

極低温原子-イオン混合系における散乱特性評価

電気通信大学 情報理工学研究科 先進理工学専攻

向山研究室 畑聡祐

背景・目的

磁場(ローレンツ力)、光を用いて捕獲・冷却された中性原子は、温度、粒子間相互作用、内部自由度、外部自由度を自由にコントロールすることが出来ることから、さまざまな多体物理問題の解明を可能にする物理系と言える。また電場(クーロン力)、光を用いて捕獲・冷却されたイオンは、内部自由度・外部自由度を自由に制御することが出来るという非常に優れた量子物理系である。それ故、イオンおよび中性原子はそれぞれ盛んに研究され、驚異的な発展を遂げている。しかし近年、これら二つの異なる物理系を融合することにより、これまで実現することが困難であった研究フィールド(極低温イオン-原子混合系)が注目され盛んに研究されている[1][2]。このような物理系ではイオンを用いた量子縮退気体の局所的なプロービングやイオン-原子間相互作用による共同冷却などへの応用が期待されている。我々は2010年からこのイオン-原子混合系の実現を目標に研究を行ってきた。本研究では、リニアイオントラップ中で捕捉されたカルシウムイオンと光トラップ中のリチウム原子気体を混合し、極低温下でのイオン・原子間衝突や化学反応を調べることを目的としている。そのために、単一または少数のイオンがドップラー限界まで冷却することができるリニア・ポルトラップと、冷却された原子集団を同時に同一空間に実現できる装置を構築することを目標に研究を進めてきた。将来的には、イオンと原子気体を同一空間上で重ね合わせ、イオン-原子間の弾性散乱の観測とその散乱特性について調べる。

本研究の特徴

本研究の特徴は「(イオン種の質量>原子種の質量)で大きな質量比があるイオンと原子の組み合わせを選択している」という点である。ここ数年間のイオンや中性原子の冷却技術の進歩によって極低温イオン・原子混合系が実現されるようになり、極低温下での原子-イオン間相互作用の観測等が近年報告された[2]。しかしながら、極低温領域では最低次部分波のs波散乱が支配的になるが、s波散乱のみの領域に関しては未だ観測されておらず、イオン捕獲のためのRF電場による混合系へのエネルギー流入が冷却の大きな妨げとなることが指摘されている。RF電場の影響はイオンと原子の質量比に大きく依存し[3]、質量比の大きなイオン・原子の組み合わせを用いて実験を行う必要があることがわかった。従来、混合系に関する研究で用いられてきた主な原子・イオンペアと本研究で用いている $^{40}\text{Ca}^+$ 、 ^6Li を比較すると(表1)、以前の混合系ペアと比べて大きな質量比を持つ組み合わせ

であることがわかる。理論的予測によると ${}^6\text{Li}-{}^{40}\text{Ca}^+$ 混合系においては RF 電場によるエネルギー流入量が従来のイオン・原子ペアと比較して大きく抑制できることが計算され、これより本研究で用いるイオン・原子ペアは格段に有利であると言える。また、イオン・原子の質量比が大きければそれだけ s 波散乱領域と古典散乱領域の衝突エネルギー閾値が高くなることが分かっており、 ${}^6\text{Li}-{}^{40}\text{Ca}^+$ の組み合わせは有利である。そのため、本研究では他グループのイオン-原子混合系では到達することが難しいと予想される極低温散乱の観測の可能性がある、 ${}^6\text{Li}-{}^{40}\text{Ca}^+$ の組み合わせは研究を進める上で好ましい組み合わせであると言える。

表 1. 他グループとの比較

| イオン種 | 原子種 | 混合系へのエネルギー流入量 | s 波散乱領域のエネルギー閾値 |
|-----------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| ${}^{174}\text{Yb}^+$ | ${}^{87}\text{Rb}$ | $540\mu\text{K}$ | $0.044\mu\text{K}$ |
| ${}^{138}\text{Ba}^+$ | ${}^{87}\text{Rb}$ | $150\mu\text{K}$ | $0.053\mu\text{K}$ |
| ${}^{174}\text{Yb}^+$ | ${}^{40}\text{Ca}$ | $32\mu\text{K}$ | $0.28\mu\text{K}$ |
| ${}^{40}\text{Ca}^+$ | ${}^6\text{Li}$ | $0.5\mu\text{K}$ | $10.6\mu\text{K}$ |

