

電子-多価イオン衝突における二電子性再結合過程の高分解能 X 線分光測定

量子・物質工学専攻 中村信行研究室 野原宏彰

1. はじめに

1-1 研究背景

多価イオンとは、一般には 2 価以上の正・負のイオンのことを指すが、本研究室では、重元素からほとんどの電子を取り去った高価数の多価イオンに着目し研究を行っている。

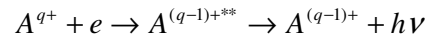
多価イオンは地上では希少であるが、核融合実験炉や宇宙などの高温プラズマには多く存在する。プラズマ中では電子と多価イオンとが絶えず衝突し、励起、再結合などの過程を介して、X 線が放出される。多価イオンが重元素の場合、放出される X 線のエネルギーが高いため、それがプラズマに再吸収されなければ、結果としてプラズマの温度を下げることになる。プラズマの温度を維持しなければならない核融合実験炉では、この放射損失過程は大きな問題となるために、再結合などの断面積は、プラズマを理解、制御する上で重要なデータであり、系統的な測定が望まれている。

本研究では、多価イオンと電子の衝突で起こる様々な過程の中でも、二電子性再結合過程と呼ばれる共鳴的な再結合過程に着目し、実験的研究を行った。共鳴過程とは、ある有限の寿命を持つ中間状態を介して起こる散乱過程である。二電

子性再結合過程は、ある特定の電子エネルギーにおいて、非常に大きな断面積をもつ重要な過程である。

1-2 二電子性再結合過程 (Dielectronic Recombination: DR)

二電子性再結合 (DR) 過程は次のように書ける。



DR 過程は、衝突する電子が多価イオンの内殻電子を励起しながら空の軌道に捕獲され、その結果生じる二電子励起状態が放射により安定化する過程である。

本研究では、特に水素様イオンの DR 過程に着目している (図 1.1)。水素様イオンでは 1 s 軌道に一つの電子があるが、この電子を励起しながら、衝突する電子が空の軌道に捕獲される。その結果二電子励起ヘリウム様イオンが形成される。この二電子励起状態は K 殻に二つの空孔を持つので、連続して二つの K-X 線を放出しうる。ここでは、はじめの遷移を第 1 遷移、続けて起こる遷移を第 2 遷移と呼ぶことにする。

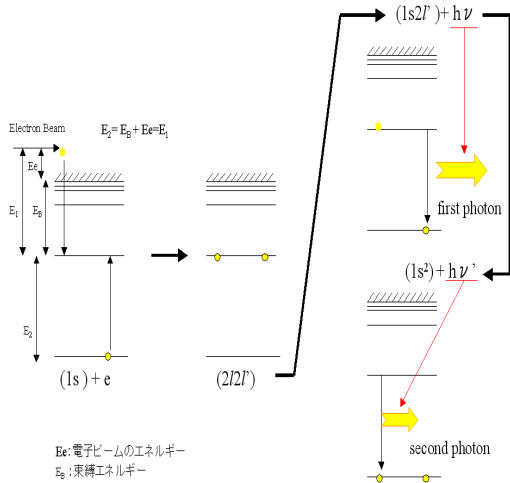


図 1.1 : 水素様イオンの二電子性再結合過程

また、図 1.1 の例は K 殻にあった電子を L 殻に励起し、自由電子を L 殻に捕獲するために、「KLL 共鳴」と呼ばれる。

1-3 過去の観測例

DR 過程の測定は、これまで電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap : EBIT)¹や蓄積リング²などを用いて行われているが、水素様イオンに対しては実験の困難さから測定例は少ない。図 1.2 は、その数少ない一例を示している。この実験は、本研究室の電子ビームイオントラップ(Tokyo-EBIT)³を用いて生成およびトラップした Ti の水素様イオンに、衝突エネルギーを走査しながら電子ビームを入射し、放出された X 線を半導体検出器で測定したものである。横軸はその X 線のエネルギー、縦軸は電子ビームのエネルギーである。図中、電子ビームエネルギーに依らず約 4.5keV で一定の X 線エネルギーを持つ線は L 殻から K 殻への遷移である $K\alpha$ 線である。 $K\alpha$ 線励起のしきい値は 6.70keV であるが、それ

よりも低いエネルギー領域において、ある特定のエネルギーで $K\alpha$ 線強度の増大が見られる (例: 電子ビームエネルギーが 3.2~3.5keV 付近)。図 1.7b) は、水素様イオンの KLL 共鳴部分、つまり白く囲んだ四角の部分縦に積分して得られる X 線スペクトルである。第 1 遷移と第 2 遷移が分離されずに 1 つのピークとして測定されている。また、図中で棒グラフ状に示されているのは、理論による X 線スペクトルの微細構造である。半導体検出器の分解能ではそのような詳細な構造を測定することは不可能である。

