

レーザー冷却中性原子・イオン混合系で探求する極低温原子イオン間衝突 Ultracold collisions in a hybrid system of laser-cooled atoms and ions

向山敬

Takashi Mukaiyama

大阪大学大学院基礎工学研究科, 大阪大学量子情報・量子生命研究センター
Department of Engineering Science, Osaka University,
Quantum Information and Quantum Biology Division, Osaka University

1 本文

通常, 化学反応を起こす際に温度を上げれば反応速度が上げられることを我々は経験的に知っている。「温度を上げると反応速度が上がる」という法則はアレニウス則と呼ばれ, 化学反応過程が系の温度と活性化エネルギーの比較から反応速度が議論できるという古典的な状況においてよく成り立つ。さて, それではより低温の, 粒子の波動性が利いてくる温度領域ではどうだろうか。極低温における非弾性散乱過程は宇宙空間における化学反応の観点からこれまで研究が進められており, 分子線を平行に走らせることにより反応物の相対速度を落とす技術を適用することでミリケルビン程度のかんりの低温領域に到達することができ, 化学反応速度に反応物の量子性(波動性)が現れた結果としてアレニウス則から外れるということが確認されている。さて, ミリケルビンよりさらに低温のマイクロケルビンという温度領域ではどうであろうか。このマイクロケルビンという温度は冷媒を用いて実現できる温度ではなく, また前述の平行分子線の技術を適用しても到達することは難しく, 極低温化学反応の研究においては未開拓の領域となっている。

そのような背景の中, 我々はレーザー冷却の手法により生成した極低温の中性原子気体とイオンに着目し, その両者を混合させることにより生じるさまざまな衝突過程について研究をおこなっている。レーザー冷却の手法を用いると中性原子気体をマクロケルビン程度の極低温にまで冷却することができ, そのような温度領域ではボースアインシュタイン凝縮やフェルミ縮退といった量子凝縮現象が発現することが知られている。また, イオン系についてもプラズマの物理や量子情報処理, 超精密計測などこちらもさまざまな観点から興味を持たれている系である。この個別に研究に用いられ, 発展を遂げてきた両者の系を混合した極低温原子イオン混合系では, 原子イオン間相互作用は中

性原子同士に比べると比較的長距離の相互作用となるため, 弾性散乱断面積, 非弾性散乱断面積とも大きく増大することが期待される。そしてマイクロケルビンといった温度領域に達した時に, 原子の持つ量子統計性(ボース・アインシュタイン統計/フェルミ・ディラック統計)が化学反応(非弾性散乱)過程に影響を及ぼすことが予想されるが, そのような極低温における化学反応過程は未開拓の領域である。そこで我々は精密に制御されたレーザーによる冷却技術を駆使することで原子系とイオン系において極低温の状態を実現し, 原子とイオンを混合させた際に起こる化学反応を含めた散乱過程について詳細に調べることを目的として研究を行なっている。

マイクロケルビンの温度領域で原子とイオンを相互作用させるためには真空装置内の同一空間にトラップする必要があるが, イオンと原子では電荷の有無の違いにより, そのトラップ機構が大きく異なる。実験装置の概略を Fig. 1 に示す。本研究で用いる $^{40}\text{Ca}^+$ イオンは二対の RF 電極から成るリニア型イオントラップを用いて Fig. 1 の右側の領域 (Ion chamber) に捕獲される。イオントラップでは電極に RF 電場を印加することで電場の極小点を形成し, イオンをその中心にトラップすることができる。さらにトラップされたイオンをレーザー冷却することで単一イオンから数十個程度のイオンからなるクーロン結晶を準備することができる。イオンの個数, 温度などの情報はレーザー冷却時にイオンが放出する蛍光を高感度 CCD カメラや光電子増倍管 (PMT) で検出することで得られる。またこの際にイオンは数ミクロンオーダー以下の非常に小さな空間領域に局在化することとなる。

一方, 中性原子として本研究では Li 原子を用いるが, Li 原子は光トラップ(いわゆる光ピンセット技術)にて捕捉される。原子オープンからの熱原子ビームは対向するレーザー光を吸収することで減速され, Fig. 1

