



東邦大学

いのち
生命の科学で未来をつなぐ

2012年度 原子分子データ応用フォーラムセミナー
タングステンプラズマの原子過程(2)

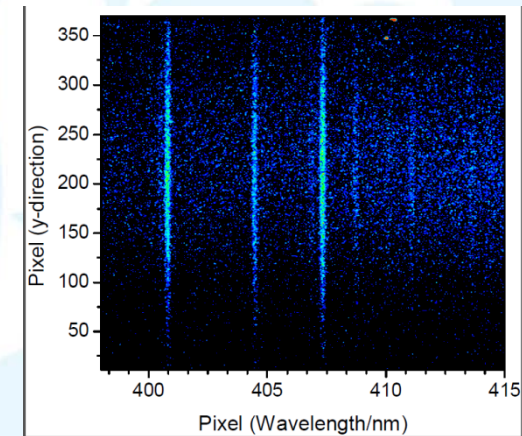
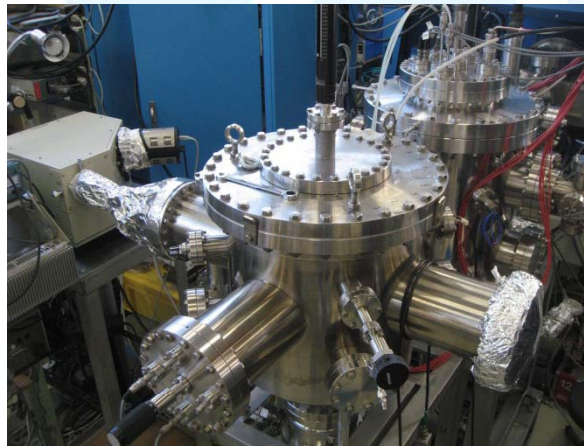
可視光計測による タングステンスパッタリング過程の研究



東邦大学・理学部物理学科 酒井康弘

目次

- 1,はじめに
- 2,実験原理
- 3,実験装置
- 4,結果と議論
- 5,まとめ

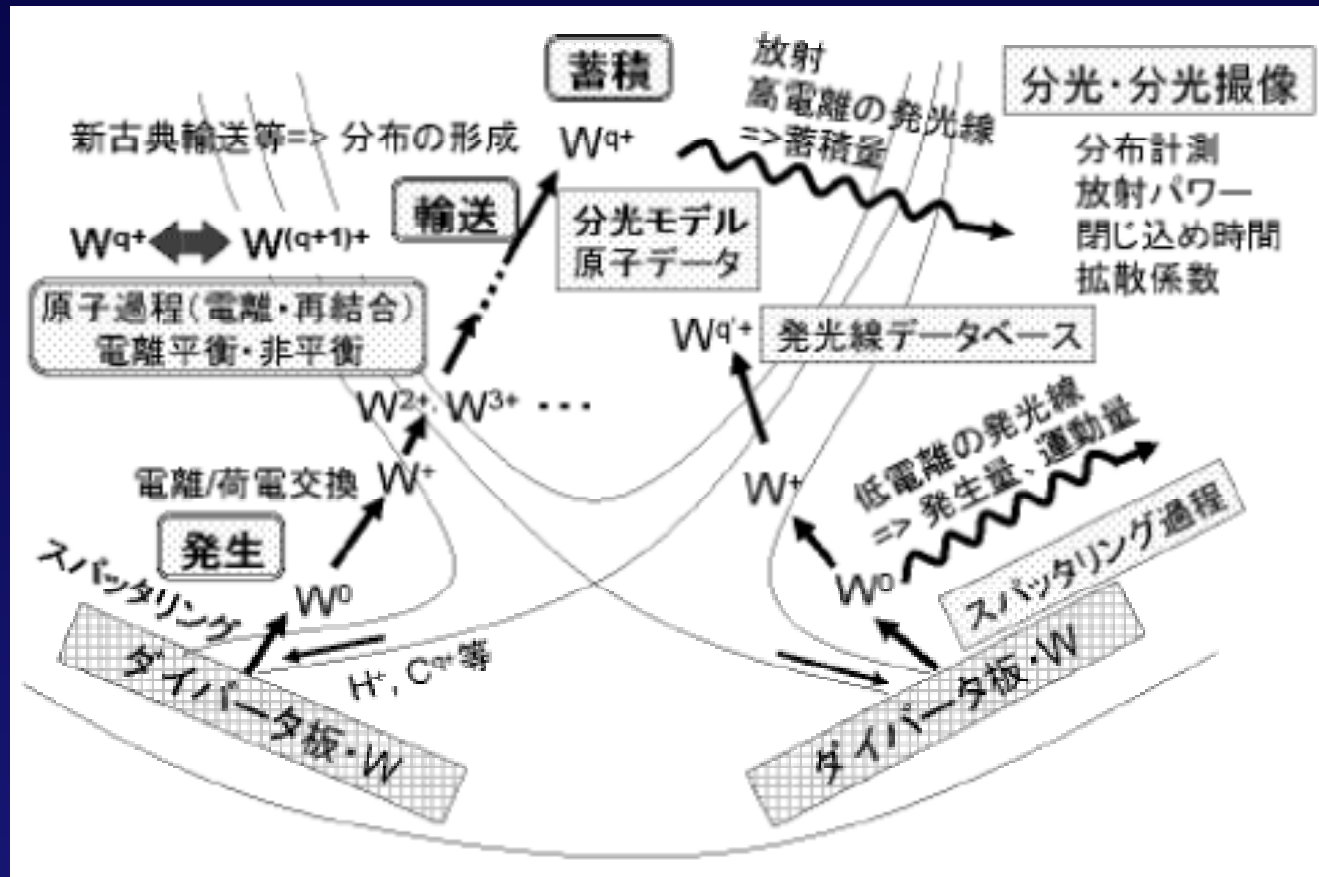


Dec 12, 2012



1. はじめに

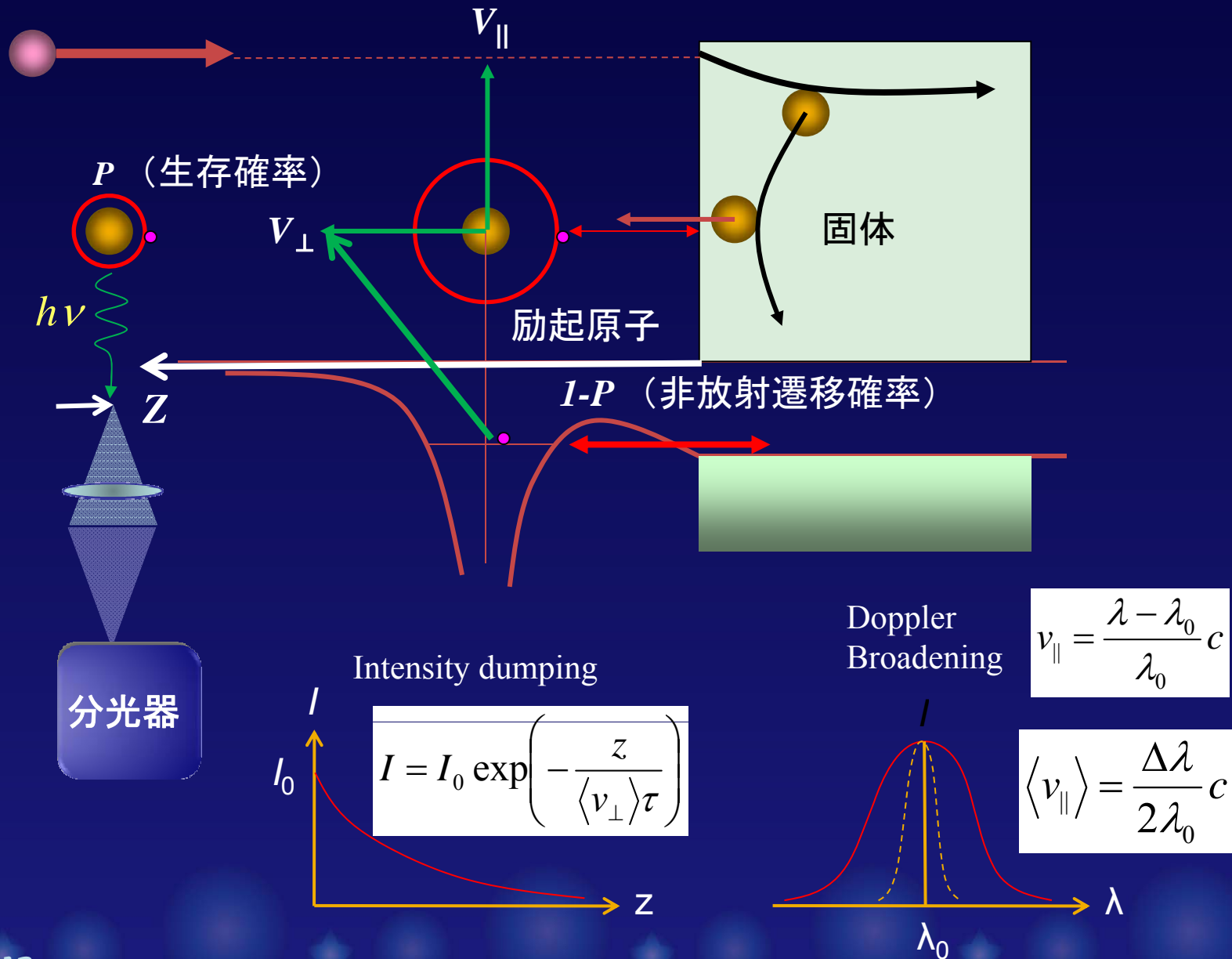
ダイバータ板 (W) からどれだけの量のタングステンが
 どのような運動量をもって放出されるのかを探る



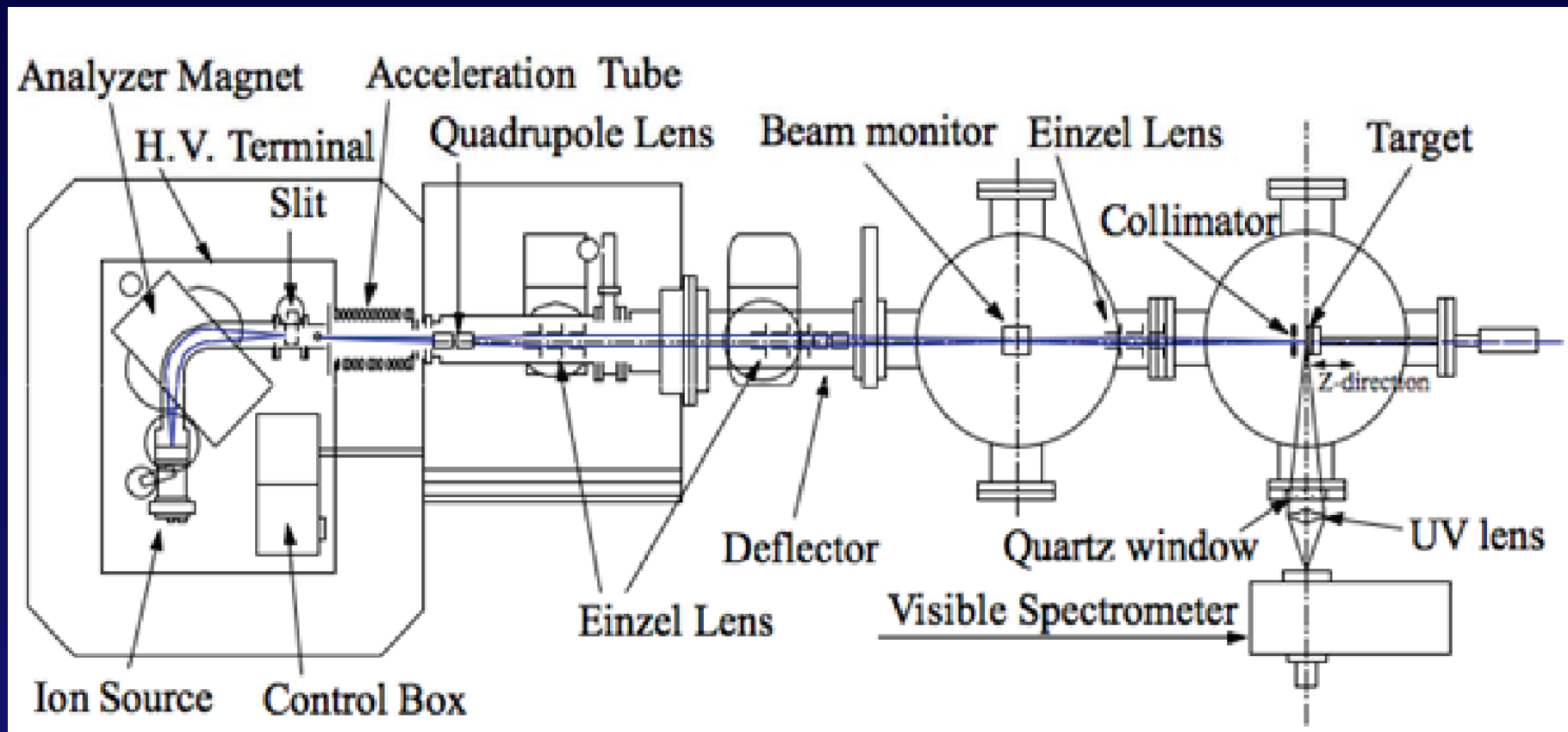
Kr⁺ Ar⁺ H⁺

W^C Ti ?