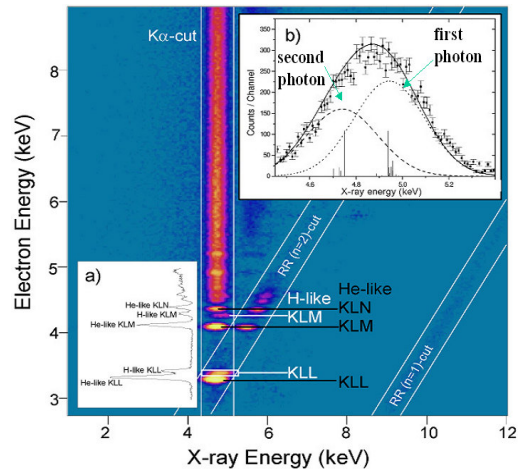


図 1.2 : 過去の測定例(e + Ti^{q+})

H.Watanabe et.al.to be published

2 実験

2-1 実験目的

本研究の目的は半導体検出器よりも分解能が優れる結晶分光器を用いて、水素様イオンの DR 過程を、高分解能 X 線分光測定し、半導体検出器では分解できなかった共鳴断面積の詳細な構造を観測することである。

2-2 装置

EBITのトラップ領域に、Kセル⁴を用いて蒸気化した鉄を導入する。そこに、超伝導磁石の強磁場により絞った高密度電子ビームを衝突させることで、逐次電離をおこして、水素様鉄イオンを生成およびトラップする。トラップしたイオンから放出されたX線を電子ビームに対して90°方向に設置した結晶分光器で測定する。なお、検出器には、二次元位置敏感型検出器(PSPC)を用いている。

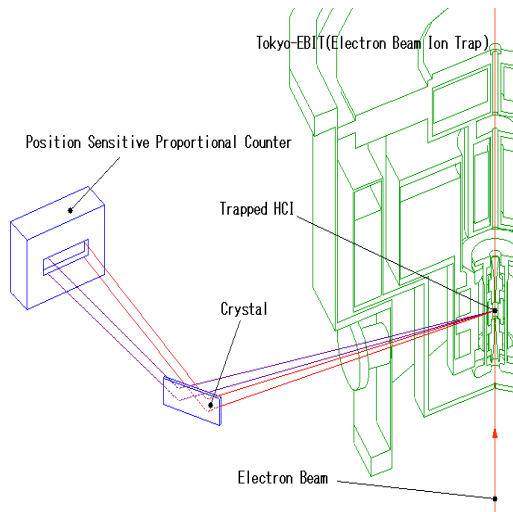


図 2.1 : 装置概略図

本実験では、放出されたX線を電子ビームに対して90°方向のみでしか測定していないために、放射角度分布を考慮しなければ共鳴断面積を得ることはできない。放射角度分布測定は、装置の配置上困難であるため、放射角度分布と一対一対応にある偏光度の測定を行う。偏光度は、同一の過程を2つの異なる結晶で測定することで求めることができる。

2-3 実験方法 (図 2.2)

水素様イオンを生成するために、電子ビームエネルギーをヘリウム様イオンの電離エネルギーより高く設定する。そのエネルギーをしばらく保持して十分な量の水素様イオンを生成した後、電子ビームエネルギーを瞬時にプローブエネルギーつまり共鳴エネルギー付近で走査してDR過程を測定する。このとき、トラップ内の水素様イオンの存在比が減少しないように、即座に電子ビームエネルギーを生成エネルギーに戻し、水素様イオンの保持および生成を行う。その後、電子ビームエネルギーを再びプローブエネルギーにするというサイクルを繰り返す。ある時間経過すると、トラップ内でカソードから混入するバリウムイオンなど、不純物イオンの存在比が高くなる。そのため、ある一定時間ごとにトラップポテンシャルを消し、トラップ内イオンを全て吐き出す。その後再びイオン生成から繰り返すというようにして、実験を行っている。

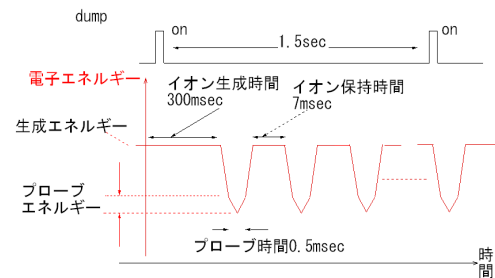


図 2.2 : 測定における電子ビームエネルギー及びトラップの制御

本実験では、イオン生成時間を 300ms、プローブ時間を 0.5ms、イオン保持時間を

7ms、イオン吐き出し時間を1.5sとした。分光結晶は、LiF(200)とLiF(220)を用いた。光源から結晶までの距離は、測定条件に応じて約550mm~650mmであり、結晶からPSPCまでの距離は320mm~350mmであった。PSPCの印加電圧は1.9kV~2.0kVであった。空気との相互作用によるX線の吸収を避けるために、結晶分光器は $\sim 10^{-6}$ torrの真空中に保たれている。

