

## Atomska fizika

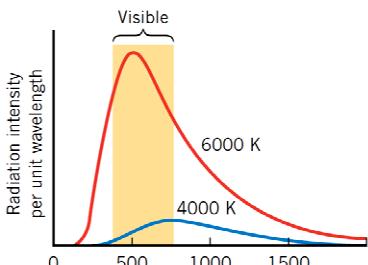
### Sadržaj

Kvantna svojstva elektromagnetskog zračenja.	391	Atomski spektri i modeli atoma – pregled	399
Ultravioletna katastrofa	392	Borov model atoma	401
Plankov zakon zračenja.		Kvantno-mehanički model atoma	405
Bolmanov i Vinov zakon.	393	Atomi sa više elektrona i Paulijev princip	407
Fotoelektrični efekat	395	Atomski spektri	410
Komptonovo rasejanje	398	X-zraci	411

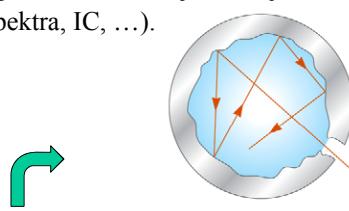
390

### Kvantna svojstva elektromagnetskog zračenja. "Ultravioletna katastrofa".

- Sva tela, na bilo kojoj temperaturi, stalno emituju energiju u obliku elektromagnetskih talasa – to je tzv. **termičko** (toplotno) zračenje.
- Na datoј temperaturi  $T$  **intenzitet** elektromagnetskih talasa koje emituje bilo koje telo zavisi od talasne dužine  $\lambda$  (vidljivi deo spektra, IC, ...).



Intenzitet emitovane energije absolutno crnog tela (eksperimentalne činjenice)



- **Absolutno crno telo** je savršeni apsorber energije elektromagnetskih talasa koju istovremeno i reemmituje nazad u prostor oko sebe.
- Sa porastom temperature tela, **maksimum intenziteta** zračenja se pomera u oblast manjih talasnih dužina  $\lambda$  (i većih frekvencija  $v$ ).

391

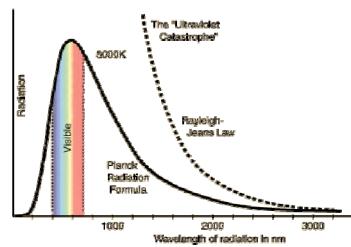
## "Ultravioletna katastrofa".

- Rejli i Džins su pokušali da objasne eksperimentalnu krivu **gustine energije zračenja** absolutno crnog tela  $\rho(v)$  (zagrejanog tela) u vidu elektromagnetskih talasa. Oni su njegove **atome** poistovetili sa **osikatorima** (naelektrisane čestice – električnim dipolima) koji pri svom oscilatornom (ubrzavajućem) kretanju stvaraju elektromagnetsko zračenje. Energija oscikatora **kontinualno** zavisi od temperature.

Energija oscikatora:  $E = k_B T$

$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K Boltzmanova konstanta

- Rezultat je kriva koja pokazuje poklapanje sa eksperimentom **samo u oblasti niskih frekvencija** (velikih talasnih dužina), ali ne i u oblasti kraćih  $\lambda$  (UV-oblasci).
- Maks Plank (1900.) uzima da se energija oscikatora (**rezonatora**) ne menja kontinualno, već **diskretno**, u tačno definisanim koracima – kvantima (tj. da je **kvantovana veličina**). Energija kvanta zavisi od frekvencije zračenja  $v$ .



$$E_n = n h v \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

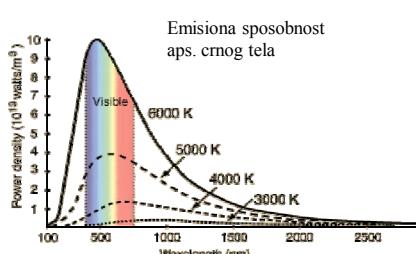
$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Js Plankova konstanta

$n$  – kvantni broj (celobrojne vrednosti)

