

平成 22 年 6 月 18 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540418
 研究課題名 (和文) 振動冷却分子イオンを用いた解離性電子捕獲反応における3体効果に関する研究
 研究課題名 (英文) Three body effects in dissociative electron capture of vibrationally cold molecular ions
 研究代表者
 斉藤 学 (SAITO MANABU)
 京都府立大学・生命環境科学研究科・准教授
 研究者番号：60235075

研究成果の概要 (和文)：静電型イオントラップによって振動基底状態にそろえられた OH^+ イオンビームを生成することに成功した。この冷却 OH^+ イオンの、解離性電子捕獲反応における解離方位依存性を調べた。その結果、この反応は等方的な解離反応であり、よって3体効果の影響は確認できなかった。ここでいう3体効果とは、解離粒子-標的原子間の3体散乱のことである。3体効果の影響をより強く受けた解離性電子捕獲を起こすと予想される HD^+ イオンビームの振動基底状態への冷却が課題である。

研究成果の概要 (英文)：We succeeded in producing vibrationally cold OH^+ ion beams using an electrostatic ion trap. The angular dependence of the dissociation of the cold OH^+ ions in dissociative electron capture collisions was investigated. The angular distribution was isotropic, and three-body effects were not observed. Here, the three-body effect means the three-body collision between the individual fragments and the target atom. Vibrationally cold HD^+ ion beams are needed because dissociative electron capture by the HD^+ ions could be influenced by the three-body effect more significantly.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：原子・分子物理学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：解離性電子捕獲、静電型イオントラップ、3体効果

1. 研究開始当初の背景

(1) 加速分子イオンの衝突誘起解離反応の断面積測定は、実験データと衝突反応理論の比較という基礎的研究の側面だけではなく、放射線科学や宇宙空間科学、あるいは核融合炉

研究などにおけるデータの必要性から、精神的に行われてきた。このような反応断面積測定では、反応時の分子イオンの向きについて識別されておらず、平均した量を求めるのが普通であった。近年、実験技術の進歩に伴い、

分子イオンの向きと反応断面積の関係が研究対象になってきている。数 100 eV 以上に加速された分子イオンの衝突の場合、衝突時間が分子イオンの回転時間に比べ充分短いと考えることができる。そのような条件の下での分子イオン衝突では、衝突によって生じた解離粒子の種類とその運動量を同時測定することで、衝突直前の分子イオンの向きを決定することが可能である。複数の研究グループがこの方法を用いて、衝突誘起解離反応の分子配向依存性を調べている。

(2) 本研究代表者の斉藤らは、衝突誘起解離反応のなかでも、解離性電子捕獲反応 (DEC) に着目して、その配向依存性を明らかにする実験研究を行ってきた。その結果のひとつとして、2 原子分子イオンの電子捕獲解離において、電子捕獲と同時に標的原子の電離が生じている場合 (DECI) に、解離の非等方向性が顕著になる現象を発見した。斉藤らは、非等方向的な解離現象の理由を、解離原子と標的原子の間の 3 体衝突によるものと考えている。

(3) 斉藤らはこの推論を確認するために、3 体衝突のシミュレーション計算で、DEC と DECI の解離分布を計算した。その結果、DECI において解離が非等方向的になる可能性を示すことはできたが、実験から得られた解離分布を再現するには至っていない。この原因として、衝突時の分子イオンが様々な振動状態に分布していることがあげられる。よって、振動状態が一定である分子イオンを実験に用いて解離分布を測定することができるのであれば、あいまいなく実験結果と計算結果を比較することができ 3 体効果を明らかにできると考える。

(4) 一方、斉藤らは東京大学の原子核研究所に設置されていた磁気型イオン蓄積リング TARN II における MeV 分子イオンビーム-電子ビーム合流実験で、双極子モーメントを持つ 2 原子分子イオンはリングに蓄積されている間に双極子放射によって振動脱励起することを実験的に確かめていた。この結果をうけ、keV エネルギーの分子イオンビームを蓄積させることが可能な静電型のイオンビームトラップを設計し、開発することに成功している。

