

Li 原子-Ca イオン混合系を用いた 原子とイオンの極低温非弾性散乱評価

向山研究室 齋藤了一

1. 背景と目的

冷却原子は温度や内部自由度、粒子間相互作用などの制御性が高く、種々の物理系をシミュレーションできる系といえる。このため、今までに様々な研究が行われており、BEC や超流動、強相関物理系などの量子系、熱・統計物理系の研究が盛んである。

冷却原子は主に光トラップや磁場トラップなどに捕獲し、TOF (Time of Flight 法) を用いて運動量分布の測定による状態観測が盛んにおこなわれてきた。一方で近年では光格子中の冷却原子や光トラップ中の冷却を高倍率、高解像度、実空間で撮像する手法の開発も盛んである。これは、光トラップが非一様系であるためにトラップ各点の局所物理量が系を記述するために重要なパラメーターとなるためである。実空間局所測定をするための手法として主に光イメージングを高倍率の対物レンズを用いて行う手法が提案、実現されている。

光イメージングと異なる手法として我々はイオンを使った局所物理量測定を目指している。イオンはレーザー冷却及びサイドバンド冷却を用いることでマイクロメートル以下の領域に局在させることが可能である。原子気体と局在させたイオンを混合し、原子イオン間の散乱を利用して原子の状態をマイクロメートル以下の分解能で検出するのがイオンを用いたプロービングの基本的なアイデアである。

本研究の目的は、光トラップ中の原子気体の空間密度分布をイオンをプローブとして測定することである。原子とイオンの非弾性散乱[1]が原子密度に比例することを利用して原子気体の実空間密度分布を測定した。

2. 実験装置と実験準備

ここでは使用した実験装置について概要と原子とイオンの捕獲について示す。原子-イオン混合系は主に図1のように二つの真空チャンバーから成る。一つはイオンチャンバーであり、もう一方は原子チャンバーである。イオンチャンバー内にはイオントラップが配置してあり、 $^{40}\text{Ca}^+$ を捕獲する。一方の原子チャンバーでは ^6Li の捕獲冷却を主として行う。

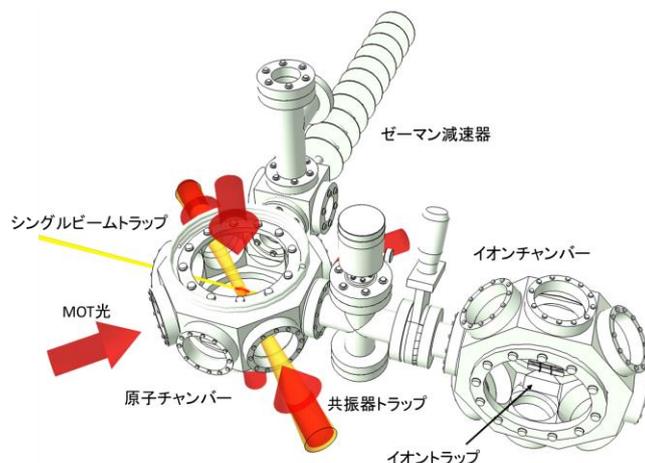


図1. 実験系

最終的にシングルビーム光トラップに捕獲した原子気体を光ピンセット技術でイオントラップまで輸送し、原子とイオンの混合を行った。なお真空チャンバー内は 10^{-11}Torr 程度の超高真空に保たれている。

2.1. イオンの捕獲

$^{40}\text{Ca}^+$ は図2に示したRFリニアイオントラップによって捕獲した。使用したRFリニアトラップは4枚のチタン製ブレードからなる。向かい合った一对のRF電極に典型的に5.6MHz、振幅55Vの正弦信号を入力した。イオントラップ中心

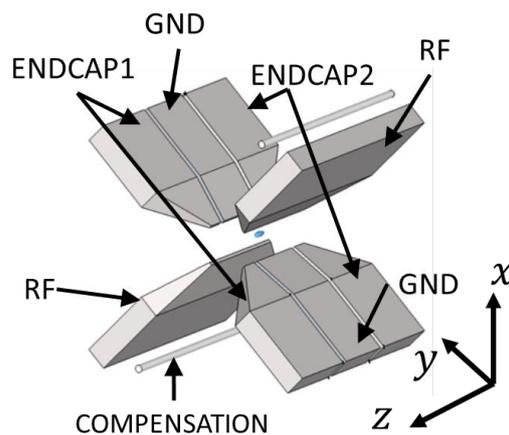


図2. イオントラップ

には周期的に変化する鞍型ポテンシャルが形成される。イオンは鞍点付近で図2中 x , y の動径方向に閉じ込められる。残る z 軸方向は ENDCAP による静電場で捕獲した。なお、GND 電極は RF 電極に対して GND になっており、COMPENSATION 電極はイオンの位置を補正するために取り付けられている。この電極の使用方法は後述する。

