

静電型イオントラップの開発とイオンビームの蓄積に関する研究

(環境計測)

太田哲朗

1. はじめに

本研究室では加速分子イオンの衝突解離反応について調べている。分子イオンの解離パターンは、分子イオンのもつ振動状態に依存する。分子イオンがイオン源で生成される際に、分子イオンに与えられたエネルギーの一部が振動励起状態を作り出す。これらの分子イオンの振動状態を区別して反応測定をすることは難しく、ほとんど実験がなされていない。

本研究では、分子イオンを振動基底状態に冷却するために、百ミリ秒のオーダーで分子イオンを蓄積することのできるイオントラップを開発し、イオンの蓄積を確認するとともに、トラップ性能を評価することを目的としている。この方法により、双極子モーメントをもつ分子イオンは、自発放射によって振動励起状態から脱励起し、振動基底状態にそえられる。例えば、現在研究室で用いられている HeH^+ イオンの場合は、最も高い振動励起状態にあるイオンでも、計算によると約 100msec で振動基底状態まで冷却されると見積もられている[1]。

本要旨では、トラップの確認と性能評価を行うため 1.2 keV- Ar^+ イオン、及び Kr^+ イオンをトラップ内に蓄積した実験とその結果について報告する。

2. イオントラップの概要

図 1 に製作したイオントラップの概略図を示す。製作したイオントラップは全長約 500 mm である。電極 E1 は、イオンの運動エネルギーに対して跳ね返すだけの電圧 V_M を与えている反射電極である。トラップに入射されたイオンは、電極 E1 の間を往復運動することによって蓄積される。E5 ~ E7 はイオンを収束させるためのレンズ電極であり、E5、E7 に 0 V、E6 に電圧 V_L を与える。 V_L を変化させることにより、イオンがトラップ内を安定に往復運動する条件を決定する。これだけの電極では、E1 から E5 までの電場がゆがみ、ビームが大きく発散する原因となる。したがって、補助電極 E2 ~ E4 を設置し、トラップ軸付近の電場が一定になるようにしている。

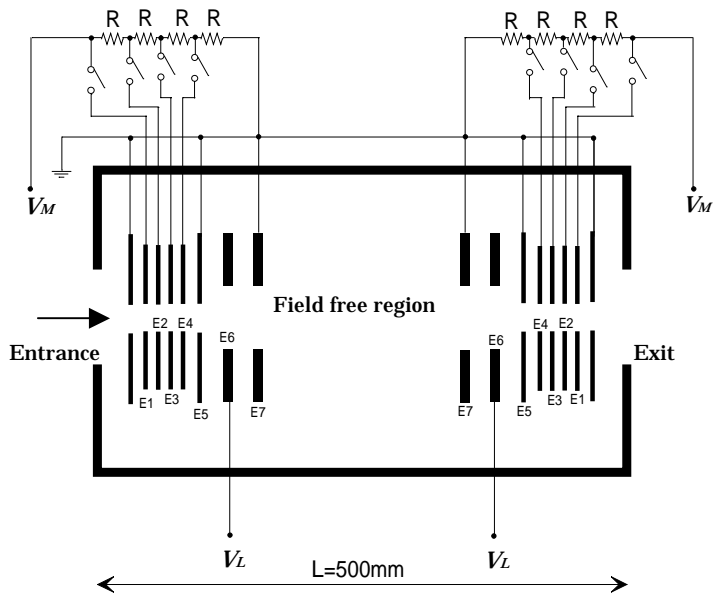


図 1. イオントラップ概略図

イオンビームの蓄積は、あらかじめトラップの出口側電極に電圧を与え、入射イオンを入り口側に跳ね返し、入り口側電極の電圧を高速で立ち上げることによって実現される。その際、入り口電極の電圧を立ち上げる時間内は、付近の電場が変動するため、イオンがトラップから損失する可能性が非常に高い。従って、電圧を立ち上げる時間はイオンがトラップ内を一往復する時間(以下周回時間)に比べ、十分に短くさせる必要がある。今回用いた高速スイッチによるトラップ入り口の反射電極、及び補助電極の電圧の立ち上がり時間は図 2 に示すように 800 nsec(目的電圧の 95 %までの立ち上がり時間)であった。1.2keV-Ar⁺ イオンの周回時間は 12.08 μsec であるので、イオンの周回時間の約 7%まで短くすることができている。

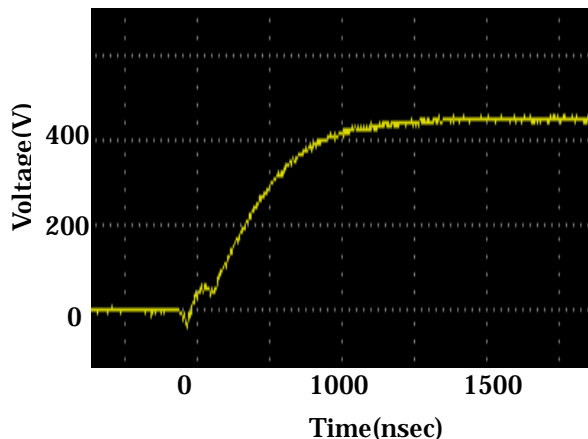


図 2. 入り口電極の電圧の立ち上がり

3. 実験

本実験では、イオンビームの蓄積中にトラップの出口側からトラップ外へ出射してきた中性粒子数を測定し、イオンの蓄積を確認、及びトラップ性能を評価することを目的としている。トラップされているイオンの一部は残留ガスとの荷電変換衝突により中性化され、トラップから逃れてくる。時刻 t において単位時間あたりに中性化される粒子数 $N(t)$ は、時刻 t にトラップされているイオン数を $I(t)$ とすると