2. 研究の目的

(1) 静電型トラップに蓄積された分子イオンより、振動基底状態に冷却された keV エネルギー分子イオンビームを生成する。

(2) 振動基底状態の 2 原子分子イオンの解離性電子捕獲反応における解離の方位依存性を調べ、3 体効果による影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 静電型イオンビームトラップより取り出したビームを実験散乱槽まで輸送するためのビームラインを設置する。

① トラップからのイオンビーム取り出しのため、トラップ下流側電極への印加電圧をパルス化する。

② 取り出されたイオンのうち、目的の運動エネルギーを持たないイオンおよび中性化したイオンを除去するため、四重極デフレクターをビームラインに設置する。

(2) トラップから取り出したイオンビームの量や形状を確認する。この確認は、位置検出型 MCP によって行う。

(3) 双極子モーメントを持つ分子で最も単純な HD^+ イオン、およびより双極子モーメントが比較的大きい OH^+ イオンを用いて、生成した分子イオンビームの振動冷却を確認する。

① 分子イオンのトラップ内での寿命を測定し、この結果より取り出すまでのトラップ蓄積時間を決定する。寿命は、トラップより出てくる中性粒子の時間減衰を測定することで求める。

② トラップから引き出した分子イオンビームを原子標的に衝突させ、衝突後の中性粒子のみを蛍光アノード付 MCP で検出する。CCD を用いた 2D イメージング装置によってアノードの粒子像を測定することで、解離中性粒子間距離分布を得る。この距離分布より分子イオンの振動冷却状態を調べる。

(4) 振動基底状態に冷却された分子イオンの解離性電子捕獲反応を測定し、解離の方向依存性を調べる。

① 解離性電子捕獲で生成する標的イオンを飛行時間分析器で検出し、解離中性粒子間距離データと同時にリストモードで記録する。

② 上記のデータから、DEC と DECI における解離粒子間距離分布をそれぞれ得る。この結果より、解離の方向依存性を調べる。

4. 研究成果

(1) 静電型トラップから蓄積イオンを取り出し、衝突研究に用いることのできるイオンビームを生成することに成功した。従来、この型のトラップを用いたイオン実験はトラップ内でのイオン寿命や脱励起を対象にしたものがほとんどであった。トラップからの取

り出しイオンビーム生成の成功は、電子・振動励起状態を冷却した原子、分子イオンビームの原子衝突実験への利用という可能性を大いに広げる成果である。

①図 1 は 2 keV Ar⁺イオンをトラップに蓄積したときに、トラップより下流の MCP で測定した粒子数の時間変化である。10 ミリ秒後にトラップ出口側のすべての電極電圧を立ち下げることによって、10 マイクロ秒幅のイオンビームを取り出せていることがわかる。ちなみに、0~10 ミリ秒の間に検出されている粒子は、トラップ内での残留ガスとの電子捕獲反応で生じた Ar 中性粒子である。

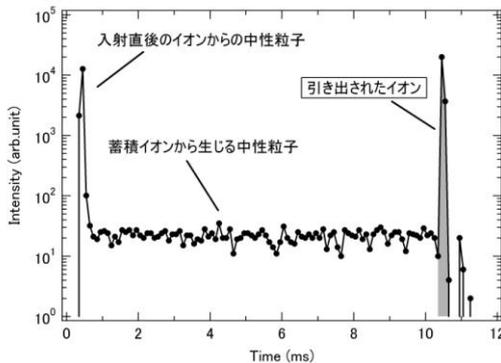


図 1 トラップからのイオン取り出し

②四重極ビームデフレクタでエネルギー弁別したビームは、ガウス分布形状のビームであることがわかった。ビーム中心にアパーチャを用いたダブルコリメータを設置することで、エネルギーのそろった半値幅 1 mm 程度のイオンビームを生成することができた。

