

原子衝突研究協会誌 2009年第6巻第5号

しよとつ

Journal of Atomic Collision Research



**The Society for
ATOMIC COLLISION
RESEARCH**

原子衝突研究協会 2009年9月15日発行
<http://www.atomiccollision.jp/>

しょうとつ

第6巻 第5号

目次

総説: 多重同時計測法を用いた低速多価イオン・分子衝突ダイナミクスの研究 (金安達夫)	... 4
NPO 法人「原子分子データ応用フォーラム」の設立についての報告 (佐々木明, 村上泉)	... 12
第10回若手奨励賞を金安達夫氏に授与 (庶務)	... 13
2009年度第2回運営委員会報告 (庶務)	... 14
第36回総会報告 (庶務)	... 14
国際会議参加報告 (編集委員会)	... 15
ICPEAC2009 (井上洋子)	... 15
ICPEAC2009, POSMOL2009 (黒川学)	... 16
ICPEAC2009, POSMOL2009 (鈴木大介)	... 16
ICPEAC2009, POSMOL2009 (南雲一章)	... 17
ICPEAC2009 (藤田奈津子)	... 17
ICPEAC2009, POSMOL2009 (谷内一史)	... 18
ICPEAC2009, POSMOL2009 (山本果林)	... 19
原子衝突若手の会第30回秋の学校開催のお知らせ (第30回秋の学校開催事務局)	... 19
国際会議発表奨励事業に関するお知らせ (庶務)	... 20
「しょうとつ」原稿募集 (編集委員会)	... 20
今月のユーザー名とパスワード	... 21

多重同時計測法を用いた 低速多価イオン・分子衝突ダイナミクスの研究

金安達夫

九州シンクロトロン光研究センター

kaneyasu@saga-ls.jp

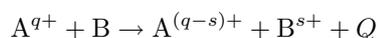
平成 21 年 8 月 26 日原稿受付

1. はじめに

多価イオンと物質の相互作用に関する研究は、1970年代の多価イオン源の実用化以来、実験・理論の両面から盛んに行われてきた。多価イオンの運動エネルギーを $\sim \text{keV/u}$ の低速領域に限定すると、多価イオンが原子分子に接近したときの主要な反応は、標的から電子を引き抜く電荷移行反応である。この過程は、基礎的な原子物理の問題としての興味のみならず、核融合プラズマ中における不純物多価イオンの挙動を探るといった応用的な側面からも非常に関心がもたれてきた。さらに近年では、彗星から電荷移行反応に起因する多価イオンの脱励起 X 線が観測され、彗星の構成物質、太陽風に含まれる元素成分についての知見が得られるに至り [1, 2]、広い分野の研究者から注目される話題の一つとなっている。本稿では非常に遅い (運動エネルギー数十 eV/u) 多価イオンと分子の衝突現象に話題を限定し、衝突ダイナミクスを理解するための新たな試みとしてなされた同時計測技術を用いた研究を紹介する。

2. 電荷移行反応

中性原子分子から多価イオンへの電荷移行は以下のように表わされる。



ここで Q は反応エネルギーであり、反応前後における全電子の束縛エネルギーの差である。電

荷移行反応の終状態ではイオン間のクーロン斥力が作用するため、 Q が正の発熱反応が主要である。電子は中性原子分子から多価イオンの励起状態へ状態選択的に捕獲され、励起状態の多価イオンは自動電離や蛍光放出によって安定化する。また分子標的であれば、複数の電子を奪われた多価分子イオンの多くは不安定であり、核間のクーロン反発によって爆発的な解離が起こる。

多価イオン・原子分子衝突における電荷移行反応の実験研究は、多価イオン源開発直後の反応断面積の測定 [3, 4, 5] に始まった。その後、多価イオンの状態選択的な電子捕獲の実証 [6] を契機として、多価イオン衝突現象の実験研究があらゆる反応系を対象として精力的に展開された。また理論研究からは、状態選択的な電子捕獲の基礎的理解が Classical Over Barrier (COB) モデル [7] によって与えられた。多電子過程への拡張と精密化 [8, 9] を経て、COB モデルは多くの反応系において実験結果の解釈に使われている。1980年代以降の多価イオン衝突の理論的・実験的研究の飛躍的な進展 [10, 11] を受け、今日では $\sim \text{keV/u}$ 領域の多価イオン衝突現象の大筋は理解されたといつてよい。

