

シリーズ  
**多価イオンの物理とその応用：  
これまでの進展と今後の展開**



**THE ATOMIC COLLISION  
SOCIETY OF JAPAN**

# 目次

第1回	今なお「新しい原子」多価イオン・・・・・・・・・・・・・・・・・・中村信行	1
	(「しょうとつ」第12巻5号－2015年9月号－掲載)	
第2回	核融合・天体プラズマでの多価イオン原子過程研究	
	・・・・・・・・・・加藤太治, 坂上裕之, 村上泉	7
	(「しょうとつ」第12巻6号－2015年11月号－掲載)	
第3回	重元素多価イオンプラズマと実験室サイズの極端紫外光源開発	
	・・・・・・・・・・大橋隼人, 東口武史	25
	(「しょうとつ」第13巻1号－2016年1月号－掲載)	
第4回	多価イオンと相対論的相互作用 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・中村信行	35
	(「しょうとつ」第13巻2号－2016年3月号－掲載)	
第5回	コヒーレント共鳴励起による多価イオンの精密分光 ・・・・・・・・中野祐司, 東俊行	43
	(「しょうとつ」第13巻6号－2016年11月号－掲載)	
第6回	多価イオン衝突・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・田沼肇	52
	(「しょうとつ」第18巻4号－2021年7月号－掲載)	

多価イオンの物理とその応用：これまでの進展と今後の展開  
第1回 今なお「新しい原子」多価イオン  
～シリーズイントロダクションに代えて～

中村信行<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 電気通信大学レーザー新世代研究センター 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1  
n.nakamu@ils.uec.ac.jp  
平成27年7月15日原稿受付

本号から6-7号にわたり、新シリーズ「多価イオンの物理とその応用：これまでの進展と今後の展開」を開始させて頂くこととなった。その趣旨と概要を簡単に紹介する。

### 1. はじめに

多価イオンとは物理学辞典(培風館)によれば「2価以上の正, 負イオン」と定義されている。そのため例えば, 質量分析でしばしば用いられる多数の陽子が付着した分子 ( $[M+nH]^{n+}$ ) や, 化学の世界で馴染みのある硫酸イオン ( $SO_4^{2-}$ ) やリン酸イオン ( $PO_4^{3-}$ ) などの負イオンも含むが, このシリーズで扱う多価イオンは多数の電子が剥がされた正の単原子イオンのことである。このような書き出しをしないで済むよう, 高電離イオンという言葉を使うべきとも思うのだが, 多価イオンという言葉が広く使われ定着しているため, その慣例に倣いシリーズのタイトルにも使わせて頂いた。なお, 英語でも高電離イオンを意味する highly ionized ion という言葉はあまり見かけず, highly charged ion という言葉が使われることが多い。

「多価イオンは新しい原子」という触れ込みで重点領域研究「多価イオン原子物理学」が開始されたのは1993年, そこから数えても既に20年以上の歴史があるため, 多価イオンは研究対象として決して「新しい」と言うことは出来ないが, 「新しい原子」としての興味や魅力は未だ尽きない。多価イオン研究はプラズマ物理の一部として始まったと言ってもよいと思うが, 今なおその分野に貢献しつつも, 原子物理学, 原

子衝突学的に新しい話題を提供してきた。さらに最近では「物理定数は真に定数か」という物理学のより根幹に貢献するものとしてにわかに注目されている [1]。そこで, 多価イオン研究の進展を再確認し, 新たな展開を展望するということは, 今正に時宜を得ていると言える。

本シリーズでは, 主に国内の関連研究について本号から6-7号に渡り, 最新の動向を執筆して頂く予定である。そのシリーズのイントロダクション的な位置付けとして「新しい原子」としての多価イオンの魅力を紹介することと, シリーズには含まれない主に国外での最近の動向を概観することが本稿の目的である。そのため次章では, 主に本シリーズに関連する事項に絞って多価イオンの特徴を簡単に記した。その他の特徴について興味のある方は文献 [2] などをご参照頂きたい。また, 多価イオンを生成する手段としては代表的なものとして電子ビームイオン源 (electron beam ion source: EBIS), 電子ビームイオントラップ (electron beam ion trap: EBIT), 電子サイクロトロン共鳴イオン源 (electron cycrotron resonance ion source: ECRIS) などがあるが, それらについては文献 [2, 3, 4, 5] などに書かせて頂いており, それ以上ここで付け足すべきことはないため, 割愛させて頂く。