(2)トラップ内のイオン寿命測定より、振動基底状態への冷却に必要とされる時間以上に、OH⁺イオンをトラップ内に蓄積できていることがわかった。一方、HD⁺イオンの蓄積時間は冷却時間に満たないことが明らかになった。この結果は、双極子モーメントが比較的大きいOH⁺のような分子イオンであれば、我々の現状のトラップで十分に振動状態冷却が可能であることを示すものである。従来このような分子イオンビームの冷却はストレージリングのような中~大規模の装置で行われていた。よって、実験室規模の小型トラップで冷却の可能性を示せた意義は非常に大きい。

①図 2 はトラップ内の 2 keV OH⁺イオンの寿命測定の結果である。トラップ内でイオンビームが指数関数的に減少していることがよくわかる。イオンが 1/e に減少する時間 (寿命) は、指数関数フィッティングより、103 ミリ秒である。理論計算による振動冷却時間 (10 ミリ秒程度) に比べて十分長く蓄積でき

ていることがわかった。

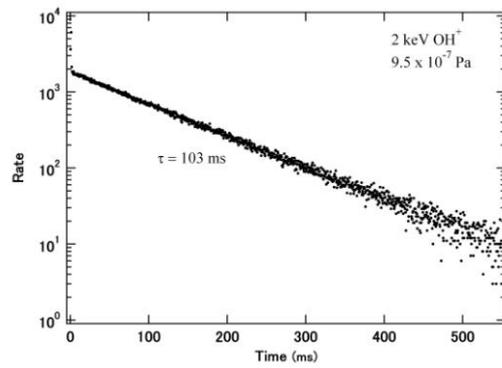


図 2 2 keV OH⁺イオンの寿命測定

②図 3 はトラップ内の 2 keV HD⁺イオンの寿命測定の結果である。OH⁺イオンと同様にイオンビームが指数関数的に減少していることがわかる。寿命は、指数関数フィッティングより、44 ミリ秒である。理論計算による振動冷却時間 (300 ミリ秒程度) の 15%ほどの時間しか蓄積できていないことがわかった。

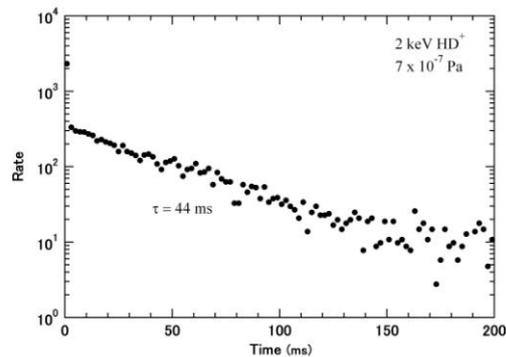


図 3 2 keV HD⁺イオンの寿命測定

(3)トラップ引き出しイオンビーム-原子標的衝突における解離中性粒子間距離分布の測定結果より、振動基底状態に冷却されたOH⁺イオンビームを得られていることが、実験的に確かめられた。トラップ蓄積イオンの直接的な振動冷却の確認は初めてである。また、振動基底状態に冷却された keV 分子イオンビームを衝突実験に供することのできる形で生成できたという意味でも、意義は非常に大きい。一方、HD⁺イオンに関しては、研究成果(2)②で予想されたように、振動基底状態に冷却できていないことが、実験的にも確認できた。ただし、蓄積時間はトラップ真空度に依存するので、現状の真空度 (~10⁻⁶ Pa) を改善することで、双極子モーメントの小さいHD⁺分子イオンの冷却も十分可能である。

① 4 は 2 keV OH⁺イオンの解離中性粒子間距離分布測定の結果である。蓄積時間が 1

ミリ秒と 100 ミリ秒の場合である。図に示されるように、100 ミリ秒蓄積した場合には、分布が 11~12 mm の距離でピークとなることがわかる。図の実線はフランク-コンドン原理に基づいた Projection method によって計算された、振動基底状態にある OH⁺イオンの解離距離分布である。100 ミリ秒蓄積した場合のデータをほぼ再現している。よって、振動基底状態に冷却された OH⁺イオンビームを得られていることが、実験的に確認できた。

