



Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Razlikovni studiji (910/920/930/940/950)

Fizika 2

Predavanje 12

Rendgensko zračenje, Laseri.

Atomska jezgra

Dr. sc. Damir Lelas

(Damir.Lelas@fesb.hr)

damir.lelas@cern.ch)

Danas ćemo raditi:

(V. Henč-Bartolić i P. Kulišić: "Valovi i optika", poglavlje 10 i 11)

◆ Rendgensko zračenje

- kontinuirani spektar
- linijski (karakteristični) spektar
- Moseleyev zakon za karakteristični X-spektar
- primjena rendgenskog zračenja

◆ Fizika i tehnologija lasera

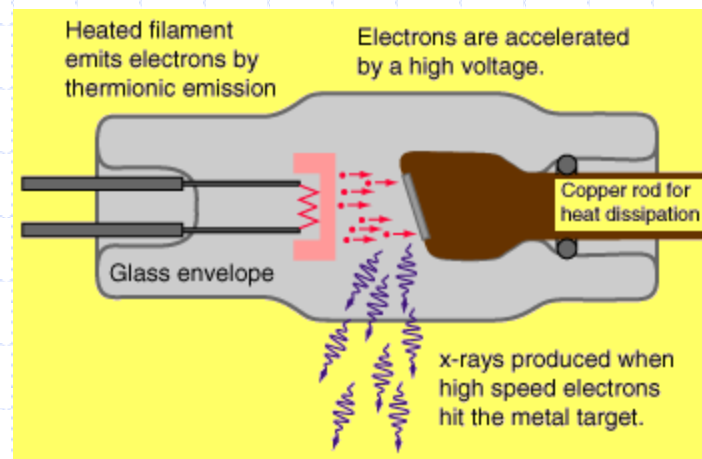
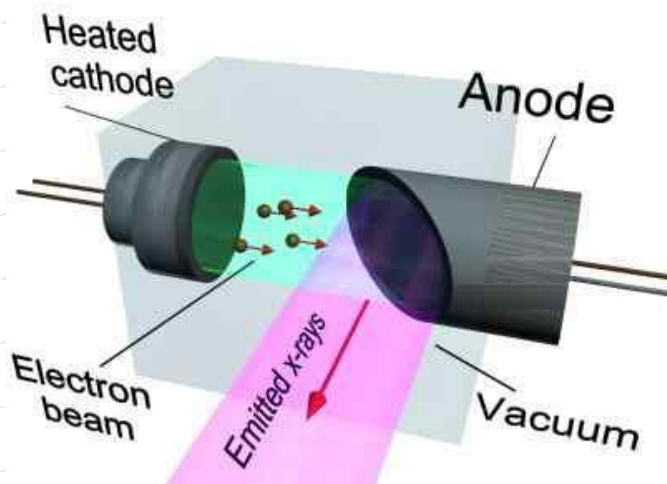
- što je laser
- princip rada lasera

◆ Atomska jezgra (uvod)

- Svojstva i struktura jezgre
- Energija vezanja jezgre
- Radioaktivnost, zakon radioaktivnog raspada

Rendgensko zračenje

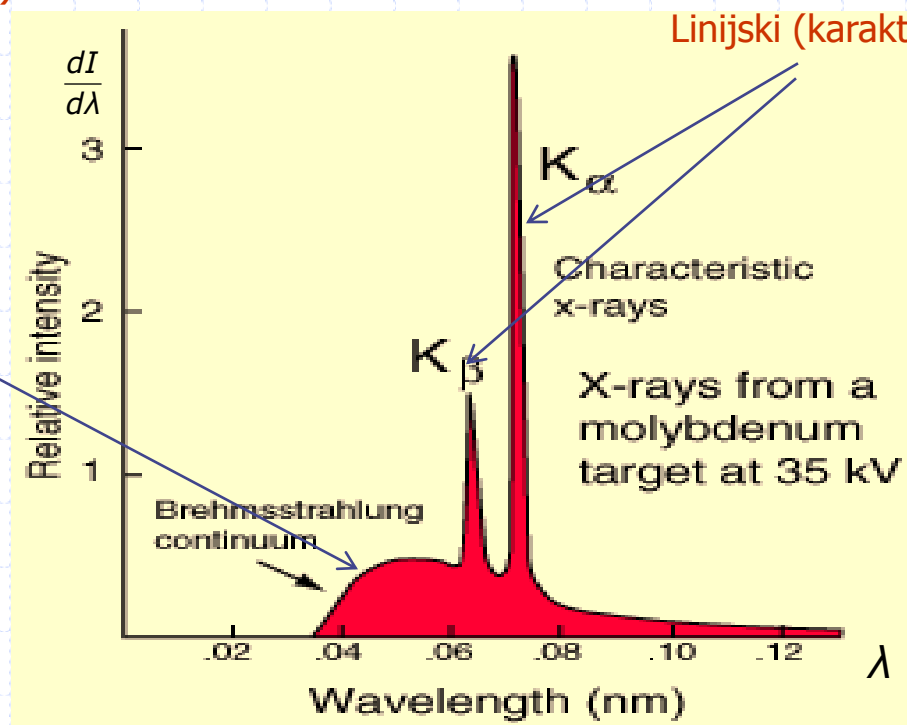
- ◆ W. K. Röntgen 1895 opazio vrlo prodorno zračenje, mada je N. Tesla još 1892 radio fotografska snimanja pomoću valova "sasvim određenog karaktera".
- ◆ X-zračenje (rendgensko zračenje) tvore elektromagnetski valovi vrlo kratkih valnih duljina: (1 pm-10 nm), a energije fotona su u području 100-10⁶ eV.
- ◆ X-zrake nastaju kad se brzi elektroni zaustave pri udaru u metu, anodu rendgenske cijevi.



Spektar rendgenskog zračenja

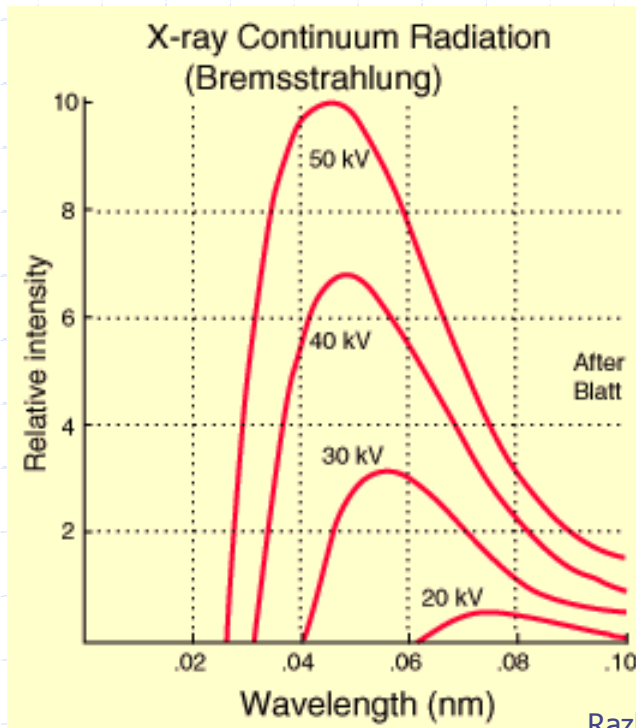
- ◆ Spektar rendgenskih zraka ovisi o energiji elektrona (naponu rendgenske cijevi (obično 10000 do 10^6 V) i o materijalu mete u koju udaraju elektroni.
- ◆ Razlikuju se dvije vrste spektra:
 - kontinuirani spektar, je odrezan na nižim valnim duljinama i ovisi samo o naponu rendgenske cijevi.
 - linijski (karakteristični) ovisi o materijalu mete u koju udaraju elektroni (anodi rendgenske cijevi).

Kontinuirani spektar je odrezan, nema valnih duljina kraćih od λ_g .

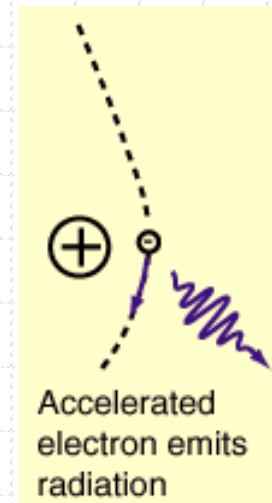


Kontinuirani spektar rendgenskog zračenja

- ◆ Kontinuirani spektar rendgenskog zračenja nastaje usporavanjem elektrona, to je tzv. **zakočno zračenje (bremsstrahlung)**, dio kinetičke energije elektrona se transformira u energiju fotona.
- ◆ U spektru nema valnih duljina kraćih od granične valne duljine λ_g
- ◆ Ova minimalna valna duljina nastaje kad upadni elektron izgubi svu svoju kinetičku energiju u jednom jedinom sudar s atomima mete.
- ◆ Foton emitiranog rendgenskog zračenja ne može imati energiju veću od kinetičke energije E_k upadnog elektrona.

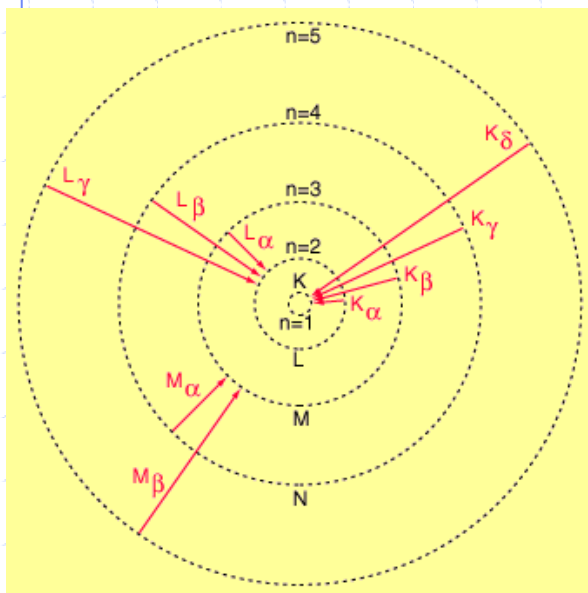


$$h\nu_g = E_k = eU \quad \lambda_g = \frac{hc}{eU}$$



Karakteristično X- zračenje

- ◆ Karakteristični spektar nastaje kad upadni elektron izbaci iz atoma jedan od elektrona i tako u jednoj od unutrašnjih ljuski nastane šupljina (npr. u K ili L ljusci).
- ◆ U nezaposjednuto stanje (šupljinu) s nižom energijom skače elektron iz ljuske s većom energijom. Razlika energija $E_n - E_m$ ($E_n > E_m$) jednaka je energiji emitiranog elektrona $h\nu = E_n - E_m$.



