

電子-多価イオン衝突に現れる 共鳴過程の観測

量子・物質工学専攻 大谷俊介研究室 飛山廣継

1. はじめに

1.1. 研究背景

一般的に 2 価以上の正負のイオンのことを多価イオンという。原子から電子を 1 個だけ取り去ったものを 1 価のイオンというように、取り去る数が q 個であれば q 価の多価イオンという。また、電子を 1 つしか持たないような多価イオンのことを、水素原子の電子配置と等しいことから、水素様多価イオンとも言う。特に我々は、極少数しか電子をもたない、重元素かつ高価数の多価イオンに注目し、電子と多価イオンの衝突における原子物理過程の観測を行っている。この電子と多価イオンは、プラズマを構成している主役である。核融合炉などの高温プラズマなどの知見を得る上でも、電子と多価イオンの衝突過程を系統的に測定することが望まれている。

本研究の目的は、電子と多価イオンの衝突過程の断面積を測定し、プラズマ中素過程の基礎データを得ることである。共鳴過程と呼ばれる衝突過程は、ある特定エネルギーの電子が関与する極めて大きな断面積をもつ主要な過程である。

ヨウ素多価イオン(I^{q+})、ホロニウム多価イオン(Ho^{q+})、ビスマス多価イオン(Bi^{q+})の二電子性再結合過程について述べる。

1.2. 原子過程

本研究では放射性再結合過程(Radiative Recombination、以降 RR) や二電子性再結合過程(Dielectronic Recombination、以降

DR)と呼ばれる多価イオンへの電子付着過程に着目している。図 1 には RR を模式的に示した。これは、多価イオン近傍にきた自由電子が、光子の放出(X 線放射)を伴いながら、多価イオンの空の軌道へと、捕獲される過程である。

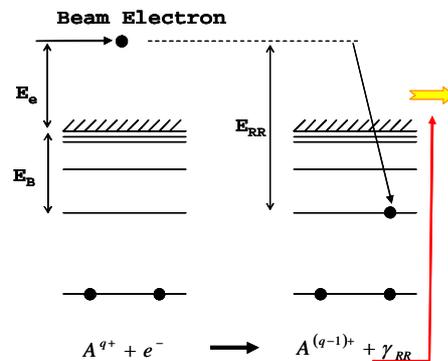
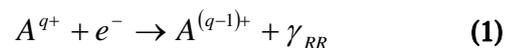


図1 放射性再結合過程

縦軸はエネルギー、黒点は電子を表している。また、RR 過程は次のように書くことができる。



DR 過程は、共鳴過程であり、図 2 にそれを模式的に示した。これは、結合エネルギー E_B と電子の運動エネルギー E_e の総和 E_1 が、結合後の二電子励起状態のエネルギー E_2 に等しいときに、共鳴的に二電子励起状態が形成され、そこから光子を放出しながら脱励起する過程である。

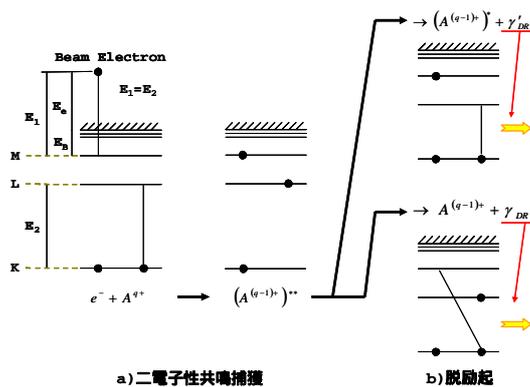
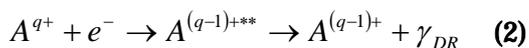


図2 二電子性再結合過程

この図2にあるようにK殻からL殻へ励起されると同時に、M殻へ自由電子が捕獲されるような二電子励起中間状態を介する場合を、KLM共鳴と呼んでいる。また、X線放出を伴うDR過程は次のように書くことができ、電子放出を伴うオージェ過程と競争する。