## 2. 今なお「新しい原子」多価イオン

原子はそれが示す固有のスペクトルによって古くから識別、いわば「タグ付け」されてきた。19世紀半ばには分光測定蓄積により様々な原子が示す発光線のカタログが整備されていたが、そこにはない530.3 nmの緑色の光が太陽コロナから発せられていることが分かったとき、「コロニウム」という新しい原子の存在が真剣に議論されたことは、スペクトルが「タグ付け」の重要な材料となっていることを示す良い例と言える。もちろんコロニウムなどという原子はなかったわけだが、その「新しい原子」の正体はFeから13個の電子が剥ぎ取られた多価イオンであることが後の研究により分かった。この事例のみを持ってしても、多価イオンが「新しい原子」と称される所以を理解して頂けるであろう。同じ元素でも価数が異なるイオンは全く異なる発光スペクトルを示し、新しい原子として振る舞うことが出来るのである。周期律表を改めて眺めるまでもなく、原子の数は大よそ100の程度であるが、それに価数という軸が加わることで、5000程度の新しい原子を手に入れることができる。その発光の多彩性故に、発光線のカタログはいつまでも完成することはなく、様々な価数の多価イオンを含むプラズマが発するスペクトルの理解を困難にしている（本シリーズ第2回予定）。その一方、原子と価数を適宜選定することによって望みの波長の光源を作ろうとする動機を生んでいる（同第3回予定）。

発光の多彩性を系統的に理解しようとするとき、電子の数が同じで原子核の電荷（つまり原子番号）が異なる等電子数系列に沿って整理すると良いことがしばしばある。（実験としては、原子核が同じで電子数の異なる等原子核系列の方が一般的にやりやすいのであるが。）それは、電子数が同じであれば基本的に同じ原子構造（エネルギー準位構造）を取るため、波長を原子番号（の適当な冪）でスケールすれば似たようなスペクトルが得られるからである。ところが、原子

番号に応じてエネルギー準位構造自体が大きく変化する例がしばしばある。その一例は4f軌道である。例えば原子番号61のPmを例にとると、その基底状態は $[\text{Kr}]4d^{10}4f^55s^25p^66s^2$ と、4f軌道が埋まる前に5s, 5p, 6s軌道が埋まっている。それはもちろん、5s, 5p, 6sのエネルギーが4fのそれに比べて低く安定だからである。しかし、電子数は同じでも原子番号が大きくなると、基底状態が $[\text{Kr}]4d^{10}4f^{14}5s$ となり4fを含めN殻までが閉殻となる。つまり、原子番号の増加に伴い4fと5s, 5p, 6sのエネルギー準位が入れ替わり、Pm様と言いながら中性のPm原子とは全く異なる正に新しい原子となるのである。この新しい原子はアルカリ金属の電子配置を持つため、その5s-5p共鳴遷移が強く発光するであろう、従ってプラズマ診断において有用であろう、との予言が30年以上前の理論研究によりなされた[6]。その予言に従い様々な手法による分光測定が最近に至るまで行われてきたが、いずれもその共鳴線を明確に観測するには至らなかった。そのため一部では“unsolved mystery”と称されるまでの問題となっていたが[7]、筆者らのグループがEBITによるPm様Biイオンの分光測定によりその謎を初めて明らかにした[8]。Pm様イオンという「新しい原子」の理解に30年余りの時間を要したわけであるが、その謎解きについてはぜひ文献[8]を読んで頂きたい。

