

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540574

研究課題名(和文)クーロン結晶によるナノ・イオンビーム生成の原理実証実験

研究課題名(英文)Proof-of-principle experiments on Nano ion beam production using Coulomb crystal

研究代表者

伊藤 清一 (ITO, Kiyokazu)

広島大学・先端物質科学研究科・助教

研究者番号：70335719

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：線形ポルトラップ中に生成したクーロン結晶を加熱せずに引き出すことができれば、理想的なナノ・イオンビーム源となる。本課題では数値計算結果をもとにクーロン結晶引き出し実験に最適化したイオントラップを設計・製作するとともに、直径が数マイクロメートルという極細の超低温ビームの断面方向構造を計測するシステムを開発した。また、系統的な数値計算によりクーロン結晶を加熱せずに引き出せる条件を見つけた。

研究成果の概要(英文)：An ion plasma confined in a compact trap system is Coulomb crystallized near the absolute zero temperature. The emittance of the crystallized ion plasma is close to the ultimate limit, far below those of any regular ion beams. An ion beam of extremely low emittance becomes available. Such ultra-low emittance beams, even if the current is low, can be used for diverse purposes including precise single ion implantation to various materials and for systematic studies of radiation damage effects on semiconductors and bio-molecules.

We have designed and manufactured a linear Paul trap system optimized to experiments on the extraction of Coulomb crystals. We also have developed a transverse distribution measurement system for ultra-low emittance beams. By systematic numerical simulations, it is confirmed that ultra-cold ions can be extracted without serious heating.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：クーロン結晶 ナノ・イオンビーム レーザー冷却 非中性プラズマ

1. 研究開始当初の背景

荷電粒子を加速した「ビーム」は、その性能の向上に伴い物理、工学、化学、生命科学、医学等の幅広い分野で応用されるようになった。現在、その実現によりさらなる応用の展開が期待されているビームの一つに、直径が原子間距離程度しかない「ナノ・ビーム」がある。

電子ビームに関しては電子顕微鏡として既に実用化されているが、観測という受動的な役割を果たしているにすぎない。これに対し、イオンで構成される「ナノ・イオンビーム」には様々な応用が期待できる。例えば、半導体や生体細胞の「放射線損傷の研究」や、DNA 中の特定の分子鎖の切断や励起による「分子レベル手術」がある。また、材料表面の組成や配列を能動的に制御できるので「高機能材料の開発」にも応用できる。他にも「超微細加工」や「ナノマテリアルの開発」等、ナノ技術系を構築するための有用な手段ともなり得る。

このような用途においては、ビーム径が細いことはもちろんその拡がり角が小さい、即ち構成粒子の運動量が均一（低温）であることが求められる。換言すれば、エミッタンスが小さいことが重要である。エミッタンスはビームを構成する粒子群が 6 次元位相空間上で占める体積で定義され、保存場においては保存量となる。一般的なビーム輸送系は保存場で構成されるので、エミッタンスはビーム源の段階で決定されることになる。通常、イオンは高温状態で生成されるためエミッタンスが大きく、ナノ・ビーム化するには何らかの散逸を導入する必要がある。

現在、ナノを標榜するイオンビームは一部では実用化されている。集束イオンビーム (FIB) である。FIB では、エミッタンスの大きなイオンビームを複数の微小開口でコリメートし、これを強力な磁気レンズにより集束することでビーム径をナノメートル台まで絞り込む。ただし、この手法で達成できるエミッタンスはあまり小さくない。そのため、焦点前後でビーム径は急激に拡大する。これでは前記の用途には適さず、真のナノ・イオンビームとは言えない。

これに対し、我々は究極的にエミッタンスの小さな「超高品質ナノ・イオンビーム」を得る方法として、「クーロン結晶」をイオン源として採用することを提案してきた。まず、線形ポールトラップに捕捉した高温のイオン群を、ドップラーレーザー冷却法（以下、レーザー冷却法）により mK 程度まで冷却する。この程度まで冷却されたイオン群では、粒子位置の相対的な変化はなくなり、クーロン結晶を形成する。特に、イオン数が比較的少数個の場合には、トラップの軸上に粒子が一行に並ぶ紐状の結晶構造を作る事が知られている。紐状結晶においては、運動量拡がりだけでなく実空間での拡がりもほぼゼロとなる。従って、量子的な効果を無視すれば

「エミッタンスはほぼゼロ」となる。これを加熱なしに取り出す事が出来れば、ビーム径がナノメートル台で、かつ拡がりも非常に小さい理想のナノ・イオンビーム源となる。我々はこれまでに、線形ポールトラップ内に $^{40}\text{Ca}^+$ の紐状クーロン結晶を生成し、これをトラップから引き出すことに成功している。

