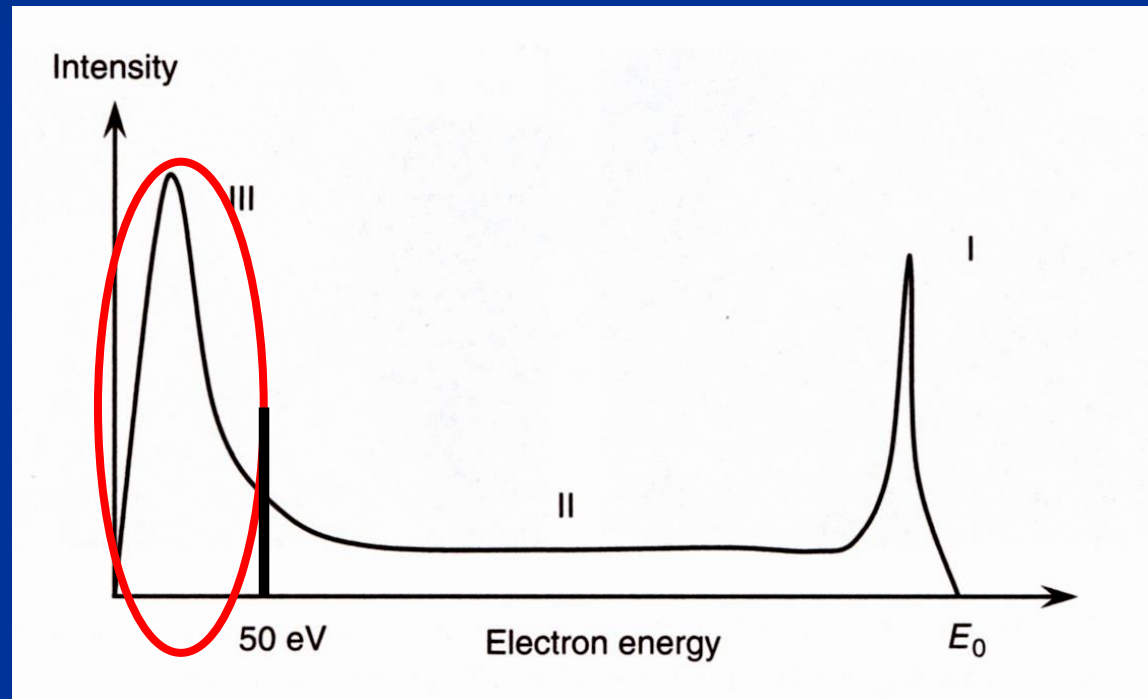


# Rozpraszanie niesprężyste

Przekazywanie energii elektronów wiązki prowadzi do emisji szeregu sygnałów wykorzystywanych w mikroskopii elektronowej i mikroanalizie rentgenowskiej:

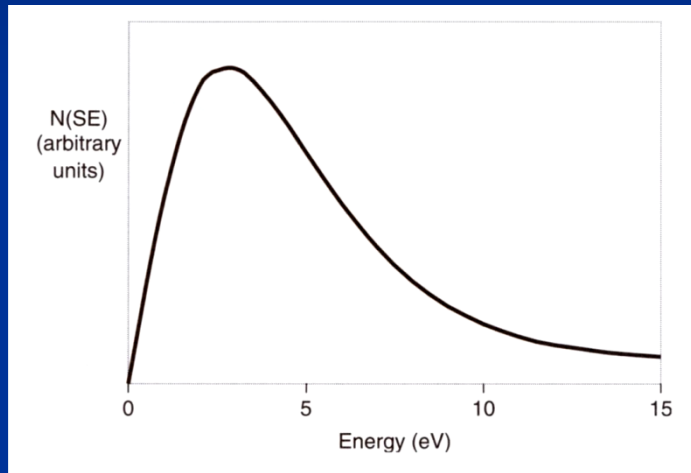
1. Niskoenergetyczne elektrony wtórne SE  
(podstawowy sygnał w SEM)
2. Charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie  
(mikroanaliza w SEM i TEM)
3. Ciągłe promieniowanie rentgenowskie (*Bremsstrahlung*) – granica Duane-Hunta
4. Katodoluminescencja – emisja promieniowania elektromagnetycznego w zakresie:
  - podczerwieni,
  - światła widzialnego,
  - ultrafioletu.

# Niskoenergetyczne elektrony wtórne SE



# Elektrony wtórne SE (*Secondary Electrons*)

Elektrony pasma walencyjnego i pasma przewodnictwa *atomów próbki*.  
Umownie są to elektrony o energiach od 0 do 50 eV (max. 2-3 eV)



$$\delta = \frac{n_{SE}}{n_B} = \frac{i_{SE}}{i_B}$$

$\delta$  - współczynnik emisji SE

$n_{SE}$  - liczba elektronów SE

$i_{SE}$  - prąd elektronów SE

$n_B$  - liczba elektronów wiązki

$i_B$  - prąd elektronów wiązki

Współczynnik  $\delta$  maleje, gdy energia wiązki rośnie

	5 keV	20 keV	50 keV
Al	0.4	0.1	0.05
Au	0.7	0.2	0.10

$$i_{\text{Beam}} = i_{\text{BSE}} + i_{\text{SE}} + i_{\text{B}} + i_{\text{abs}}$$

gdzie:

$i_{\text{Beam}}$  – natężenie prądu wiązki

$i_{\text{BSE}}$  – natężenie prądu elektronów wstecznie rozproszonych (I)

$i_{\text{SE}}$  – natężenie prądu elektronów wtórnych (III)

$i_{\text{B}}$  – natężenie prądu tła (II)

$i_{\text{abs}}$  – natężenie prądu elektronów zaabsorbowanych

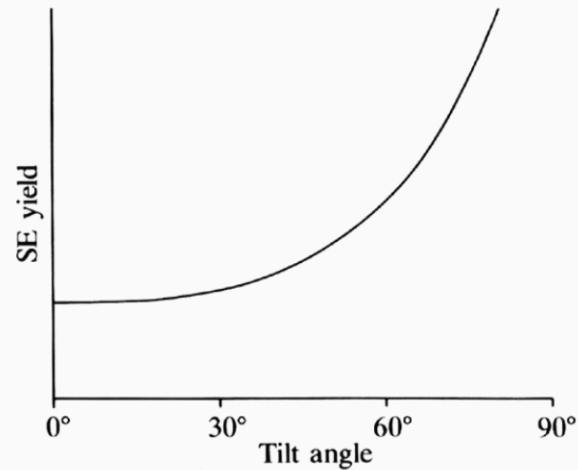
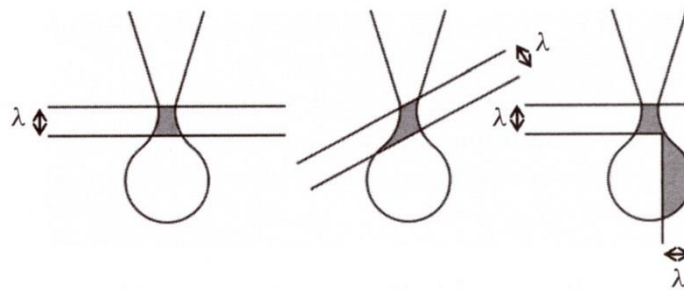


Fig. 5.1. Variation in secondary electron yield angle of tilt of specimen surface relative to horizontal.



**Figure 2.24** Schematic illustration of the tilt angle dependence of secondary electron emission. Only those electrons created within a distance  $\lambda$  of the surface are able to escape (shaded area). As the surface is tilted, a greater proportion of the interaction volume is exposed. Emission at edges is particularly high. (For backscattered electrons, the situation is very similar, although the escape depth region is much greater since backscattered electrons have higher energies)

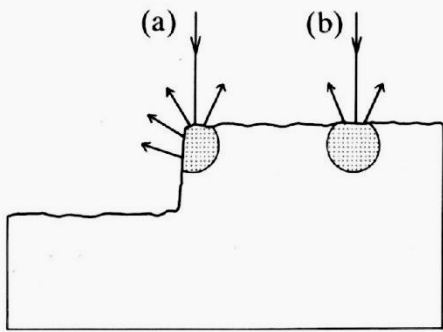
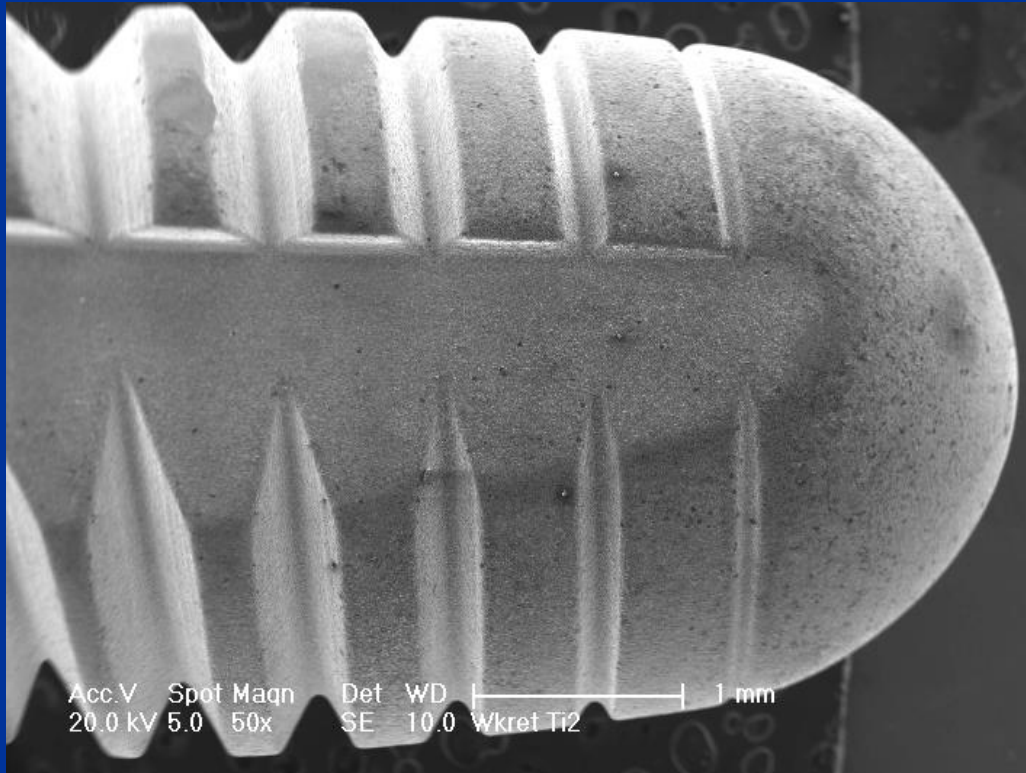
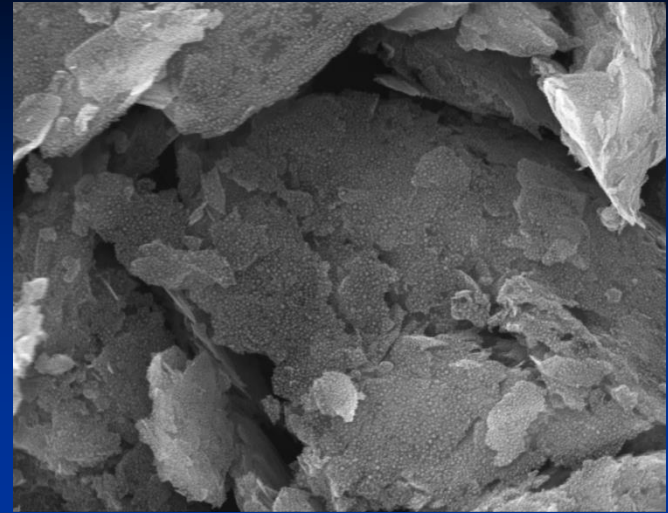
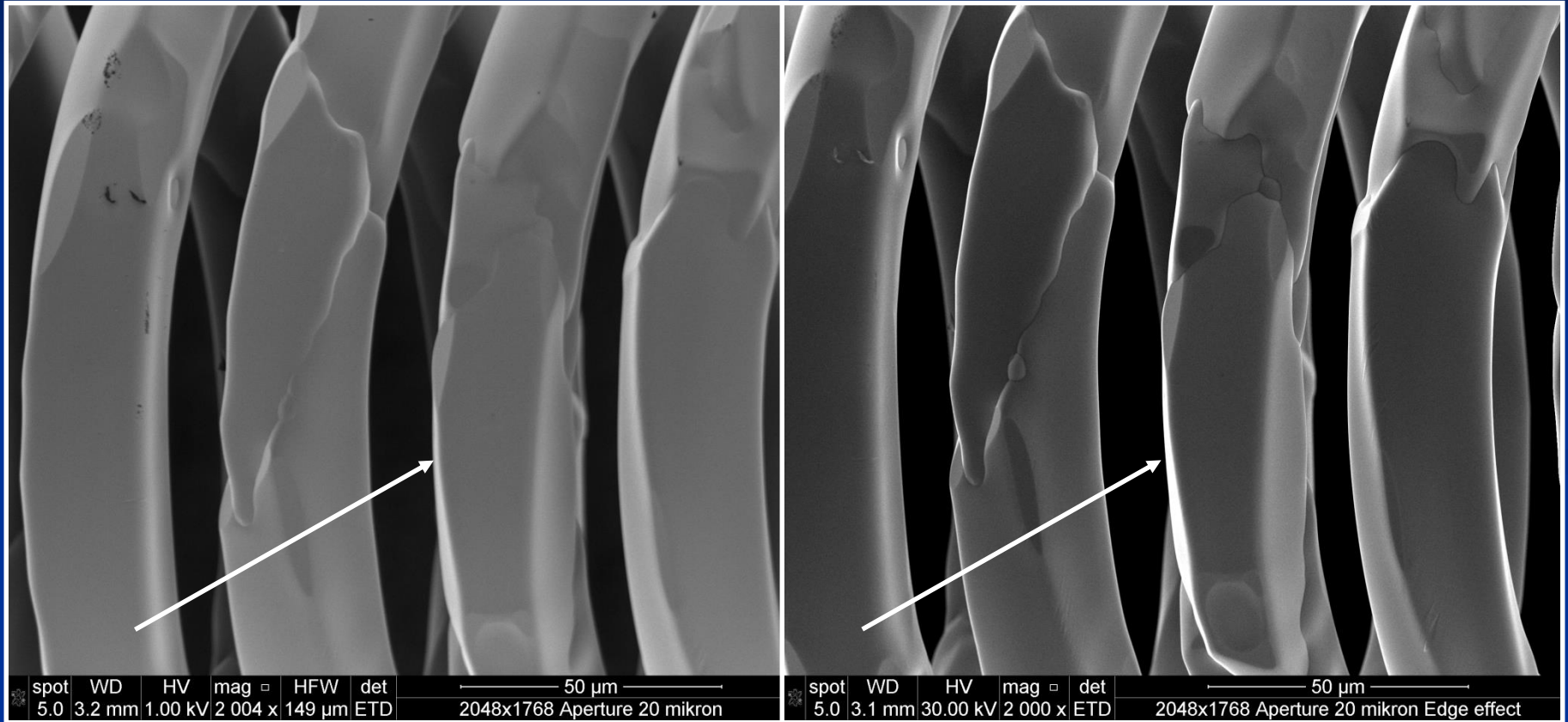


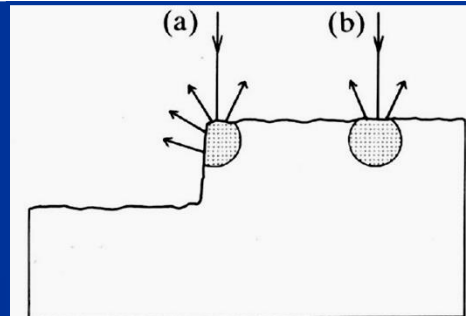
Fig. 5.3. Edge effect in secondary electron image: signal enhanced when beam is (a) close to edge, compared to (b) away from edge.



# Wpływ topografii



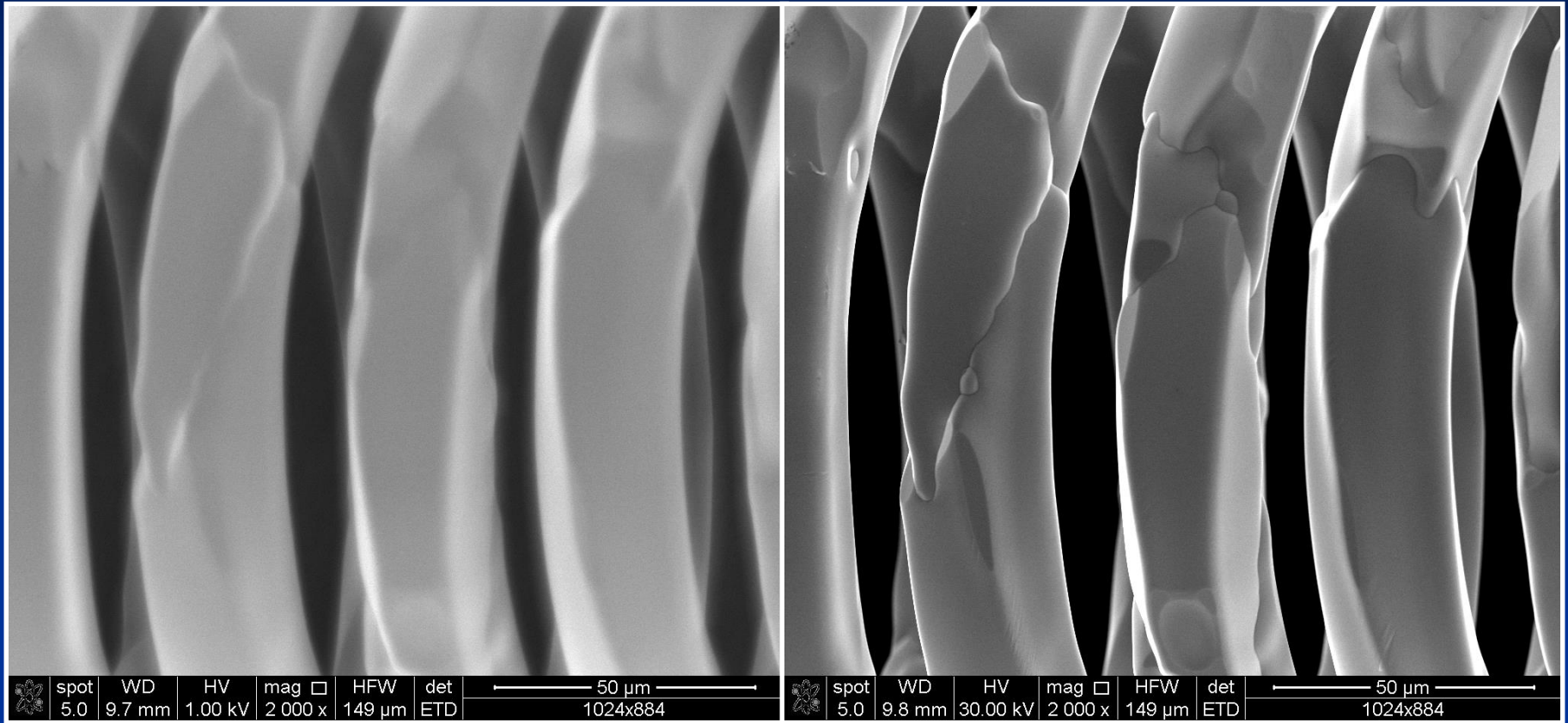
Working distance WD 3.2 mm  
HV = 1 kV



Working distance WD 3.2 mm  
HV = 30 kV



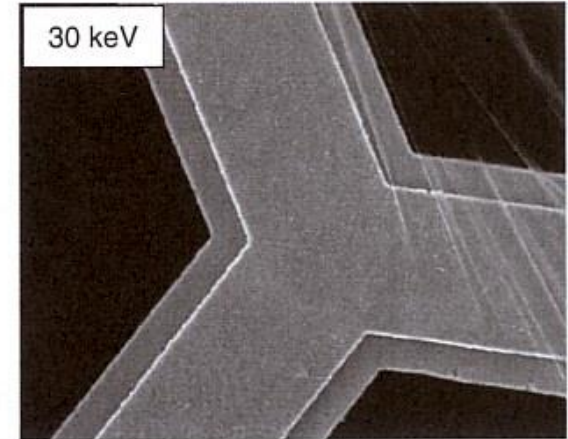
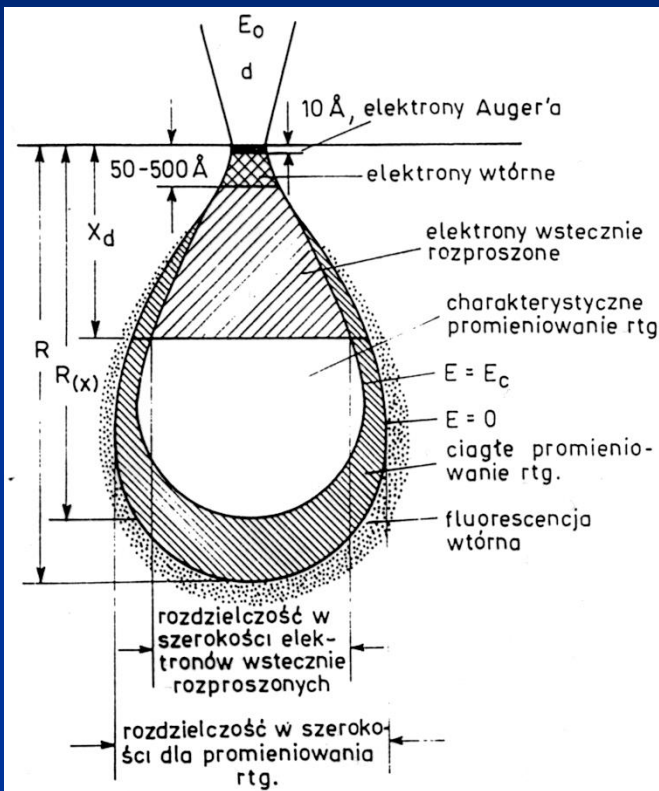
# Wpływ energii elektronów wiązki



