

Atomska fizika

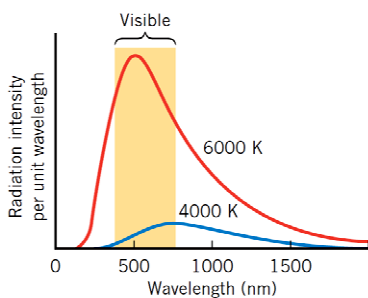
Sadržaj

Kvantna svojstva elektromagnetnog zračenja.	286	Atomski spektri i modeli atoma – pregled	294
Ultravioletna katastrofa	287	Borov model atoma	297
Plankov zakon zračenja.		Kvantno-mehanički model atoma	300
Bolcmanov i Vinov zakon.	288	Atomi sa više elektrona i Paulijev princip	302
Fotoelektrični efekat	290		
Komptonovo rasejanje	293		

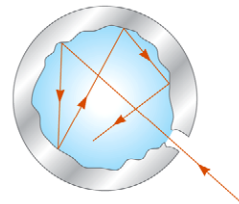
285

Kvantna svojstva elektromagnetnog zračenja. "Ultravioletna katastrofa".

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



Intenzitet emitovane energije apsolutno crnog tela (eksperimentalne činjenice)



- **Apsolutno crno telo** je savršeni apsorber energije elektromagnetnih talasa koju istovremeno i reemituje nazad u prostor oko sebe.
- Sa porastom temperature tela, **maksimum intenziteta** zračenja se pomera u oblast manjih talasnih dužina λ (i većih frekvencija ν).

286

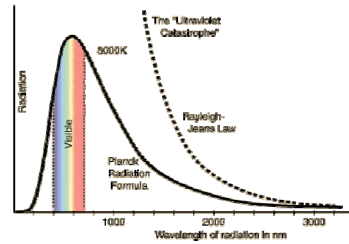
"Ultravioletna katastrofa".

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

Energija oscilatora: $E = kT$

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K Bolcmanova konstanta

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



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

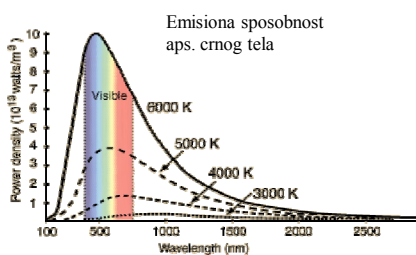
$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Js Plankova konstanta

n – kvantni broj (celobrojne vrednosti)

287

Plankov zakon zračenja. Bolcmanov i Vinov zakon.

- Plankov zakon zračenja** definiše **gustinu energije zračenja** ρ crnog tela kao funkciju temperature T i frekvencije ν :



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

- Uvođenjem hipoteze o **kvantovanju** energije oscilatora (atoma crnog tela) uspešno su objašnjeni eksperimentalni rezultati za $\rho(\nu)$ 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-Bolcmanov zakon zračenja**.

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



$\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴ Štefan-Bolcmanova konstanta

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

288

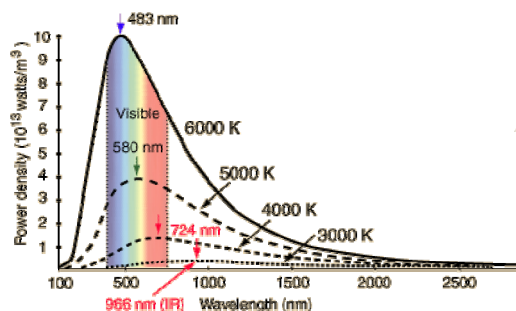
Plankov zakon zračenja. Bolcmanov i Vinov zakon.

- Iz Plankovog zakona se može izvesti i **Vinov zakon pomeranja** – definiše zavisnost frekvencije ν_m (ili talasne dužine λ_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



289

Fotoelektrični efekat

- Fotoelektrični efekat** je pojava da se pod uticajem elektromagnetnog zračenja iz metala oslobađaju elektroni.

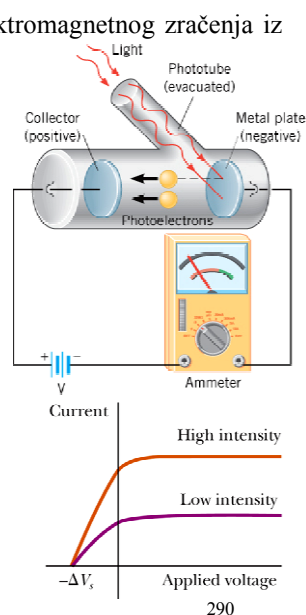
1. Fotoni elektromagnetnog zračenja veće **frekvencije** (manje λ) uzrokuju veće **kinetičke** energije fotoelektrona.