2, 実験原理



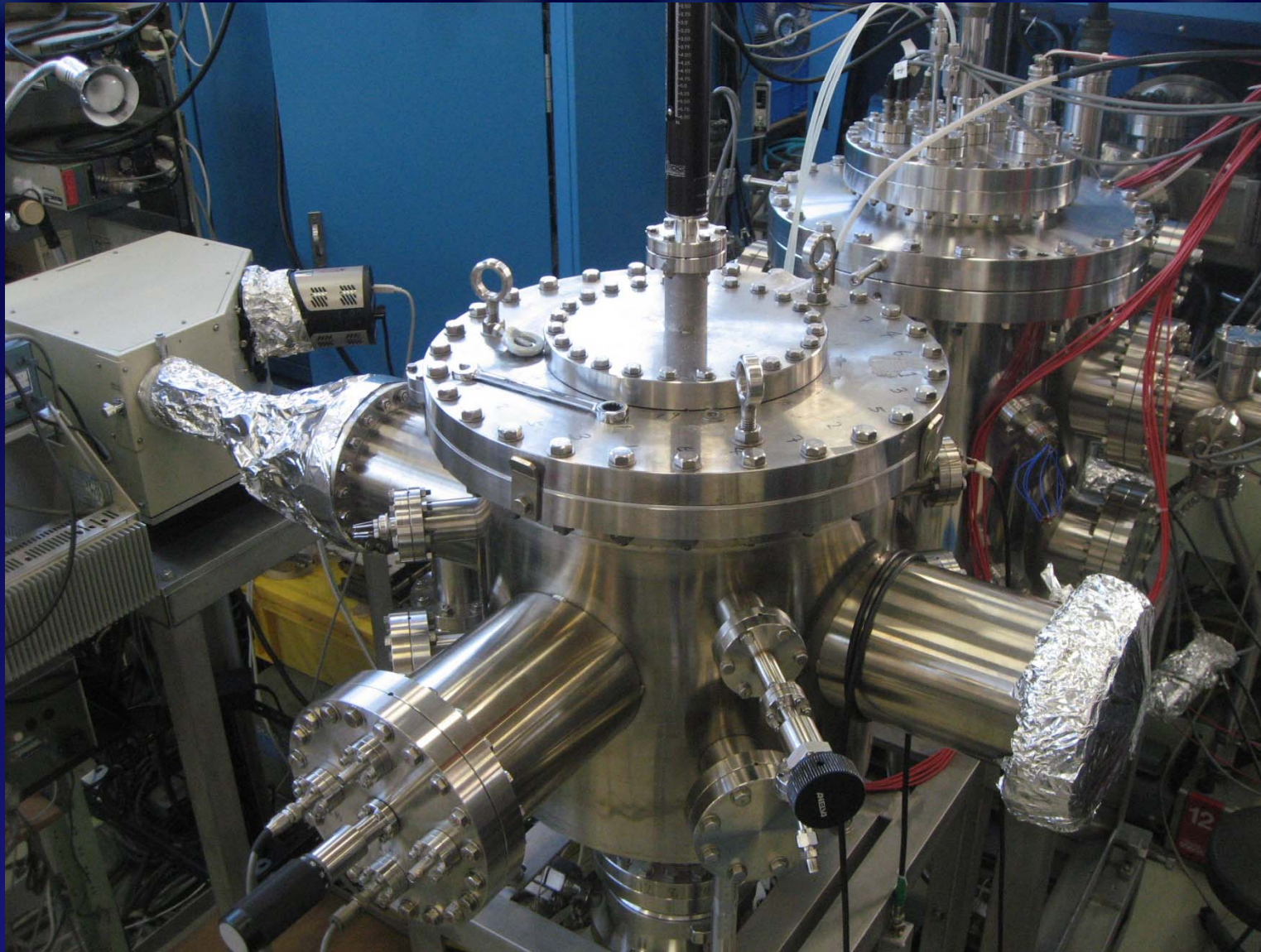
3, 実験装置



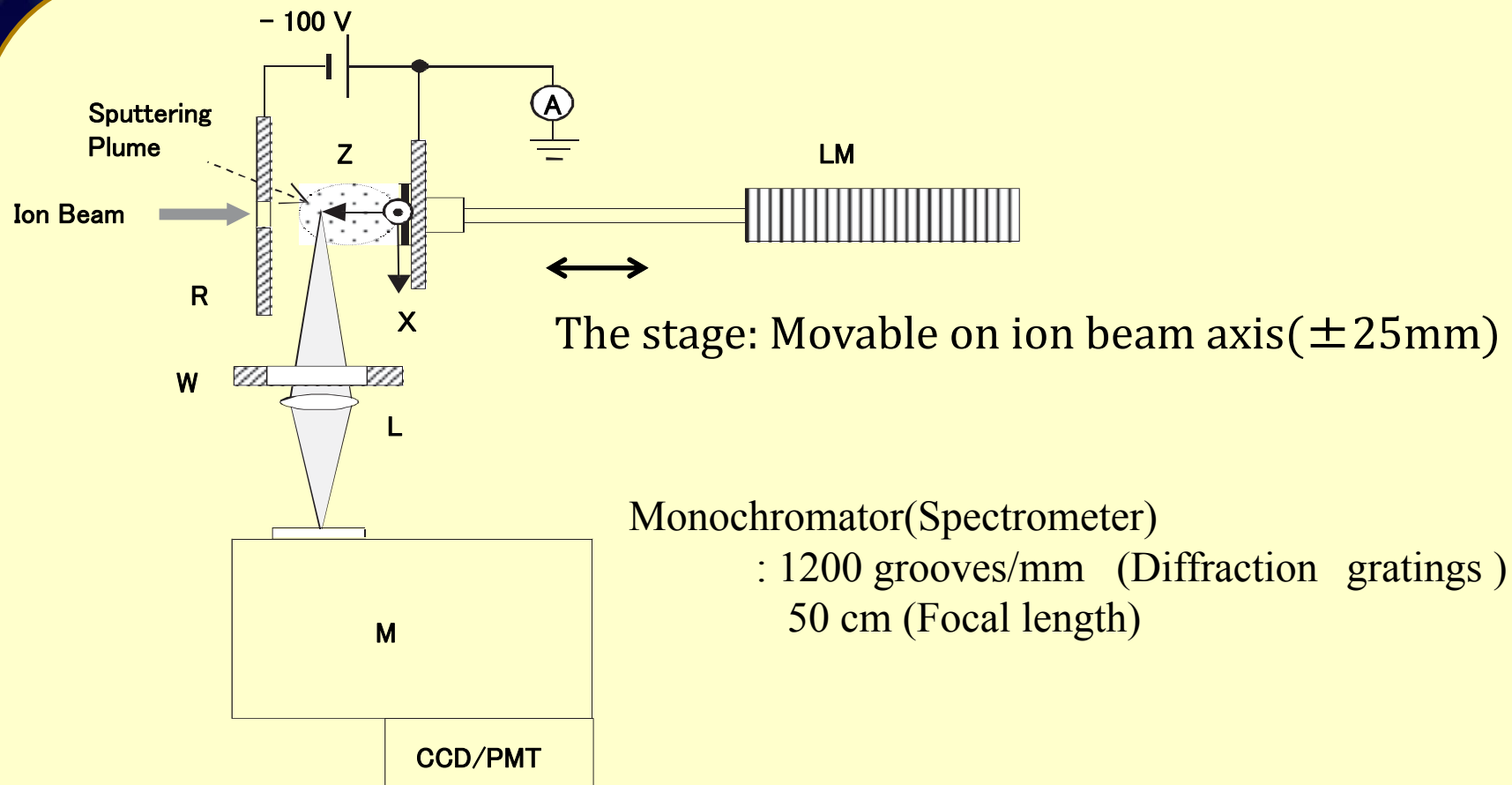
大強度イオン源:フリーマン型の熱陰極アーク放電型イオン源
(イオン注入装置を改造したもの:ULVAC IM-200MH-FB)

入射イオン:He, Ne, Ar, Kr, 他 H, D, C等の1価および2価イオン

入射エネルギー:数keV~100keV程度 強度:数から100 μ A



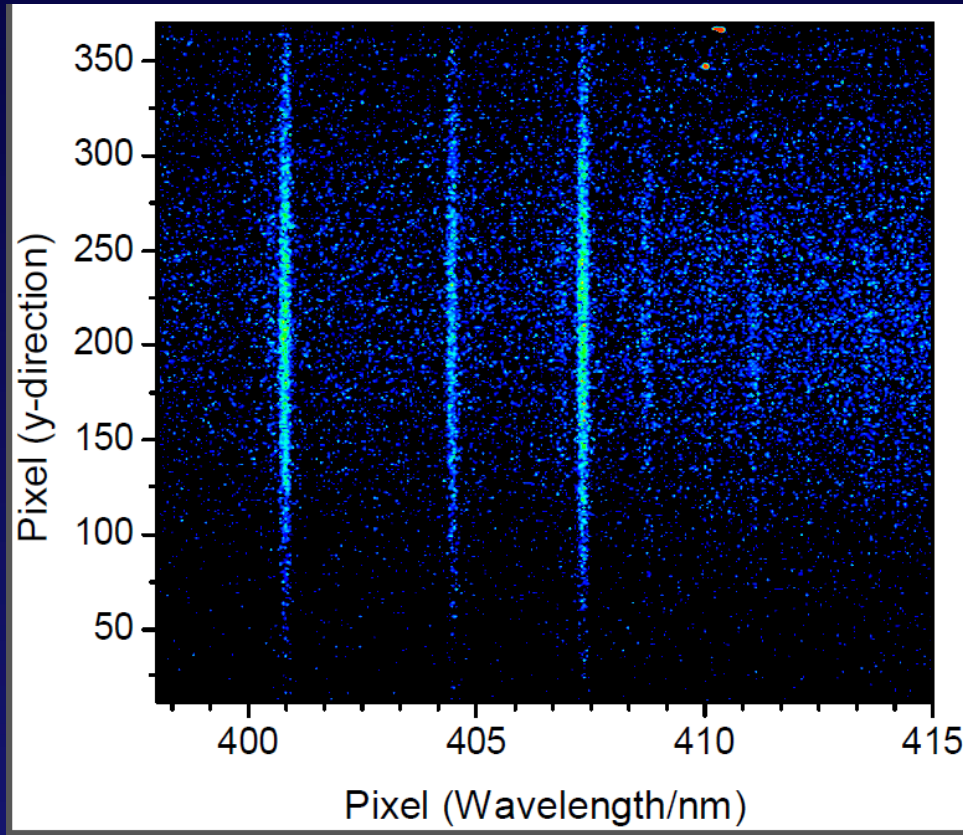
2012/12/12



Schematic illustration of the experimental apparatus around the target sample

4, 結果と議論

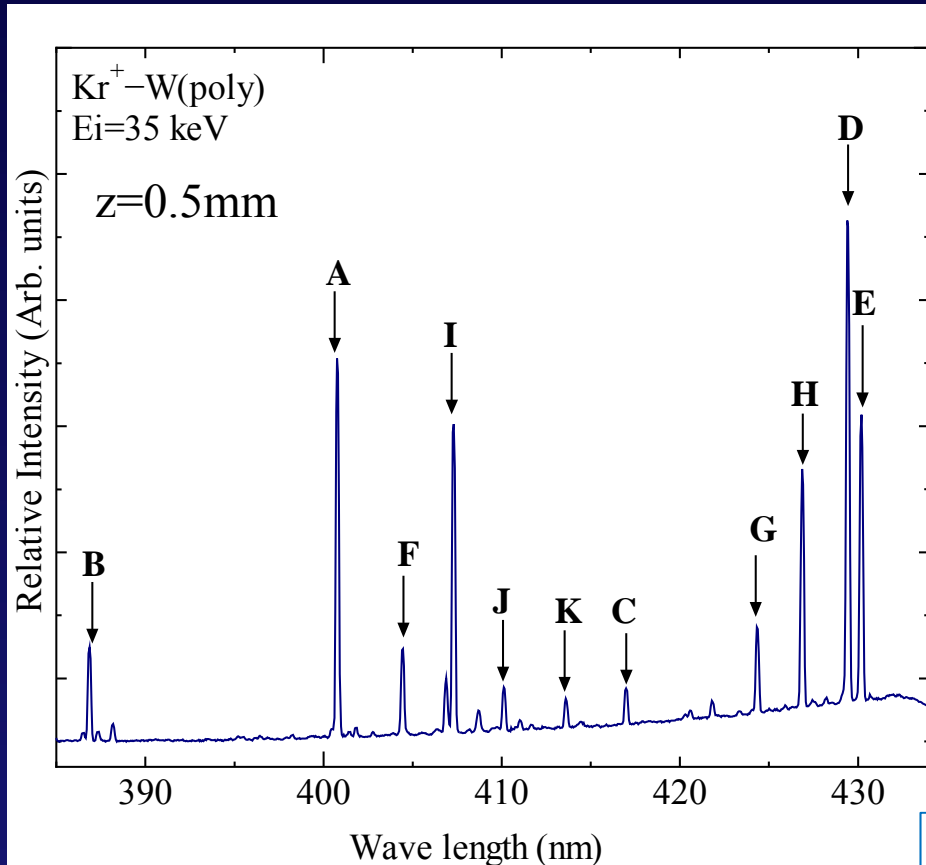
4.1 Kr⁺ - W(poly)



Typical 2D raw image taken by the CCD detector under Kr⁺ (35 keV) irradiation of a polycrystalline tungsten surface.