Working distance WD 9.7 mm  
HV 1 kV

Working distance WD 9.7 mm  
HV 30 kV

# Dobór napięcia przyspieszającego

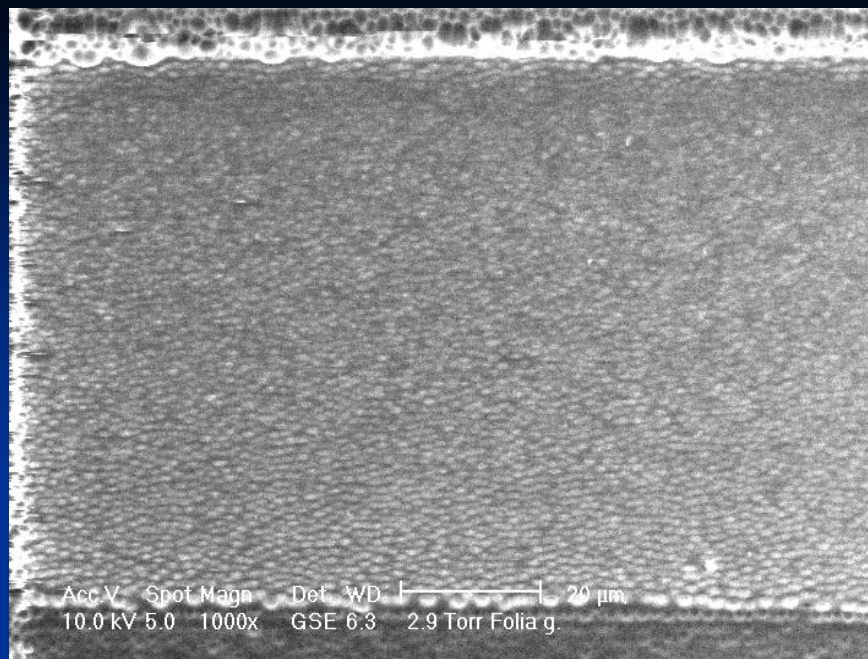


Polimer na siatce Cu

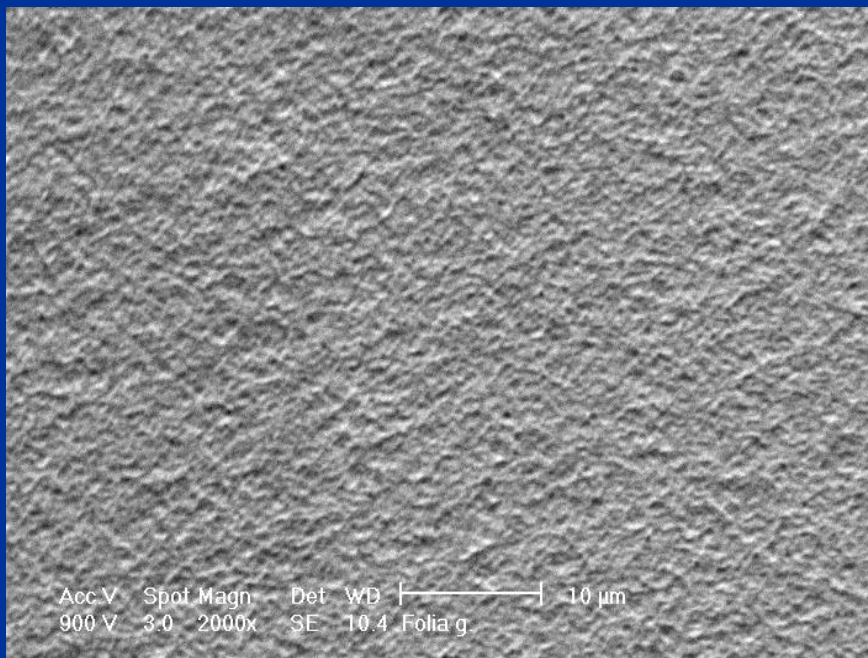
Zakres detekcji SE od 5 do 50 nm!

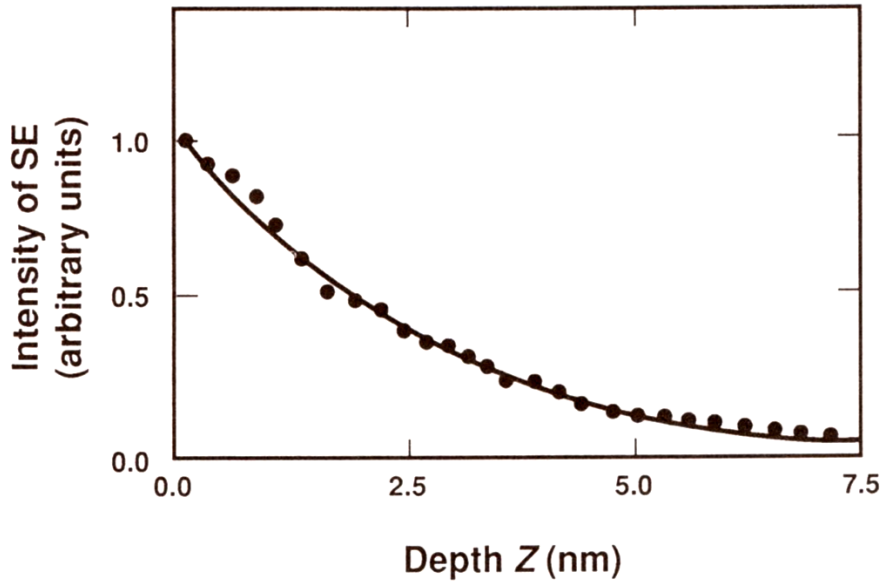
**10 keV**

**Efekt degradacji  
polimeru  
Zmiana struktury  
powierzchni przez  
zbyt wysoką  
energię  
elektronów**



**900 eV**





Maksymalna głębokość, z której rejestrowane są SE to  $5\lambda$

$\lambda$  – MFP ca 1 nm dla metali

$\lambda$  – MFP ca 10 nm dla izolatorów

$$5 \text{ nm} < \lambda < 50 \text{ nm}$$

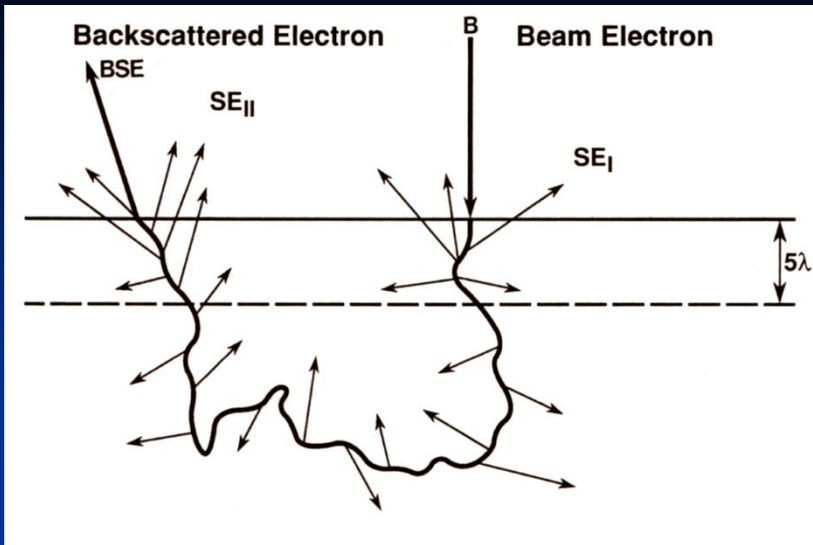
$$50 \text{ \AA} < \lambda < 500 \text{ \AA}$$

$$p \approx \exp\left(-\frac{Z}{\lambda}\right)$$

$p$  – prawdopodobieństwo ucieczki elektronów wtórnych z próbki

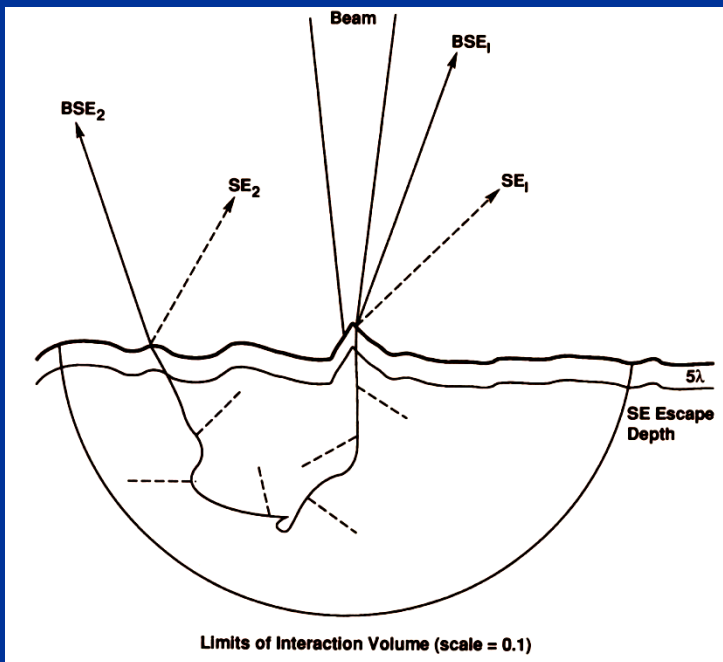
$Z$  – głębokość, z której generowane są elektrony wtórne (SE)

$\lambda$  – MFP dla SE



20 keV	$\delta_{\text{Total}}$	$\eta$	$\text{SE}_2/\text{SE}_1$
C	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.18</b>
Al	<b>0.1</b>	<b>0.16</b>	<b>0.48</b>
Cu	<b>0.1</b>	<b>0.30</b>	<b>0.9</b>
Au	<b>0.2</b>	<b>0.50</b>	<b>1.5</b>

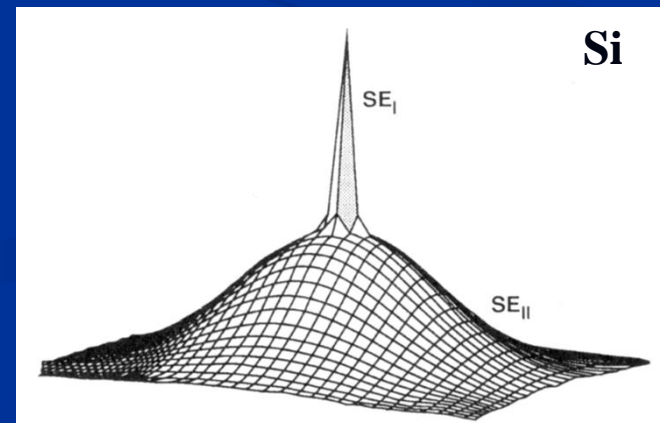
$$\delta_{\text{Total}} = \delta_1 + \delta_2 \eta$$

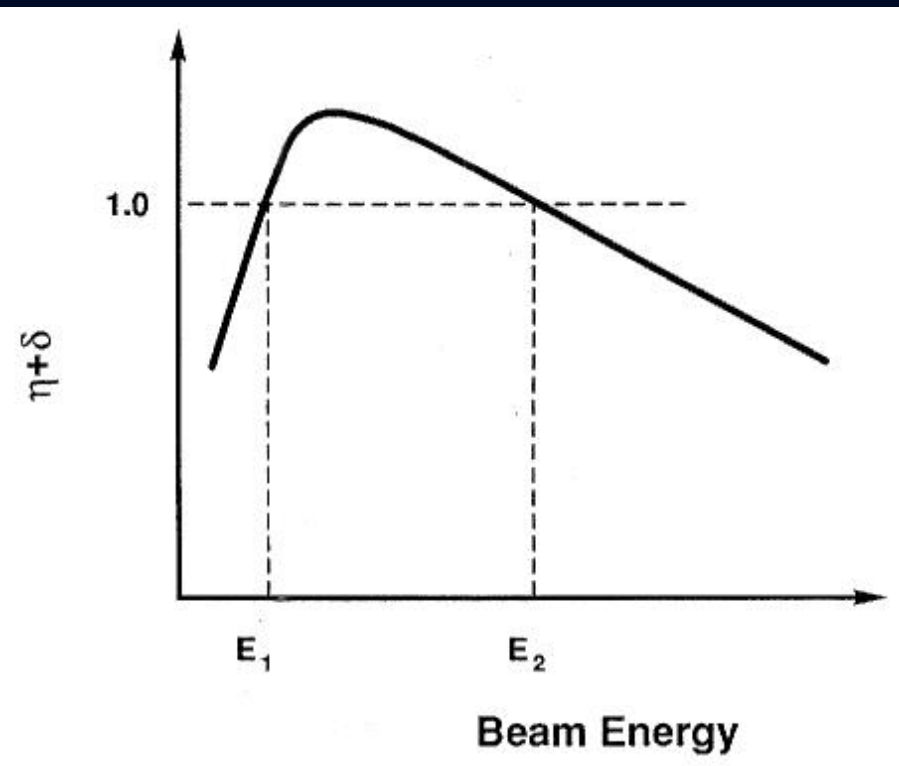


$\text{SE}_1$  przeważa dla C i Al (dla tych pierwiastków rozpraszanie wsteczne jest małe)

Dla materiałów o średniej Z (np. Cu):  $\text{SE}_1 = \text{SE}_2$   
 $\text{SE}_2$  przeważa dla pierwiastków ciężkich (rozpraszanie wsteczne jest duże)

Zmienia się zdolność rozdzielcza sygnału wraz ze wzrostem liczby atomowej !





**Table 3.6.** Upper Crossover Energy for Various Materials (Normal Beam Incidence)

Material	$E_2$ (keV)	Reference
Kapton	0.4	Joy (unpublished)
Electron resist	0.55–0.70	Joy(1987)
Nylon	1.18	Joy (unpublished)
5% PB7/nylon	1.40	Krause <i>et al.</i> (1987)
Acetal	1.65	Vaz (1986)
Polyvinyl chloride	1.65	Vaz (1986)
Teflon	1.82	Vaz and Krause (1986)
Glass passivation	2.0	Joy (1987)
GaAs	2.6	Joy (1987)
Quartz	3.0	Joy (1987)
Alumina	4.2	Joy (unpublished)

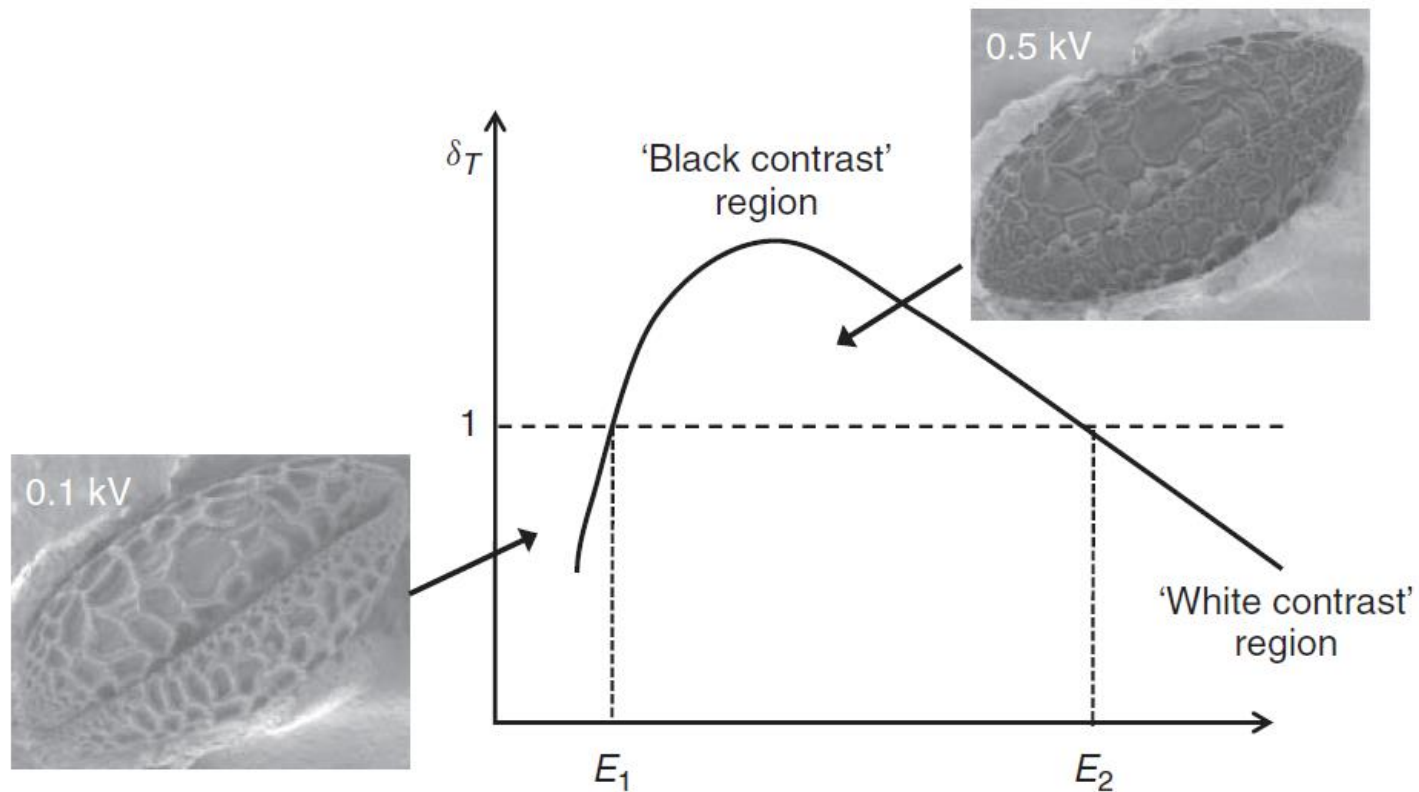
**Możemy obserwować materiały  
nieprzewodzące przy niskich energiach  
wiązki elektronowej !!!**

**ponieważ sumaryczna liczba elektronów  
opuszczających próbkę > od liczby elektronów wiązki  
padających na próbkę**

Podstawowy warunek prowadzenia eksperymentu w SEM (C-SEM – Conventional Scanning Electron Microscopy):

**Próbka musi przewodzić prąd elektryczny!!!**

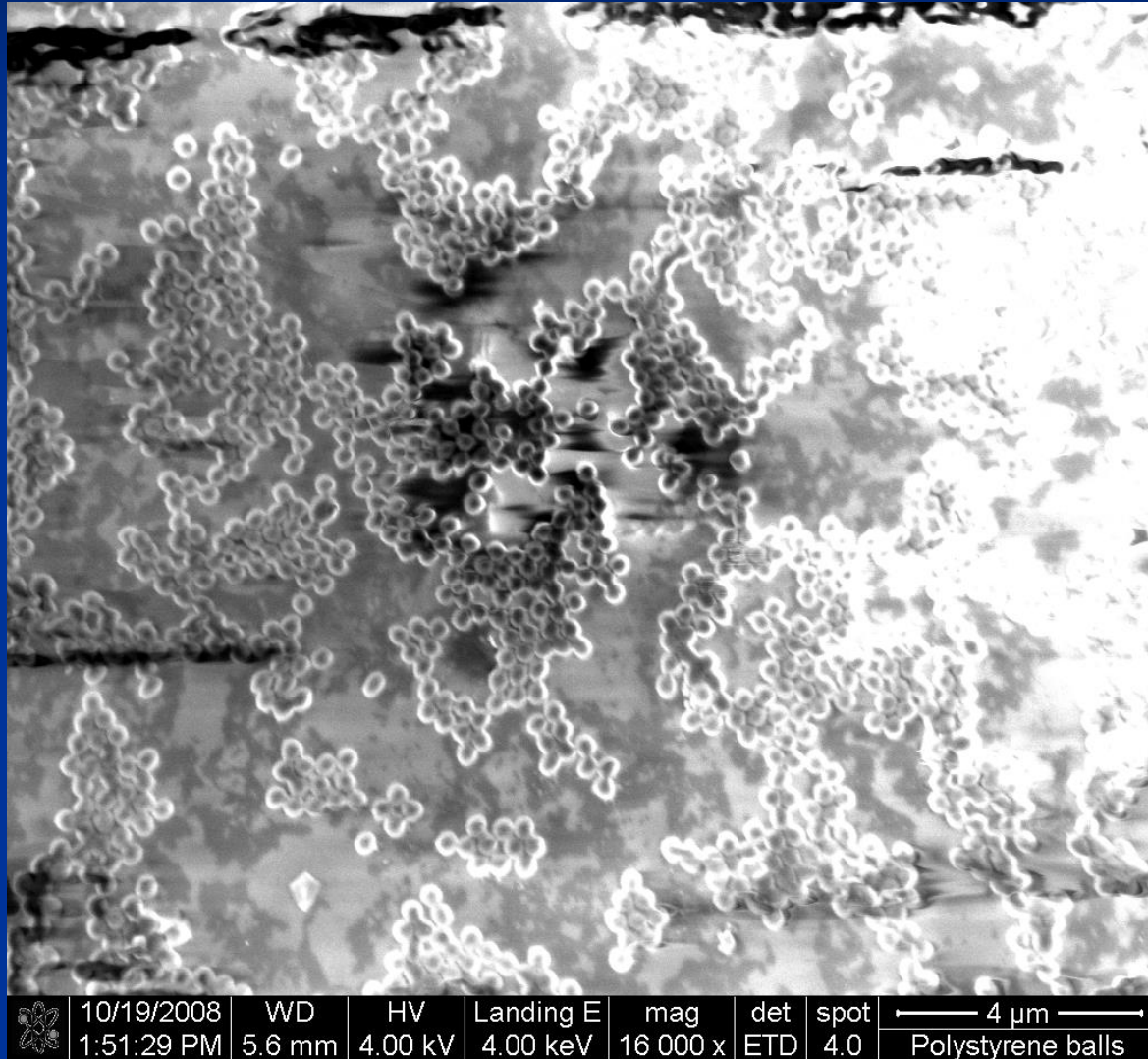
jeżeli nie cała próbka, to przynajmniej warstwa powierzchniowa musi być przewodząca (chyba że znajdziemy się w zakresie  $E_1 - E_2$  !)



