

## PRODUCTION OF COULOMB CRYSTAL FOR NANO ION BEAM

Haruki Hitomi, Kenji Izawa, Kiyokazu Ito, Keiichi Homma,  
Kazuhiisa Tanaka, Hiroyuki Higaki, Masao Kuriki, Hiromi Okamoto  
Hiroshima University  
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526

The ions trapped in a linear Paul trap crystalize at low temperature. The Coulomb crystal has extremely low emittance. By using the Coulomb crystal as an ion source, it is possible to reduce the beam size down to nanometer order keeping the beam divergence of microradian order, i.e. nano ion beam. This paper reports a preliminary experiment for production of ultra-low emittance ion beam using the Coulomb crystal. The Coulomb crystal, which consists of  $^{40}\text{Ca}^+$  ions, is generated by the laser cooling in the linear Paul trap. We succeed to move the Coulomb crystal with kept the crystal state.

### ナノイオンビーム源への応用を目的としたクーロン結晶生成

#### 1. 研究背景

イオントラップ内に捕捉したイオンプラズマを冷却していくと、やがて粒子間のクーロン相互作用のエネルギーが熱エネルギーよりも大きな強結合状態となる。さらに冷却を進めると、イオンが規則的に配列をしたクーロン結晶へと相転移する。クーロン結晶は低温の極限状態であり、そのエミッタンスはゼロである。従って、クーロン結晶を取り出し加速することが出来れば、超高品質なイオンビームを生成出来る。

クーロン結晶構造はイオン群の密度に応じて1次元の紐状構造、2次元のジグザグ構造、3次元の殻構造をとる。中でも紐状のクーロン結晶をイオンビームとすれば、ビーム径がナノメートルのオーダーであり、また非常に小さな角度拡がりしか持たない「ナノイオンビーム」となりうる[1]。このようなビームは工業、医療、生命科学、生物学等様々な分野での応用が期待できる。

ここでは、ナノイオンビーム生成への応用を目的とした、クーロン結晶の生成、引き出し実験について報告する。イオン群の冷却には、レーザー冷却法[2]を用いる。捕捉イオン種には、扱いが容易な半導体レーザーで冷却が可能な $^{40}\text{Ca}^+$ を採用した。

#### 2. 実験装置

イオントラップには、レーザー冷却を行いやすく、結晶の引き出しにも適した線形ポールトラップを採用した。本実験で使用した線形ポールトラップを図1に示す。4本のロッド電極に高周波電圧Vrfを印加して径方向の閉じ込め場を形成し、ロッド電極と水平な方向に設置した板状電極に直流電圧Vendを印加することで軸方向の閉じ込め場を形成する。トラップ領域の真下に位置したオープンで中性のCaビームを生成しイオン捕捉領域へと入射する。その真上に位置する電子銃からの電子ビームにより捕捉領域内でイオン化し、イオントラップ内に捕捉する。

冷却用のレーザーはトラップの軸方向より入射する。冷却用レーザーには2本の半導体レーザーを使用する。1本は主冷却用のレーザーであり $^{40}\text{Ca}^+$ の $4s^2 S_{1/2} \Rightarrow 4p^2 P_{1/2}$ の励起に使用する。 $^{40}\text{Ca}^+$ の場合12:1の割合で比較的寿命の長い準安定状態 $3d^2 D_{3/2}$ へと遷移する。従ってそのままでは冷却の効率が低下してしまう。効率的な冷却を行うためにリポンプ用レーザー(866nm)により $3d^2 D_{3/2} \Rightarrow 4p^2 P_{1/2}$ の再励起を同時に行う。

二本のレーザーは真空チェンバーの外で光路を重ねて真空チェンバー横の窓から入射する。

表1 典型的な実験パラメータ

捕捉イオン	$^{40}\text{Ca}^+$
遷移準位	$4s^2 S_{1/2} \Rightarrow 4p^2 P_{1/2}$
レーザー波長	1 397 nm (755.2225 THz)
	2 866 nm (346.0003 THz)
高周波電圧 Vrf	59.0 Vp-p
周波数 f	2.03 MHz
ロッド半径 r	3.44 mm
内接円半径 $r_0$	3.0 mm
端板電圧 Vend	2.0 V
端板間距離 L	18.0 mm