4, 結果と議論

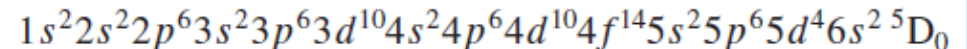
4.1 Kr⁺ - W(poly)



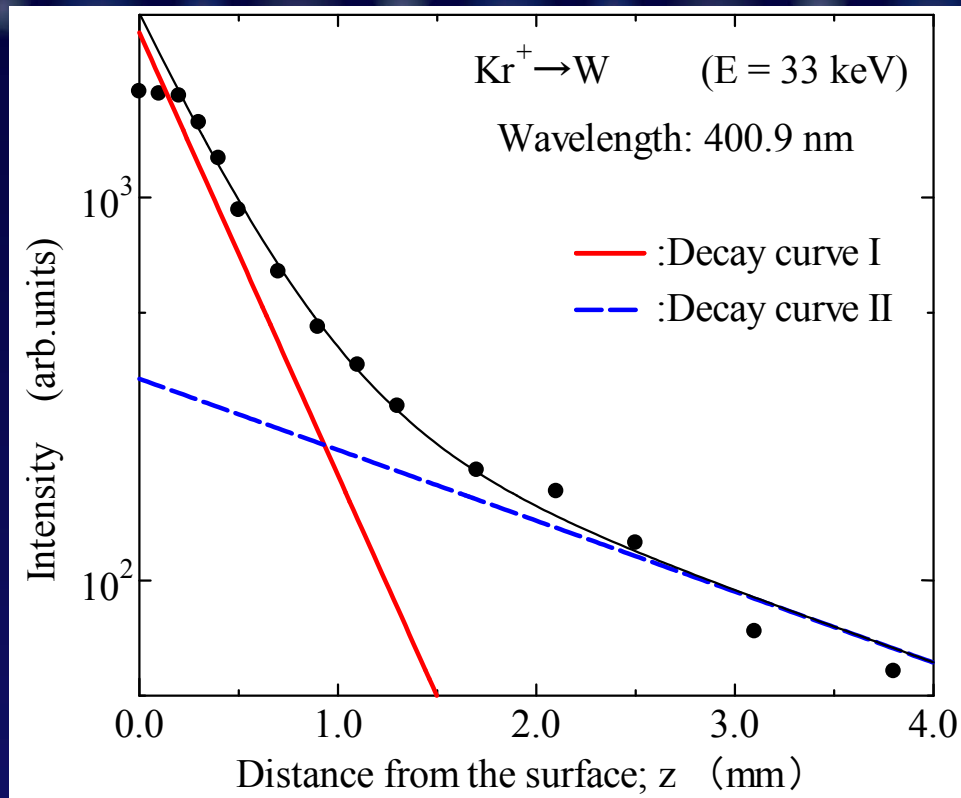
Strong lines of the visible emission spectrum observed for tungsten surfaces under irradiation by Kr⁺ (35 keV) ions

Labels	wavelength(nm)	Transitions
A	400.88	$5d^5(^6S)6p, ^7P_4 \rightarrow 5d^5(^6S)6s, ^7S_3$
B	386.80	$5d^46s(^6D)6p, ^7D_4 \rightarrow 5d^5(^6S)6s, ^7S_3$
C	417.12	$5d^46s(^6D)6p, ^7D_4 \rightarrow 5d^46s^2, ^5D_3$
D	429.46	$5d^5(^6S)6p, ^7P_2 \rightarrow 5d^5(^6S)6s, ^7S_3$
E	430.21	$5d^46s(^6D)6p, ^7D_3 \rightarrow 5d^5(^6S)6s, ^7S_3$
F	404.56	$5d^46s(^6D)6p, ^5F_2 \rightarrow 5d^5(^6S)6s, ^7S_3$
G	424.44	$5d^46s(^6D)6p, ^7D_5 \rightarrow 5d^46s^2, ^5D_4$
H	426.94	$5d^5(^6S)6p, ^7P_4 \rightarrow 5d^5(^6S)6s, ^7S_3$
I	407.44	$5d^5(^6S)6p, ^7P_3 \rightarrow 5d^5(^6S)6s, ^7S_3$
J	410.27	$5d^46s(^6D)6p, ^5P_3 \rightarrow 5d^46s^2, ^5D_4$
K	413.75	$5d^5(^6S)6p, ^7P_3 \rightarrow 5d^46s^2, ^5D_2$

Ground state



Typical survey optical emission spectrum obtained by the CCD detector under Kr⁺ (35keV) irradiation of a polycrystalline tungsten surface. Labels A–K denote strong lines observed in the spectrum; properties of these lines are given in the Table.



Semi -log plot of photon intensity for “A” peak (400.9 nm) as a function of the distance.

$$I = \sum_k I_{0k} \exp\left(-\frac{z}{\langle v_{\perp} \rangle \tau_k}\right)$$

$$\langle v_{\perp} \rangle = 5.7 \pm 1.0 \text{ km/s}$$

I : Photon emission intensity

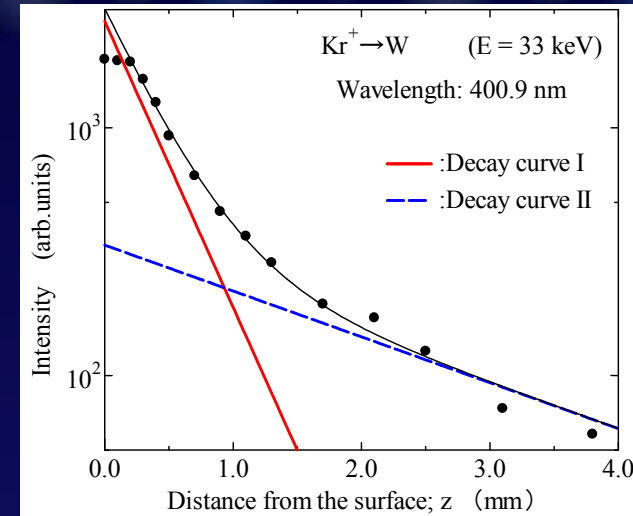
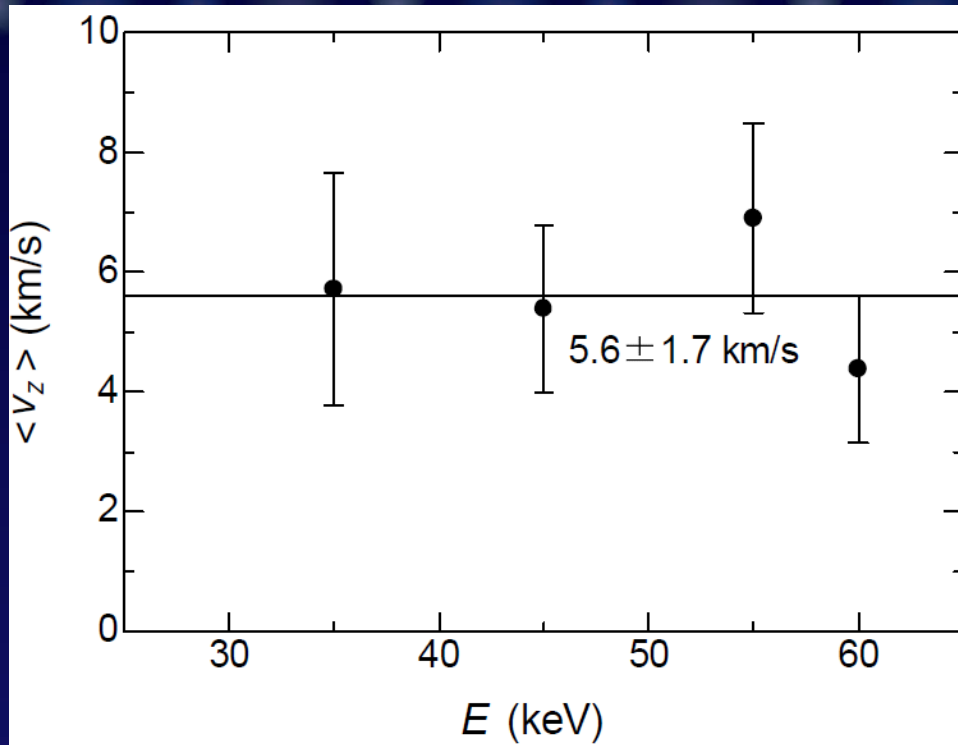
z : Distance from the surface

I_{0k} : Photon intensity above the surface

$\langle v_{\perp} \rangle$: Mean vertical velocity component normal to the surface

τ_k : Life time. (59.4 ns)[3]

[3] E. A. Den Hartog *et.al.*, *J. Opt. Soc. Am.* B4,48(1987)