**Figure 1.17** Total electron yield as a function of energy, showing with regions of possible contrast reversal. Images of pollen grain at various corresponding voltages shown as insets.

# Polystyrene balls

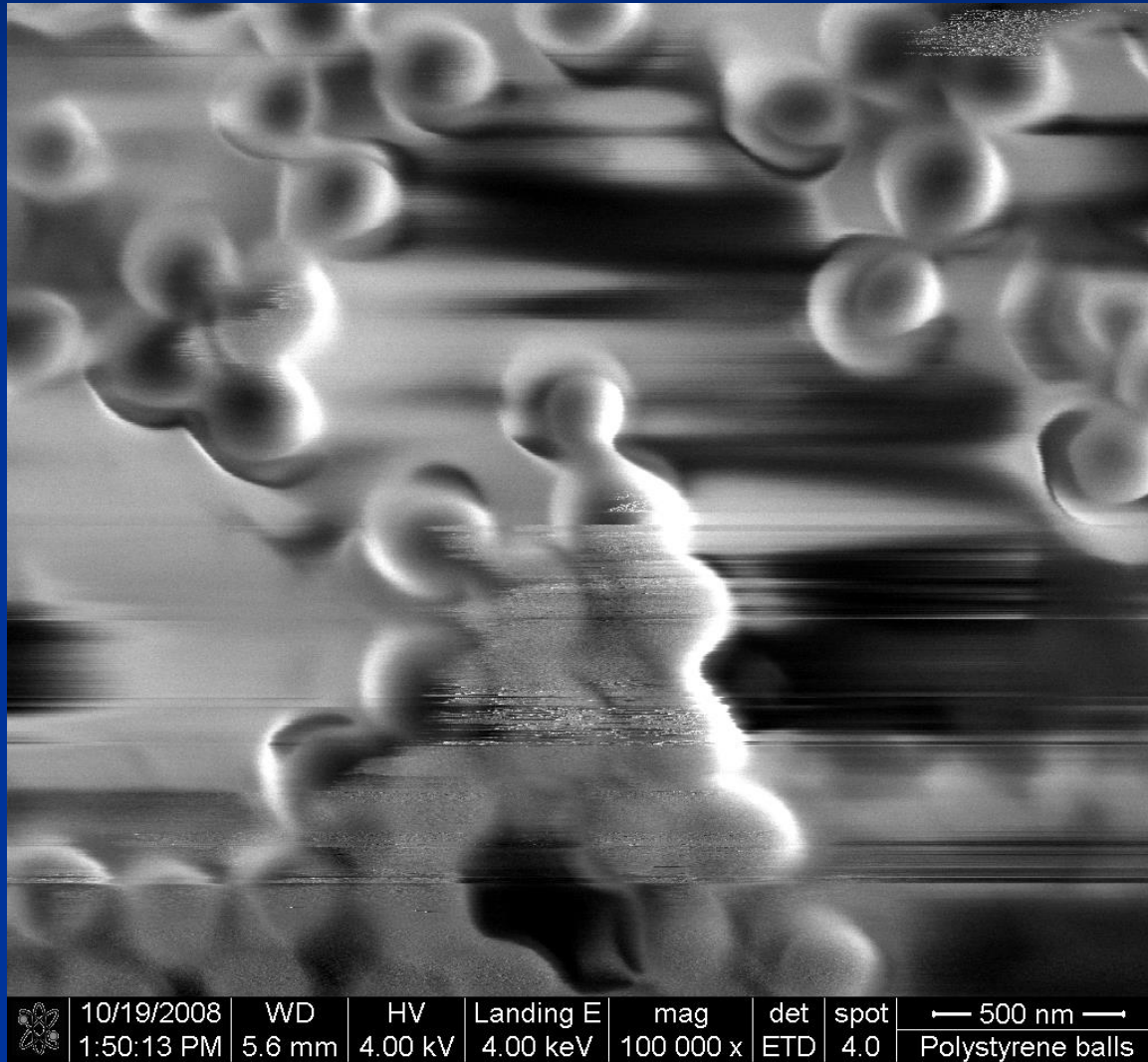
## High vacuum, 16 kX





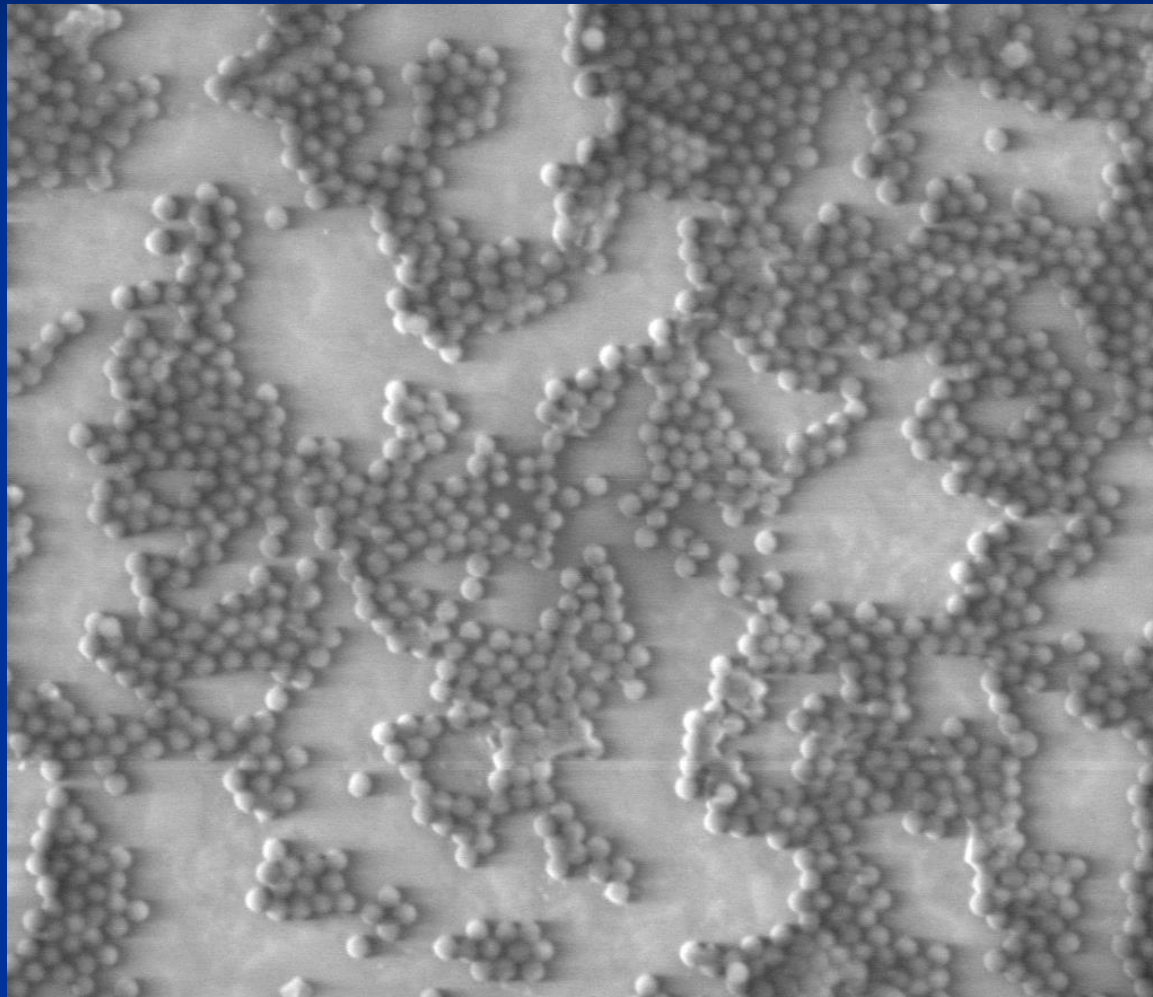
# Polystyrene balls

## High vacuum, 100 kX



# Polystyrene balls

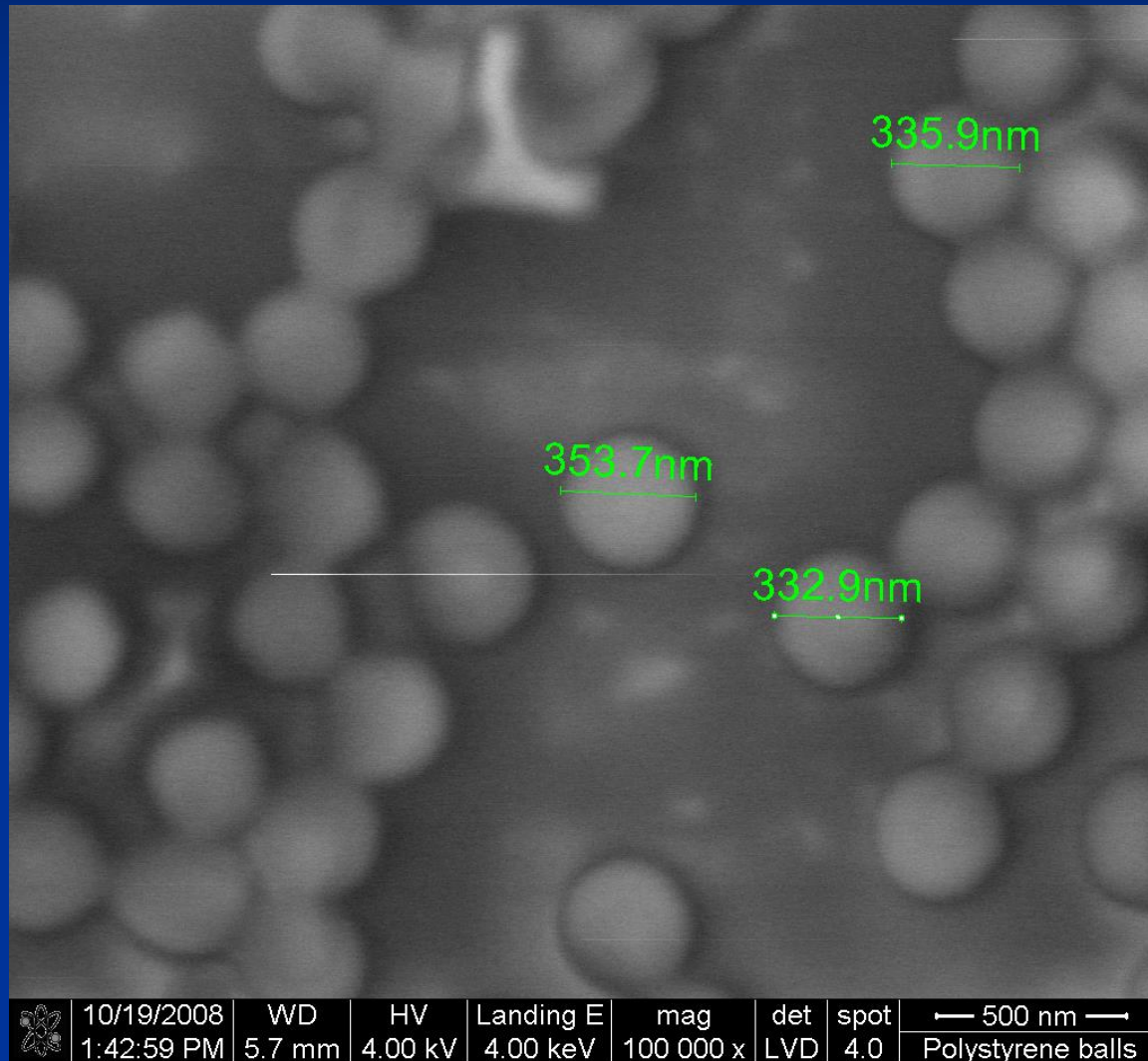
## Low vacuum, 16 kX



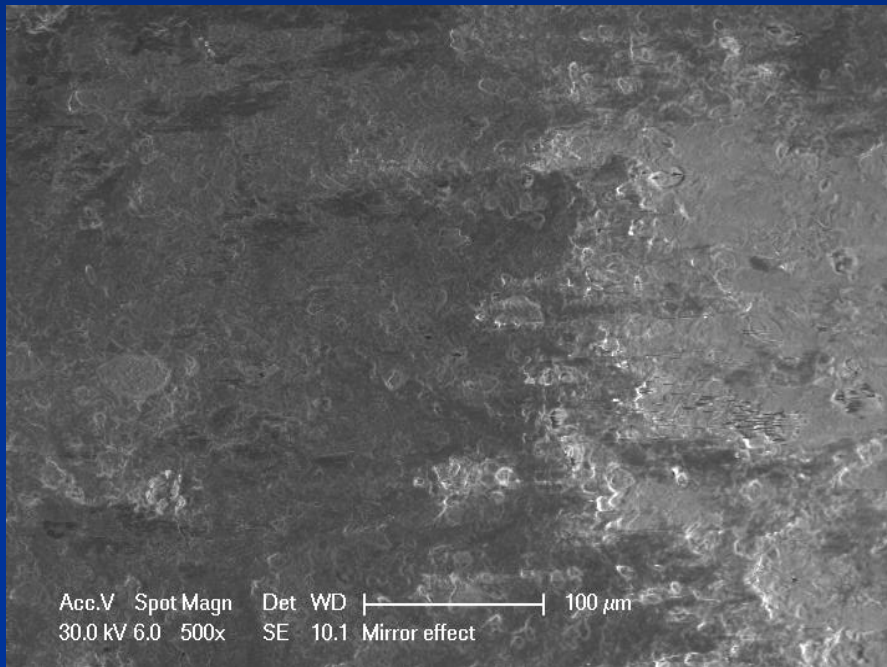
	10/19/2008 1:58:50 PM	WD 5.7 mm	HV 4.00 kV	Landing E 4.00 keV	mag 16 000 x	det LVD	spot 4.0	← 4 μm → Polystyrene balls
---	--------------------------	--------------	---------------	-----------------------	-----------------	------------	-------------	-------------------------------