RR、DR過程のほかにも、EBITのトラップ領域で考えられる原子物理過程には、電子衝突による電離、電荷交換反応、トラップ領域からのイオンの離脱などがあげられる。

1.3. 過去の研究報告例

過去のDR測定の研究報告例を図3にあげる[1]。

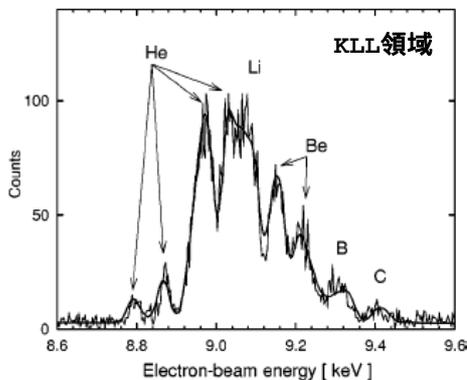


図3 クリプトンのDR研究報告例[1]

これはEBITを用いてクリプトンの多価イオンを生成し、電子ビームのエネルギーを走査しながら多価イオンから放出されるX線を、電子ビームの方向に対して90°に設置された半導体検出器によって計測したものである。図3の右側に見えるピークは、矢印で書いてある電離状態(Heであれば、He様クリプトンを指している)からのDRによるもので、特にKLL共鳴領域だけを抜き出したものになっている。EBITの内部には、異なる価数の多価イオンが存在するため、特定価数のDRを測定するためには、様々な価数の多価イオンから放出されるX線を半導体検出器で分解することが必要になる。しかし、図3からもわかるように、半導体検出器の分解能ではDRを価数ごとに分離することが困難である。また、共鳴強度の導出には、理論計算による放射の角度分布に頼らなければならない。このようにX線によるDR測定には、いろいろな問題点をかかえている。

2. 実験原理

2.1. 引き出しイオンによるDR測定

本研究では、電離平衡状態に達したEBITのトラップ領域に存在する多価イオンの価数分布を計測することで、共鳴過程の測定を行う方法を用いた。この引き出しイオンによるDR過程の観測では、トラップ領域から引き出された多価イオンの各価数ごとの強度を計測することで、問題点を解決できる。この測定原理を説明するにはEBITトラップ領域において成り立つレート方程式の理解が必要となる。

2.2. レート方程式

レート反応遷移とは単位体積単位時間当たりどれだけの反応が起こるかを示し、

単位は $[s^{-1}cm^{-3}]$ である。そこで、 q 価の多価イオンの電子衝突における DR、RR、電離、電荷交換過程をレートで表すとそれぞれ以下ようになる。 はそれぞれの過程の断面積である。

$$R_{q \rightarrow q-1}^{DR} = \frac{J}{e} n_q \sigma_q^{DR} \quad (3)$$

$$R_{q \rightarrow q-1}^{RR} = \frac{J}{e} n_q \sigma_q^{RR} \quad (4)$$

$$R_{q \rightarrow q+1}^{EI} = \frac{J}{e} n_q \sigma_q^{EI} \quad (5)$$

$$R_{q \rightarrow q-1}^{CX} = v n_0 n_q \sigma_q^{CX} \quad (6)$$

ここで \bar{v} は中性原子とイオンの相対速度 [cm/s]、 n_0 はトラップ領域の中性原子の密度 [cm^{-3}]、 n_q [cm^{-3}] はトラップ領域の q 価の多価イオンの密度、 J は電流密度 [A/cm^2]、 e は電荷素量 [C] である。トラップ領域における q 価の多価イオンのレートをを用いた模式図を図 4 に示す。

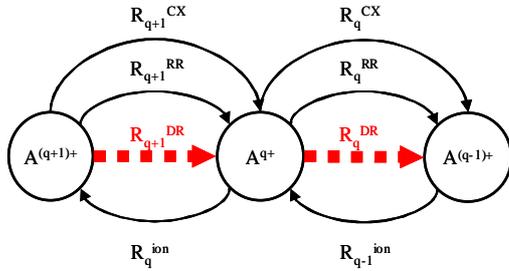


図4 DR を含む q 価イオンのレート模式図

電離平衡を考えると任意の偏数 k に対して以下の式を得る[2]。

$$\frac{n_{k-1}}{n_k} = \frac{\sigma_k^{DR} + \sigma_k^{RR} + \langle \sigma_k^{CX} \rangle}{\sigma_{k-1}^{EI}} \quad (7)$$

