

${}^6\text{Li}$ - ${}^{40}\text{Ca}^+$ 間の電荷交換散乱断面積のエネルギー依存性の測定

向山研究室

笹川瑞樹

1 背景と目的

背景

レーザー技術の発展により原子の温度を極低温まで冷却することや内部状態を高い精度で制御、空間に安定的に捕獲することが可能となった。原子間の相互作用は粒子間距離の -6 乗に比例し、トラップ中に多数個の原子を捕獲することが可能である。そのため冷却原子系では集団的な量子現象の解明に期待されており、超流動現象などの研究が行われている。これに対して冷却イオン系では単一の粒子の量子状態を観測することが期待されている。これはイオンが持つクーロン力によって相互作用が粒子間距離の -1 乗に比例し、同一のトラップ中に少数個捕獲することができるためであり冷却原子系との大きな違いである。これにより冷却イオン系は量子情報処理に期待され研究されている。

近年ではこのように別々に発展してきた原子とイオンを同一空間上で扱う原子-イオンの混合系が注目されている。原子-イオン間の相互作用は粒子間距離の -4 乗に比例し、原子-原子やイオン-イオンとは異なる相互作用での研究されている。

目的

我々のグループの目的は量子領域における原子イオン間の化学反応の観測を行うことであり、量子的な振る舞いが観測される散乱エネルギーは 10 マイクロケルビン以下とされている。現在我々の実験系ではドップラー冷却を用いてリチウム原子・カルシウムイオンの冷却を行っており、それぞれ数マイクロケルビンと数ミリケルビンまで冷却が可能である。また観測される散乱現象は電荷交換散乱であることが別の研究 [1] によって分かっている。そこで本研究の目的は量子領域前までのリチウム原子-カルシウムイオン間の電荷交換散乱断面積のエネルギー依存性の測定である。

2 原理

ランジュバン散乱

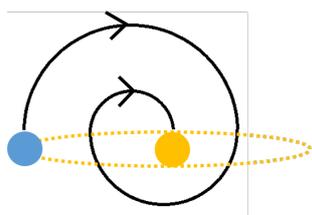


図1 Langevin 衝突

2体の散乱現象は「引力ポテンシャルに捕まり近距離で衝突する散乱」と「引力ポテンシャルに捕まらずに運動方向だけ変化させる散乱」の2種類に分類することができ、粒子間距離が近距離となる散乱をランジュバン散乱という。この2種類の散乱を分ける条件は遠心力と引力から求められる散乱断面積によって決まっており、2粒子の散乱が散乱断面積内で発生する時ランジュバン散乱が発生する。

原子イオン間の散乱を考える時遠心力は原子イオンそれぞれの相対的な運動によって決まり、引力は原子イオン間の相互作用から求めることができるので、ランジュバン散乱断面積は

$$\sigma_{\text{Langevin}} = \pi \times \sqrt{\frac{2C_4}{E_{\text{col}}}} \approx 4.6 \times 10^{-28} \times E_{\text{col}}^{-\frac{1}{2}} \quad [m^2] \quad (1)$$

電荷交換散乱



本実験で観測される電荷交換散乱とは式 (2) で表される散乱である。粒子間を電子が飛び移る現象であるからこの散乱は粒子間距離が近距離となる散乱に分類され、ランジュバン散乱をしていることがわかる。これより電荷交換散乱断面積もランジュバン散乱断面積と同じエネルギー依存性を持つことが予想される。

マイクロモーション

カルシウムイオンはポールトラップと呼ばれる交流電場を用いて荷電粒子を空間的に閉じ込める技術を利用して捕獲した。本研究で用いたポールトラップの構造は以下の図 2(a) の通りであり、図 2(c) はトラップ中のポテンシャルの変化を 1 次元方向のみ取り出した図である。RF 電極に交流電場をかけトラップ中のポテンシャルが図 2(c) のように変動させることによって荷電粒子にポテンシャルの勾配に応じた力が加わり振動運動が誘起されるがその振動の中心は変動しないため捕獲することが可能となっている。この誘起される振動運動をマイクロモーションといい、その運動エネルギーは理論的にトラップ中心からの距離の 2 乗に比例することが先行研究によって知られている [2]。

