部伸二*

Quantum information processing with ion traps

Key Words : quantum information processing, ion trap entanglement, quantum simulation

1. はじめに

量子情報処理は、原子などの二準位系の状態を情報の単位として用いることにより、従来の情報処理では不可能な、量子力学的な重ね合わせや量子もつれを利用して並列処理を行うもので、現在の計算機では膨大な時間のかかる問題やシミュレーションなどを高速に処理できることが期待されている。物理的実現のために、基礎的な研究段階ではあるが、核スピン、光子、イオンや原子、量子ドット、超伝導ジョセフソン素子などを用いた実験研究が活発に進められている。イオントラップ中に並んだイオンを量子ビットとして用いる方法は1995年に提案され、有力な方法の一つとして、世界的に研究が進められている。2012年にはこの分野の第一人者の米国のワインランド博士がノーベル物理学賞を受賞している¹⁾。我々の研究室でもイオントラップを用いた量子情報処理の研究を行っている。本稿では、我々の研究室の最近の代表的な成果をいくつか紹介する。

2. 多粒子量子もつれ状態の生成

量子もつれは、量子力学特有の強い相関を持つ複数の粒子間の状態を示すものであり、量子情報処理の中核的な資源の一つである。多粒子量子もつれ状態は、量子通信、量子テレポーテーション、測定ベースの量子計算など量子情報処理を行う上で大きな

資源となる。また、生成可能な個数は、どの程度の規模の量子情報処理がその量子系において可能であるかの目安にもなる。多粒子量子もつれ状態の代表的なものとしてGHZ状態とディッケ状態がある。GHZ状態は最大の量子もつれ状態で、シュレーディンガーの猫状態と呼ばれることもある。一方、ディッケ状態は各量子ビットをスピン1/2の粒子と見なした場合に、全角運動量と一つの射影成分の同時固有状態で定義される。

イオントラップの実験では、GHZ状態については幾何学位相を用いた手法により、14個のイオンでの生成が報告されている。一方、ディッケ状態に関しては、忠実度が高く多粒子に拡張できる良い方法がこれまでなかった。特に、半数励起の対称ディッケ状態は高分解能分光や計測への応用にも注目されているにもかかわらず、実際に発生することは困難で、2個以上の発生例はなかった。我々は多粒子への拡張可能な半数励起のディッケ状態の発生に成功した^{2,3)}。用いた方法は、イオンの内部状態とフォノンを結合させる正負に離調した二つのレーザーパルスを用いて時間をずらして照射して、系を断熱的に移行させるという方法(誘導ラマン断熱通過法)である。この方法では、振動状態まで冷却されたイオンは断熱的に暗状態を保って変化し、中間地点で半数励起のディッケ状態が生成される(図1)。実験では4個のイオンに対し、生成された状態について忠実度を評価したところ、下限と上限として、それぞれ0.84および0.88という高い値が得られた。この方法は、集団的なアドレスによってシンプルに操作できること、断熱的な過程を用いているため、実験パラメータの変動に強いなどの特徴がある。各種の誤差要因等を制御することによりさらに多数個のディッケ状態の生成が期待できる。



* Shinji URABE

1950年1月生
 東京大学大学院工学系研究科 修士課程
 修了(1975年)
 現在、大阪大学大学院基礎工学研究科
 システム創成専攻電子光科学領域 教授
 工学博士 量子エレクトロニクス
 TEL: 06-6850-6325
 FAX: 06-6850-6325
 E-mail: urabe@ee.es.osaka-u.ac.jp