実験装置

リチウム原子とカルシウムイオンを混合させるための実験装置の概略を図 1 に示す。冷却された原子とイオンは同一チャンバー内で捕獲する。このチャンバーには、イオンポンプとチタンサブリメーションポンプを取り付け真空度 $4 \times 10^{-11}\text{Torr}$ の超高真空に保たれている。リチウムオープンから放射した原子線は、ゼーマン減速器により減速され、チャンバーの中心で磁気光学トラップ(MOT)により捕獲される。その後、MOT に非共鳴光をオーバーラップさせる事により光双極子トラップ(ODT)に移行する。ODT 光はイオントラップのトラップ軸方向に入射している。イオントラップは MOT の位置から 5cm 離れた位置に取り付けてあり、原子を ODT に移行した後、光ポテンシャルの極小点を変位させる事により

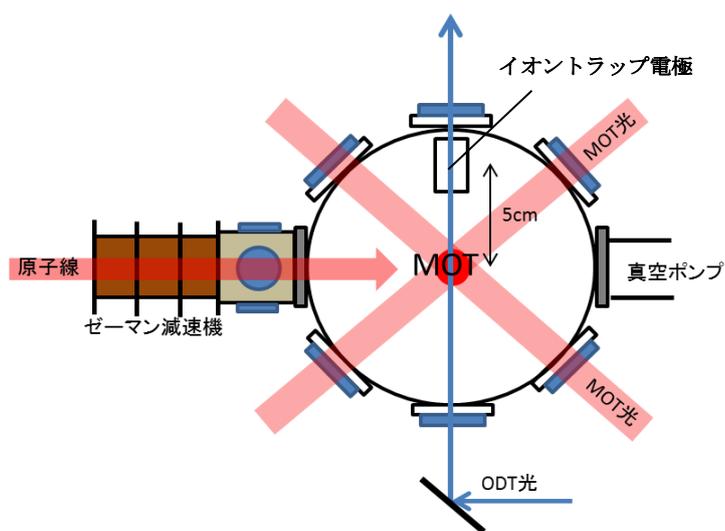


図 1. 実験装置概略

イオントラップ電極の領域まで原子集団を輸送する。本研究ではエアベアリングステージを用い、ODT 光の焦点を移動させている。イオントラップ装置は四枚のブレード型の RF 電極と二個の円柱型のエンドキャップ電極、また電場を補正しマイクロモーションを抑えるための電極から構成されている(図 2)。トラップされたイオンはドップラー冷却で冷却した後、リチウムを輸送し混合させる。

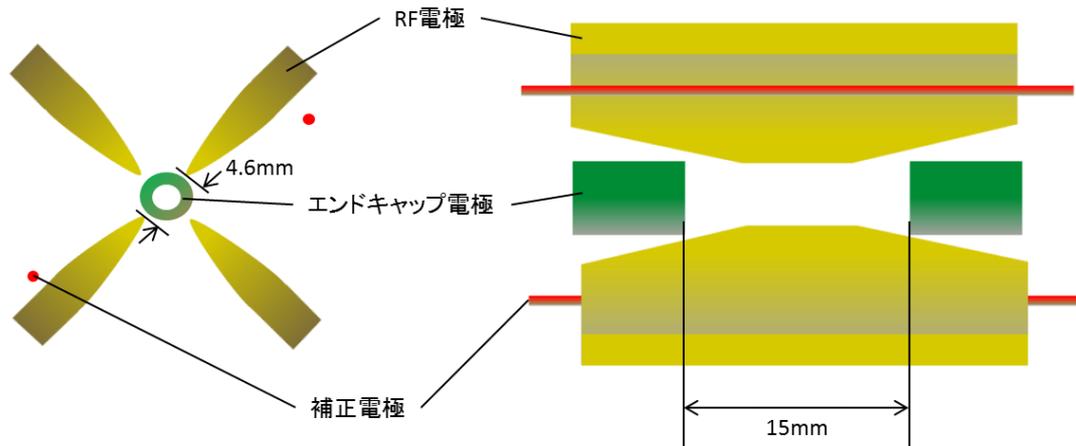


図2. イオントラップ電極

リチウム原子トラップ

原子をヒーターで加熱することで昇華させ原子線を得る。Li オープンを 500°Cまで加熱し原子線を飛ばす。ゼーマン減速器を用いて原子を減速させ MOT へロードしやすくしている。ゼーマン減速器に入射するビームの出力は 130mW で使用した。またゼーマン減速器を通過し減速された原子はチャンバーまでに広がってしまう。その原子に対し、共鳴光に対して 30MHz の負の離調をつけたコリメート光を 4 方向から入射することで原子の広がりを抑制している。この時のビームウエストは 10mm 程度でパワーは 8 mW を入射した。