これに対して、衝突エネルギーが keV/u よりさらに低い領域における実験研究は、原子物理的関心や基礎的データとしての他分野からの必要性にも関わらず、最近まで進展してこなかった。その理由は低エネルギーの多価イオンビームでは、空間電荷効果によるビームの発散により精密な実験が著しく困難になることにある。しか

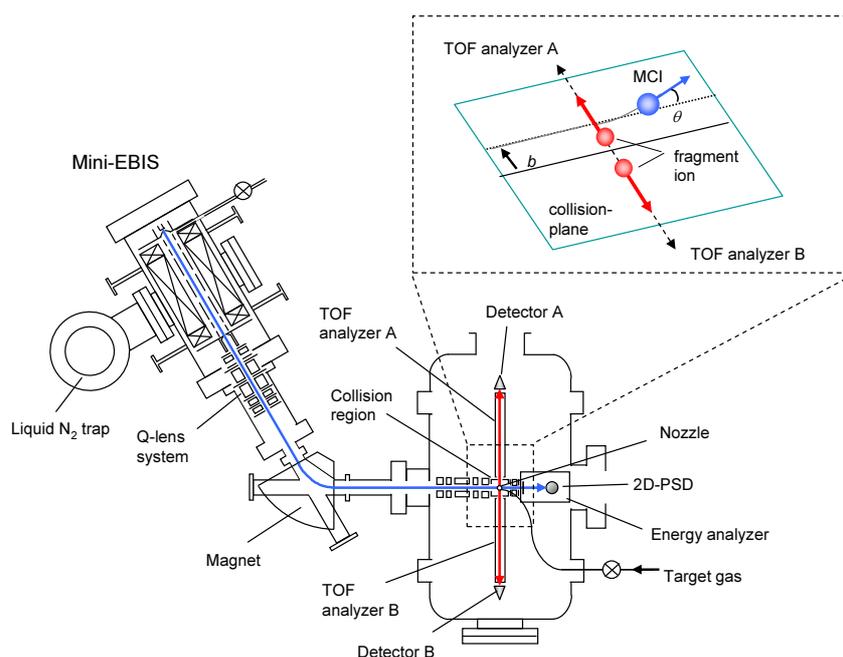


図 1: 低速多価イオン・分子衝突実験装置の概略図。

しながら、このような領域では電荷移行反応の断面積が特異な振る舞いを示し [12, 13, 14, 15], そこでは標的の分極効果が多価イオン衝突を特徴付けるなど興味深い現象が知られ、より低いエネルギー領域における多価イオン衝突現象の解明が期待されていた。

一方、分子を標的とした多価イオン衝突過程も詳細の解明は困難な状況であった。理由として、分子は原子と比べ内部自由度が大きいため、実験的には複雑な反応経路の選別が困難であり、理論的にも多中心標的を扱う難しさのために特にダイナミクスに関してはあまり理解が進んでいない。実験の側面では、原子標的における反応系の内部状態に関して知見を得る手法として、併進運動エネルギー分光法や反跳運動量分光法といった反応生成物の運動エネルギー変化の観測が一般的である。さらには、反跳イオンと入射イオンの同時計測により反応経路を選別する手法や、散乱情報から相互作用ポテンシャルに関する知見を得る試みも行われてきたが、分子標的に対して同様の手法をそのまま用いたとしても、多様な反応経路の全貌を捕らえることは難しい。分子標的に対しては、多価イオン衝突過程における解離イオンの観測 [16, 17, 18, 19, 20] が多

く行われてきたが、解離イオン種の分析だけでは、多価イオンの電子捕獲準位を特定して、電荷移行反応と分子解離機構の詳細を調べることは困難であった。そこで著者を含む研究グループでは、1 keV/u 以下の低速多価イオン・分子衝突ダイナミクスを解明することを目的として、反応生成物の全てを毎回の衝突イベントごとに同時検出する手法の開発に着手した。反応生成物を同時に捕らえ、さらに観測された粒子間のエネルギー、角度分布の相関を解析すれば、多価イオン衝突に起因する多様な反応経路を分離識別して衝突ダイナミクスを理解可能と期待される。