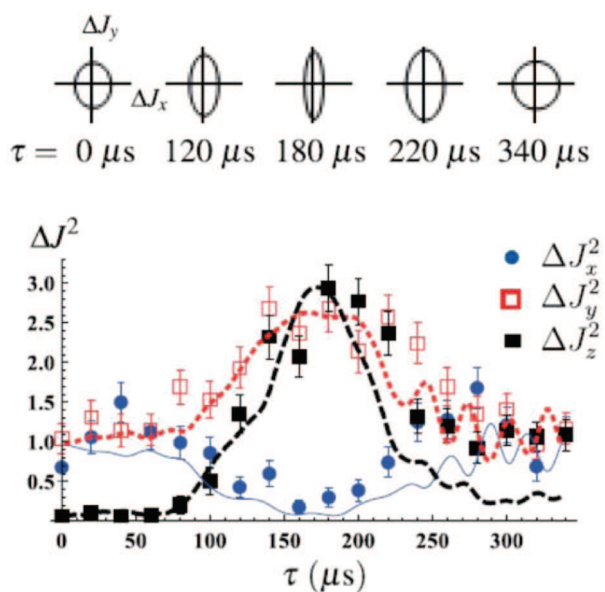


図1 多準位誘導ラマン断熱通過における4個のイオンのスピノイズの時間発展の様子。170 μs あたりで擬スピノイズがx方向に最も大きくスクエアされ、半数励起の Dicke 状態が生成されている²⁾。

3. イオンを用いた量子シミュレーション

量子シミュレーションは、古典的に解析が困難な量子多体系などを、基本的なプロセスが知られた操作の容易な実験系（原子や光など）に置き換えて実験を行い、複雑なプロセスの解析や新たな現象を予測することを目的とするものである。固体物理などの強相関多体系の量子シミュレーションとして、原子を含む結合した光共振器列のモデルが提案されている。このモデルは、原子を含む共振器を格子点、光子をこの格子中のボース粒子と見なし、原子を仲介とした光子間の相互作用を粒子間の相互作用として用いるもので、各サイトへの個別アクセスが容易なことから、理論的な解析が進められてきた。共振器内の二準位原子と光の相互作用を用いる場合には Jaynes-Cummings-Hubbard (JCH) モデルと呼ばれる。様々な系を用いた実験の提案がなされてきたが、実験的実証は未着手であった。我々のグループでは、リニアトラップ中に捕獲されたイオンの内部状態と振動フォノンを用いて、JCH モデルの実証実験に初めて成功した⁴⁾。

リニアトラップの横方向のポテンシャルの束縛を強くすると、イオン鎖の振動の横モードフォノンは各イオンに局在し、クーロン相互作用によりイオン

間をホッピングする。このため、各イオンを格子点、振動フォノンを光子と見なすことができる。このイオン鎖に、イオンの内部状態とフォノンを結合する負の離調のレーザーパルス照射すると、フォノン間の相互作用が生じ、JCH モデルが実現される。実験では、振動基底状態まで冷却した2個のイオンに対し、2個の励起が各イオンの内部状態に局在した初期状態を作り、レーザーの離調と振幅を変化させて系の基底状態を断熱的に移行させることにより、量子相転移の観測を行った。この結果、励起がイオンの内部状態に局在した“絶縁体”の状態から、原子とフォノンが結合した“ポラリトニックな超流動状態”を経て、フォノンが系全体に広がる“フォノン超流動状態”へ量子相転移することが確認された。図2は各サイトにおける原子の励起数の分散とフォノン数の分散を示したもので、上記の三つの状態が実現していることを示している。今後は、より多くのイオンを用いた実験に発展させていくことが課題となる。この成果は、注目論文として米国物理学会のオンラインジャーナルに解説付きで紹介された⁵⁾。

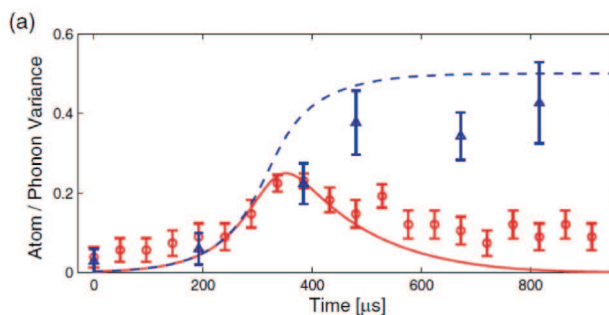


図2 基底状態を断熱的に変化した場合の、各サイトにおける原子の励起数の分散 V_a (赤○) とフォノン数の分散 V_p (青△) の測定値。実線と点線はそれぞれの理論値。左端は V_a, V_p ともに零の“絶縁体”状態、中間地点は V_a, V_p ともに分散が有限な“ポラリトニックな超流動状態”、右端は V_a が零、 V_p が有限な“フォノン超流動状態”を示す⁴⁾。

