

ヨウ素多価イオンの 二電子性再結合過程の測定

大谷俊介研究室 飛山廣継

【目的】

一般的に原子から電子を 2 個以上取り去ったものを多価イオンという。取り去られた電子の個数が q のとき、これを q 価の多価イオンと呼ぶ。本研究では、ごく少数しか電子を持たないようなヨウ素(原子番号:53)多価イオンに対する二電子性再結合過程の観測を行った。

イオンの再結合過程には、主に放射性再結合(以降 RR: 図 1)と二電子性再結合(以降 DR: 図 2)の 2 つがある。RR では運動エネルギー E_e の電子が束縛エネルギー E_B の準位に捕獲される際、 $E_{RR}=E_e+E_B$ のエネルギーを持った光子を放出する。DR では、図 2 における E_1 と E_2 が等しいとき、運動エネルギー E_e の電子が束縛エネルギー E_B の準位に捕獲されると同時に内殻電子を励起する。DR は $E_1=E_2$ が成り立つときのみ、つまり、ある特定の電子エネルギーのときのみ共鳴的に起こる過程である。この DR の共鳴強度はプラズマ中の平衡状態の価数分布を決定するのに大きな要因となるため系統的な測定が望まれている。

過去に軽元素に関する DR 測定の報告例は多いが、重元素多価イオンに関しては、その実験的困難さから報告例は少ない。本研究では、レーザーセンターに設置された Tokyo-EBIT と呼ばれる多価イオン発生装置を用いることで He 様ヨウ素イオン(I^{51+})という非常に電離状態の高い重元素イオンを対象として DR の観測を行った。

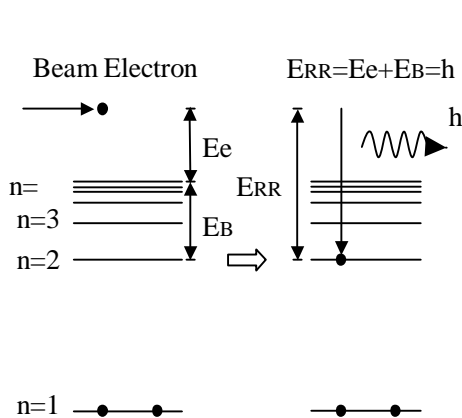


図1:RR概略図

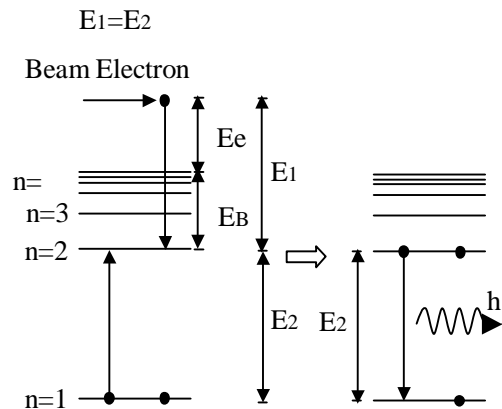


図2:DR概略図

【実験装置】

Electron Beam Ion Trap(EBIT)とは、トラップ領域にある原子に高エネルギーの電子を衝突させ、

原子を逐次電離させることにより多価イオンを生成する装置のことで、原理的にはウランの裸イオンまでの生成が可能である。図3にその概略図を示す。electron gun から引き出された電子が図3の electron beam の様な軌道に沿って electron collector へと収集される。また設置された3つの Drift Tube(DT)の電位を操作することにより、EBIT 内でのイオンのトラップを可能にしている。