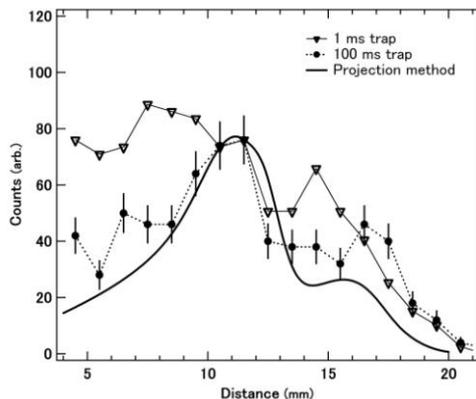
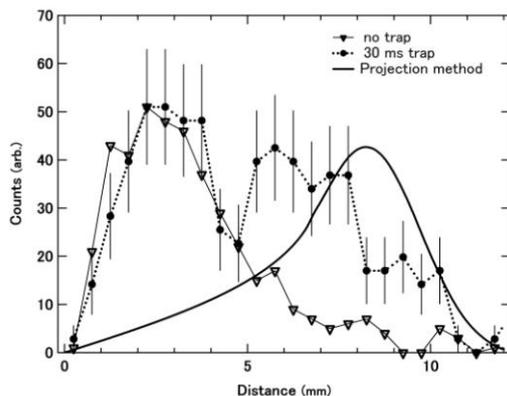


図 4 2 keV OH⁺ の解離性電子捕獲衝突における解離中性粒子間距離分布

図 5 2 keV HD⁺ の解離性電子捕獲衝突における解離中性粒子間距離分布

②図 5 は 2 keV HD⁺イオンの解離中性粒子間距離分布測定の結果である。30 ミリ秒蓄積し



た場合には、蓄積しない場合に比べ分布が距離の大きいほうにシフトしていることがわかる。一方、Projection method を用いた計算によれば、振動基底状態に冷却した場合の分布は、8~9 mm あたりにピークを示す。これは、30 ミリ秒蓄積した測定の結果と異なる。これより、現状の 30 ミリ秒の蓄積では、振動基底状態に冷却された HD⁺イオンビームを生成できていないことが確認できた。イオンの蓄積時間はトラップの真空度に依存する

ので、振動基底状態の HD⁺イオン生成のためには、現状の真空度の改善が課題である。

(4) 2 keV OH⁺イオンの解離性電子捕獲で生成する標的イオンを飛行時間法で分析した結果、DEC に比べ DECI の割合が非常に少ないことがわかった。これは、図 4 のデータがほぼ DEC からの解離によるものであることを表している。図中の Projection method による計算は、等方的な解離を仮定して計算されたものである。この計算結果とデータの一致がよいことから、振動基底状態にある 2keV OH⁺イオンビームの DEC による解離は等方的であると言える。よって、この反応では 3 体効果の影響が小さいことがはっきりした。一方、DECI による解離の方向依存性と 3 体効果の影響を明らかにするために、DECI がより多く生じる HD⁺イオンビームを、研究成果(3)②で述べたように振動基底状態へ冷却することが課題である。

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)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 斉藤学、甲斐裕章、高橋直也、春山洋一：“静電型イオントラップを用いた振動冷却分子イオンの解離性電子捕獲反応測定 II” 日本物理学会第 65 回年次大会．(20100323)．岡山大学
- ② 斉藤学、細川俊介、臨泰斗、春山洋一：“静電型イオントラップを用いた振動冷却分子イオンの解離性電子捕獲反応測定” 日本物理学会第 64 回年次大会．(20090330)．立教大学池袋キャンパス

[その他]

ホームページ等

http://www2.kpu.ac.jp/ningen/physics/trap_ext.ppt

6. 研究組織

(1) 研究代表者

斉藤 学 (SAITO MANABU)

京都府立大学・生命環境科学研究科・准教授

研究者番号：60235075

(2) 研究分担者

春山 洋一 (HARUYAMA YOICHI)

京都府立大学・生命環境科学研究科・教授

研究者番号：00173097