

DEVELOPMENT OF LASER COOLING SYSTEM FOR ION TRAP DESIGNED FOR BEAM PHYSICS

Kenji Izawa¹, Haruki Hitomi, Kiyokazu Ito, Keiichi Honma, Kazuhisa Tanaka, Hiroyuki Higaki,
Masao Kuriki, Hiromi Okamoto

Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, Japan 739-8530

Abstract

The collective motion of ion plasmas trapped in a linear Paul trap is physically almost equivalent to that of charged particle beams propagating through a linear transport channel. Therefore, it is possible to study behaviours of space-charge-dominated beam by the linear Paul trap. One of the important parameters of space-charged effects is temperature. For controlling the temperature of ions trapped in the linear Paul trap, we have developed a laser cooling system. The system is optimized for cooling $^{40}\text{Ca}^+$ ion. Change of the trapped ion temperature is examined by measuring lifetime, velocity distribution, and real space distribution, which are obtained by laser induced fluorescence method. Additionally, we demonstrate production of ultra-low temperature ions for assessing property of the laser system. In the result, the $^{40}\text{Ca}^+$ ions crystallize in one or more dimensions.

ビーム物理研究用イオントラップのためのレーザー冷却システムの開発

1. はじめに

加速器中を伝搬する荷電粒子ビームの集団運動は、線形ポールトラップ中に捕捉された非中性プラズマの集団運動と空間電荷効果まで考慮しても物理的に等価である。そこで我々は加速器シミュレータとして線形ポールトラップを用いることにより空間電荷効果が支配的なビームの振る舞いを実験的に研究する手法を提案している^[1,2]。

空間電荷効果は位相空間上の密度に依存する。これまでの実験では線形ポールトラップ中の蓄積粒子数を増加することで、チューンディプレッションを0.8へ下げること成功している^[3]。ここからさらに低いチューンディプレッションを実現するにはビームの温度を制御することが重要となる。そこで広い範囲で温度制御が可能なレーザー冷却法^[4]を用いるためのシステムを導入する。本報告ではそのシステムの構築と、実験による性能評価について述べる。

2. レーザー冷却システム

図1にイオントラップシステムを示す。これは真空度 5×10^{-7} Pa以上の真空容器中に設置されている。線形ポールトラップは半径3 mmの円柱電極と、それらの電極を挟む2枚の端板電極から成る。これらに囲まれたイオン捕捉領域の大きさは、径方向（以下、垂直方向をx、水平方向をy方向とする）は直径6 mmである。軸方向（以下、z方向）は端板間距離で決まり、その距離は6 mmから60 mmに可変である。

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 $^{40}\text{Ca}^+$ を採用する。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ブンから

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程度となる。

$^{40}\text{Ca}^+$ の冷却には397 nmレーザーによる $4s^2S_{1/2} \leftrightarrow 4p^2P_{1/2}$ の遷移を使う。このとき、励起したイオンの一部は準安定状態への遷移 $4p^2P_{1/2} \rightarrow 3d^2D_{3/2}$ を行う為、リポンプ用として866 nmレーザーを同時入射している。これにより冷却サイクルが閉じた2準位系を形成し、効率よく冷却が行える。レーザーシステムの概略図を図2に示す。レーザー光源は外部共振器型半導体レーザーを用いる。各波長のレーザーは出射後に光軸を重ね、線形ポールトラップへz軸に沿って入射する。また、それぞれのレーザー光の一部をスプリッターによって切り取り、波長計、FPIによってモニタリングする。さらに、397 nmレーザーはFPIの出力をコントローラーへフィードバックすることで波長の長期安定化を図っている。

