

# 金多価イオンの二電子性再結合過程の観測

山田研究室 嬉野通晴

## 1、はじめに

多価イオンとは2個以上の電子を剥ぎ取られたイオンのことをいう。取り去られた電子の数が $q$ 個のとき、これを $q$ 価の多価イオンという。このように高度に電離した多価イオンは地上のような低温環境下にはほとんど存在せず、太陽のコロナ中や核融合炉などの高温プラズマ内に多く存在する。高温プラズマ内では電子と多価イオンの衝突が常に起こっているため、それらプラズマの理解には電子と多価イオンの基礎データが必要である。

## 2、背景と目的

現在新しいエネルギー供給源の開発の一つで注目されているのがレーザー核融合である。レーザー核融合では hohlraum と呼ばれる金でできた容器の内壁にレーザーを当て、そこでできたレーザー生成プラズマから非常に強い X 線を発生させる。そしてこの X 線を核融合燃料を詰めたカプセルにあてることにより核融合を実現させるものである。レーザー生成プラズマ中での金多価イオンの衝突過程や発光過程がレーザー核融合を実現する上で重要となるが、そのような素過程の基礎データは不足しており、実験によるデータの蓄積が求められている。

そこで本研究の目的は、プラズマ内での発光強度や電荷分布に大きな影響を及ぼす二電子性再結合 (Dielectronic Recombination: DR) の共鳴強度 (resonant strength) を測定することである。

## 3、原理

### 3. 1 二電子性再結合 DR

二電子性再結合とは電子イオン衝突における共鳴再結合過程である。二電子性再結合は自由電子の運動エネルギーとこの電子が捕獲された後の束縛エネルギーの総和が内殻電子の励起エネルギーに等しいときに起こる。このとき二電子励起状態が生成され、光を放出しながら脱励起する (図 1)。

一般に K 殻の電子が L 殻に励起すると同時に自由電子が L 殻に捕獲され、脱励起する過程を KLL と表記する。また、金のように重元素になると KLL が著しく 3 つの領域に分かれる。それは  $KL_{12}L_{12}$ 、 $KL_{12}L_3$ 、 $KL_3L_3$  である。 $L_{12}$  が示しているのは  $2s_{1/2}$ 、 $2p_{1/2}$  軌道で、 $L_3$  が示しているのが  $2p_{3/2}$  軌道である。

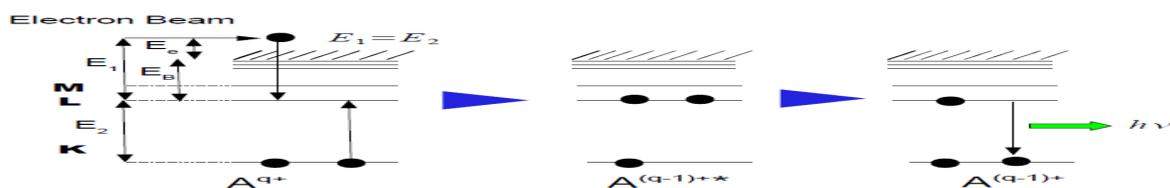


図 1 二電子性再結合過程

### 3. 2 電子ビームイオントラップ: Electron Beam Ion Trap(EBIT) 測定装置

測定装置である EBIT は図 2(a)のように主に電子銃、ドリフトチューブ (Drift Tube:DT)、超伝導コイル、電子コレクターからできている。電子ビームは超伝導コイルの強い磁場により絞られ高密度になり、このとき電子ビームが作るポテンシャルでイオンを電子ビームの径方向にトラップすることができる (図 2(b))。また、図 2(c)のように DT に井戸型ポテンシャルをかけることによりイオンを電子ビーム方向にトラップすることができる。このときトラップされたイオンに電子ビームが衝突することにより逐次電離がおこり多価イオンを生成することができる。

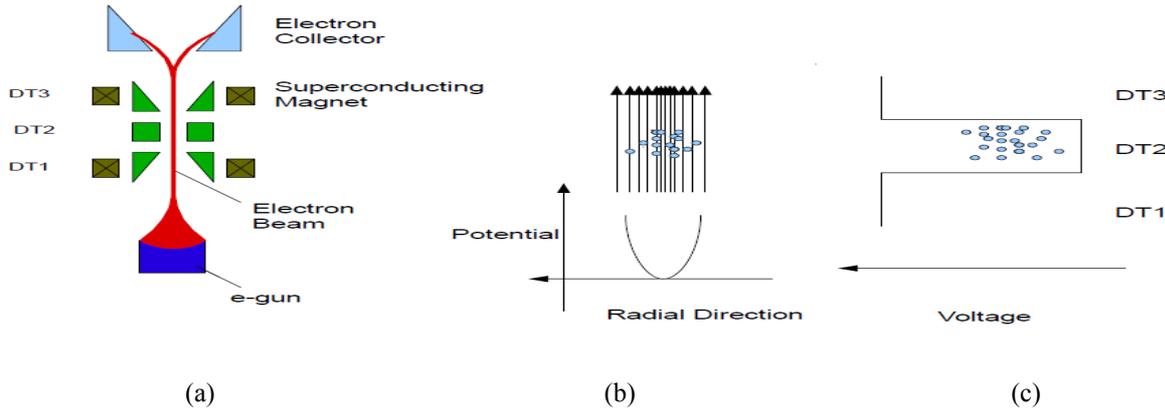


図 2 電子ビームイオントラップの原理

### 3. 3 測定原理

EBIT 内部ではイオン化 (ionization:ion) により価数が上がる一方、放射性再結合 (Radiative Recombination:RR)、電荷交換 (Charge Exchange:CX) で価数が下がる。下の反応式は EBIT 内部での反応式である。