さて、この例のように原子番号に伴ってエネルギー準位が入れ替わるということは、ある原子番号においてそれらの準位間のエネルギーが接近するということである。一般に多価イオンにおける遷移は極端紫外からX線の波長領域にあるが、このような接近したエネルギー準位間の遷移であればレーザーの使える波長域となることもある。そのような遷移を精密レーザー分光することで、微細構造定数 $\alpha$ など基礎物理定数の変動を高感度に検出できるとした理論研究が近年立て続けに発表され話題となっている[1, 9, 10, 11, 12]。現状では $\text{Al}^+$ と $\text{Hg}^+$ における遷移周波数の差を精密に測定することにより $\dot{\alpha}/\alpha =$

$(-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17} \text{ yr}^{-1}$  という上限が与えられているが [13], 多価イオンを利用することでその精度を1桁以上向上させることができるとされている. 乗り越えるべき技術的課題も多いが, その実現に向けた競争もにわかに始まっている [14].

多価イオンが微細構造定数の変動に敏感なのは, エネルギー準位に相対論的効果が顕著に表れるからである. 遷移に関与する最外殻電子が感じる有効電荷  $Z_{\text{eff}}$  は, 原子番号  $Z$  の中性原子の場合, 原子核の電荷  $Z+$  を他の  $(Z-1)$  個の電子が遮蔽するため, 非常に大雑把に言って  $1+$  程度である. 一方, 価数  $q$  が増加するに伴い,  $Z_{\text{eff}} \sim q+1$  という強いクーロン力を感じることで原子核の近傍を高速で運動するようになり, 相対論効果が大きく現れるようになる. また, 加速度も大きくなることにより光子場との相互作用が大きくなり, 量子電磁力学 (QED) 的効果も顕著になる. ただし, エネルギー準位における相対論的効果や QED 効果はあくまで補正であり, 主要項つまりクーロン相互作用項を超えて大きくなることはないため, 分光測定によりそれらの効果を研究するためには一般に高分解能測定が必要となる.

一方, 多価イオンの衝突過程においては相対論的効果がクーロン相互作用を凌駕する大きさとなって現れうることで, 筆者らの最近の研究で示された [15, 16, 17] (本シリーズ第4回予定). この成果は原子衝突学としては注目を集め, 触発された後続研究なども発展的に行われているが,  $\text{Bi}^{80+}$  などの非常に価数の高い重元素イオンについて得られたものであり, 残念ながら世の中の役に立つようなことは今のところない. プラズマ中の素過程として役に立つ多価イオン衝突過程は, より軽元素の多価イオンが関与するものである (同第5回予定). 例えば, 冷たいはずの彗星から高エネルギー X 線が観測されるという不思議な現象が, 太陽風に含まれる酸素などの多価イオンの衝突によるものとして解決されたことは比較的記憶に新しい例である [18].

### 3. 多価イオン研究の最近の進展

—主にシリーズに含まれない内容について—

ここでは主に本シリーズに含まれない, つまり主に国外での最近の進展について紹介したい. 筆者にとってはライバルに相当するグループの成果も多く, あまり詳しく紹介するのは本意ではないので, ざっと概観して参考文献を挙げるに留める. 興味がある方はそれらの文献を参照して頂きたい.

#### 3.1 多価イオンと固体表面との相互作用

多価イオンはサブナノのサイズでありながら数 100 keV にも及ぶポテンシャルエネルギーを有する. そのエネルギーは, 多価イオンが中性化されるときに放出される. 中性化の時間スケールが短いとき, 例えば多価イオンが固体表面と相互作用するときなどはフェムト秒という短い時間で中性化が起こり, その膨大なエネルギーが固体表面のナノサイズの微小領域に一気に放出され, 固体表面の構造や物性を局所的かつ劇的に変化させる. そこに多価イオンの最大の魅力を見出し, 表面との相互作用の研究を集中的に行っているグループも少なくない. ウィーン工科大学のグループはその代表的な一つであるが, そこでの成果を中心にまとめられた review 論文がグループのボス F. Aumayr によりまとめられている [19]. 表面との相互作用を調べる実験は, 金属, 半導体, 絶縁体など標的試料が多岐に渡る上, 観測対象も二次正負イオン, 二次電子, 可視から X 線に至る光子など様々である. 多価イオンが照射した表面の構造や物性を走査プローブ顕微鏡やラマン分光などにより調べる実験も広く行われている. それらを総括するにはスペースも足りなければ筆者の能力も足りないのでは, 詳しく知りたい方は, 上記の review およびそこに含まれている参考文献などを当たって頂きたい.