K-serija

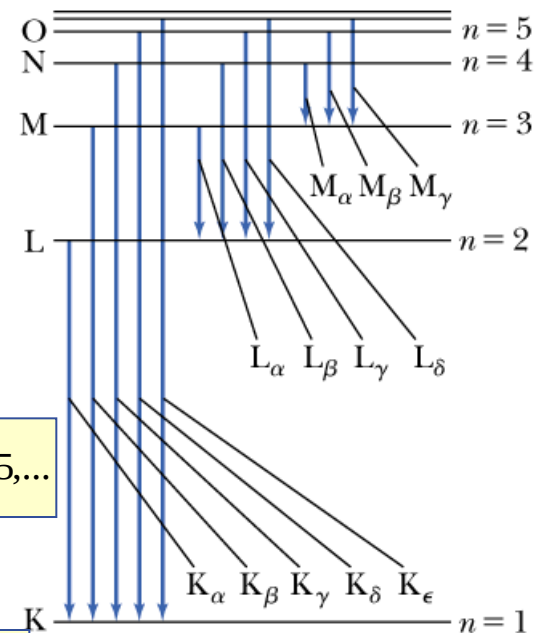
$$\nu_{\alpha} = cR(Z-1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right)$$

$$\nu_{\beta} = cR(Z-1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2} \right)$$

L-serija

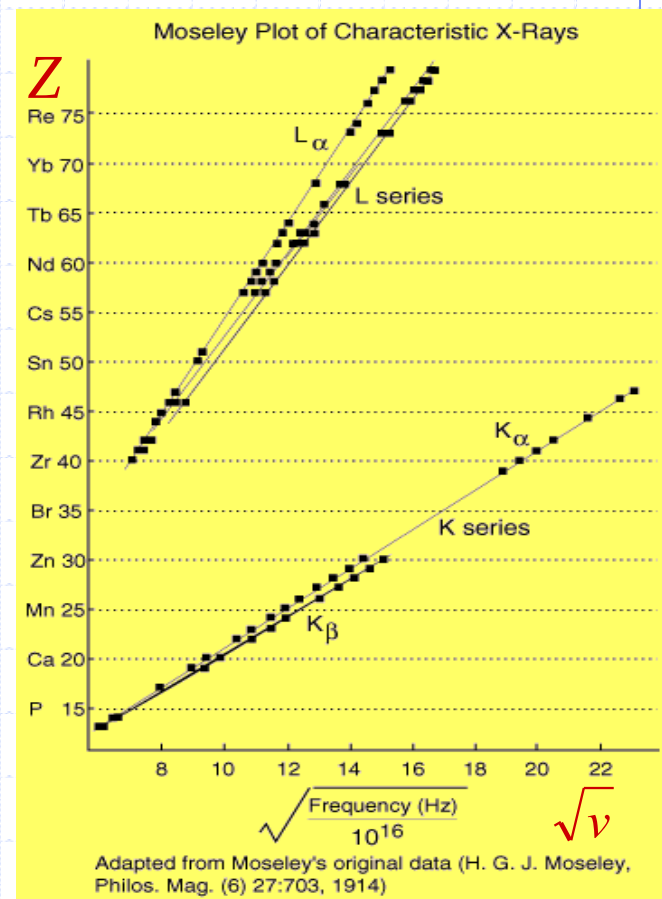
$$\nu = cR(Z-7,4)^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad m = 3, 4, 5, \dots$$

$$\nu = cR(Z-b)^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad m = 3, 4, 5, \dots$$



Moseleyev zakon za karakteristični X-spektar (1)

- ◆ 1913., Moseley je generirao karakteristične x-zrake za sve elemente koje je mogao naći – njih 38, koristeći ih kao mete koje bombardiraju elektroni u evakuiranoj cijevi.
- ◆ Uočio je da su frekvencije karakterističnih X-zraka proporcionalne kvadratu rednog broja.
- ◆ Prikazavši kvadratni korijen izmjerenih karakterističnih frekvencija u ovisnosti o rednom broju Z anode rendgenske cijevi, dobio je linearnu ovisnost o Z .
- ◆ Moseleyev rad je pokazao da se karakteristično X-zračenje treba prihvatiti kao znakovitost postojanja danog elementa.
- ◆ Položaj pojedinog elementa u prvim periodnim tablicama određivala je njegova masa, a **Moseley je pokazao da redni broj tj. naboj jezgre treba biti veličina koja određuje položaj elementa u periodnoj tablici.**



Moseleyev zakon za karakteristični X-spektar (2)

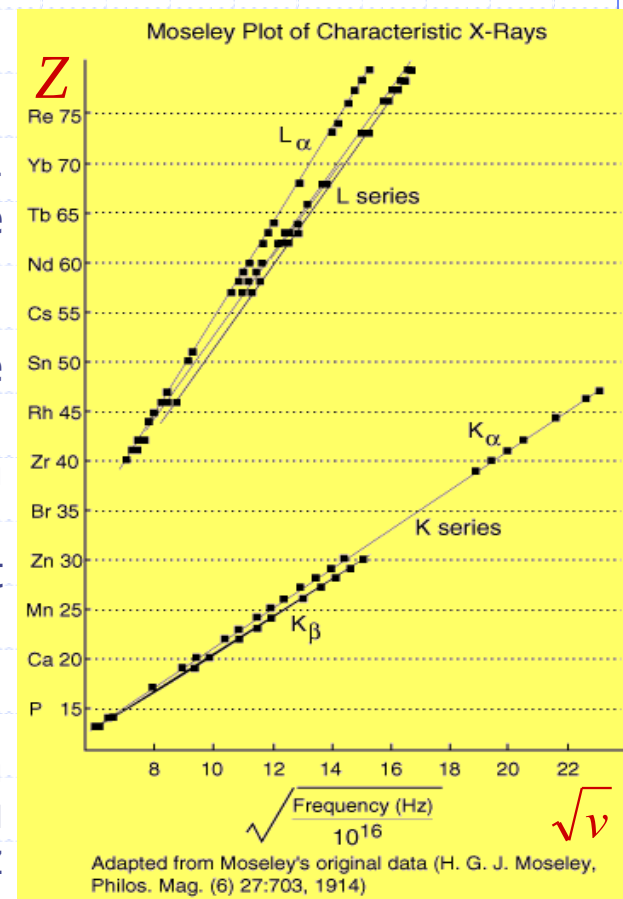
- ◆ Karakteristično X-zračenje je jednoznačan način da se identificira neki element i znatno je pouzdaniji od optičkog spektra.

Naime, karakteristično x-zračenje nastaje kad elektron popunjava šupljinu u unutrašnjim ljuskama (npr. K-ljusci), pa naboj jezgre koji jednoznačno određuje identitet elementa nije zasjenjen.

Optički spektar kod težih elemenata nastaje prijelazom elektrona između vanjskih ljusaka, te je naboj jezgre zasjenjen elektronima u unutrašnjim ljuskama.

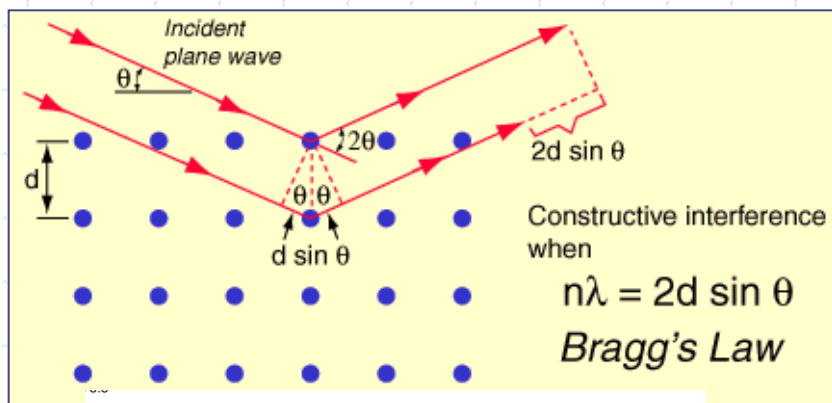
Očito optički spektar nije toliko osjetljiva proba naboja jezgre, odnosno identiteta elementa.

- ◆ Linijski spektar rendgenskog zračenja za dani element isti je bez obzira je li element u čvrstom, tekućem ili plinovitom stanju ili se nalazi u nekom kemijskom spoju.
- ◆ X-spektrometrijska metoda je nedestruktivna metoda za određivanja sastava tvari, svaki element u ispitivanom uzorku zrači karakterističnu X-zraku, a iz intenzitet pojedine karakteristične X-zrake određuje zastupljenost pojedinog elementa u uzorku.
- ◆ Široka primjena od biologije, kemije, industrije, povijesti umjetnosti, arheologije, ...



Difrakcija rendgenskog zračenja

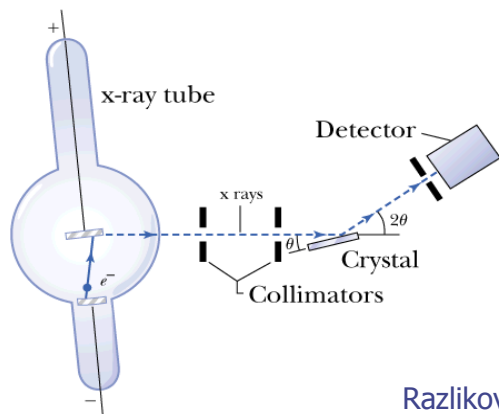
- ◆ Rendgensko zračenje je elektromagnetski val koje iskazuje svoju valnu prirodu preko efekata ogiba i interferencije kad pada na optičku rešetku čija je konstanta usporediva s valnom duljinom rendgenskog zračenja.
- ◆ Ogib rendgenskih zraka je uočen pri upadu rendgenskog zračenja na kristale (M. von Laue 1912).
- ◆ Kristali se sastoje od pravilno raspoređenih atoma u trodimenzionalnoj kristalnoj rešetci.