# Polystyrene balls

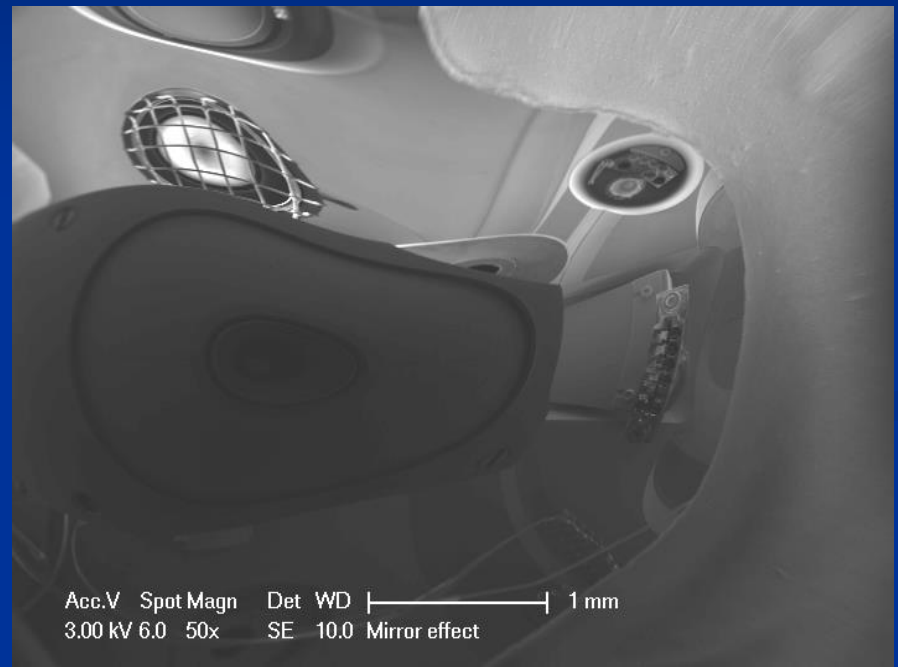
## Low vacuum, 100 kX



# „Mirror effect”



**30 keV**



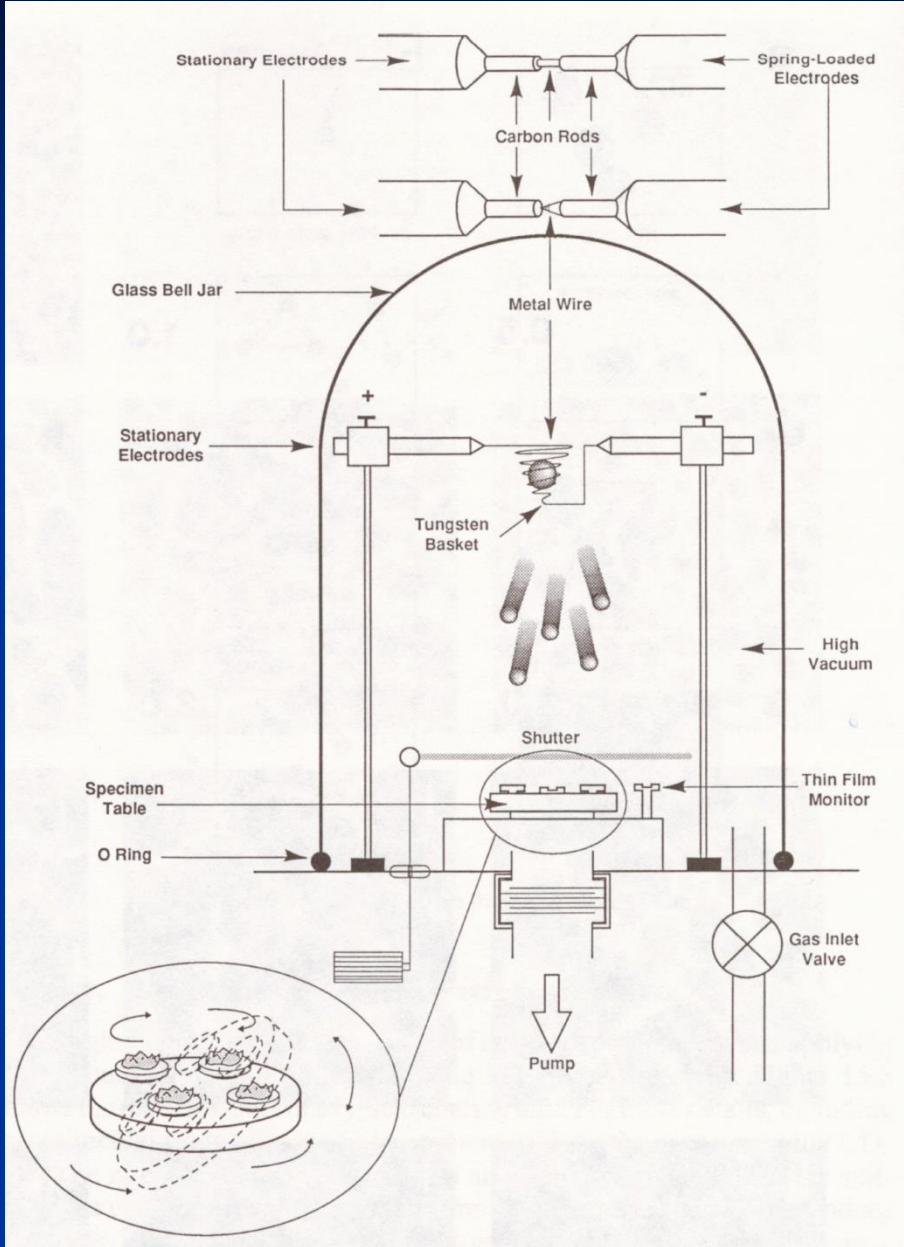
**3 keV**

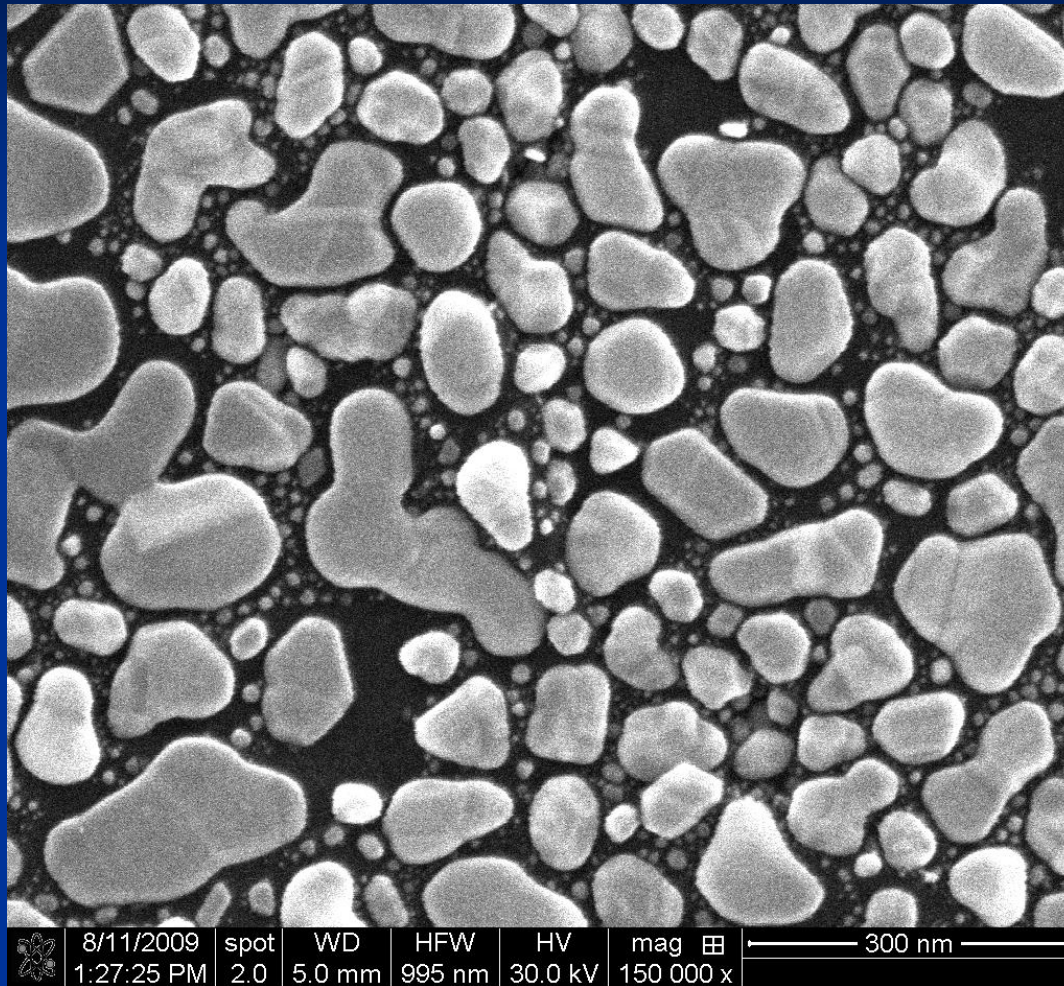
Dla wyższych energii wiązki elektronów (np. 20 keV) stosujemy pokrywanie izolatora w napyłarce próżniowej cienką warstwą:  
**C, Au (wyspy!), Pd, Pt, Ag**

a dla HR-SEM: **Ir, Ta, W, i Cr**

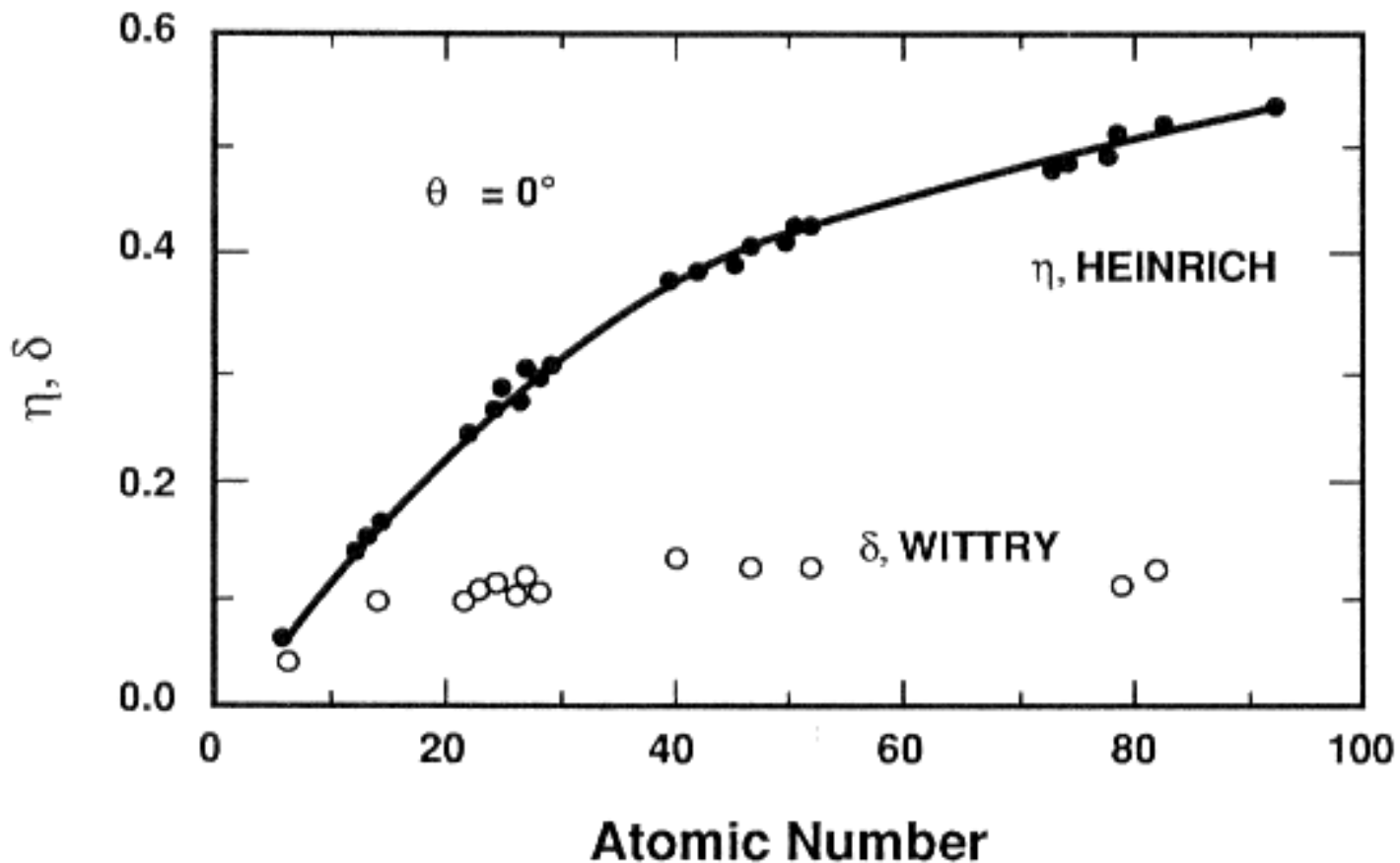
Alternatywa:

**Variable Pressure SEM (VP-SEM)**  
**Environmental SEM (E-SEM)**





**Artefakty przy napylaniu**



$\eta$  - rośnie silnie z liczbą atomową Z !!!

$\delta$  - zmiana niewielka!!!

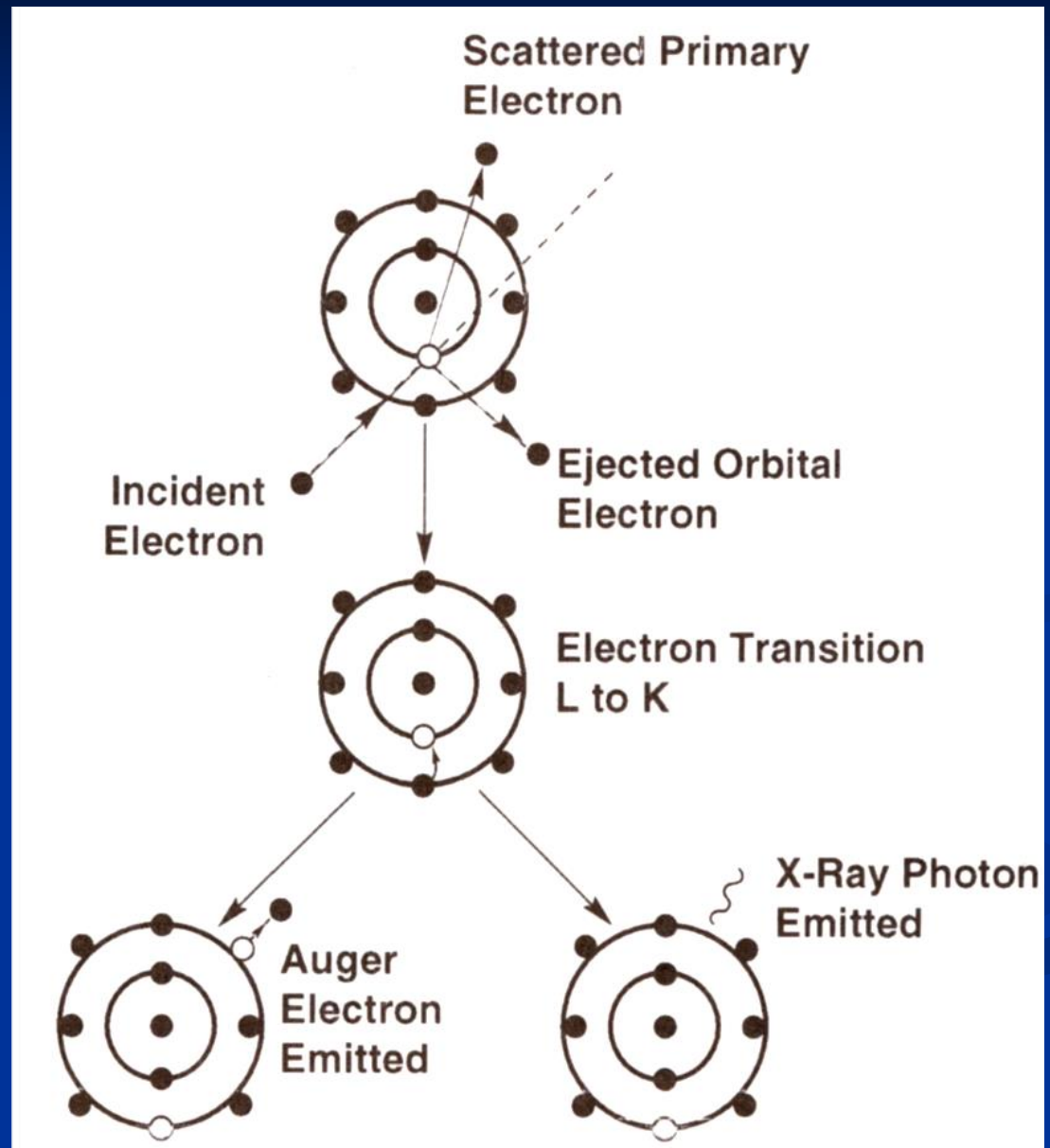
Średnia wartość  $\delta = 0.1$ ;

dla od C  $\delta = 0.05$  do Au  $\delta = 0.2$  (dla 20 keV)

## Pierre Auger i Niels Bohr

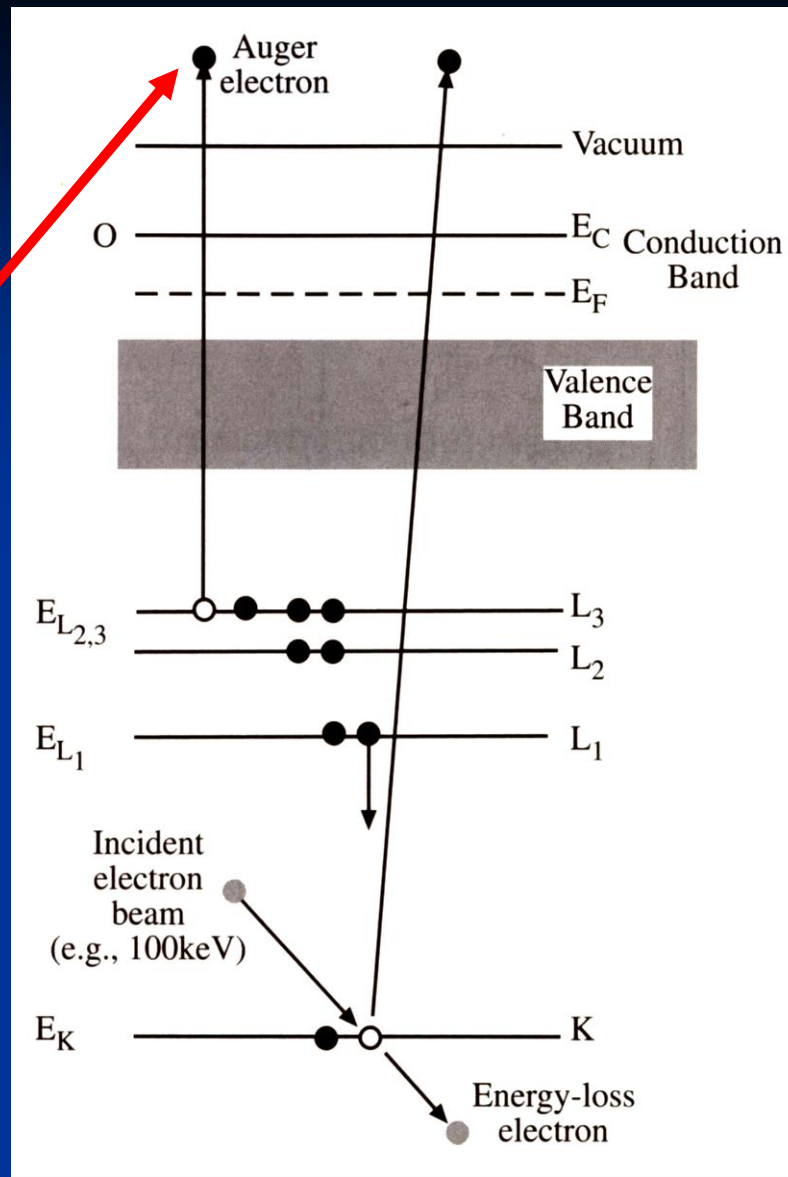


Scanned at the American  
Institute of Physics





Elektron  $KL_1L_{23}$

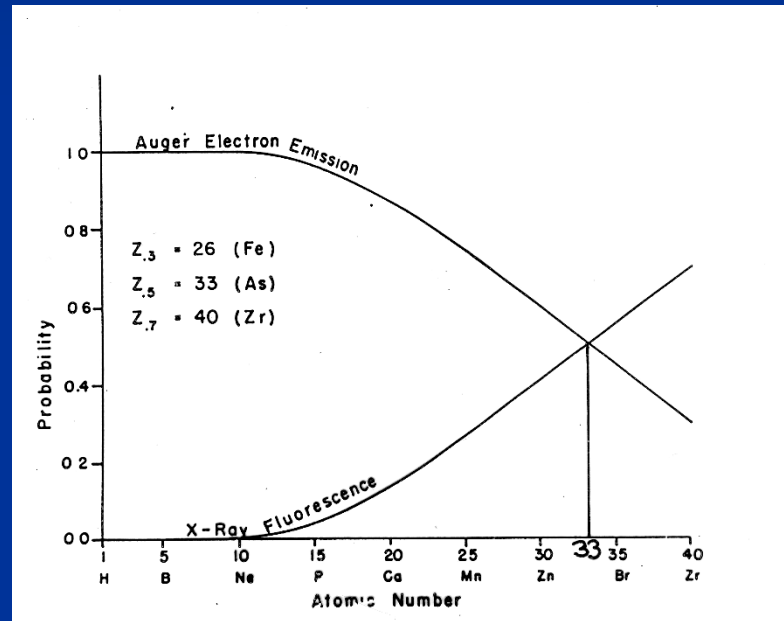


$$E_{KL_1L_{23}} = E_K - E_{L_1} - E_{L_{23}}^*$$

$E_{L_{23}}^*$  energia wiązania w obecności dziury elektronowej na powłoce  $L_1$  różna od  $E_{L_{23}}$

# Wydajność fluorescencji

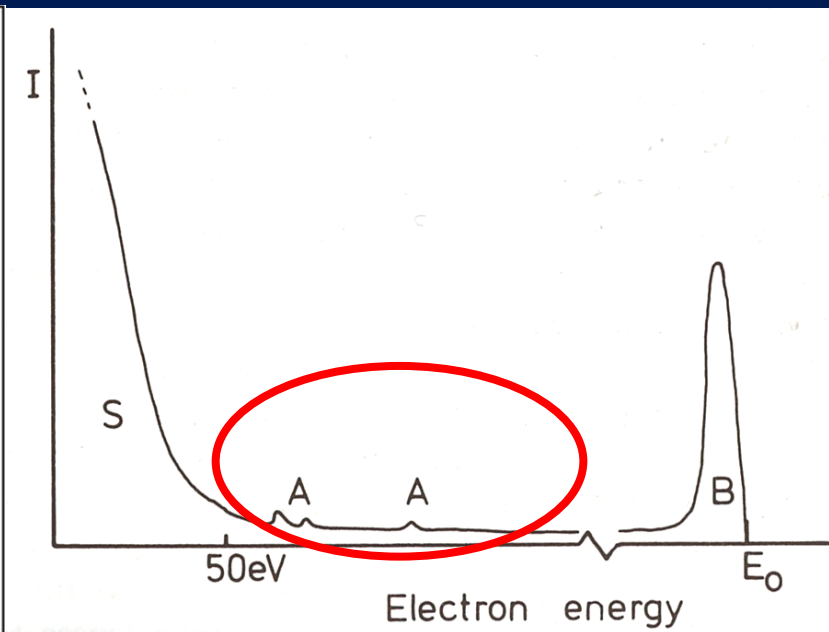
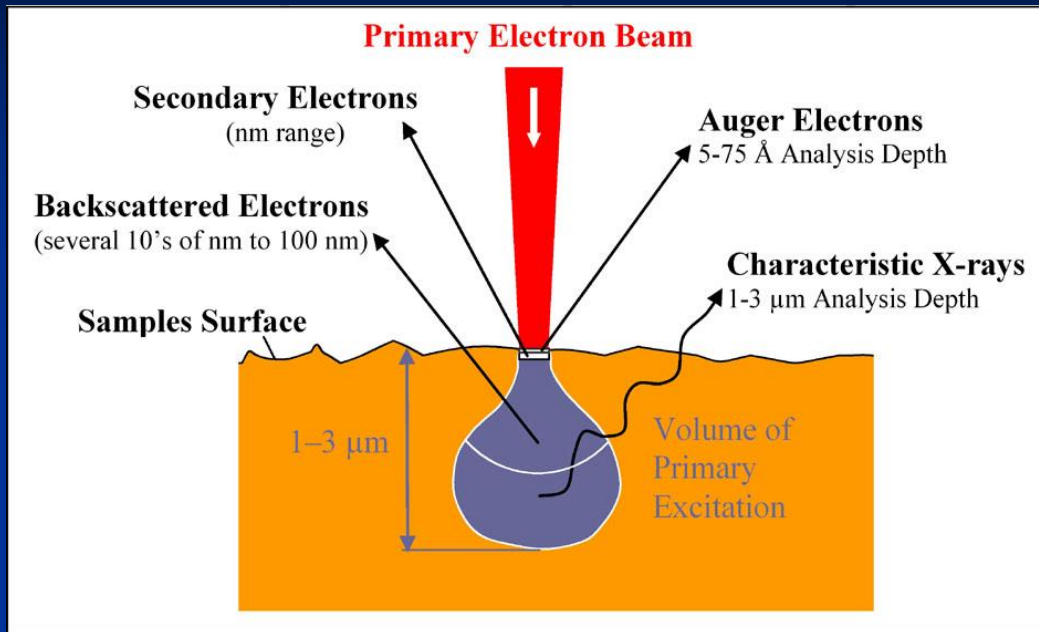
$$\omega_K = \frac{\text{produkcja fotonów K}}{\text{jonizacja powłoki K}}$$



dla C  $\omega_K \sim 0.005$

dla Ge  $\omega_K \sim 0.5$

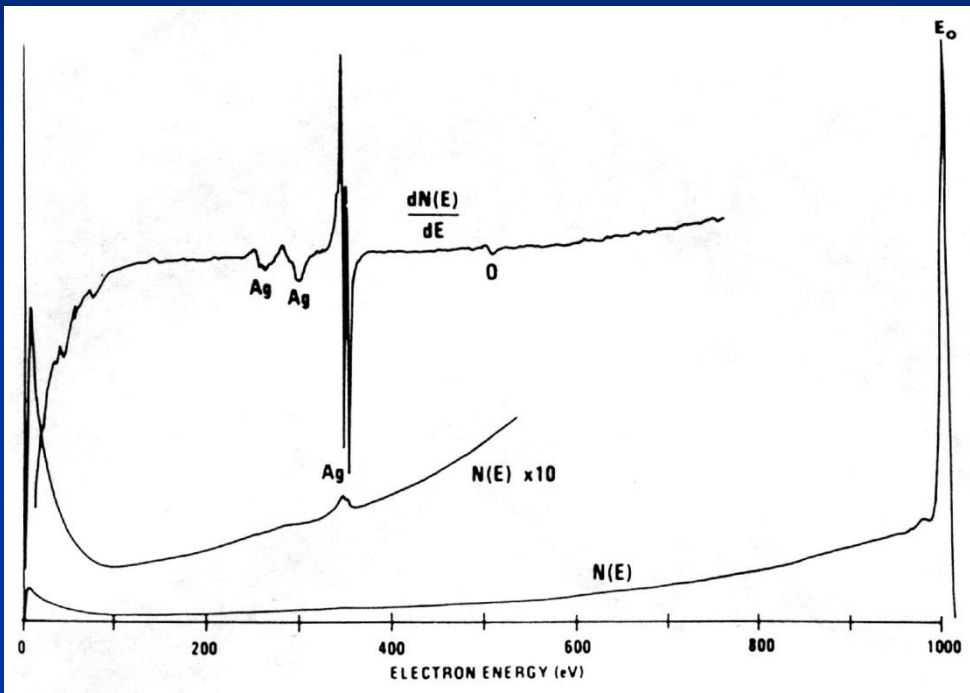
Emisja elektronów Augera przeważa dla niskich Z (niska energia wiązania)