なお, 表面との相互作用の研究は国内でも行われている. 筆者を含む電通大のグループ [20], 理研 [21], 農工大 [22] などで研究が盛んに行わ

れていた一時期に比べると少々流行りが過ぎた感はあるが、立教大学 [23]、神戸大学 [24] などで現在でも興味深い実験が行われている。

### 3.2 新光源を用いた active な分光実験

分光学は、発光スペクトルや吸収スペクトルを分光器で観測する passive な方法から、レーザーや周波数コムなど新たな技術を導入する active な方法を取り入れることで飛躍的な進化を遂げてきた。X線領域の遷移が主である多価イオンの分光学においてはそのような光学領域の技術の恩恵を授かることがなかなか出来ないこともあり、passive な方法が現在でも主流と言えるが、X線自由電子レーザーが世界で本格的に稼働するようになったことを一つのきっかけに、多価イオンの分光学にも active な方法による進化が遂げられつつある。特に、ハンブルグの軟X線自由電子レーザー FLASH を使った  $\text{Fe}^{23+}$  多価イオン分光 (2007年) [25] を皮切りにして、ドイツ・ハイデルベルグのグループでは放射光とEBITの組み合わせによる active な分光実験を進めている。分光学としては今のところ、結晶分光などの passive な方法に比べて特段優れているというわけではないが、これまで不可能であった光電離断面積や光学的振動子強度の測定が可能となり、太陽大気の観測で長年の謎であった  $\text{Fe}^{16+}$  イオンの発光強度の問題を大きく進展させることにつながった [26]。

結晶場を通過する高速イオンが感じる周期的な電磁場も、結晶への入射角度とイオンのエネルギーを適宜調整することにより、望みの波長を持ったX線光源として利用することができる。これも新しい active な分光法として、多価イオンの分光学に新たな展開を生んでいるが、これは国内の研究グループが先導しているものであり、本シリーズ第6回で紹介して頂くことを予定している。

### 3.3 新しい検出器による分光実験

#### 3.3.1 マイクロカロリメータ

X線領域における passive な分光学は、ブラッグ反射を利用した古典的な結晶分光器によるも

のが現在でも主流である。得られる分解能に関しては、上述の active な新しい分光技術に今のところまだ負けていない。しかしその最大の欠点は効率の悪さにある。湾曲結晶を用いて効率を上げる方法はあるが、飛躍的に改善されるようなものではない。したがって、生成量が限られている多価イオンの結晶分光器による観測は、数日に及ぶことも珍しくない。効率の面を重視したエネルギー分散型の検出器として半導体検出器があるが、その分解能は結晶分光器に比べ2桁ほど悪化してしまう。

結晶分光器の高分解能、半導体検出器の高効率という双方の利点がある程度併せ持っていると言えるのがマイクロカロリメータ [27] である。カロリメータは半導体検出器同様エネルギー分散素子であるが、半導体検出器がX線エネルギーを電荷に変換するのに対し、カロリメータでは熱に変換する。低温にすることで熱容量を小さくした素子の温度上昇を精度良く測定することにより、高分解能で入射X線のエネルギーを分析する。最初のEBITを開発し多価イオンの分光研究をリードしてきたローレンスリバモア研では、これまで結晶分光器を用いて数々の重要な成果を挙げてきたが、最近では大半の分光実験がこのカロリメータを用いて行われるようになった [28]。

