

小特集

多価イオン原子過程の基礎と広がる応用研究

Fundamental Atomic Processes and Increasing Applications
of Highly Charged Ions

1. はじめに

中村 信行

電気通信大学 レーザー新世代研究センター

(原稿受付：2007年6月14日)

本小特集では、良くも悪くもプラズマとの関わりが深い「多価イオン」の基礎と応用についてご寄稿いただいた。多価イオンとは一般に「2価以上の正、負イオン」(物理学辞典)のことであるが、ここでいう「多価イオン」とは、多くの電子が剥ぎ取られた高電離原子イオンのことである。それならば「高電離イオン」(英語ならば「highly ionized ion」)と呼んだ方が意味がよりはっきりすると筆者は思うのだが、なぜか「多価イオン」(英語では「highly charged ion」)という言葉が広く使われているようなので、本稿でもそれに従うこととする。

さて、そのような多価イオンはプラズマ中に多く存在する。特に、太陽コロナや核融合実験炉などの高温プラズマには高度に電離された多価イオンが存在している。プラズマと多価イオンとの「良い」関わり方の一つの例は、プラズマ中に含まれる多価イオンの発光を観測することにより、そのプラズマの温度や密度をはじめとする様々なパラメータを知ることができることである(4.1節)。この分光手法によるプラズマ診断(分光診断)は、「多価イオン応用」の代表的なものであり、歴史も古いが、現在でも様々な分野のプラズマで活躍している。一方、プラズマと多価イオンとの「悪い」関わりとしては、核融合プラズマ中に混入した不純物重元素多価イオンがX線放射によりプラズマの温度を下げるといふ放射冷却が挙げられる。つまり、核融合にとって多価イオンは「邪魔者」であるが、その邪魔者の特性を知ることが核融合の実現に不可欠であるとして、多価イオンの関与する基礎素過程の研究が1970年代頃から広く行われるようになった(2章)。当初はそのようないわば受動的な興味から研究が始められたが、多価イオンの性質が明らかになるにつれて、それ自身が非常に興味深い魅力的な特徴を持つと認識されるようになり、新たな能動的興

味を生むようになった。

例えば多価イオン中の電子は、原子核の強いクーロン力を感じながら光速に近い速度で運動しているため、その電子状態には相対論的効果、量子電磁力学的効果が顕著に現れるようになる。したがって、少数電子系多価イオンの電子状態を調べることは、原子物理学における非常に基礎的な重要課題であると認識されるようになった。残念ながら本小特集では紙面の都合上そのような研究について取り上げることはできなかったが、興味のある方は参考文献[1]~[3]などをお読みいただきたい。

多価イオンの魅力的な特徴として、非常に多彩なスペクトル線を持つことも挙げられる。中性の原子だけを考えると、自然界に存在する元素は90ほどであり、不安定元素を入れても100を超えるほどしかない。そのような原子が出すスペクトル線には限りがあるが、同じ元素であっても多価イオンにすることによって、電離状態ごとに全く違ったスペクトル線を放つようになる(その意味で、多価イオンは「新しい原子」であるとのキャッチフレーズもしばしば用いられる)。そのため、任意の元素の任意の電離状態を自由に手にすることができれば、任意の波長にスペクトル線を得ることができるといっても決して過言ではないし、当然それを光源として利用することも考えられており、研究が進められている(4.2節)。

多価イオンのもう一つの大きな特徴は、非常に大きなポテンシャルエネルギーを持つということである。そのため粒子や物質との相互作用において、他の粒子にはない反応を示す。例えば固体表面との相互作用においては、多価イオン1個が固体表面の微小領域に劇的な変化をもたらすことが可能である。その「変化」が具体的にどのようなものか、あるいはそれを引き起こす物理的機構がどういったも

のであるかは現在研究が進められている段階であり、理解されていないことも多いが、それをナノテクノロジーに応用しようとする試みも既に始められており(4.3節)、またそのような応用実現のために、高品質多価イオンビームを生成する技術的研究も精力的に進められている(4.4節)。