レーザー冷却によるイオンの結晶化は多くの研究室で成功しており、精力的な研究がなされている。しかし、クーロン結晶を高品質イオン源として用いるという提案は我々が最初である。現時点で、このような観点から研究を行っているのは我々とドイツの 1 グループだけである。

我々が提案する方法には他にも多くの利点が存在する。例えば、

- (1) レーザー誘起蛍光 (LIF) 法によりイオンの数を完全に測定できる。
- (2) 紐状結晶は空間的に等間隔に並ぶため、高周波加速器の位相に同期して入射することで軸方向の加熱なしに加速できる。
- (3) 高周波の最適位相に正確に入射できるので加速距離が短くてすむ。
- (4) 断面方向拡がりほとんど無いのでビーム輸送・加速系の断面方向のサイズも小さくて良い。
- (5) 放射線の遮蔽が不要である、などである。

特に、装置の小型化と遮蔽が不要な点は、コストの削減と使用場所を選ばないことから実用化に対し非常に大きなメリットとなる。

2. 研究の目的

前述のように、我々はこれまでに、線形ポールトラップ内に生成した $^{40}\text{Ca}^+$ の紐状クーロン結晶の引き出しに成功している。引き出されたイオンの検出器への到着時刻はほぼ等間隔であった。これはクーロン結晶が構造を保ったまま引き出された可能性を示唆している。この結果を踏まえ、本研究では以下の 2 つを主な目的とした。

- (1) ナノ・イオンビーム生成に最適化したイオントラップの設計・製作、およびクーロン結晶引き出し条件の最適化。
- (2) 非常に細いビームの断面方向構造を測定する手法の開発、および実際の測定

3. 研究の方法

本課題以前の研究において使用していたトラップでは、クーロン結晶を引き出すのに検出器側の端板電圧を $V_b=0\text{V}$ まで減少させるのと同時に遠い側の端板電圧 V_A を数十 V まで増加させる必要があった。これは $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの生成と捕捉を同じ場所で行っていたため、余計な Ca 原子が電極に付着することで発生する接触電位が原因と考えられた。

この方法で引き出しを行うと検出器から遠い側のイオンがより高いエネルギーを得るため、粒子間の距離が縮まり、クーロン相互作用により横方向に加熱されることが数

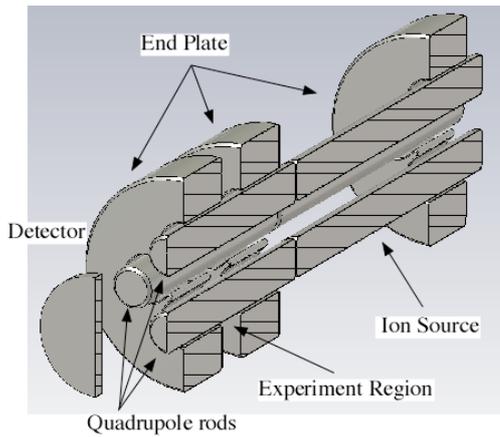


図1：イオントラップの概略図

値計算から示唆された。そこで、本実験ではこの加熱を抑制するよう、クーロン結晶引き出しに最適化したトラップを設計、製作した。概略図を図1に示す。

大きな改良点はイオン生成領域(IS)とクーロン結晶の捕捉・生成領域(ER)を分割したことである。これにより接触電位の影響が小さくなり、引き出し時の V_A も小さくすることが可能である。

しかしながら V_A をどこまで小さくできるかは自明ではない。クーロン加熱はイオン間の距離が狭くなった時に生じるので、クーロン結晶が動き出した後、素早く加速すれば、これを抑制できる。そこで、捕捉領域の電極長は30 mmと可能な限り短くした。

断面方向の大きさや閉じ込めのための高周波電圧の周波数は実績がある旧システムと同一とし、捕捉領域の半径3 mm、周波数2 MHz、とした。

本課題で測定の対象とするのは、断面方向の特定の軸とそれに共役な運動量が作る平面に射影された二乗平均平方根(rms)エミッタンスである。ビームの進行方向の運動量は引き出し電圧から決定できるので、ビーム径と拡がり角からrmsエミッタンスを評価できる。拡がり角はイオンの進行方向に離れた複数の箇所でもビーム径を測定することで評価できる。従って、rmsエミッタンスを測定するためにはビーム径を正確に計ることが重要となる。もちろん、ナノメートル台のビーム径を正確に計ることは容易ではない。そこで、低エネルギーで自由空間を飛ばすことにより、ビーム径を広げ測定を簡易化する。この過程でも外乱が無ければrmsエミッタンスは保存する。