3. 多重同時計測実験

実験装置の全体図と同時計測の概念を図 1 に示す。実験装置は小型多価イオン源 Mini-EBIS [21, 22] と反応分析部から構成される。Mini-EBIS から引き出された多価イオンを衝突領域直前のレンズ系により減速することで、価数当たりの運動エネルギー 50 -1800 eV の多価イオン衝突実験を実現した。反応分析部には、電荷移行反応によって電子を引き抜かれた多価

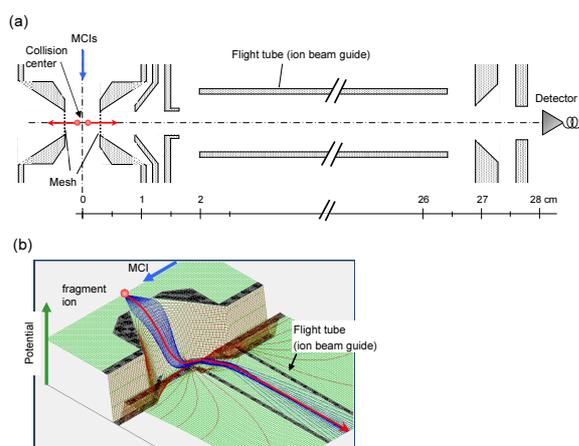


図 2: (a) 飛行時間分析器の構造. 飛行管に高周波イオンビームガイドを組み込み、イオンの捕集効率とエネルギー分解能を向上させている. (b) 衝突領域近傍のポテンシャル.

分子イオンのクーロン爆発で生成された解離イオン“対”を観測するための一対の飛行時間型分析器(図中では TOF Analyzer A 及び B と示した), 及び入射多価イオンのエネルギー利得と散乱情報を得るための, 二次元位置敏感型検出器を内蔵した平行平板型エネルギー分析器が配置されている. 標的ガスは衝突領域上部に設置したノズルから吹き出した分子線として供給し, 多価イオンビームと交差させる. 同時計測の対象は電荷移行反応後の価数選別した多価イオンと, 解離イオン対の三種類の粒子であり, 衝突イベント毎に, 多価イオンの位置情報(散乱角とエネルギー), 解離イオン対の各飛行時間の計四つのパラメータを記録する. なお同時計測データの収集には芝浦工業大学のグループにて開発された Menplus システム [23] を使用した. 本実験装置の最大の特徴は, 散乱平面を飛行時間型分析器の軸とイオンエネルギー分析器の入射スリットで限定することで, 多価イオン・分子衝突を二次元平面上に規定したダイナミクスとして容易に理解できるようにした点にある. また図 2 に示したように, 独自に開発した 16 極型の高周波型イオンビームガイド [24] を飛行時間型分析器に組み込むことにより, イオンの捕集効率増大とエネルギー分解能の向上を両立させた. なお衝突領域はフィールドフリーとして,

解離イオンの飛行管への取り込み効率が価数・運動エネルギーによらず一定となるようにしてある. 飛行管前段の収束レンズ系を適切に設定することにより, イオンの取り込み効率を幾何学的条件のみで規定することが可能である.

4. 低速多価イオン・分子衝突ダイナミクス

同時計測実験は二原子分子をターゲットとして, 多価イオン衝突によって生成された解離イオン対の飛行時間分析からスタートした [25, 26, 27]. その後, 衝突ダイナミクスの詳細の理解を目的として, エネルギー分析器へ二次元位置敏感型検出器を取り付け, 解離イオンの飛行時間分析と同時に衝突後の多価イオンについてもエネルギー利得・散乱情報を得た [28]. ここでは同時計測実験の例として, Kr^{8+} イオンと N_2 分子衝突(衝突エネルギー $E=200$ eV/u 以下)における多電子移行過程を紹介する.

本研究では衝突後の Kr イオンの価数に応じて, 以下のように多電子捕獲過程を分類している. 電荷移行反応後の多価イオンは Kr^{q+} として観測されるが, $q=7, 6, 5$ に対して一電子, 二電子, 三電子捕獲過程とする. ただし N 電子捕獲といっても, 多電子移行によって生成された励起状態の多価イオンが自動電離によって安定化する過程も含まれるため, N 個以上の電子が分子より引き抜かれるケースも混在する. なお本稿では二電子捕獲過程に関する実験結果を紹介し, 解離イオンの飛行時間スペクトルに現われた構造を衝突ダイナミクスの観点から理解する試みに話題を絞った. 同時計測データから導かれる多価イオン衝突現象の詳細については, 文献 [29, 30, 31] を参照されたい.

