

# EXTRACTION OF COULOMB CRYSTALS FROM A PAUL-TRAP ION SOURCE FOR NANO-BEAM GENERATION

Kenji Izawa<sup>1</sup>, Kiyokazu Ito, Hiroyuki Higaki, Hiromi Okamoto  
Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University  
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, Japan 739-8530

## Abstract

As is well-known, a single-species plasma confined in a compact trap system naturally forms a spatially ordered configuration near the absolute zero. Such a unique state of matter is called “Coulomb crystal”. The emittance of this strongly coupled plasma is close to the ultimate limit, far below those of regular particle beams. This implies that, if we can somehow accelerate a crystal without serious heating, an ultralow-emittance beam becomes available. To test this idea, we produce a *string* Coulomb crystal in a linear Paul trap by laser cooling and then try to extract it by switching off the axial confinement potential. Preliminary experimental results indicate that it is possible to transport the crystal while roughly maintaining its linear ordered structure.

## ナノイオンビーム実現に向けたクーロン結晶射出実験

### 1. はじめに

現在、基礎物理学や工学、医学など様々な分野で高品質ビームの需要が高まっている。我々はクーロン結晶状態のイオン群のエミッタンスがほぼゼロであることに着目し、これを極低エミッタンスビーム源として応用することを提案してきた。

線形ポールトラップ(以下LPT)に捕捉したイオン群をレーザー冷却<sup>[1]</sup>によってmKオーダーまで冷却すると、イオンはある種の相転移を起こし、クーロン結晶となる。特に、イオンが少数個の場合には、LPTの軸上にイオンが1列に並んだ紐状の結晶構造となる。このときエミッタンスはゼロである。これをLPTから引き出し、ビーム源とすることで極低エミッタンスビームを生成できる可能性がある<sup>[2-4]</sup>。また、引き出されたイオンは時間的にも等間隔に並んでいる為、エミッタンスを増加すること無く、MeV台へと高周波加速することが可能である<sup>[5]</sup>。

これまでに、LPT中に生成したクーロン結晶を移動させることに成功している。今回、クーロン結晶をLPTから引き出すことに成功したので報告する。また、引き出されたイオン群が時間的にほぼ等間隔であることも実験的に確認した。

### 2. 実験装置と手順

以下に実験装置の概略と実験手順について示す<sup>[6]</sup>。

図1に本実験で用いたLPTとイオン生成装置を示す。これらは真空度 $5 \times 10^{-7}$  Pa以下の真空容器内に設置されている。LPTは平行に置かれた4本の円柱電極と、2枚の端板電極から成る。円柱電極に高周波電圧( $f=950$  kHz)を、端板電極に直流電圧を印加することで、これらの電極に囲まれた空間にイオンを

捕捉する。イオン捕捉領域の大きさは、断面方向(以下、垂直方向をx、水平方向をy方向とする)は半径3 mmで、軸方向(以下、z方向)の大きさは6 mmである。

捕捉イオン種は半導体レーザーによるレーザー冷却が可能な $^{40}\text{Ca}^+$ を採用した。まずCa原子を線形ポールトラップの下部に設置した原子オープンから放出する。同時にトラップの上部に設置した電子銃から電子ビームを入射する。これらをイオン捕捉領域内で衝突させることで $^{40}\text{Ca}^+$ を生成する。この過程により生成、捕捉される $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの初期温度は数千K程度である。

次に、LPTに捕捉した高温のイオン群をクーロン結晶化させるためにレーザーを照射して冷却を行う。レーザーはz軸に沿って入射する。本実験ではレーザー光源として2本の外部共振器型半導体レーザーを用いた。

捕捉イオンの分布はレーザー誘起蛍光(LIF)をトラップのy方向へ輸送し観測する。検出器には光増幅器付きCCDカメラ(ICCD)を用いる。それにより二次元の実空間分布の計測が可能となる。