3 結果

図3.1は結晶にLiF(200)を用いた時のX線スペクトルの電子ビームエネルギー依存性を示したものである。横軸にX線の波長、縦軸に電子ビームのエネルギーをとっている。測定には約100時間を要している。

赤の四角で囲んだ部分は、水素様イオンを生成する領域(図2.2中の「生成エネルギー」)に相当しており、青の四角で囲んだ部分は「KLL共鳴」が起こる領域、つまり電子ビームエネルギーが、4.5~5.5keVの領域に相当している。それぞれの領域を積分して得られるスペクトルを図3.2に示す。

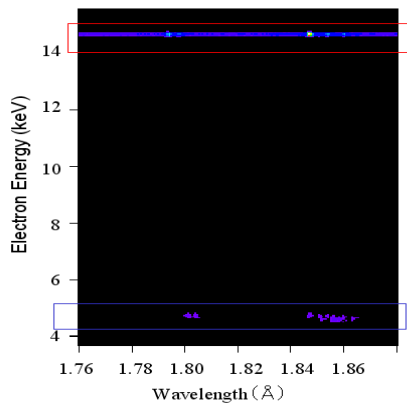


図3.1: X線スペクトルの電子ビームエネルギー依存

図3.2上図に表れているのは、水素様イオン、ヘリウム様イオンそれぞれの直接励起により放出されるX線である。左の2つのピークは水素様イオンのライマン線($2p \rightarrow 1s$)であり、右のいくつかのピークはヘリウム様イオンの $1s2l \rightarrow 1s^2$ 遷移である。このスペクトルからもわかるように、EBITの原理上、そのトラップ領域には単一の価数のイオンをトラップすることはできず、水素様イオンおよびヘリウム様イオンが同時に存在している。

次に図3.2下図は、水素様イオンおよびヘリウム様イオンのDRを介して放出されたX線である。

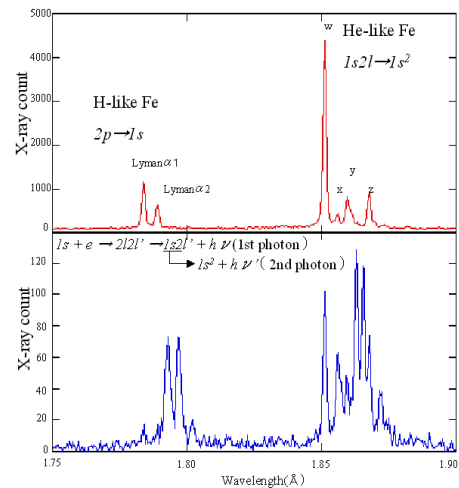


図3.2: 上図は赤線で囲んだ部分($E_e=14\sim 15$ keV)を積分したスペクトル。下図は赤線で囲んだ部分($E_e=4.5\sim 5.5$ keV)を積分したスペクトル。

今後の結果は、第1遷移に着目し波長1.76~1.84Åの範囲のみを説明する。まず、実験で得られたスペクトルに、フォークト関数をフィッティングした。その際、各ピークに対して、幅が同じとなるよう

にした。図 3.3 に、実験スペクトルとフィティングにより得られたスペクトルを示す。主に 3 つピークがあり、それぞれのピークを A, B, C とラベルをつけている。

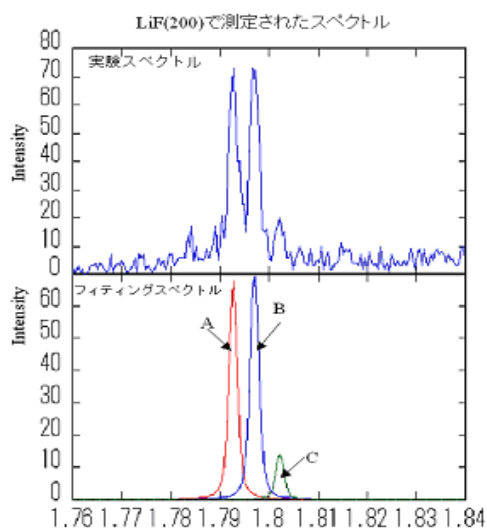


図 3.3 : LiF(200)のを用いた時の結果。上図は実験スペクトル、下図はフィティングスペクトル。

図 3.4 には、結晶に LiF(220)を用いたときに測定された X 線スペクトルと、同様のフィティングにて得られたスペクトルを示す。測定には約 100 時間を要している。