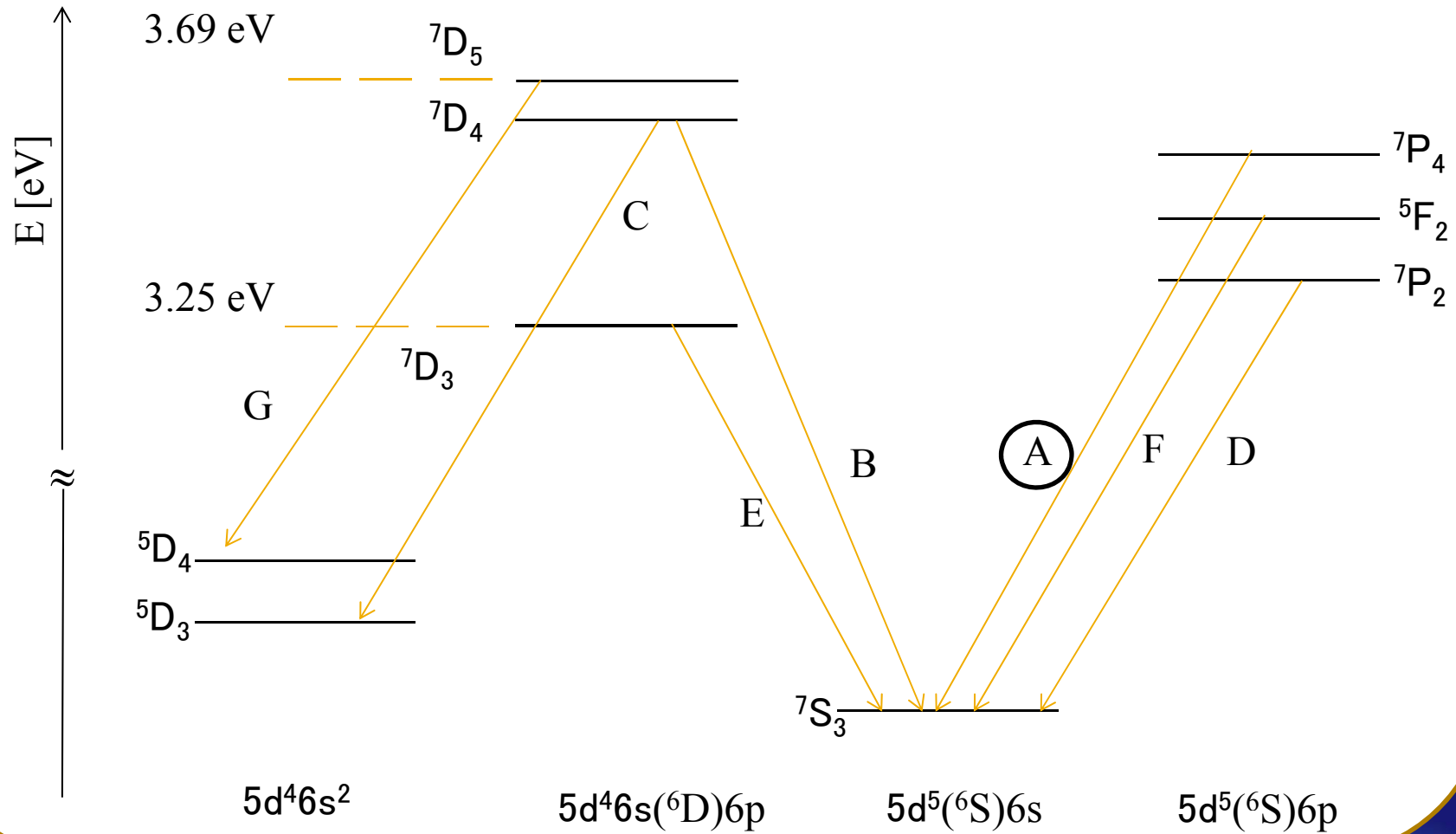


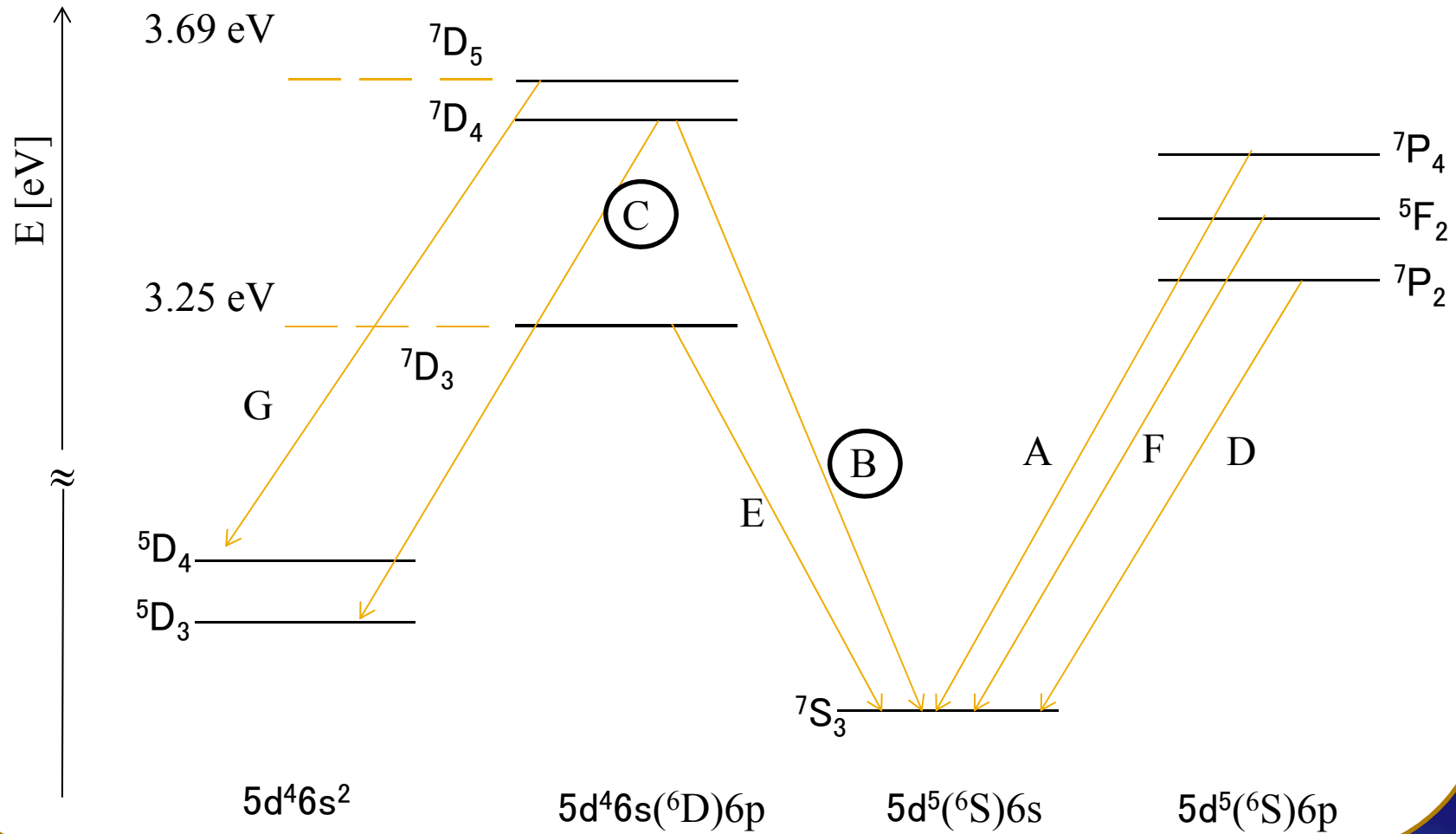
$$\langle \mathbf{v}_\perp \rangle = 5.6 \pm 1.7 \text{ km/s}$$

$\langle v_z \rangle$ of $\text{W}^*(6p \ ^7P_4)$ atoms as a function of the projectile energy

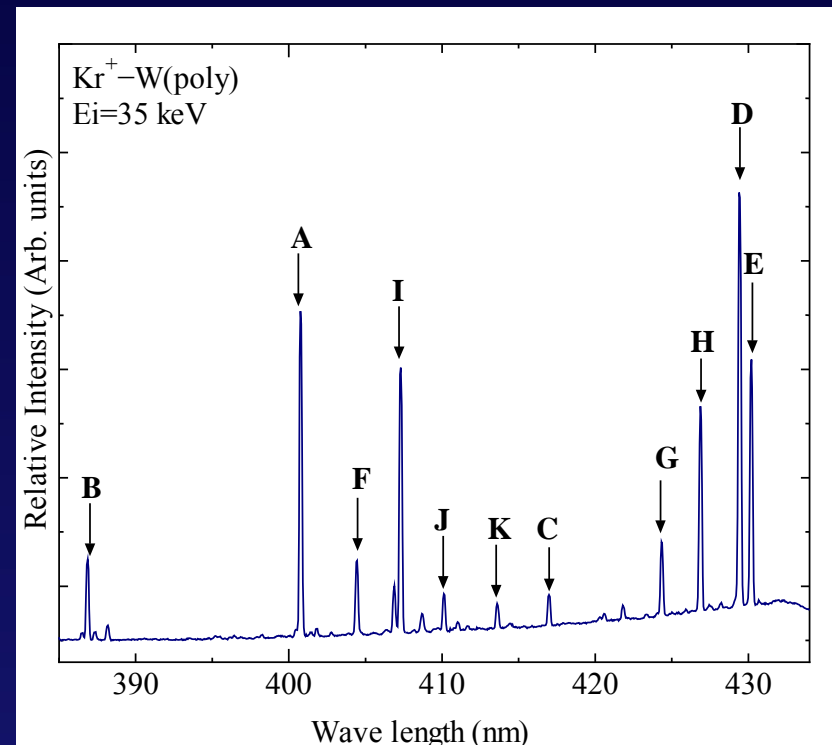
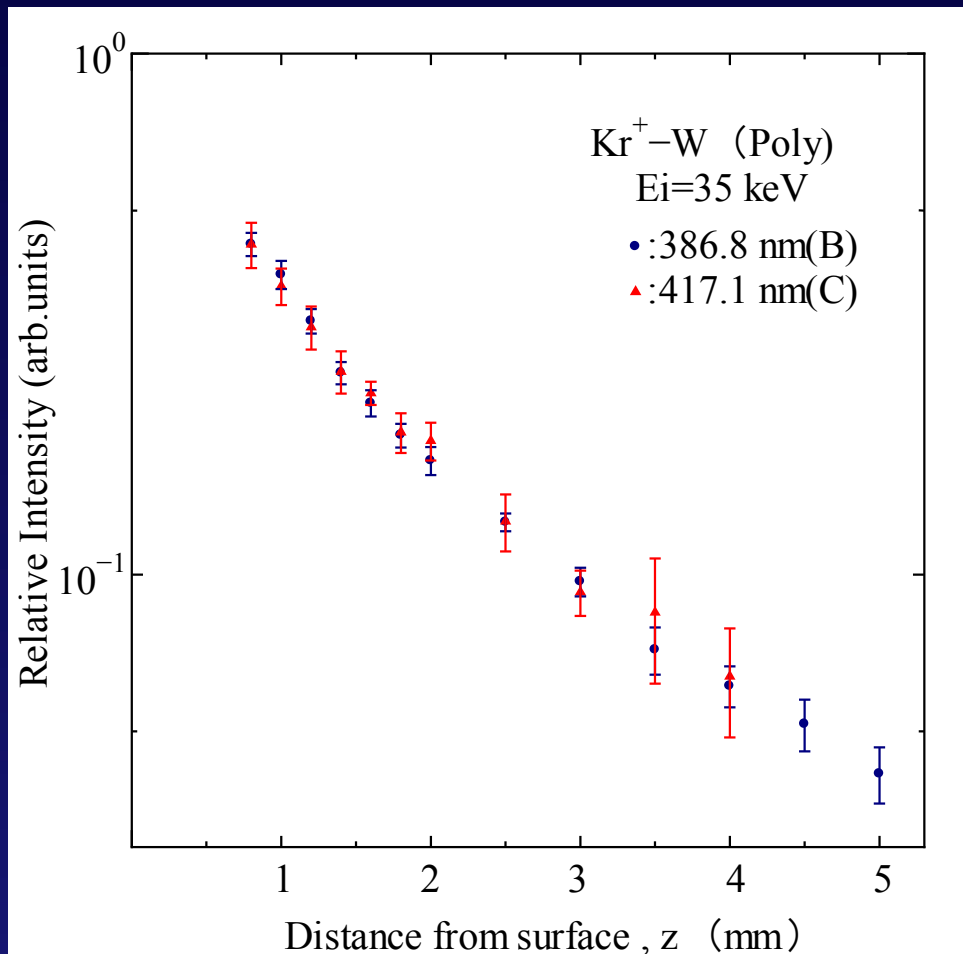
プロジェクトイオンの入射エネルギーが異なっても、この遷移に対応する W^* の垂直方向の速さは変わらない。
単純にエネルギーに換算すると $\sim 30 \text{ eV}$ になる。[4]

[4] K. Motohashi *et. al.*, Phys. Scr. T73 (1997) 329





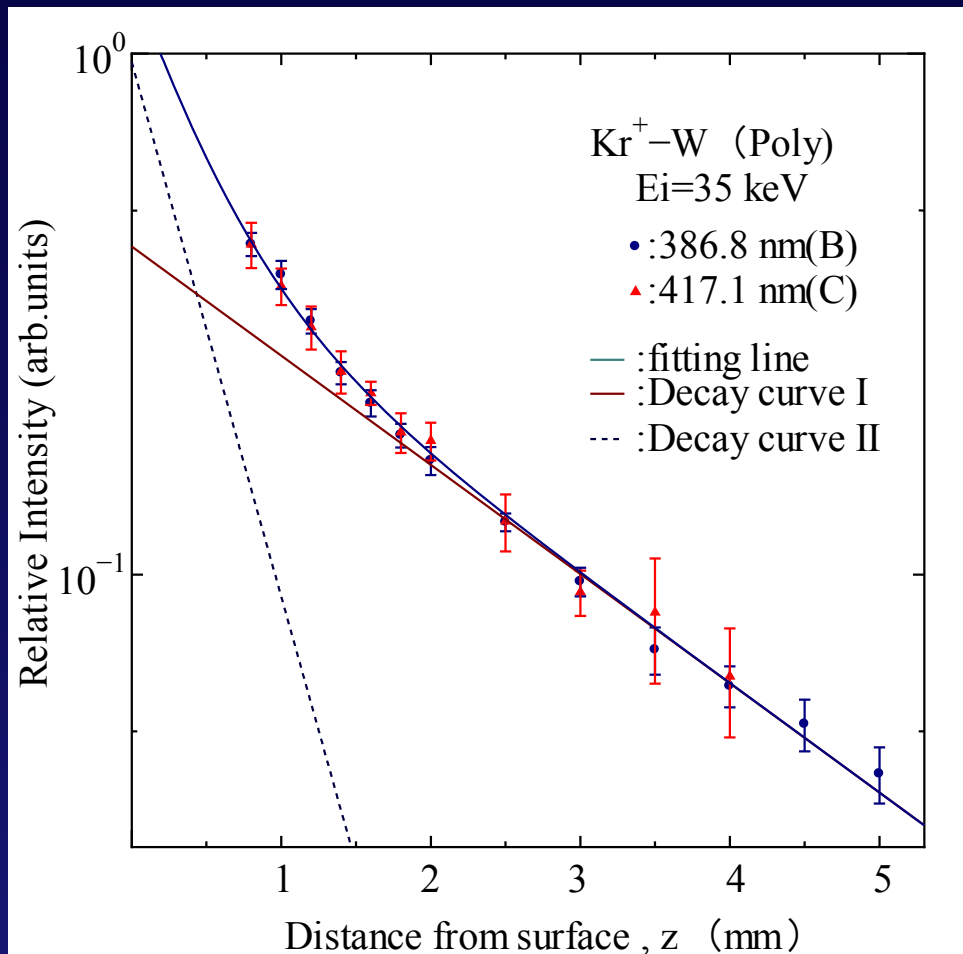
B	386.8 nm	$5d^4 6s(^6D)6p, ^7D_4 \rightarrow 5d^5(^6S)6s, ^7S_3$
C	417.1 nm	$5d^4 6s(^6D)6p, ^7D_4 \rightarrow 5d^4 6s^2, ^5D_3$



Semi -log plot of photon intensity for “B” and “C” peaks as a function of the distance.