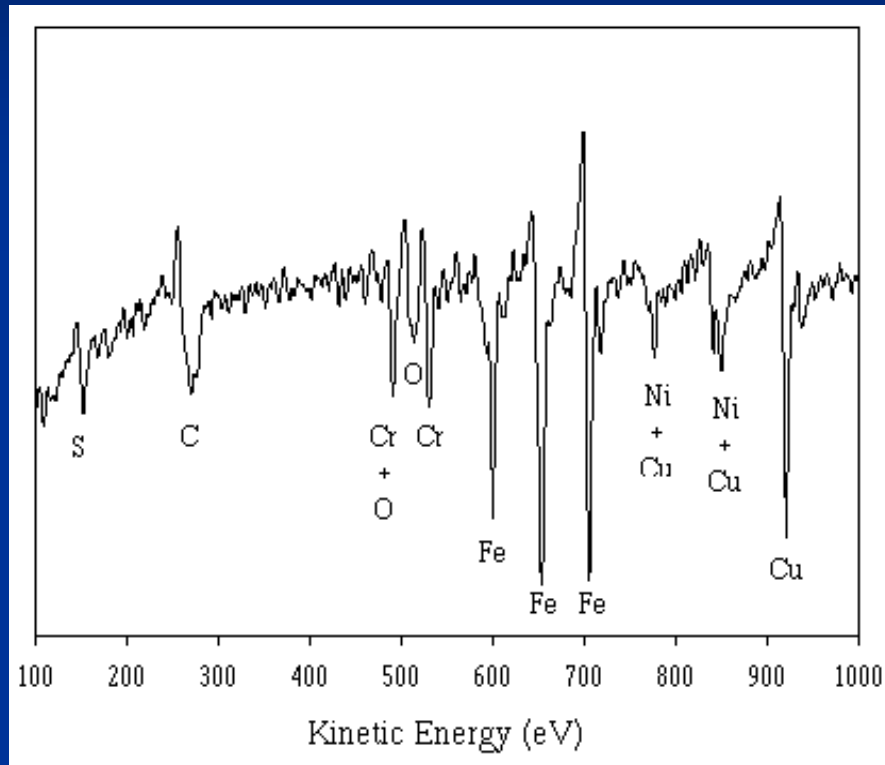
Zakres energii elektronów Augera od kilkuset eV do kilku keV

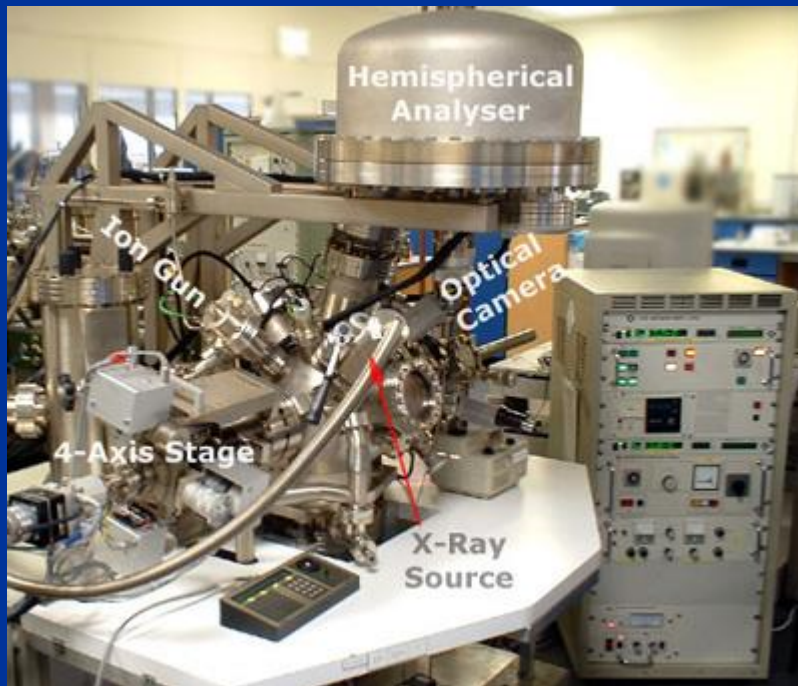
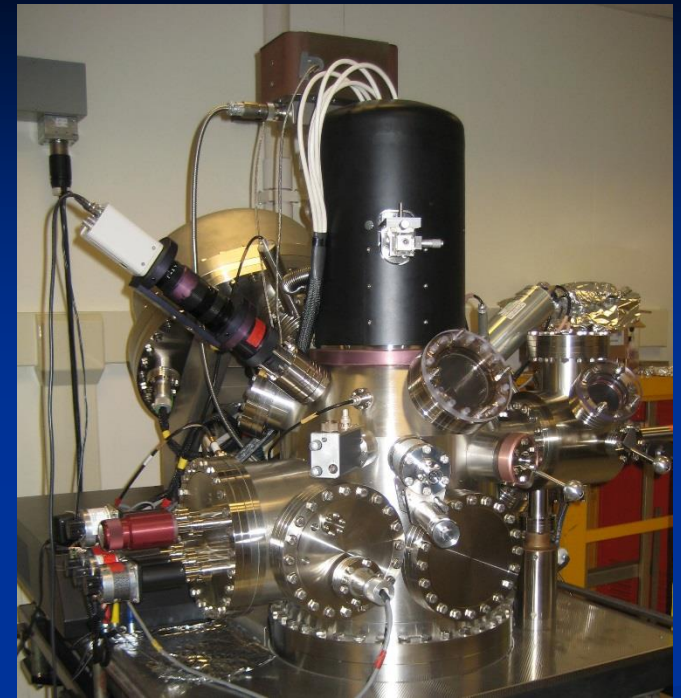
Emisja z kilku monowarstw atomowych – idealna technika do analizy powierzchni:

**SAM – Scanning Auger Microscopy**



**Figure 3.50.** Auger electron spectra of silver with an incident beam energy of 1 keV. Derivative and integral spectra are compared (courtesy N. C. MacDonald).





# Promieniowanie rentgenowskie

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{keV}$$

$$\lambda = \frac{1.2398}{E} \quad \text{nm}$$

gdzie:

$h$  – stała Plancka

$\nu$  – częstotliwość

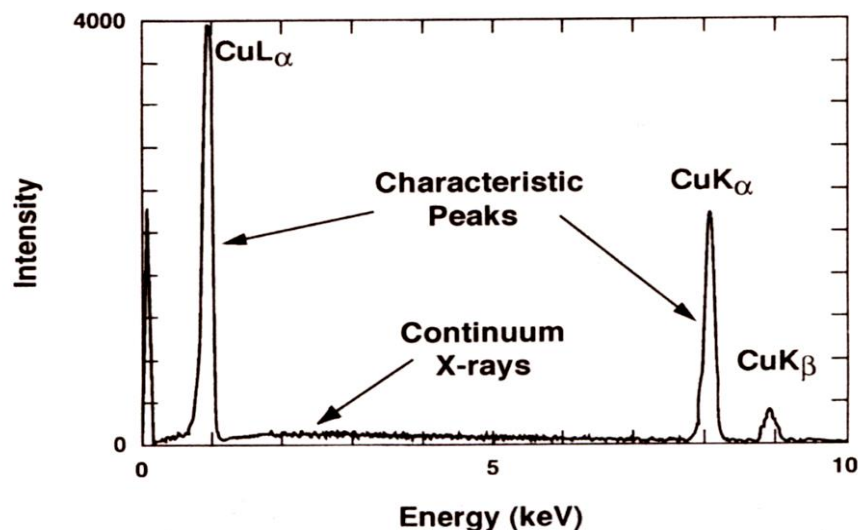
$c$  – prędkość światła

$\lambda$  – długość fali promieniowania rentgenowskiego (nm)

$E$  – energia fotonu (keV)

W zależności od tego co analizujemy:  $E$  czy  $\lambda$  stosujemy odpowiednie techniki badawcze:

**EDS albo WDS**



Widmo energetyczne dla czystej miedzi zarejestrowane spektrometrem EDS

Promieniowanie ciągłe (*Bremsstrahlung*)  
Promieniowanie charakterystyczne

# Promieniowanie ciągłe (*Bremsstrahlung*)

Elektrony wiązki tracą energię poprzez straty prędkości – „hamowanie” (nazwa: *Bremsstrahlung* – *Bremse* – niem.: hamulec) w polu elektrycznym jąder atomowych (oddziaływanie coulombowskie).

Wynikająca z tego procesu strata energii  $\Delta E$  wyemitowana jest w postaci fotonu o energii  $h\nu$ .

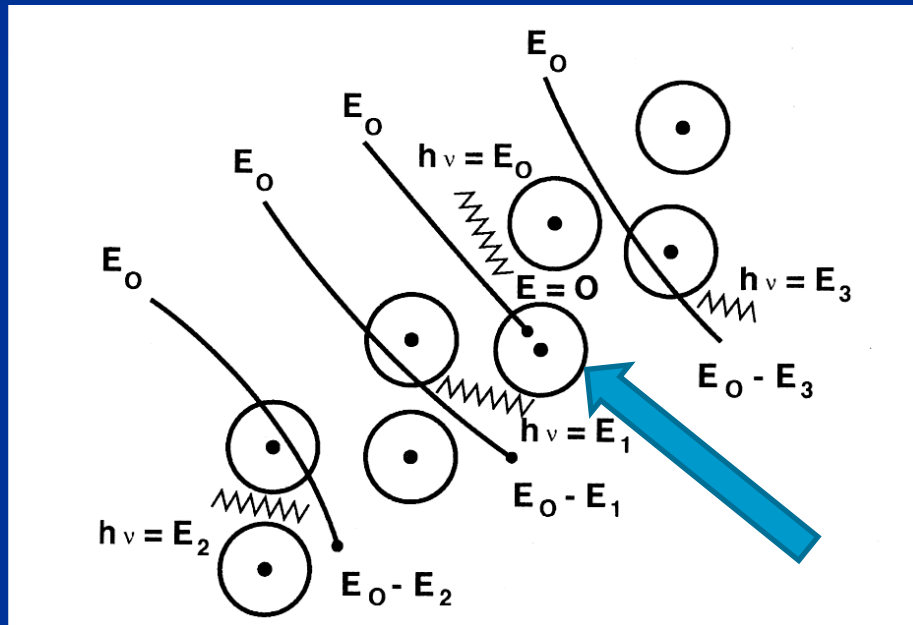
**Proces losowy**, który generuje fotony w całym zakresie energetycznym:  $0 - E_0$ .

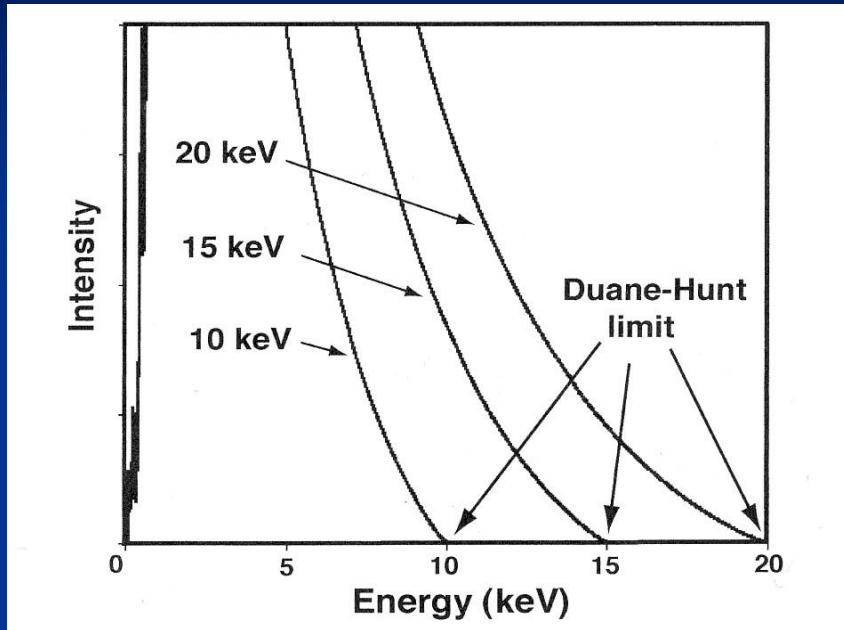
Maksymalną energię prom. X obserwuje się przy całkowitej stracie energii elektronu  $E_0 = h\nu$ .

Max energia prom. X = min. długość fali X, tzw.  $\lambda_{\text{SWL}}$  – Short Wave Limit

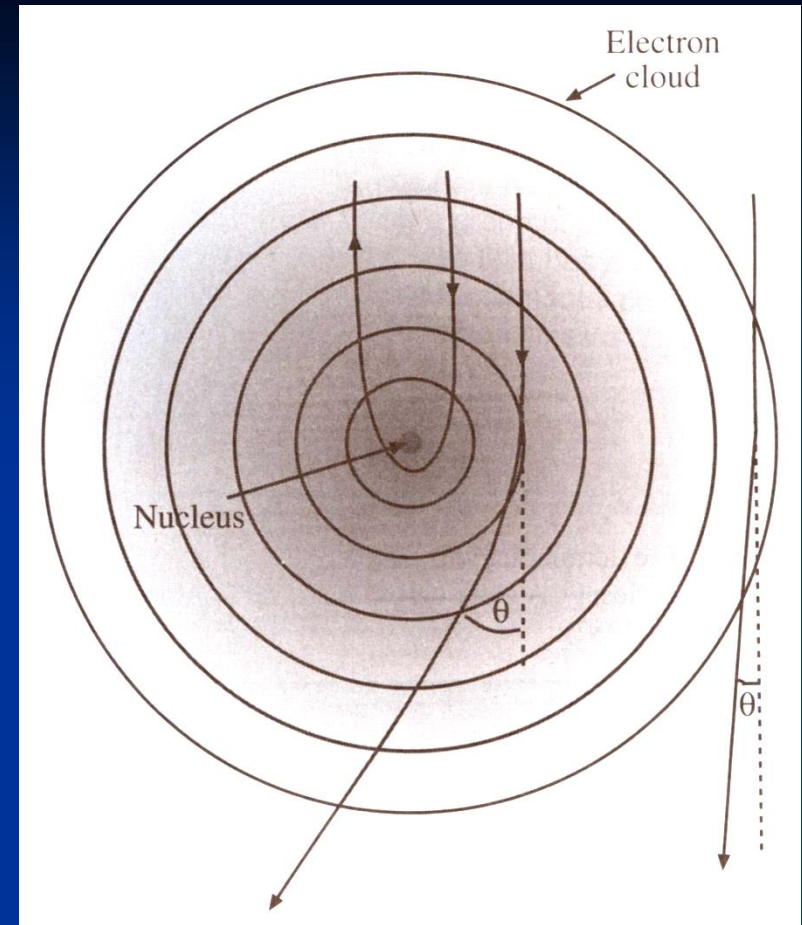
**granica Duane -Hunta** (1916)

**granica krótkofalowa widma !!! (bardzo ważny parametr w VP-SEM)**





Symulacja widma ciągłego dla C dla energii wiązki elektronowej: 10 keV, 15 keV i 20 keV



Dlaczego przy niskich energiach natężenie promieniowania ciągłego *brehmsstrahlung* rośnie?