2. Veći **intenzitet** svetlosti (veći svetlosni fluks Φ) 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:

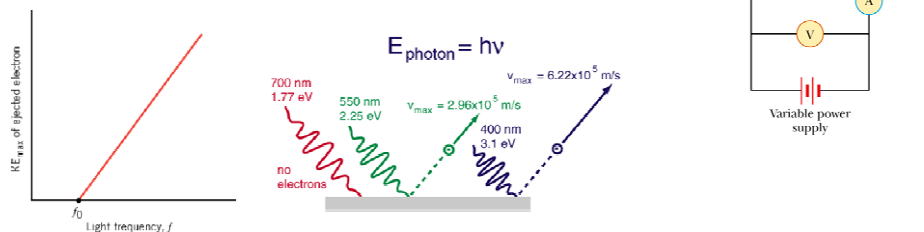
$$E_k = e\Delta V_s$$



290

Fotoelektrični efekat

3. Fotoefekat se javlja samo ako je talasna dužina upadnog zračenja manja od neke granične λ_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.

291

Fotoelektrični efekat. Ajnštajnova formula.

- Prema Ajnštajnovom tumačenju, **fotoni** (**paketi energije** elektromagnetnog 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.

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

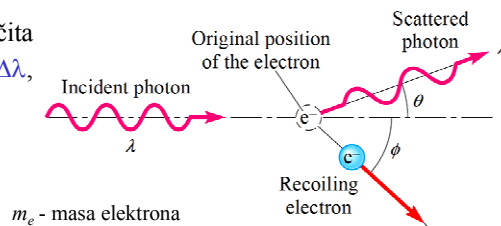
- Ovim tumačenjem se **svetlosti pripisuju** **korpuskularna** (čestična) svojstva, iako se ovde radi o kvazi-čestici, čestici bez mase, koja postoji samo pri kretanju. Drugim rečima, elektromagnetno zračenje, zavisno od pojave, manifestuje **dualistički** (i talasni i čestični) karakter.
- Spoljašnji fotoefekat** – kada fotoelektroni imaju dovoljnu energiju da izađu 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: **fotocelije, fotootpornici, fotomultiplikatori, solarne ćelije, ...**

292

Komptonovo rasejanje (efekat)

- Za razliku od fotoefekta gde fotoni (kvanti) elektromagnetnog 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 elektromagnetnog zračenja), rasejani na kristalnoj materiji (kalcit), delimično menjaju svoju talasnu dužinu (od neke λ do λ').
- Na rezultate eksperimenta primenjeni 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*.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

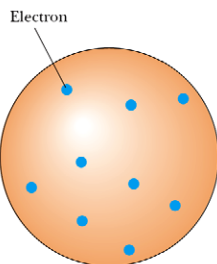
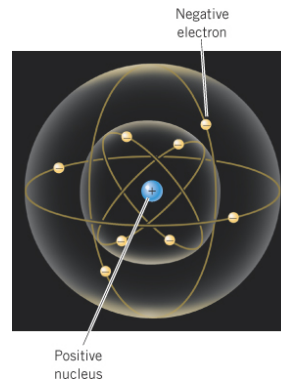


- Komptonov efekat je dokaz **kvantne** i **čestične** prirode elektromagnetnih talasa – **energija je kvantovana veličina**, a **fotoni** (kao kvazi-čestice) poseduju izvesnu **količinu kretanja**, koja se u sudaru sa materijom menja.

293

Atomski spektri i modeli atoma - pregled

- U današnje vreme je poznato da se atom sastoji od relativno malog pozitivno naelektrisanog jezgra ($\approx 10^{-15}$ m) oko kojeg se kreću negativni elektroni na relativno velikom rastojanju (poluprečnik atoma $\approx 10^{-10}$ m).
- **Prvi** model atoma je **statički model** (J. Thomson; 1910.) koji uzima da je pozitivno naelektrisanje ravnomerno raspoređeno po sferi poluprečnika $\approx 10^{-10}$ m, a u koju su utisnuti negativni elektroni. Celokupna masa atoma odnosi se praktično na pozitivno naelektrisanje, a ne i na elektrone.

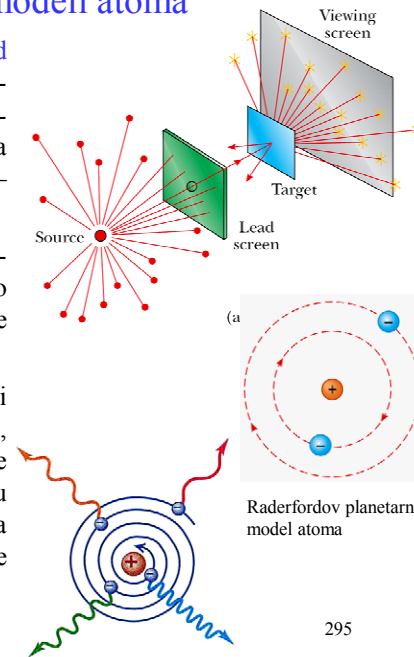


- Ovim modelom se mogla objasniti elektroliza i pražnjenje u gasovima, ali **ne** i **emisija svetlosti**.