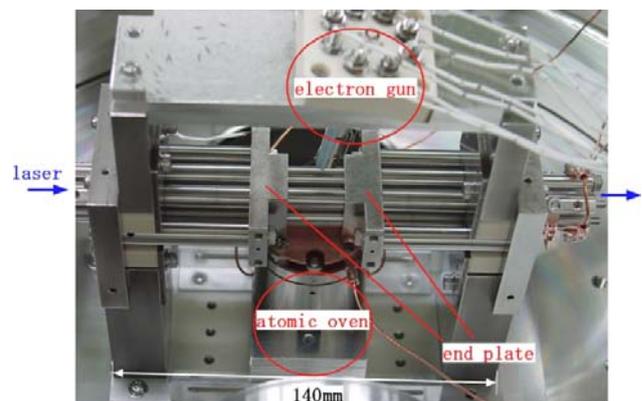


図1. イオントラップシステム

¹ E-mail: kizawa-038@hiroshima-u.ac.jp

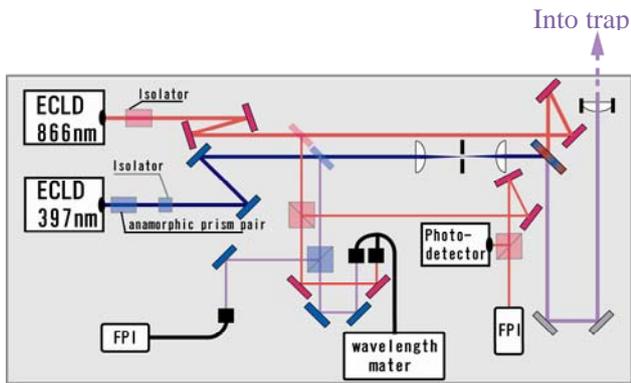


図2. 光学システムの概略図

捕捉イオンの分布はレーザー誘起蛍光 (LIF) 法により観測する. LIFの計測手法としては, 光増幅器付きCCDカメラ (ICCD) による二次元計測と, 光電子増倍管(PMT)による蛍光量の積分値の検出を行っている. これらはトラップのy方向に対向する向きで設置しており, 同時計測が可能である.

3. レーザー冷却, 加熱実験

3.1 実空間分布

まず, 線形ポルトラップ中に捕捉したイオン群に対し, レーザーによる加熱, 冷却効果を確認した. このとき, 端版間距離は6 mmでありトラップのz軸方向に放物型のポテンシャルが形成されている. そこにイオンを捕捉した状態でz軸方向からレーザーを入射する.

図3にICCDカメラで取得したレーザー入射直後のLIFの分布の時間変化を示す. 図の上4枚はレーザー周波数 f_L と静止しているカルシウムと共鳴する周波数 f_0 の差 $\Delta f = (f_L - f_0)$ を冷却側 ($\Delta f < 0$) の -0.1 GHzに固定した結果である. このときには時間経過とともに全蛍光量の増加, 光量分布のz軸方向広がり減少がみられた. 広がりの減少は軸方向における位相空間上での粒子軌道の縮小によるものであり, 蛍光量の増加とともに冷却が起きていることを意味している. 図の下4枚は Δf を加熱側 ($\Delta f > 0$) の $+0.2$ GHzに固定した場合である. ここでは全蛍光量が急激に減少し約9 sで全捕捉粒子が損失した. また, z軸方向に2つのピークを持つ蛍光分布が得られた. そのピークの間隔は時間経過とともに広がり, ポテ

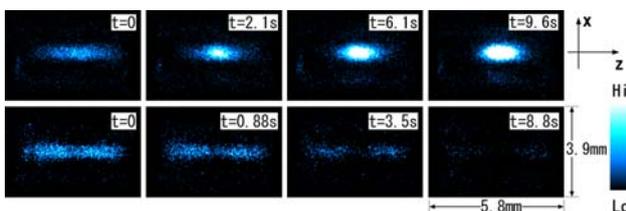


図3. レーザー周波数を冷却側(図上), 加熱側(図下)に固定した場合のLIF分布の変化

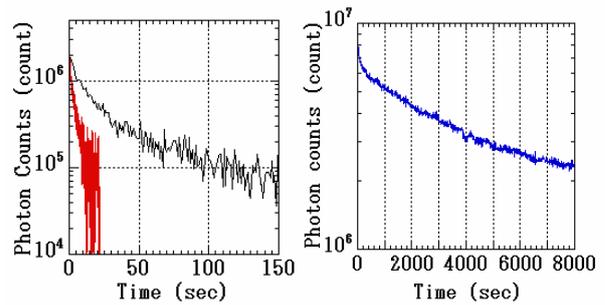


図4. ライフタイム測定. 赤, 黒, 青の実線はそれぞれ Δf が $+0.3$ GHz, 0 GHz, -0.1 GHzを示している.