B	386.8 nm	$5d^46s(^6D)6p, ^7D_4 \rightarrow 5d^5(^6S)6s, ^7S_3$
C	417.1 nm	$5d^46s(^6D)6p, ^7D_4 \rightarrow 5d^46s^2, ^5D_3$

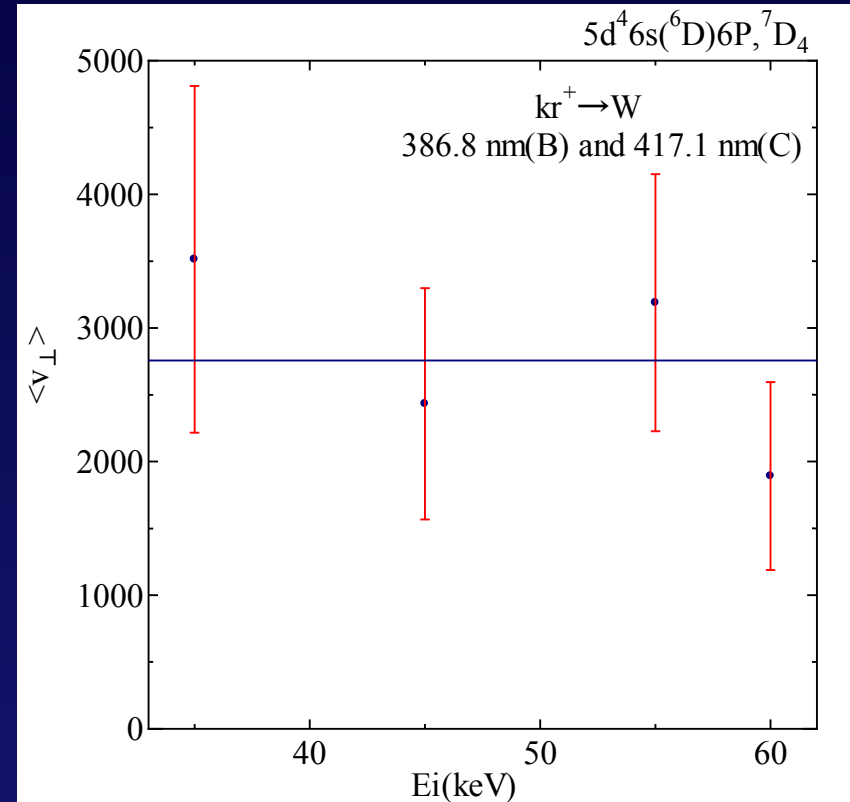
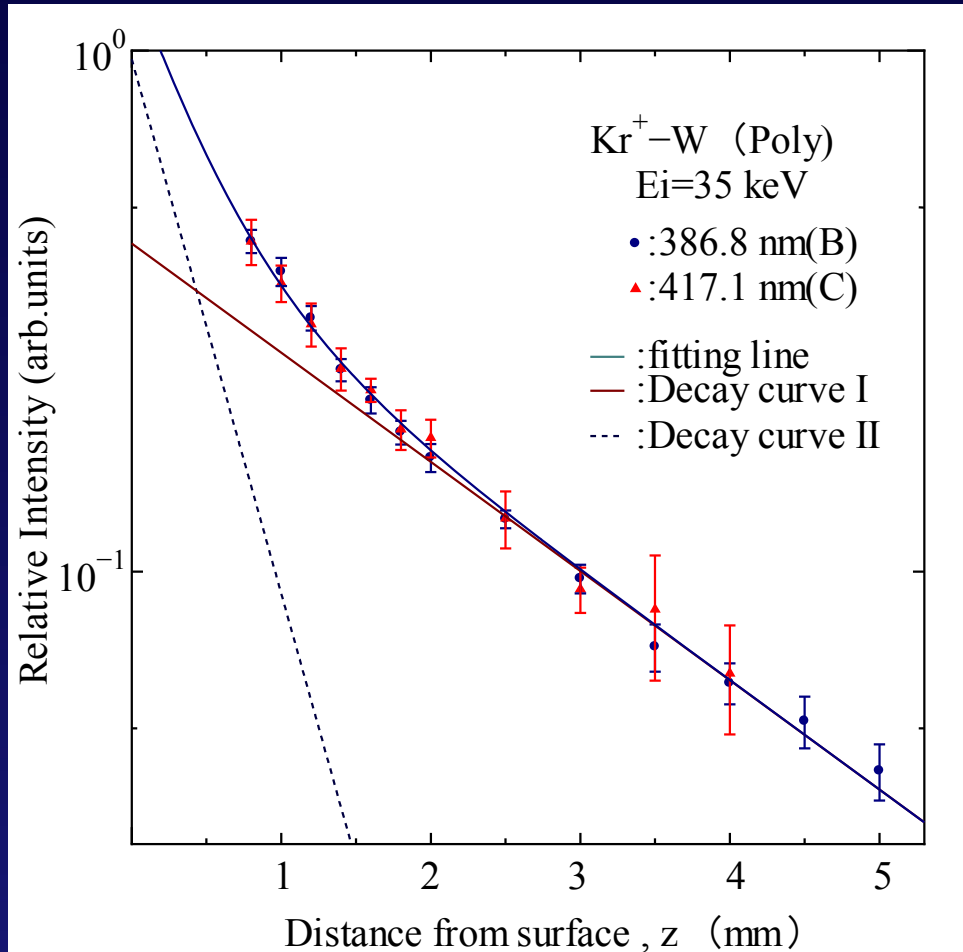
$\tau=185$ ns [1]



Semi -log plot of photon intensity for “B” and “C” peaks as a function of the distance.

B	386.8 nm	$5d^4 6s(^6D)6p, ^7D_4 \rightarrow 5d^5(^6S)6s, ^7S_3$
C	417.1 nm	$5d^4 6s(^6D)6p, ^7D_4 \rightarrow 5d^4 6s^2, ^5D_3$

$\tau = 185 \text{ ns}$ [1]

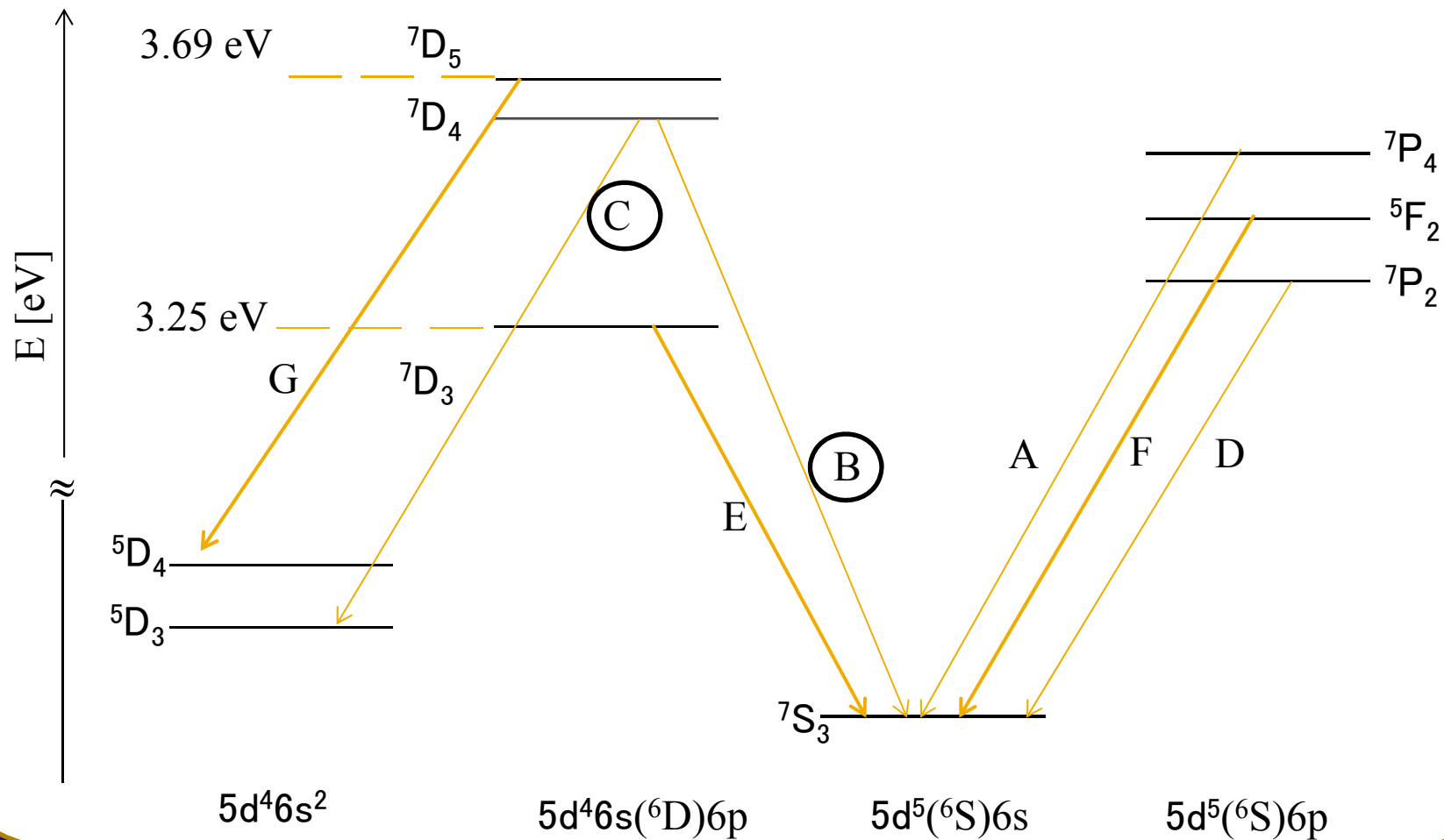


$\langle v_z \rangle$ of $W^*(5d^4 6s 6p ^7D_4)$ atoms as a function of the projectile energy

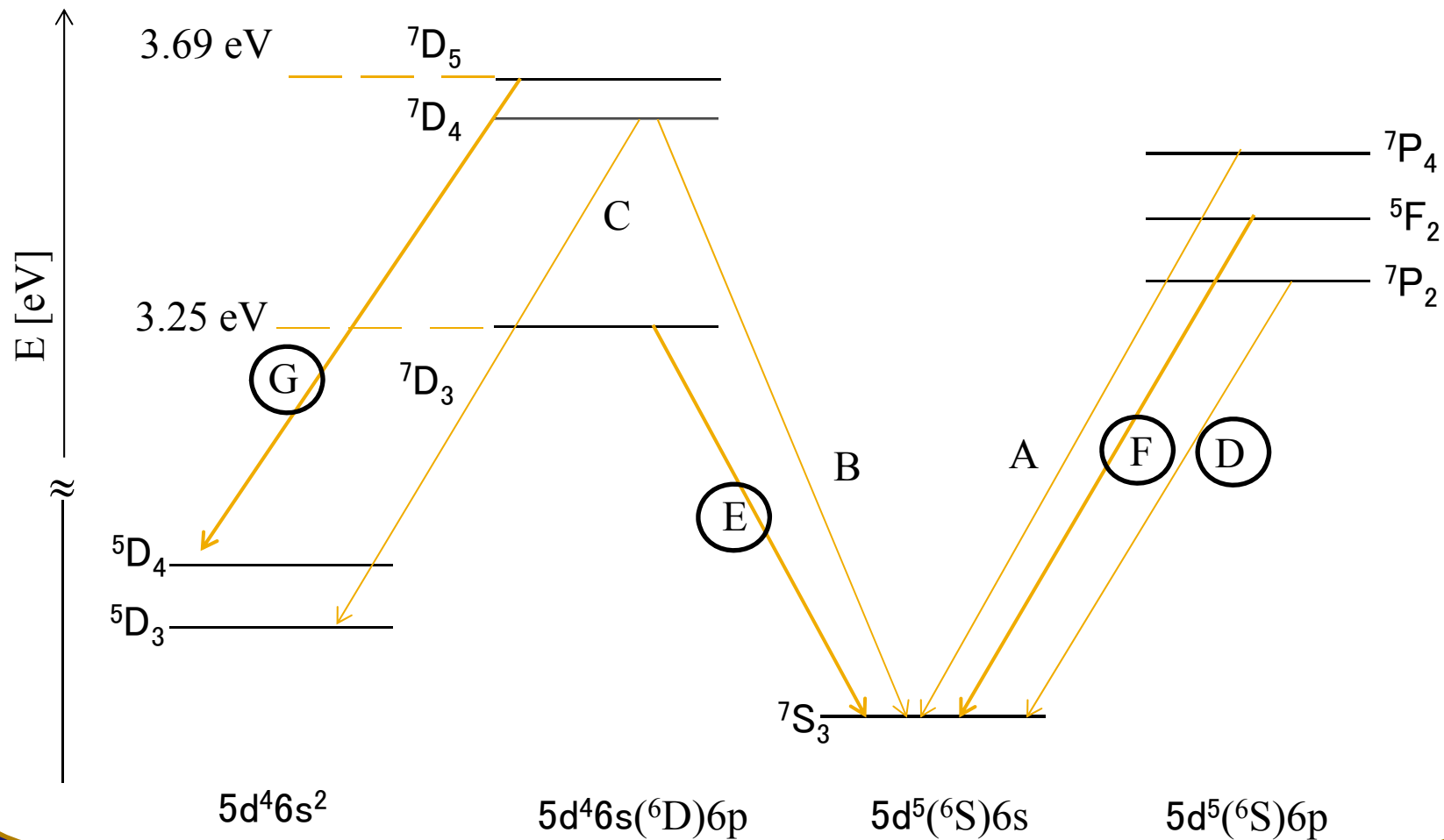
Semi-log plot of photon intensity for “B” and “C” peaks as a function of the distance.

