

# Физичка хемија 2

за студијски програм Хемичар (022Н1)

шк. 2019/2020

5. Рендгенско зрачење и рендгенски спектри.

Март 2020.

Др Гордана Ћирић-Марјановић, редовни професор

## Rendgensko (X) zračenje

Ovo zračenje otkrio je **Rendgen (1895)**.

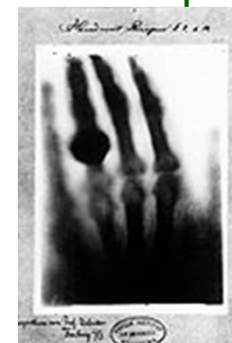
Kada se u rendgenskoj cevi na put brzih elektrona (katodnih zraka) stavi komad metala (antikatoda, anoda) emituje se zračenje koje se zove **rendgensko** ili **X-zračenje**.

Rendgensko zračenje je **elektromagnetne prirode, velike je prodornosti i ne skreće u električnom i magnetnom polju**.

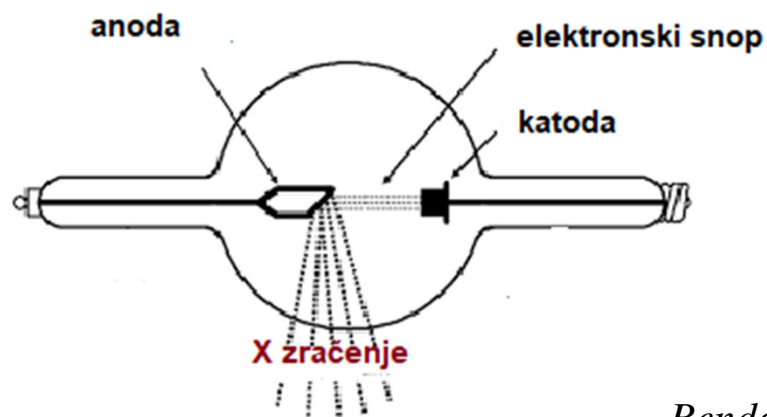
**Talasne dužine** ovog zračenja nalaze se u intervalu **0,01 - 10 nm**.

**Nekarakteristično (kontinualno) X zračenje** ne zavisi od materijala antikatore.

**Karakteristično rendgensko zračenje** sastoji se od oštrih linija i zavisi od materijala antikatore (anode).



1896. Roentgen  
(šaka njegove supruge)



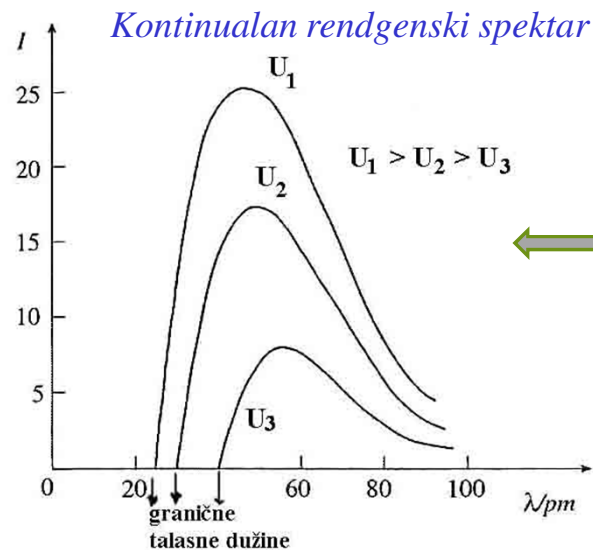
*Rendgenska cev*

## Kontinualni rendgenski spektri

Ovi spektri nastaju u interakciji brzih elektrona sa atomima metala, pri čemu se **elektroni usporavaju ili potpuno zaustavljaju**. Zato se nastalo kontinualno zračenje naziva i **zakočno**.

Frekvencija emitovanog zračenja zavisi samo od vrednosti gubitka kinetičke energije elektrona pri njegovom usporavanju.

Ovi spektri nastaju sve dotle dok je kinetička energija elektrona niža od neke određene vrednosti karakteristične za dati metal.