大雑把な評価によれば、レーザー冷却の下限まで冷やした $^{40}\text{Ca}^+$ を10 eVまで加速して、100 mm程度飛ばすと、ビーム径はおおよそ5 μm となる。従って、ビーム径の計測には「数百nm程度の分解能」と「イオンを1個から計測できる感度」が必要となる。マイクロチャンネルプレート(MCP)はその開口率が典型的には60%程度しかなく、不感部分にイオンが当たると信号を得ることができない。本課題

では開口率の問題がない電子増倍管(EMT)を検出器に採用した。

しかしながら、EMT自身には空間分解能がない。そこで、ビーム径の測定は「ナイフエッジ法」で行う。これは、イオン検出器とイオンビームの進路の間に遮蔽板(ナイフエッジ)を置き、この遮蔽板を空間的に走査した際に観測されるイオン数の変化からビーム径を評価する方法である。遮蔽板の駆動装置には超高真空中で使用できかつ50 nmの分解能と5 mmのストロークを持つナノ・ポジショナーを採用した。引き出したイオン群はほぼ軸対称なので、遮蔽板は一軸走査できれば充分である。拡がり角測定のための計測場所の移動は、計測系を直線導入機で動かすことにより、実験装置を大気に晒すことなく行えるようにした。

4. 研究成果

(1) イオン引き出し条件の最適化

トラップの改良による加熱抑制の効果を確かめるため、実際のトラップを想定した数値実験を行なった。計算には市販の3次元電場解析ソフトと当研究室で開発した3次元粒子追跡コードを用いた。

数値計算の結果を図2に示す。縦軸は検出器上の粒子分から計算したエミッタンスで、横軸は引き出し時の端板電圧である。記号はクーロン結晶に含まれる粒子数($N_i=1$ (丸), 2 (三角), 5 (四角))を表す。

白抜き記号は引き出し時に検出器側端板電圧 $V_B=0$ とした場合である。 $N_i=1$ を除いた場合には、 $V_A=5$ V以上で強く加熱されエミッタンスが上昇することが確認された。実際の実験においては、トラップの改良により V_A は小さくても引き出せると考えられるが、念のために大きな V_A でも加熱を抑制できるような引き出し条件の探索も併せて行った。

前述のように、加熱はイオン間の距離が縮まった時に生じる。そこで、引き出し時に $V_B < 0$ とすれば、検出器側のイオンが加速され粒子

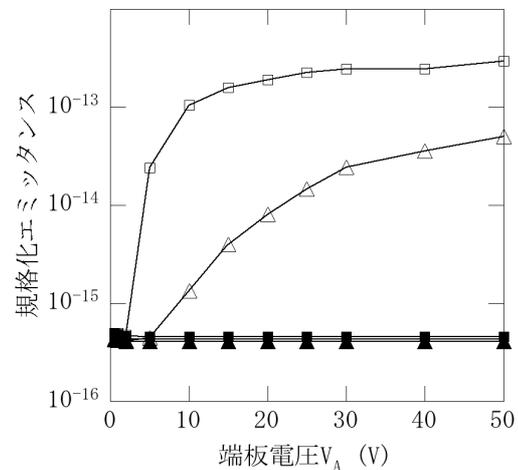


図2：引き出し電圧の最適化

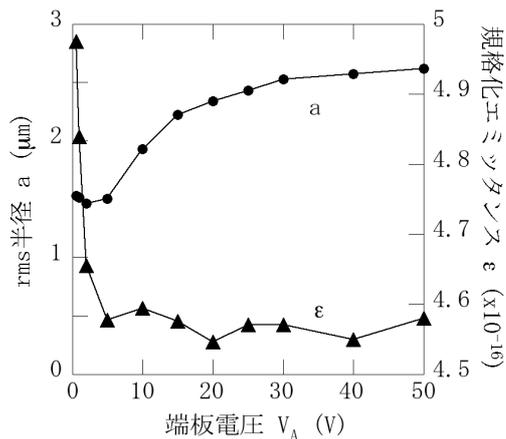


図 3 : 検出器上のイオン分布

間距離が広がり、加熱が抑制されるはずである。図 2 中の黒塗りの記号は $V_B = -V_A$ とした場合の数値計算結果である。この条件では加熱はほとんど起きていない。以上の結果から引き出し時に $V_B < 0$ とすることは加熱の抑制に効果的であることが確かめられた。