392

## Plankov zakon zračenja. Boltzmanov i Vinov zakon.

- Plankov zakon zračenja** definiše gustinu energije zračenja  $\rho$  crnog tela kao funkciju temperature  $T$  i frekvencije  $v$ :



$$\rho(T, v) = \frac{8\pi v^2}{c^3} \frac{hv}{e^{\frac{hv}{k_B T}} - 1}$$

- Uvođenjem hipoteze o **kvantovanju** energije oscikatora (atoma crnog tela) uspešno su objašnjeni eksperimentalni rezultati za  $\rho(v)$  crnog tela.
- Ukupna energija** koju zrači crno telo na **svim frekvencijama** (u jedinici vremena sa jedinične površine), dakle **snaga zračenja**, zavisi samo od temperature crnog tela – **Štefan-Boltzmanov zakon zračenja**.

$$W_{ec} = \frac{P}{S} = \sigma T^4$$



$\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup> Štefan-Boltzmanova konstanta

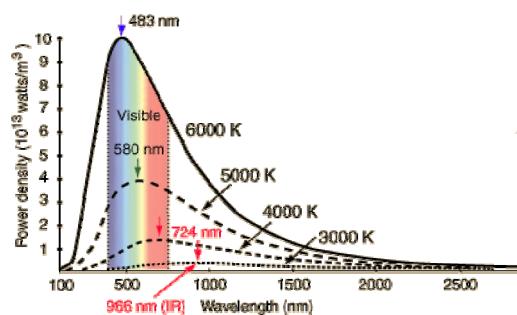
393

## Plankov zakon zračenja. Boltzmanov i Vinov zakon.

- Iz Plankovog zakona se može izvesti i **Vinov zakon pomeranja** – definiše zavisnost frekvencije  $v_m$  (ili talasne dužine  $\lambda_m$ ), koja odgovara maksimumu gustine energije zračenja, od temperature  $T$  crnog tela:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

$b=2.9 \cdot 10^{-3} \text{ Km}$   
Vinova konstanta

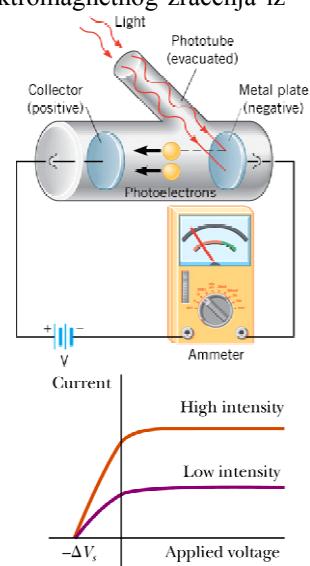


394

## Fotoelektrični efekat

- Fotoelektrični efekat** je pojava da se pod uticajem elektromagnetskog zračenja iz metala oslobađaju elektroni.
- 1. Fotoni elektromagnetskog zračenja veće **frekvencije** (manje  $\lambda$ ) uzrokuju veće **kinetičke** energije fotoelektrona.
- 2. Veći **intenzitet** svetlosti (veći svetlosni fluks  $\Phi$ ) uzrokuje samo **povećan broj** fotoelektrona, a ne i njihovu veću kinetičku energiju.
- Prema talasnoj teoriji svetlosti, međutim, veći intenzitet bi, nasuprot tome, trebao uzrokovati i **veće kinetičke energije** izbijenih elektrona iz metala, što eksperimentom **nije** utvrđeno.
- Kinetička energija fotoelektrona se određuje na osnovu razlike potencijala (tzv. zaustavnog napona  $-\Delta V_s$ ) između elektroda u vakuumskoj cevi:

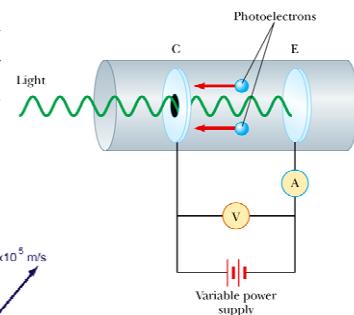
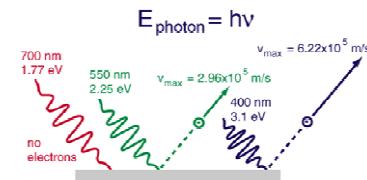
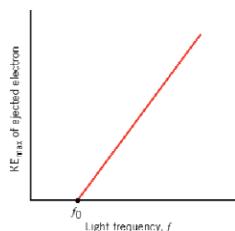
$$E_k = e\Delta V_s$$



395

## Fotoelektrični efekat

3. Fotoefekat se javlja samo ako je talasna dužina upadnog zračenja manja od neke granične  $\lambda_0$  – **crvena granica** fotoefekta. Ona je karakteristična veličina za dati materijal koji ispoljava fotoefekat.