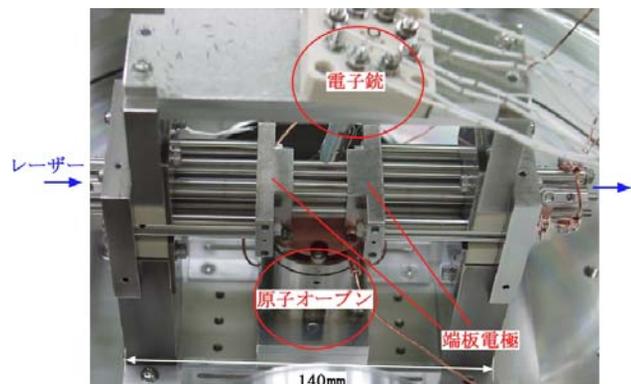


図1. 線形ポールトラップとイオン生成装置

<sup>1</sup> E-mail: kizawa-038@hiroshima-u.ac.jp

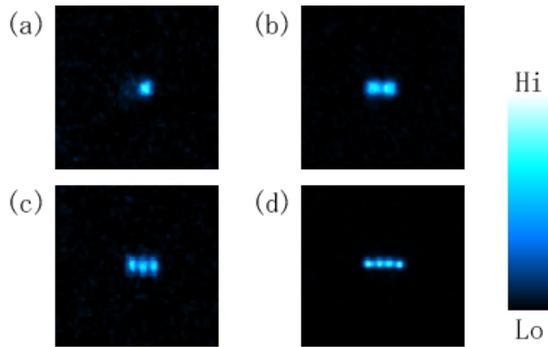


図2. 1次元紐状結晶. 画像は500 $\mu\text{m}$ ×500 $\mu\text{m}$ . (a), (b), (c), (d)の各画像の結晶はそれぞれ1, 2, 3, 4個の $^{40}\text{Ca}^+$ からなる.

ICCDカメラにより結晶を確認後, トラップの外場を操作することで結晶を射出する. 射出されたイオンは2段組のマイクロチャンネルプレート(MCP)で検出する. MCPにはイオン入射面に-2.43 kV, 電子出射面に-0.43 kVの電圧を印加しており, イオン1個から検出できる. MCPはトラップの中心からz方向に約100 mm離れた場所に設置している.

### 3. 実験結果

#### 3.1 クーロン結晶生成実験

本実験ではカルシウムのイオン化に電子ビームを用いているため, 真空容器内の残留ガスも同時にイオン化されてしまう. これらのイオンはレーザー冷却することができず, LPTに捕捉された場合, カルシウムのクーロン結晶化を阻害してしまう. 一般に, LPTは質量分析器としても使用され, 安定に捕捉することのできるイオンの比電荷はロッド電極に引加する直流電圧Uと高周波電圧Vによって決まる. そこで, イオン化の間, ロッド電極への印加電圧を調整し(U=2.8 V, V=23 V),  $^{40}\text{Ca}^+$ を選択的に捕捉した.

イオン生成終了後, 捕捉した $^{40}\text{Ca}^+$ をレーザーにより冷却する. このとき, 上記の電圧のままでは $^{40}\text{Ca}^+$ に対しても安定領域の端に位置するため, クーロン結晶を安定に保つことが難しい. そのため, 冷却・結晶生成時にはより安定領域の中心に近く結晶の生成が容易なU=0 V, V=13 Vへとロッド電極の印加電圧を変更する. なお, 端板電圧はイオン化時, 結晶生成時ともに1.5 Vである.

図2に生成したクーロン結晶のLIF像を示す. 各画像の光点が $^{40}\text{Ca}^+$ を表している.  $^{40}\text{Ca}^+$ が軸方向に一列に並んだ紐状の結晶を形成していることがわかる.

#### 3.2 クーロン結晶射出実験

続いて, 生成したクーロン結晶をLPT内から射出する実験を行った. まず, MCPを設置してある側(以下下流側)の端板電圧を0 Vへとスイッチし, イオン群を軸方向に捕捉していた電位障壁をなくすことでクーロン結晶の引き出しを試みた. この時, ICCDカメラからLIF像は消えるが,