**Im niższa energia elektronów, tym łatwiej tracą one energię przy oddziaływaniu Coulombowskim!**



# Natężenie promieniowania ciągłego $I_{cm}$ dla każdej energii/długości fali (Kramer, 1923)

$$I_{cm} \approx i_p \bar{Z} \frac{E_o - E_v}{E_v}$$

$i_p$  – prąd wiązki elektronowej

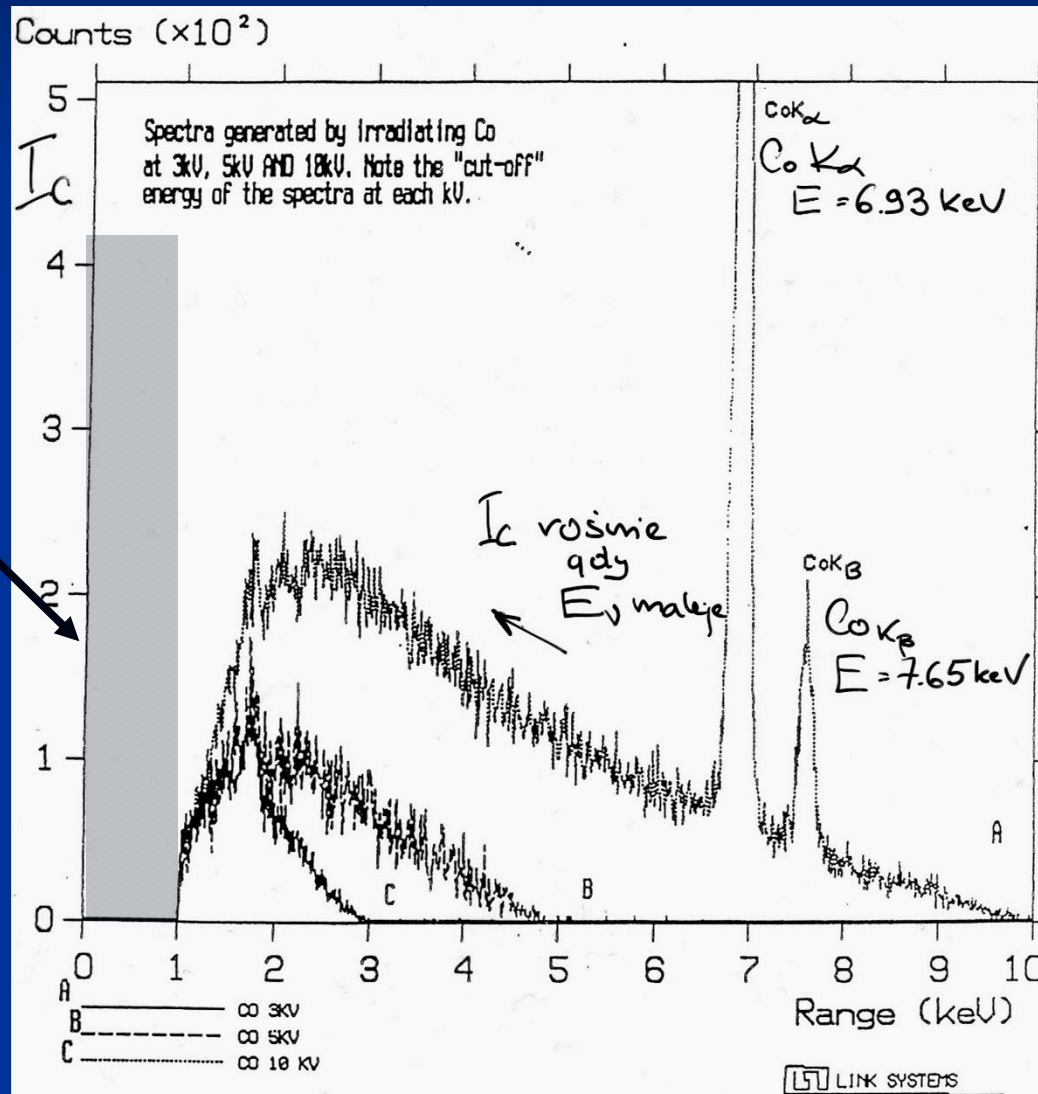
$\bar{Z}$  – średnia liczba atomowa

$E_o$  – energia elektronów wiązki

$E_v$  – energia fotonu w danym miejscu widma

- Natężenie  $I_{cm}$  rośnie z prądem wiązki elektronowej  $i_p$ , energią wiązki elektronowej  $E_o$  oraz średnią liczbą atomową próbki  $\bar{Z}$

# Zależność natężenia widma ciągłego od energii wiązki



Zakres widma z wyciętym „bremstrahlung”  
- Absorpcja na okienku spektrometru EDS

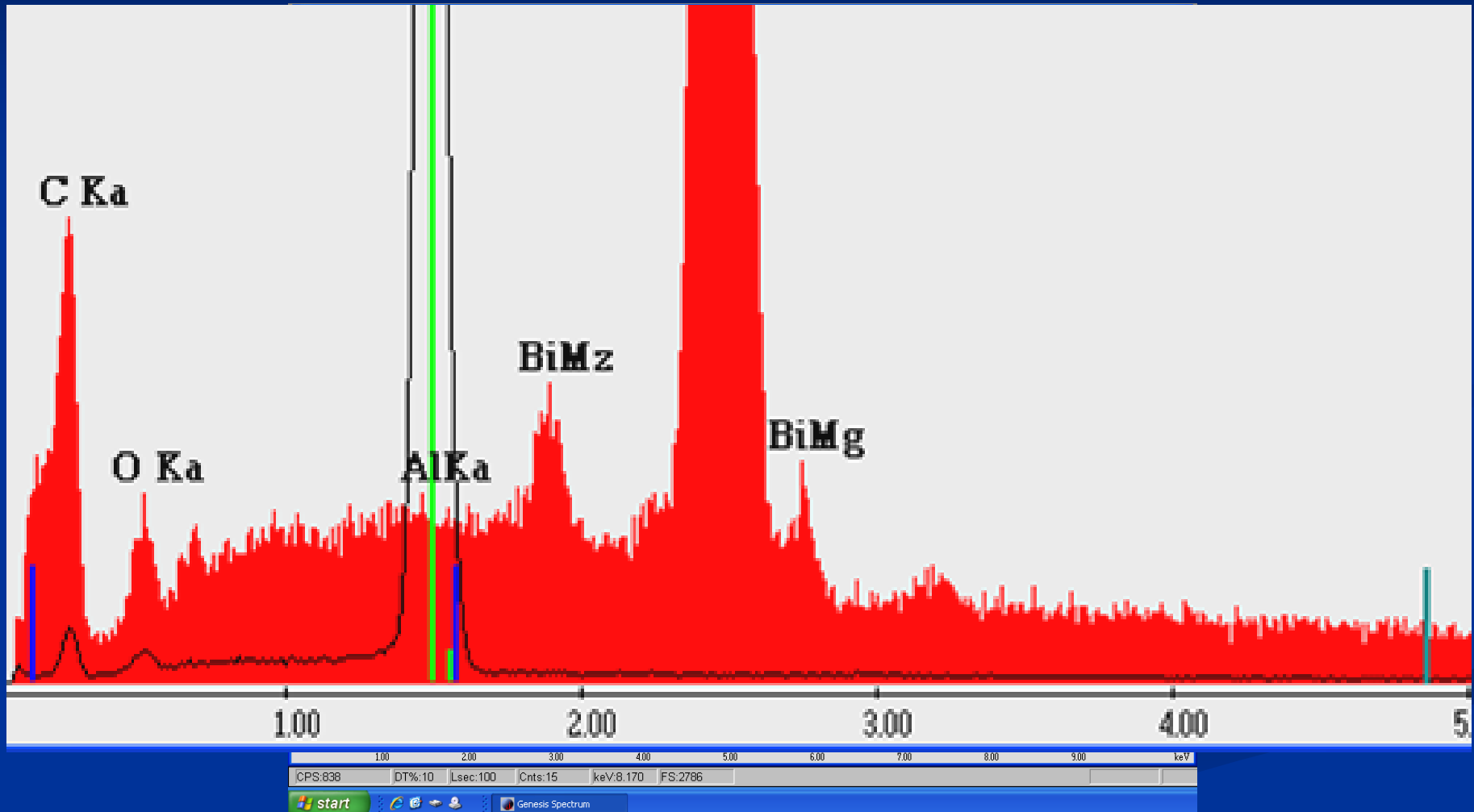
A = 10 keV

B = 5 keV

C = 3 keV

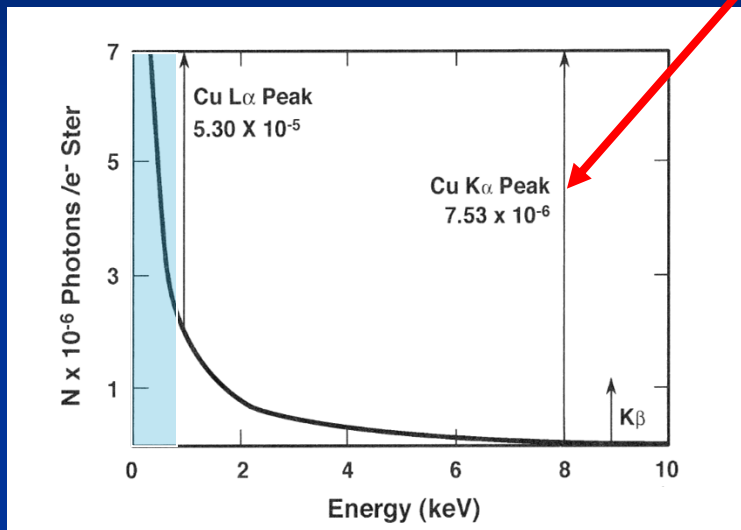
Wzrost natężenia  $I_{cm}$  wraz z liczbą atomową  $Z$  związany jest z oddziaływaniem Coulombowskim jądra  $\rightarrow$  większy ładunek jądra silniej oddziałuje na elektrony wiązki

Natężenie *brehmsstrahlung* dla Al będzie bardzo małe w porównaniu z Bi (dla tych samych warunków pomiarowych – identyczny prąd wiązki elektronów!)

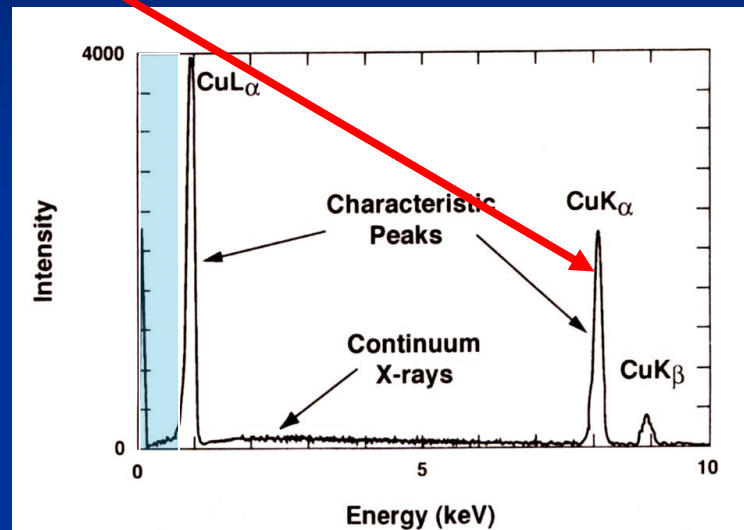


# Rozmycie szerokości linii spektralnej ca 70x rozdzielczość EDS

Widmo teoretyczne (Cu, 20 keV)

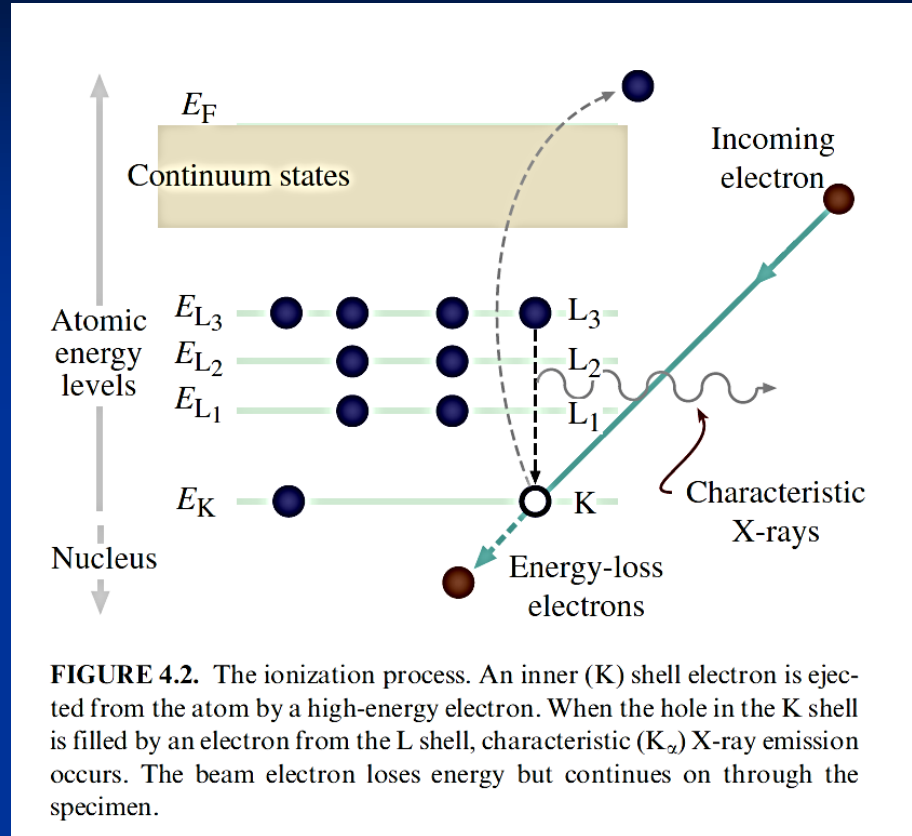


Widmo eksperymentalne (Cu, 20 keV)



*Bremsstrahlung* – duży kłopot podczas analizy  
Obniżenie granicy wykrywalności  
(piki promieniowania charakterystycznego „utopione”  
w widmie ciągłym)

# Promieniowanie charakterystyczne



**FIGURE 4.2.** The ionization process. An inner (K) shell electron is ejected from the atom by a high-energy electron. When the hole in the K shell is filled by an electron from the L shell, characteristic ( $K_\alpha$ ) X-ray emission occurs. The beam electron loses energy but continues on through the specimen.

Teoria przewiduje, że nie wszystkie przejścia pomiędzy powłokami są dozwolone

Np. dla Cu:

- Przejście elektronu z podpowłoki  $L_3 \rightarrow K$   $\longrightarrow$  prom. rtg.  $K\alpha_1$  o energii  $E_{K\alpha_1} = E_K - E_{L_3}$
- Przejście elektronu z podpowłoki  $L_2 \rightarrow K$   $\longrightarrow$  prom. rtg.  $K\alpha_2$  o energii  $E_{K\alpha_2} = E_K - E_{L_2}$
- Przejście elektronu z podpowłoki  $L_1 \rightarrow K$   $\longrightarrow$  brak emisji fotonu

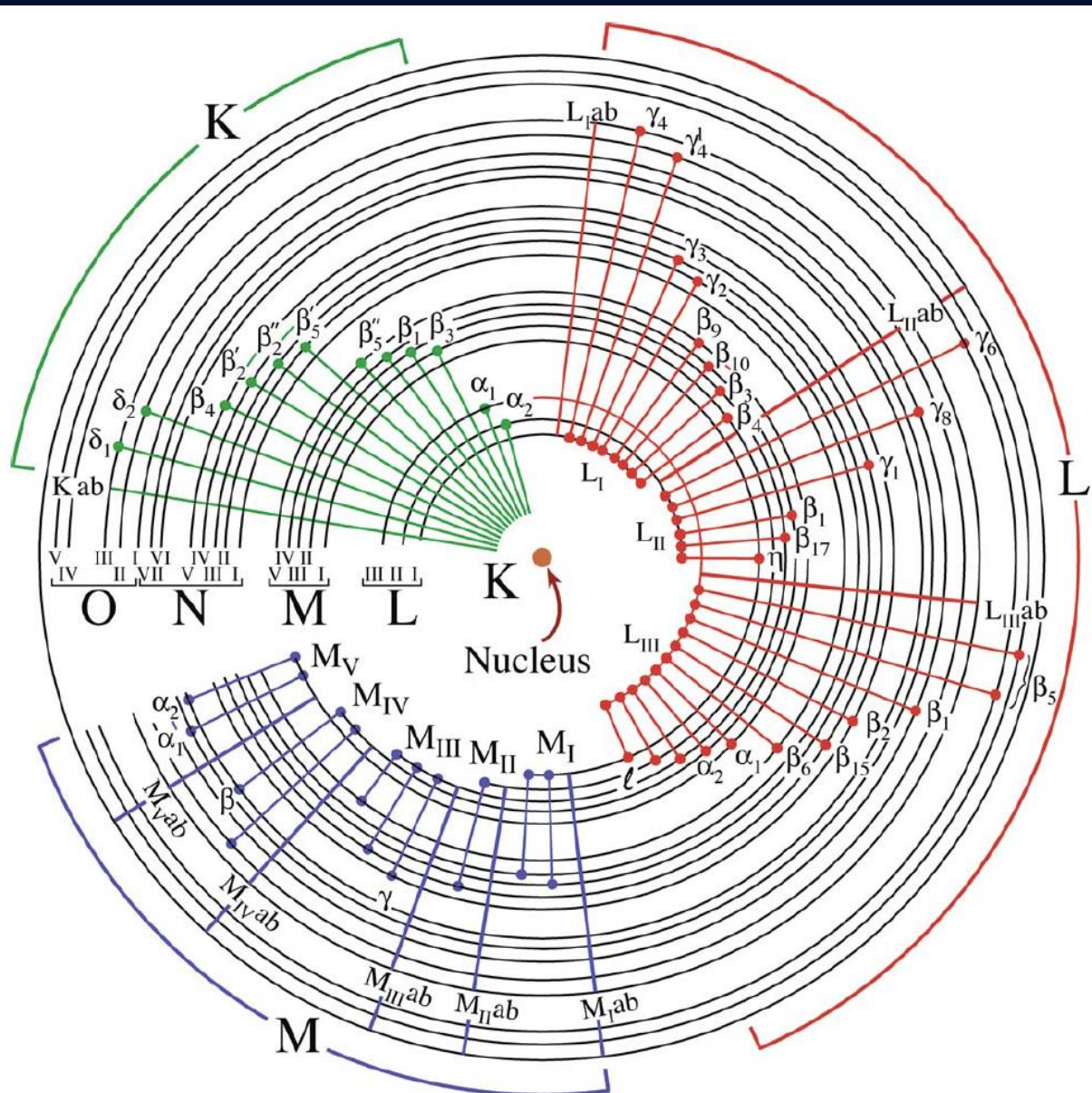
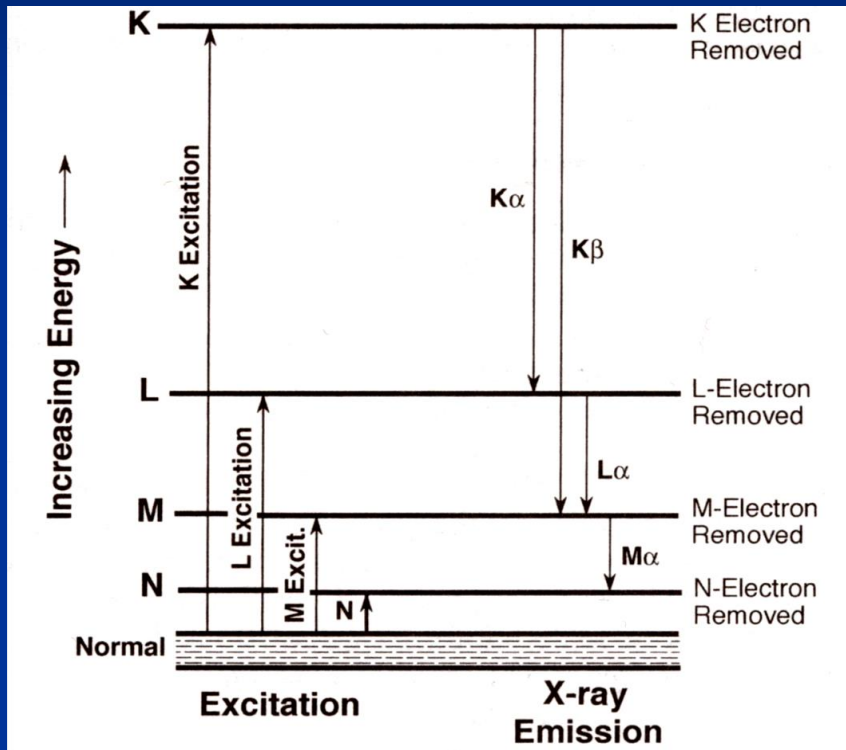


FIGURE 4.3. The complete range of possible electron transitions that give rise to K, L, and M characteristic X-rays. Not all these X-rays are detectable by the XEDS in the TEM.

# Krytyczna energia jonizacji

energia potrzebna do usunięcia elektronu z powłoki

## *Critical Excitation Energy*



**Table 6.2.** Critical Ionization Energies for Pt, Nb, and Si

Shell	$E_c$ for Pt (keV)	$E_c$ for Nb (keV)	$E_c$ for Si (keV)
K	78.39	18.99	1.839
$L_I$	13.88	2.697	0.149
$L_{II}$	13.27	2.464	0.099
$L_{III}$	11.56	2.370	0.099
$M_I$	3.296	0.468	
$M_{II}$	3.026	0.378	
$M_{III}$	2.645	0.363	
$M_{IV}$	2.202	0.207	
$M_V$	2.122	0.204	

**Reguła:**  
**Pracujemy z energią wiązki elektronowej 2-3 większą od krytycznej energii jonizacji dla danego pierwiastka !!!**

Energia charakterystycznego promieniowania rtg. jest zawsze  $<$  od krytycznej energii jonizacji dla danej powłoki, z której to powłoki elektron został usunięty!

Np. dla Si:  $E_{K\alpha} = 1.740 \text{ keV} < E_c = 1.839 \text{ keV}$

**TABLE 4.2 Difference Between  $E_c$  and  $E_K$**

Element	Critical ionization energy $E_c$ (keV)	X-ray energy $E_K$ (keV)
C	0.282	0.277
Al	1.562	1.487
Ca	4.034	3.692
Cu	8.993	8.048
Ag	25.531	22.163

Note that the energies may be affected by bonding states but shifts will only be a few eV.



# Prawo Moseley'a (1914)

opisuje związek między liczbą atomową  $Z$  a energią/długością fali emitowanego prom. rtg.



$$E = A(Z - C)^2$$

$$\lambda = \frac{A}{(Z - C)^2}$$

$A, C$  – stałe

Np.