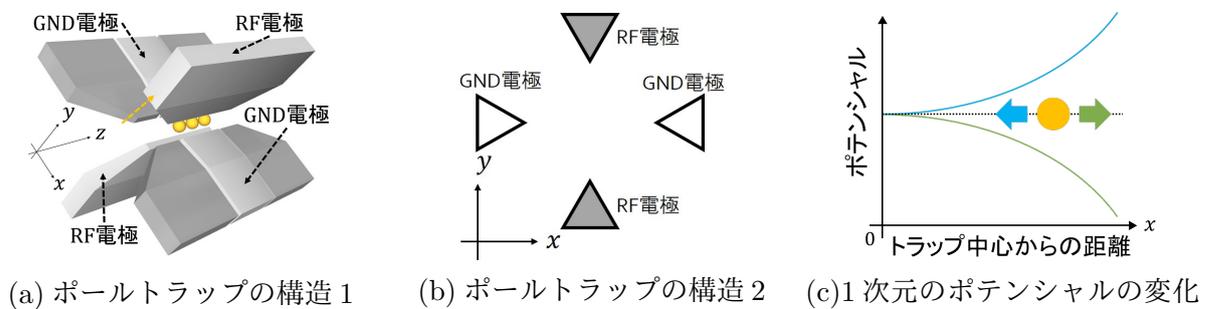


図 2: ポールトラップ

3 実験内容と結果

実験は (A) マイクロモーションを利用したエネルギー操作の評価、(B) 電荷交換散乱断面積の測定 の 2 つに分けられる。

(A) マイクロモーションを利用したエネルギー操作の評価

カルシウムイオンをトラップ中心からずらすことでイオンのエネルギーを変化させる。この時実際にイオンが持つエネルギーをイオンの蛍光スペクトルから実測しエネルギー操作の精度につ

いて評価を行った。イオンの蛍光スペクトルは離調 δ 、交流電場周波数 Ω 、自然放出レート γ を用いて以下のような関係式がある [2]。

$$P \propto \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{J_n^2(\beta)}{(\delta + n\Omega)^2 + (\gamma/2)^2} \quad (3)$$

β はイオンのマイクロモーションの速度を含む値であるから、 β を用いことでイオンのエネルギーを求めることができる。

$$E_{\text{mm}} = m_{\text{ion}} \left(\frac{2\pi\Omega\beta}{\lambda_{\text{laser}}} \right)^2 \quad (4)$$

これはスペクトルの測定結果の一部と係数 β から求めたイオンのエネルギーとトラップ位置との関係のグラフである。図 3(b) よりマイクロモーションエネルギーはトラップ中心からのイオンの距離の 2 乗に比例することが実験的に確かめることができた。

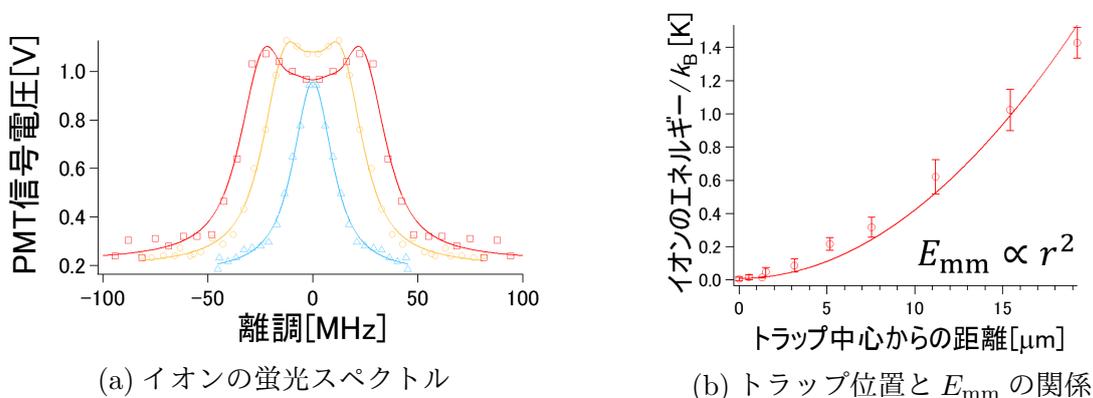


図 3: 実験 (A) の結果

これはスペクトルの測定結果の一部と係数 β から求めたイオンのエネルギーとトラップ位置との関係のグラフである。カルシウムイオンのトラップ位置がトラップ中心部、約 5 マイクロメートル、約 1.5 マイクロメートルでのスペクトルをグラフにした、それぞれのスペクトルは青色、黄色、赤色で示した。図 3 よりマイクロモーションエネルギーはトラップ中心からのイオンの距離の 2 乗に比例することが実験的に確かめることができた。