Uvjet za konstruktivnu interferenciju

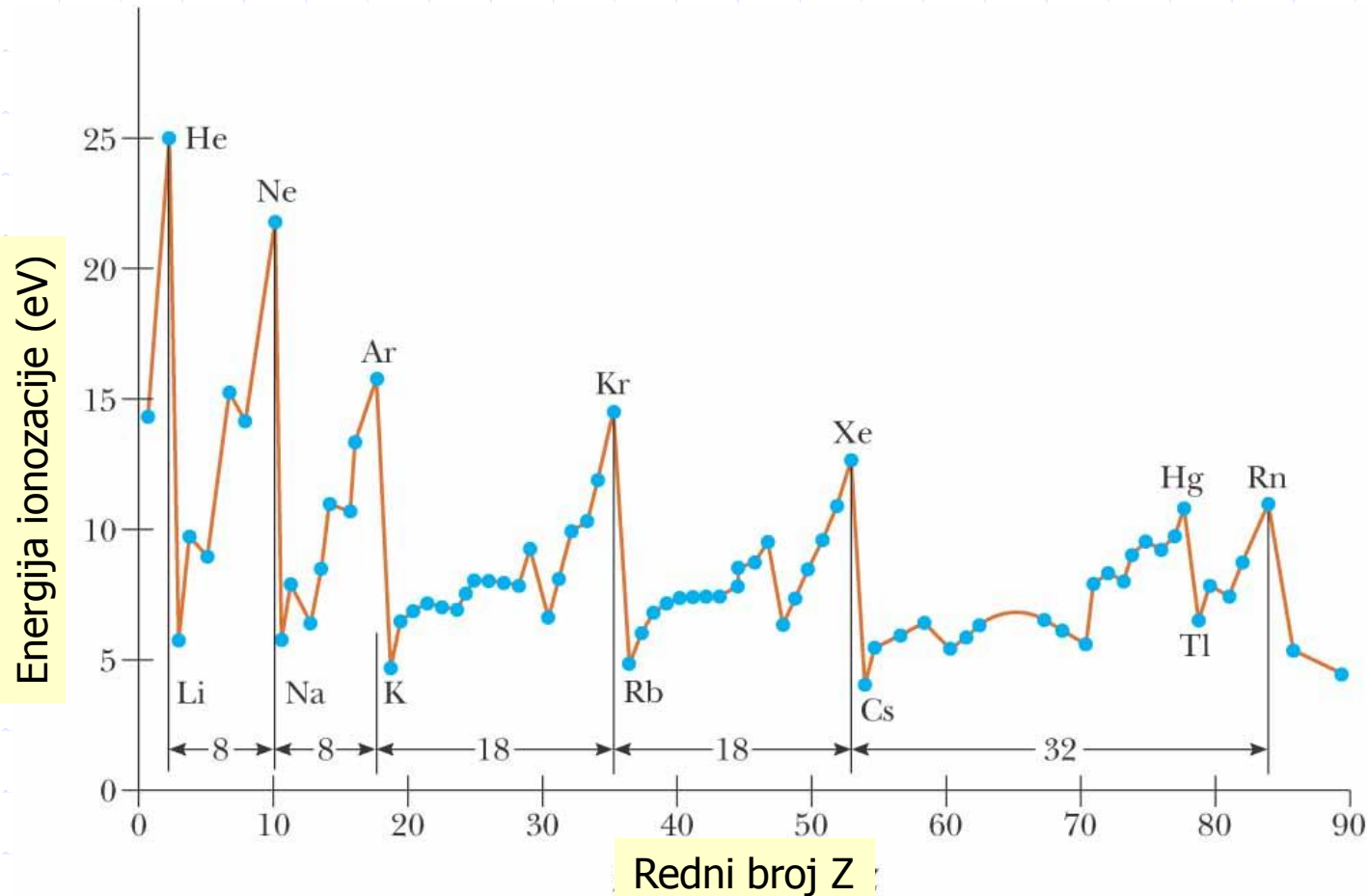
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Braggov zakon



Karakteristično X-zračenje se primjenjuje za određivanje strukture kristala i DNK molekula.

Energija ionizacije u ovisnosti o rednom broju Z



- Uočite maksimume u energije ionizacije za $Z=2, 10, 18, 36, \dots$ (vanjska elektronska ljuska kompletno popunjena).

Priča

Vrlo brzo nakon što su izumljeni 1960. godine, laseri su postali novi izvori svjetlosti u znanstvenim laboratorijima širom svijeta.

Danas se laseri koriste posvuda, u širokom spektru aplikacija poput prijenosa podataka, nadgledanja, zavarivanja, bar-code čitačima itd.

Na slici je prikazana kirurška operacija pomoću laserskog svjetla prenesenog preko svjetlovoda. Svjetlost iz lasera, kao i iz bilo kojeg drugog izvora, nastaje emisijom atoma.

Što je to onda tako drugačije kod laserske svjetlosti?

Vjerovali ili ne, odgovor ćete saznati na današnjem predavanju 😊



Laseri i laserska svjetlost (1)

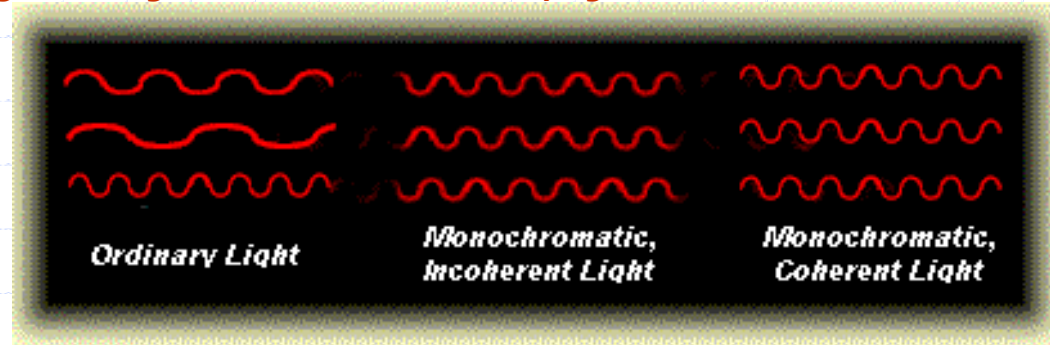
- ◆ U kasnim 1940.-tim i ranim 1960.-tim kvantna fizika je napravila dva ogromna doprinosa modernim tehnologijama: tranzistori i laseri.
- ◆ Laserska svjetlost, kao i svjetlost npr. iz obične žarulje, je emitirana pri prijelazu atoma iz višeg u niže energijskog stanje.
- ◆ Za razliku od običnih izvora svjetlosti, u laserima atomi djeluju zajedno da bi proizveli svjetlost sa sljedećim karakteristikama:

1. ***Laserska svjetlost je visoko monokromatska, tj. sastavljena od samo jedne frekvencije.***

Svjetlost iz običnih (bijelih) žarulja je sastavljena od mnoštva različitih valnih duljine i stoga sigurno nije monokromatska.

Čistoća laserske svjetlosti može biti do 1 dio u 10^{15} .

1. ***Laserska svjetlost je vrlo koherentna, tj. fotoni su međusobno u fazi.***



Primjer: <http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl>

Laseri i laserska svjetlost (2)

3. Laserska svjetlost je jako usmjerena.

Npr. laserski puls korišten za mjerenje udaljenosti do mjeseca napravio je točku na mjesečevoj površini radijusa od samo nekoliko metara.

Svjetlost iz obične žarulje može se usmjeriti pomoću leća, ali nikad tako dobro kao laserska svjetlost.

3. Laserska svjetlost može se oštro fokusirati.

Ako dva svjetlosna snopa imaju istu energiju, snop koji se fokusira u manju točku imat će veći intenzitet.

Da bi dobili intenzitet svjetlosti koju daju jaki laseri tijelo bi trebalo zagrijati na temperaturu 10^{30} K (radi usporedbe, volframova nit u žarulji je ugrijava na 3000 K, a temperatura u jezgri sunca je 10^8 K).

Kako rade laseri (1)

- ◆ Riječ **laser** je kratica engleskog izraza "light **a**mplification by the **s**timulated **e**mission of **r**adiation", što se prevodi kao "pojačanje svjetlosti stimuliranom emisijom radijacije".
- ◆ Ovaj koncept je uveo Einstein 1917. godine, dok je prvi laser napravljen 1960.
- ◆ Razmotrimo izolirani atom koji može biti ili u svom **osnovnom stanju** (stanju s najnižom energijom) E_0 , ili u **pobuđenom stanju** (stanju s višom energijom) E_x . Postoje tri različita fizikalna procesa kroz koje atom može prelaziti iz jednog u drugo stanje.

1. **Apsorpcija.**

Atom se u početku nalazi u osnovnom stanju. Ako ga stavimo u elektromagnetsko polje frekvencije ν , atom može apsorbirati energiju $h\nu$ iz tog polja i preći u više energijsko stanje. Iz zakona sačuvanja energije imamo, $h\nu = E_x - E_0$.

2. **Spontana emisija.**

Atom se na početku nalazi u pobuđenom stanju i nema vanjskog zračenja. Nakon nekog vremena, atom će spontano ("sam od sebe") preći u osnovno stanje emitirajući foton energije $h\nu$.

Ovaj proces zovemo **spontana emisija**, jer se događaj zbija bez vanjskog utjecaja. Svjetlost u običnoj žarulji je generirana na ovakav način.

U normalnim okolnostima srednje vrijeme života atoma u pobuđenom stanju, prije spontane emisije, je oko 10^{-8} s.

Međutim, za neka pobuđena stanja, ovo srednje vrijeme života može biti i do 10^5 puta veće. Takva stanja zovu se metastabilna stanja i igraju važnu ulogu u radu lasera.

Kako rade laseri (2)

3. **Stimulirana emisija.**

Atom je na početku u pobuđenom stanju, ali je ovaj put prisutno vanjsko elektromagnetsko polje frekvencije $\nu = (E_x - E_0)/h$.

Foton energije $h\nu$ može stimulirati atom na prelazak u osnovno stanje, i tijekom tog procesa emitira dodatni foton čija energija je također $h\nu$.

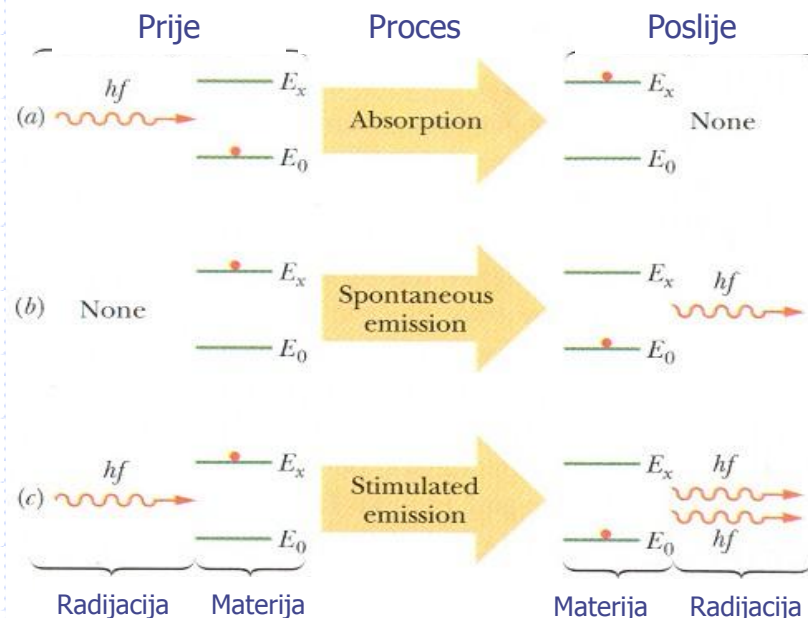
Ovaj proces se naziva **stimulirana emisija** jer je događaj pobuđen vanjskim fotonom. Emitirani foton je u potpunosti identičan vanjskom fotonu, tj. imaju istu energiju, fazu, polarizaciju i smjer kretanja.