← Kontinualan rendgenski spektar **volframa**, nastao u interakciji brzih elektrona sa atomima volframa. **Elektroni su prethodno ubrzani naponom U**, gde je  $U_1 > U_2 > U_3$ , a granične talasne dužine su u međusobnom odnosu  $(\lambda_g)_1 < (\lambda_g)_2 < (\lambda_g)_3$ .

**Granična talasna dužina  $\lambda_g$**  odgovara emitovanim **fotonima maksimalne energije** koji nastaju **kada elektron potpuno izgubi svoju kinetičku energiju**

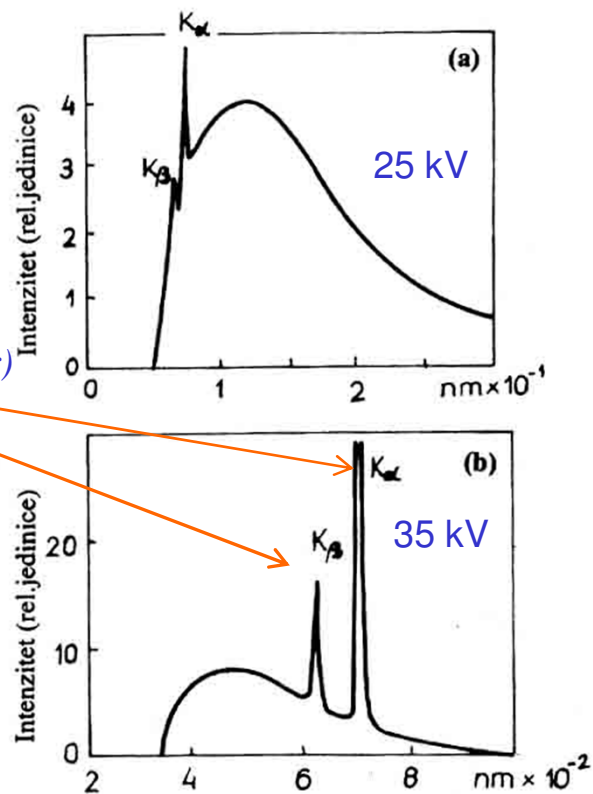
$$h \frac{c}{\lambda_g} = \frac{mv^2}{2} = eU = h\nu_{\max}$$

$$\lambda_g = \frac{hc}{eU}$$

## Karakteristični rendgenski spektri

Kada kinetička energija upadnih elektrona dostigne određenu vrednost, karakterističnu za materijal antikatode, pojavljuju se **oštre linije** iznad kontinualnog rendgenskog spektra. Njihov položaj zavisi od materijala antikatode. Ove linije čine **karakterističan rendgenski spektar**.

*Karakteristične linije  
(karakterističan rendgenski spektar)*



Rendgenski spektar *molibdena* dobijen udarom elektrona ubrzanih naponom a) 25 kV i b) 35 kV

**Karakterističan rendgenski spektar** nastaje kao posledica **prelaza elektrona iz unutrašnjih nivoa atoma**, tj. promenom stanja čvrsto vezanih elektrona.

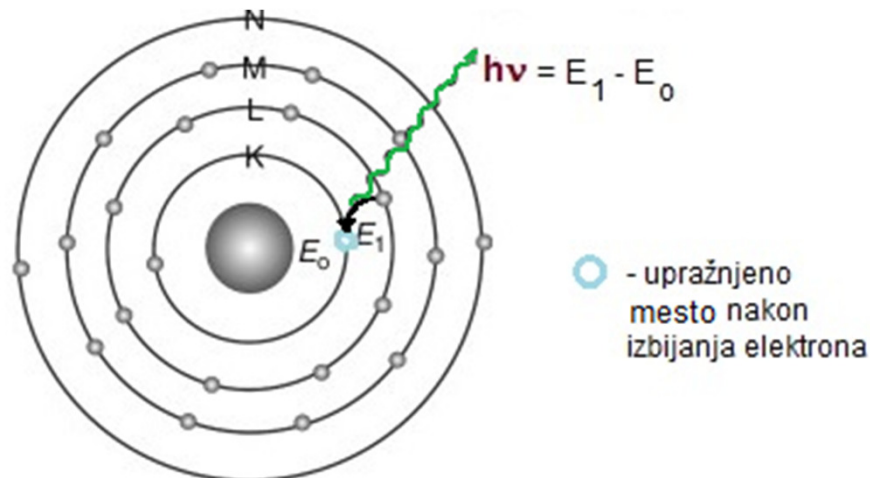
Kod nastanka rendgenskih fotona prvi korak je udaljavanje elektrona iz neke od unutrašnjih ljuski (nivoa), bliskih jezgri (K, L, M).