4. Fotoelektroni se emituju praktično **trenutno** iz metala (posle oko  $10^{-9}$  s), čak i pri malim intenzitetima upadne svetlosti, iako klasična talasna teorija predviđa izvesno **vreme** neophodno za pojavu efekta, dok se dovoljno energije ne apsorbuje u metalu da elektron napusti njegovu površinu.

396

## Fotoelektrični efekat. Ajnštajnova formula.

- Prema Ajnštajnovom tumačenju, **fotoni** (**paketi energije**) elektromagnetskog zračenja, koji nastaju kada oscilatori materije koja emituje svetlost, skokovito menjaju vrednost svog energetskog stanja) u sudaru sa vezanim elektronom u metalu deo energije predaju za vršenje **izlaznog rada** iz metala *A* (izbijanje elektrona), a ostatak energije predstavlja **kinetičku energiju**  $E_k$  elektrona.

$$hv = A + \frac{mv^2}{2}$$

- Ovim tumačenjem se **svetlosti pripisuju korpuskularna** (čestična) svojstva, iako se ovde radi o kvazi-čestici, čestici bez mase, koja postoji samo pri kretanju. Drugim rečima, elektromagnetno zračenje, zavisno od pojave, manifestuje **dualistički** (i talasni i čestični) karakter.
- Spoljašnji fotoefekat** – kada fotoelektroni imaju dovoljnu energiju da izadu u spoljašnji prostor.
- Unutrašnji fotoefekat** (kod dielektrika i poluprovodnika) – elektroni ne napuštaju materijal, već se samo pobuđuju u viša energetska stanja i povećavaju provodljivost materijala.
- Primena: **fotoćelije, fotootpornici, fotomultiplikatori, solarne čelije, ...**

397

## Komptonovo rasejanje (efekat)

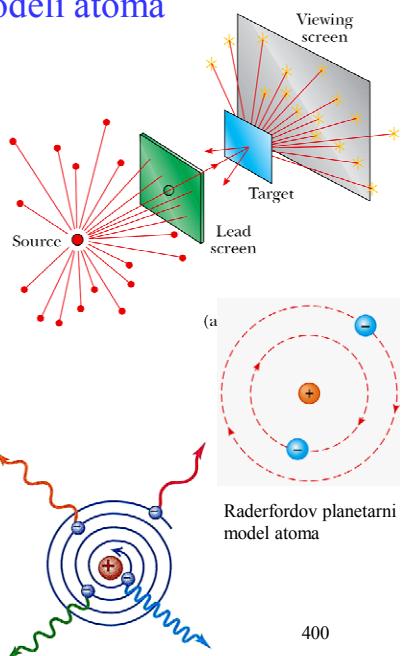
- Za razliku od fotoefekta gde fotoni (kvanti) elektromagnetskog zračenja predaju celokupnu svoju energiju elektronu, postoji i efekat **rasejanja** fotona na slobodnim (slabo vezanim) elektronima, tzv. **Komptonovo rasejanje**.
  - Artur Kompton je eksperimentom utvrdio (1923.) da monohromatski X-zraci (deo spektra elektromagnetskog zračenja), rasejani na kristalnoj materiji (kalcit), delimično menjaju svoju talasnu dužinu (od neke  $\lambda$  do  $\lambda'$ ).
  - Na rezultate eksperimenta primjenjeni su **zakoni održanja energije i količine kretanja**, kao i u slučaju elastičnog sudara dve materijalne čestice.
  - U zavisnosti od **ugla rasejanja**, različita je promena talasne dužine fotona  $\Delta\lambda$ , tj. *Komptonov pomeraj*.
- $$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$
- $m_e$  - masa elektrona
- 
- Original position of the electron
- Scattered photon  $\lambda'$
- Incident photon  $\lambda$
- Recoiling electron
- $\theta$
- $\phi$
- $m_e$  - masa elektrona
- 398
- Komptonov efekat je dokaz **kvantne** i **čestične** prirode elektromagnetskih talasa – energija je kvantovana veličina, a fotoni (kao kvazi-čestice) poseđuju izvesnu **količinu kretanja**, koja se u sudaru sa materijom menja.