式(7)の右辺において、 σ_k^{DR} は電子エネルギーが特定の値のときに非常に大きな値となるが、他の項は電子エネルギーに対して緩やかに変化する項である。したがって、

n_{k-1}/n_k の電子エネルギー依存性を測定し、緩やかな寄与からの増分を見ることで、DR 過程を観測することができる。また、 σ_k^{DR} について解くと式(7)は以下ようになる。

$$\sigma_k^{DR} = \sigma_{k-1}^{EI} \left(\frac{n_{k-1}}{n_k} - BG \right) \therefore BG = \frac{\sigma_k^{RR} + \langle \sigma_k^{CX} \rangle}{\sigma_{k-1}^{EI}} \quad (8)$$

式(8)によれば、 n_{k-1}/n_k の測定から B.G. に相当する部分を引き、電離断面積の値を用いることで σ_k^{DR} の値を導出することができる。

3. 実験

3.1. 実験概要

ヨウ素、ビスマス、ホロニウムの DR 測定を行った。これらの重元素の高電離状態の多価イオンの DR 過程の報告例は極めて少ない。本研究では電子ビームのエネルギーを変えながらトラップ領域の多価イオンの価数分布、二電子励起状態から脱励起して放出される X 線のエネルギー分布を、多次元同時計測システムにより測定した。

またヨウ素、ビスマス、ホロニウムの同位体は 1 つしか存在しない。このことにより、トラップ領域から引き出された多価イオンを、分析磁石で価数ごとに明瞭に分けることができる。ビスマスは、安定核の中で一番大きな原子番号 Z を持つ金属である。ホロニウムも金属であり、ヨウ素と、ビスマスの中間の Z を持つことから DR の Z 依存性に関する知見が得られる。

3.2. 実験装置

多価イオン生成装置として Tokyo-EBIT (Electron Beam Ion Trap)[3] を用いている。その多価イオン生成原理を模式的に図 5 に示す。

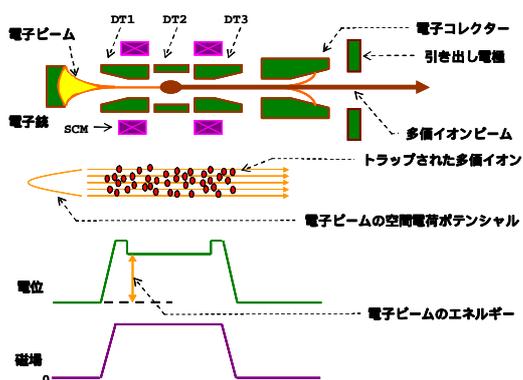


図5 EBIT 内部概略図

EBITは単色の高エネルギー電子ビームによりトラップされたイオンを逐次電離していく事で多価イオンを生成する。

また Drift Tube と呼ばれる円筒電極のうちイオントラップにあたるDT2にはスリットが設けられており、多価イオンからのX線などを観測することができる。

また生成された多価イオンを軸方向にビームとして取り出すことが出来る。

このように EBIT では単色の電子ビームと多価イオンが相互作用しているため電離や再結合などのプラズマ素過程のなかで共現象を調べるのに非常に適した装置であると言える。

3.3. 実験方法

EBIT のトラップ領域から引き出された隣り合う価数同士の多価イオンの強度比はそれぞれの引き出し効率に差がないと考え、トラップ領域の隣り合う価数同士の多価イオンの存在比と等しいとして、本実験は行われた。

EBIT のトラップ領域へは、揮発性の高い沃化メチル(CH₃I)を注入し、ピスマスやホロニウムに関しては金属蒸気として注入することでそれぞれの多価イオンを生成した。トラップ領域から引き出された多価イオン