ンシャルの大きいほうへ移動する. これは運動エネルギー上昇を意味し, 加熱を示唆していると考えられる.

3.2 ライフタイム測定

通常, ポルトラップに捕捉した $^{40}\text{Ca}^+$ の損失の主な原因は残留ガスによる散乱であり, それにより捕捉粒子のライフタイムが決まる. 残留ガスとの衝突頻度は捕捉イオンの速度に比例するため, ライフタイムを測定することでレーザーによる冷却, 加熱効果を間接的に確認できる. 図4は Δf を負, ゼロ, そして正の値に固定した場合のライフタイム測定実験を行った結果である. ここではイオン生成後にレーザーを入射し, それと同時に検出器によって全蛍光量の時間変化を測定した. 冷却, 加熱も起きない $\Delta f = 0$ の場合 (図4. 左図の黒線) のライフタイムは 58.5 sであった. それに対し, Δf を冷却側にした場合 (図4. 右図) は 3300 sと非常に長くなった. これは明らかに $\Delta f = 0$ の場合より長く, イオンに冷却効果が表れている.

また, Δf を加熱側に固定した場合 (図4. 左図の赤線) はライフタイムが 2.3 sと非常に短くなった. 加熱の場合, 残留ガスとの衝突頻度の増加に加え, 加熱によってイオントラップの閉じ込めポテンシャル以上の運動エネルギーを得ることによる損失も急激な粒子損失を助長していると考えられる.

3.3 速度空間分布

レーザーの線幅は非常に狭いので, 捕捉された粒子のうち特定の速度の粒子のみと共鳴していると考えてよい. そのためレーザー周波数の関数として得られる捕捉イオンからの蛍光スペクトルは速度分布を反映する. そこで, Δf を負から正の値まで掃引することでレーザーによる速度分布の変化から温度変化を調べた.

図5はほぼ同数の捕捉イオンに対しパワーを変えたレーザーを掃引することで得られたLIFスペクトルを表している. 図の黒線は冷却用レーザーをフィルターに通すことによってパワーを $42 \mu\text{W}$ に下げた後にトラップへと入射したときのLIFスペクトルである. ここまでレーザーパワーを下げると, レーザーとイオンとの共鳴頻度が少なくなり, 冷却効果

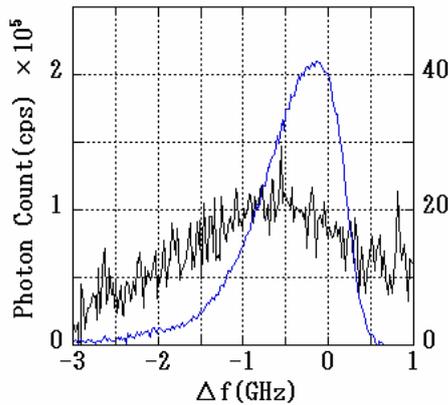


図5. LIFスペクトル. 黒線は入射直前のレーザーパワー $\sim 42 \mu\text{W}$ の場合(縦軸は左側のスケール), 青線は $\sim 4.2 \text{ mW}$ の場合(縦軸は右側のスケール).

は小さくなる. このときスペクトルの広がりには $\Delta f < 0$ 側についてガウシアンで最小二乗フィッティングすることで 1.7 GHz (1σ)となった. この値を捕捉粒子の速度分布の広がりとして仮定して温度を見積もると約 $2.2 \times 10^3 \text{ K}$ となる. これは捕捉イオンの初期温度とほぼ同程度であり冷却効果が非常に小さいことを示している. 図の青線はレーザーパワーを 4.2 mW にした状態でレーザー周波数掃引を行った結果である. このスペクトル幅は黒線であらわしたLIFスペクトルに対して明らかに細くなっており, 同様に温度を見積ると約 $3.7 \times 10^2 \text{ K}$ になった. ここから明らかに冷却効果が表れていることがわかる. また, LIFスペクトルの Δf が負の領域と, 正の領域を比較すると, 明らかに非対称なスペクトルになっていることが分かる. これは離調がプラス値になると急速にイオンが加速, 加熱されることによる損失が起こっていることが原因と考えられる.