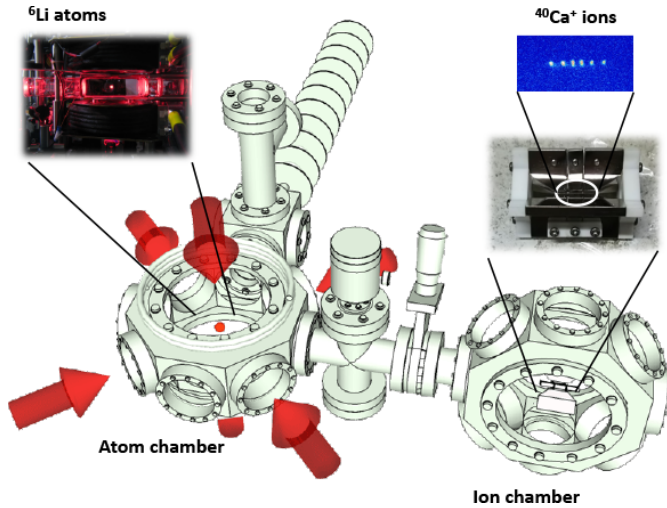


Fig. 1: 実験セットアップ

の左側の領域 (Atom chamber) に磁気光学トラップという手法で捕獲されたのちに冷却される。その後原子は光トラップへと移行され、さらに高精度なスライドステージ上に配置されたレンズを移動することで光トラップ中心位置を動かし、極低温の原子気体を原子チャンバー側からイオントラップチャンバー側へと輸送する。この時点での原子気体の温度は5マイクロケルビン程度、原子数は 2×10^4 個程度である。最終的にイオントラップ電極の中央で原子気体と冷却イオンの混合系が生成される。実際の実験では、イオンと原子を相互作用させたときの状態変化 (イオン数や原子数、温度、振動周波数など) を観察することで、衝突レートを測定し散乱特性の評価を行う。特にイオンの状態を高精度で観測可能であるので、イオン原子間の散乱を単一粒子レベルでとらえることができるという利点がある。

これまで我々はケルビンからミリケルビンの温度領域において原子イオン間の弾性散乱と非弾性散乱の観測に成功している。非弾性散乱が起きた後にトラップ中に反応後のイオンが残る条件やその反応生成物イオンの質量分析をすることにより、非弾性散乱が電荷交換反応であることを突き止めた [1]。また、このことがポテンシャルエネルギー曲線の計算による準位の交差の様子から理解できることを理論研究者との共同研究により明らかにした。Fig.2 に典型的な電荷交換の様子を示す。原子と混合する前 (a) と後 (b) のイオンの蛍光画像から、6 個のイオンのうちの3 個が電荷交換によって失われたことがわかる。(c) には蛍光量の推移を示しており、イオンが一つずつ電荷交換反応により失われていく様子が見てとれる。さらに衝突エネルギーを決めている要因がイオンの運動エネルギーで

あることに着目し、イオンの運動エネルギーを制御する方法を新たに開発することで非弾性散乱断面積の衝突エネルギー依存性の詳細な測定を行った [2]。この測定により、イオンの内部状態に依存して2回~5回の近接衝突のうち一度電荷交換が生じるということが突き止められた。また、極低温の中性原子気体を用いたイオンの冷却にも挑戦しており、1ケルビンの温度領域における共同冷却の効果の観測にも成功している [3, 4]。この結果から1度の弾性衝突につき30%程度イオンが運動エネルギーを失うことがわかった。このように一度の衝突において生じる内部状態やエネルギーの変化が正確に評価できる点が原子イオン混合系の利点である。本講演ではそれらの研究結果について紹介する。

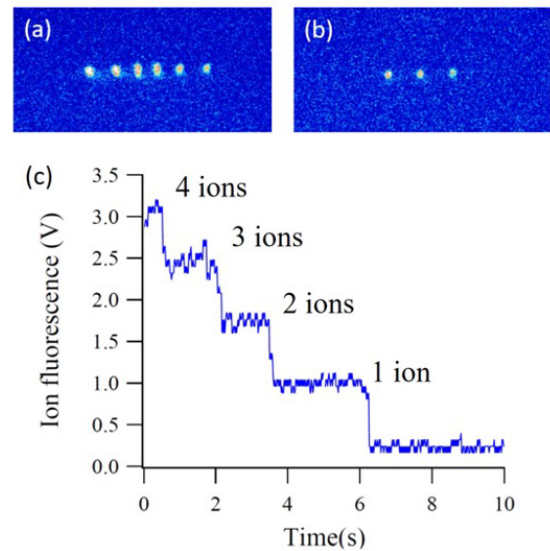


Fig. 2: 原子とイオンを混合する前 (a) と後 (b) のイオンの蛍光画像。(c) は原子とイオンを混合している際の蛍光信号の推移。

References

- [1] S. Haze, R. Saito, M. Fujinaga, and T. Mukaiyama, Phys. Rev. A **91**, 032709 (2015).
- [2] R. Saito, S. Haze, M. Sasakawa, R. Nakai, M. Raoult, H. Da Silva Jr., O. Dulieu, and T. Mukaiyama, Phys. Rev. A **95**, 032709 (2017).
- [3] S. Haze, S. Hata, M. Fujinaga, and T. Mukaiyama, Phys. Rev. A **87**, 052715 (2013).
- [4] S. Haze, M. Sasakawa, R. Saito, R. Nakai, and T. Mukaiyama, Phys. Rev. Lett. **120**, 043401 (2018).