294

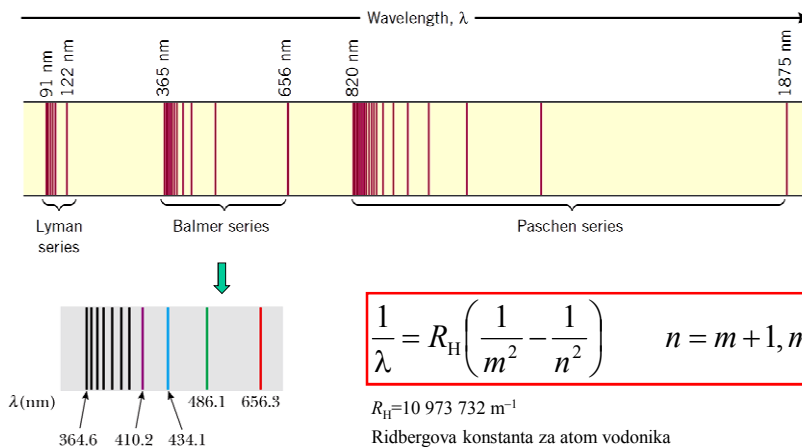
Atomski spektri i modeli atoma

- **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 elektromagnetnih talasa (kontinualni spektar) i stalno smanjenje radijusa putanje.



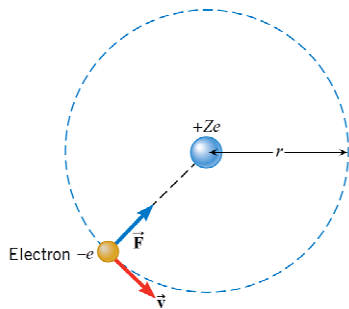
Atomski spektri i Borov model atoma.

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



Borov model atoma.

- Nils Bor (1913.) je kombinovao Raderfordov planetarni model atoma sa idejama Planka i Ajnštajna o kvantovanju (diskretnosti) energije atoma i elektromagnetnog zračenja, što je rezultovalo definisanjem dva postulata kojima se opisuje atom.
- Pretpostavke 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 diskretne vrednosti i zadovoljava:

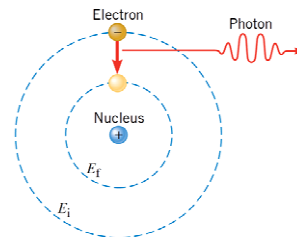
$$L = m_e v r = n \frac{h}{2\pi} \quad n = 1, 2, \dots$$

297

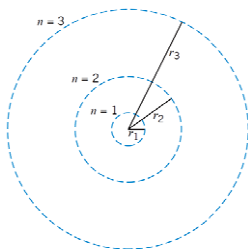
Borov model atoma.

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

$$h\nu = E_n - E_m$$



- Drugim postulatom se opisuje linijski karakter atomskih 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.



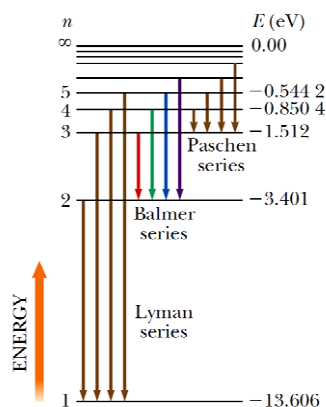
$$r_n = \left(\frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2 Z} \right) n^2 \quad n = 1, 2, \dots$$

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

298

Borov model atoma.

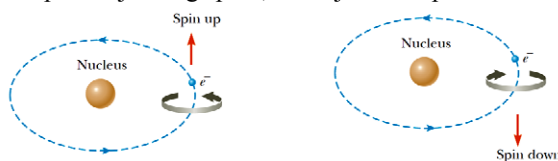
- Prema Borovoj teoriji, **energija** elektrona u stacionarnom stanju zavisi samo od jednog, **glavnog kvantnog broja n** .
- Kasnije je Borov model **modifikovan** i primenjen za slučaj atoma sličnih vodoniku, sa *jednim* elektronom u omotaču atoma (recimo jon He^+ , Li^{2+} , Be^{3+}).
- Neuspesi Borovog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



