陽電子衝撃による内殻イオン化断面積

東大院総合文化 長嶋泰之、兵頭俊夫 理研 斎藤文修、伊東芳子、後藤彰

陽電子の入射によって発生するX線





陽電子衝撃によって発生する特性X線

陽電子入射による制動X線



陽電子と内殻電子の対消滅によって発生する特性X線 (陽電子消滅誘起特性X線)

粒子線衝撃による内殻イオン化



電子線衝撃による内殻励起: 電子線を用いた元素分析 電子プローブマイクロアナリシス(EPMA) などに利用。

電子衝撃による内殻イオン化断面積に関する情報は応用上も重要。

電子衝撃による内殻イオン化断面積の測定

- 種々の元素について、内殻イオン化断面積の測定が行われている。
- 理論計算、測定結果が食い違う例が報告されている。

CuのK殻イオン化断面積





Khare and Wadehra, Can. J. Phys. 74 (1996) 376

Tang et al. Phys. Rev. A 65 (2002) 052707

陽電子衝撃内殻イオン化断面積

陽電子衝撃の場合は、電子衝撃の場合とエネルギー依存性が異なる。

電子衝撃の場合:原子核から引力を受ける。交換相互作用あり。陽電子衝撃の場合:原子核から斥力をうける。

交換相互作用なし。

特に、閾値付近で顕著。



電子衝撃(実線)および<mark>陽電子</mark>衝撃(破線)の場合の比較(実線、破線は理論計算値) (Khare and Wadehra, Can. J. Phys. 74 (1996) 376) 陽電子衝撃による内殻電子イオン化断面積の測定は、ほとんど行われていない。 30keV以下のエネルギー領域のデータはない。 ↑ 陽電子の消滅γ線がX線検出器に入射しエネルギーの一部を与えて バックグラウンドが高くなるため。



バックグラウンドは結晶の厚さに比例する。 結晶を薄くすれば、バックグラウンドは減るはず。 厚さを1/10程度にすれば、バックグラウンドも1/10になるはず。 しかし、数10keV以下のX線の検出効率は変わらない。 S/N比の大幅な改善が期待できる。 薄い結晶を用いたX線検出器を製作 Si(Li)結晶の厚さ:0.25mm、有効面積:2×20mm² (株式会社レイテックに製作を依頼) エネルギー分解能:300eV@5.9keV



消滅γ線によって誘起されるK X線(4.5keV) 消滅γ線によって発生するバックグラウンド





測定

理研、ラジオアイソトープ実験棟において、低速陽電子ビームを入射。 ビーム

ビーム強度 : 3×10⁴e⁺/s 陽電子の入射エネルギー : 0-30keV

試料: Cu および Ag

① <u>厚い試料</u>(厚さ0.1mm)

② <u>薄膜試料</u>



Pressure : 4 × 10⁻⁷Pa

測定

理研、ラジオアイソトープ実験棟において、低速陽電子ビームを入射。 ビーム

ビーム強度 : 3×10⁴e⁺/s 陽電子の入射エネルギー : 0-30keV

試料: Cu および Ag

① <u>厚い試料</u>(厚さ0.1mm)

② <u>薄膜試料</u>

陽電子衝擊特性X線

試料は、厚さ0.1 mm の Cu および Ag

(測定時間はいずれも10000s)



陽電子衝撃による内殻電子イオン化断面積の導出 (特性X線が等方的に放出されると仮定)

試料が薄い場合

- $N_{X}(E) = n Q \ell N_{beam} \varepsilon \omega$ $N_{X}(E)$: エネルギーEにおける特性X線の計数率
- n : 試料の原子数密度
- Q : 内殻電子イオン化断面積
- ℓ : 試料の厚さ
- N_{beam} : ビーム強度
- *ε* : X線検出器の検出効率
- ω : 蛍光収率

試料が厚い場合

- $N_{X}(E) N_{X}(E \Delta E) = n Q \ell' N_{beam} \varepsilon \omega$ ℓ' : 陽電子エネルギーが Eから E - \Delta E になる際の走行距離 $\ell' = \Delta E / P$
- P : 陽電子の阻止能





Inner shell ionization cross sections

薄膜試料を用いた測定

試料の厚さは

Cu : 76Å(87Å) Ag : 72Å(83Å)



(Jensen and Walker (1996))

内径8mmのアルミニウムの枠に10 μ g/cm² (400 Å)の カーボン薄膜を張り、Cu、Agを真空蒸着。

陽電子ビーム ビーム強度 : 3×10⁴e⁺/s 陽電子の入射エネルギー : 0-30keV ビーム径 : 3mm ビームが枠にぶつからずに薄膜部分を通りぬけるように、 軌道をコントロール。





(Jensen and Walker (1996))

内径8mmのアルミニウムの枠に10µg/cm²(400Å)のカーボン薄膜を張り、 Cu、Agを真空蒸着。 ビームが枠にぶつからずに薄膜部分を通りぬけるように、軌道をコントロール。 理化学研究所の低速陽電子ビームのビーム径は3mm。





X線検出器の検出効率

7.8×10⁻³ (⁵⁵Fe標準線源を用いて校正) 蛍光収率 :

Cu K-shell : 0.443, Ag L-shell : 0.062±0.009 (Bambynek et al. Rev. Mod. Phys. 44 (1972) 716) (Hoffman et al. Z. Phys. A 293 (1979) 187) Inner shell ionization cross sections



結論

- 薄いSi(Li)結晶を使ったX線検出器を用いることにより、
 30keV以下のエネルギー領域におけるの陽電子衝撃による
 内殻イオン化断面積をはじめて直接測定した。
- ・ 閾値近傍における断面積のエネルギー依存性が明らかに なった。
- CuのK殻イオン化断面積は、理論計算値と一致。
- AgのL殻イオン化断面積は理論計算値よりも小さくなった。
- 理論計算の再検討が必要。

今後の方針

- 種々の元素について測定を行う。
- 電子衝撃の場合についても測定を行い、陽電子衝撃の場合 との比較を行う。