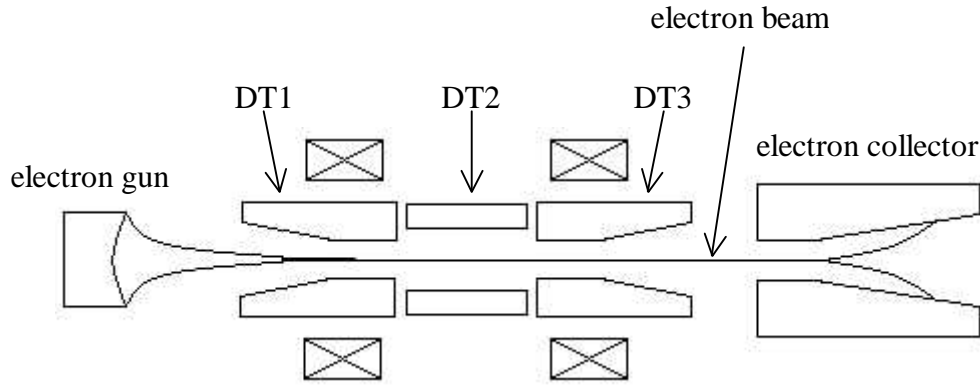


図3:EBIT 内部概略図

【原理】

本研究では、EBIT 内に生成される非中性プラズマの電離平衡を考えることで DR を測定した。ここで EBIT 内での q 価と $q-1$ 価イオンとの間の電離平衡を考える。 q 価、 $q-1$ 価イオンの個数をそれぞれ n_q 、 n_{q-1} とし、 q 価から $q-1$ 価イオンへの DR 断面積を σ_q^{DR} 、RR 断面積を σ_q^{RR} 、電荷交換断面積を $\langle \sigma_q^{CX} \rangle$ 、 $q-1$ 価から q 価イオンへの電離断面積を σ_{q-1}^{EI} とすると、平衡状態において次式が成り立つ。

$$\frac{n_{q-1}}{n_q} = \frac{\sigma_q^{DR} + \sigma_q^{RR} + \langle \sigma_q^{CX} \rangle}{\sigma_{q-1}^{EI}} = \frac{\sigma_q^{DR}}{\sigma_{q-1}^{EI}} + \frac{\sigma_q^{RR} + \langle \sigma_q^{CX} \rangle}{\sigma_{q-1}^{EI}} \quad (1)$$

ここで、式(1)の右辺の第2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ので、 n_{q-1} / n_q の電子エネルギー依存性を測定し、緩やかな寄与を引くことで、DR 断面積 σ_q^{DR} と電離断面積 σ_{q-1}^{EI} の比が得られる。さらに σ_{q-1}^{EI} に関して信用できる理論値などを適用することで σ_q^{DR} が得られる。

【実験方法】

本研究では He 様ヨウ素イオンの DR を観測するため以下の手順で実験を行った。また実験装置概略図を図4に示す。

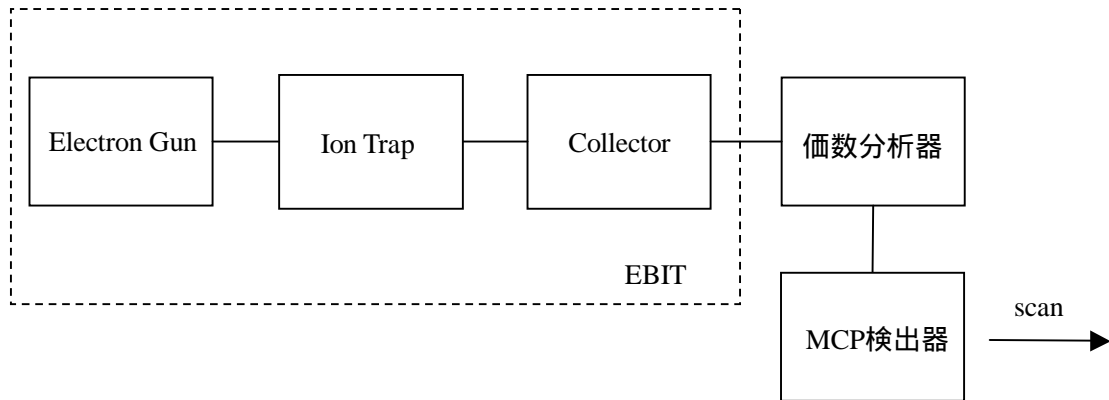


図 4: 実験装置概略図

- ・ Ion Trap 内へヨウ素を注入すべく、揮発性の強いヨウ化メチル(CH₃I)を用い気体として注入した。
- ・ 生成された多価イオンを引き出し、価数分析器で価数毎に分割した。
- ・ 電子エネルギーを時間に対して変化させた。電子エネルギーの値は DT2 と電子銃(カソード)にかける電位の差で決まるが、本研究では DT2 の電位を 3kV に固定し、電子銃の電位を-16~-19kV の間で走査することで電子エネルギーを 19 ~ 22keV の間で変化させた。
- ・ 電離平衡を保証するため走査時間は 5000 秒とした。
- ・ 電子エネルギーに対して価数毎の多価イオンの数の変化を記録した。