4. 極低温化

次にこのレーザーシステムの性能を検証するため, 低温化の極限としてイオン群のクーロン結晶化を目指した実験を行った.

レーザー冷却の原理的な到達温度は冷却イオン種の自然幅で決まる. カルシウムの場合その温度は約 0.5 mK である. この程度の温度まで冷却するとイオン群はクーロン結晶化する. この状態ではエミッタンスがゼロである.

そのような極低温にまで下げるためには加熱レートの減少が必要となる. 加熱の主要な原因は径方向閉じ込めに用いる高周波電圧によるrf加熱であり, その電圧の大きさや, 粒子密度に依存する^[5]. そのため高周波電圧の大きさは初期の高温なイオンを閉じ込めることのできる電圧の中で, 比較的小さい値を選択した. この値をベータトロンベアチューンに換算すると 0.089 となる.

そこでこのパラメータでイオン生成を行い, さらに

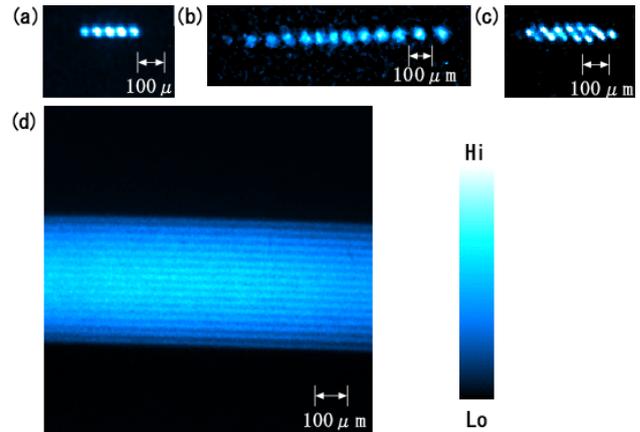


図6. 観測されたクーロン結晶. (a)5個のカルシウムイオンによる1次元紐状結晶. (b)12個の1次元結晶(c)2次元結晶. (d)3次元の殻状結晶.

に冷却と同時に捕捉粒子数を徐々に減らす. これにより加熱効果を減少させ, 低温化を図る. その結果観測された複数個のイオンによる結晶を図6に示す. 各画像の強く光る1点1点が $^{40}\text{Ca}^+$ イオン1つ1つを表す. (a)は5個の $^{40}\text{Ca}^+$ が1次元紐状結晶を形成している. (b)は12個のイオンが結晶を構成している. (c)は2次元ジグザグ構造をとっていることが分かる. また, (d)は数千個のイオンから成る多数の殻構造の一部を撮像したものである. このとき, (a), (c)は端板間距離を 18mm , (b)(d)の場合は 60mm と, 捕捉領域の大きさを変えている.

5. まとめ

線形ポルトラップ中に捕捉したイオン群に対する温度制御用レーザーシステムの構築を行い, 実際に $^{40}\text{Ca}^+$ を用いた冷却実験を行った. その結果, Δf を負にすることでLIFの全蛍光量の増加, 実空間分布, 速度空間分布の広がりの減少, また, ライフタイムの著しい増加が見られ, 冷却を確認できたといえる. また, Δf を正に固定することで同様に加熱効果も確認できた.

次に, 冷却システムの特長評価として, 捕捉イオンの極低温化を目指した. 到達温度を下げるために閉じ込め場の最適化, 捕捉粒子数の減少により1次元から多次元のクーロン結晶の観測に成功した.

参考文献

- [1] H. Okamoto, Y. Wada, and R. Takai, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A **485**, 244 (2002).
- [2] R. Takai, H. Enokizono, K. Ito, Y. Mizuno, K. Okabe, and H. Okamoto, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 5332(2006)
- [3] R. Takai, K. Nakayama, W. Saiki, K. Ito, and H. Okamoto, J. Phys. Soc Jpn **76**, 014802(2007)
- [4] D. J. Wineland, R. E. Drullinger, and F. L. Walls, Phys. Rev. Lett., **40** 1639(1978)
- [5] Vladimir L. Ryjkov, XianZhen Zhao, and Hans A. Schuessler, Phys. Rev. A **71**, 033414(2005)