4.1 飛行時間測定

図 3 に二電子捕獲過程において Kr^{6+} イオンと同時計測された解離イオン対の飛行時間スペクトルを示す. 個々のピークは多電子移行によって生成された多価分子イオンの解離パターンに対応する. 二電子捕獲過程において識別された

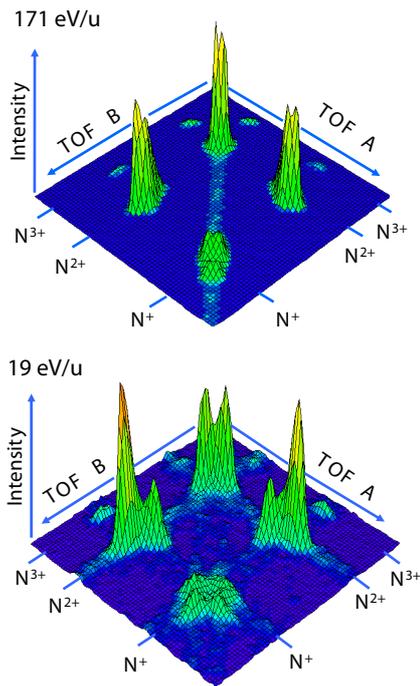
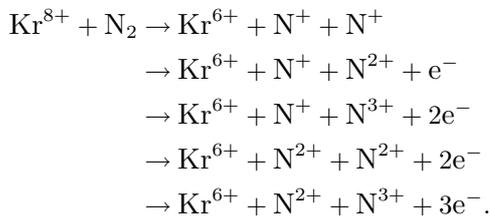


図 3: $\text{Kr}^{8+} + \text{N}_2$ 衝突における二電子捕獲過程で生成された解離イオン対の飛行時間スペクトル. 衝突エネルギーは 171 eV/u と 19 eV/u.

反応経路を以下にまとめる.



最終的な Kr イオンの価数は 6+ であるが、最大

で 5 電子が Kr イオンへ乗り移り、多重励起状態の多価イオンが自動電離によって Kr^{6+} へ安定化する過程が、同時計測された解離イオン対と多価イオンのエネルギー情報より特定された. また、衝突エネルギーが 19 eV/u まで減少した場合には、飛行時間スペクトル上のピークが分裂し、その中でも非対称な価数の解離チャンネルでは分裂したピークの強度が異なっている.

衝突エネルギーの減少に伴い観測された飛行時間スペクトルのピーク構造変化を調べるため、エネルギー分解能を向上させて飛行時間測定を実施した. 二種類の反応経路 ($\text{N}^{2+} + \text{N}^{2+}$ と $\text{N}^{2+} + \text{N}^+$ の生成反応) について、飛行時間スペクトルを拡大して図 4 に示す. いずれの解離チャンネルにおいても二次元スペクトル上のピークは分裂しているが、この構造は解離イオンが“速いイオン”と“遅いイオン”の対として生成されたことに起因している. この運動エネルギーの異なる解離イオン対の生成機構は、衝突力学の考察により容易に理解される. 図 5 は $\text{Kr}^{8+} + \text{N}_2$ 衝突系におけるニュートンダイアグラムを示している. 電荷移行反応が発熱反応であることから、低エネルギー衝突ではイオンビーム軸へ垂直な方向への運動量移行が増大する. その結果、分子の解離ダイナミクスへ反跳運動量が重畳されるため、多価イオンビーム軸に垂直な方向で