ゼーマン減速器を通り抜けてきた原子は磁気光学トラップで捕獲される。MOT は原子を捕獲するための技術の一つであり、冷却原子研究に多大な貢献をもたらし、現在も数多くの研究グループが用いている。アンチヘルムホルツコイルが作る磁場の向きに対して負に離調した σ^- 偏光の光を入射すると磁気光学トラップが実現する。本研究では共鳴光に対して 30MHz の負の離調をつけた σ^- 偏光の MOT 光を六方向から入射した。MOT 光は光強度を均一にするように MOT 直前でビーム径を調整した。MOT 光はファイバー直後で 100mW、各方向に 20mW 程度入射した。 ${}^6\text{Li}$ の冷却に寄与するのは $|F = 3/2, m_F = -3/2\rangle \Rightarrow |F' = 5/2, m'_F = -5/2\rangle$ のサイクリック遷移である。また $F = 1/2$ に落ちて冷却サイクルから脱落した原子を $F' = 3/2$ を経由して再び $F = 3/2$ に戻すためのリポンプ光が EOM によって MOT 光に混ぜられている。

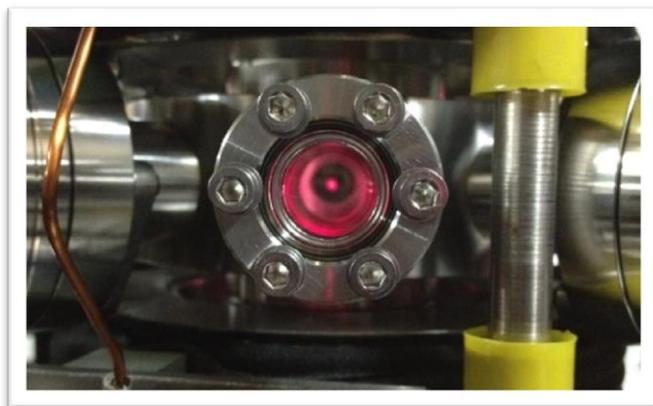


図3. MOT 蛍光画像

図3は MOT の蛍光の写真である。MOT は原子の吸収・放出過程を利用するのでトラップが形成されている時には蛍光が目視出来る。オープンから飛んできた原子 ($T=700\text{K}$) はゼーマン減速器を通過し MOT で約 1 mK まで冷却され、約 10^8 個の原子が捕獲される。

MOTの次の光双極子トラップ(ODT)は、位相空間密度を上げるためにMOTよりもトラップ体積が小さくトラップ深さも小さい。そのためMOTを圧縮することで(CMOT)、ODT

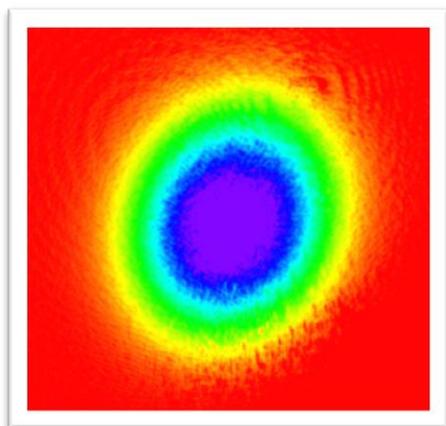


図 4. CMOT の吸収イメージ画像

への移行効率をあげる。CMOTはMOTのトラップ中心の密度を大きくすること、原子集団の温度を低くすることを目的とし、本研究では磁場勾配を上げ、冷却光の離調を $-\Gamma/2$ に近づけることでCMOTを行っている。光学配置の都合上、MOT光の周波数変化がリポンプ光の周波数にも影響を与えるので、これを補正するために同時にEOMの周波数も変化させている。図4はCMOTの吸収イメージ画像である。原子数 10^8 個、温度 $280\mu\text{K}$ の原子集団を得た。