Udaljavanje unutrašnjih elektrona iz atoma (tzv. **unutrašnja jonizacija**) se može postići

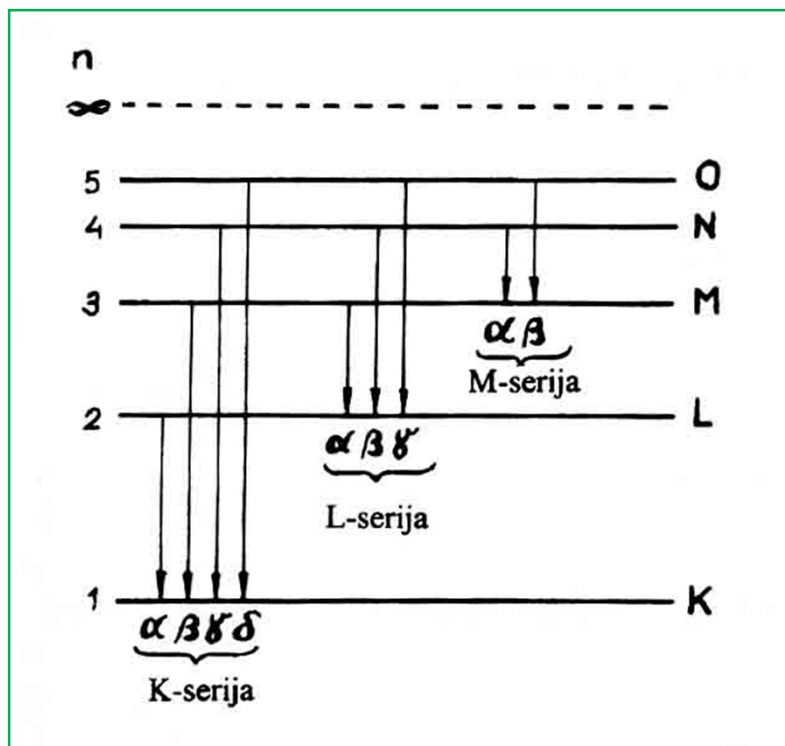
1. **udarom elektrona** čija je kinetička energija veća od energije veze elektrona u datom unutrašnjem nivou
2. **apsorpcijom rendgenskih fotona** (energija apsorbovanog rendgenskog fotona prenosi se na elektron koji se zatim izbacuje iz ljuske atoma).

Pošto je atom u takvom stanju sa upražnjenim mestom nastalim nakon udaljavanja elektrona nestabilan, da bi povratio stabilnost upražnjeno mesto udaljenog elektrona vrlo brzo se popunjava drugim elektronom iz višeg nivoa. Pri tome se emituju rendgenski fotoni čije energije odgovaraju razlici energija veza elektrona u nivoima jonizovanog atoma između kojih se vrši prelaz.

Ukoliko je do unutrašnje jonizacije atoma (odnosno pobuđivanja) došlo **udarom elektrona**, nastalo zračenje zove se **primarno rendgensko zračenje**, a ukoliko je jonizacija izazvana **apsorpcijom rendgenskih fotona**, radi se o **sekundarnom rendgenskom zračenju** (koje se naziva i **fluorescentno rendgensko zračenje**).