## Atomski spektri i modeli atoma - pregled

- U današnje vreme je poznato da se atom sastoji od relativno malog pozitivno nanelektrisanog jezgra ( $\approx 10^{-15}$  m) oko kojeg se kreću negativni elektroni na relativno velikom rastojanju (poluprečnik atoma  $\approx 10^{-10}$  m).
  - Priji** model atoma je **statički model** (J. Tomson; 1910.) koji uzima da je pozitivno nanelektrisanje ravnomerno raspoređeno po sferi poluprečnika  $\approx 10^{-10}$  m, a u koju su utisnuti negativni elektroni. Celokupna masa atoma odnosi se praktično na pozitivno nelektrisanje, a ne i na elektrone.
- 
- Negative electron
- Positive nucleus
- Electron
- Ovim modelom se mogla objasniti elektroliza i pražnjenje u gasovima, ali **ne** i emisija svetlosti.

## Atomski spektri i modeli atoma

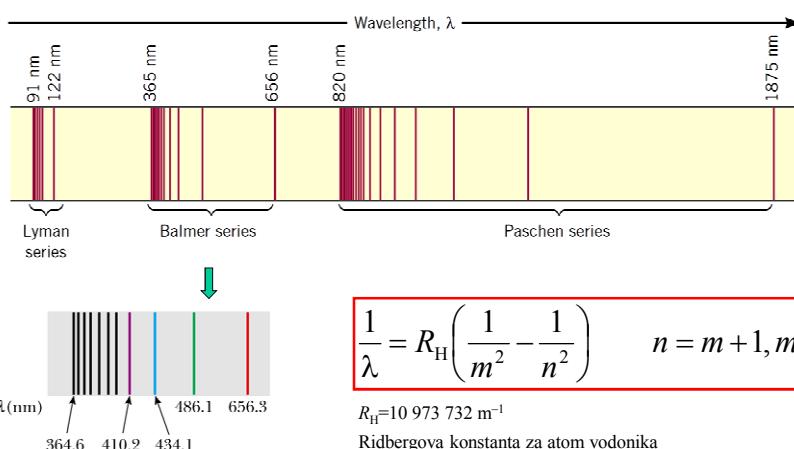
- **Drugi** model atoma je predložio Raderford (1911.) na osnovu eksperimenata sa *rasejanjem α-čestica* (jezgra He) na tankim metalnim folijama i saznanja da je masa atoma **skoncentrisana** u relativno maloj zapremini – jezgru atoma.
- **Dinamički (planetarni) model** atoma pretpostavlja da **elektroni kruže** oko jezgra, kao planete oko Sunca i da je naelektrisanje jezgra jednako naelektrisanju svih elektrona.
- Raderfordov model nije mogao da objasni **stabilnost** atoma i **linijski karakter spektara**, jer, prema *klasičnoj fizici*, ubrzano kretanje elektrona oko jezgra znači i stalnu emisiju energije u obliku elektromagnetskih talasa (kontinualni spektor) i stalno smanjenje radijusa putanje.



400

## Atomski spektri i Borov model atoma.

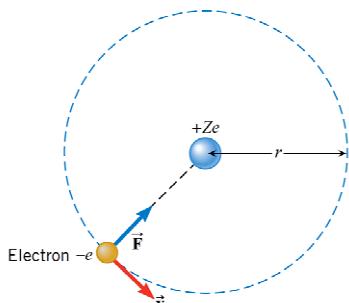
- Eksperimentalni podaci su ukazivali da pobuđeni izolovani atomi (razredeni gas) emituju **linijski spektor**, karakterističan za hemijski element koji vrši emisiju.
- **Vodonikov** spektor sadrži grupe linija (spektralne serije) čije se talasne dužine redaju po određenom pravilu.



401

## Borov model atoma.

- Nils Bor (1913.) je kombinovao Raderfordov planetarni model atoma sa idejama Planka i Ajnštajna o **kvantovanju** (diskretnosti) energije atoma i elektromagnetskog zračenja, što je rezultovalo definisanjem dva postulata kojima se opisuje atom.
- Prepostavke i postulati na kojima se bazira Borov model atoma su sledeći:
- **I Borov postulat:** Atom se može naći u nizu diskretnih stacionarnih stanja u kojima niti emituje, niti apsorbuje energiju. U tim stanjima elektron se kreće oko jezgra u atomu po kružnoj putanji pod uticajem Kulonove električne privlačne sile (ona je uzrok centripetalnog ubrzanja elektrona).



