

イオントラップ中でレーザー冷却された

Ca⁺イオンの3次元結晶の観測

量子・物質工学科 0913092 藤永宗和

<背景>

レーザー冷却技術が開発されて以来、イオンや中性原子を冷却する事により得られる極低温物理系が注目され研究が進められている。この物理系では内部自由度、外部自由度、または中性原子に対しては粒子相互作用を自在に操ることが出来る事が大きな特徴として知られている。冷却原子系は周波数標準や量子情報処理、また中性原子に対しては極低温分子の生成などに応用が期待されている。しかし、これまで中性原子とイオンは別々に研究が進められてきた。しかし、近年その2つを同一空間に存在させる極低温イオン・原子混合系が注目されている。当研究室では極低温下でのLiとCaイオンの混合系を目指している。この系では中性原子を冷媒にしたイオンの共同冷却、極低温イオン分子の生成、イオン-原子相互作用を用いて中性原子の局所評価をイオンを通して行うこと、また宇宙空間での化学反応の再現実験が出来ると期待されている。混合系実現のためイオンを空間的に捕獲(イオントラップ)し、冷却していく(レーザー冷却)必要がある。イオントラップでは振動電場を用いて調和ポテンシャルを生成しイオンを捕獲する。さらにレーザー冷却においてイオンが冷却されていくとイオンの運動エネルギーよりクーロンエネルギーが支配的になってくる。そうすると今まで独立に運動していたイオンが相転移をおこしてイオンが空間に整然に配列した結晶の状態になる。しかし、イオントラップはかける振動電場による加熱が大きいため補正電場によるポテンシャルの補正を高い精度で行い振動電場による加熱を最小にしないと結晶化を観測できない。またレーザー冷却は用いるレーザーの周波数の調整がとても重要になってくる。このように実験パラメータを調整していくことがイオンを冷却していくうえで必要不可欠となってくる。特に3次元的にイオンが配列した結晶状態は動径方向に対して空間的広がりが大きいので振動電場による加熱の影響が1次元結晶の時に比べて大きくなる。そのため1次元結晶の時以上に高いポテンシャルの補正が求められる。よってイオンの3次元結晶の観測はイオンが十分冷却されていることを示す指標となる。

<原理・実験方法>

(1) イオントラップ

イオンを空間的に捕獲する方法として本研究室ではリニアトラップを使用している。今回の実験では3つに分かれている電極を2組、ブレード型の電極を2組をそれぞれ対向するようにセットした電極を使用している。この電極を 10^{-7} Paの真空度のチャンバーの中に装着して、さらに3つに分かれている電極の両端にDC電場(本実験ではそれぞれ12Vと9V)をかける事によりZ軸方向を閉じ込め、真ん中の部分にAC電場(電圧3.5V、周波数約3MHz)残りの2組のブレード電極はグラウン



図1: トラップ電極

ドに接続することにより調和ポテンシャルを生成してイオンをトラップする。また振動電場によるポテンシャルを補正するためにブレード電極に補正電極（図1 緑色の線）がついている。

(2) Ca イオンの生成と冷却

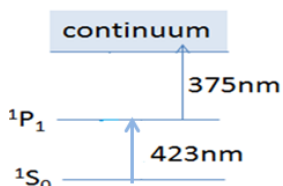


図2 : Ca のイオン化

準位間で 397nm(160μW)の光を用いてレーザー冷却を行う。原子が準安定状態の D 軌道に落ちてしまうことがあるのでその原子を冷却サイクルに戻すために 866nm (1.8mW) の光を使用する。

Ca イオンは電極の中心を貫くようにイオン化光を入射し、それがオープンより放出された Ca 原子と当たる事により生成している。イオン化には図2のように sp 遷移の共鳴光である 423nm (270μW)、p 軌道よりイオン化するため 375nm(4.5mW)の光を用いている。また図3のように Ca⁺イオンの sp

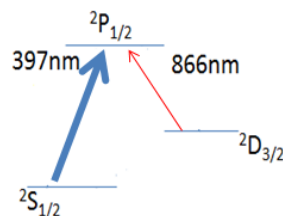


図2 : Ca⁺の冷却サイクル

(3) 結晶化

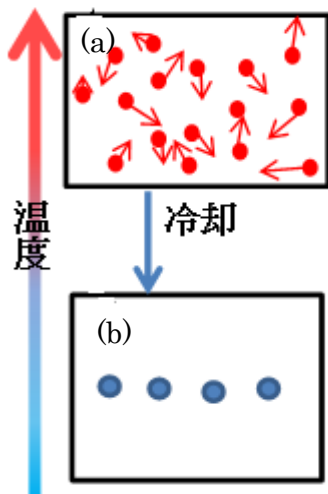


図4 : イオン結晶化の直観図

イオンを捕まえたただだとイオンは図4の(a)のように各イオンが独立に運動（雲状の状態）して運動エネルギーも高い状態にある。レーザー冷却が進みイオンの温度が下がってくると運動エネルギーに対してクーロンエネルギーが支配的になってくる。特に、