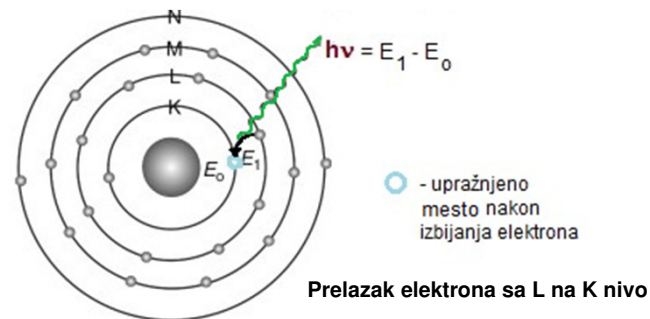


## Nastanak karakterističnog rendgenskog spektra



### Nastanak karakterističnog rendgenskog spektra:

Neka je na primer udaljen elektron iz nivoa  $n=1$  (K nivoa). **Upražnjeno mesto tog udaljenog elektrona vrlo brzo se popunjava drugim elektronom**, obično onim iz najbližeg nivoa  $n=2$ , a može i prelazom elektrona sa nivoa  $n=3, n=4\dots$  **Pri tome se emituju rendgenski fotoni čije energije odgovaraju razlici energija veza elektrona u nivoima jonizovanog atoma, između kojih se vrši prelaz.** Tako u ovom slučaju (kada je elektron izbačen sa  $n=1$  tj. K nivoa) nastaje **K serija** čije linije su  $K_\alpha, K_\beta, K_\gamma$  u zavisnosti od toga da li se prelaz vrši sa nivoa L, M, ili N. Dalje se stvara novo upražnjeno mesto na nivou sa koga je elektron prešao u niži nivo, koje se dalje popunjava prelazima elektrona sa viših nivoa na to upražnjeno mesto...



H i He nemaju rendgenski spektar.

Elementi sa  $Z < 11$  imaju samo K seriju, a oni sa  $Z < 29$  samo K i L seriju.

**K serija je uvek na kratkotalasnoj strani spektra**, a zatim slede serije L, M,.... idući ka većim talasnim dužinama.

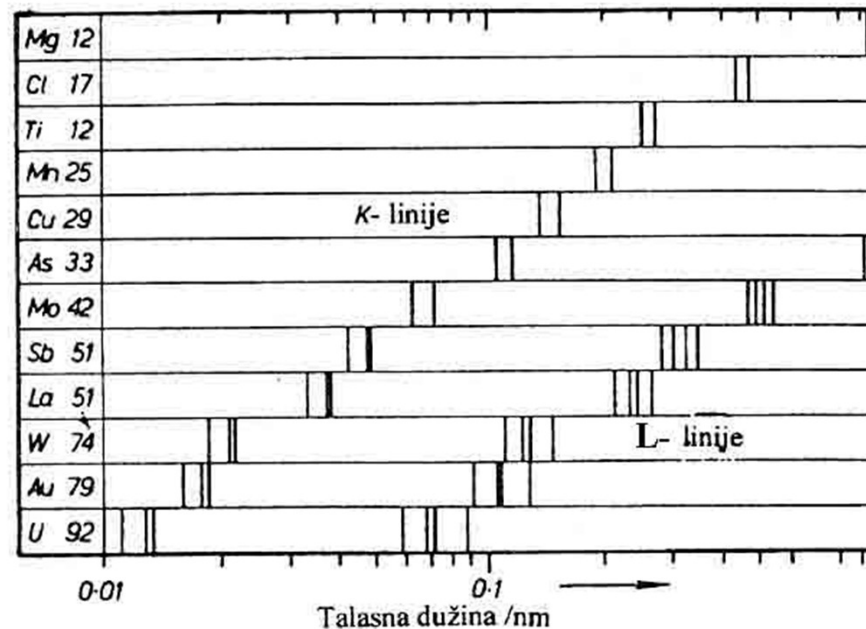
**Karakteristični spektri** koji nastaju pobuđivanjem elektronima nazivaju se **primarni**, a oni koji nastaju apsorpcijom rendgenskih fotona nazivaju se **sekundarni**.

**Talasni broj emitovane linije** karakterističnog rendgenskog spektra izračunava se formulom:

$$\tilde{\nu} = R (Z - \sigma)^2 \left[ \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right]$$

$\sigma$  = 1 konstanta zaklanjanja jezgra za elektron u nivou  $n_1$

**K serija**  $n_1=1, n_2= 2,3,4\dots$   
**L serija**  $n_1=2, n_2= 3,4,5,\dots$   
**M serija**  $n_1 =3, n_2= 4,5,6,\dots$



Položaji K i L serija nekih elemenata; uočava se pravilnost pomeranja linija sa talasnom dužinom-sa porastom rednog broja linije se pomeraju ka kraćim talasnim dužinama (većem talasnom broju), u skladu sa gornjom formulom.