299

Kvantno-mehanički model atoma

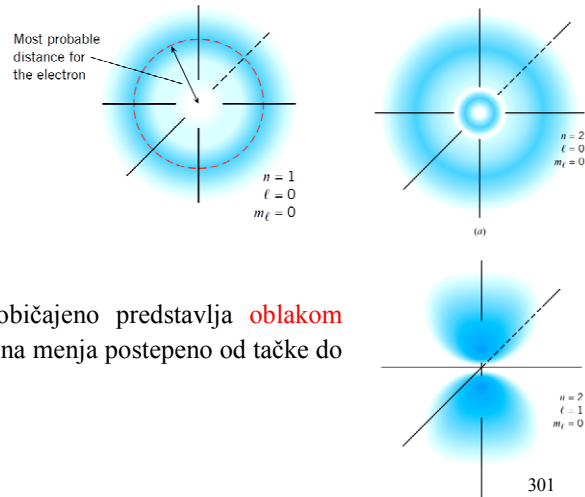
- Za razliku od Borovog shvatanja strukture atoma koje pretpostavlja postojanje **jednog kvantnog broja n** kojim se određuje orbita i energija elektrona, savremena **kvantna mehanika** je u fiziku atoma uvela **4 kvantna broja** pomoću kojih **opisuje stanje elektrona** ne samo u atomu tipa vodonika već i u višeelektronskim atomima.
- n** – glavni kvantni broj – određuje **ukupnu energiju** atoma - ($n=1, 2, 3, \dots$);
- ℓ** – orbitalni kvantni broj – određuje **moment impulsa** (količine kretanja) koji elektroni poseduju zbog orbitalnog kretanja - ($\ell=0, 1, 2, \dots, (n-1)$);
- m_ℓ** – orbitalni magnetni kvantni broj – određuje ponašanje elektrona u atomskoj orbiti u primenjenom 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 - ($m_s = -1/2, +1/2$).



300

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.

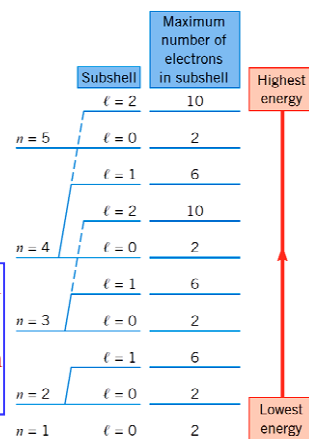


- Položaj elektrona se uobičajeno predstavlja **oblakom verovatnoće**, čija se gustina menja postepeno od tačke do tačke.

Atomi sa više elektrona i Paulijev princip

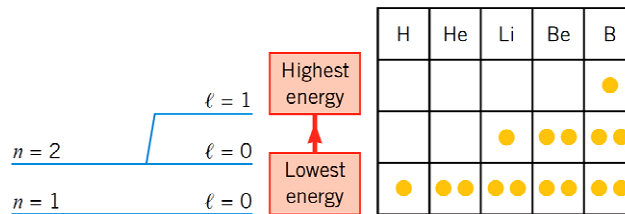
- Detaljna analiza pokazuje da **energetski nivo** svakog stanja višeelektronskog atoma zavisi i od **glavnog** i od **orbitalnog** kvantnog broja.
- Problem poretka elektrona po elektronskim **ljuskama** (omotačima, koje karakteriše glavni kvantni broj n – K, L, M, N, O, P, ... ljuske) i **podljuskama** (koje karakteriše orbitalni kvantni broj ℓ – 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, ℓ, m_ℓ, m_s).
- Ili: Dva elektrona u atomu se ne mogu naći u istom kvantnom stanju.



Atomi sa više elektrona i Paulijev princip

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

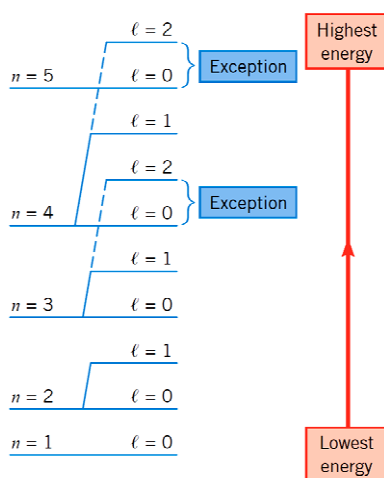


- Kod lakih elemenata ($Z < 19$), elektronske ljuske se popunjavaju **redom**.

303

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 ($n=1$)	$s(l=0)$	2	2
L ($n=2$)	$s(l=0)$	2	8
	$p(l=1)$	6	
M ($n=3$)	$s(l=0)$	2	18
	$p(l=1)$	6	
	$d(l=2)$	10	
N ($n=4$)	$s(l=0)$	2	32
	$p(l=1)$	6	
	$d(l=2)$	10	
	$f(l=3)$	14	

304