

極低温原子－イオン混合系実現に向けた $^{40}\text{Ca}^+$ のトラップと冷却

向山研究室 松井千加士

1. 背景

レーザーによる希薄ガスの捕獲・冷却技術が開発されて以来、希薄ガスを用いた極低温物理が注目され始めた。中性原子またはイオンを冷却する事で得られる物理系は、内部自由度・外部自由度・粒子間相互作用を自在に制御出来ると言う稀有な特徴によって優れた量子物理系として認知され、現在も盛んに研究されている。しかし、これまでは中性原子とイオンはそれぞれが独立な物理系として扱われ研究されてきた。それに対して近年、イオンと原子のトラップを同一空間中に実現した系である極低温原子－イオン混合系が注目されている。この混合系では、イオン－原子相互作用を用いる事による今までに無い研究が期待されている。例えば、宇宙空間での化学反応の再現実験、冷却原子での実験の精密測定などの研究が挙げられ、混合系は物理・化学の両方面から注目されている。これまで幾つかのグループが混合系を実現しているが、我々もこの混合系の実現を目指している。我々はフェルミオンである ^6Li を捕獲・冷却する事で、フェルミ縮退を実現しており、p-波分子の生成などの研究を既に行っている。そこで、イオントラップの技術を導入し、混合系を実現する事で新たな量子物理系を手に入れ、新たな研究を目指している。本研究では、先ずイオントラップそれ単体を実現する事を目指した。

2. イオンの選択

我々は、 ^6Li ガスとの混合を行う事を念頭に、トラップの安定性・熱平衡への到達し易さ、電荷の移動のし辛さなどを考慮して $^{40}\text{Ca}^+$ を選んだ。

温度が異なるイオンと原子を混合させた時、重要になるのは質量比である。イオンの質量が原子の質量に比べて非常に重いとエネルギーの交換が効率良く行われず、混合系は熱平衡に至るまで非常に時間がかかってしまう。従って質量が ^6Li と同程度である事が望ましい。一方で、質量が同程度の時にデメリットも生じてくる。イオントラップではイオンはトラップポテンシャルに常に揺さぶられている事が前提でトラップされている。この時、ポテンシャルによる揺さ振りは位相が飛ぶ事なく常に揺さぶられている事が必要で、これが満足されないとトラップが不安定になる。特にイオンと原子の質量が近いイオンの方が小さい場合、衝突でイオンの運動が強く阻害され、トラップが不安定になってしまう。従って、イオントラップの安定性と言う観点からは、イオンの質量が原子の質量より十分大きい事が要求される。以上より、イオンの質量は原子の質量に対して大き過ぎずかつ小さ過ぎない中間辺りの質量を持つ事が要求される。

イオンと中性原子が衝突する時、核種によっては電荷の移動が起き易い事がある。この電荷の移動はイオンや原子がトラップから失われるなどの要因となり、望ましくない。電荷が移動し易い条件は、 ^6Li と $^{40}\text{Ca}^+$ の場合、 ^6Li の第一イオン化エネルギーと ^{40}Ca の遷移工

エネルギーの合計が ^{40}Ca の第一イオン化エネルギーと等しい事である。この条件が満たされると ^6Li と $^{40}\text{Ca}^+$ が衝突して $^6\text{Li}^+$ と ^{40}Ca になる反応が促進されてしまうが、 ^{40}Ca にはこの条件を満たすような遷移は存在していない。

上記の理由に加えて、必要な光が LD で容易に生成出来る点も考慮して $^{40}\text{Ca}^+$ を選んだ。

3. リニアトラップ

本研究では電場のみで荷電粒子をトラップするリニアトラップを用いた。リニアトラップは、ペニングトラップのような強磁場が不要でトラップが安定な領域を軸として持つという特徴がある。リニアトラップでは図 1 のように 2 つのリングと 4 本のロッド型の電極から構成され、リングには DC 電圧を、ロッドには RF 電圧を印加する。