$\langle v_{\perp} \rangle = 2.8 \pm 1.0 \text{ km/s}$

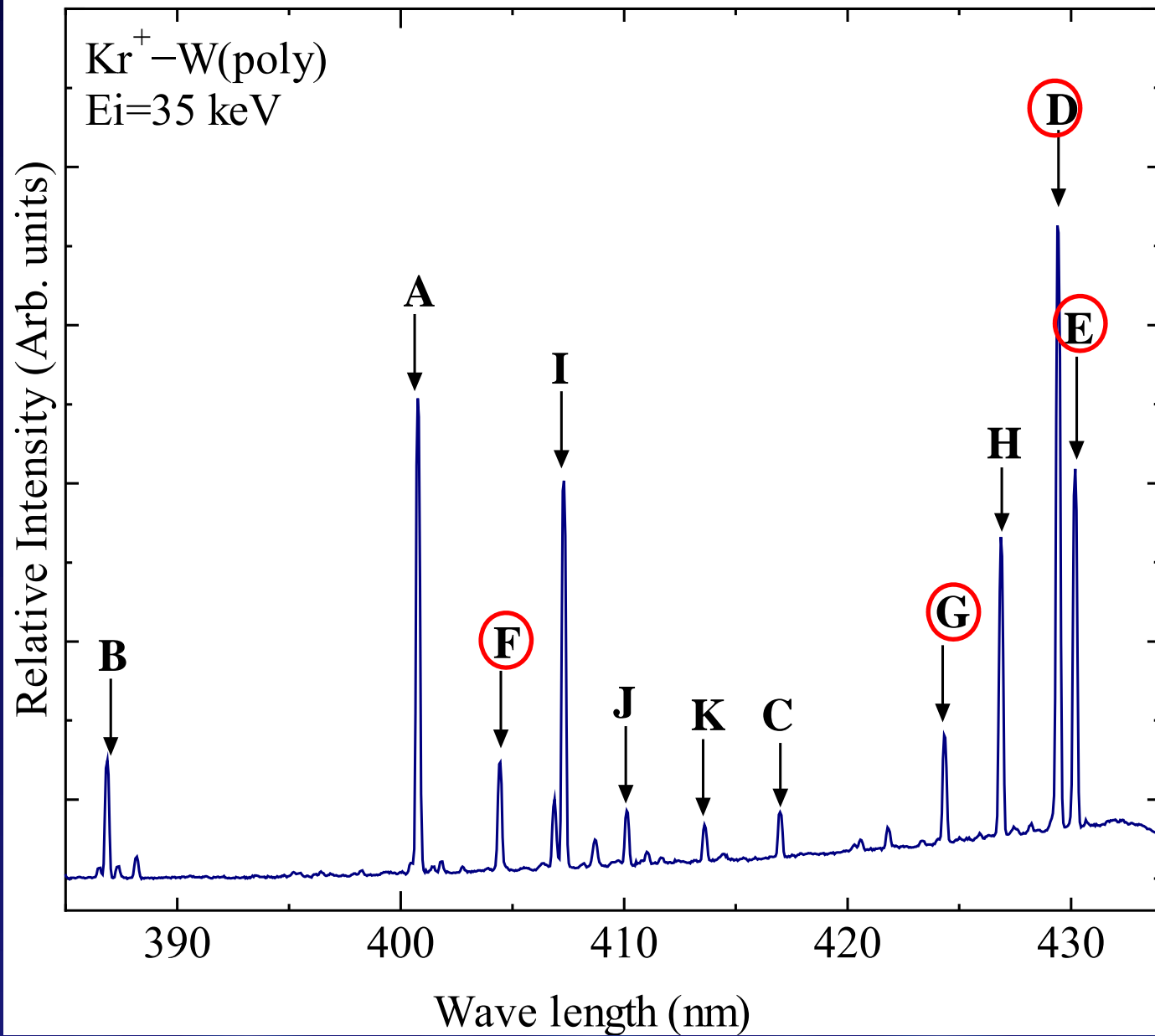
[1] M. D. Campbell-Miller *et.al.*, J. Opt. Soc. Am. B **13**, 2115 (1996)

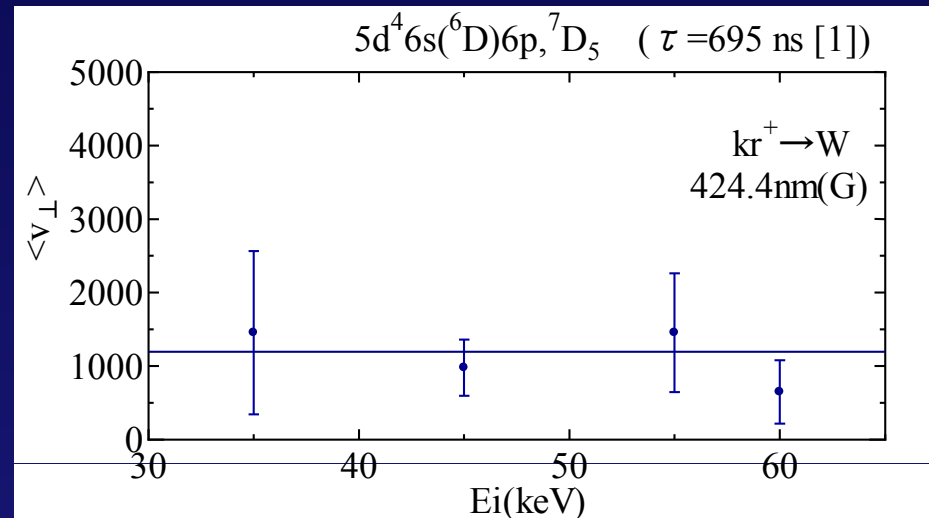
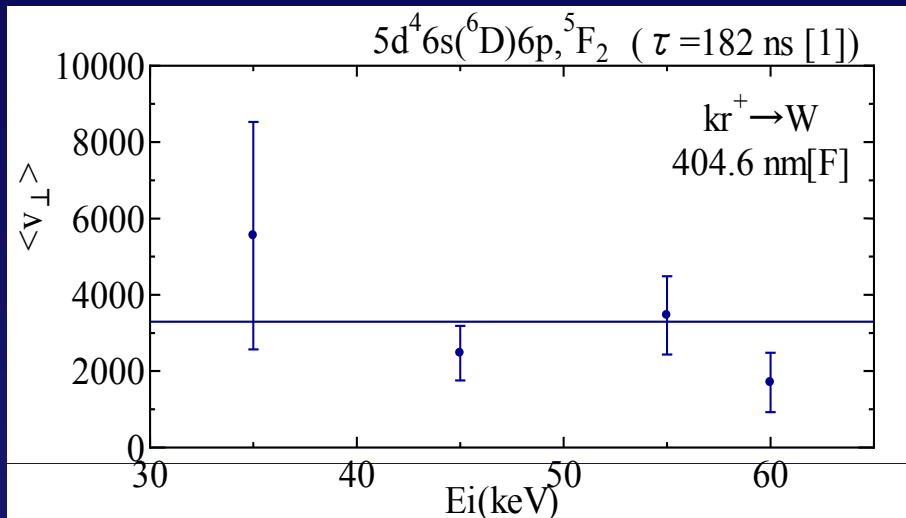
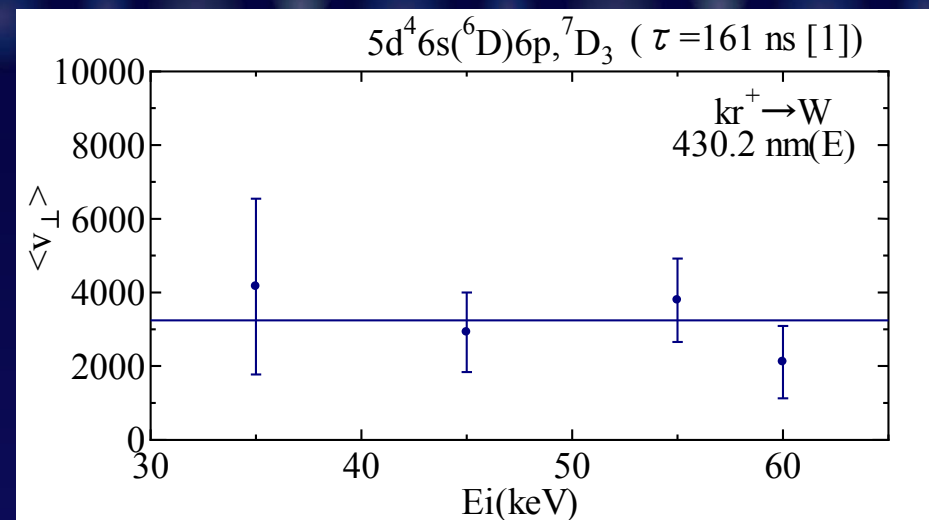
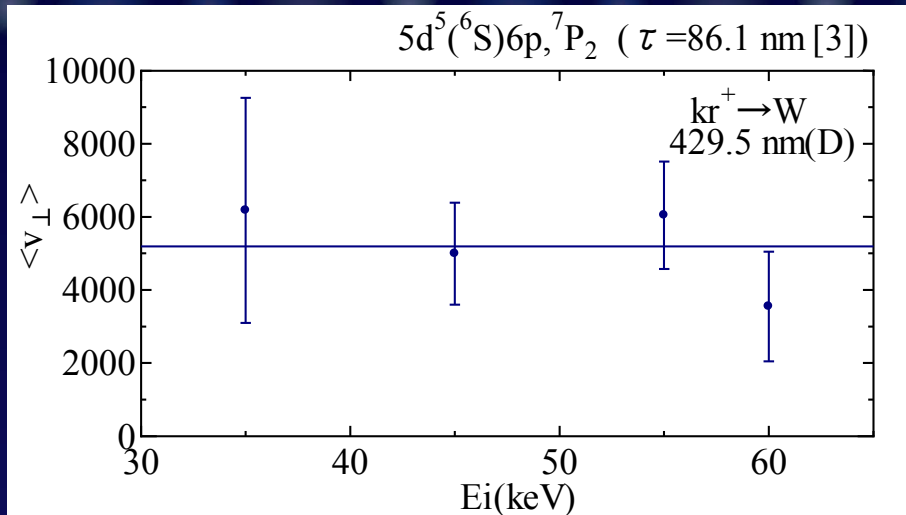


上準位が同じなら W^* の垂直方向の速さは変わらない。
 ただし、上準位が異なると速さはかなり異なる。



上準位が同じなら W^* の垂直方向の速さは変わらない。
 ただし、上準位が異なると速さはかなり異なる。



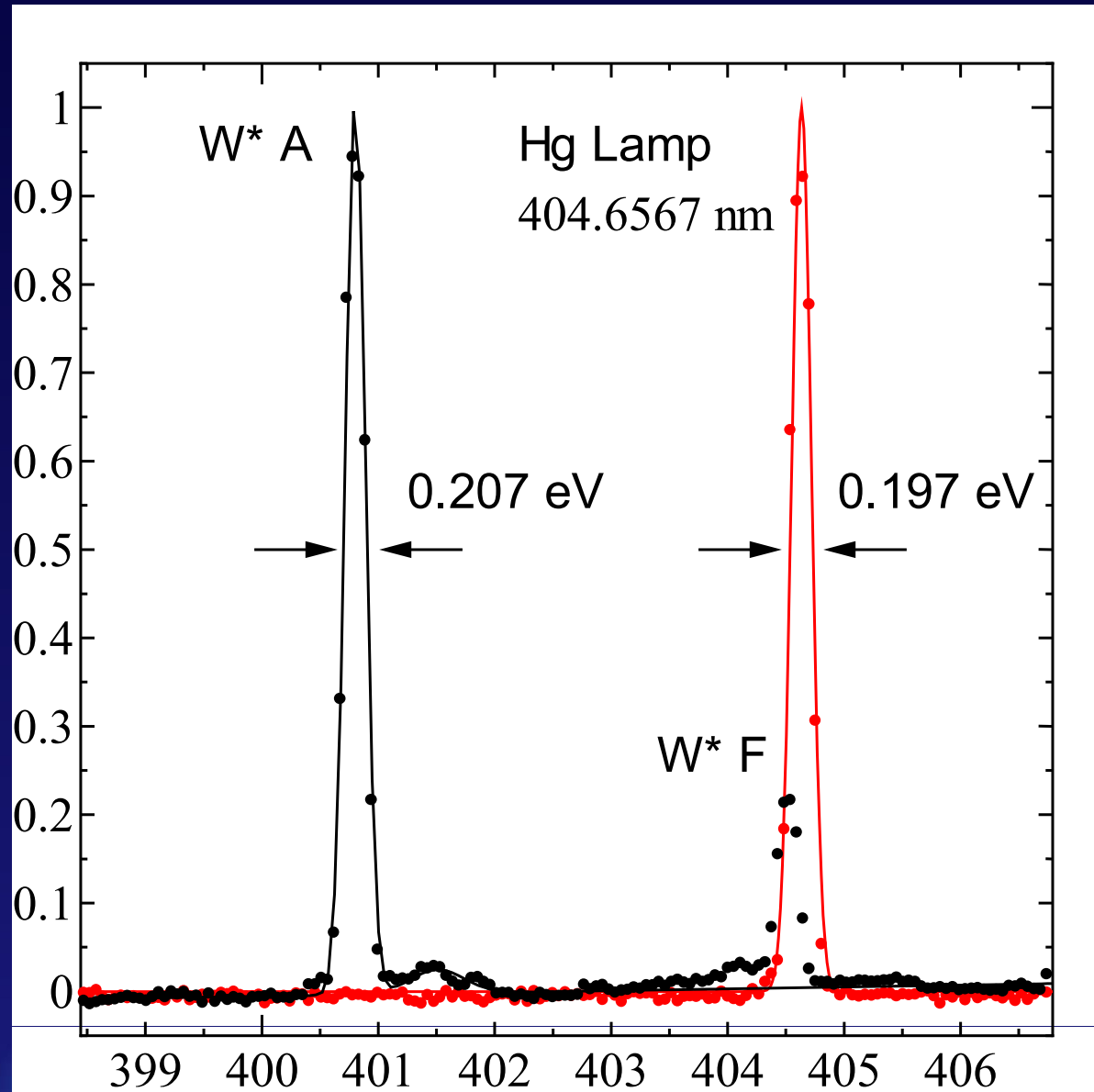


$\langle v_z \rangle$ of various W^* atoms as a function of the projectile energy

[1] M. D. Campbell-Miller *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **13**, 2115 (1996)