$C = 1.13$  dla serii K

$C = 7$  dla serii L

**Promieniowanie charakterystyczne** – ściśle zdefiniowania energia/długość fali dla wzbudzanego pierwiastka

**Energie powłok elektronowych zmieniają się w dyskretny sposób wraz z liczbą atomową**

## Zakres penetracji elektronów w materiale tarczy – Kanaya i Okayama (1972)

$$R_{K-O} = \frac{0.0276A}{Z^{0.89}\rho} E_0^{1.67} \quad \mu\text{m}$$

A – ciężar atomowy (g/mol),

Z – liczba atomowa

$\rho$  – gęstość (g/cm<sup>3</sup>)

$E_0$  – energia elektronów wiązki (keV)

$$\rho R_{K-O} = k E_0^n \quad \mu\text{m}$$

k – stała materiałowa = 0.0276 A/Z<sup>0.89</sup>

$E_0$  – energia elektronów wiązki (keV)

n – 1.2-1.7

## Głębokość wzbudzenia promieniowania rentgenowskiego (ciągłego i charakterystycznego) – Kanaya i Okayama (1972)

$$\rho R_{K-O} = k (E_0^n - E_c^n) \quad \mu\text{m}$$

k – stała materiałowa = 0.0276 A/Z<sup>0.89</sup>

k – f(A,Z)

$E_c$  – krytyczna energia jonizacji dla prom. charakterystycznego albo określona energia dla prom. ciągłego

n – 1.2-1.7

Głębokość wzbudzenia promieniowania rentgenowskiego (ciągłego i charakterystycznego) jest **ZAWSZE MNIEJSZA** od głębokości penetracji elektronów !!!

## Głębokość wzbudzenia promieniowania rentgenowskiego (ciągłego i charakterystycznego) – Anderson-Hasler (1966)

$$R_{A-H} = \frac{0.064}{\rho} (E_o^{1.68} - E_c^{1.68}) \quad \mu\text{m}$$

Przykład:

Cu,  $\rho_{\text{Cu}} = 8.93 \text{ g/cm}^3$ ,

$E_0 = 20 \text{ keV}$

$$E_c = 0 \text{ keV}$$

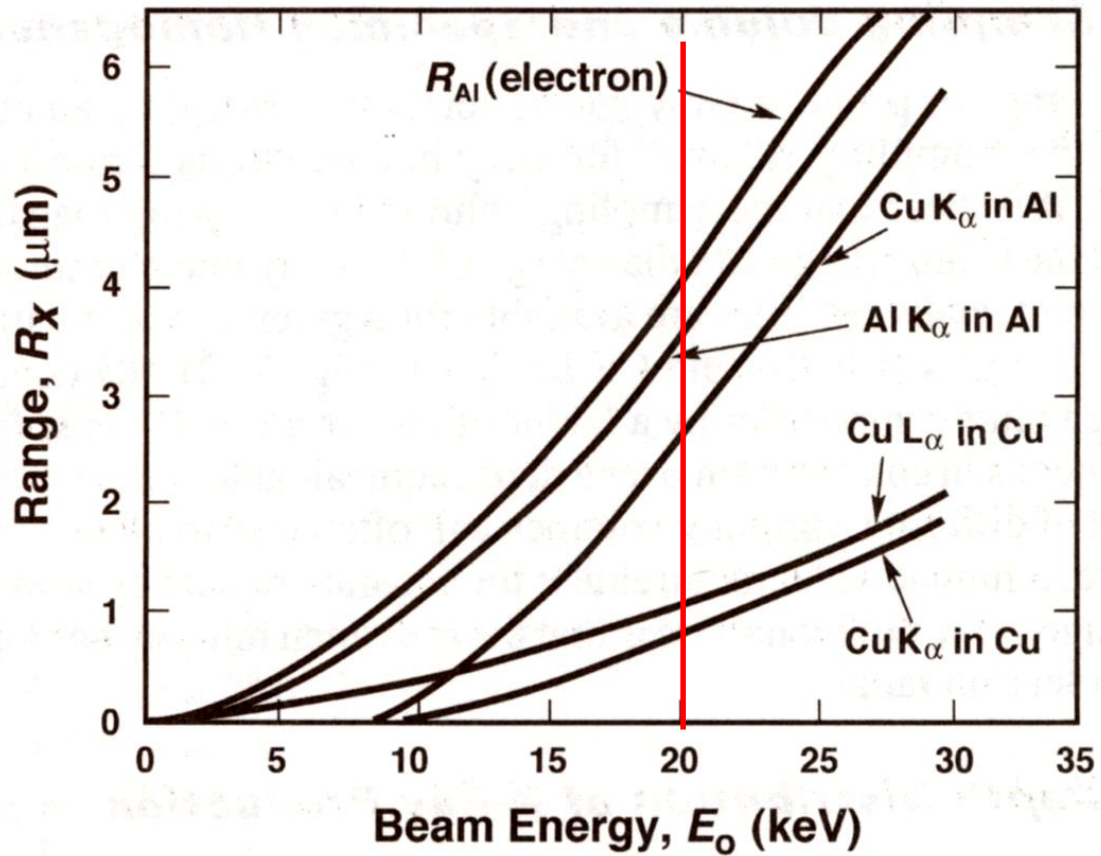
$$R = \frac{0.064}{8.93} 20^{1.68} = 1.10 \mu\text{m}$$

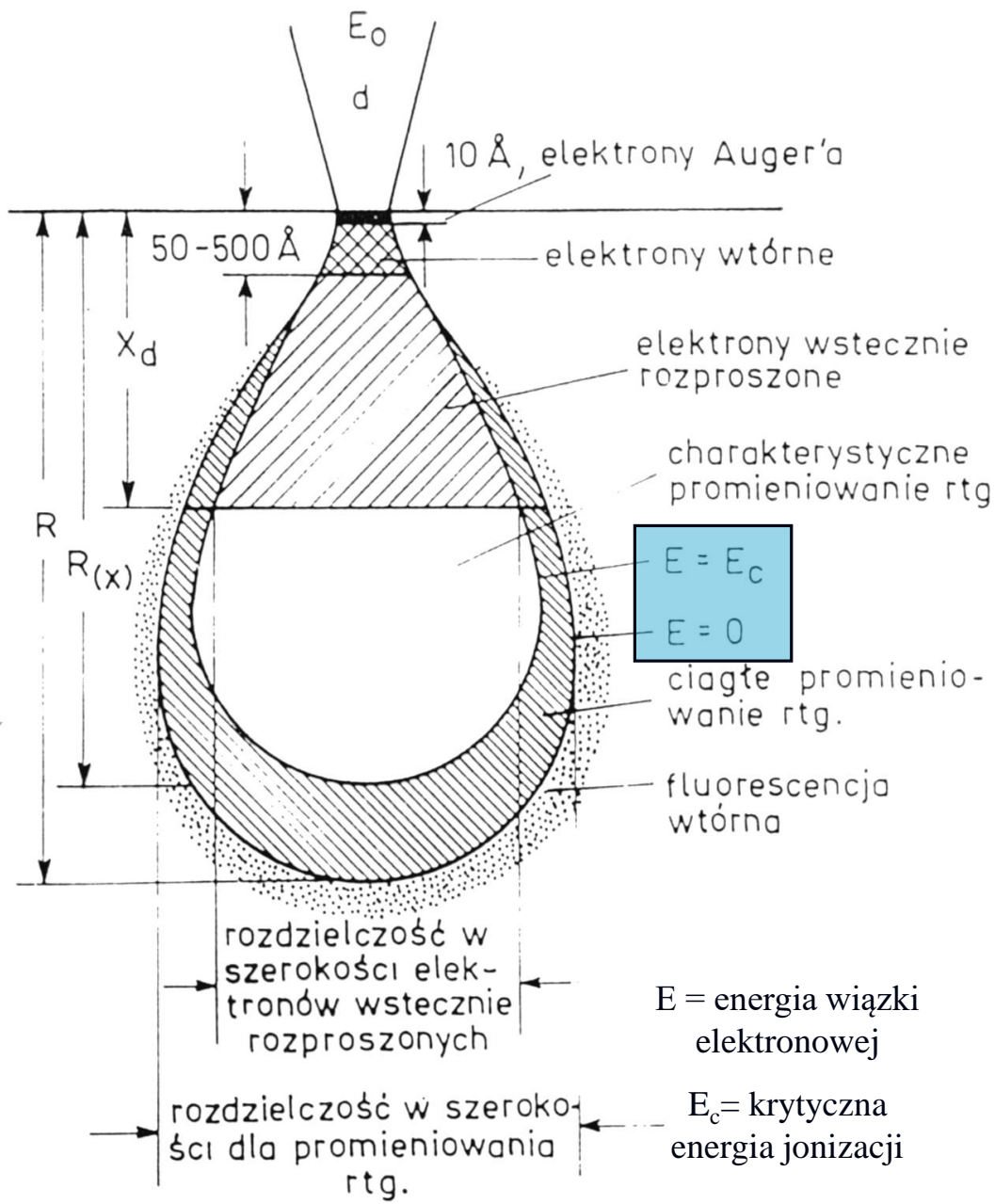
$$\text{Cu} - \text{L}\alpha (E_c = 0.933 \text{ keV})$$

$$R = \frac{0.064}{8.93} (20^{1.68} - 0.933^{1.68}) = 1.09 \mu\text{m}$$

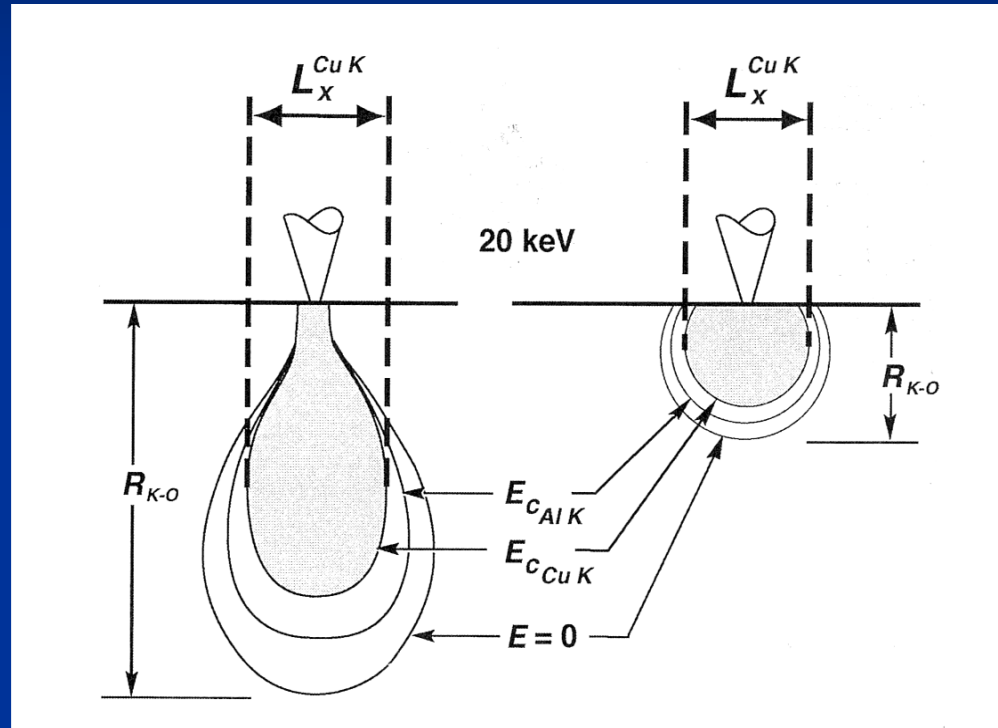
$$\text{Cu} - \text{K}\alpha (E_c = 8.993 \text{ keV})$$

$$R = \frac{0.064}{8.93} (20^{1.68} - 8.993^{1.68}) = 0.81 \mu\text{m}$$





# Przestrzenna zdolność rozdzielcza promieniowania rtg. w próbce litej (SEM)



Al,  $\rho \sim 3 \text{ g/cm}^3$

Cu,  $\rho \sim 10 \text{ g/cm}^3$

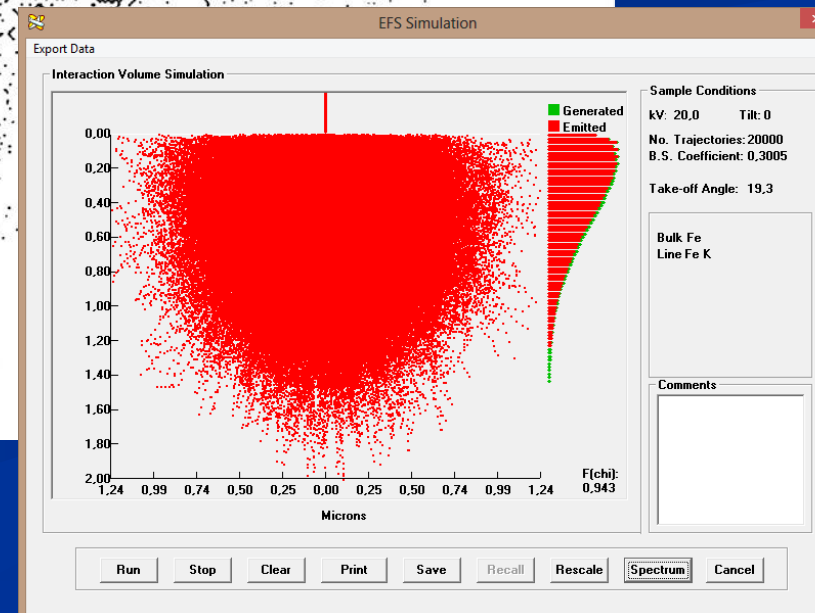
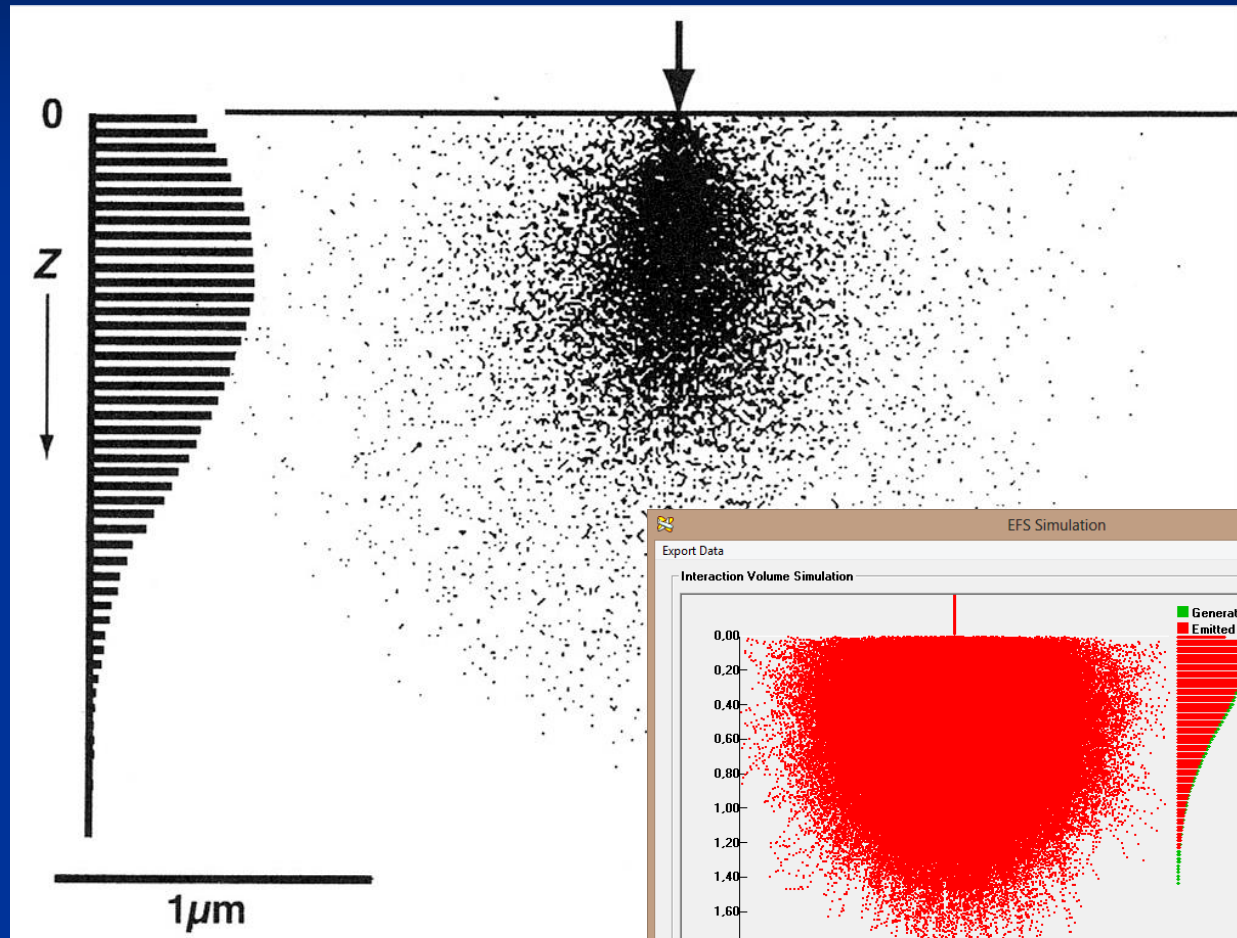
Przestrzenna zdolność rozdzielcza  $L_x$  powstaje przez projekcję maksymalnej średnicy rozkładu promieniowania rtg. na powierzchnię próbki

Uwaga:

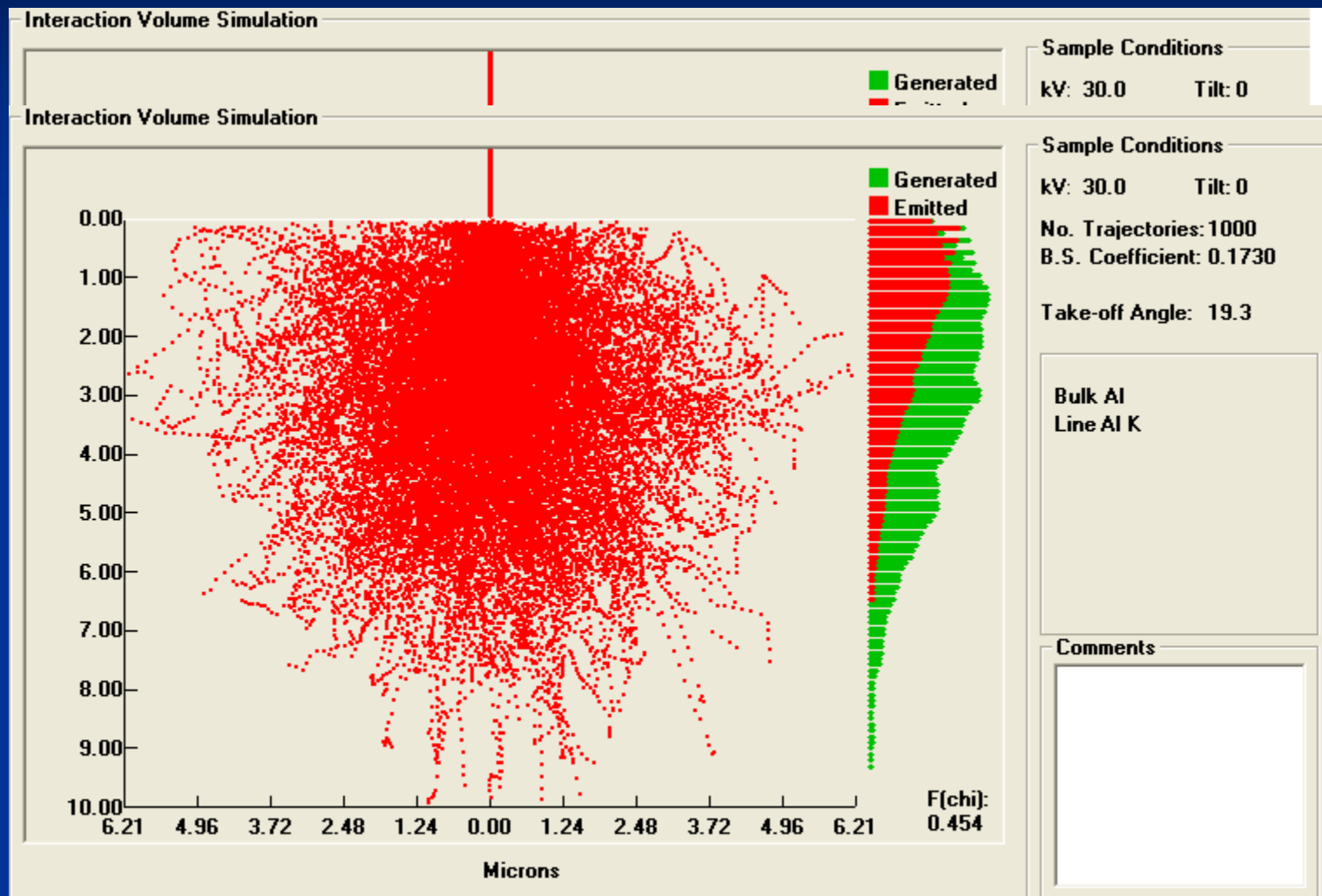
Zmienia się kształt i objętość, z której generowane jest promieniowanie rtg.

# Rozkład natężenia promieniowania rtg. na głębokości próbki litej (SEM)

Histogram  
wzbudzenia  
prom. rtg. z  
głębokością, tzw.  
funkcja  $\phi(\rho Z)$ .  
Maksimum  
produkcji  
promieniowania  
rtg. znajduje się  
pod powierzchnią  
próbki!