4. 量子回転子の実現とアハラノフ・ボーム効果の実証

イオントラップを用いた実験では、リニアトラップ内に一列に配列したイオンを使って、量子情報処理の研究が進められてきた。イオンの二次元的な配列は、トラップのポテンシャルの形を制御することにより可能であることは知られていたが、振動基底状態まで冷やすことは難しいと考えられていたため、

利用されることはなかった。我々の研究室では、リニアトラップ中に三角形に配列したイオンを振動基底状態まで、レーザーを使って冷やせることを初めて見出した。実験では、この三角形に配列したイオンを、断熱冷却という手法を用いてさらに数十ナノケルビンまで下げることにより、上向きと下向きの三角形の二つの安定点の間を、量子トンネル効果によって移り変わる量子回転子を実現することに成功した(図3)。量子回転子の状態は、上向きと下向きの三角形の重ね合わせの状態となっており、光学顕微鏡で識別可能なミクロンサイズの単純な系で、このような状態を実現したのは世界的にみて稀有な例である。さらに、分子科学研究所と共同で、量子回転子が二つの経路を通過して移り変わるという量子干渉の性質を用いて、アハラノフ・ボーム効果の観測を行った。この効果は、干渉計の二つの経路の囲

む領域に電磁ポテンシャルがある場合は、電荷を持った粒子が直接電磁場によって力を受けなくても、干渉縞の位相に変化を与えるというものである。実験では、経路の囲む領域の磁場の強さを変えることで、この効果によって理論的に予言されるトンネル効果の確率が周期的に変化することを観測した⁶⁾。アハラノフ・ボーム効果は、電子ビーム干渉計を使った実験による検証などで知られていたが、この実験では、干渉計の経路のすべてをトンネル粒子が通過しており、古典的に許される軌道を全く持たない粒子を使って初めて実証したことになる。

5. おわりに

イオントラップを用いた量子情報処理の実験をいくつか紹介した。少数個のイオンについては各種の基本的操作が可能になったといえる。今後は、大規模化に向けた研究を進めていくことが必要となるが、中規模な量子シミュレーターの実現などをマイルストーンとして研究を進めていくことになる。

なお、本研究は科学研究費新学術領域「量子サイバネティクス」、最先端研究支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」の支援のもとに行われた。

(参考文献)

- 1) 占部伸二、田中歌子；科学、83巻1号、98-101、2013、岩波書店。
- 2) A. Noguchi, K. Toyoda, S. Urabe; Phys. Rev. Lett. 109, 260502, 2012.
- 3) 野口篤史、豊田健二、占部伸二；日本物理学会誌、69巻5号、308-313、2014.
- 4) K. Toyoda, Y. Matsuno, A. Noguchi, S. Haze, S. Urabe; Phys. Rev. Lett., 111, 160501, 2013.
- 5) D. Kielpinski; Physics 6, 112, 2013.
- 6) A. Noguchi, Y. Shikano, K. Toyoda, S. Urabe; Nat. Commun. Vol.5, 3868, 2014.

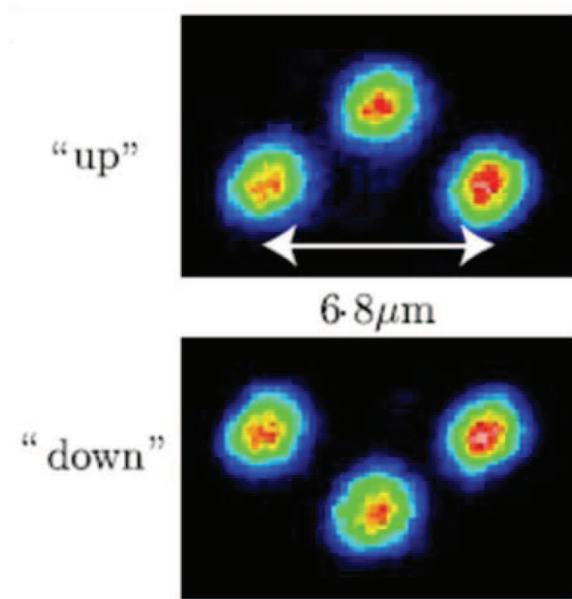


図3 リニアトラップ内の量子回転子の二つの状態(一辺が6.8マイクロメートルの上向き三角形と下向き三角形)。量子回転子は二つの重ね合わせの状態にある。