マイクロカロリメータはもともとX線天文学での利用を目的として開発されたものである。今年2015年には、このマイクロカロリメータが搭載されたX線観測衛星ASTRO-Hが打ち上げられる予定である。ASTRO-E, ASTRO-EII (すざく) での悲運を経て、大きな期待を持って打ち上げられるマイクロカロリメータが多くの発見をもたらすことを期待したい。

#### 3.3.2 硬X線偏光計

対象となる波長領域に関わらず、分光研究では偏光度が興味の対象となることがしばしばあるが、X線の偏光分析技術は開発途上であると言える。入射角  $45^\circ$  におけるブラッグ反射が偏光選択制を持つことを利用した分析方法は確立

されているが、多価イオンに適用するにはやはり効率が問題となる上に、10 keV を超えるような硬 X 線では適用がより困難となる。筆者のグループでは、放射の角度分布を測定することにより数 10 keV 程度の X 線について偏光度と等価な情報を得ることに成功したが [16, 29], その方法は残念ながら汎用的であるとは言い難い。一方ドイツの重イオン研究所 (GSI) では、コンプトン散乱 X 線の角度分布を元に偏光度を直接測定する半導体検出器を用いており、成果が得られるつつある [30].

カロリメータ、コンプトン散乱偏光計いずれも state-of-the-art の機器であり、残念ながら既製品としてカタログに載っているようなものではない。個々の研究室で開発することは難しく、天文分野や物性分野との密な連携による共同研究のもとに研究が進められている。コンプトン偏光計に関しては、エネルギー分解能がそれほど重要でない場合には、シンチレータを利用してより安価に入手あるいは製作することが可能であり、筆者の研究室でも製作を進めている。

### 3.4 多価イオン冷却

多価イオンは高温プラズマの主演である。逆の言い方をすれば高温な環境ゆえに多価イオンが存在するわけで、低温という環境には本質的に馴染まない。しかし、QED 効果の検証や微細構造定数変動の検出など精密分光が必要な場合には、ドップラー拡がりを抑制するために冷却する必要が生まれる。有力な冷却手段の一つであるレーザー冷却は、多価イオンにおけるレーザー波長領域の光学遷移がせいぜい  $10^3 \text{ s}^{-1}$  程度の遷移確率しか持たないような禁制遷移であることを考えると実用的ではない。従って何らかの冷媒を使って間接的に冷やす方法が試みられている。断熱膨張により冷却した電子ビームと並走させることにより高速多価イオンビームを冷やす技術 (電子冷却 [31]) は古くから確立されており蓄積リングで広く使われているが、高速イオンビームの分光はドップラーシフトの補

正により精度が制限されてしまうため、トラップされた多価イオンを冷却することが望まれる。

最近ハイデルベルグのグループは、レーザー冷却した  $\text{Be}^+$  イオンの結晶中に  $\text{Ar}^{13+}$  多価イオンを捕捉し冷却することに成功したとして、*Science* にその結果を報告した [32]. 冷却された  $\text{Ar}^{13+}$  イオンの温度は 235 mK であるという。マイクロケルビン、ナノケルビンという言葉が日常から使う方々には物足りない数字に思えるかも知れないが、100 万 K などというコロナ温度の方がよっぽど馴染みのある多価イオン研究者としては全くもって驚きに値する数字である。ドイツでは他にも、高速イオンの電荷剥ぎ取り反応 [5] で生成した高速多価イオンを減速し、トラップし、冷却するという計画が GSI にて進行中である [33].

## 4. おわりに

本稿を読み次回からのシリーズを楽しみに感じて頂けたなら、本稿の目的を果たせたことになるがいかがであろうか。さて、本シリーズの企画は「時宜を得ている」と序章において書いたが、実は逆にタイミングが悪いと思うところもある。と言うのは、筆者の多価イオン研究の主幹装置 Tokyo-EBIT が 20 年目の節目である 2015 年を迎えると同時に深刻な真空トラブルに陥り、本稿の脱稿時点で解体された状態にあって、未だ復旧の目途が立っていない状態なのである。20 周年を記念した国際ワークショップを今年開催し、その盛会ぶりを 2014 年 1 月に急逝された大谷俊介先生の墓前に報告したいと本誌第 11 巻 2 号の追悼記事に書いたが、それも延期せざるを得ない状況にある。EBIT はアメリカのローレンスリバモア研究所で最初に開発されたが、その初代の装置は幾多のトラブルがありながらも、そろそろ 30 年を迎えようかという現在も現役として成果を生み続けている。Tokyo-EBIT にもまだまだ現役でいてもらわなくてはならない。復旧に向けてこれまでも多くの方々のご支援を頂いているが、今後ともよ