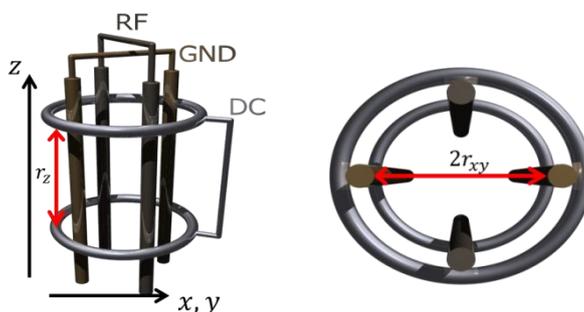


図 1 トラップ電極

本研究では 500V の DC 電圧, RF 周波数 ω_{rf} が 3MHz, 振幅 100V 程度の RF 電圧を図のように 4 本の内 2 本にのみ印加し, 残りの 2 本の電位はグラウンドとした。また, 電極間距離は r_z が 15.5mm, r_{xy} が 4.9mm である。これによって生成されるトラップポテンシャルのポテンシャル深さは 1 万 K, トラップ周波数は 0.1MHz 程度である。

イオンは DC 電圧によって z 方向に閉じ込められ, RF 電圧によって残りの xy 面内でも閉じ込められる。トラップされたイオンの x 軸方向の運動は

$$x(t) \cong x_0 \cos\left(\beta_x \frac{\omega_{rf}}{2} t\right) \left[1 - \frac{q_x}{2} \cos(\omega_{rf} t)\right]$$

と近似的に表され, y 軸方向の運動も同様に表される[1]。ただし, $q_x, \beta_x \ll 1$ である。これにより, イオンはリップル成分を無視すれば調和振動子として振る舞う事が分かる。リップル成分は調和振動子の振幅にも依存するので, 冷却を行う事はリップル成分を抑える事にも繋がる。

4. イオンの生成と冷却

イオンはオープンから供給された原子にトラップセンターでイオン化光を照射する事で生成している。イオン化には図 2 の SP 遷移に共鳴する 423nm と P 状態からイオンを生成する為の 375nm の光を用いる。冷却にはドップラー冷却を用いている。冷却遷移は 397nm に相当する SP 遷移で, DP 遷移に共鳴する 866nm の光をリポンプ光として用いている。

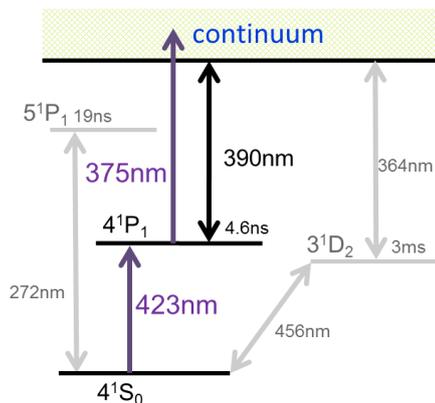


図 2 ^{40}Ca のエネルギー準位図

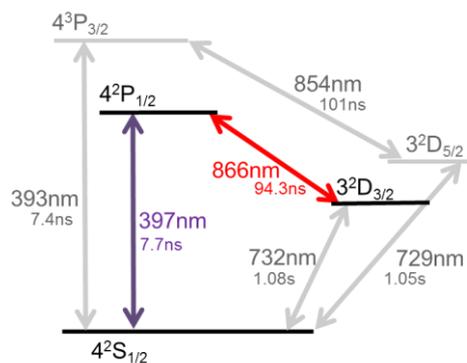


図 3 $^{40}\text{Ca}^+$ のエネルギー準位図

5. 実験系

実験は全て 10^{-7}Pa の真空槽中で行った。冷却光とイオン化光はそれぞれがトラップ軸方向の一方のみから入射させている。観測は冷却光の散乱光をレンズで倍率 4 倍前後で結像しバンドパスフィルターを通して CCD や PMT で行っている。光源は全て LD もしくはその SHG により生成している。

6. イオンクラウド

トラップされたイオンの検出方法で最も簡単なのは PMT による蛍光測定で、本研究では PMT による測定によって最初のイオントラップが確認された。その測定結果が図 4 の左図のデータで、これはリポンプ光の ON/OFF に対してイオンの蛍光が反応している事を示していて、イオンの存在が確認出来る。また、この時のイオンを CCD 撮影すると図 4 の右図のようになっていた。