次に光双極子トラップへ移行する。方法としてはMOTにIR光を絞り込めば良い。まず $F=1/2 \rightarrow$

$F=3/2$ の共鳴光をIR光と同じパスから入射させ、原子雲に絞り込む。そうすることで、原子雲の蛍光が絞られたイメージングリポンプ光で貫かれたような形になる。これにより原子雲の位置、方向を知ることが出来る。そのイメージングリポンプ光とIR光を重ね合わせることで、原子雲にIR光をオーバーラップさせた。IR光は 1064nm 、 15W 、ビームウエスト $38\mu\text{m}$ で使用し、その時のトラップ深さは 0.43mK である。

光双極子トラップへ移行した後、ビームの焦点を移動させることで原子雲をイオン側へ輸送する。焦点を移動させるためにAEROTECH社のエアベアリングステージ「ABL15050」を使用した。このエアベアリングステージにレンズを乗せ、レンズをエアベアリングステージで動かす事で焦点を移動させる。チャンバ直前のレンズを動かすのがシンプル(ステージを動かした距離だけ焦点も移動する、焦点のビーム径が変わらない)で一番良いが、光学常盤のスペース上不可能である。本研究ではレンズ3つを使用し、レンズ配置を設計した。図5に光学配置の模式図を示す。

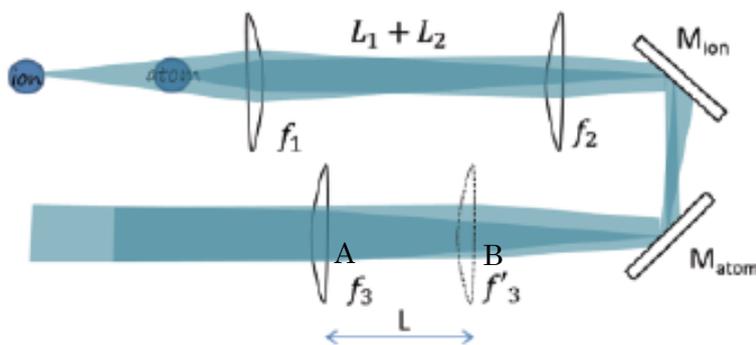


図 5. キャッツアイ配置を利用したレンズ配置：Aがレンズの初期位置(MOTの場所に焦点がある)、Bがレンズの最終位置(Ionの場所に焦点がある)である

このレンズ配置はキャッツアイ配置を利用した配置で、ミラー上に焦点があることが重要である。そのためレンズ動かす距離とミラー M_{ion} – M_{atom} 間の距離は同じである。まず初期位置 A にレンズがあるとき、コリメート光が f_3 を通過し焦点が絞られる位置にミラー M_{atom} を配置し、atom に焦点がある。この時 M_{atom} を動かしても atom での焦点は動かないためここでのアラインメントは M_{ion} のみで決まる。次に距離 L レンズを動かし最終位置 B にレンズがあるとき、コリメート光が f'_3 を通過し焦点が絞られる位置に M_{ion} を配置し、ion に焦点がある。この時、 M_{atom} のみで ion の位置が決まるが、 M_{atom} を動かしても、レンズを移動させる前のアラインメントはずれない。この事からもわかるように atom、ion でのアラインメントがそれぞれ M_{ion} 、 M_{atom} と独立に行うことが出来る。

MOT から光双極子カトラップに移行した後、エアベアリングステージを動かし光双極子トラップポテンシャルの極小点をイオントラップまで変位させることで、輸送する。図 6 はイオントラップ装置中心におけるリチウム原子の吸収イメージ画像を表しており、光ピンセットによる原子輸送が行える事が確認出来た。輸送後の原子数は 1.7×10^5 個である。本研究では、原子を MOT で捕獲した後、光双極子カトラップに移行し、光ピンセットの手法でイオン側へ輸送する事が出来た。イオントラップ電極越しに ODT を観測できたことで、イオン・原子混合系を構築するにあたって原子の準備はここまでである。

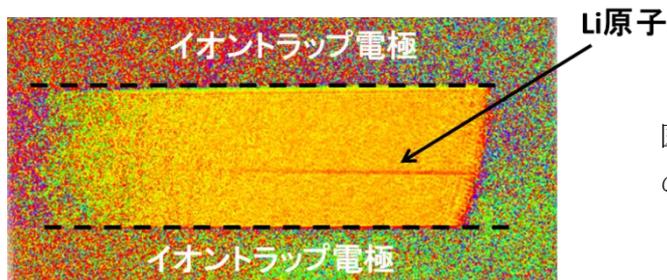


図 6. 輸送後の光双極子トラップの吸収イメージ画像

イオントラップ

本研究ではイオントラップ装置により電場ポテンシャルの極小点を生成することによってイオンの補正を行う。本研究ではリニアトラップを選択している。エンドキャップ電極間距離は 15mm、RF 電極間距離は 4.6mm である。電極は原子トラップで必要になる磁場の影響を受けないようにするため、素材はアルミニウムで出来ている。