$$N(t) = \sigma n v I(t) \quad \dots (1)$$

である。ただし、 σ はトラップ内を運動しているイオンの残留ガスからの電子捕獲断面積、 v はイオンの速度を、 n はトラップ内の残留ガスの原子数密度を表している。 $\sigma n v$ は時間変化に対し一定の値であるので、 $N(t)$ は $I(t)$ に比例する。従って、中性粒子数の t に対する変化を測定することによって、トラップ内の蓄積イオン数を評価できる。

3.1. 蓄積イオンの確認

出口側から逃れてくる中性粒子は、トラップ内で入り口から出口に向かって運動しているイオンが荷電変換することによって中性となったものである。従って、イオンがトラップを一周する走行距離(約 78 cm)と比べて短い長さのイオン集団(以下バンチビーム)をトラップ内に蓄積し、中性粒子数を測定すれば、バンチビームの動きに応じて中性粒子数が増減する。これによって蓄積を確認することができる。

バンチビームの生成方法を以下に示す。イオン源直後に設置しているデフレクターに印加する電圧を、ON - OFF することでイオン源から出てきたイオンビームをビームラインから逸らす。電圧を ON にしている時間だけ、イオンビームがトラップに入射するようにしている。このと

きの ON の時間幅は、イオンがトラップを一周する時間に比べて短い時間に設定する。本実験では、1.2 keV-Ar⁺イオン(周回時間 12.08 μsec)の場合に、5.3 μsec に設定した。長さに換算すると 40 cm である。図 3 に 1.2keV-Ar⁺イオンのバンチビームの形状を直接測定した結果を示す。横軸が時間と対応するバンチビームの長さ、縦軸がイオンの計数を表している。図に示すように、半値幅は 4.2 μsec で長さ 32 cm のバンチビームを生成することができた。また、最大長を見積もっても 7 μsec 長さで 50 cm の幅におさまるバンチビームができています。

図 4 に 1.2keV-Ar⁺イオンのバンチビームをトラップした結果を示す。トラップの各電極に印加する電圧は $V_M = 1870$ V、 $V_L = 1130$ V である。横軸は蓄積時間(2 μsec/ch)、縦軸が中性粒子の計数を表している。図に示すように周期的にピークが現われている。この周期を求めるために、隣り合ったピーク間の時間差をプロットした結果を図 5 に示す。 Ar⁺イオン、 Kr⁺イオンの測定結果からプロットしたものである。実線と点線はそれぞれ最小 2 乗法でガウス分布をフィッティングした結果である。ピーク値は、Ar⁺イオンが 12.0 ± 0.025 μsec、Kr⁺イオンが 17.3 ± 0.001 μsec であった。イオン軌道シミュレーションソフト SIMION Ver7.0 で求めた周回時間は Ar⁺イオンが 12.08 μsec、Kr⁺イオンが 17.50 μsec であり、測定値と良い一致を示した。これらのことからイオンがトラップに蓄積され周回運動していることがわかった。

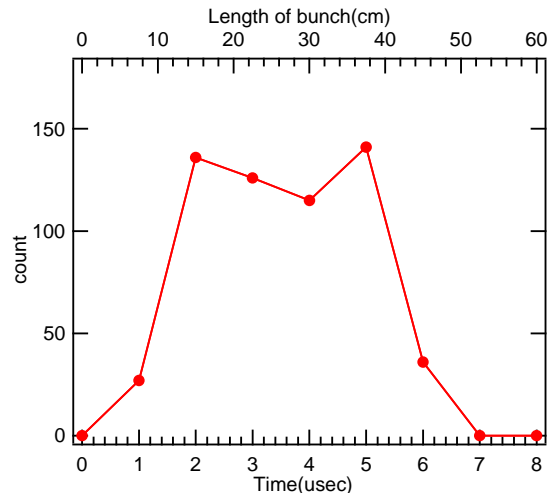


図 3. 5.3 μsec バンチビームの形状

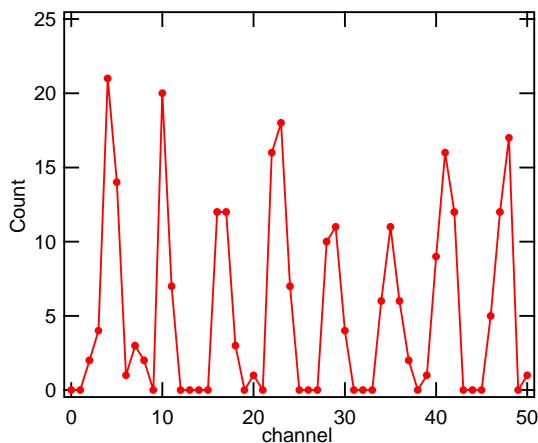


図 4. 5.3 μsec バンチビームの蓄積(1.2 keV-Ar⁺イオン)