$$\Gamma = \frac{\text{イオン間のクーロンエネルギー}}{\text{イオンの運動エネルギー}}$$

で定義されるプラズマ結合パラメータが約 170 を超えるとイオンが空間に整然と配列した結晶の状態に相転移すると知られている。

今回目標としている3次元結晶は図4(b)のような1次元結晶に比べて空間的な広がり大きい。空間的な広がり大きいので振動電場の影響を受けやすくなり加熱されやすくなる。その加熱を抑えるため電極にかける DC、AC 電場、レーザーの周波数、補正電場などを1次元結晶の時以上に細かく調整する必要がある。

電極にかける DC、AC 電場、レーザーの周波数、補正電場などを1次元結晶の時以上に細かく調整する必要がある。

(4) ポテンシャルの補正

ポテンシャル補正の直観図を図5として示す。電極の中心（振動電場の影響がない、また4本のレーザー光が貫く場所）を原点にとっている。Ca イオンは電極中心に調和ポテンシャルによりトラップされているのが振動電場によるマイクロモーションの影響がなく、またレーザー冷却が一番効率よく進むので理想的（図5の上段一番左）であるが、実際は浮遊電場やトラップ電極の対称性の崩れなどの原因により中心からずれた位置にポテンシャル（図5の上段一番右）が生成されその最下点にCaイオンがトラップされる。このポテンシャルにトラップされた時、実際の振動電場によるポテンシャルでみるとトラップ中心から外れていることになる。そうなると振動電場によるマイクロモーションの影響が大き

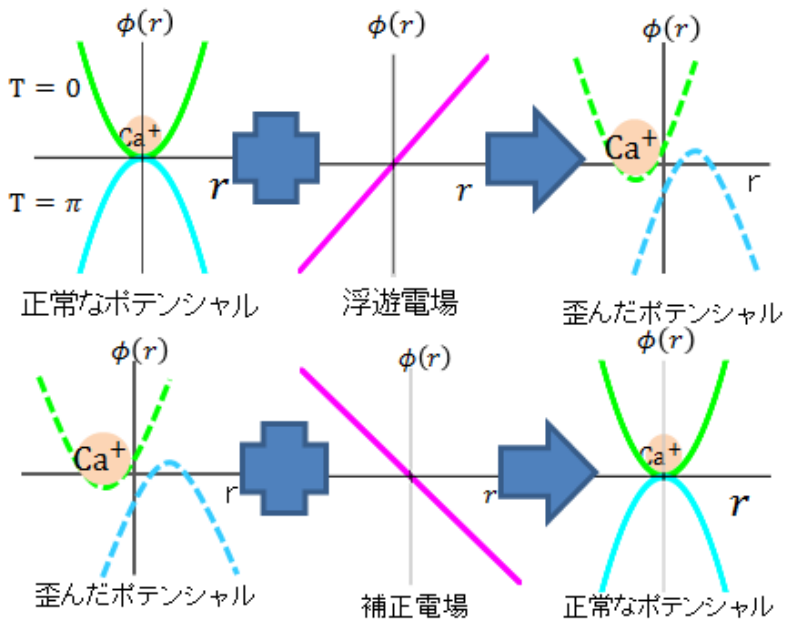


図5：ポテンシャルの補正

くなり加熱の要因にもなってしまいレーザー冷却も効率よく進まない。ポテンシャルの位置を補正し振動電場によるポテンシャルの最下点に Ca イオンがトラップされるようにする。このように加熱を最小限に抑えるために補正電極を使用するのが必要不可欠である。特に3次元結晶は1次元結晶に比べて空間的広がりが大きいので加熱されやすく、より高い精度でポテンシャルの補正が求められる。

(5) 蛍光スペクトルの観測

冷却光 (397nm) がイオンに当たって起きる散乱光をレンズを用いて集光して光電子増倍管 (PMT) で蛍光量を観測した。その際に冷却光は共鳴周波数より低周波数側より掃引しながら蛍光を観測した。図6に観測された蛍光スペクトルの結果を示す。横軸が冷却光の周波数、縦軸が 397nm の散乱の蛍光量である。実際の実験では蛍光量を PMT で電圧に変換してオシロスコープで観察している。イオンの温度が高い場合はイオンが大きい速度を持っているのでドップラー効果によりイオンが感じる共鳴周波数が変化 (ドップラーシフト) して図6(a)のような広がりをもったスペクトルが観測された。PMT の積算時間が短かったので角ばったスペクトルになった。この波形を観測しながらスペクトルが共鳴周波数付近で細く高くなるようにイオンの数を減らし、電極にかける DC、AC 電場の強さやレーザー光が電極の中心を貫くようにパスの調整、レーザーの周波数の調整、補正電場の調節を緻密に行った。その結果、図6(b)のような共鳴周波数付近で細く高いスペクトルを観測できた。また共鳴周波数を過ぎると、急激にイオンの蛍光が減少する非対称なスペクトルが観測されるがこれはレーザーによる加熱が起こるからである。Aの地点が結晶化の場所である。結晶化によりドップラー広がりが減少したために蛍光量が下がっている。共鳴周波数付近で蛍光量が大幅に増えているのは結晶化により散乱断面積が増えたからである。