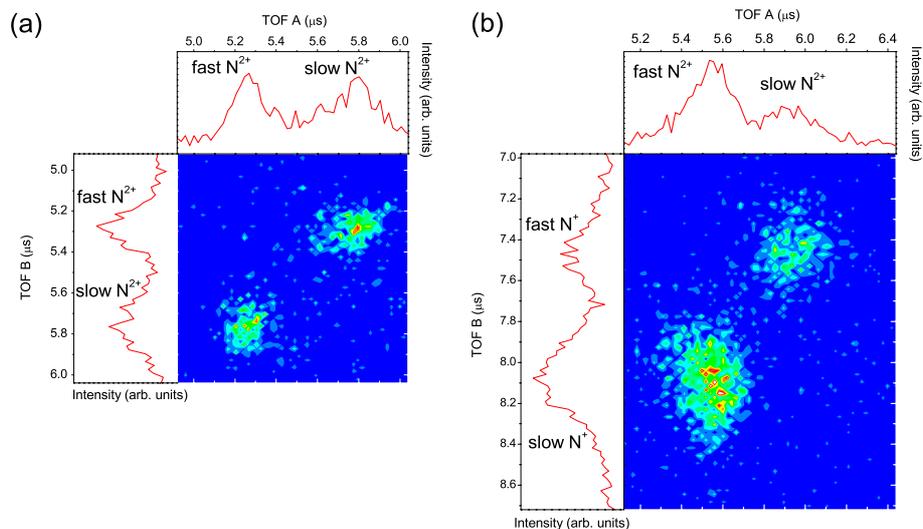


図 4: $\text{Kr}^{8+} + \text{N}_2$ 衝突 ($E=19$ eV/u) における二電子捕獲過程で生成された解離イオン対の飛行時間スペクトル. 一次元の飛行時間スペクトルは二次元プロットの射影に対応する. 解離チャンネルは (a) $\text{N}^{2+} + \text{N}^{2+}$. (b) $\text{N}^+ + \text{N}^{2+}$.

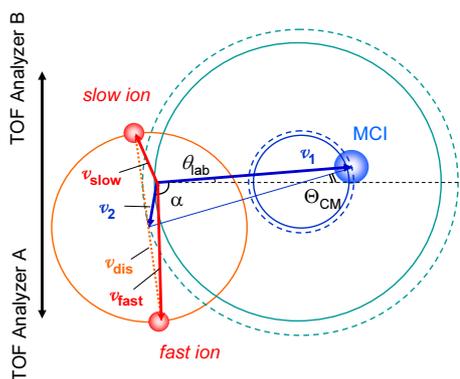


図 5: $\text{Kr}^{8+} + \text{N}_2$ 衝突におけるニュートンダイアグラム。散乱多価イオン、解離イオン対の速度ベクトルの相関を示す。 \mathbf{v}_1 , \mathbf{v}_2 は衝突後の多価イオンと標的分子の速度ベクトルを表わす。解離イオンの速度ベクトルは、反跳速度ベクトル \mathbf{v}_2 と分子解離によるベクトル \mathbf{v}_{dis} の合成となる。解離イオン対は速いイオンと遅いイオンの対として観測され、それぞれの速度ベクトルは \mathbf{v}_{fast} と \mathbf{v}_{slow} である。

解離イオンの飛行時間分析を行えば、“速いイオン”と“遅いイオン”が常に対となって観測されることになる。また、多価イオンと分子の相互作用は衝突後のクーロン反発ポテンシャルが支配的と考え、衝突時に入射多価イオンから近いサイトの原子が遅いイオン、逆に遠いサイトの原子が速いイオンに対応する。このことから、非対称の価数の解離チャンネルにおける分裂ピークの強度差は分子解離の異方性を反映しており、衝突時に入射多価イオンより遠いサイトの原子が高電離状態となるチャンネルが主要と推定された。

4.2 多重同時計測による衝突ダイナミクスの理解

低エネルギー多価イオン衝突では、標的への運動量移行が分子の解離ダイナミクスを理解する上で無視できないこと、また、非対称価数の解離チャンネルでは分子解離に異方性が現われ、その効果は衝突エネルギーの減少によって強調されることが見出された。低速多価イオンの衝突ダイナミクスの詳細を理解するため、多価イオンのエネルギー・散乱情報の同時測定を行った。二電子捕獲過程の主要な反応経路に対応する Kr^{6+} イオンのイメージを図 6 に示す。この二次元プロットは、反応エネルギー Q 値と散乱