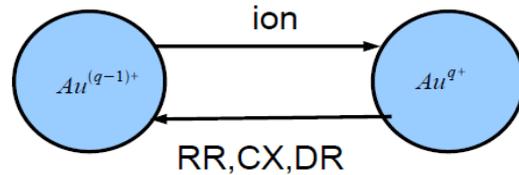
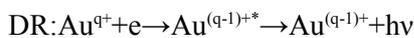
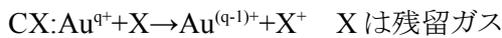
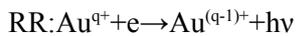
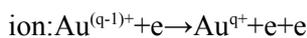


図 3 EBIT内のイメージ

図3において右向きの矢印と左向きの矢印が平衡状態になったとき、近接した q 価のイオンと q-1 価のイオンの存在比  $n_{q-1}/n_q$  はそれぞれの衝突断面積を  $\sigma_{q-1}^{\text{ion}}$ 、 $\sigma_q^{\text{RR}}$ 、 $\sigma_q^{\text{CX}}$ 、 $\sigma_q^{\text{DR}}$  とおくと次の式が成り立つ。

$$\frac{n_{q-1}}{n_q} = \frac{\sigma_q^{\text{RR}} + \langle \sigma_q^{\text{CX}} \rangle + \sigma_q^{\text{DR}}}{\sigma_{q-1}^{\text{ion}}}$$

この式の右辺において共鳴過程が起こらないとき、つまり  $\sigma_q^{\text{DR}}=0$  のとき、左辺の存在比は電子のエネルギーの変化に対して緩やかに変化する。しかし、あるエネルギーに達したとき共鳴が起これば存在比は非常に大きく変化する。その変化した量を q-1 価のイオンのイオン化断面積で規格化することにより q 価のイオンの DR の衝突断面積を求めることができる。

## 4、測定方法

装置、実験条件を図4に示す。本実験では金の  $KL_{12}L_{12}$ 、 $KL_{12}L_3$  の共鳴強度を求めた。

電子エネルギーに対する依存性を測定するため EBIT の電子銃の電位を階段上に変化させた。 $KL_{12}L_{12}$  は  $-38.6 \sim -41.2$  (kV)、 $KL_{12}L_3$  は  $-41.2 \sim -43.6$  (kV) の範囲で測定した。このとき平衡状態を十分達成させるために電位を変化させる間隔を 10s とした。イオントラップから漏れたイオンを分析磁石で価数を分け、二次元位置敏感型検出器 (PSD) で検出した。このとき価数ごとのイオンの個数を求め、近接するイオンの比をとり、それぞれに対応するイオン化断面積で規格化し、それぞれの DR の断面積を求めた。得られた断面積をエネルギーに対して積分することで共鳴強度を求めた。

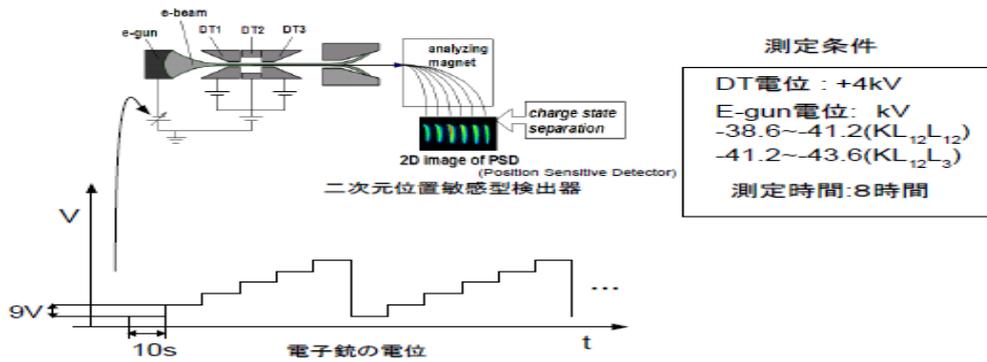


図4 装置図と測定条件

## 5、結果

図5に測定結果を示す。図5における4つのグラフの横軸は全て電子エネルギーである。また、(a)(b)それぞれ、左側のグラフの縦軸は近接する価数のイオンの存在比、右側は DR の衝突断面積である。イオンの存在比から、バックグラウンドを差し引き、対応するイオン化断面積で規格化して求めたものが右側の DR の衝突断面積である。