◆ Sva tri procesa prikazana su na slici (desno):
atomi su prikazani crvenom točkom;
atom je ili u osnovnom stanju E_0 ili u pobuđenom stanju E_x .

a) atom apsorbira foton iz dolazećeg zračenja,

b) atom emitira foton bez vanjskog utjecaja,

c) svjetlost koja prolazi uzrokuje da atom emitira foton iste energije, povećavajući tako energiju svjetlosnog vala

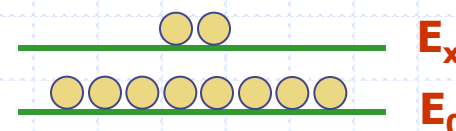


Kako rade laseri (3)

- ◆ Pretpostavimo sada da komad materijala sadrži veliki broj atoma u termalnoj ravnoteži na temperaturi T .

Prije nego usmjerimo zračenje na taj materijal, N_0 atoma je u osnovnom stanju s energijom E_0 , a N_x atoma je u pobuđenom stanju s energijom E_x . Ludwig Boltzmann je pokazao da se N_x može izraziti preko N_0 pomoću relacije:
$$N_x = N_0 e^{-(E_x - E_0)/kT}$$
 gdje je k Boltzmannova konstanta

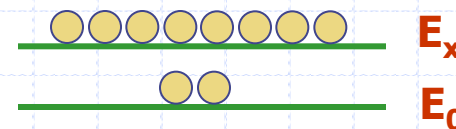
- ◆ Ova relacija izgleda razumno (☺). kT je srednja kinetička energija atoma na temperaturi T . Što je veća temperatura, više atoma će (u prosjeku) preko termalnih pobuđenja (sudari atoma) preći u pobuđeno stanje E_x . Isto tako, s obzirom da je $E_x > E_0$, iz gornje relacije se vidi da je $N_x < N_0$. Dakle, ako postoje samo termička pobuđenja uvijek je manje atoma u pobuđenom stanju nego u osnovnom stanju, što je ilustrirano na slici desno.



- ◆ Ako sada atome "preplavimo" fotonima energije $E_x - E_0$, jedni fotoni će nestajati kroz apsorpciju na atomima u osnovnom stanju, dok će se drugi fotoni stvarati uglavnom kroz stimuliranu emisiju. Einstein je pokazao da su ova oba procesa jednako vjerojatna.

S obzirom da ima više atoma u osnovnom stanju **prevladavat će efekt apsorpcije**.

- ◆ Da bi proizveli lasersko svjetlo moramo imati više fotona emitiranih nego apsorbiranih, tj. moramo imati situaciju u kojoj stimulirana emisija dominira. Direktni način postizanja ovog efekta je započeti proces s više atoma u pobuđenom nego u osnovnom stanju (slika desno), što se zove **inverzija gustoće naseljenosti**.



Kako rade laseri (4) - Plinski He-Ne laseri

◆ S obzirom da inverzija gustoće naseljenosti nije konzistentna s termalnom ravnotežom, treba smisliti pametan način kako je postići i zadržati.

◆ Plinski He-Ne laseri daju svjetlost valne duljine 632,8 nm.

◆ Rade na sljedećem principu:

■ Staklena cijev se napuni mješavinom He-Ne plinova u odnosu od 5:1 do 20:1; neon je medij u kojemu se odvija fizikalni proces emisije laserskog svjetla.

■ Na slici desno je prikazan energijski dijagram za atome He i Ne.

Struja koja prolazi kroz mješavinu plinova, kroz sudare atoma He i elektrona struje, uzrokuje pobudu atoma helija u stanje E_3 , koje je metastabilno.

■ Energija stanja helija E_3 (20,61 eV) je vrlo blizu energiji neonskog stanja E_2 (20,66 eV).

Stoga, kada se atom helija u stanju E_3 sudari s atomom neona u osnovnom stanju E_0 , energija pobude atoma helija se vrlo često prenese na atom neona, koji se pobudi u stanje E_2 .

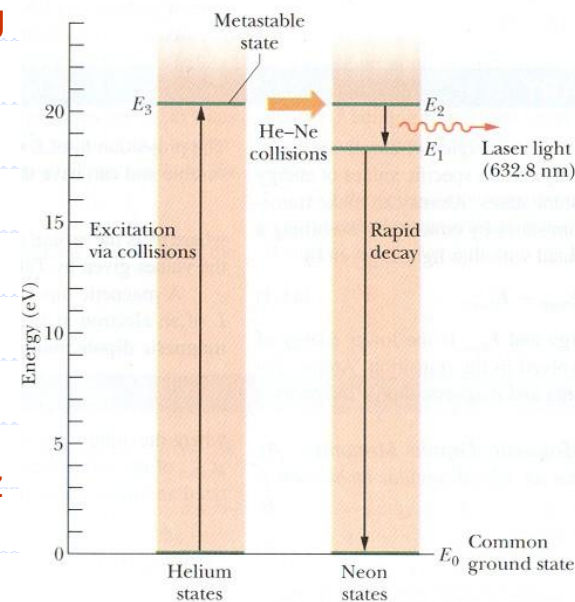
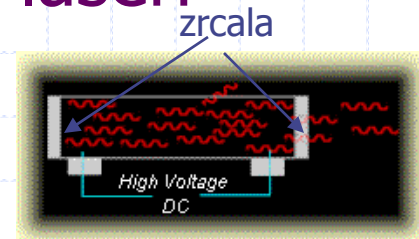
Na ovaj način neonska energijska razina E_2 postane naseljenija elektronima od razine E_1 – imamo inverziju gustoće naseljenosti.

■ Ovu inverziju gustoće naseljenosti je relativno lako izvesti zbog:

(1) na početku je razina E_1 skoro potpuno prazna,

(2) metastabilnost helijske razine E_3 osigurava kontinuirani prelaz atoma neona na razinu E_2 i

(3) atomi iz razine E_1 vrlo brzo se vraćaju (preko međustanja koja nisu prikazana) u osnovno stanje E_0 .



Kako rade laseri (5)

◆ Plinski He-Ne laseri (nastavak):

- Pretpostavimo sada da se jedan foton spontano emitira pri prijelazu atoma neona iz E_2 u E_1 .

Takav foton može tada stimulirati emisiju istih takvih fotona, koji nadalje opet stimuliraju istu emisiju ...

Kroz takav proces stvara se koherentni snop crvene laserske svjetlosti koja putuje duž osi cijevi s plinom.

Ako još na krajevima cijevi postavimo zrcala (s jedne strane nepropusno, a s drugo djelomično propusno) fotoni će se reflektirati od zrcala povećavajući tako vjerojatnost stimulirane emisije.

Korisno lasersko svjetlo dobije se od dijela svjetlosti koja prođe kroz djelomično propusno zrcalo.

Tipovi lasera

- ◆ **Lasери sa čvrstom tvari** kao aktivnim sredstvom
Najpoznatiji su rubinski laser, Yag laser itd.
- ◆ **Plinski laseri**, kojima je aktivno sredstvo neki plin
Najpoznatiji su He-Ne i CO₂-N laseri
- ◆ **Poluvodički laseri**, kojima je aktivno sredstvo dioda
(koriste se u telekomunikacijama i računalima)
- ◆ **Kemijski laseri** – u kojima je laserska emisija uzrokovana kemijskim procesom
- ◆ Laseri se mogu dijeliti i na:
 - Kontinuirani laseri, koji daju neprekinute laserske snopove
 - Pulsni laseri, koji daju isprekidane laserske snopove
- ◆ **Najmanji laseri**, koji se koriste pri prijenosu podataka kroz svjetlovode mogu imati veličinu reda veličine mm i generirati malu snagu od npr. 200 mW.
- ◆ S druge strane **najjači (i najveći) laseri** koriste se u istraživanju nuklearne fuzije, astronomskim i vojnim aplikacijama.
Takvi laseri mogu generirati kratke pulsove snage i do 10^{14} W, što je nekoliko stotina puta veće od ukupnog kapaciteta proizvodnje električne energije u SAD-u.

Primjene lasera (1)

◆ Svakodnevna upotreba

- Compact disc/DVD
- Laserski printer
- Bar-code čitači
- Zaštitni hologrami (na kreditnim karticama, Microsoftovom softwareu, vrijednosnim papirima,...)
- Prijenos podataka svjetlovodima
- Direktni prijenos podataka (komunikacija među satelitima, vojna tehnologija)
- Hologrami (npr. u muzejima umjesto originalnih umjetnina,...)
- Laser show
- ...

Primjene lasera (2)

◆ **Vojne primjene**

- Mjerenje udaljenosti
- Lociranje mete (navođenje "pametnih bombi")
- Laserska oružja ("Star Wars" program)
- ...

◆ **Medicinske primjene**

- Kirurgija
 - ◆ Operacije očiju, operacije zubi, dermatološki zahvati, opći zahvati
- Dijagnostika i liječenje raka
- Liječenje termičkim efektima (biostimulacija)

◆ **Industrija**

- Mjerenja
- Povlačenje ultra ravnih linija
- Procesiranje materijala
 - ◆ Rezanje, varenje, taljenje, isparavanje, fotolitografija u poluvodičkoj industriji ...
- Spektralna analiza

Primjene lasera (3)

◆ Istraživačke svrhe

- Fundamentalna istraživanja
 - ◆ Interakcija zračenja s materijom, genetski inženjering ...
- Spektroskopija
- Nuklearna fuzija
- Hlađenje atoma na ultra niske temperature
- Generiranje vrlo kratkih pulseva za studiranje vrlo brzih procesa

◆ Posebne primjene

- Prijenos energije (u budućim svemirskim postajama)
- Laserski žiroskop (instrument za orijentaciju u prostoru)
- Laserski procesi direktno u svjetlovodu (primjena u telekomunikacijama)

Pitanja za provjeru znanja

1. Što je rendgensko zračenje i kako nastaje, kakva je struktura spektra rendgenskog zračenja (obavezno)?
2. Što je laser i kako radi laser (obavezno)?
3. Objasnite Mosleyev zakon, navedite njegovu primjenu?
4. Objasnite stimuliranu i spontanu emisiju, te princip rada He-Ne lasera.