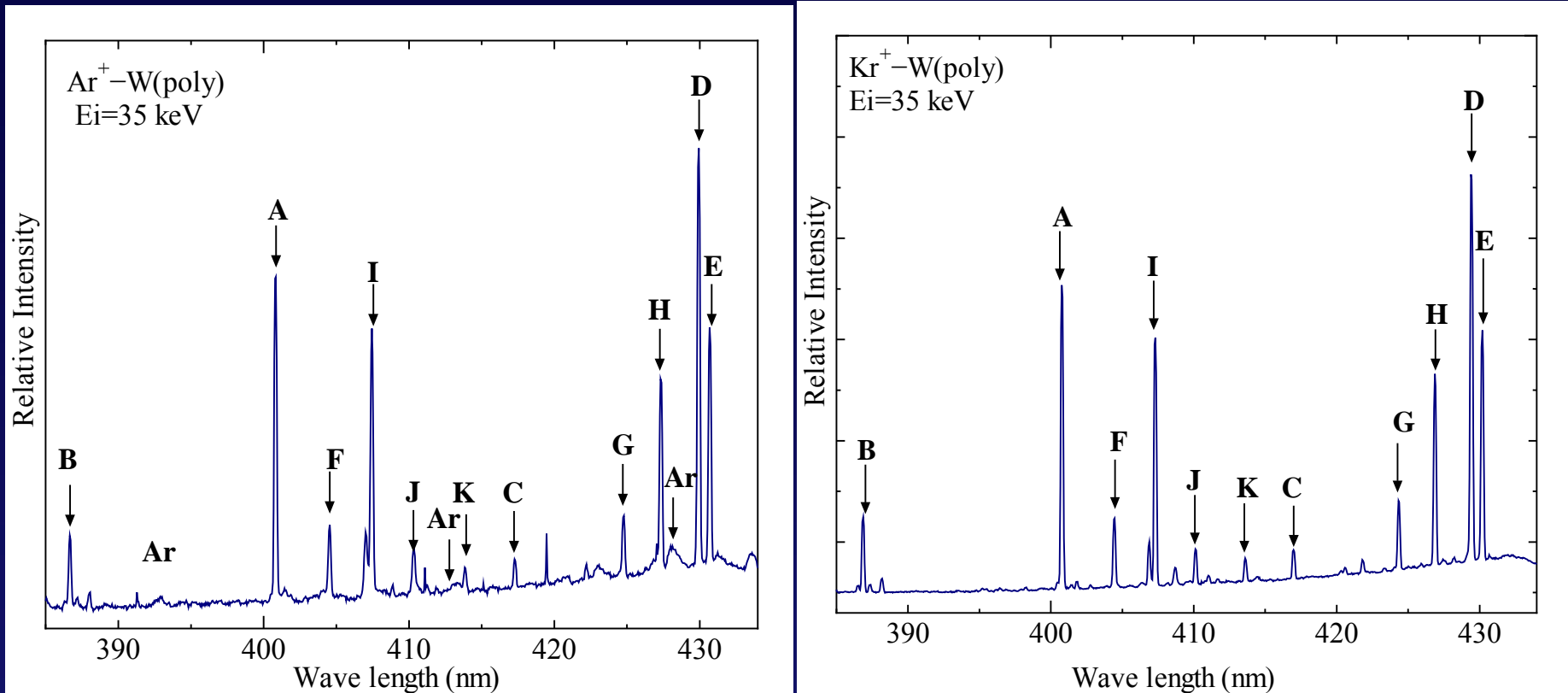
[3] E. A. Den Hartog *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **4**, 48 (1987).

4.2 Kr⁺ - W(poly) ドップラーブローディング解析

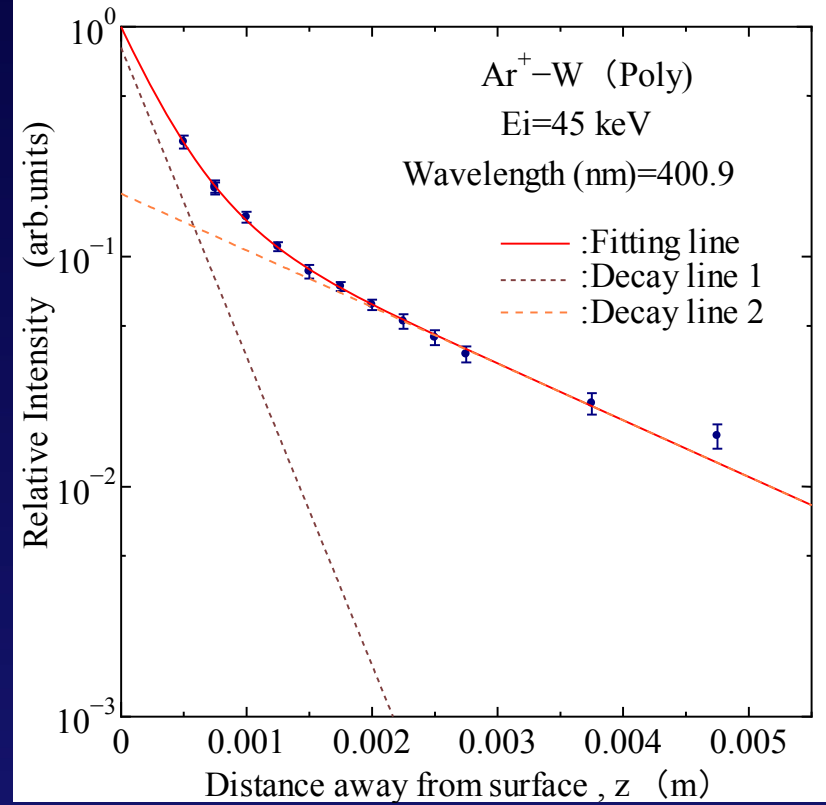
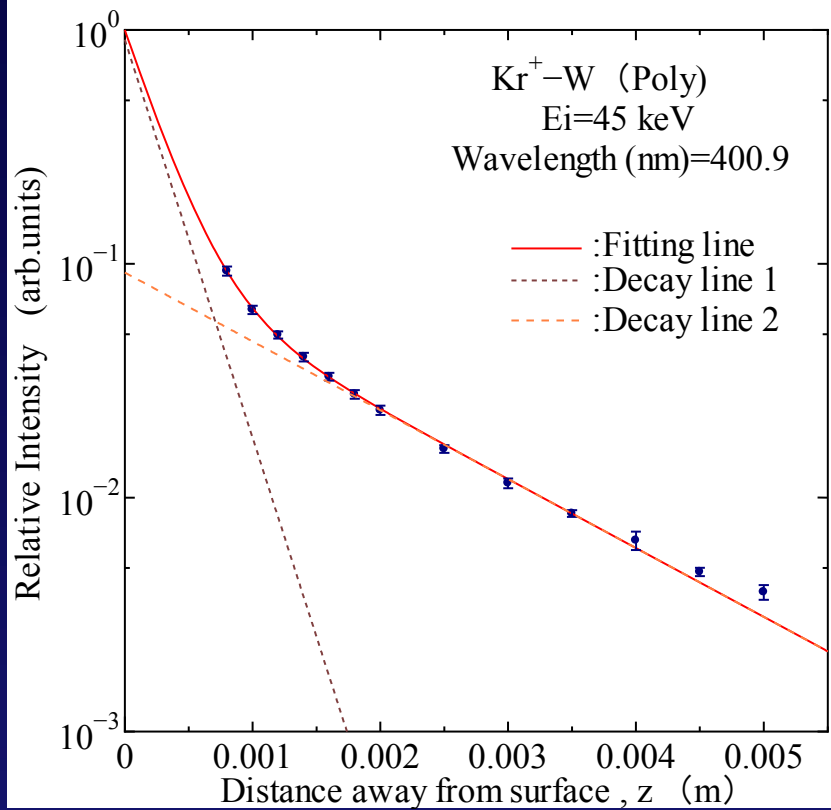


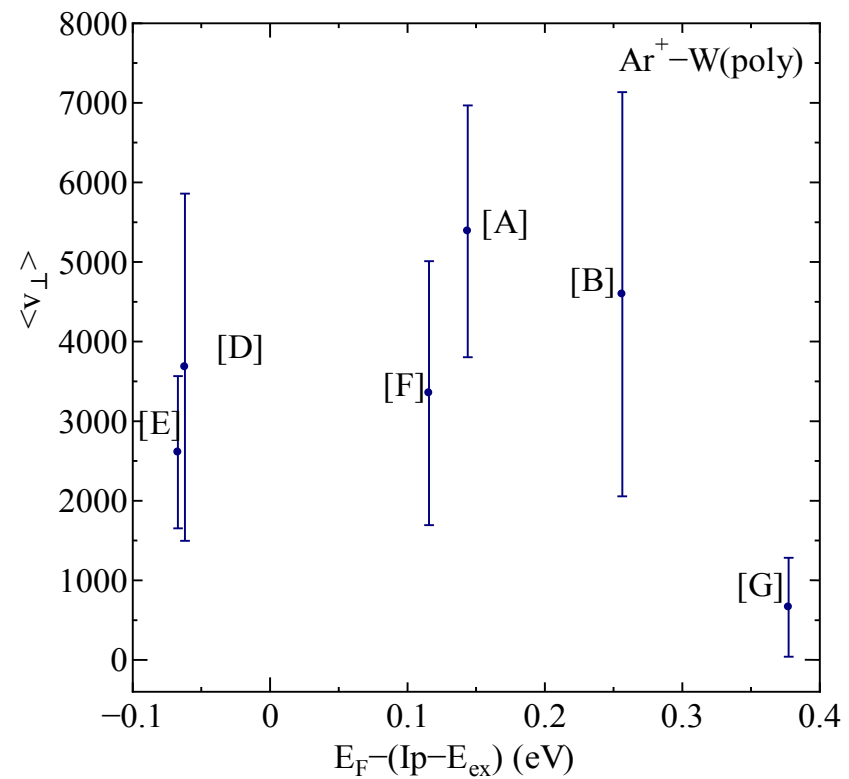
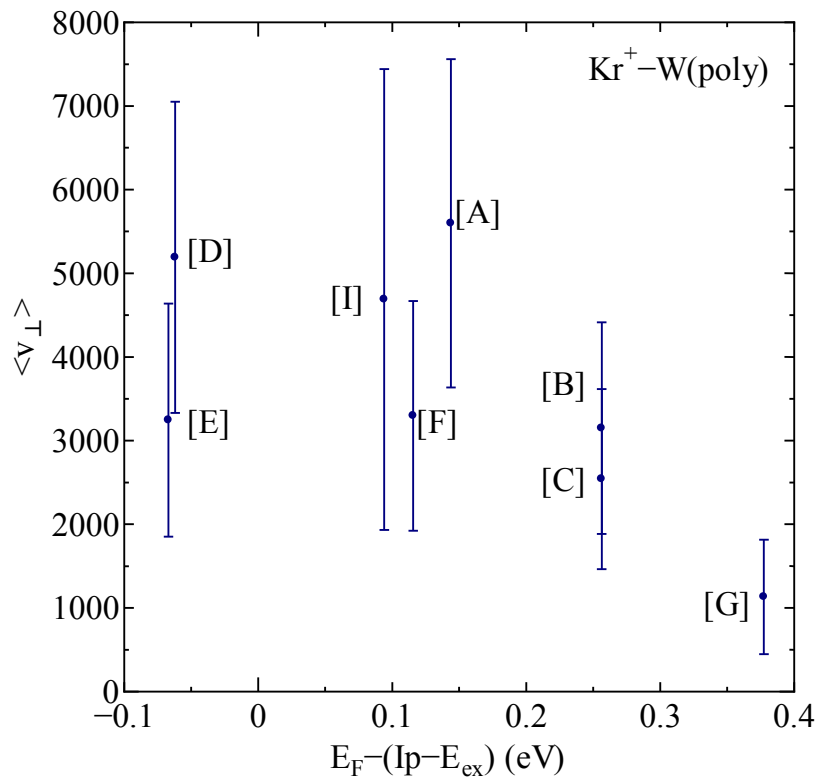
ドップラーによるピークの広がりほとんどなく (Fittingの誤差で解析不能になる程度)、標的タングステン板に平行な方向の速度解析は難しい。

4.3 Ar⁺ - W(poly)



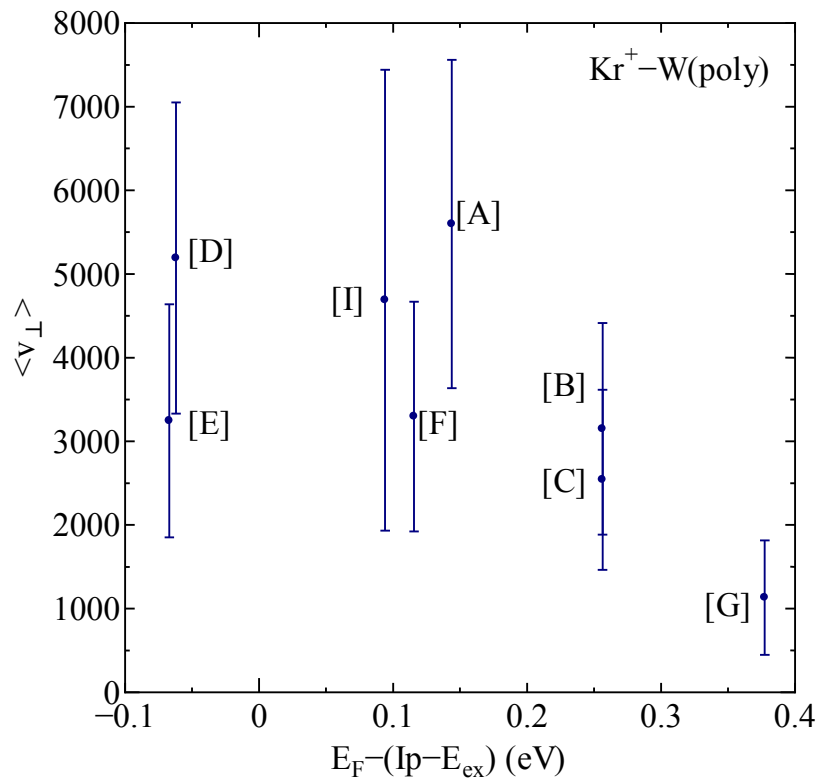
プロジェクトイルのイオン種の違い (Ar⁺とKr⁺) では、スペクトルの各ピークの強度比はほとんど同じ。(イオンの絶対量は異なる)