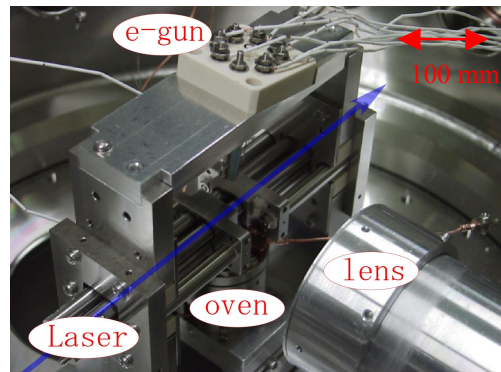


図1 線形ポールトラップと実験配置

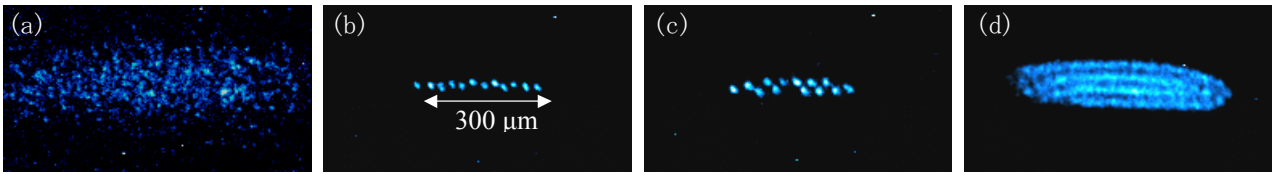


図2 捕捉した $^{40}\text{Ca}^+$ の空間分布  $V_{rf} \sim 26.4\text{V}$ , 露光時間 0.3 s (a) 比較的高温な状態  $\Delta = -200\text{MHz}$   
(b) 1次元の紐結晶  $\Delta = 0\text{MHz}$  (c) 2次元のジグザグ結晶  $\Delta = 0\text{MHz}$  (d) 3次元の殻結晶  $\Delta = 0\text{MHz}$

イオントラップの中心付近でレーザー径は1 mm程度である。また、そこでのレーザー強度は $5\text{mW/mm}^2$ 程度であり、これはイオン群の冷却に十分な値である。クーロン結晶を安定に生成するにはレーザー周波数を高い精度で制御、安定化する必要がある。温度安定化したファブリペロー干渉計(FPI)を用いてフィードバック制御を行うことで波長を安定化している。

トラップの軸(レーザー入射方向)と直交する方向には、冷却の際に得られる誘起蛍光(LIF)観測のための像転送用レンズを設置している。このレンズにより真空チェンバー外に設置してあるImage Intensifier (I.I.)ユニット付きcharge-coupled-device (CCD)カメラへとLIF像を転送し、イオン群の空間分布を観測する。また、結晶構造観測のために像転送の途中で像を拡大している。拡大率は可変で最大1.3倍まで拡大して観測が出来る。表1に実験のパラメータ例を示す。

### 3. 実験結果

#### 3.1 クーロン結晶生成

イオンが共鳴、吸収するレーザーの周波数はイオンの速度によって異なる。静止したイオンの共鳴周波数を $\omega_0$ とすると、運動しているイオンの共鳴周波数はドップラーシフト(離調) $\Delta$ 分だけずれる。ドップラーレーザー冷却の冷却力は離調に依存し、到達温度は離調が小さいほど低くなる。

図2にレーザー照射時の典型的なLIF像を示す。図2(a)は離調が比較的大きい場合のイオン群の様子であり、雲状に広がっている。離調を小さくしていくと低温化は進み、図2(b)のように直線状に配列し1次元紐状のクーロン結晶をつくる。輝点のひとつひとつがイオン一個を表している。粒子間距離は $30\text{ }\mu\text{m}$ 程度でありイオンの相対位置の変化はない。また、レーザーを照射し続けている限り

その構造は安定に保たれる。我々の実験ではおよそ30分の間結晶状態であることが確認された。粒子数を変化させることで図2(c)や(d)のように紐状以外のクーロン結晶も生成出来た。