を分析磁石で価数ごとに分けたものを計測するのに位置敏感検出器 PSD、トラップ領域から放出される X 線のエネルギーを計測するのに Ge 半導体検出器を用いた。

実験の計測結果の取り込みに用いた多次元同時計測システムの模式図を以下の図 6 に示す。

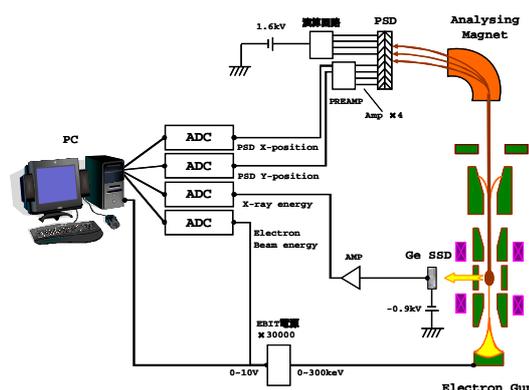


図6 多次元同時計測システム

電離平衡を保つために走査した電子ビームエネルギーの時間波形を図 7 に示す。

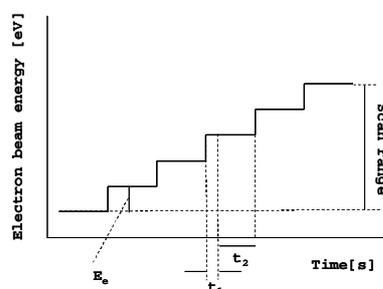


図7 電子ビームエネルギーの時間経過

t_1 はトラップ領域が電離平衡を保障するために待った時間[s]、 t_2 はデータ溜め込み時間[s]、 E_e は $t_1 + t_2$ だけ時間が経過した後の電子ビームエネルギーの変化量[eV]である。本実験では $E_e=9\text{eV}$ 、 $t_1=1\text{s}$ 、 $t_2=9\text{s}$ とした。 t_2 の部分のデータのみ使用して解析を行っている。

3.4. 実験結果

ヨウ素多価イオンについての結果及び導

出した共鳴強度 S をそれぞれ図 8、表 1 に示す。共鳴強度 S は例えば He 様多価イオン S_{He} に対し

$$S_{He} = \int \sigma_{He}^{DR}(E_e) dE_e \quad (9)$$

と定義される(共鳴エネルギー)積分断面積のことである。

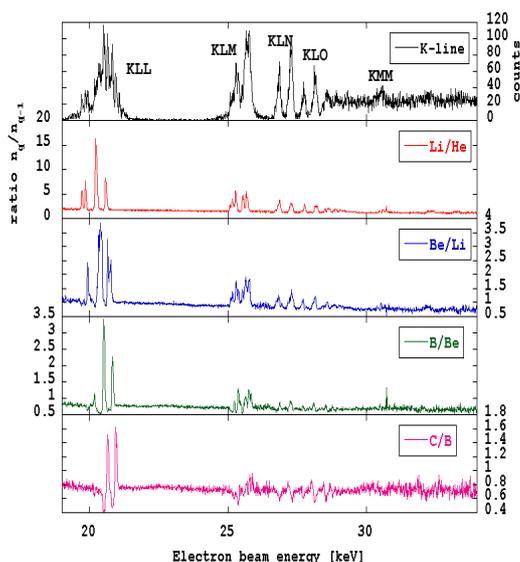


図8 電子ビームエネルギーに対する隣接価数多価イオンの強度比依存性

表1 I 多価イオンの DR 共鳴強度 [$10^{-20} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{eV}$]

	S_{He}	S_{Li}	S_{Be}	S_B
KLL	39.7	28.6	21.9	11.7
KLM	22.0	15.8	12.7	7.2
KLN	9.5	5.1	3.6	0.8
KLO	6.3	2.4	1.9	0.2

図 8 の最上段の K-line の縦軸は X 線の(エネルギー)積分強度である。Li/He と書かれている図は、電子ビームエネルギーに対する Li 様ヨウ素多価イオンと He 様多価イオンの強度比であり、He 様ヨウ素多価イオンの DR 過程に帰属する結果である。その他も同様の手順を行っている。前述のように X 線の強度変化の DR 観測の中には様々な