イオントラップにて捕獲する Ca イオンはトラップ周辺にとりつけた Ca 原子源に電流を流して加熱し、気化した Ca 原子線を光イオン化することで行った。光イオン化には ^{40}Ca の $4^1\text{S}_0 \rightarrow 4^1\text{P}_1$ の遷移に共鳴する 423nm レーザー光と 4^1P_1 遷移から連続状態まで遷移させるための 375nm レーザー光によって行った。

イオンの状態検出にはイオンの蛍光を用いた。イオンには後述するレーザー冷却で 397nm 光を入射したが、冷却サイクルに伴うイオンの 397nm 蛍光を対物レンズを通した上で PMT と EMCCD で観測した。

2.2. 原子の捕獲と冷却

絶対零度近傍まで冷却された ^6Li 原子をシングルビーム光トラップ中に捕獲するため、まず、磁気光学トラップ (MOT) を用いて 10^8 個程度の原子気体を捕獲冷却し、その後、共振器トラップに移行した。

オープンから発した 500-600°C の原子気体はゼーマン減速器を通してレーザー冷却され、速度を落とした後、効率的に MOT を行った。具体的に図1のように六方向から原子の共鳴から負に離調した円偏光レーザー：冷却光を入射し、原子は輻射圧を受ける。さらにチャンバー上下に取り付けたアンチヘルムホルツコイルに電流を流すことで磁場勾配を作り輻射圧に位置依存性を持たせた。なお、冷却サイクルをつくりだすため、冷却光と同時にリパンプ光を入射した。

共振器トラップに効率的に原子を移行するため MOT の後 CMOT を行った。これはトラップ体積の小さい共振器トラップに移行するため原子を圧縮して密度をあげ、冷却するプロセスである。具体的には磁場勾配を上げ、冷却光を共鳴に近づけた。

CMOT から共振器トラップに移行した。共振器トラップは光トラップに共振器を構成し、

共振器内で増幅した光強度を利用して深いトラップを実現するものである。

共振器トラップからシングルビームトラップへ移行し、シングルビーム内には 10^5 - 10^6 個の原子を捕獲出来た。

3. 実験結果

3.1. イオンの冷却

イオントラップに捕獲されたイオンは永年運動とマイクロモーション運動の二種類の運動をする。永年運動はイオンが RF 電場によって実効的に感じる擬調和ポテンシャル中での運動のことである。一方でマイクロモーション運動は RF 電場によってイオンが加熱されて RF 振動周期で運動するモードである。原子気体の局所プローブを行うためにはイオンを局在させる必要があるため、両者の運動を抑制する必要がある。

永年運動はレーザー冷却によって抑制した。

$^{40}\text{Ca}^+$ の $4^2\text{S}_{1/2} \rightarrow 4^2\text{P}_{1/2}$ の遷移に対して 397nm レーザーを入射してドップラー冷却を行った。冷却サイクルをつくりだすため $3^2\text{D}_{3/2} \rightarrow 4^2\text{P}_{1/2}$ 遷移間の 866nm のリパンプ光を同時に入射した。なお両者のレーザーは z 軸方向と x 軸方向の二方向から入射することで軸方向と動径方向の永年運動を効率的に抑制できるよう