V. Henč-Bartolić i P. Kulišić: "Valovi i Optika", poglavlje 11

◆ Atomska jezgra

- Svojstva i struktura jezgre
- Energija vezanja jezgre
- Radioaktivnost, zakon radioaktivnog raspada

Priča

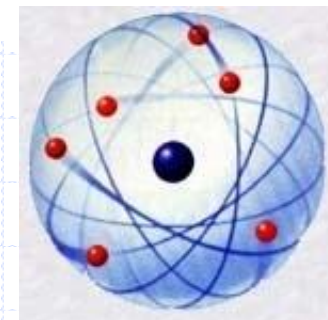
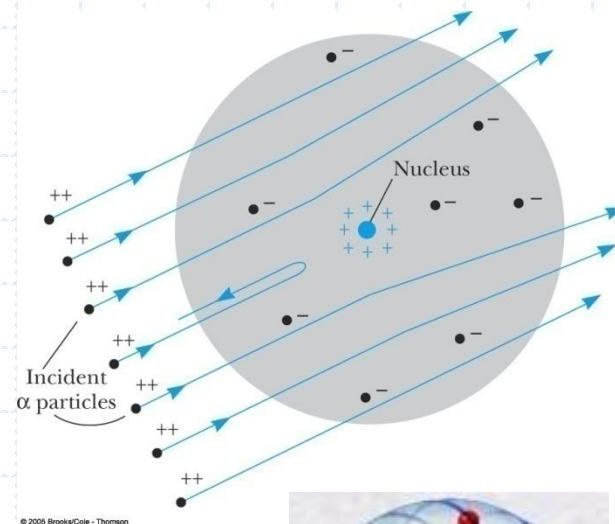
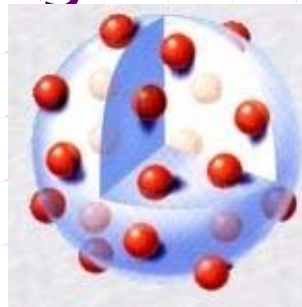
- ◆ Ova slika je promijenila svijet!!!
- ◆ Kad je Robert Openheimer, voditelj tima znanstvenika na Manhattan projektu koji su razvili atomsku bombu, prisustovao prvoj eksploziji bombe citirao je sveti Hindu tekst:
" Sada postajem Smrt, uništavatelj Svjetova."



Kakva fizika stoji iza ove slike ?

Kako je otkrivena atomska jezgra

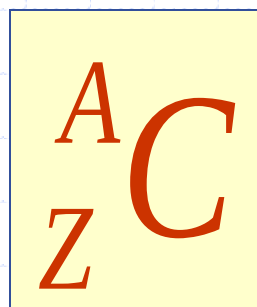
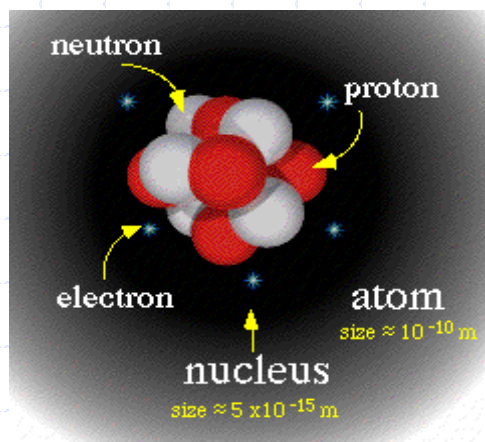
- ◆ 1896., Becquerel je otkrio radioaktivnost.
- ◆ Elektron otkriven 1897 od strane Thomsona, koji zamišlja da atom čini pozitivno nabijena kugla, a da su elektroni uniformno razasuti po toj pozitivno nabijenoj kugli i da titraju oko svojih fiksnih položaja, model: "puding s grožđicama".
- ◆ 1912., Rutherford, Geiger i Marsden otkrili jezgru u eksperimentima raspršenja alfa zraka na zlatu. Iz kutne razdiobe raspršenih alfa čestica zaključuje da je radijus jezgre znatno manji od radijusa atoma i to za faktor 10^4 , atom je većinom prazan prostor.
- ◆ 1932., Chadwick otkrio neutron.
- ◆ 1938., Hahn i Strassmann otkrili nuklearnu fisiju.
- ◆ 1942., Fermi sa suradnicima izgradio prvi kontrolirani fisijski reaktor.



Svojstva i struktura jezgre (1)

◆ Jezgra se sastoji od protona i neutrona (nukleoni):

- naboj protona je pozitivan i jednak naboju elektron $e=1,6 \times 10^{-19} \text{ As}$,
- spin protona je $s=1/2$, $m_p= 1,672\,62 \times 10^{-27} \text{ kg}$,
- neutron je električni neutralan, spin $s=1/2$, $m_n= 1,674\,93 \times 10^{-27} \text{ kg}$.



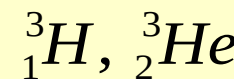
A - Maseni broj, $A=Z+N$, broj nukleona

Z - Redni broj – broj protona

N - broj neutrona, $N=A-Z$

➤ **Izotopi** – nuklidi (jezgre) koje imaju jednaki broj protona (isti Z), ali različit broj neutrona: ${}^1_1\text{H}, {}^2_1\text{H}, {}^3_1\text{H}$

➤ **Izobari** su nuklidi jednakog broja nukleona (isti A):



Svojstva i struktura jezgre (2)

- ◆ Masa jezgre (nuklida) je praktički jednaka masi atoma jer je masa elektronskog omotača zanemariva.

U tablicama su uvijek navedene mase atoma, a ne nuklida.

- ◆ Atomske mase iskazuju se u atomskim jedinicama mase ***u***:

$$u = \frac{1}{12} \times \text{masa atoma } {}^{12}_6\text{C}$$

$$u = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

- ◆ Energijski ekvivalent $E=mc^2$ **atomske masene konstante (*u*)** je:

$$1m_u c^2 = 931,478 \text{ MeV}$$

Particle	Mass		
	kg	u	MeV/ c^2
Proton	$1.672\,62 \times 10^{-27}$	1.007\,276	938.28
Neutron	$1.674\,93 \times 10^{-27}$	1.008\,665	939.57
Electron	$9.109\,39 \times 10^{-31}$	$5.48\,579 \times 10^{-4}$	0.510\,999
${}^1_1\text{H}$ atom	$1.673\,53 \times 10^{-27}$	1.007\,825	938.783
${}^4_2\text{He}$ nucleus	$6.644\,66 \times 10^{-27}$	4.001\,506	3\,727.38
${}^{12}_6\text{C}$ atom	$1.992\,65 \times 10^{-27}$	12.000\,000	11\,177.9

Veličina jezgre

◆ Još od Rutherfordova (1912) vremena brojnim eksperimentima je potvrđeno:

- većina jezgri je sfernog oblika.
- srednji radijus jezgre je $r=r_0A^{1/3}$, $r_0=1,2 \times 10^{-15}$ m.
- kako je volumen jezgre $V \sim r^3$, a $r^3 \sim A$, slijedi da je volumen jezgre proporcionalan broju nukleona u jezgri, pa je gustoća svih jezgri približno ista.
- srednja gustoća jezgre oko 2×10^{17} kg/m³.
- uobičajeno je u nuklearnoj fizici koristiti jedinicu 1 fermi:

$$1\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

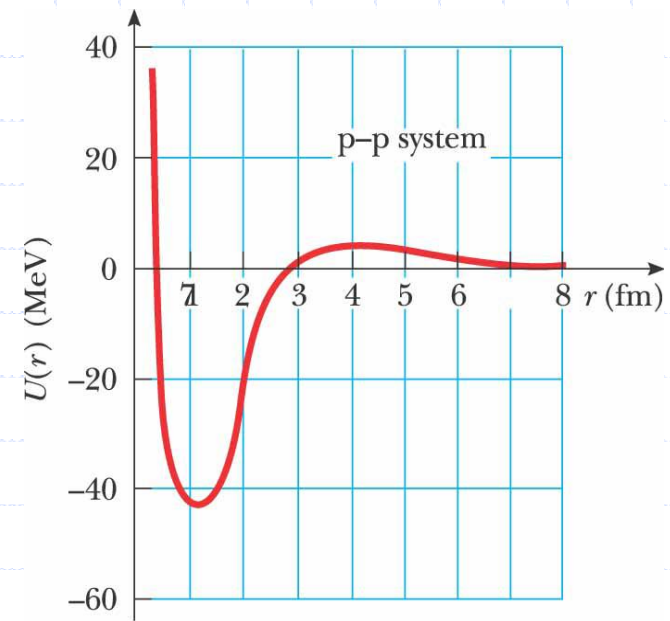
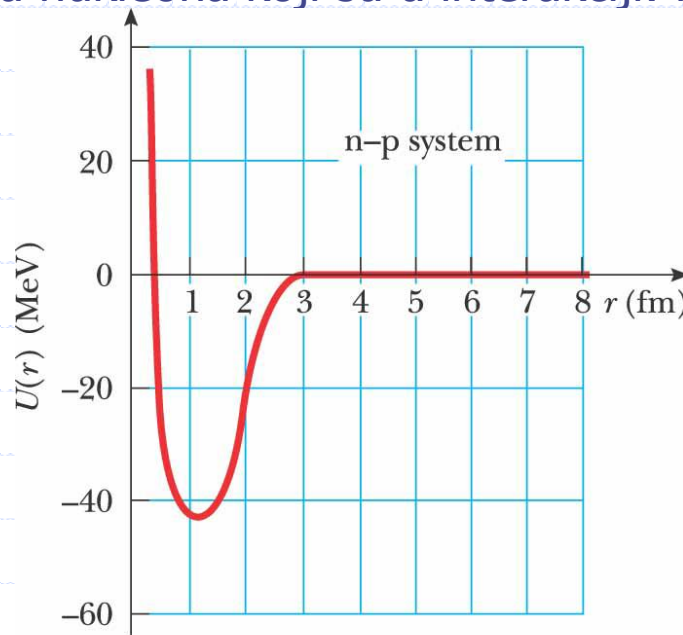
- ◆ U prirodi ima oko 400 stabilnih jezgri, stotine drugih je otkriveno, ali su nestabilne i ubrzo se raspadaju.
- ◆ Lagane jezgre su stabilne ako imaju jednak broj protona i neutrona $N=Z$, a teške jezgre su stabilne ako je broj neutrona veći od broja protona ($N>Z$) kad je $Z>20$.