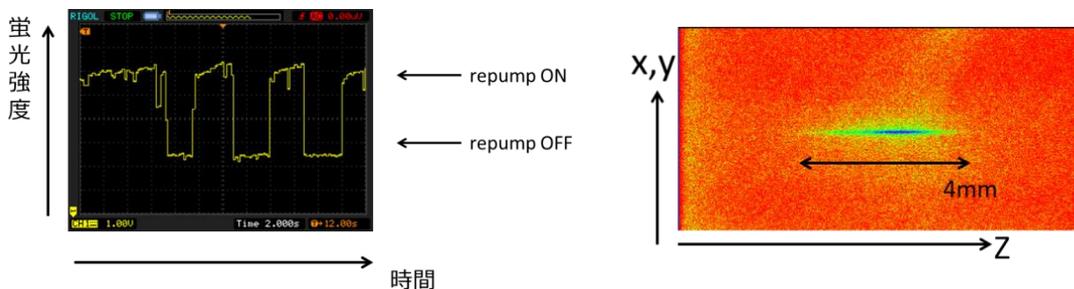


図 4 左：PMT による蛍光の測定 右：CCD によるクラウドの観測

この時実現されたイオントラップは寿命が長くて数秒程の短いトラップであったが、冷却光の波長やアライメント、RF 電圧の調整を行った結果、図 5 のようなイオンクラウドが生成された。

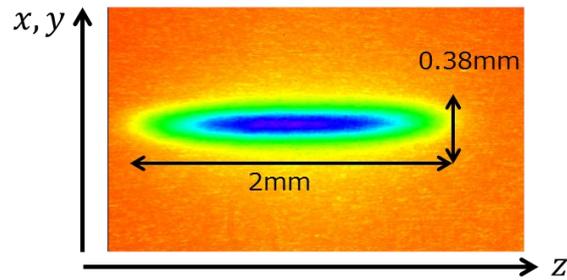


図5 トラップの最適化により生成された安定なクラウド

これは図4のクラウドの形状と比べても変化は明らかであるが、実際に寿命も数時間以上となり安定なイオントラップが実現された。この時、トラップされたイオンを調和ポテンシャル中の理想気体と見做す事によって、温度を見積もると数十 K 程度である事が分かった。ところで、このように安定なイオントラップが実現されたが、トラップされたイオンは未だに運動エネルギーがイオン同士により生じるクーロンエネルギーよりも大きく支配的な領域である。従って、冷却レートの改善と加熱レートの低減により到達温度を下げてトラップの更なる改善を図った。

7. クーロン結晶

イオン集団にはプラズマ結合定数

$$\Gamma = \frac{\text{Coulomb energy}}{\text{thermal energy}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{a_{WS} k_B T}$$

が定義されている。ただし、 Q はイオンの電荷量、 a_{WS} はウィグナーザイツ半径、 T はイオンの温度である。イオントラップではこのプラズマ結合定数 Γ が100程度になるとイオン集団は固相へと相転移する。固相ではイオン間距離は固定され、イオンはクーロンエネルギーが最小となる空間配置を取るようになり、温度は数十 mK 程度になっている事が知られている[2]。また、クーロン結晶はトラップ周波数の比や個数によって図6のようにその形状が変化する。

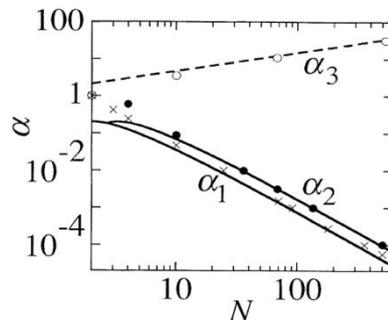


図6 クーロン結晶の構造[3] $\alpha = \omega_z^2 / \omega_r^2, N = \text{イオン数}$
 α_1 より下が鎖状, α_1 と α_2 に囲まれた領域がジグザグ状,
 α_3 より上が平面状, 残りが螺旋状の構造を持つクーロン結晶

本研究でもイオンの温度を下げる事で図 7 にあるようにクーロン結晶を観測した。最大で 11 個のイオンから成るクーロン結晶が観測出来た。

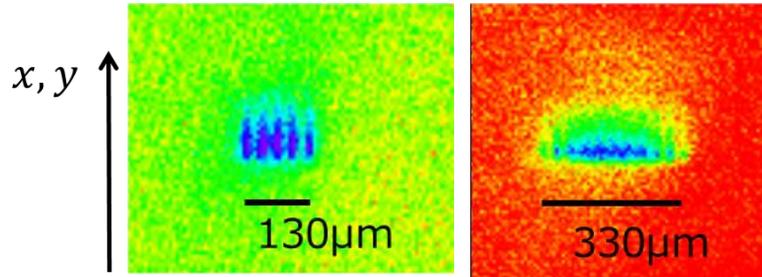


図 7 5 個および 11 個のイオンから構成されるクーロン結晶

到達温度を下げる為に、RF 電圧を下げる事とイオン数を減らす事を主に行った。これはトラップポテンシャルによるイオンの加熱を抑える事が目的である。その他に、冷却光の安定化などを行い冷却効率の向上も行った。