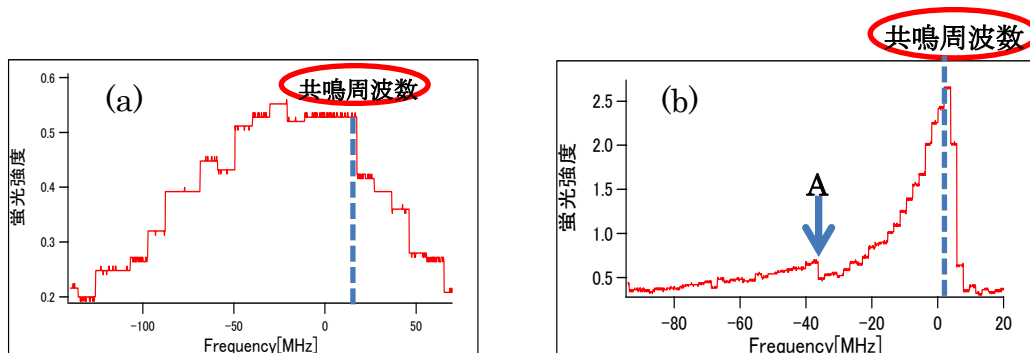
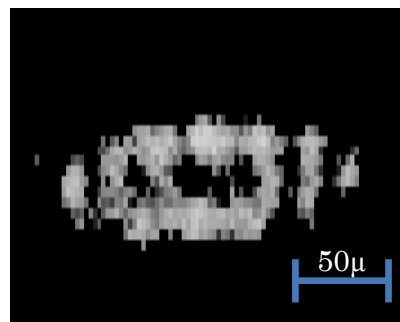


図6：イオンの蛍光スペクトル

<実験結果>

397nm の光がイオンに当たって起きる散乱光をレンズを用いて集光して、その蛍光を高感度の CCD カメラを用いて観測した。使用したレンズは Thorlabs 社の平凸レンズ ($f = 50 \text{ mm}$)、モリテックス社のテレセントリックレンズ (MML8-ST65DS)、Thorlabs 社の非球面レンズ (Best form レンズ) の3つのレンズを使用した。初め平凸レンズを用いて観測を行っていたが、倍率を稼いでいくと全体がぼやけてうまく観測できなかった。レンズの収差が原因でないかと考えて、収差が小さいテレセントリックや



非球面レンズを使用して観測を行った。図7に観測した中で一番きれいなイメージング画像(積算時間10秒、モリテックス社のテレセントリックレンズ使用)を得られた。白く光っているのがイオンである。また高性能 CCD カメラについて1 pixel が $16 \mu\text{m}$ で3次元結晶の広がり横約80 pixel、縦約13 pixel、倍率8倍より計算してイオン間距離は縦横約 $25 \mu\text{m}$ であることを求めた。また1次元結晶に比べて動径方向に広がりを持っていることもわかる。

図7：イオンの3次元結晶

<今後の展望>

過去の論文などを参考にしてもレーザー一周波数のある一点で突然蛍光が下がっているスペクトルを観測できたことは十分イオンの冷却が進み結晶化しているのは間違いないので今後は、より収差の少ないレンズを使用したり遮光をより完璧にするなどのイメージング系の改良を行い、倍率と分解能を上げてイオン各々がはっきりとわかり、また奥行方向についてもわかるようにしていきたい。

また極低温下での Ca イオンと Li 原子の混合系を構築しイオンや原子が衝突によりロスされていく過程(散乱レート)の測定などを行いたい。その過程を計算するためにイオンの密度が必要になる場合がある。ここでイオンの密度はイオンの数が多く温度が高い場合には蛍光イメージングでは誤差が大きくなり正確な値を得るのが難しい。しかし、イオンを結晶化させればイオンの個数が正確にわかり密度もわかるようになる。今回、卒研で身に着けたイオンの結晶化の技術を用いて混合系の実験を進めていきたい。またイオンと原子の衝突で電荷移動を起こし Ca イオン結晶の中に Li イオンが存在しているようなイオン結晶の観測なども行いたい。

<参考文献>

現在物理最前線<3> 共立出版

占部 伸二(著) 町田 茂(著) 高柳 英明(著) 大槻 義彦(編集)