2 種類の結晶で得られたスペクトルの強度比の違いから、偏光度を得ることができる。

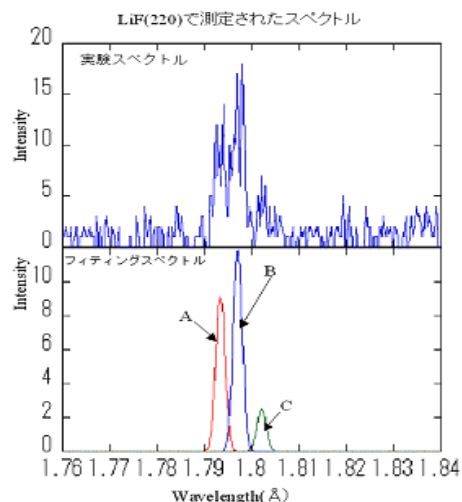


図 3.4 : LiF(220)を用いた時の結果。上図は実験スペクトル、下図はフィティングスペクトル。

各ピークとライマン α_2 ($2p_{1/2} \rightarrow 1s$) との強度比を求め、HULLAC⁵ と呼ばれるコードにより計算した $1s \rightarrow 2p_{1/2}$ 励起断面積で規格化を行うことで、共鳴強度を求めた。その結果を表 4.1 に示す。2 つの異なる理論値^{6, 7}を同時に示している。

peak	upper(J)	lower(J)	SthA (cm^2eV)	SthB (cm^2eV)	Sexp (cm^2eV)
A	2s2p _{3/2} (1)	1s2s(0)	2.1E-19	1.5E-19	2.7E-19
	2s2p _{3/2} (2)	1s2s(1)			
	2p _{3/2} 2p _{3/2} (2)	1s2p _{1/2} (1)			
B	2p _{1/2} 2p _{3/2} (2)	1s2p _{3/2} (2)	2.5E-19	2.4E-19	1.8E-19
	2p _{1/2} 2p _{3/2} (2)	1s2p _{3/2} (1)			
C	2s2p _{3/2} (1)	1s2s(0)	2.2E-20	2.2E-20	3.8E-20

表 3.1 : 共鳴強度の実験値と理論値の比較

実験値とそれぞれの理論値を図 3.5 に示す。図 3.5 を見てわかるように、今回の実験結果では、理論 II よりも理論 I に近いものであった。しかし、誤差が大きいため、理論との詳細な比較には更なる実験が必要である。

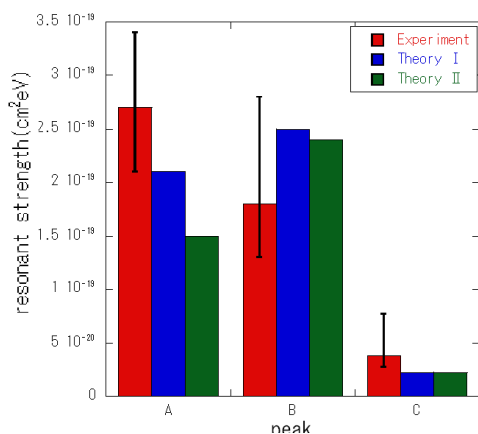


図 3.5 : 共鳴強度の実験値と理論値の比較の棒グラフ

4 総括

水素様鉄イオンと電子との衝突における二電子性再結合過程を高分解能 X 線分光により測定し、これまで半導体検出器の実験では分離できなかった共鳴状態の微細構造を観測することに成功した。残念ながら、本実験でも共鳴状態を完全に分離することは出来ず、一つのピークにいくつかの共鳴状態からの寄与が混ざってしまっているが、水素様イオンの二電子性再結合過程に関して共鳴強度の内訳を得ることに初めて成功した。現在は統計による誤差が非常に大きいですが、水素様イオンの二電子性再結合過程に関して、共鳴断面積の詳細な構造を得ることに初

めて成功したことは、天文プラズマや核融合プラズマなどの関連分野に、新たな知見を与えたと思われる。

参考文献

- 1 P. Beiersdorfer: Phys Rev. A, Vol. 46, P3812 (1992)
- 2 L. H. Andersen, J. Bolko, and P. kvistgaard, Phys Rev. A, Vol. 41, P1293 (1990)
- 3 中村信行, J. Mass Spectrom. Soc. Jpn. 49(6), 229-236
- 4 C. Yamada Review of Scientific Instruments Vol. 77, No. 6, June 2006
- 5 A. Bar-Shalom: HULLAK package computer set of codes for atomic structure and processes in plasmas
- 6 Y. M. Li, private communications
- 7 Spectral Data for Highly Ionized Atoms (Journal of Physical and Chemical Reference Data Monograph No. 8)