

# 多価イオンと表面との相互作用における X 線放出

量子物質工学科      大谷研究室      犬童友樹

## 1. 背景

多価イオンとは、中性原子・分子から電子を 2 個以上増加、もしくは減少させた正負のイオンのことを指すが、本研究において用いられる多価イオンは原子に束縛されている電子を取り去り、高度に電離した正のイオンである。このような多価イオンは中性粒子や低価数イオンとは異なる特徴を有している。

多価イオンは固体表面に近づくと表面から電子を捕獲し内殻に空孔を持った多電子高励起原子となる。これを中空原子と呼ぶ。イオンが表面に到達すると高励起状態の電子は一旦失われるが、表面下で低い励起状態に再び電子が捕獲されることで中空多電子低励起原子が生成する。

Briand ら[1]による中空原子の最初の観測以来、その生成と崩壊メカニズムを理解するために、多くの科学者がこの珍しい原子を研究してきた。中空原子は Auger 遷移と放射遷移によって崩壊するため、現在まで中空原子の生成と崩壊メカニズムを理解するために Auger 電子と X 線スペクトルの測定が行われて来た。

X 線放出は Auger 遷移と競争する。y 殻への蛍光収率は以下の式で書くことができる。

$$\omega_y = \Gamma_r / (\Gamma_r + \Gamma_A)$$

$\Gamma_r$  が総放射遷移速度であり、上の殻から y 殻までの総 Auger 遷移速度が  $\Gamma_A$  である。遷移に直接関与しない上位にいるスペクテーター電子の数に比例して Auger 遷移速度が増加するので、それらの電子が増加するにつれて、 $\omega_y$  は小さくなる。Briand らは L 殻電子の数に応じて KX 線のエネルギー分布が変化することを測定した。その結果を基に中空原子の生成と崩壊のメカニズムを議論した。それに加えて、X 線の蛍光収率の測定は、簡単な方法で同様の情報を得ることが出来ると期待される[1]。

例えば最近、我々のグループで異なる標的に水素様と裸イオンを衝突させることにより生成した中空原子が崩壊する際に放出された X 線を測定することにより蛍光収率を求めた。KX 線の収率が 100%であったのに対して、LX 線収率は標的により異なり、収率は標的の電子状態に依存していることがわかった[2]。

## 2. 目的

本研究では、多価イオンと標的種との組合せを変え、それらの相互作用時に発光する X 線スペクトルを測定する。得られた X 線スペクトルから蛍光収率を見積もり、多価イオンと中性原子の場合とを比較する。また、多価イオンにおける蛍光収率と原子番号依存性を調べる。そして、多価イオンと表面との相互作用メカニズムの解明を目指す。

## 3. 実験

本研究室で行われた実験で、水素様ヨウ素イオン( $I^{52+}$ )と裸ヨウ素イオン( $I^{53+}$ )の高価数の多価イオンを  $Be(Z=4)$  や  $Cu(Z=29)$  にあてた実験により、高価数の多価イオンを用いると標的によらず KX 線の蛍光収率が 100% であることがわかった。

本実験では、多価イオンである水素様 Co イオン( $Co^{26+}$ )を標的となる  $Ti(Z=22)$  に照射したときに放出した X 線スペクトルを測定した。また、得られた X 線スペクトルから蛍光収率を求め、中性原子の場合と比較した。図 1 は実験の装置図である。