【結果】

電子エネルギーに対するヨウ素の He 様イオンと Li 様イオンの数の比から図 5 の結果が得られた。

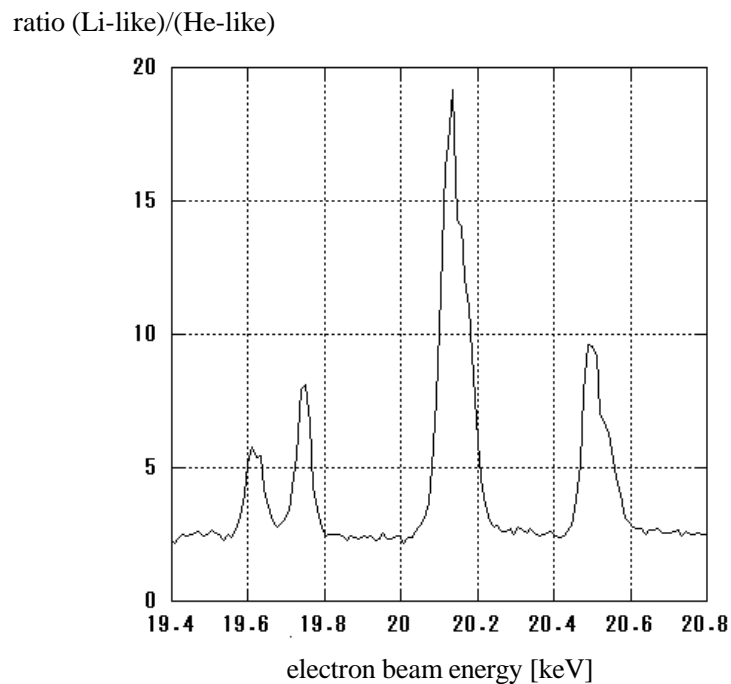


図 5: 電子エネルギーに対する I^{50+} / I^{51+} の変化

図5のデータから式(1)の第2項による寄与と思われる分(ratioで約2.5)を引き、Li様イオンの電離断面積としてLotzの公式を用い、それをかけることでDR断面積を得た。その結果を図6に示す。

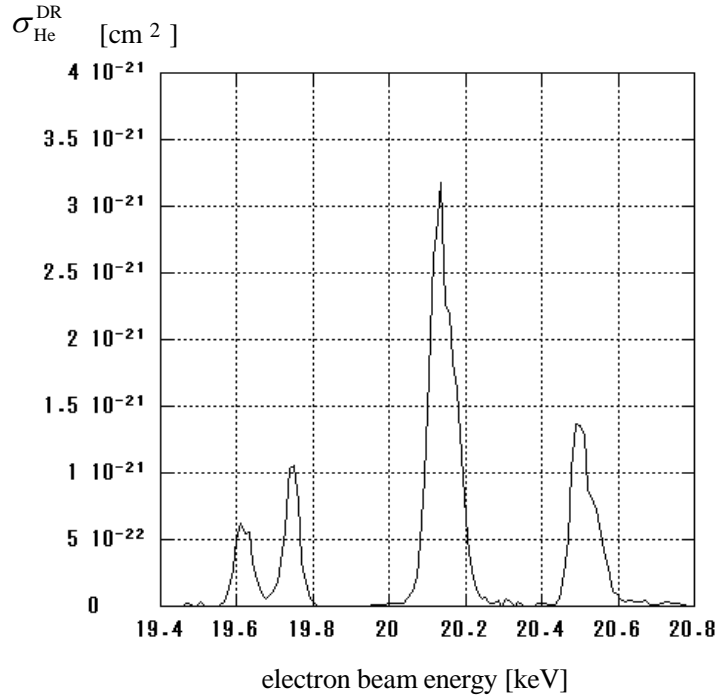


図6: 電子エネルギーに対する $\sigma_{\text{He}}^{\text{DR}}$ の関係

【まとめ】

電子エネルギーに対するヨウ素のHe様イオンとLi様イオンの数の比から、He様ヨウ素イオンのDRを観測し、その断面積を決定することができた。

【課題】

結果に使用した横軸は、単純に電極に印加した電圧の値を用いているので、正確な値とするためには較正が必要である。また、q価とq-1価イオンとの間の電離平衡を考えた時、再結合・電離・電荷交換以外の過程の存在を考察することが今後の課題である。