- Moment količine kretanja  $L$  elektrona u takvim stanjima ima takođe **diskrete** vrednosti i zadovoljava:

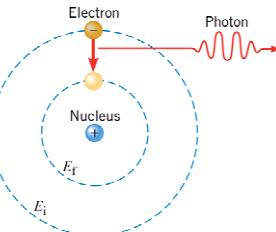
$$L = m_e v r = n \frac{\hbar}{2\pi} \quad n = 1, 2, \dots$$

402

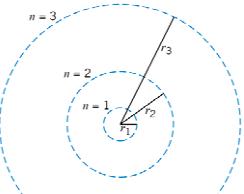
## Borov model atoma.

- **II Borov postulat:** Atom emituje ili apsorbuje energiju u vidu kvanata elektromagnetskog zračenja  $\hbar\nu$  prilikom promene stacionarnog stanja, tj. prelaska elektrona između različitih orbita.

$$\hbar\nu = E_n - E_m$$



- Drugim postulatom se opisuje linijski karakter atomske spektara.
- Na osnovu ovih postulata, izračunati su **poluprečnici** kružnih putanja elektrona  $r$  i **energije elektrona** u stacionarnim stanjima  $E$  (zbir kinetičke i potencijalne energije u električnom polju jezgra). To su takođe veličine sa **diskretnim** vrednostima – tzv. **kvantovane veličine**.



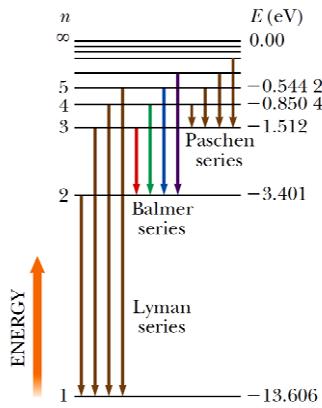
$$r_n = \left( \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2 Z} \right) n^2 \quad n = 1, 2, \dots$$

$$E_n = - \left( \frac{m e^4 Z^2}{8 \epsilon_0^2 h^2} \right) \frac{1}{n^2} \quad n = 1, 2, \dots$$

403

## Borov model atoma.

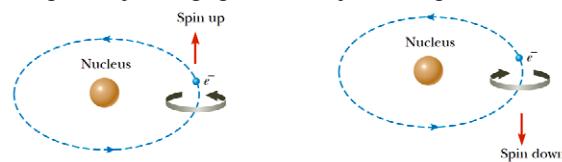
- Prema Borovoj teoriji, **energija** elektrona u stacionarnom stanju zavisi samo od jednog, **glavnog kvantnog broja  $n$** .
- Kasnije je Borov model **modifikovan** i primenjen za slučaj atoma sličnih vodoniku, sa **jednim elektronom** u omotaču atoma (recimo jon  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{2+}$ ,  $\text{Be}^{3+}$ ).
- Neuspesi Borovog modela atoma: **spektri** (položaj i intenzitet linija) **višeeklektronskih atoma**.
- Modifikacija Borovog modela od strane **Zomerfeda**:
  - uvodi pretpostavku o **eliptičnosti** orbita elektrona;
  - novi kvantni broj – **orbitalni kvantni broj  $\ell$** , koji karakteriše stanje elektrona u **različitim orbitalama** sa istom vrednošću  $n$ .



404

## Kvantno-mehanički model atoma

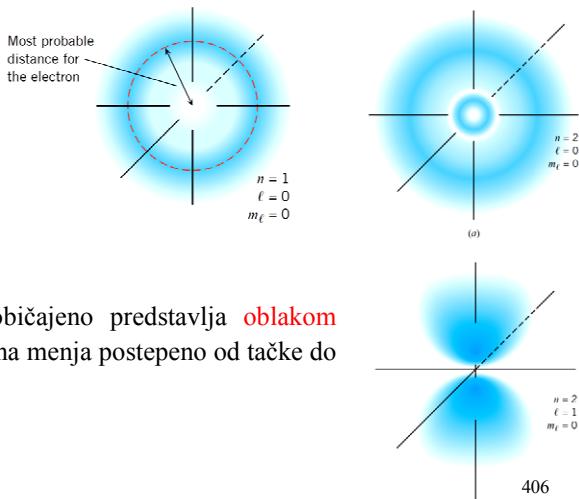
- Za razliku od Borovog shvatanja strukture atoma koje prepostavlja postojanje jednog **kvantnog broja  $n$**  kojim se određuje orbita i energija elektrona, savremena **kvantna mehanika** je u fiziku atoma uvela **4 kvantna broja** pomoću kojih **opisuje stanje elektrona** ne samo u atomu tipa vodonika već i u višeeklektronskim atomima.
- $n$**  – **glavni kvantni broj** – određuje **ukupnu energiju** atoma - ( $n=1, 2, 3, \dots$ );
- $\ell$**  – **orbitalni kvantni broj** – određuje **moment impulsa** (količine kretanja) koji elektroni poseduju zbog orbitalnog kretanja - ( $\ell=0, 1, 2, \dots, (n-1)$ );
- $m_\ell$**  – **orbitalni magnetni kvantni broj** – određuje ponašanje elektrona u atomskoj orbiti u primjenom spoljašnjem **magnetnom** polju, koje utiče na njegovu energiju - ( $m_\ell = -\ell, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, \ell$ );
- $m_s$**  – **spinski magnetni kvantni broj** – određuje **spinski moment impulsa** koji elektroni poseduju zbog spina, rotacije oko sopstvene ose - ( $m_s = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$ ).