#### 3.2 クーロン結晶の輸送

次にクーロン結晶の引き出し実験を行った。まず、軸方向の閉じ込め場を形成する両端板印加電圧 $V_{end}$ を0 Vにしたときでもクーロン結晶はロスしなことが分かった。クーロン結晶状態では極低温状態であるためわずかなポテンシャルがあれば捕捉可能なはずである。従って $V_{end}$ を0 Vとしてもイオントラップのロッド等に生じたわずかな接触電位により軸方向に閉じ込められると考えられる。

片側の端板電極に印加する電圧 $V_{end}$ を時間と共に徐々に変化させていき、そのときの様子をI.I.CCDカメラで観測した。端板電極に印加する電圧を急激に変化させると、イオンの移動がカメラの露光時間よりも早く十分な光量が得られずカメラによる観測は出来なかったためカメラで観測出来るよう印加電圧を徐々に変化させて行った。図3右側の端板印加電圧を2 Vから-10 Vまで100sで変化させた。左側の端板印加電圧は2 Vで固定した。

図3にLIF像を示す。ポテンシャルの勾配変化に応じてクーロン結晶を保ったまま移動する様子が観測された。ただし、図3(b)にも見られるように移動のさい粒子間距離が一定ではない。両端板電極に印加された電圧により受ける力でイオン群は移動するが、移動途中にわずかなポテンシャルの壁があるため、それにひっかかるような形でイオン群は一度止まる。その間も両端板電極が作るポテンシャル勾配は徐々に大きくなりイオン群はさらに力を受ける。その結果粒子間距離が狭くなっているのではないかと考えられる。

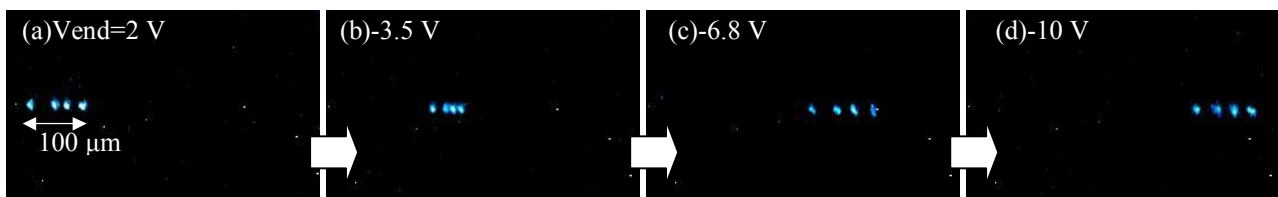


図3 ポテンシャル勾配により結晶が移動する様子。露光時間0.3 s。輝点のひとつひとつが $^{40}\text{Ca}^+$ を表す。この場合は4個の $^{40}\text{Ca}^+$ で構成される紐状クーロン結晶。画面左端から右端まではおよそ1.3 mmである。

これはロッド電極とそこに付着したCaとの間に生じる接触電位によりポテンシャルが形成されたことに起因するものと予想される。

本実験で使用している線形ポルトラップと原子オープンとの間には、ロッド電極へのCa付着を避けるため、中性Caビームの拡がり制御のためのアパーチャプレートを導入している。しかし、完全にそれを回避できていないのが現状である。そのためイオン生成の段階でロッド電極にCaが付着しないような工夫を装置に施す必要がある。例えば、イオン化セクションと冷却セクションを分割したポルトラップを使用するなどが考えられる。

### 3.3 MCPを使った測定

カメラを使った実験では視野が狭くイオントラップの外までイオンの様子を捉えられない。そこでmicrochannel plate (MCP) を使ってクーロン結晶がイオントラップの外へ出てきているかを測定した。MCPはポルトラップ中心から軸方向に100 mm離れたところに設置してある。MCPでイオンを電子に変換、増幅し最終的にはFaraday Cupによって出力信号を測定する。MCPは2段組で、イオン入射面に-2 kV、電子出射面は0 Vを印加した。