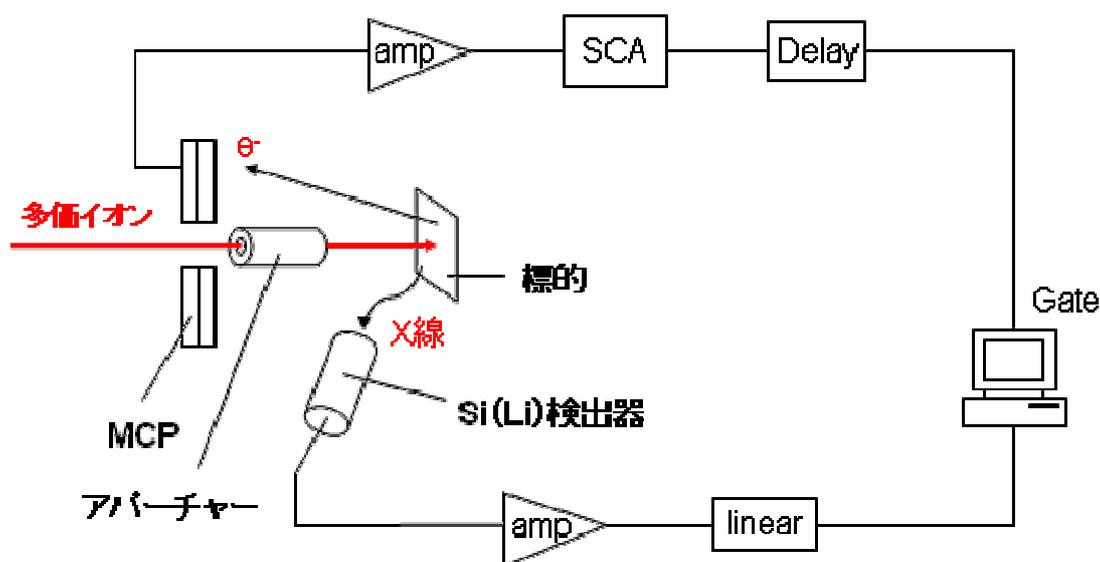


図 1

多価イオンを MCP、アパーチャーを通して X 線を標的に照射させる。標的から放出された X 線を Si(Li) 検出器で検出し、2 次電子を MCP で検出する。X 線と 2 次電子を同時に測定することで、多価イオンが標的に照射された時だけ放出された X 線スペクトルが測定される。そして、照射イオン 1 個当たりの X 線放出率 (蛍光収率) が測定できる。