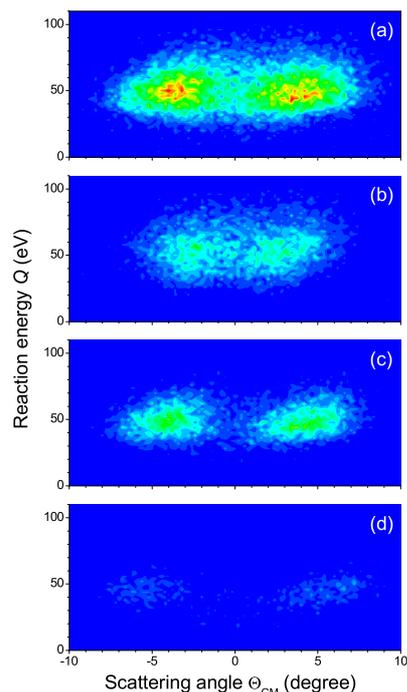


図 6: $\text{Kr}^{8+} + \text{N}_2$ 衝突 ($E = 19$ eV/u) における二電子捕獲過程で生成された Kr^{6+} イオンのイメージ。位置情報を重心系における散乱角と反応エネルギー Q 値へ変換してプロットした。(a) 全ての反応経路の和, (b) $\text{N}^+ + \text{N}^+$, (c) $\text{N}^+ + \text{N}_2^+$, (d) $\text{N}_2^+ + \text{N}_2^+$ 。

角の関係を表わしている。二次元プロットからわかるように、反応エネルギーは狭い領域に集中している。これは分子標的においても電子捕獲過程は状態選択的に進行することに対応する。また、角度分布に関しては、反応経路ごとに特定の角度へ散乱していく様子が明確に観測された。これらの結果は、散乱角と衝突径数の関係から、特定の衝突径数をもつイオンが、反応核間距離近傍において対応するポテンシャル曲線へ乗り移るとして理解される。

イオンの位置情報からは衝突力学により標的の反跳運動量が求まる。このことにより反跳運動量の効果を取り除いて、低速多価イオン衝突における分子解離のダイナミクスが議論できるようになった。図 7 に $\text{N}_2^+ + \text{N}_2^+$ イオン対の Kinetic Energy Release (KER) と反跳運動量を示す。反跳運動量は衝突エネルギーの減少により増大するが、KER 分布は衝突エネルギーに殆ど依存していない。標的への運動量移行は衝突

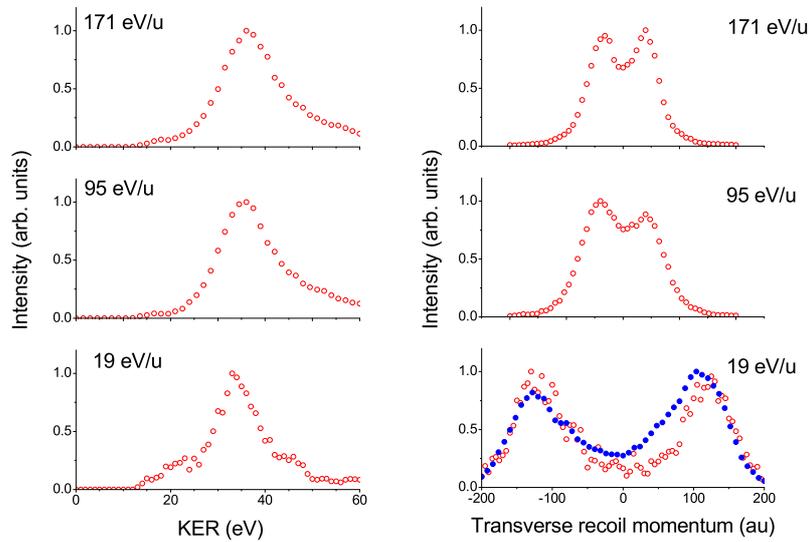


図 7: $\text{Kr}^{8+} + \text{N}_2$ 衝突における二電子捕獲過程で観測された $\text{N}_2^+ + \text{N}_2^+$ イオン対の (a) KER, (b) 標的分子の反跳運動量. 19 eV/u における運動量分布は Kr イオンの二次元イメージ (青丸) と解離イオン対の飛行時間分析 (赤丸) で得られた結果を示す.

エネルギーの-1/2 乗に比例して増大しており, このことは重心系における散乱角が衝突エネルギーに反比例することに対応する. この結果から, 特定の衝突径数におけるクーロン散乱が衝突ダイナミクスを支配することが理解される. またここで示した KER 分布には, 運動量移行の寄与が取り除かれているため, 解離過程に関する多価分子イオンのポテンシャルについて直接的な情報が得られる. 低エネルギーの多価イオン衝突では, 状態遷移中に標的分子の核が動く単純には予想され, 解離イオンの運動エネルギーは核間距離が広がった状態を反映すると考えられる [32]. しかしながら, 本研究における観測ではそのような傾向は見られず, 衝突エネルギー 10 eV/u の領域においても, 分子の状態遷移は核を固定した近似が成り立つことが確認された.