このように、プラズマ中の不純物として研究が始まった多価イオンであるが、それらの基礎研究を通して様々な魅力が明らかになり、多方面の応用研究に拡がりつつある。本小特集では、そのような多価イオンの応用研究に着目し、それに付随する技術研究とともに4章に寄稿いただいた。また、その応用研究において重要となる基礎過程について、最新の話題も交えて紙面の許す限り2章に寄稿いただいた。さらに、それらの基礎研究および応用研究を進めるためには何らかの方法で多価イオンを生成しなければならないことはいままでのないが、その代表的な手法を3章にまとめた。各原稿を拝見させていただくと、紙面の都合上書き足りない部分が多々あるように見受けられるが、本

小特集が多くの分野の研究者の目にとまり、多価イオンが様々な分野と新たな「良い」関わりを持つ一助になれば幸いである。

なお、おおよそ1年後の2008年9月1日から5日間にわたり、「第14回多価イオン物理学国際会議」が東京都調布市で開催される運びとなった。プラズマ分野の方々はもちろん、ぜひ多くの分野の方々に議論に加わっていただきたく、ご興味のある方は筆者までご連絡いただきたい。

参考文献

- [1] 大谷俊介, 櫻井 誠: 「電子ビームイオントラップを用いた多価イオンの研究」プラズマ・核融合学会誌 **73**, 1063 (1997).
- [2] 中村信行, 大谷俊介: 「電子ビームイオントラップの開発と多価イオンの研究」日本物理学会誌 **52**, 919 (1997).
- [3] 加藤太治, 大谷俊介: 「電子ビームイオントラップを用いた多価イオン研究」日本物理学会誌 **57**, 890 (2002).



小特集用語解説

オージェ過程 Auger Process

X線や粒子線などの照射により内殻の電子が電離又は励起してできた空孔に外殻の電子が落ち込み、同時に余ったエネルギーを得た外殻の他の電子が放出される過程。1925年にP. AugerがX線によるアルゴンの電離を研究しているときにこの過程を観測したのが最初である。内殻に空孔の在る状態が緩和するときには、電子放出(オージェ過程)の他にX線放射による過程がある。X線放射の速度は原子番号とともに増加するが、電子放出の速度は原子番号に対する依存性が弱い。よって、一般に重い原子ほどオージェ過程の確率は小さい。

完全実験 (完全衝突実験)

Perfect (or Complete) Scattering Experiment

衝突後に生成された全ての粒子に対し、粒子の種類・内部量子状態・運動量(角運動量)等の情報を取得しながら、特定の反応断面積を測定すること。B. Bedersonによって名づけられた。例えば、スピン偏極原子に偏光放射光を入射し、電離された2つの電子に対する角度・エネルギー分解の微分断面積を同時計測すれば、原子の二重電離に対する完全実験を行うことができる。重粒子衝突では粒子内の電子状態まで決定することは困難だが、粒子間の衝突動力学に関する完全実験(kinematically complete experiment)は既実現している。

前期解離 Pre-Dissociation

分子が一旦、結合性の励起状態をとった後、別の解離性の状態に移り移って解離する現象。引力型のポテンシャル曲面が斥力型のポテンシャル曲面と(擬)交差しており、交差点で引力型から斥力型へ乗り移るような場合に前期解離が起こる。交差点より高いエネルギーを持つ結合性の状態は前期解離により寿命が短くなるため、不確定性関係より、そのエネルギー準位の幅が広がる。このため、前期解離が起こると、交差点より高い準位の振動・回転スペクトルがぼやける、または、ほとんど消失する。

UTA Unresolved Transition Array

多電子、多価電離イオンの発光線は、しばしば多数の微細構造ラインに分裂する。UTAはUnresolved Transition Arrayの略で、微細構造ラインの間隔が線幅よりも狭く、個々のラインが分離できない条件で観測される疑似連続スペクトル、あるいはそのようなスペクトルの中心波長と幅や形状を定義して解析する方法を指す。動径波動関数が得られている時に、形状をガウシアン分布と近似して中心波長と幅を角運動量の代数で求める手法があり、複雑な構造を持つスペクトルを理論的に再現するために役立つことが知られている。

