

## Atomsko jezgro. Radioaktivnost.

Protoni i neutroni u jezgru uzajamno interaguju jakim **nuklearnim silama**; ove sile su kratkog dometa, deluju na rastojanju  $< 10^{-13}$  cm, između svih parova nuklearnih čestica: protona i protona (p-p), protona i neutrona (p-n) i neutrona i neutrona (n-n). Ove sile su privlačne i istog su intenziteta u svim navedenim slučajevima parova čestica. Između dva protona postoje i odbojne sile, ali su one oko 100 puta slabije od privlačnih nuklearnih sila.

**Proton** je čestica mase  $m_p = 1,6724 \times 10^{-27}$  kg i pozitivnog naelektrisanja od  $1,6 \times 10^{-19}$  C. Simbol za proton je **p**.

**Neutron** ima masu  $m_n = 1,6748 \times 10^{-27}$  kg, a naelektrisanje nula-to je neutralna čestica. Uobičajeni simbol za neutron je **n**. Slobodan neutron je nestabilan i spontano se transformiše u proton, elektron i antineutrino. Slobodnih neutrona u prirodi nema, jer je vreme poluraspada slobodnog neutrona oko 10 minuta. Pod vremenom poluraspada podrazumeva se vremenski interval u toku koga polovina svih čestica prisutnih na početku tog intervala pretrpi datu transformaciju. Neutroni i protoni imaju zajednički naziv **nukleoni**.

**Pozitron** je čestica mase jednake mase elektrona, obeležava se simbolom  $e^+$ . Njegovo naelektrisanje je jednako elementarnom naelektrisanju, ali pozitivnog znaka. Pozitroni se emituju u procesu **beta plus ( $\beta^+$ ) raspada**.

**Neutrino** ima masu mirovanja nula i nema naelektrisanja; obeležava se simbolom **v**. Stabilan je i kada jednom nastane više ne interaguje sa materijom. Emituje se u procesu  **$\beta^+$  raspada** nestabilnog jezgra.

**Antineutrino**,  $\bar{\nu}$ , ima naelektrisanje nula, masu mirovanja nula i kreće se brzinom svetlosti. Neutrino i antineutrino međusobno predstavljaju antičestice.

Atomsko jezgro ima prečnik  $\sim 10^{-15}$  m. Njegove najvažnije karakteristike su sledeće:

1. Ukupan broj nukleona-maseni broj (A).
2. Ukupan broj protona-redni (atomski) broj (Z).
3. Ukupan broj neutrona N ( $N=A-Z$ ).
4. Energija veze po nukleonu; to je srednja energija potrebna za odvajanje jednog nukleona od jezgra.

Moglo bi se očekivati da je ukupna masa jezgra  $M(Z,N)$  jednaka:

$$M(Z,N) = Z m_p + N m_n$$

Međutim, stvarna masa jezgra manja je od ove vrednosti za iznos  $\Delta M(Z,N)$  koja se naziva **defekt mase**. Defekt mase pomnožen sa  $c^2$  daje **ukupnu energiju veze jezgra  $W(Z,N)$** :

$$\Delta M(Z,N) \cdot c^2 = W(Z,N)$$

Znači, prilikom formiranja jezgra tolika energija se emitovala, odnosno, da bi se jezgro rastavilo na slobodne nukleone, potrebno je uložiti energiju  $\Delta M(Z,N) c^2$  na savladavanje privlačnih nuklearnih sila. **Energija veze po nukleonu  $B(Z,N)$**  dobija se deljenjem ukupne energije veze jezgra sa brojem nukleona:

$$\frac{W(Z, N)}{Z + N} = B(Z, N)$$

### 5. Stabilnost jezgra.

Ako je u početnom jezgru (jezgro-roditelj) ukupna energija veća od energije u krajnjem jezgru (jezgro-potomak), odnosno ukoliko je ukupna energija veze u početnom jezgru manja nego u krajnjem, tada dolazi do spontanog **raspada jezgra**, takvo jezgro je nestabilno.



Slika 1.

Prema zakonu o održanju energije, energiju raspada odnose čestice koje se emituju u raspadu; energija raspada jednaka je energiji emitovanog zračenja.

Nestabilno jezgro se može okarakterisati:

- vremenom poluraspada ( $T_{1/2}$ ), koje predstavlja vreme u toku kojeg polovina svih jezgara prisutnih u početnom trenutku pretrpi raspad
- vrstama zračenja emitovanih pri raspadu
- energijama emitovanih zračenja
- relativnim intenzitetima emitovanih zračenja

## Vrste radioaktivnih raspada

Pojava nestabilnosti jezgara naziva se **radioaktivnost**. Transformacije koje trpe radioaktivni izotopi zovu se **radioaktivni raspad**.