3.2. マイクロモーションの補正

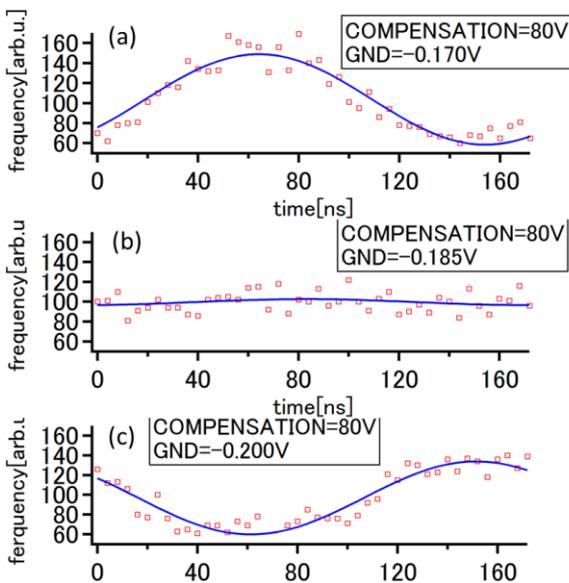


図 4. TAC によるヒストグラム

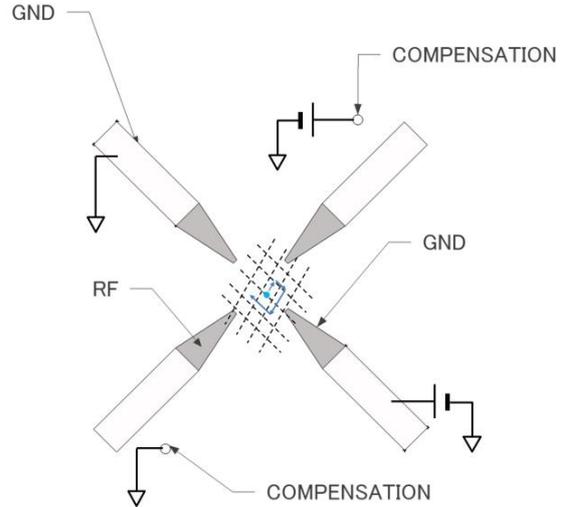


図 3. マイクロモーションの補正方法

マイクロモーションはトラップの極小点にてトラップすることで最小化することが可能である。通常イオンをトラップすると浮遊電場の影響で極小点でトラップされない。そこで外部から電場を印加することでマイクロモーション最小点までイオンを誘導することをマイクロモーションの補正と呼ぶ。なおリニアトラップの場合、RF によって直接駆動される x y 動径方向にマイクロモーションの影響が顕著である。

マイクロモーションの補正は図 3 (z 軸方向からのぞいた図) のように GND 電極と COMPENSATION 電極の二対の電極を用いた。図のように電極の一方を GND に、もう一方は電圧を印加した。二つの電圧を調整す

ることで x y 平面上の任意の点でイオンをトラップすることが可能である。

上に記したようにイオンをトラップ最小点まで誘導する際にマイクロモーションの大きさの指標が必要となる。指標として TAC を用いて蛍光と RF の相関を検出する方法（以下 TAC とする）とパラメトリック共鳴を用いた二種類の方法を使った。

TAC による方法[2]とは TAC (Time amplitude converter) であり、二つのパルス間の時間差に対応する出力を行うデバイスである。イオンの蛍光をスタートパルス、RF 信号の同期矩形波信号の立ち上がりエンドパルスとして TAC に入力し、このパルス間の時間差信号を得る。つまりイオンが蛍光を発するタイミングと RF の位相との相関を検出することができる。TAC による手法は冷却光の入射方向の運動に感度を持つため、 x 軸方向から冷却光を入射することで x 軸方向のマイクロモーションの補正を行うことができる。

この信号を複数回取得し、RF の一周期でヒストグラムを作製した。これを図 4 に示す。図 4 のヒストグラムは異なるイオン位置による三つの結果を示した。それぞれ横軸は時間であり、RF の一周期内の各時間を示し、縦軸は各時間においてイオンが蛍光を発するイベントの頻度を示している。図 4 (a) は 60ns 付近で散乱頻度が高く、150ns 付近で散乱頻度が低いことが見て取れる。このような散乱と RF の位相に相関がみられるときはイオンが RF によって加熱されるため、すなわちトラップ最小点でトラップされていないことを示している。GND 電極値を変化させたときの結果が図 4 (b) である。RF と蛍光の相関がみられない。これは RF の加熱が小さいトラップ最小点でトラップできていることを示している。さらに GND 電極値を変化させてイオンを移動させると図 4 (c) のような結果が得られた。図 4 (a) と (c) は位相が反転していることが見て