配置間相互作用 Configuration Interaction

複数電子系の波動関数を一電子軌道に基づいて表すHartree-FockやDirac-Fockの方法では電子間の反発を正確に記述することはできない。この独立粒子モデルと現実の差である電子相関を補正するために最もよく用いられている方法は、直交する励起電子配置の波動関数との一次結合を作るものである。一般に導入する励起電子配置の数が多いほど正確な波動関数が得られる。これを配置間相互作用の方法と呼ぶが、離散状態ばかりでなく連続状態も取り入れる場合もある。何れも実体のある相互作用ではなく、独立粒子近似がもたらした概念であることに留意すべきである。

オパシティ Opacity

物質に固有な光の不透明度。光の波長の関数で、可視からX線領域では原子の電子遷移(束縛-束縛, 束縛-自由, 自由-自由遷移)が主要な寄与をする。プラズマ中の多価イオンのアバundanceやポピュレーションによって決まり、電子温度、電子密度および媒質がさらされている放射の強度とスペクトルに依存する。オパシティという場合は、吸収係数 α [1/cm]に対して密度で規格化した値 $\kappa = \alpha/\rho$ [cm²/g]がしばしば用いられる。プラズマの光学的厚み $\kappa\rho\Delta l > 1$ が放射によるエネルギー輸送が重要な条件の指標になる。

集束イオンビーム Focused Ion Beam, FIB

細く集束したイオンビームを試料表面上で走査することにより、イオンのスパッタ効果で試料表面を加工したり、二次電子を検出して顕微鏡像を観察する装置。鋭利な金属針の先端に液体金属ガリウムを流し、電界イオン化で針の先端だけからイオンを生成させることにより、10 nm以下の像分解能を実現している。また、化合物ガスを試料表面のイオンビーム照射領域近傍に吹き付けることでデポジション機能も持たせることができ、膜堆積のみならず円筒形状などの3次元構造の製作も可能である。

走査トンネル分光

Scanning Tunneling Spectroscopy, STS

STMにおいて、探針を試料表面上1ナノメートル程度の高さに保ち、バイアス電圧(V)の関数として微分トンネルコンダクタンス(dI/dV)を測定することで表面の電子状態密度が測定できる。また、探針を走査しながらdI/dV測定することで原子スケールの位置分解能で電子状態密度のマッピングを行うこともできる。さらには、スピン偏極した表面準位付近でSTS測定することにより表面磁性を調べたり、2回微分信号をロックイン検出することで非弾性トンネル過程による吸着分子の振動励起を観測すること

も可能である。

蒸発冷却法 Evaporative Cooling Method

電磁トラップのポテンシャル障壁内に閉じ込められた多価イオン群は、イオン同士の衝突を通して熱平衡状態に向かう。その際、一部のイオンはポテンシャル障壁以上の運動エネルギーを獲得してトラップから脱出（蒸発）することがあれば、後に残るイオン群の平均運動エネルギーは減少することになる（冷却）。このような原理に基づいた冷却法を、蒸発冷却法と呼ぶ。一般に、ポテンシャル障壁の大きさはイオンの価数に比例するので、価数の異なるイオン群を混合した状態で蒸発冷却する場合には、価数の低いイオン群が早く蒸発し、価数の高いイオン群が効果的に冷却されることになる。

抵抗冷却法 Resistive Cooling Method

電磁トラップの電極群には捕捉した多価イオンの鏡映電荷が誘起されるが、その大きさはイオンの熱運動のために時間的に変動し、電極間を流れる電流を誘起する。抵抗冷却法とは、イオンの熱運動が誘起した電流（電力）を抵抗により消費することにより、イオンを冷却する手法をいう。通常、イオンの閉じ込めポテンシャルを（ペニングトラップのように）調和振動子型にして、電極間に誘起する電流の周波数をイオン温度と無関係に一定となるようにする。電極間には、同じ周波数で共振する回路を接続して、イオンが誘起した電流（電力）を効率的に消費する工夫を行う。抵抗冷却法は、冷却速度が比較的遅いとされているが、冷却中にイオンを失わないという利点を持つ。