405

## Kvantno-mehanički model atoma

- Prema *kvantno-mehaničkom pristupu*, položaj elektrona u atomu se ne može potpuno sigurno odrediti, već se može govoriti samo o većoj ili manjoj **verovatnoći nalaženja** elektrona u nekom delu prostora oko jezgra.

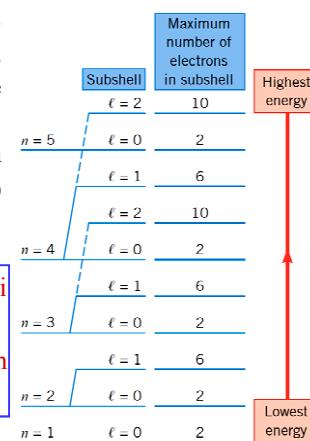


- Položaj elektrona se uobičajeno predstavlja **oblakom verovatnoće**, čija se gustina menja postepeno od tačke do tačke.

## Atomi sa više elektrona i Paulijev princip

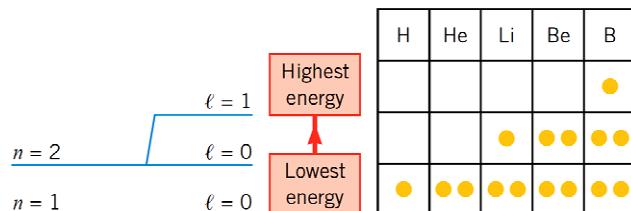
- Detaljna analiza pokazuje da **energetski nivo** svakog stanja više elektronskog atoma zavisi i od **glavnog** i od **orbitalnog** kvantnog broja.
- Problem poretka elektrona po elektronskim **ljuskama** (omotačima, koje karakteriše glavni kvantni broj  $n = K, L, M, N, O, P, \dots$  ljsuske) i **podljuskama** (koje karakteriše orbitalni kvantni broj  $\ell$  – u okviru nje su tzv. s, p, d, f, ... orbitale) kod atoma sa više elektrona u osnovnom (stabilnom) stanju rešio je Wolfgang **Pauli** (1925.) definisanjem tzv. **principa zabrane**:

- U atomu dva elektrona ne mogu imati iste vrednosti sva 4 kvantna broja ( $n, \ell, m_\ell, m_s$ ).
- Ili: Dva elektrona u atomu se ne mogu naći u istom kvantnom stanju.



## Atomi sa više elektrona i Paulijev princip

- Popunjavanje atomskih ljudski elektronima ide od najnižih kvantnih stanja (energetskih nivoa).
- Raspored elektrona po kvantnim stanjima naziva se **elektronska konfiguracija atoma**.

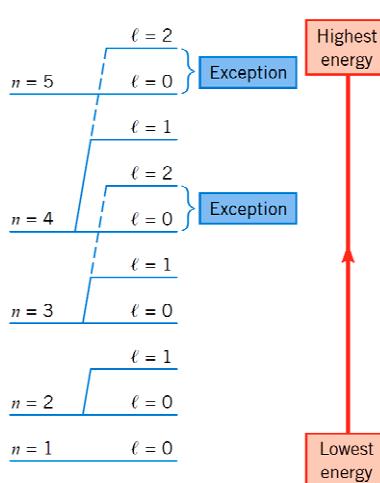


- Kod lakih elemenata ( $Z < 19$ ), elektronske ljudske se popunjavaju redom.