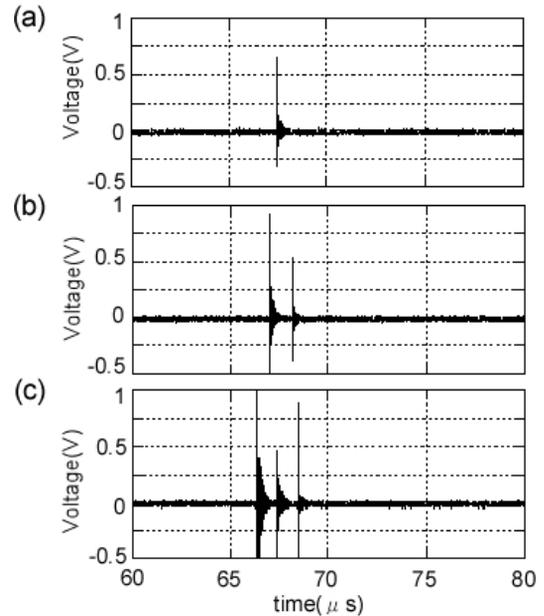


図3. MCPによる射出イオンの検出結果. (a), (b), (c)はそれぞれ図2の(a), (b), (c)を射出した時の信号.

MCPで有意な信号を検出することは出来なかった. また, 下流側の端板電圧を引加し直すと, 再びLIF像が観測された. これは, 下流側端板電圧を0Vにすることでクーロン結晶はLIF観測系の視野の外までは移動するが, 途中で止まってしまい, LPT外部へは射出されなかったことを表している. クーロン結晶が途中で止まってしまうのは, 依然として軸方向に電位障壁があるためと考えられる. そのような電位障壁が形成される可能性として, 電極とイオン生成時に電極に付着したカルシウムとの接触電位が挙げられる.

クーロン結晶をLPTから引き出すためには, この電位障壁を越えられるだけのエネルギーをクーロン結晶に与える必要がある. イオン間のクーロンエネルギーでは小さすぎるので外部から与えなければならない. 最も簡単な方法はクーロン結晶捕捉時の端板電圧を大きくすることで初期のポテンシャルエネルギーを大きくすることである. しかし, 現在のシステムでは結晶生成時の端板電圧をこれ以上上げると結晶構造の多次元化してしまう. そこで, 下流側の端板電圧を1.5 Vから0 Vへとスイッチすると同時に, MCPと反対側(以下, 上流側)の端板電圧を1.5 Vから7.5 Vへとスイッチすることで, 結晶の引き出しを試みた.

その結果, 端板電圧をスイッチするとLIF画像が消え, MCPに信号が検出された. 図3にイオン数が1~3個のクーロン結晶を射出した場合に, MCPで検出した信号を示す. 横軸の時間は, 端板電圧をスイッチした時刻を $t=0$ としている. LIFで観測したイオン数と同数のピークが観測されることから, ピークはCaの信号と考えられる. ここで重要なのはイオン数が3個の場合には, 粒子の到達時間間隔はほぼ等しい点である. このことから射出されたイオン群は結晶状態か, それに近い状態を維持して

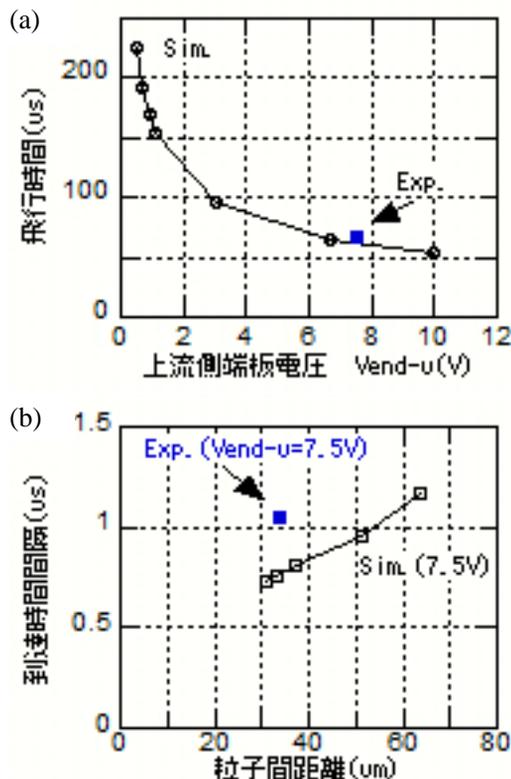


図4. (a)上流側端板電圧 $V_{end-u}$ による粒子1個のMCPへの飛行時間の変化. (b)結晶の粒子間距離とMCPへの到達時間間隔の変化.