小特集執筆者紹介



なかむらのぶゆき
中村 信行

1991年上智大学物理学科卒業，1996年電気通信大学大学院電子物性工学専攻修了，博士（理学）取得，2つのポストドク職を経て2003年7月から現職。主な研究分野は多価イオン原子物理学。趣味は2人娘を連れての野球観戦。2008年9月に第14回多価イオン原子物理学国際会議（HCI2008）を東京都調布で開催予定。これを機に次世代の多価イオン研究を切り拓きたい。



わたなべひろふみ
渡辺 裕文

科学技術振興機構研究員。博士（工学）。主な研究分野は多価イオンが関わる原子過程。特に今は多価イオンが固体表面に衝突した際起きる現象に興味を持っている。家族は秘境好きの妻と今年産まれたばかりの息子。現在の楽しみは息子との入浴と週末の散歩。



かとうだいじ
加藤 太治

1997年電気通信大学大学院修了。理学博士。旧科学技術振興事業団「多価冷イオンプロジェクト」研究員，核融合科学研究所COE研究員を経て，現在，同研究所助教。研究内容は，プラズマ及びプラズマ-壁相互作用における原子分子過程，原子分子データベース，第一原理分子動力学による炉材料の水素照射効果モデリング等。



もと ほん けん じ
本橋 健次

東京農工大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士前期課程修了後，1991年株式会社東芝総合研究所（現，研究開発センター）に入社，1993年東京農工大学・助手，2007年同大学院共生科学技術研究院・助教。工学博士。現在の専門は，電子・イオン衝突による分子や固体表面からの二次粒子放出過程の実験的研究。小学三年生から始めたテニスのキャリアは長い，試合には弱い。家族は妻と子供二人。



さかうえひろゆき
坂上 裕之

1991年上智大学大学院理工学研究科物理学専攻博士後期課程修了，理学博士。同年理化学研究所（大型放射光）の研究員としてSpring-8建設に従事。1995年に核融合科学研究所大型ヘリカル研究部開発研究系助手。現在に至る。専門は原子・分子衝突過程の実験的研究。



さとうくにのり
佐藤 国憲

1974年名古屋大学大学院理学研究科物理学第2専攻博士課程修了。同年名大プラズマ研究所に勤務。現在，核融合科学研究所准教授。理学博士。学生の時から分光の研究を始め，今もスペクトル線と格闘している毎日。スペクトル線の数は文字どおり星の数程あるので興味の種は尽きない。偶然に，未知だったスペクトル線を同定する機会はなかなか刺激的なもの。



たぬま はじめ
田沼 肇

1989年東北大学大学院理学研究科化学専攻博士課程後期修了，理学博士。日立製作所中央研究所において電子放出材料の研究に従事した後，1992年から東京都立大学理学部物理学科助手。現在は首都大学東京准教授。専門分野は原子分子物理。特にmeVからMeVまでの低エネルギー領域におけるイオン衝突実験。イオンストーム，多価イオン分光，静電型イオン蓄積リングの三足の草鞋を履く。趣味は順に「飲む読む聴く観る」。



ささき あきら
佐々木 明

1961年8月27日生，工学博士（東京工業大学），日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門勤務。EUV光源の研究開発において，プラズマ原子分子過程の計算機シミュレーション解析を行っている。原子分子物理の知識をデータベース化し，その反応特性，分光学的特性を予測して高精度のプラズマモデルを構築する，原子分子インフォマティクスへの展開に興味を持っている。
連絡先 sasaki.akira@jaea.go.jp ホームページ <http://web.mac.com/s0827/>



いけだときひろ
池田 時浩

理化学研究所中央研究所原子物理研究室 前任研究員。理学博士。理化学研究所基礎科学特別研究員を経て2000年入所。研究分野は原子物理学：主に絶縁体キャピラリーを用いたナノビーム生成法の開発および荷電粒子の絶縁体表面との相互作用の研究。趣味は美術館めぐりとフリスビー。



おおしま なが やす
大島 永康

総合研究大学院大学博士課程修了。産業技術総合研究所研究員。主な研究分野は陽電子消滅と原子物理。趣味は登山。