408

## Atomi sa više elektrona i Paulijev princip

- Kod atoma sa više elektrona, 19-ti elektron ne popunjava 3d podljusku, već 4s podljusku sa nižom energijom, a slične anomalije se zapažaju i na višim energetskim stanjima elektrona.



Number of Electrons in Filled Subshells and Shells			
Shell	Subshell	Number of Electrons in Filled Subshell	Number of Electrons in Filled Shell
K ( $n = 1$ )	$s(\ell = 0)$	2	2
L ( $n = 2$ )	$s(\ell = 0)$	2	8
	$p(\ell = 1)$	6	
M ( $n = 3$ )	$s(\ell = 0)$	2	18
	$p(\ell = 1)$	6	
	$d(\ell = 2)$	10	
N ( $n = 4$ )	$s(\ell = 0)$	2	32
	$p(\ell = 1)$	6	
	$d(\ell = 2)$	10	
	$f(\ell = 3)$	14	

409

## Atomski spektri

- Atomski spektri su posledica **prelaska elektrona** između različitih elektronskih energetskih stanja okarakterisanih kvantnim brojevima.
- Utvrđeno je da atom **ne može** emitovati zračenje prelaskom sa bilo kojeg početnog na bilo koje krajnje stanje. Za neke parove stanja, takvi prelazi su **zabranjeni**, a za neke – **dozvoljeni**.
- Složenim proračunima su dobijena **opšta pravila** koja ukazuju na moguće prelaze elektrona. To su tzv. **pravila izbora**.
- Jednoelektronski prelazi** se mogu vršiti između stanja sa proizvoljnim vrednostima glavnog kvantnog broja  $n$ , jer su pravila izbora ograničena samo na orbitalni i magnetni kvantni broj.
- Atomski spektri koji su posledica promene stanja **više elektrona** složeniji su i opisuju se pravilima izbora koji u sebe uključuju dodatne uslove.

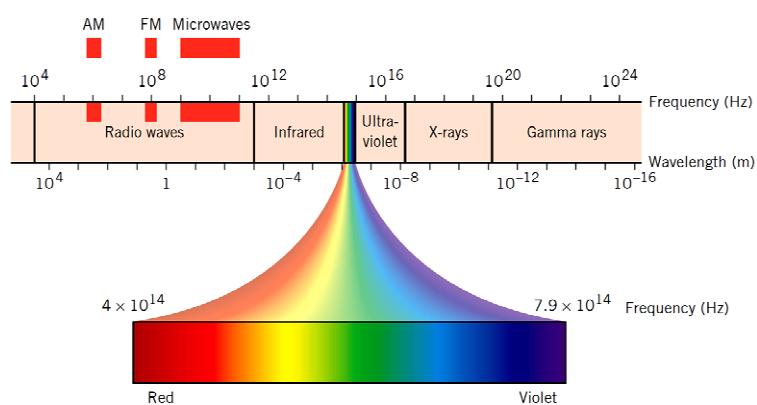
$$\Delta\ell = \ell_f - \ell_i = \pm 1$$

$$\Delta m_\ell = m_{\ell f} - m_{\ell i} = 0, \pm 1$$

410

## X-zraci

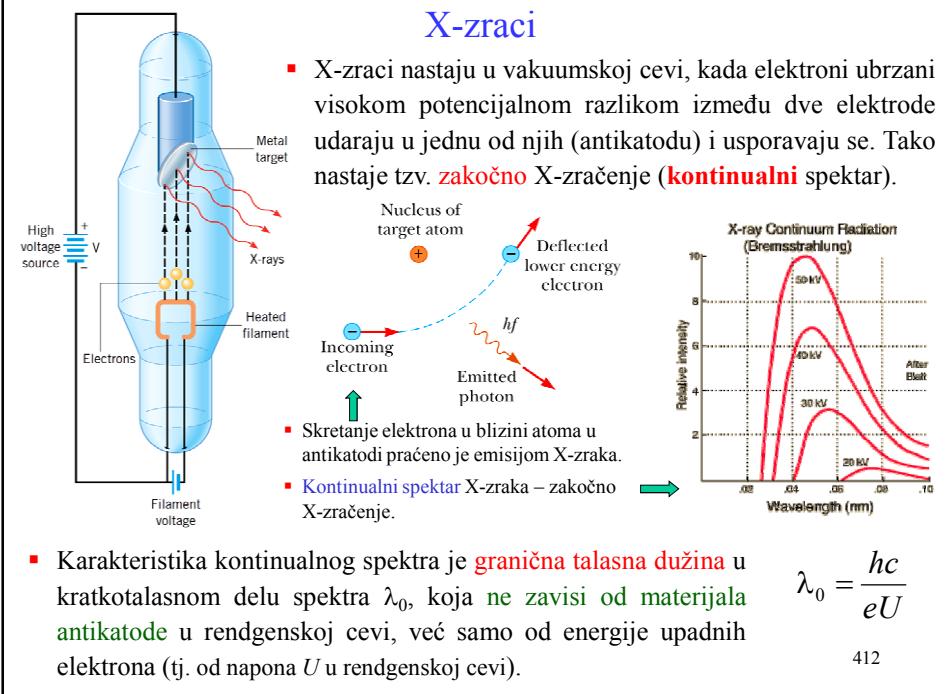
- X-zraci (rendgenski zraci, W. Roentgen, 1885.) su deo spektra elektromagnetskog zračenja u oblasti veoma kratkih talasnih dužina, reda  $10^{-10}$  m.