原子線は金属 Ca をジュール熱で加熱し原子を気化させることで得ている。本研究では二つの光を用いてイオンの生成を行った。Ca の sp 遷移の 423nm と p 状態から連続状態までの 375nm のレーザー光を用いた。p 状態から連続状態は 390nm より波長の短いものであればよい。光イオン化のメリットとしては同位体を選択してイオン化が可能な点、イオンの生成・ローディングの効率が良い点が挙げられる。

Ca^+ をイオントラップ中にロードする際は Ca オープンから放出された Ca を光イオン化 (423、375nm) レーザーを同時照射する。トラップされたイオンは $S_{1/2}$ - $P_{1/2}$ 遷移を用いて Doppler 冷却する。その時の Doppler 限界は $490\mu K$ である。また Doppler 冷却時にイ

オンは励起準位から自然放出するため、その蛍光を、光電子増倍管およびCCD 撮像素子を用いて観測した。イオン化(423nm、375nm) および冷却(397nm、866nm) はすべて同軸で重なり、トラップ中心で焦点を結ぶようにアラインメントする。

本研究では、リニアトラップにより捕獲、ドップラー冷却により冷却することでイオンの一次元クーロン結晶を観測している。これにより、イオンは安定に捕獲、冷却出来ているとして、イオン-原子混合系を構築するにあたってイオンの準備はここまでである。

イオン-原子混合

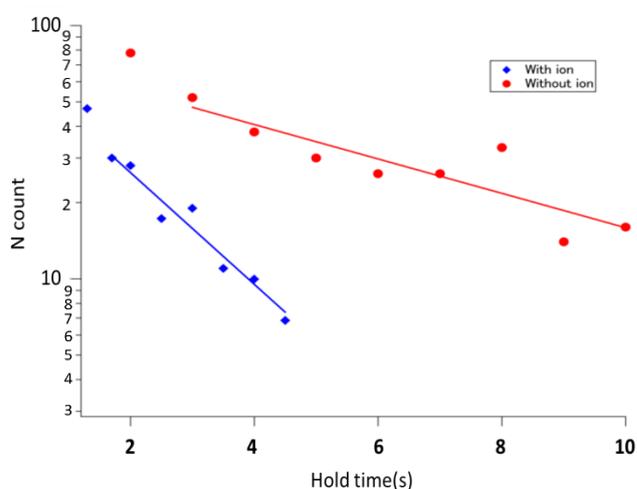


図7. 原子のロス曲線：赤線は原子のみでトラップし寿命を測定した。青線はイオンと原子を混合させ原子の寿命を測定した。

は個数・温度・密度が正確にわかるため、散乱断面積など見積もることが容易になる。結晶化したイオンと原子の混合で、問題となることの一つとして、原子のロスを観測出来るかどうか重要である。それはイオンの数と原子の寿命によって決まる。原子の寿命の間にイオンとの散乱を観測しなければならないということである。そのためには、出来るだけ多くのイオンで構成される結晶化を準備する必要がある。

上記の方法によりイオンと原子を混合させる。図7は原子のロスを示すものであるが、イオンと混合させているほうが、原子のロスが早いことがわかる。これはイオンと原子の衝突によって、原子がイオンからエネルギーを受け取り、原子がトラップからロスしている事を示す。この事から、混合系を構築できたと言える。またこの時のイオンは結晶化しておらず、クラウド状のイオンである。今後の課題として、より低エネルギーでの衝突を観測する必要がある。結晶化したイオン

[1]C. Zipkes, S. Palzer, C. Sias, and M. Köhl, Nature **464**, 388 (2010).

[2]Stefan Schmid, Arne Härter, Johannes Hecker Denschlag, Phys. Rev. Lett.**105**, 133202 (2010).

[3] Marko Cetina, Andrew T. Grier, and Vladan Vuletic, Phys. Rev. Lett.**109**,253201 (2012)