Nuklearna sila (1)

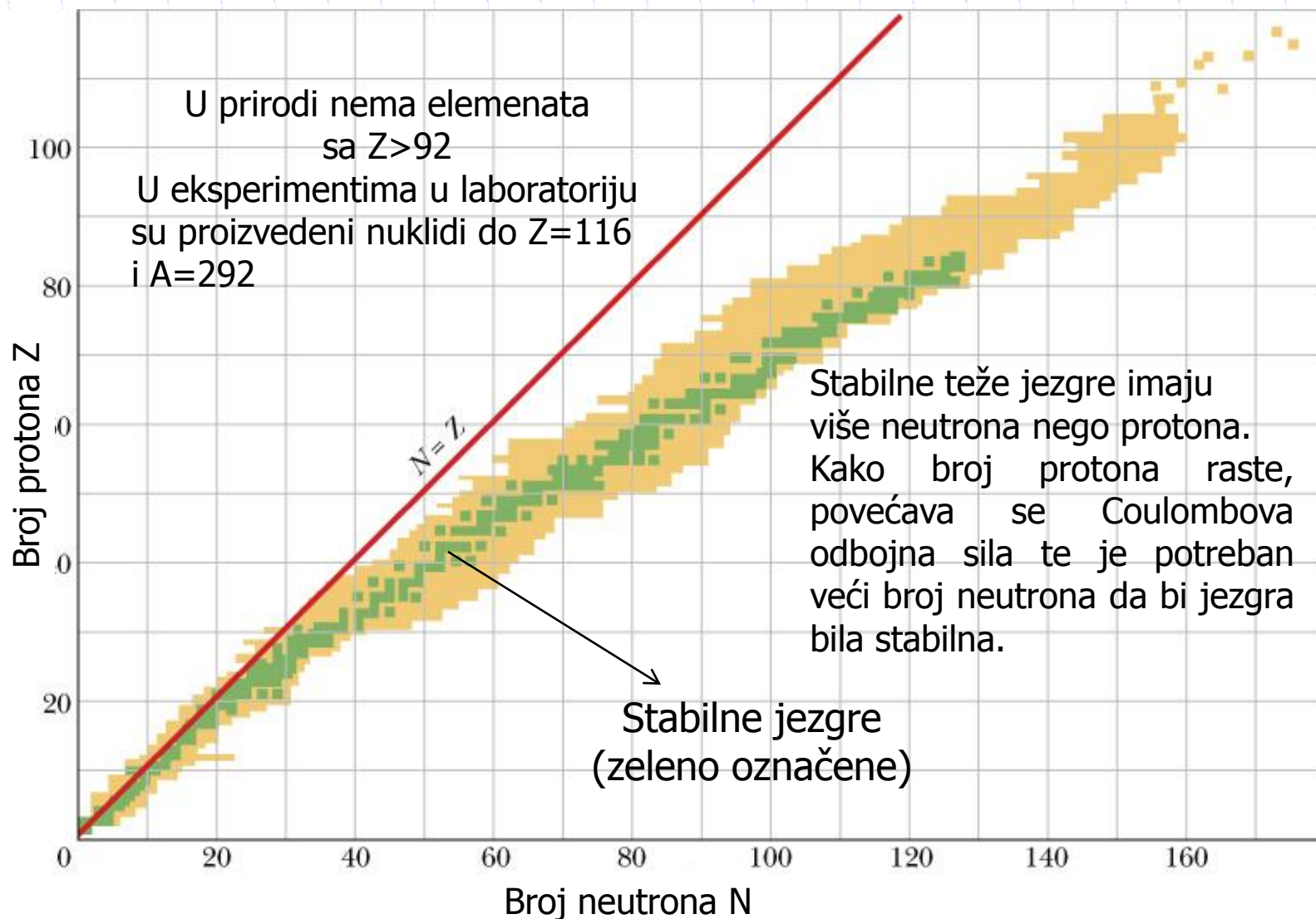
- ◆ U jezgri djeluje vrlo jaka odbojna električna sila između protona i zbog njenog djelovanja jezgra bi se razletjela, ne bi bila stabilna.
- ◆ Jezgra je stabilna jer uz električnu silu između protona djeluje još jedna sila koju zovemo **nuklearna sila ili jaka sila**.
- ◆ Svojstva nuklearne sile:
 - privlačna sila koja djeluje između nukleona (protona i neutrona).
 - vrlo kratkog dosega, reda veličine promjera jezgre oko 2 fm.
 - znatno je snažnija od elektromagnetske sile (otprilike 100 puta).
 - Nuklearna sila (jaka sila) je najjača sila u prirodi, 10^{38} puta jače od gravitacijske sile.

Nuklearna sila (2)

- ◆ Iz raspršenja neutrona i protona na meti vodika može se dobiti potencijalna energija sistema neutron-proton, proton-proton.
- ◆ Dubina potencijlane jame zbog nuklearne sile između nukleona je 40-50 MeV i postoji snažna odbojna komponenta nuklearne sile kad je udaljenost između nukleona manja od 0,4 fm.
- ◆ Eksperimenti također pokazuju da nuklearna sila ne ovisi o električnom naboju nukleona koji su u interakciji: nuklearna sila ista je između: n-n, p-p i n-p.



Karta nuklida



Defekt mase i energija veze

- ◆ Razlika ukupne mase protona i neutrona Zm_p i Nm_n i mase jezgre m_A zove se defekt mase Δm :

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_A$$

- ◆ Pri spajanju nukleona u jezgri oslobodila bi se energija Δmc^2 , da bi smo jezgru rastavili na nukleone moramo utrošiti upravo tu energiju pa je **energija veze jezgre**:

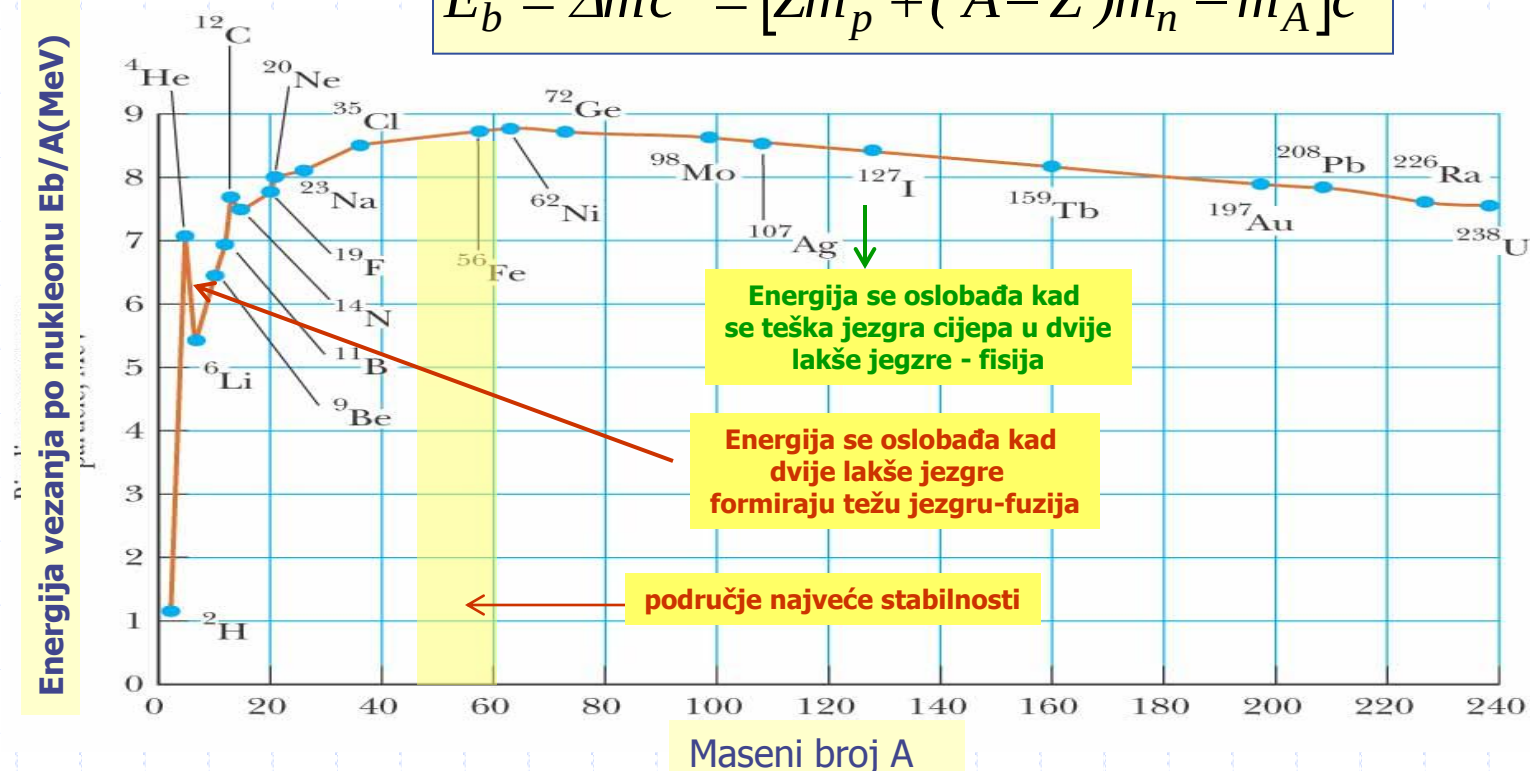
$$E_b = \Delta mc^2$$

- ◆ Ukupna masa jezgre je uvijek manja od pojedinačnog zbroja masa protona i neutrona od kojih je jezgra izgrađena.
- ◆ Energija veze po nukleonu je E_b/A – energija koju treba dati jednom nukleonu da ga se izvuče iz jezgre.

Energija vezanja jezgre

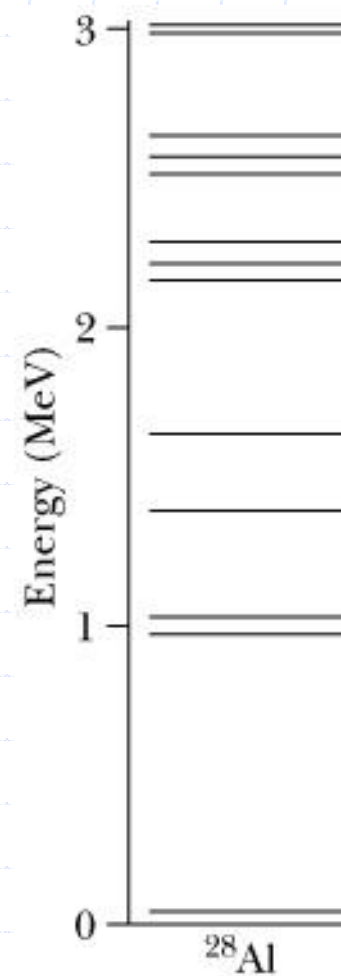
- ❖ **Energija vezanja je energija potrebna da se nukleoni vezani u jezgri razdvoje.**
- ❖ Iz zakon očuvanja energije i Einsteinove relacije o ekvivalenciji mase i energije slijedi izraz za energiju veze jezgre mase m_A :

$$E_b = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_A]c^2$$



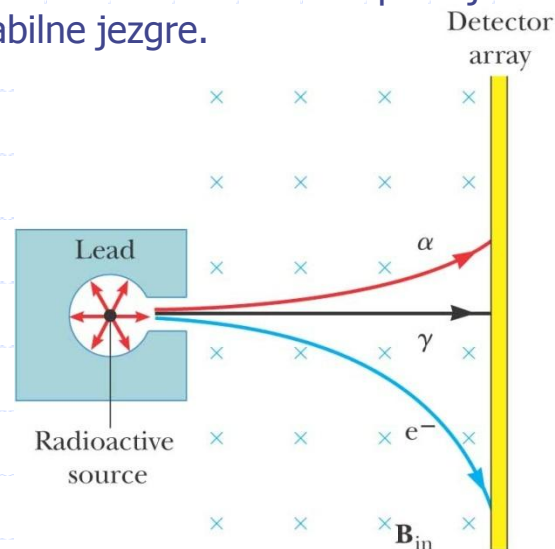
Energijske razine jezgre

- ◆ Energija nukleona u jezgri je kvantizirana slično kao i energija elektrona u atomu.
- ◆ Slika desno prikazuje energijske razine u jezgri ^{28}Al .
- ◆ Uočite da su energijske razine reda veličine **milijun eV**, dok su energijske razine elektrona u atomu **reda veličine eV**.
- ◆ Slično kao i kod atoma kad jedan nukleon prijeđe iz stanje više energijske razine u nižu emitira se foton energije $h\nu$, tj. kvant elektromagnetskog vala u gama području-gama zraka.