この図は、各上準位の励起エネルギーとイオン化エネルギーの差と仕事関数の関係を横軸に整理したもの

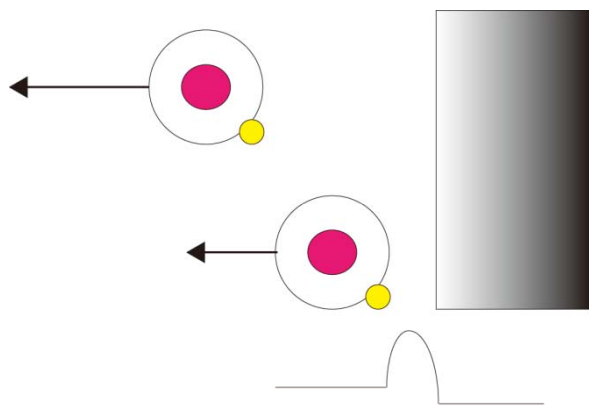
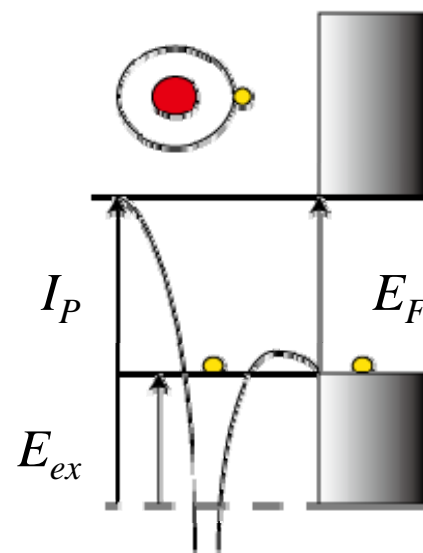
プロジェクトイルのイオン種の違い (Ar⁺とKr⁺) では、各ピークが示す速度は変わらない。



E_F : Work Function (4.55 eV)

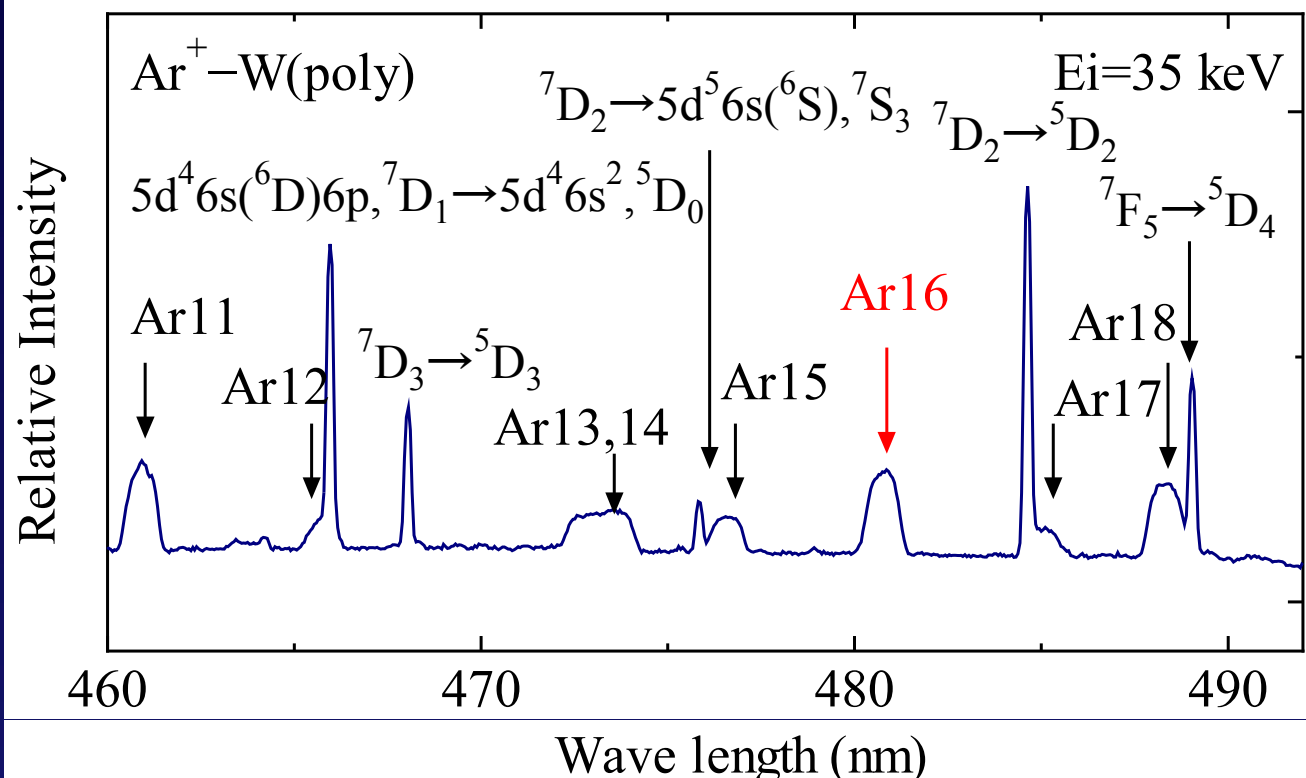
I_P : Ionization Energy

E_{ex} : Excitation Energy

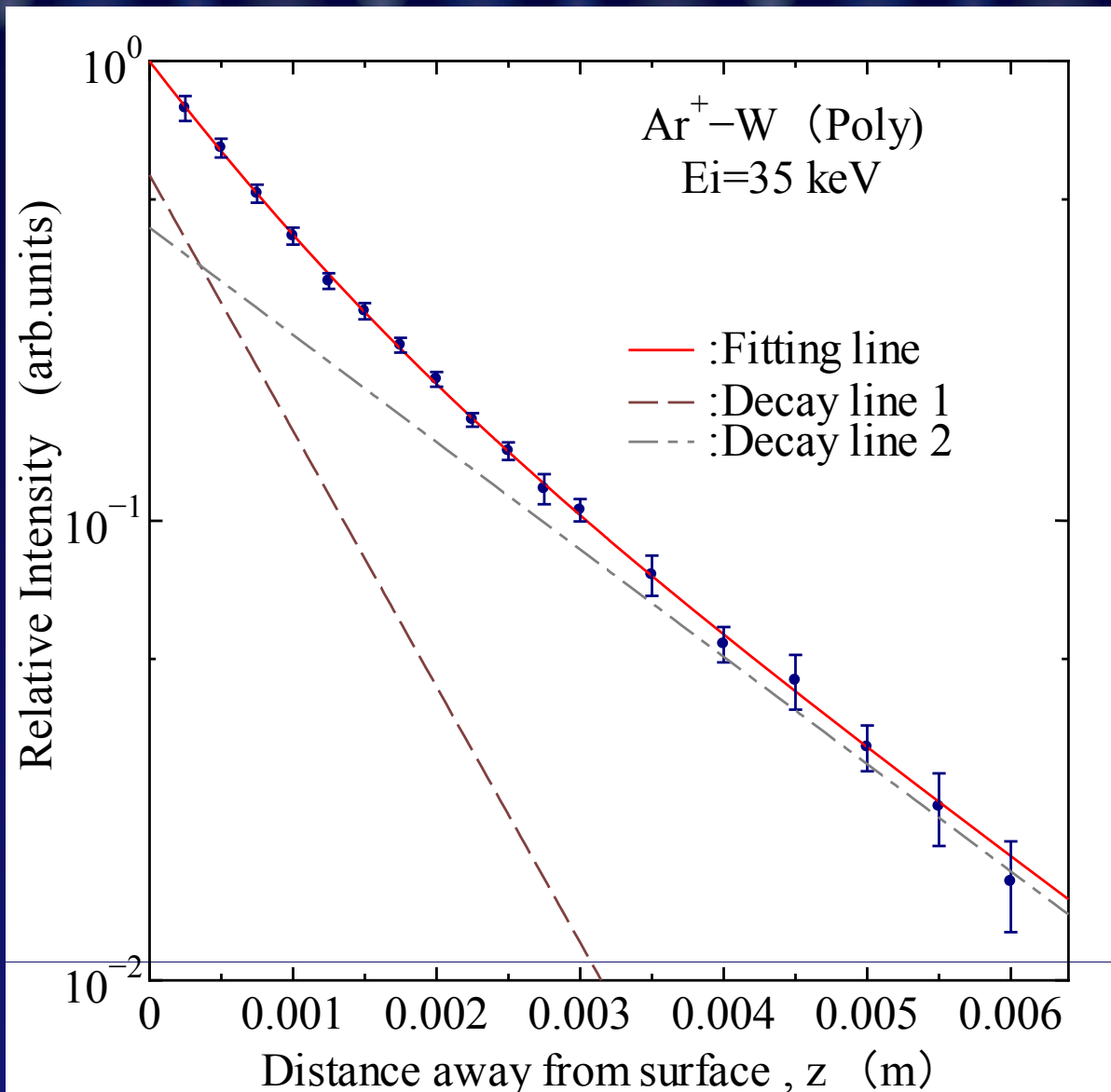


観測された発光は、非放射遷移を逃れた励起原子の発光と考えられるので、求められた平均速度は、比較的速く見積もられてしまうと考えられる。

4.4 Ar⁺ - W(poly) 反跳イオン (Ar⁺) の解析



%Label	遷移
Ar11	$3s^2 3p^4(^1D)4p, ^2F_{7/2} \rightarrow 3s^2 3p^4(^1D)4s, ^2D_{5/2}$
Ar12	$3s^2 3p^4(^3P)4p, ^2P_{1/2} \rightarrow 3s^2 3p^4(^3P)4s, ^2P_{3/2}$
Ar13	$3s^2 3p^4(^3P)4p, ^2D_{3/2} \rightarrow 3s^2 3p^4(^3P)4s, ^2P_{3/2}$
Ar14	$3s^2 3p^4(^3P)4p, ^4P_{3/2} \rightarrow 3s^2 3p^4(^3P)4s, ^4P_{5/2}$
Ar15	$3s^2 3p^4(^3P)4p, ^2P_{3/2} \rightarrow 3s^2 3p^4(^3P)4s, ^2P_{1/2}$
Ar16	$3s^2 3p^4(^3P)4p, ^4P_{5/2} \rightarrow 3s^2 3p^4(^3P)4s, ^4P_{5/2}$
Ar17	$3s^2 3p^4(^3P)4p, ^4P_{1/2} \rightarrow 3s^2 3p^4(^3P)4s, ^4P_{3/2}$
Ar18	$3s^2 3p^4(^3P)4p, ^2D_{5/2} \rightarrow 3s^2 3p^4(^3P)4s, ^2P_{3/2}$



$$\langle \mathbf{v}_{\perp} \rangle = 133.7 \text{ km/s}$$

$$\langle \mathbf{E}_{\perp} \rangle = 3.7 \text{ keV}$$

5, まとめ

クリプトン及びアルゴンイオンビームを入射エネルギー35, 45, 55, 60 keVで多結晶タングステン表面上に照射し、スパッタリングされたタングステンの発光からスパッタリングされた励起原子の表面から垂直方向の平均速度を求めた。その結果以下の事が分かった。

- 1, 求められた平均速度は励起準位によって異なり、 $\langle v_{\perp} \rangle = 1.1 \sim 5.2$ km/s程度と見積もられた。
- 2, 求められた平均速度、およびスペクトルは、入射イオン種に依存しない。
- 3, 求められた平均速度は、この入射エネルギーの範囲では入射エネルギーにほとんど依存しないという結果が得られた。

さらに、反跳したアルゴンイオンのピーク解析によりタングステン表面から垂直方向の平均速度を求めた。(133.7km/s、3.7keV程度)

今後の予定

- 1, 軽イオン(H⁺)照射実験(実施済み)の解析を行い、核融合炉内を模した状況における基礎データの取得を目指す。
- 2, 反跳イオンあるいは反跳原子(電荷移行後)についてドップラー効果を利用した解析を行い、表面に平行方向の平均速度を求める。

謝辞

以下の支援を受けました。感謝いたします。

NIFS Collaboration Research program

(NIFS09KBAF002 & NIFS12KBAF008)

The Grant-in-aid for Scientific Research (A) (23246165)

共同研究者 (敬称略)

核融合研



加藤太治 坂上裕之

同志社大学



剣持貴弘

東邦大学



野上慶祐 (Students)

九州大学



古屋謙治

東洋大学



本橋健次