#### 4. 実験結果

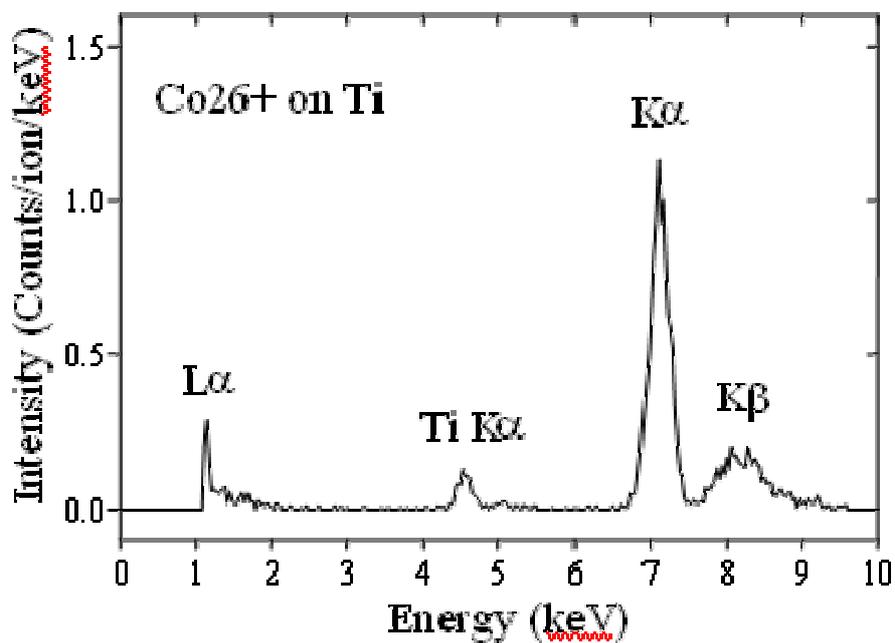


図2  $\text{Co}^{26+}$ をTiに照射した時に放出したX線スペクトル

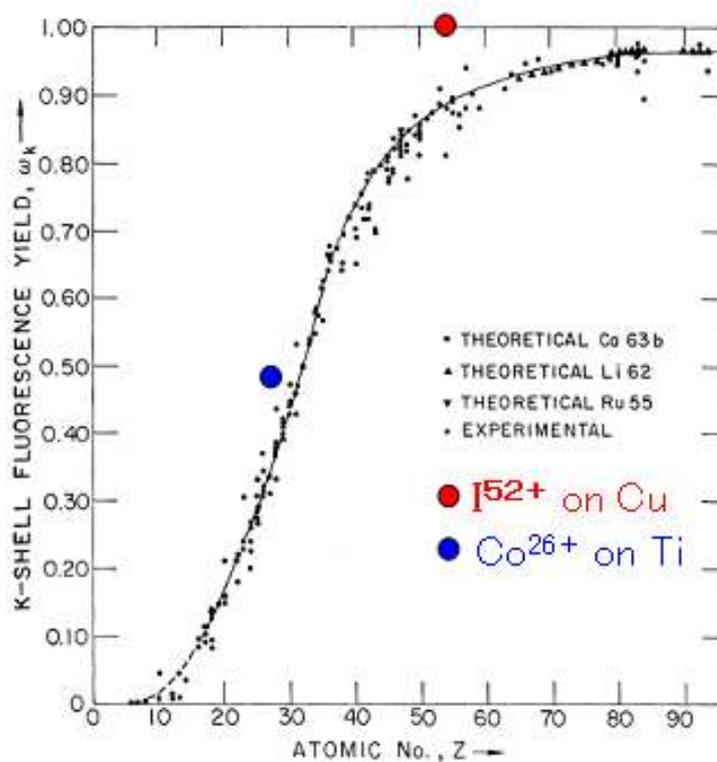


図3 KX線蛍光収率

R. W. FINK et al, Atomic Fluorescence Yields [3] 参照

図2は水素様 Co イオン( $\text{Co}^{26+}$ )を標的となる Ti( $Z=22$ )に照射したときに放出した X 線スペクトルである。K $\alpha$ は  $n=2$  から  $n=1$ 、K $\beta$ は  $n=3$  から  $n=1$ 、L $\alpha$ は  $n=3$  から  $n=2$  へ遷移した時に放出した X 線スペクトルである。また、Ti K $\alpha$ は標的から放出された X 線スペクトルである。図3は縦軸に KX 線蛍光収率、横軸に原子番号をとり、黒点は中性原子の KX 線蛍光収率である[3]。青点が  $\text{Co}^{26+}$  を Ti に、赤点が  $\text{I}^{52+}$  を Cu にそれぞれ照射した時に放出した X 線スペクトルの K $\alpha$ 、K $\beta$ 、K $\gamma$ 、・・・を積分して求めた KX 線蛍光収率をプロットしたものである。

## 5. 考察

水素様 Co イオン( $\text{Co}^{26+}$ ) を Ti に照射した時の蛍光収率は 48%であった。水素様ヨウ素イオン( $\text{I}^{52+}$ )を Cu に照射した時と同様、中性原子と比べると KX 線蛍光収率は高い値となった。このことにより多価イオンは中性原子よりも蛍光収率が高いことがわかった。また、様々な価数で測定を行っていくと、高価数領域よりも低価数領域での KX 線蛍光収率に差が大きくなることが予測できる。中性原子に比べ、中空原子にはスペクテーター電子の数が少ない。スペクテーター電子が少ないと総オージェ遷移速度( $\Gamma_A$ )が小さくなるため、X 線の蛍光収率が大きくなる。また、総放射遷移速度( $\Gamma_r$ )は原子番号に依存していて、原子番号が大きくなると総放射遷移速度も大きくなる。

## 6. 今後の課題

多価イオンや標的を変えて同様の実験を行う。そこで得られた X 線スペクトルから蛍光収率を測定し、多価イオンにおける蛍光収率と原子番号依存性を調べる。そのデータを中性原子のデータと比較する。それにより、中空原子の生成と崩壊メカニズムの解明を目指す。

## 参考文献

- [1] J. P. Briand et al, Production of Hollow Atoms by the Excitation of Highly Charged Ions in Interaction with a Metallic Surface. Phys. Rev. Lett. 65, 159 (1990)
- [2] J. Sun et al, K and L X-ray Emissions from Hollow Atoms Produced in Interaction of Slow H-like ( $\text{I}^{52+}$ ) and Bare ( $\text{I}^{53+}$ ) Ions with Different Target Materials.
- [3] R.W.FINK et al, Atomic Fluorescence Yields. Rev. Modern. Phys. 38, 513 (1966)