4.3 分子解離の異方性

非対称な価数の解離チャンネルでは, 速いイオンが遅いイオンに比べ高電離状態となる反応経路が主要であった. このことは, 衝突時に入射多価イオンから遠いサイトの原子が, より多

価イオン化しやすいことに起因すると推定された. この分子解離の異方性は, 解離イオン対の価数の非対称性の増大と衝突エネルギーの減少によって顕在化する. その原因としては, 電荷移行反応自身の配向依存性と, 多価イオンと解離イオン対の衝突後相互作用が考えられる. 図 8 に衝突後相互作用による異方性の概念図を示した. 本実験では飛行時間型分析器の検出見込角は制限されている. したがって, 衝突後の多価イオンと解離イオン対のクーロン相互作用により分子軸を回転させる効果が標的分子の配向に依存することから, 観測結果には解離の異方性

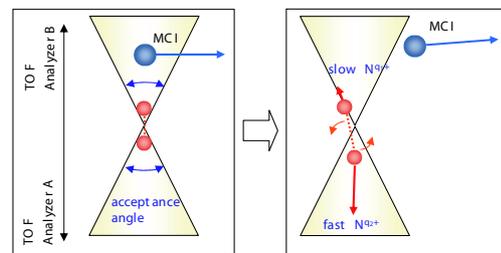


図 8: 分子解離の異方性と衝突後相互作用. 多価イオンと標的分子とのクーロン相互作用により分子軸が回転する. 飛行管の検出見込角が制限されているため, 非対称価数の解離イオン対では観測確率は分子配向に依存する.

が生じる [29, 31]. また分極力によりこの効果はさらに顕著になることが期待される [27]. 一方, 電荷移行確率も分子配向に依存する可能性が指摘されており, 分子解離の異方性は低エネルギー領域の多価イオン・分子衝突を特徴付ける現象であると考えられる.

5. まとめ

低速多価イオン・分子衝突ダイナミクスの解明を目的として, 多重同時計測法を用いた実験研究を行った. 多重同時計測の実現により, 衝突イベント毎に, 多価イオンの散乱・エネルギー情報と解離イオン種の飛行情報の取得が可能となった. その結果, 低エネルギーの多価イオン衝突では, 標的分子への運動量移行が分子解離のダイナミクスを理解する上で無視できないこと, 分子の状態遷移は数十 eV/u 領域の多価イオン衝突においても核を固定した近似が成り立つこと, 分子標的に対しても電荷移行反応は状態選択的に進行することが確認された. さらに, 低速多価イオン・分子衝突を特徴づける現象として, 分子解離の異方性が見出された. その原因としては衝突後のクーロン相互作用が主要と推定されたが, 異方性の発現機構の理解へ向けて理論面からの研究も進められており, 今後の進展に期待したい.

6. 謝辞

本研究を著者の学位論文のテーマとして遂行するに当たり, 東京都立大学原子物理研究室のスタッフをはじめ, 多くの方々のご指導・ご支援をいただきました. 指導教官であった奥野和彦教授には, 実験の初歩から結果の解釈まで懇切丁寧にご指導いただきました. 心よりの感謝を申し上げます. 多価イオン衝突の実験チームに参加していただいた東俊行教授, ならびに小林信夫教授, 田沼肇准教授には, 研究についてはもちろんのこと, それ以外にも多くの面でご指導していただきました. ここに深く感謝いた

します. また芝浦工業大学の吉野益弘教授にはデータ収集システムを提供していただき, 電気通信大学の大槻一雅博士には分子イオンのポテンシャルを計算していただきました. 最後に, 当時研究室に在籍した学生の方々の協力無くしては, 本研究を進めることは非常に困難であったと思います. お世話になった多くの方々のご協力に感謝します.