(B) 電荷交換散乱断面積の測定

まずイオントラップにカルシウムイオンをロードし蛍光させることでイオン数を数え N_{load} とする。そしてリチウム原子雲と 1 秒間混ぜ合わせた後、リチウム原子と散乱しトラップから外れたイオン数を数え N_{react} とした。得られた $N_{\text{load}}, N_{\text{react}}$ を用いて電荷交換確率 $P = N_{\text{react}}/N_{\text{load}}$ を求めることで電荷交換散乱断面積を算出した。電荷交換確率をイオンのトラップ位置を変えることで衝突エネルギーごとに電荷交換散乱断面積を測定した。また原子と混ぜ合わせる直前にレーザーによってカルシウムイオンの内部状態を操作することでカルシウムイオンの内部状態ごとに電荷交換散乱断面積を測定した。測定された電荷交換散乱断面積と衝突エネルギーの関係は以下の図 3 のようになり、赤いプロットが実測点である。原理で触れたように電荷交換散乱は粒子間距離が近距離となる衝突に分類されるので、電荷交換散乱断面積はランジュバン散乱断面積と同じエネルギー依存性 ($\sigma_{\text{Lang}} \propto E_{\text{col}}^{-1/2}$) を持つことが予想される。これよりフィッティングをかけたのが赤実線である。黒実線はランジュバン散乱断面積を表している。このグラフからすべてのエネ

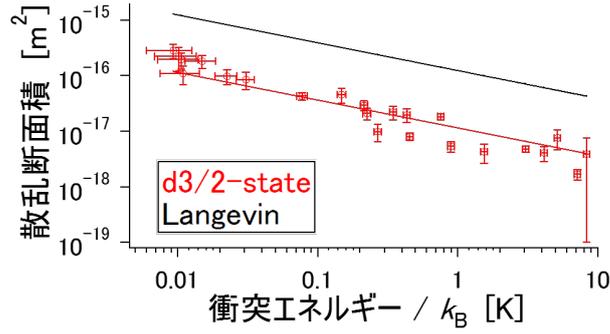


図 4: 電荷交換散乱断面積と衝突エネルギーのグラフ

ルギー領域の電荷交換散乱断面積がランジュバン散乱断面積と同じエネルギー依存性を示していることがわかった。またこれより今回測定された 10 ミリケルビンから 10 ケルビンのエネルギー領域すべてにおいて電荷交換散乱が古典的な衝突のモデルに従うことがわかった。さらに $D_{3/2}$ 状態だけでなく今回測定した $S_{1/2}$ 状態を除くすべての内部状態 ($P_{1/2}$, $D_{5/2}$) においてランジュバン散乱断面積と同じエネルギー依存性を示した。カルシウムイオンの各内部状態ごとの電荷交換散乱断面積とランジュバン散乱断面積との比は以下の表のようになった。

表 1: ランジュバンの散乱断面積との比 $\sigma/\sigma_{\text{Langevin}}$

$D_{3/2}$	$D_{5/2}$	$P_{1/2}$	$S_{1/2}$	$S_{1/2}, P_{1/2}, D_{3/2}$ の混合
0.11	0.38	0.48	$\leq 8.4 \times 10^{-4}$	0.17

ランジュバン散乱断面積との比はランジュバン散乱がした時の電荷交換散乱する確率を表しており、電荷交換散乱となる確率はカルシウムイオンの各内部状態ごとに異なることが表 1 からわかる。特に $S_{1/2}$ 状態の電荷交換散乱となる確率は他の内部状態と比較して 3 桁近く小さくほとんど電荷交換散乱が発生しない、つまりランジュバン散乱してもリチウム原子とカルシウムイオンのまま離れていく弾性散乱がほとんどであることがわかった。

4 展望

カルシウムイオンの冷却にサイドバンド冷却と呼ばれる新しい冷却法を取り入れることでさらに低温の散乱現象を観測する。

参考文献

- [1] Shinsuke Haze, Ryoichi Saito, Munekazu Fujinaga, and Takashi Mukaiyama, Phys. Rev. A 91, 032709 (2015)
- [2] D.J. Berkeland, J.D. Miller, J.C. Berfquist, W.M. Itano, and D.J. Wineland, J. Appl. Phys. 83, 5025 (1998)