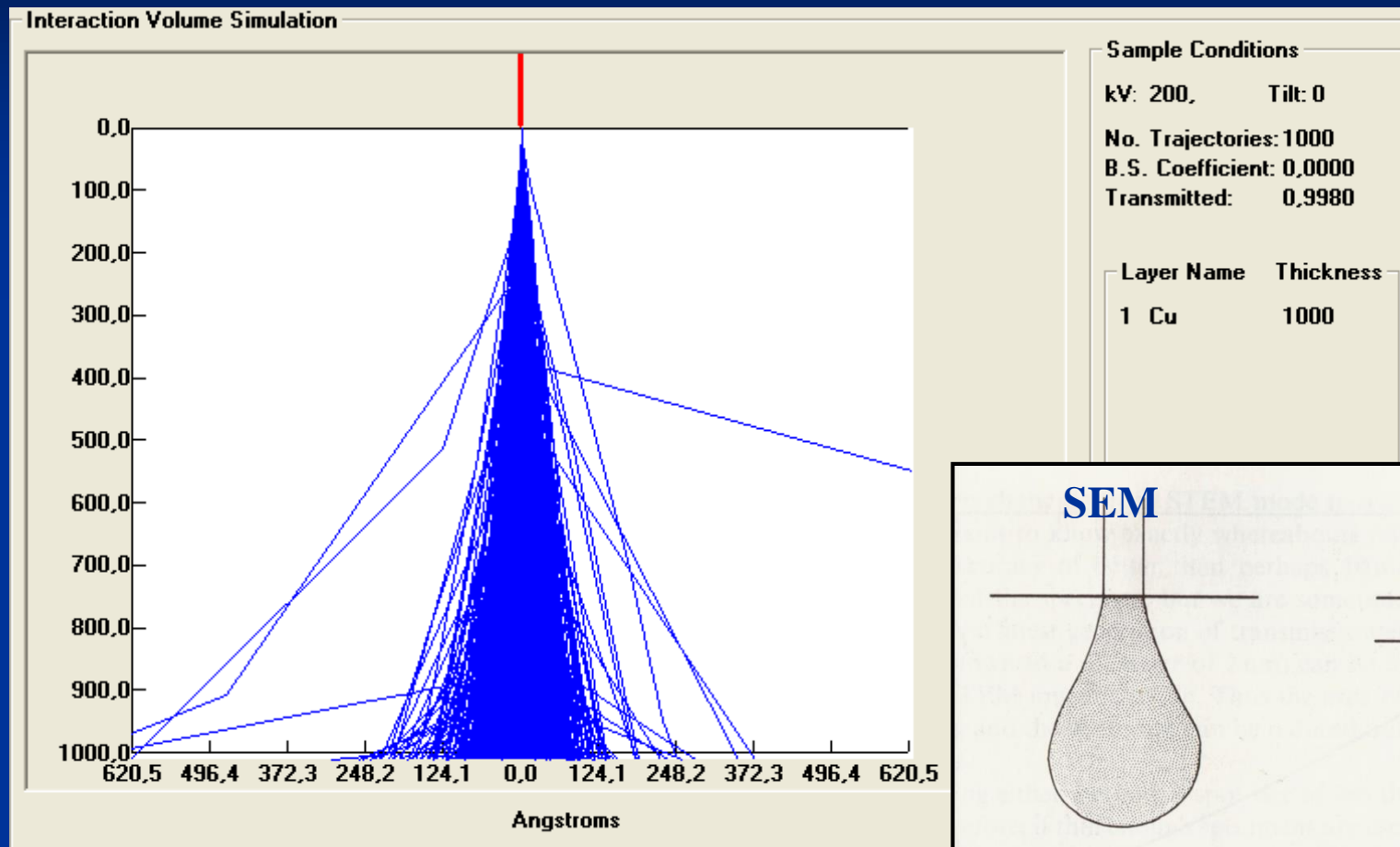
# Symulacja Monte Carlo wzbudzenia linii Al K $\alpha$ , 30 keV



Zmienna liczba trajektorii: 1000 i 10050



# Przestrzenna zdolność rozdzielcza promieniowania rtg. w cienkiej folii (TEM)



W TEM przestrzenna zdolność rozdzielcza  $L_x$  limitowana jest tylko poszerzeniem wiązki elektronowej wewnątrz cienkiej folii

# Nateżenie emitowanego charakterystycznego promieniowania rtg.

Przekrój czynny na jonizację wewnętrznych powłok elektronowych wg Bethego (1930)

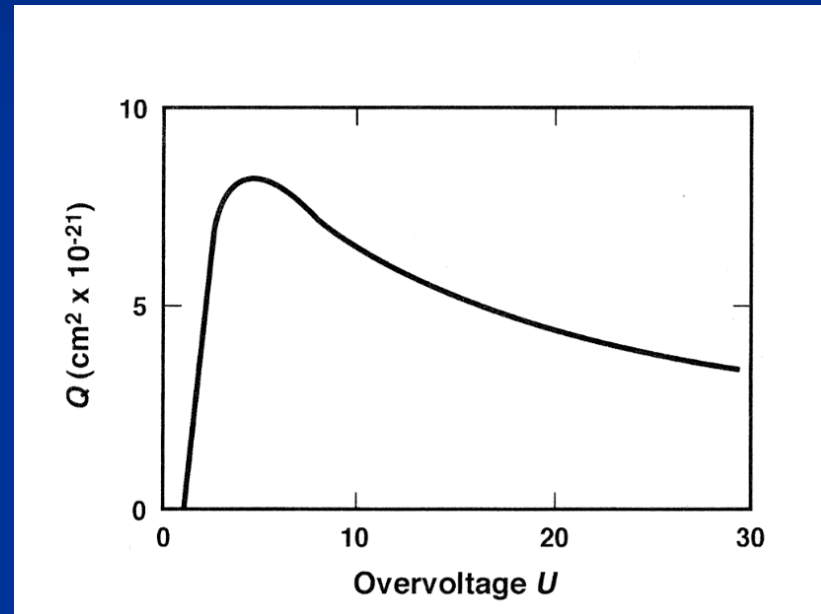
$$Q = 6.51 \times 10^{-20} \frac{n_s b_s}{U E_c^2} \ln(c_s U)$$

$n_s$  – liczba elektronów na danej powłoce np.  $n_s=2$  dla powłoki K

$b_s, c_s$  – stałe dla danej powłoki

$E_c$  – krytyczna energia jonizacji danej powłoki

**U** – „**overvoltage**” - krotność krytycznej energii jonizacji



$$U = \frac{E_0}{E_c} \quad !!!$$

Prawdopodobieństwo jonizacji rośnie silnie od  $U = 1$  i osiąga maksimum dla  $U \approx 3$

Np. dla  $E_c$  Si K = 1.839 keV, max. jonizacja powłoki nastąpi dla  $E_0 \approx 5.5$  keV

# Natężenie emitowanego charakterystycznego promieniowania rtg.

SEM (Green 1963, Lifshin 1980)

$$I_c = i_p a \left( \frac{E_o - E_c}{E_c} \right)^n = i_p a (U - 1)^n$$

$i_p$  – prąd wiązki

$a, n$  – stałe

**U – overvoltage !!!**

TEM

**Krotność krytycznej energii jonizacji**

$n_x$  – liczba fotonów/ $e^-$

$Q$  – przekrój czynny

$N_o$  – liczba Avogadro

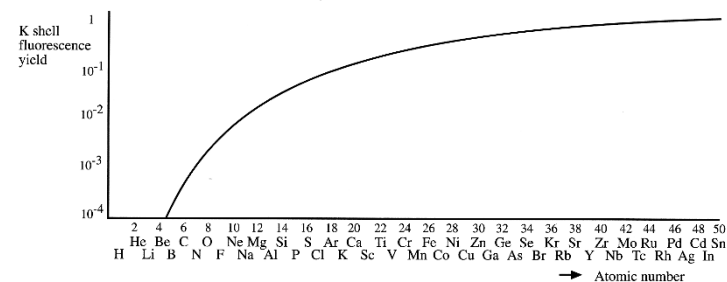
$\rho$  – gęstość,

**t – grubość folii !!!**

$$n_x = Q \omega N_o \frac{1}{A} \rho t$$

$\omega$  – wydajność fluorescencji rtg.

$$\omega = \frac{Z^4}{a + Z^4}$$



$$I_c = i_b \left( \frac{E_0 - E_c}{E_c} \right)^n$$

$$I_{cm} = i_b Z \left( \frac{E_0 - E_v}{E_v} \right)$$

$$\frac{P}{B} = \frac{I_c}{I_{cm}} = \frac{\left( \frac{E_0 - E_c}{E_c} \right)^n}{Z \left( \frac{E_0 - E_v}{E_v} \right)}$$

$$E_v \cong E_c$$

$$\frac{P}{B} = \frac{I_c}{I_{cm}} = \frac{1}{Z} \left( \frac{E_0 - E_c}{E_c} \right)^{n-1}$$

$E_0$  – energia wiązki elektronowej

$E_c$  – krytyczna energia jonizacji

$E_v$  – wybrana energia widma ciągłego

$I_c$  – natężenie promieniowania charakterystycznego

$I_{cm}$  – natężenie promieniowania ciągłego

$i_b$  – prąd wiązki elektronowej

$Z$  – liczba atomowa

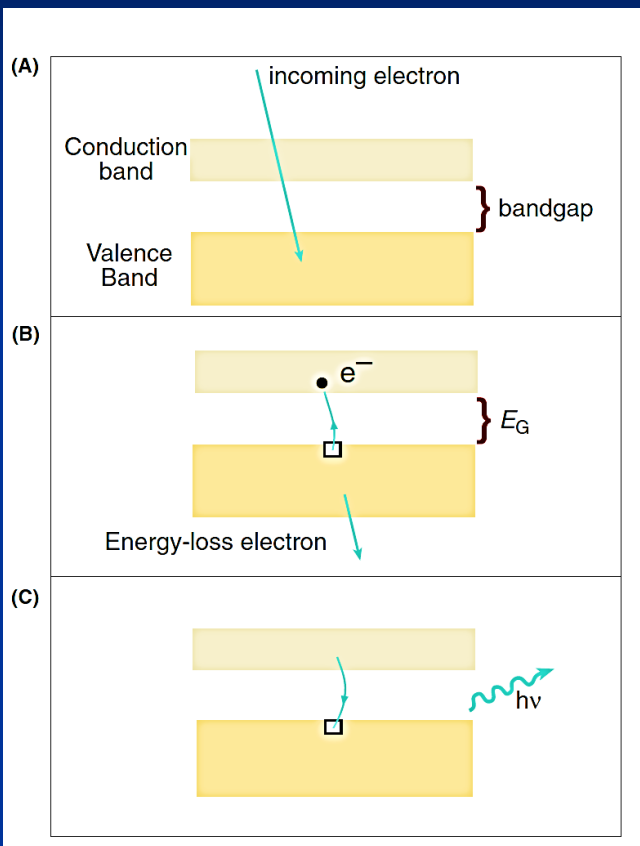
Gdy różnica pomiędzy energią wiązki elektronowej  $E_0$  a krytyczną energią jonizacji  $E_c$  (wyrażenie:  $E_0 - E_c$ ) rośnie to:

- Peak to Background ratio rośnie
- Granica wykrywalności (mass fraction) maleje (poprawia się!!!)

Patrz slajd 34!

# Katodoluminescencja – emisja fotonów w zakresie światła widzialnego i ultrafioletu

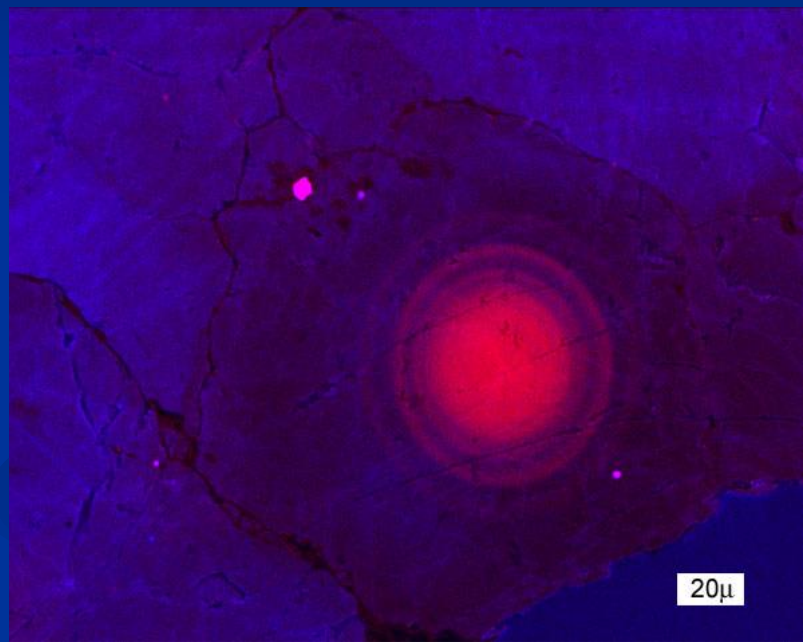
występuje w:  
izolatorach,  
półprzewodnikach



A: pasmo przewodnictwa puste, pasmo walencyjne wypełnione

B: elektron w paśmie przewodnictwa, „dziura” w paśmie walencyjnym

C: rekombinacja i anihilacja pary elektron-„dziura”  
emisja fotonu  $h\nu = E_{GAP}$



Ponieważ  $E_{GAP}$  jest ściśle określona, to emitowane promieniowanie ma ściśle określoną długość fali (energię) charakterystyczną dla danego pierwiastka

$$E_{GAP} = 2.4 \text{ eV (CdS)}$$

$$E_{GAP} = 1.1 \text{ eV (Si)}$$

# Jeżeli nie zrobimy nic - nastąpi rekombinacja elektronów z „dziurami” → emisja promieniowania

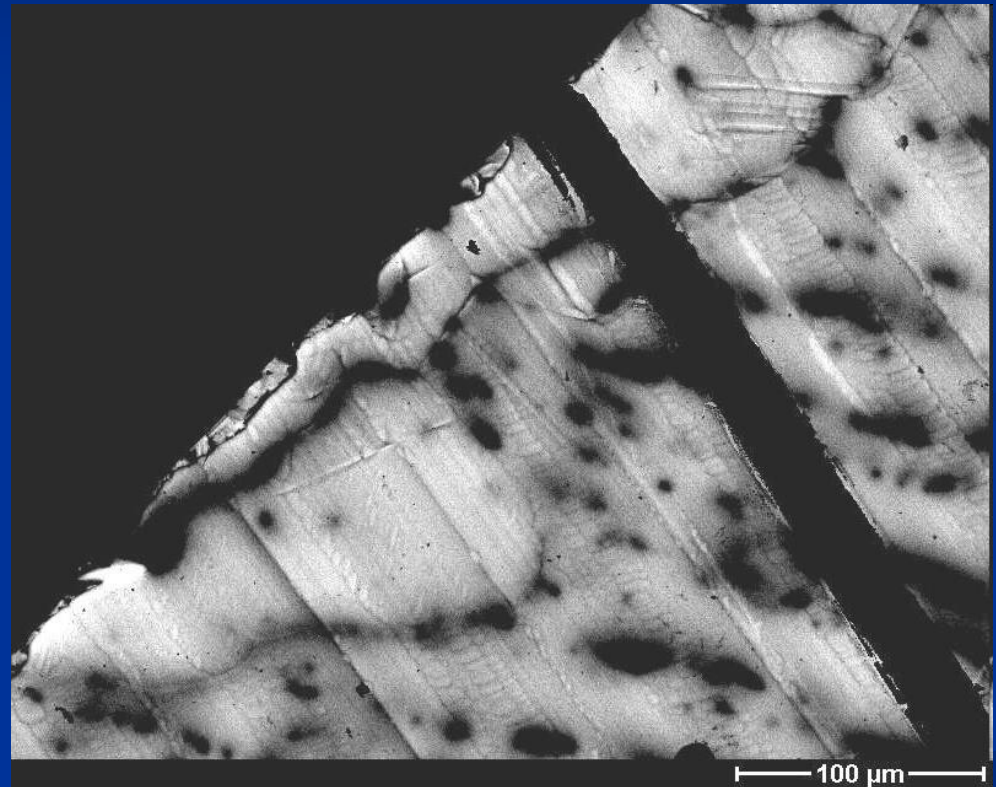
Jeżeli przyłożymy potencjał do próbki - rozdzielimy elektrony i „dziury” .

Pikoamperomierzem mierzymy sygnał w próbce – próbka działa jako swoisty detektor!

Mierzony prąd w próbce to:  
„Electron Beam Induced Current” - EBIC

Jeżeli będziemy go monitorować podczas skanowania wiązką po powierzchni próbki

„Charge-Collection Microscopy” or CCM



Obraz EBIC krzemu z baterii słonecznej: ciemne miejsca to centra rekombinacji

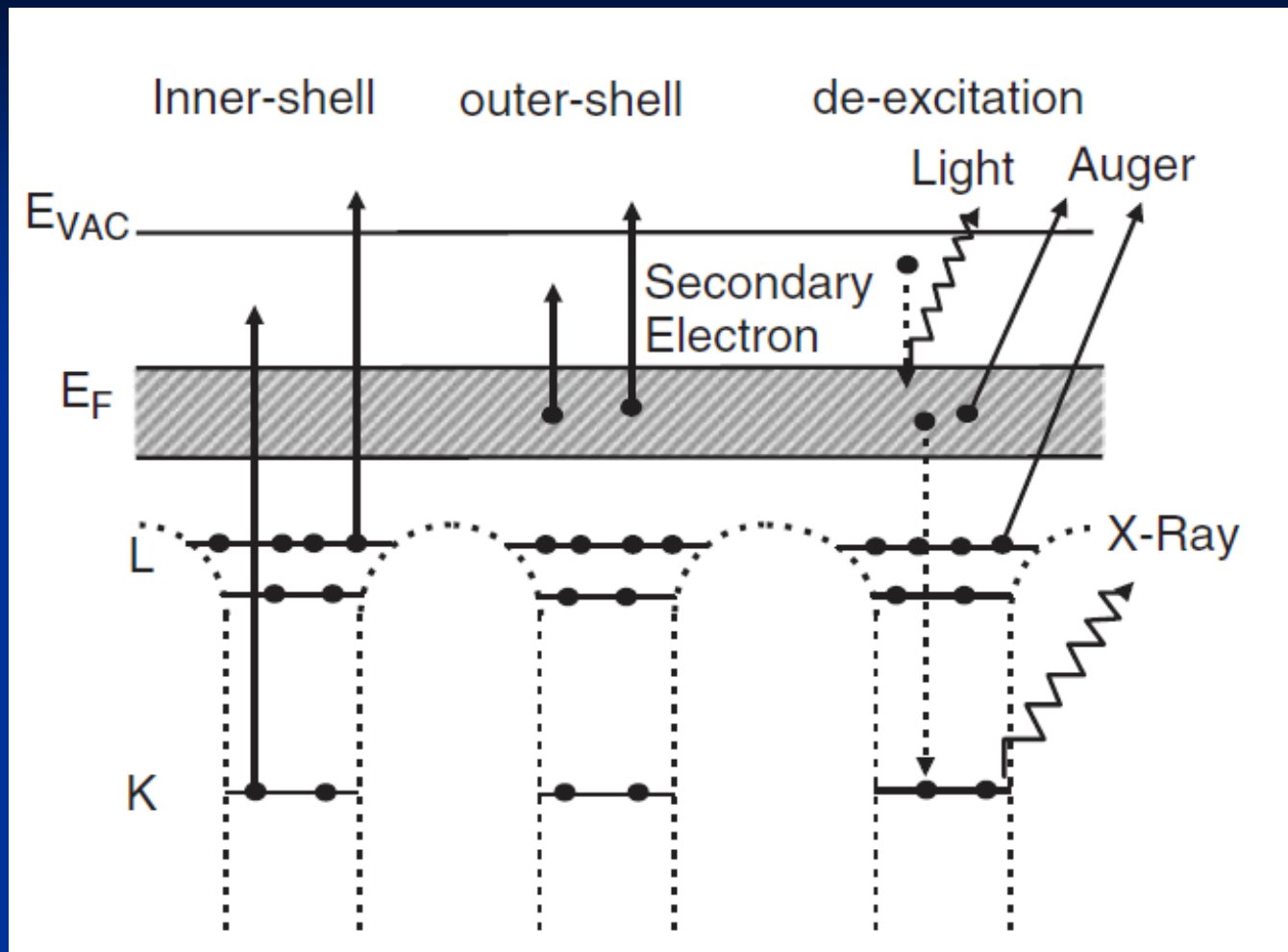


Diagram of inelastic excitations, X-ray, photon and Auger emissions with respect to different energy levels.