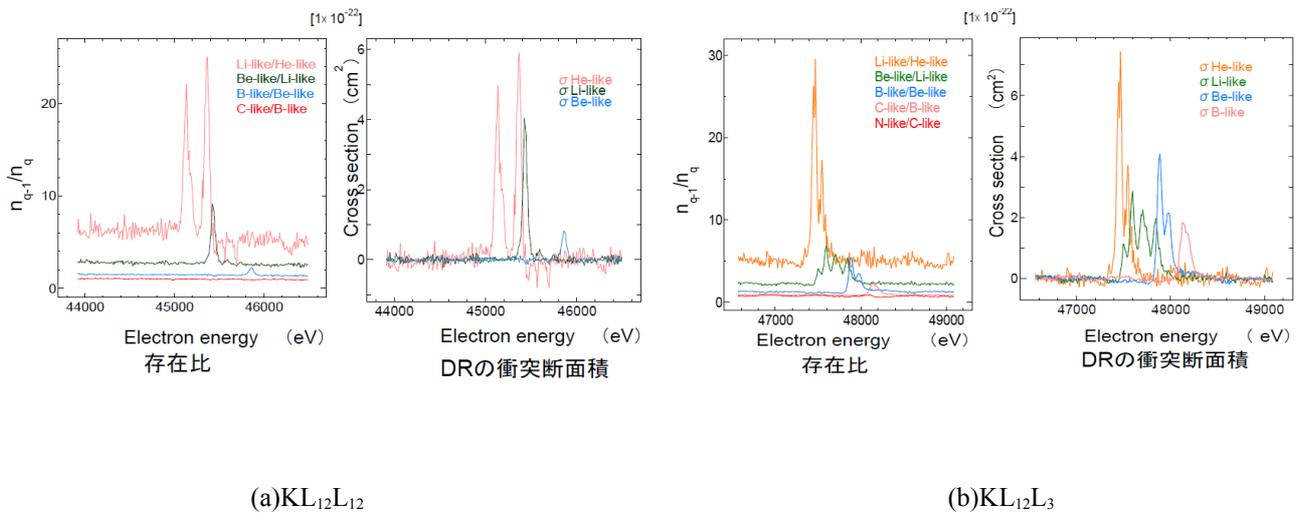


図5 金の  $KL_{12}L_{12}$ 、 $KL_{12}L_3$  の測定結果

次に、図5の得られたDRの断面積をエネルギーに対して積分した値(共鳴強度)を求めた。その結果を表1に示す。

表1 共鳴強度 resonant strength (cm<sup>2</sup>eV)

	KL <sub>12</sub> L <sub>12</sub>	KL <sub>12</sub> L <sub>3</sub>
He-like	8.3E-20	7.8E-20
Li-like	2.6E-20	6.4E-20
Be-like	7.0E-21	5.6E-20
B-like		2.7E-20

次に、測定した共鳴強度と理論値との比較した図を図6に示す。横軸はイオン電荷である。また、縦軸はそれぞれ共鳴強度である。誤差は統計誤差のみを考慮している。

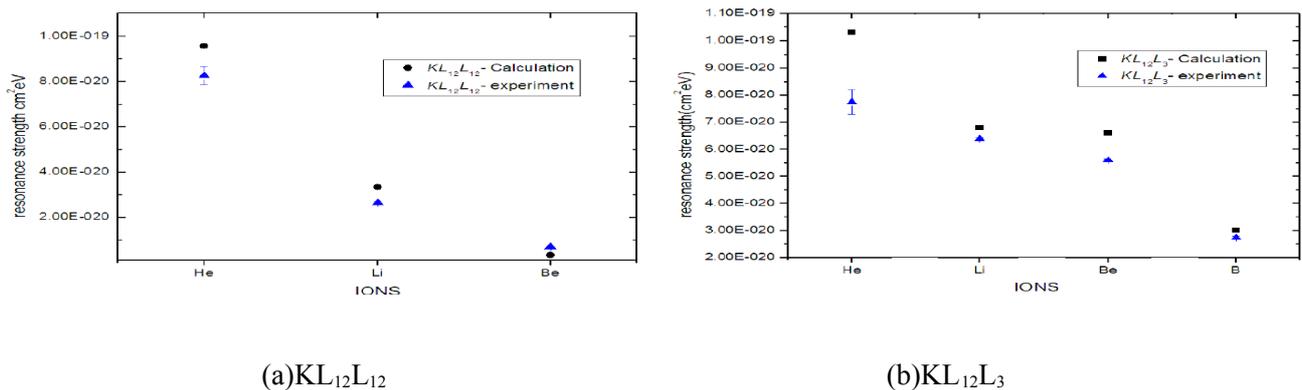


図6共鳴強度の理論値との比較

## 6、まとめ

- 本実験では、EBITを用いて金の基礎データであるDRのKL<sub>12</sub>L<sub>12</sub>、KL<sub>12</sub>L<sub>3</sub>の二電子性再結合過程を測定した。
- 測定した結果をそれぞれのイオン化衝突断面積で規格化し共鳴強度を求め、理論値と比較した。