価数のイオンの再結合過程が現れているが、引き出しイオンの観測では、それぞれの価数の DR 過程を分けることが出来ている。

表 1 の中に S_q^{DR} の表記は q 様ヨウ素多価イオンの DR 共鳴強度である。

次にホロニウム多価イオンについての結果及び共鳴強度をそれぞれ図 9、表 2 に示す。

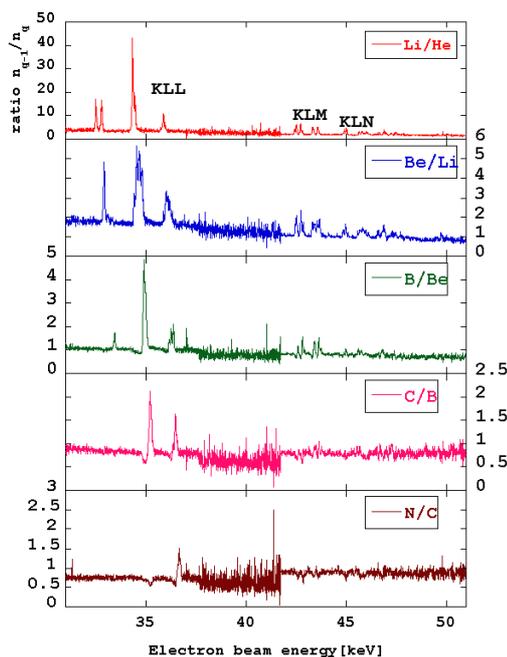


図9 電子ビームエネルギーに対する隣接価数多価イオンの存在比依存性

表2 Ho 多価イオンの DR 共鳴強度 [$10^{-20} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{eV}$]

	S_{He}	S_{Li}	S_{Be}	S_B
KLL	44.1	27.8	18.8	6.6
KLM	9.6	6.7	6.1	5.9
KLN	2.3	1.1	0.8	1.0

最後にビスマス多価イオンについての結果及び共鳴強度をそれぞれ図 10、表 3 に示す。L 殻は $2S_{1/2}$ 、 $2P_{1/2}$ 、 $2P_{3/2}$ に分けられ、それぞれの軌道を L_1 、 L_2 、 L_3 、としている。そして $2S_{1/2}$ 、 $2P_{1/2}$ 、はエネルギー準位的に近いので L_{12} と更に省略される。

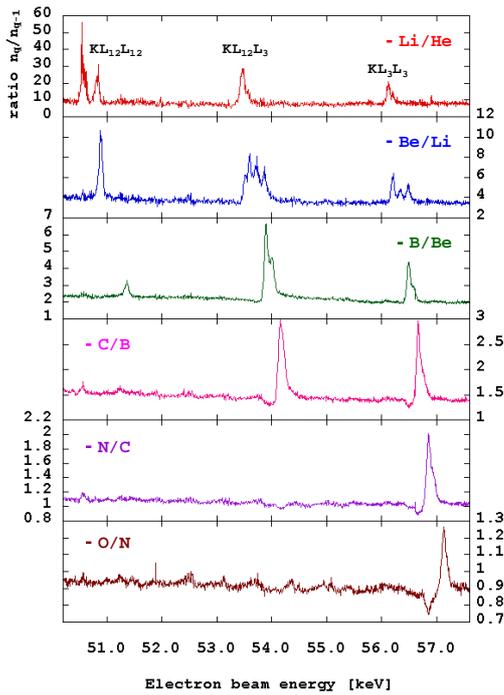


図10 電子ビームエネルギーに対する隣接価数多価イオンの強度比依存性

表3 Bi 多価イオンのDR 共鳴強度[$10^{-20} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{eV}$]

	S_{He}	S_{Li}	S_{Be}	S_{B}
KLL	16.8	21.2	6.7	34.6

4. まとめ・考察

固体検出器SSDを用いたX線観測では非常に困難であった特定価数の多価イオンのDR測定を、トラップ中に存在する多価イオンの存在比を計測することで可能とした。ヨウ素($Z=53$)、ホロニウム($Z=67$)、ビスマス($Z=83$)という広範囲の Z を持つ重元素多価イオンに対して様々な電子エネルギーにおけるDR過程について観測することができ、これらの共鳴強度を導出することができた。

参考文献

- [1] R. Radtke *et al.*, Phys. Rev. E 61 1966(2000)
- [2] D. R. DeWitt *et al.*, Phys. Rev. A 44, 7185 (1991)
- [3] 中村信行, 清水宏, 大谷俊介, J. Mass Spectrom. Soc. Jpn 49(6), 229(2001)