Izotopi su jezgra nekog elementa koja imaju isti redni broj  $Z$ , a različit broj neutrona, odnosno  $N$ . U pogledu hemijskog ponašanja oni predstavljaju iste atome. Poznato je 270 stabilnih izotopa. Izotop se označava oznakom:



a dovoljno ga je označiti i oznakom:



Postoje sledeće vrste radioaktivnih raspada:

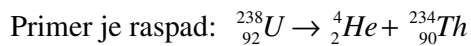
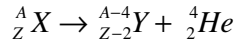
1. **Alfa raspad**
2. **Beta raspad: beta-minus, beta-plus i elektronski zahvat**
3. **Spontana fisija**
4. **Gama raspad**

Alfa raspad, beta raspad i spontana fisija praćeni su emisijom odgovarajućih čestica, tzv. **radioaktivnog zračenja**. Pri ovim raspadima dolazi do stvaranja izotopa drugog elementa,

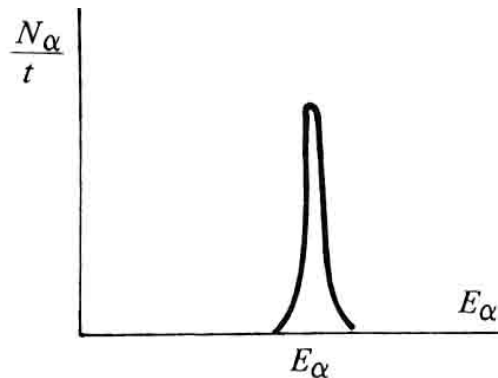
tzv. **transmutacije elemenata**. U svakom radioaktivnom raspadu menja se broj protona u jezgru, a broj elektrona u atomu se ovome odmah prilagođava. Dakle, svaki raspad daje atom izotopa drugog elementa. Gama raspad je praćen emisijom fotona i ne predstavlja pravi raspad, jer u njemu jezgro ne trpi nikakvu promenu osim energetske.

### Alfa raspad

Alfa čestica je jezgro atoma helijuma,  ${}^4\text{He}$ , koje sadrži 2 protona i 2 neutrona. Pri alfa raspadu emituje se  $\alpha$  čestica, pri čemu se maseni broj jezgra smanjuje za 4, a redni broj se smanjuje za 2. Drugim rečima, element se pomera za dva mesta ulevo u Periodnom sistemu:



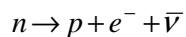
Najveći deo energije alfa raspada odnosi sama  $\alpha$  čestica, pa je energija zračenja praktično jednaka energiji raspada. Energija  $\alpha$  zračenja je 4–10 MeV, a brzina  $v \sim 0,05c$ , gde je  $c$  brzina svetlosti. Ovo zračenje ima oko 100 puta manju prodornost od  $\beta$  zraka. Ono se kroz gasove kreće pravolinijski. Energija  $\alpha$  zračenja je precizno definisana, spektar ovog zračenja je linijski (Slika 2.)



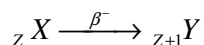
Slika 2 . Spektar  $\alpha$  zračenja.

### Beta-minus raspad

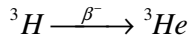
Beta-minus ( $\beta^-$ ) čestica je elektron, odnosno elektroni su beta-minus zraci. Pri ovom raspadu, neutron se transformiše u proton, koji ostaje u jezgru, a jezgro napuštaju elektron i antineutrino:



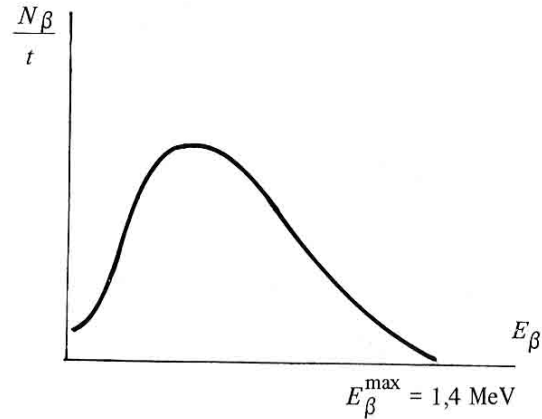
Pri ovom raspadu redni broj izotopa raste za jedan, odnosno:



Primer beta-minus raspada je raspad tricijuma:



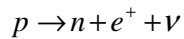
Spektar  $\beta^-$  zračenja je kontinualan jer energiju raspada dele elektron i antineutrino, ali ne uvek na isti način (Slika 3.). Maksimalna energija u spektru ovog zračenja je  $\sim 5$  MeV, a brzine  $\beta^-$  čestica su  $(0,3-0,99)c$ .