検出器上のビームの rms 半径とエミッタンスを端板電圧 V_A の関数として図 3 に示す。Ni=5 個、 $V_B = -V_A$ 、検出器はトラップ中心から 96 mm の場所に設置してある。 V_A が小さいときにはビーム半径は $1.5 \mu\text{m}$ 程度であるが、 V_A の増加に伴い広がっていく。一方でエミッタンスはほぼ一定であるので、ビーム半径の増加は V_B による静電レンズ効果が原因である。

(2) 実験装置の改良と製作

イオントラップおよびナノ・ポジショナーを用いたナイフエッジ法による断面方向分布測定系については、前述のように設計・製作した。これとは別に実験に適するように装置全体の改良も行った。

クーロン結晶の観測は LIF 法により行う。LIF 検出効率を向上させるためには像転送系の対物レンズをクーロン結晶のできるだけ近くに置く必要がある。そのため旧システムでは対物レンズを真空容器内に設置していた。しかし、この方法では対物レンズと接眼レンズを独立に設置することになるので、その軸合わせが煩雑であった。そこで真空容器を一回り小さくすることで、クーロン結晶-対物レンズ間の距離をほぼ保ったまま対物レンズを大気中に設置できるようにした。これにより、旧システムと同等の検出効率を保ちつつ、光軸合わせがより容易に行えるようになった。

旧システムでは真空排気系にターボ分子ポンプとロータリーポンプを採用していた。これらが発生する振動がエミッタンス測定に影響する可能性が懸念された。そこで、主排気系をイオンポンプへと変更した。イオンポンプは可動部がないので振動を完全になくすことができる。更に、イオンポンプは電

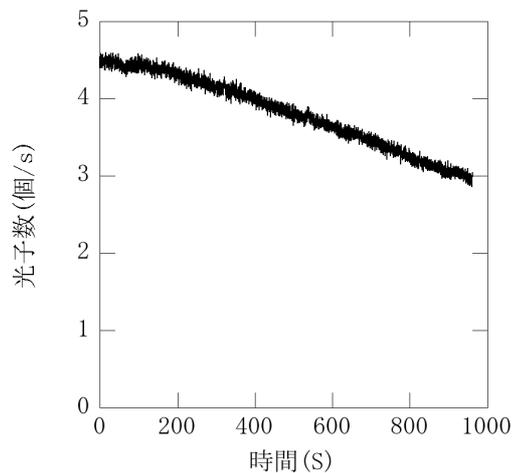


図 4 : LIF 信号の典型的な時間発展

源を切っても暫く真空を維持できる。従って、電源を切って実験を行うことで、排気系からの擾乱が全くない状態で実験を行うことが可能である。

(3) クーロン結晶生成・引き出し実験

最初に本課題であらたに製作した実験装置でイオンの捕捉ができることを確かめた。次にレーザーを照射し、LIF の検出とレーザーによる冷却効果の確認を行った。

図 4 に LIF 信号の典型的な時間発展を示す。LIF の減少はイオン数の減少を表している。ここから寿命を評価するとおよそ 1,000 秒となる。通常、トラップに捕捉されたイオンの寿命は数十秒程度であり、イオン温度が下がるほど寿命は長くなる。このことからレーザー冷却によりイオン温度が極低温まで下がっていることが確かめられた。

しかし、残念ながらクーロン結晶化には至らなかった。一度は-7 乗台であった新システムの到達真空度が-6 乗台まで悪化したことが、その原因と考えられる。残留ガスとの衝突によりイオンが加熱されるため、一般に、真空度が悪いとクーロン結晶化は難しくなる。He 吹き付け法ではリークは発見できなかったため、真空度悪化の原因として容器内の構造物からのガス放出が考えられる。実際、真空容器の一部は他装置からの流用品であるので、これが過去の実験で汚染されていた可能性が高いが、原因は判明していない。

(4) まとめ

本課題で製作した新システムと旧システムの相違はクーロン結晶を取り出した後の計測装置部分であり、トラップ部分はほぼ一緒である。従って、真空度を改善できればクーロン結晶化は可能であると考えられる。また、数値計算によりクーロン結晶からナノ・イオンビームを生成できる可能性が強く示唆されている。従って、今後もこの研究を継続す

る予定である.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 岩井崇晃, “レーザー冷却を応用した⁴⁰Ca⁺イオン蓄積法の開発”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27, 東海大学湘南キャンパス.
- ② 伊藤清一, “クーロン結晶を源とする極低温イオンビームの断面分布計測システムの開発”, プラズマ・核融合学会第 29 回年回, 2012/11/28, クローバー・プラザ (春日市).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/beamphys/index.html>

Fug

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 清一 (ITO Kiyokazu)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・助教

研究者番号 : 70335719

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者