Radioaktivnost (1)

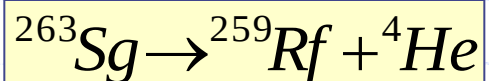
- ◆ U prirodi postoji samo 92 kemijska elementa + (još 12 umjetno proizvedenih), a poznato je oko 1500 različitih nuklida od kojih je 350 prirodnih a 1100 umjetnih. Većina nuklida je nestabilna (oko 1200) – radioaktivna.
- ◆ Pogodna kombinacija protona i neutrona čini jezgru stabilnom, čim je drugačije jezgra se nastoji izbacivanjem nukleona približiti stabilnoj konfiguraciji.
- ◆ 1896., Becquerel je slučajno otkrio radioaktivnost u spojevima koji sadrže uran. Nakon niza eksperimenata zaključio je da se to zračenje spontano emitira, da je prodorno, da zacrnjuje fotografsku emulziju i da ionizira plin. **Takva spontana emisija zračenja nazvana je radioaktivnost.**
- ◆ Marie i Pierre Curie sustavno su izučavali radioaktivnosti, te otkrili dva do tada nepoznata elementa, oba radioaktivna, nazvana **polonij i radij.**
- ◆ Sustavna eksperimentalna istraživanja radioaktivnosti zajedno s Rutherfordovim raspršenjem alfa čestica ukazala su da je radioaktivnost rezultat raspada nestabilne jezgre.
- ◆ Utvrđeno je da psotoje tri tipa radioaktivnosti:
 - **alfa raspad** – jezgra spontano emitira jezgru helija
 - **beta raspad** – jezgra spontano emitira elektron ili pozitron (antielektron)
 - **gama raspad** – jezgra spontano emitira gama zraku – foton visoke energije



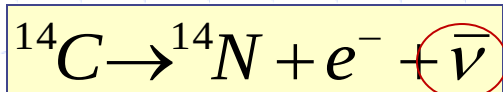
©2004 Thomson - Brooks/Cole

Radioaktivnost (2)

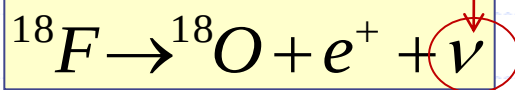
Alfa raspad:



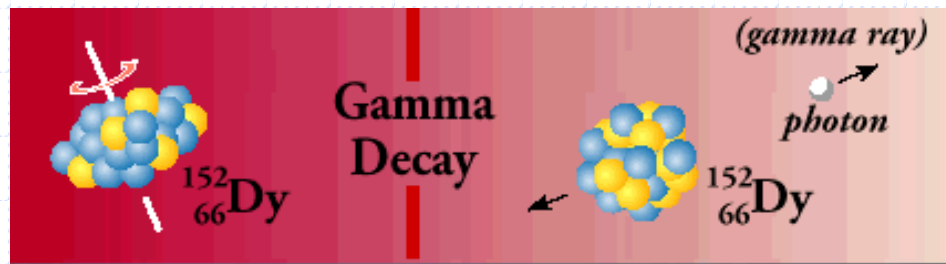
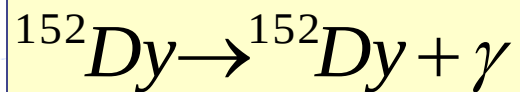
Beta raspad:



neutrini

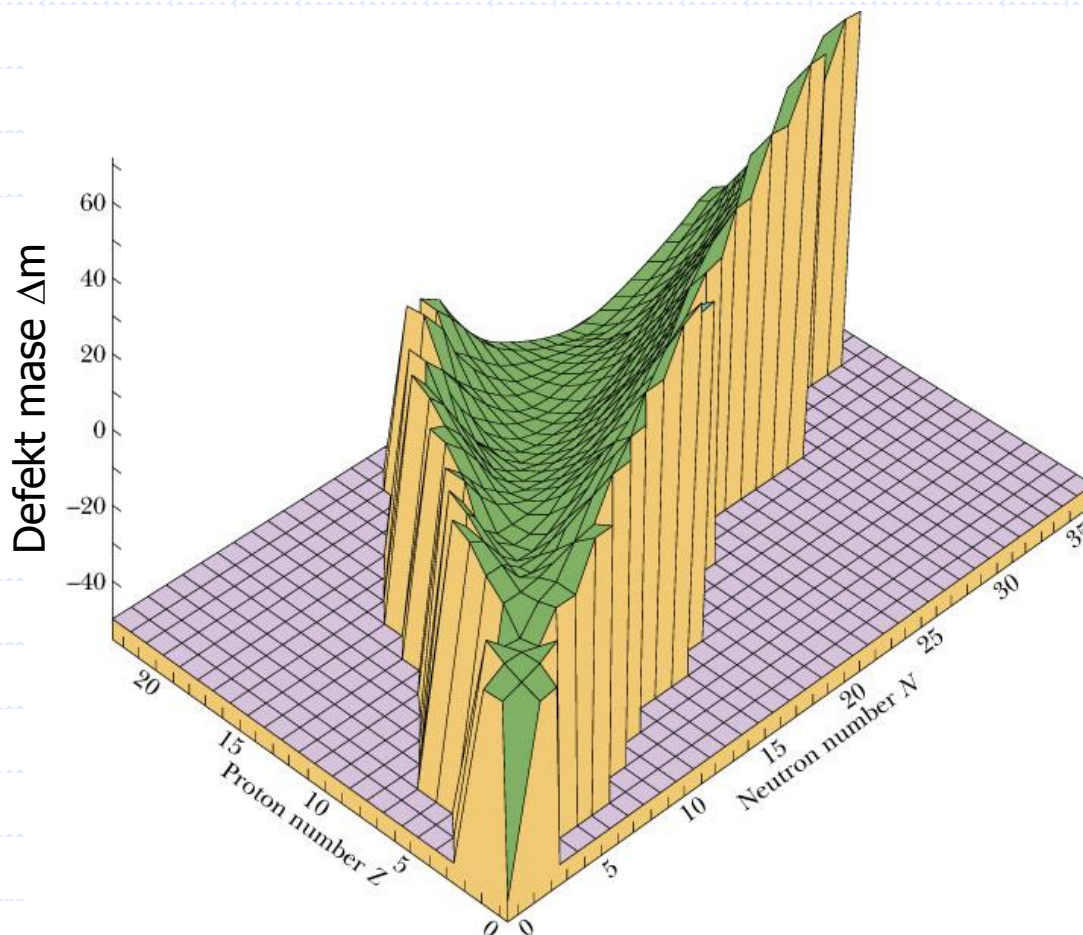


Gama raspad:



Karta nuklida i radioaktivnost

- ◆ Slika lijevo prikazuje defekt mase u ovisnosti o broju protona i neutrona u jezgri za lagane jezgre.
- ◆ Dolina na slici lijevo je područje stabilnih jezgri.
- ◆ Jezgre bogate protonima emisijom α -čestica "spuštaju se u dolinu".
- ◆ Jezgre s viškom neutrona "spuštaju se u dolinu" emisijom elektrona – beta raspad.



Radioaktivni elementi u prirodi

- ◆ Neki radioaktivni elementi koje nalazimo u prirodi:

Table 12.2 Some Naturally Occurring Radioactive Nuclides

Nuclide	$t_{1/2}$ (y)
$^{40}_{19}\text{K}$	1.28×10^9
$^{87}_{37}\text{Rb}$	4.8×10^{10}
$^{113}_{48}\text{Cd}$	9×10^{15}
$^{115}_{49}\text{In}$	4.4×10^{14}
$^{128}_{52}\text{Te}$	7.7×10^{24}
$^{130}_{52}\text{Te}$	2.7×10^{21}
$^{138}_{57}\text{La}$	1.1×10^{11}
$^{144}_{60}\text{Nd}$	2.3×10^{15}
$^{147}_{62}\text{Sm}$	1.1×10^{11}
$^{148}_{62}\text{Sm}$	7×10^{15}

Zakon radioaktivnog raspada

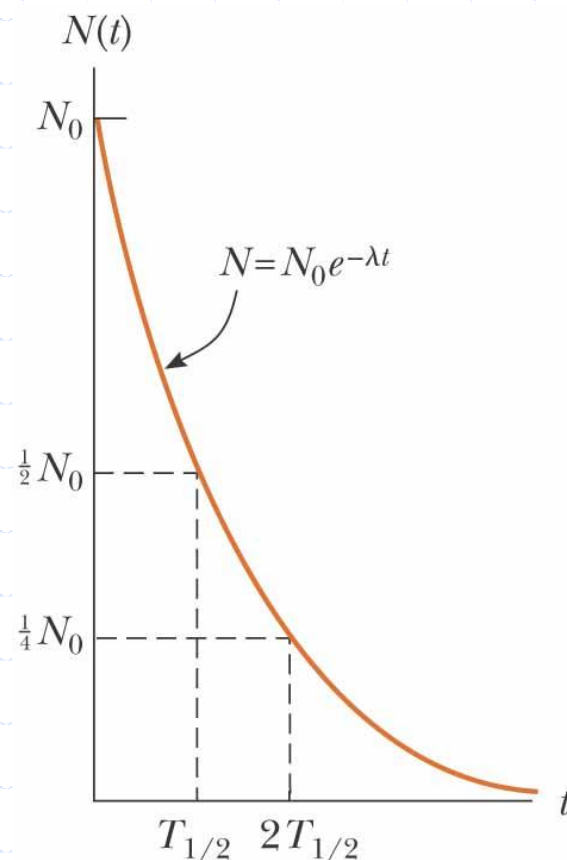
- Radioaktivni raspad je statističke prirode, ne možemo predvidjeti kad će se određena jezgra raspasti, ali možemo izračunati vjerojatnost da se proces dogodi.
- Brzina kojom se radioaktivni uzorak raspada ($-dN/dt$) proporcionalan je broju radioaktivnih jezgri u uzorku $-dN/dt = \lambda N$, λ - konstanta raspada koja određuje brzinu raspada radioaktivne jezgre i ovisi o tipu nuklida.
- Broj neraspadnutih jezgri u nekom radioaktivnom uzorku nakon t vremena, ako je početni broj jezgri bio N_0 je:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