8.ポテンシャルの補正

クーロン結晶は図 7 の通り観測されたが、幾つかの問題点がある。イオンが動径方向に大きな運動を行っている点や動径方向の対称性が非常に悪い点などである。この問題の原因は幾つか考えられるが、トラップポテンシャルによってイオンが不要に揺さ振られている可能性を考え、ポテンシャルの補正を行った。

トラップポテンシャルは上述の通り電場を用いて生成されているが、トラップ電極に付着した原子の酸化物や電場の高調波成分などの幾つかの要因によって理想的なポテンシャルでは無くなってしまふ。例えば、浮遊電場として DC 電場ポテンシャルに加わるとイオンの運動は

$$x(t) \cong \left[x_1 + x_0 \cos\left(\beta_x \frac{\omega_{rf}}{2} t\right) \right] \left[1 - \frac{q_x}{2} \cos(\omega_{rf} t) \right]$$

と表され、振動中心が移動すると共にリップル成分が増大する事が分かる[4]。この浮遊電場の影響を取り除く為に、浮遊電場を打ち消すような電場を印加しポテンシャルの補正を行った。本研究では、ロッド型電極に付加的に DC 電場を印加して補正を行った。数百 mV の補正の結果、補正前はトラップに必要な RF 電圧が 100V を超えていたのに対して 60V 程度でトラップが可能となった。また、図 8 のように対称性が良く、動径方向の伸びも改善 (145μm→125μm) されたクーロン結晶が生成された。

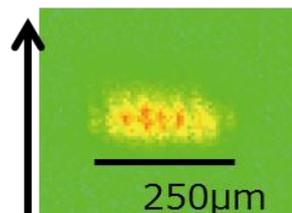


図 7 補正後のクーロン結晶

補正後のクーロン結晶にも問題があり、イオンの動径方向の伸びは十分に改善し切ったとは言えない。ポテンシャルの補正を行ったにも拘わらず尚、十分な改善が見られないのは、動径方向の伸びがポテンシャルによる影響ではない事を示唆している。この伸びの原因としては軸方向の冷却は十分に行われているが、動径方向の冷却が不十分である可能性が挙げられる。これは、冷却方法に起因する問題だと考えられる。本研究では冷却光を軸方向のみから照射していて、軸方向の冷却は十分に行われていると考えられる。しかし、動径方向の冷却はポテンシャルの非調和性によって軸方向と動径方向のイオンの運動が結合している事を利用し、間接的に冷却している。本研究のトラップシステムでは動径方向と軸方向の運動の結合が弱く、動径方向の冷却効率が不十分になってしまった可能性がある。従って、動径方向からも冷却光を照射し、冷却効率の改善を行う必要があると思われる。

8.まとめと今後の展望

本研究で $^{40}\text{Ca}^+$ の生成システム、冷却用の光源開発、真空装置の開発などを経て、Ca イオントラップを構築した。構築されたトラップシステムでは、

- ・単一イオンから捕獲・観測可能
- ・寿命が数時間以上
- ・クーロン結晶の生成

と言う性能を実現した。

今後は、イオントラップに関する部分では

- ・動径方向の冷却効率の改善
- ・ポテンシャルのより精密な補正
- ・線幅狭窄化された光源の開発とサイドバンド冷却
- ・結像系の高倍率化などによる S/N の改善

などを行う予定である。また、実際に MOT との混合系を事始めに実現しイオンや原子のロスレートの測定を行う予定である。

参考文献

- [1] D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe, and D. Wineland, Rev. Mod. Phys. **75**, 281 (2003).
- [2] D. Berkeland, J. Miller, J. Bergquist, W. Itano, and D. Wineland, Journal of applied physics **83**, 5025 (1998).
- [3] D. H. E. Dubin, Phys. Rev. Lett. **71**, 2753 (1993).
- [4] P. Bove, L. Hornekær, C. Brodersen, M. Drewsen, J. S. Hangst, and J. P. Schiffer, Phys. Rev. Lett. **82**, 2071 (1999).