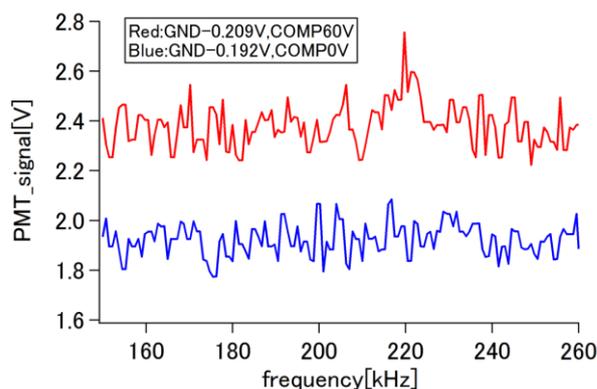


図 6. 動径方向パラメトリック共鳴信号

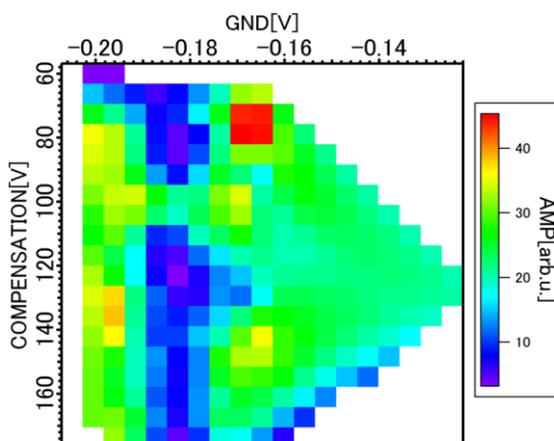


図 5. TAC によるマイクロモーション補正

取れる。これはトラップ位置が最小点を通過して再び加熱される領域に入り、図 4 (a) でのトラップ位置に対して擬調和ポテンシャルの反対側でトラップされていることで加熱されるタイミングが反転しているためである。すなわち、ヒストグラムが平坦になること及びその前後で信号が反転することがマイクロモーション補正の指標とした。

マイクロモーション補正点を

網羅的に探索するため、各電極位置で TAC ヒストグラムを取得し、正弦関数でフィットした際の振幅をプロットした結果を図5に示す。振幅が小さい電極値において RF とイオン蛍光が無相関、すなわちマイクロモーション補正点を示しているといえる。この結果から x 軸方向のマイクロモーションは COMPENSATION 電極値にはあまり依存せず GND 電極値-0.18V 付近に最適点が存在することが見て取れる。

y 軸方向のマイクロモーション補正は y 軸方向から冷却光を入射して x 軸と同様の TAC ヒストグラムの測定を行えば良い。しかし、光学系の都合上 y 軸方向から冷却光を入射することができなかつたため、パラメトリック共鳴を用いて補正[3]を行った。この手法ではトラップに振動を加える事によりトラップ周波数でイオンが共鳴的に振動されることを利用する。ENDCAP 電極に振動電圧を印加した。共鳴周波数ではイオンは加熱されるために散乱断面積が変化し、イオン蛍光に変化が生じる。トラップ最適点では加熱されにくいいため、イオン蛍光の変化がおきづらい、図に典型的な結果を示す。赤と青のデータは異なるイオントラップ位置でのパラメトリック共鳴結果である。赤のデータでは 220kHz 付近に共鳴がみられる。なお今回は動径方向マイクロモーションに注目しているので動径方向のパラメトリック共鳴に注目した。一方、青のデータでは同様の周波数に共鳴が見られない。これはイオンが最適値にトラップされていることにより、加熱されづらくなり共鳴が見えていないと考えられる。この測定を TAC によって得た x 軸最適点付近 GND 電極-0.18V 付近で COMPENSATION 電極値を変えて測定を行った。この結果を図に示した。横軸は COMPENSATION 電極値であり、縦軸はパラメトリック共鳴の振幅である。赤丸のデータ点は振動電圧を 0.15V、赤四角は 0.17V 印加したときの結果である。青線は赤丸のデータの放物線フィットであり、この最低点-10V 付近が xy の両軸のマイクロモーションが補正された点であると考えられる。

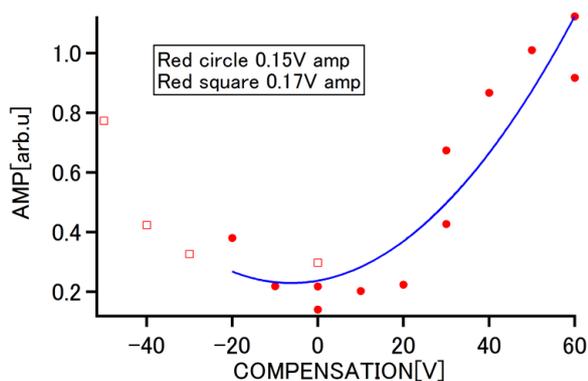


図7. パラメトリック共鳴によるマイクロモーションの補正

3.3. 原子気体の密度分布測定

光ピンセットを用いて原子気体をイオントラップまで輸送した、原子はシングルビームトラップ光の焦点付近に捕獲されるので、レンズをシフトさせ、焦点を移動させることで実現した。図8にイオントラップまで輸送した原子気体の吸収イメージング画像を示す。中心の黒い点が原子気体であり、周囲の十字型の影はイオントラップ電極の影である。輸送できた原子は 10^4 個、28 μ K 程度であった。