り一層のご支援をお願いして本稿を閉じたい(この場をお借りしてこのようなお願いが出来るということは、やはり良いタイミングだったのだとポジティブに考えることにしたい)。

なお、シリーズの予定は変更がありうることを予めお断りしておく。

## 参考文献

- [1] J. C. Berengut, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, and A. Ong., Phys. Rev. Lett., **106**, 210802 (2011).
- [2] 中村信行 “原子分子物理学ハンドブック (第 4.1 章)” 朝倉書店 (2012) 377.
- [3] 中村信行, 大谷俊介. 日本物理学会誌, **52**, 919 (1997).
- [4] 中村信行, 真空, **48**, 466 (2005).
- [5] 坂上裕之, 中村信行, プラズマ核融合学会誌, **83**, 671 (2007).
- [6] L. J. Curtis and D. G. Ellis, Phys. Rev. Lett., **45**, 2099 (1980).
- [7] S. Wu and R. Hutton, Can. J. Phys., **86**, 125 (2008).
- [8] Y. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. A, **89**, 010501(R) (2014).
- [9] J. C. Berengut, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, and A. Ong., Phys. Rev. Lett., **106**, 210802 (2011).
- [10] J. C. Berengut, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, and A. Ong., Phys. Rev. Lett., **109**, 070802 (2012).
- [11] M. S. Safronova *et al.*, Phys. Rev. Lett., **113**, 030801 (2014).
- [12] V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, and H. Katori, Phys. Rev. A, **91**, 022119 (2015).
- [13] T. Rosenband *et al.*, Science, **319**, 1808 (2008).
- [14] A. Windberger *et al.*, Phys. Rev. Lett., **114**, 150801 (2015).
- [15] N. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. Lett., **100**, 073203 (2008).
- [16] Z. Hu *et al.*, Phys. Rev. Lett., **108**, 073002 (2012).
- [17] 中村信行, 日本物理学会誌, **69**, 623 (2014).
- [18] P. Beiersdorfer *et al.*, Science, **300**, 1558 (2003).
- [19] F. Aumayr *et al.*, J.Phys.: Condens. Matter, **23**, 393001 (2011).
- [20] M. Tona *et al.*, Sur. Sci., **601**, 723 (2007).
- [21] 岩井良夫, 金井保之, 真空, **48**, 478 (2005).
- [22] K. Motohashi, S. Tsurubuchi, and A. Koukitu. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, **232**, 254 (2005).
- [23] K. Fukai *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter, **22**, 084007 (2010).
- [24] 櫻井誠 他, 真空, **58**, 147 (2015).
- [25] S. W. Epp *et al.*, Phys. Rev. Lett., **98**, 183001 (2007).
- [26] S. Bernitt *et al.*, Nature, **492**, 225 (2012).
- [27] F. S. Porter *et al.*, Rev. Sci. Instrum., **75**, 3772 (2004).
- [28] F. S. Porter *et al.*, Rev. Sci. Instrum., **79**, 10E307 (2008).
- [29] Z. Hu *et al.*, Phys. Rev. A, **90**, 062702 (2014).
- [30] G. Weber *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., **48**, 144031 (2015).
- [31] M. Steck *et al.*, Phys. Rev. Lett., **77**, 3803 (1996).
- [32] L. Schmöger *et al.*, Science, **347**, 1233 (2015).
- [33] Z. Andelkovic *et al.*, Hyperfine Interactions, published online (2015), doi: 10.1007/s10751-015-1199-8.