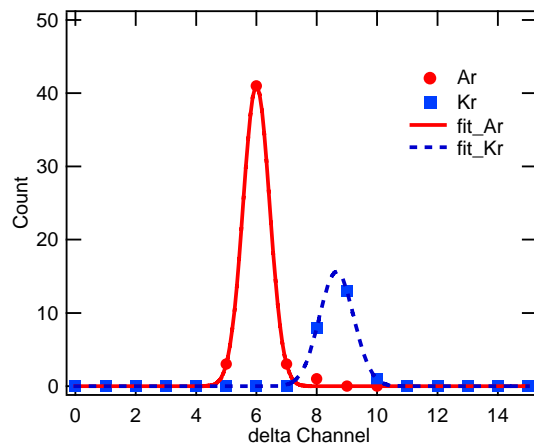


図 5. 周回時間

3.2. 蓄積イオンの寿命測定

Ar⁺イオンビームをトラップに蓄積し、その寿命を測定した。蓄積開始から t 秒後に蓄積されている Ar⁺イオン数 I は

$$I = I_0 \exp(-\sigma n v t) \quad \dots (2)$$

で表される。ただし I_0 は蓄積開始直後の Ar^+ イオン数である。(2)式において、 I_0 が $1/e$ に減少する時間

$$\tau = \frac{1}{\sigma n v} \quad \dots (3)$$

をトラップ内のイオンの寿命とする。そこで、検出される中性粒子数の蓄積開始からの時間変化を測定し、 $1/e$ に減少する時間を求め、それをトラップ内のイオンの寿命とし、性能評価の指標とした。

図 6 に 1.2keV- Ar^+ イオンをトラップした実験結果を示す。トラップ内真空度 1.0×10^{-6} Torr、 2.6×10^{-7} Torr、 2.6×10^{-8} Torr、 1.1×10^{-8} Torr で測定した。横軸が蓄積時間(msec)、縦軸が中性粒子数の減少を Log 表示で表している。(2)式で示したようにどの真空度でも、中性粒子数は指数関数的に減少していることがわかる。図には最小 2 乗法で指数関数をフィッティングして決定した寿命(τ)も示している。トラップ内真空度 1.1×10^{-8} Torr では、151 msec の寿命まで Ar^+ イオンを蓄積できており、目標とする 100 msec の蓄積時間が達成できた。次に、図 7 に各真空度に対して測定された寿命を真空度の逆数に対してプロットした結果を示す。フィッティングして決定した寿命の誤差を誤差棒で表している。図に示すように、求められた寿命は真空度の逆数に対して誤差の範囲で比例している。トラップ内真空度を p とすると、 p は残留ガスの原子数密度に比例するので、(3)式の寿命は

$$\tau = \frac{1}{\sigma n v} \propto \frac{1}{p} \quad \dots (4)$$

と表すことができる。図 7 の結果はこの関係を示している。

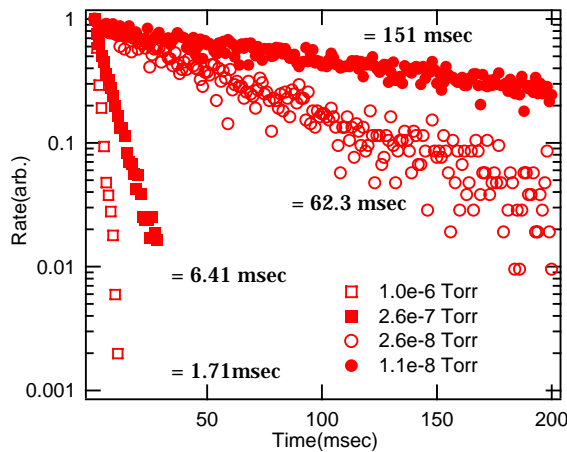


図 6. 各真空度における中性粒子数の減少(1.2 keV- Ar^+ イオン)

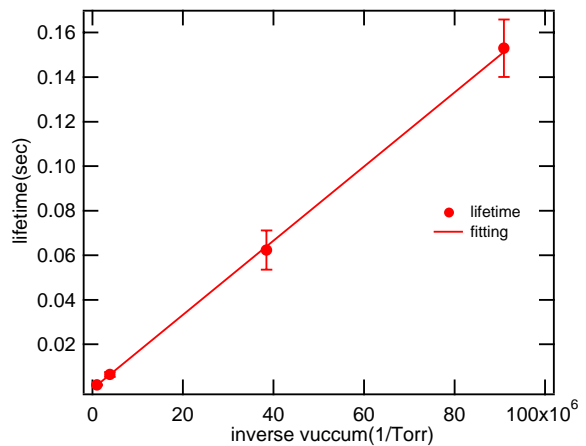


図 7. 寿命の真空依存

参考文献

- [1] S.Datz and M.Larsson Physica Scripta 46 (1992)