MCPまで到達したと推測できる. なお, 出力信号に振動が見られるのは, 検出系のインピーダンスマッチングがとれていないためである.

#### 4. 数値シミュレーションとの比較

前節のクーロン結晶射出実験で得られた信号が $^{40}\text{Ca}^+$ の信号であるのか, 飛行時間の観点から検証する. 我々の実機装置ではLPT中心からMCP表面までポテンシャルが大きく変化している. より現実に近い飛行時間を得るために, 実際のトラップの電極構造と検出器の配置を出来る限り考慮したポテンシャルを3次元電磁場解析ソフトで作成した. このポテンシャルデータをもとに3次元多粒子シミュレーションを行った.

図4(a)に粒子1個を射出した際の上流側端板電圧とMCPまでの飛行時間の関係を示す. 実験で得た飛行時間はシミュレーションとよく一致している. 従って飛行時間の観点からも観測されたシグナルは $^{40}\text{Ca}^+$ のものであると結論づけられる.

さて, クーロン結晶をナノイオンビーム源として応用するためには, 粒子の到達時間間隔を制御する必要がある. 方法は幾つか考えられるが, 最も簡便なのは, ポテンシャルの軸方向の形状を変えることでクーロン結晶時の粒子間距離を制御する方法である.

そこで, 先に作成したポテンシャルデータに加え, クーロン相互作用も考慮したシミュレーションを行い, これを検証した. まず粒子数3個のクーロン結晶を生成し, 端板電圧を変化させることで粒子間距離が変わること確認した. このクーロン結晶を射出した時のMCPへの到達時間間隔を図4(b)にまとめる. 現状の実験条件では粒子間距離が30  $\mu\text{m}$ 以下になると, クーロン結晶はzigzag構造へと相転移するので, 粒子間距離がこれより大きな場合のみをプロットしてある. 粒子間距離の増加に伴い, 到達時間間隔も長くなる. この結果から, 端板電圧を制御することで粒子の到達時間間隔を制御する方法が有効であることが確認できる. なお, 実験で観測された到達時間間隔はおよそ1  $\mu\text{s}$ であり, これに関しても実験とシミュレーションはよく一致する.

#### 5. まとめ

テ線形ポルトラップ中で生成した1次元紐状結晶の射出実験を行い, 少数個の $^{40}\text{Ca}^+$ イオンを引き出すことに成功した. イオンのMCP到達時刻はほぼ等間隔で, 射出後も規則的配列を保っていることがわかる. また, 3次元の分子動力学シミュレーションを実施し, 結晶生成時の端板電圧を操作することによって射出後のイオン間隔が制御できることを確認した.

生成された紐状の低エネルギービームは, エミッタンスを損なうことなく, 線形加速器等を使ってさらに高エネルギーへ加速することが原理的に可能である<sup>[2,5]</sup>. 1次元結晶を使うため電流値には限界があるが, たとえば, 放射線影響学や生命科学上の様々な研究テーマに利用可能な先進的ツールとなり得る.

#### 謝辞

本研究は「K E K大学等連携支援事業」, 「日本学術振興会科学研究費補助金」による支援を受けて実施しました.

#### 参考文献

- [1] D.J. Wineland and H. Dehmelt, Bull. Am. Phys. Soc. **20** (1975), 637.
- [2] K. Ito, A. Ogata, H. Okamoto, Int. J. Appl. Electromagn. Mech. **14** (2001), 283..
- [3] W. Schnitzler, N. M. Linke, R. Fickler, J. Meijer, F. Schmidt-Kaler, and K. Singer, Phys. Rev. Lett. **102**, 070501 (2009)
- [4] K. Izawa, H. Higaki, H. Yamate, H. Hitomi, K. Ito, M. Kuriki, and H. Okamoto, J. Phys. Conf. **163**(2009) 012102.
- [5] M. Kano, S. Masuda, A. Ogata, K. Okabe and H. Okamoto, J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004), 760.
- [6] K. Izawa, *et al.*, PASJ5-LAM33, Hiroshima, Japan, August 6-8, 2008, WP070.