411

## X-zraci

- X-zraci nastaju u vakuumskoj cevi, kada elektroni ubrzani visokom potencijalnom razlikom između dve elektrode udaraju u jednu od njih (antikatodu) i usporavaju se. Tako nastaje tzv. **zakočno X-zračenje (kontinualni spektar)**.



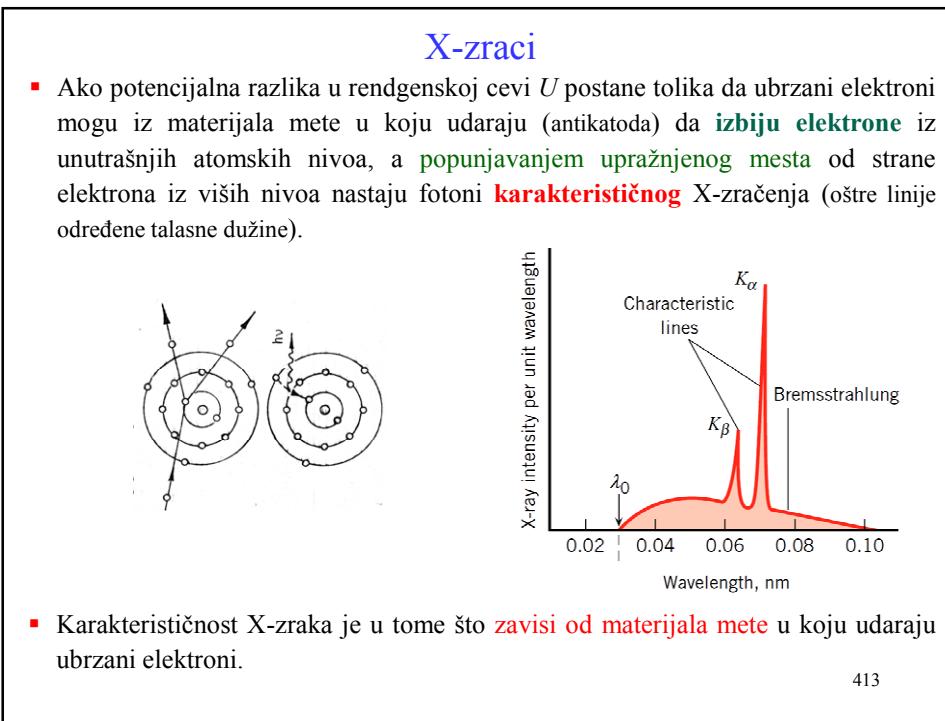
- Karakteristika kontinualnog spektra je **granična talasna dužina** u kratkotalasnom delu spektra  $\lambda_0$ , koja **ne zavisi od materijala antikatode** u rendgenskoj cevi, već samo od energije upadnih elektrona (tj. od napona  $U$  u rendgenskoj cevi).

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eU}$$

412

## X-zraci

- Ako potencijalna razlika u rendgenskoj cevi  $U$  postane tolika da ubrzani elektroni mogu iz materijala mete u koju udaraju (antikatoda) da **izbiju elektrone** iz unutrašnjih atomskih nivoa, a **popunjavanjem upražnjenog mesta** od strane elektrona iz viših nivoa nastaju fotoni **karakterističnog X-zračenja** (oštре linije određene talasne dužine).



- Karakterističnost X-zraka je u tome što **zavisi od materijala mete** u koju udaraju ubrzani elektroni.

413