参考文献

- [1] C. M. Lisse, D. J. Christian, K. Dennerl, K. J. Meech, R. Petre, H. A. Weaver and S. J. Wolk, *Science* **292**, 1343 (2001).
- [2] T. E. Cravens, *Science* **296**, 1042 (2002).
- [3] H. Tawara and A. Russek, *Rev. Mod. Phys.* **45**, 178 (1973).
- [4] H. Klinger, A. Müller and E. Salzbom, *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **8**, 230 (1975).
- [5] A. Müller, H. Klinger and E. Salzbom, *Phys. Lett. A* **55**, 11 (1975).
- [6] S. Ohtani, Y. Kaneko, M. Kimura, N. Kobayashi, T. Iwai, A. Matsumoto, K. Okuno, S. Takagi, H. Tawara and S. Tsurubuchi, *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **15**, L533 (1982).
- [7] H. Ryufuku, K. Sasaki and T. Watanabe, *Phys. Rev. A* **21**, 745 (1980).
- [8] A. Bárány, G. Astner, H. Cederquist, D. Danared, S. Huldt, P. Hvelplund, A. Johnson, H. Knudsen, L. Liljeby and K. G. Rensfelt, *Nucl. Instrum. Meth. B* **9**, 397 (1985).
- [9] A. Niehaus, *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **19**, 2925 (1986).
- [10] M. Barat and P. Roncin, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **25**, 2205 (1992).
- [11] J. Ullrich, R. Moshhammer, R. Dörner, O. Jagutzki, V. Mergel, H. Schmidt-Böcking and L. Spielberger, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **30**, 2917 (1997).
- [12] S. Kravis, H. Saitoh, K. Okuno, K. Soejima, M. Kimura, I. Shimamura, Y. Awaya,

- Y. Kaneko, M. Oura and N. Shimakura, *Phys. Rev. A* **52**, 1206 (1995).
- [13] K. Ishii, K. Okuno and N. Kobayashi, *Phys. Scr. T* **80**, 176 (1999).
- [14] K. Ishii, T. Tanabe, R. Lomsadze and K. Okuno, *Phys. Scr. T* **92**, 332 (2001).
- [15] K. Ishii, A. Itoh and K. Okuno, *Phys. Rev. A* **70**, 042716 (2004).
- [16] J. Vancura and V. O. Kostoun, *Phys. Rev. A* **49**, 321 (1994).
- [17] H. O. Folkerts, R. Hoekstra and R. Morgenstern, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 3339 (1996).
- [18] M. Tarisien, L. Adoui, F. Frémont, D. Lelièvre, L. Guillaume, J. Y. Chesnel, H. Zhang, A. Dubois, D. Mathur, Sanjay Kumar, M. Krishnamurthy and A. Cassimi, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **33**, L11 (2000).
- [19] I. Ali, R. D. Dubois, C. L. Cocke, S. Haggmann, C. R. Feeler and R. E. Olson, *Phys. Rev. A* **64**, 022712 (2001).
- [20] K. Motohashi and S. Tsurubuchi, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **36**, 1811 (2003).
- [21] K. Okuno, *Japan. J. Appl. Phys.* **28**, 1124 (1989).
- [22] K. Okuno, K. Soejima and Y. Kaneko, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **53**, 387 (1991).
- [23] M. Yoshino, T. Shino, H. Suzuki, T. Wagaatsuma, N. Tanaka, A. Danjo and Y. Itoh, in 21st International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, Abstract of contributed papers, p. 359 (1999).
- [24] 奥野和彦, *しょうとつ* **4**, 11 (2007).
- [25] K. Okuno, T. Kaneyasu, K. Ishii, M. Yoshino, N. Kobayashi, *Physica Scripta T* **80**, 173 (1999)
- [26] T. Kaneyasu, K. Matsuda, M. Ehrich, M. Yoshino, K. Okuno, *Physica Scripta T* **92**, 341 (2001).
- [27] M. Ehrich, U. Werner, H. O. Lutz, T. Kaneyasu, K. Ishii, K. Okuno, U. Saalman, *Phy. Rev. A* **65**, 030702 (2002).
- [28] T. Kaneyasu, T. Azuma, M. Ehrich, M. Yoshino, K. Okuno, *Nucl. Instrum. Method. B* **205**, 624 (2003).
- [29] T. Kaneyasu, T. Azuma, K. Okuno, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **38**, 1341 (2005).
- [30] T. Kaneyasu, T. Azuma, K. Okuno, *Nucl. Instrum. Method. B* **235**, 352 (2005).
- [31] T. Kaneyasu, T. Azuma, K. Okuno, Proceedings of the XXIV International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, pp.454-461, 2007.
- [32] P Sobocinski, J Rangama, J-Y. Chesnel, G. Allio, D. Hennecart, G. Laurent, L. Adoui, A. Cassimi, S. Dubois, O. James, D. Martina, A. Spicq, J-H. Bremer, A. Dubois and F. Frémont, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **36**, 1283 (2003).