輸送されイオンと混合された原子気体は原子イオン間で

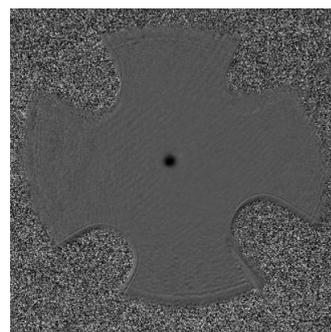


図8. 輸送した原子集団

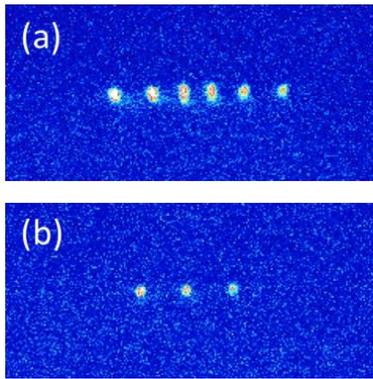


図9. 混合前後のイオン数の変化

散乱を起こす、原子のトラップポテンシャルは数百 μK 程度である、一方でイオンの温度は数十 mK でトラップポテンシャル K オーダー以上であると考えられる。したがって弾性散乱ではイオンはロスしない。一方で混合前後で図9のようなイオン数の変化がみられた。図9(a)は混合前のイオン結晶で6個のCaイオンがトラップされており、(b)は混合後のイオン結晶で3個に減少した。前述の通りイオンは弾性散乱でロスしないのでこれは非弾性散乱の結果であり、別の測定から電荷交換反応であることが判明している。この結果は3回の非弾性散乱によって

イオンが3つロスしていることを示しており、非弾性散乱の単一レベル検出を示している。

非弾性散乱の測定を複数回、典型的に70回繰り返すことで非弾性散乱確率を測定した。原子とイオンの相対位置をイオントラップの外部電場を制御して変え、非弾性散乱確率の測定を行った。結果を図10に示した。図10横軸は原子とイオンの相対位置を示し、縦軸はイオンのロス確率すなわち非弾性散乱確率を示す。赤データ点は実際に測定した非弾性散乱確率である。青線は原子温度と原子のトラップ周波数から予想される原子の密度分布であり、振幅の値をフリーパラメーターとして書いたものである。この2つの結果はよく一致しており、イオンを用いて原子の局所密度プローブを行えたことを示している。測定は3-6個のイオンを用いて行ったため、イオンは軸方向に数十マイクロメートルの拡がりを持っており、図10の結果はイオンの広がった範囲で平均化した密度分布を観測していることになる。

4. まとめと展望

本研究は光トラップ中の原子気体の密度分布をイオンでプローブした。原子の温度と光トラップ周波数から予想される原子密度プロファイルと一致した結果が得られ、密度プローブの妥当性を確認した。

また、密度プローブを行うためにTACとパラメトリック共鳴を用いてイオンのマイクロモーションを補正し、局在させた。

今後の展望として温度やトラップ周波数を変化させてプローブを行い、密度プロービングを確認することやイオン温度を測定し、プローブ分解能を確認することがあげられる。

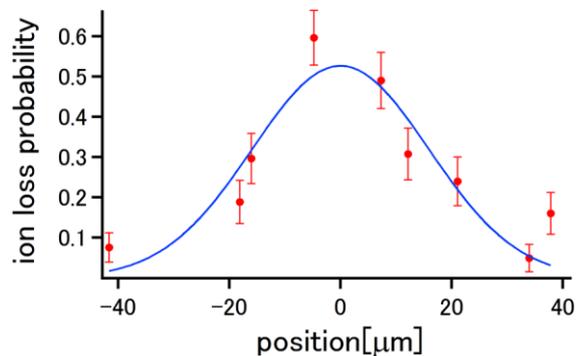


図10. イオンによる原子気体プローブ

- [1] L. Ratschbacher et al, Nature. Physics **8**, 649-652(2012)
- [2] F. Diedrich et al, Phys. Rev. Lett **62**, 403(1989)
- [3] Y. Ibaraki et al, Applied Physics B **105**, 2(2011)