Za K seriju  $\sigma = 1$ . Za  $K_\alpha$  liniju je  $n_1 = 1, n_2 = 2$ , tako da se zamenom u prethodni izraz dobija:

$$\tilde{\nu} = R (Z - \sigma)^2 \left[ \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right] = \frac{3}{4} R (Z - \sigma)^2$$

Pošto je  $\sigma = 1$  sledi : 
$$\tilde{\nu} = \frac{3}{4} R (Z - 1)^2$$

**Zadatak:**

1. Odrediti **energije K i L nivoa atoma**, ako je talasna dužina  $K_\alpha$  linije  $\lambda_{K\alpha} = 2,75 \text{ \AA}$ , talasna dužina  $K_\beta$  linije  $\lambda_{K\beta} = 2,54 \text{ \AA}$ , a talasna dužina koja odgovara granici K serije iznosi  $\lambda_K = 2,49 \text{ \AA}$ .  
Koliki je **redni broj** atoma čiji je rendgenski spektar analiziran?

**Rešenje:**

Konstanta zaklanjanja kod K serije je  $\sigma = 1$ , kvantni broj  $n_1 = 1$  pa je izraz za talasni broj linija ove serije

$$\tilde{\nu} = R (Z - 1)^2 \left[ \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right] = \frac{1}{\lambda_K}$$

gde je  $\lambda$  talasna dužina odgovarajuće K linije.

Za  $K_\alpha$  liniju  $n_2 = 2$ , a za  $K_\beta$  liniju  $n_2 = 3$ , dok se granica serije dobija kada je  $n_2 = \infty$ .

Najpre možemo iz izraza za talasni broj  $K_\alpha$  linije izračunati traženi redni broj Z (ovo možemo i iz izraza za talasni broj  $K_\beta$  linije):

$$\frac{1}{\lambda_{K\alpha}} = R(Z-1)^2 \left[ \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right]$$

$$(Z-1)^2 = \frac{1}{2,75 \times 10^{-10} \text{ m} \times 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \times \left(1 - \frac{1}{4}\right)}$$

$$(Z-1)^2 = 441,977$$

$$Z = 22$$



## Nastavak rešenja:

Energija prelaza koji odgovara granici K serije je energija prelaza sa nivoa  $n_2 = \infty$  na nivo  $n_1 = 1$ , tj.  $\Delta E_{K\infty}$ . Iz izraza za energiju kvanta koji odgovara ovom prelazu možemo izračunati energiju nivoa K (tj. nivoa  $n_1=1$ )

$$\Delta E_{K\infty} = E_{\infty} - E_K = 0 - E_K = \frac{hc}{\lambda_{Kg}}$$

$$E_K = -\frac{hc}{\lambda_{Kg}} = -\frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J s} \times 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}}{2,49 \times 10^{-10} \text{ m}} = -7,978 \times 10^{-16} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_K = -\frac{7,978 \times 10^{-16}}{1,602 \times 10^{-19}} \text{ eV} = -4,980 \text{ keV}$$

Energiju L nivoa možemo sada izračunati koristeći podatak za talasnu dužinu  $\lambda_{K\alpha}$  koja odgovara prelazu elektrona sa L nivoa na K nivo

Kvant (foton) energije koji se izrači pri prelazu elektrona sa L nivoa na K nivo, kome odgovara talasna dužina  $\lambda_{K\alpha}$  je:

$$\Delta E_{K\alpha} = \frac{hc}{\lambda_{K\alpha}} = E_L - E_K$$

$$E_L = \frac{hc}{\lambda_{K\alpha}} + E_K = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J s} \times 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}}{2,75 \times 10^{-10} \text{ m}} + (-4,980 \text{ keV})$$
$$= 7,2235 \times 10^{-16} \text{ J} - 4,980 \text{ keV} = \frac{7,2235 \times 10^{-16}}{1,602 \times 10^{-19}} \text{ eV} - 4,980 \text{ keV}$$

$$E_L = 4,509 \text{ keV} - 4,980 \text{ keV} = -0,471 \text{ keV}$$