- Vrijeme poluživota, $T_{1/2}$, je vremenski interval unutar kojeg se raspadne polovina jezgri:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

- Aktivnost** – broj raspada u jedinici vremena, jedinica za aktivnost je 1Ci (Kiri)= $3,7 \times 10^{10}$ raspada/s, odnosno 1 Bq (bekerel, SI jedinica)= 1 raspad/s.



$$A = -\frac{dN}{dt} = N_0 \lambda e^{-\lambda t} = \lambda N$$

Prodornost i doza radioaktivnog zračenja

- ◆ Alfa čestice – jezgre helija jedva prolaze kroz list papira
- ◆ Beta čestice – elektroni (pozitroni) prolaz kroz nekoliko milimetra aluminija
- ◆ Gama čestice – fotoni prolaze kroz nekoliko centimetara olova
- ◆ Utjecaj zračenja na ljude se iskazuje preko:
 - Apsorbirana doza – apsorbirana energija po jedinici mase (Gy-gray), stara jedinica je rad, $1\text{Gy}=1\text{ J/kg}=100\text{ rad}$.
 - Uobičajneo je izjava: " Doza gama zračenja od 3 Gy koju primi čitavo tijelo u kratkom vremenskom intervalu uzrokovat će smrt u 50 % slučajeva".
 - Srednja doza koju primi čovjek u godini dana od prirodnih i umjetnih radioaktivnih izvora je oko 2 mGy.
 - Ekvivalentna doza – različiti tipovi zračenja mogu isporučiti istu dozu (energiju po jedinici mase), ali ne uzrokuju iste biološke efekte.
 - Ekvivalentna doza zračenja izražava biološki utjecaj apsorbirane doze tako da apsorbiranu dozu množi s numeričkim faktorom *RBE-relativni biološki utjecaj*. $RBE=1$ za X-zrake i elektrone, $RBE=5$ za spore neutrone, $RBE=10$ za alfa zrake.
 - SI jedinica ekvivalentne doze je 1 sivert (Sv).
 - Preporuka je da neprofesionalna osoba ne primi ekvivalentnu dozu zračenja veću od 5 mSv u godini dana.
 - Prilikom leta avionom ljudi su izloženi kozmičkom zračenju koje generiraju protoni emitirani iz Sunca. U 900 sati leta u godini dana ekvivalentna doza iznosi oko 5,4 mSv, što prelazi dopuštenu granicu od 5 mSv u godini dana.

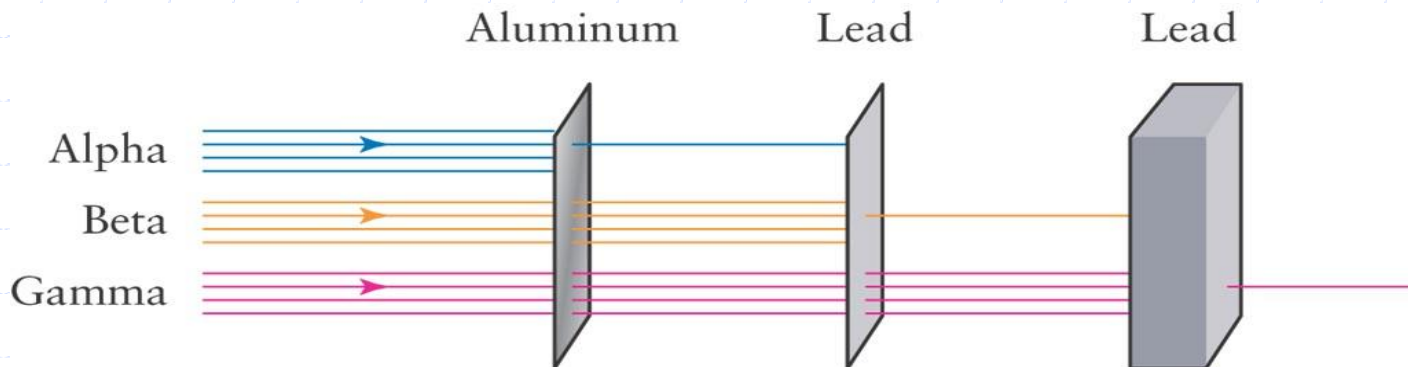
Primjer - radioaktivnost

- ◆ Gama doza od 3 Gy je letalna doza, oko 50% ljudi koji prime ovu dozu umire. Ako se ekvivalentna doza primi u obliku topline, koliki bi bio porast temperature?

Za specifični toplinski kapacitet ljudskog tijela uzmite vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta vode $c=4180 \text{ J/kgK}$:

$$\Delta T = \frac{Q/m}{c} = \frac{3 \text{ J/kg}}{4180 \text{ J/kgK}} \approx 0,7 \text{ mK}$$

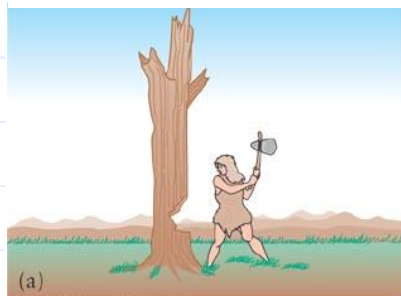
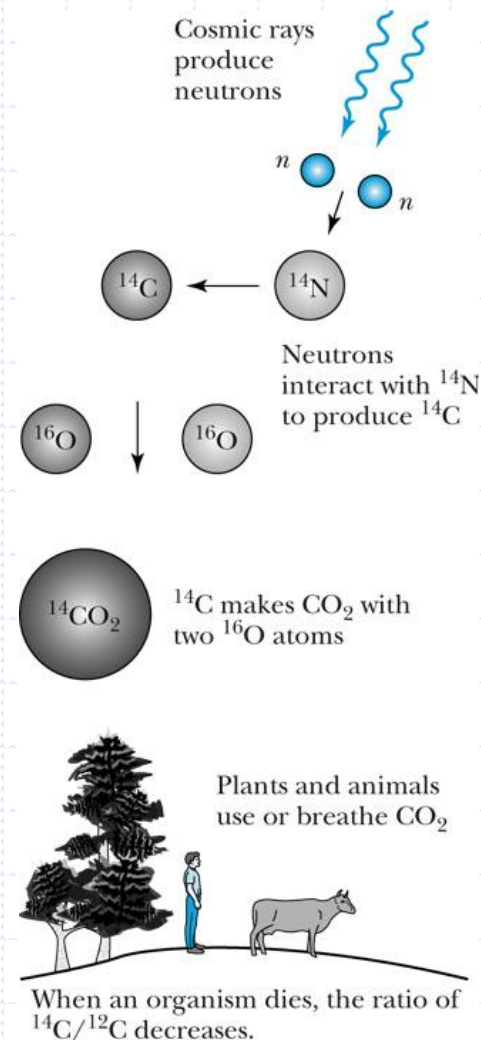
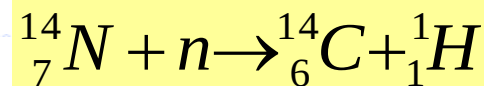
- ◆ Očito oštećenja izazvana zračenjem nemaju nikakve veze s zagrijavanjem tijela.
- ◆ Oštećenja nastaju na razini DNA i tako utječu na promjene u biološkim i kemijskim procesima.



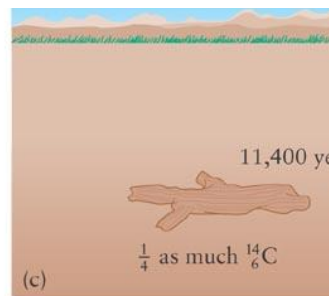
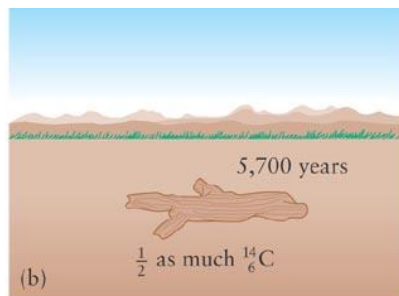
Ispitivanje starosti materijala

– datiranje ugljikom

- Raspad bilo koje radioaktivne jezgre ne ovisi o okolini.
- Omjer broja stabilnih jezgri kćerki i jezgri majki ovisi o vremenu, što je broj jezgri kćerki veći to je uzorak stariji.
- Radionuklid ^{14}C ima vrijeme poluživota $T_{1/2}=5730$ godina.
- Stalna je proizvodnja izotopa ^{14}C u višim slojevima atmosfere, 1 atom ^{14}C na 10^{13} atoma ^{12}C . Formira se molekula ugljičnog dioksida CO_2 , jedna na 10^{13} sadrži ^{14}C umjesto ^{12}C .
- Kroz biološke procese, fotosinteza i disanje, CO_2 ulazi u tkivo, uspostavi se dinamička ravnoteža tako da svako živo biće sadrži fiksnu količinu ^{14}C u formi CO_2 .
- Kad prestanu biološki procesi, nema više izmjene radiougljika s atmosferom i količina ^{14}C se smanjuje raspadom.
- Mjereći količinu ^{14}C po gramu organskog tkiva može se odrediti koliko je vremena prošlo od trenutka smrti organizma.
- Ovo datiranje je pouzdano do 50 000 godina starosti.



© 2005 Brooks/Cole - Thomson



Primjer

- ◆ Komad drveta na arheološkom nalazištu ima aktivnost ^{14}C od 13 raspada u minuti po gramu.

Aktivnost živog drveta je 16 raspada u minuti po gramu.

Kad je drvo uginulo?

$$N = N_o e^{-\lambda t}; \quad \lambda = 0,693/5730 \text{ godina}$$

$$e^{\lambda t} = \frac{N_o}{N} \quad \lambda t = \ln \frac{N_o}{N} \quad t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_o}{N}$$

$$t = \frac{5730}{0,693} \ln \frac{16}{13} = 1700 \text{ godina}$$