まずは極低温状態であるイオン群がイオントラップの外へ出るかを調べるため比較的粒子数が多い図2(d)のような結晶の引き出しを行った。数十Vの電圧をMCPの反対側の端板電極に与えた程度ではMCPでの測定で信号が得られなかった。上述したようにクーロン結晶状態ではイオン群の運動エネルギーはmK程度しかない。従ってわずかな接触電位などで捕捉され、MCPまで到達しなかった可能性がある。そこで、さらに大きなポテンシャル勾配を与えて実験を行った。MCPと反対側の端板電極に100 Vの電圧を印加し、MCP側の端板電極に印加する直流電圧を5 Vから0 VへとスイッチングすることでMCPが設置されている側へとイオン群をはきだす。

このとき観測された信号を図4に示す。青線がイオンの信号であり、赤線がMCP側の端板電極に印加した電圧Vendを表す。端板印加電圧が切り替わっておよそ110  $\mu$ sにイオンの信号が検出され始める。従って実験により得られた信号は $^{40}\text{Ca}^+$ であるといえる。電磁場解析ソフト(cst studio suite)によりこの実験パラメータにおけるイオントラップの軸方向のポテンシャルを計算し、イオントラップの中心からMCPまでイオンが飛行する時間を計算した結果105  $\mu$ sとなり実験結果と合致する。

図4においてイオンの信号からMCPへと到達したイオン数を逆算すると2個となった。LIF観測から見積もれるイオン数は4.0個であり、実際は3次元であることも考慮するとさらに数は多いはずである。数が一致しない原因として以下の二つが挙げられる。一つ目は、我々の意図しない何らか

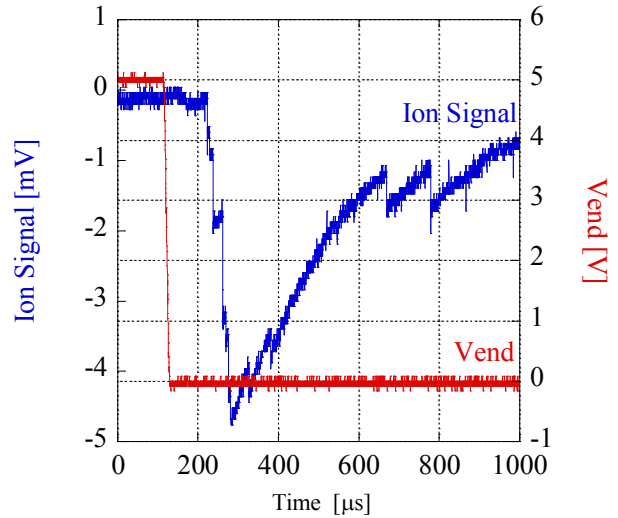


図4 MCPによるイオン検出結果  
赤線が端板印加電圧を示す。トリガが入ると5 Vから0 Vへとスイッチングされる。

のポテンシャルによりいくらかのイオンは依然として閉じ込められている可能性がある。二つ目は、イオン数評価に使ったイオン検出効率があくまでカタログ値であり実際には大きく違う可能性がある。

今後、一次元紐状のクーロン結晶で同様の実験を行い、MCPでイオン一個の信号を区別出来るかを評価する。そのためにはイオン一個の信号と優位に判断できるようなノイズ対策や、イオン引き出しのために上述したロッド電極汚染に関してイオントラップのさらなる改善が必要となるであろう。

## 4. 結論

イオントラップ内に捕捉した $^{40}\text{Ca}^+$ をレーザー冷却法により極低温化し、I.I.CCDカメラを用いてそのLIFを計測し結晶化を確認した。また、粒子数を変化させることで様々な構造のクーロン結晶を得ることができた。そして、イオントラップの軸方向にポテンシャル勾配を造ることでクーロン結晶を維持したまま移動させることに成功した。また、MCPを用いてイオン群の検出も行い、 $^{40}\text{Ca}^+$ がイオントラップの軸方向へと引き出されていることが確認できた。計算結果も実験結果と一致している。以上のようにナノイオンビーム生成に向けて初期的な実験を行い今後に向けて多くの有用な知見が得られた。

## 参考文献

- [1] K. Ito, A. Ogata, H. Okamoto, Int. J. Appl. Electromagn. Mech. Vol.14(2001)p.283
- [2] D.J. Wineland, Wayne M. Itano, Phys. Rev. A 20(1979)1521