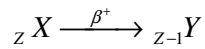
Slika 3. Spektar  $\beta^-$  zračenja iz raspada  ${}^{24}\text{Na}$ .

### Beta-plus raspad (pozitronski)

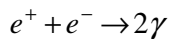
U jezgrima podložnim ovoj vrsti raspada jedan proton raspada se na neutron, koji ostaje vezan u jezgru, pozitron ( $\beta^+$  čestica,  $e^+$ ) koji napušta jezgro i čini pozitronsko zračenje i neutrino koji se ne zapaža:



Pri beta-plus raspadu redni broj izotopa smanjuje se za jedan:



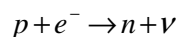
Prolazeći kroz materiju pozitroni se susreću sa slobodnim elektronima i nestaju u procesu **anihilacije** u kojoj pozitron i elektron daju dva gama zraka:



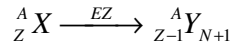
Energija svakog gama fotona je 511 keV.

### Elektronski zahvat (EZ)

U elektronskom zahvatu, jedan od atomskih elektrona, obično iz K ljuske, biva zahvaćen od strane jednog protona iz jezgra. Proton se pri tome transformiše u neutron, a iz jezgra se emituje samo neutrino:

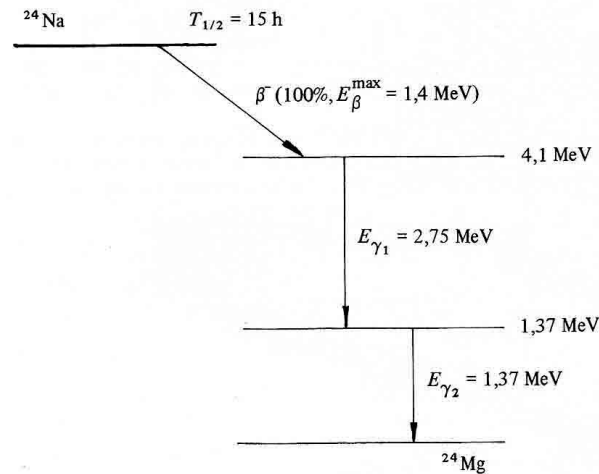


Upraznjeno mesto elektrona popunjava neki od elektrona iz viših nivoa, pri čemu nastaje prateće  $X_K$  zračenje. Elektronski zahvat je konkurentski proces  $\beta^+$  raspadu, u oba slučaja redni broj se smanjuje za jedan. Pri elektronskom zahvatu izotop X transformiše se u izotop Y prema:

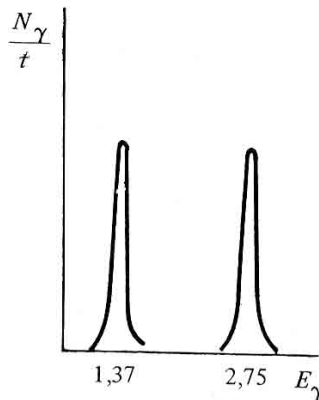


## Gama raspad

Posle  $\alpha$  ili  $\beta$  raspada, jezgro potomak može da se nalazi u nekom od svojih pobuđenih stanja. Iz pobuđenog stanja jezgro potomak se praktično trenutno deekscituje (vraća u osnovno stanje) emisijom gama-fotona odgovarajućih energija. Gama zračenje je oko 100 puta prodornije od  $\beta$  zračenja. Gama zruci ne skreću u električnom polju, a energije su im u intervalu ( $10^4$ – $10^{12}$ ) eV. Većina  $\alpha$  i  $\beta$  raspada praćena je emisijom  $\gamma$ -zračenja. Na slici 4 prikazana je šema raspada izotopa  ${}^{24}\text{Na}$ , a zračenja koje emituje izvor  ${}^{24}\text{Na}$  imaće spektre kao na slikama 3 i 5.



Slika 4. Shema raspada izotopa  ${}^{24}\text{Na}$ .



Slika 5. Spektar gama zračenja iz raspada  ${}^{24}\text{Na}$ .

## Spontana fisija

Spontana fisija se javlja kod teških jezgara. To je proces cepanja teškog jezgra na dva lakša jezgra koja se zovu **fisioni fragmenti**. Cepanje se ne vrši na dva podjednaka fragmenta, već postoji određena verovatnoća da mase fragmenata stoje u određenom odnosu. Pri fisiji se oslobađa energija, posle fisije svaki nukleon je za oko 1 MeV čvršće vezan u fisionom fragmentu nego u početnom jezgru. Prilikom svake fisije oslobodi se oko 250 MeV. Ovu energiju nose fisioni fragmenti u vidu kinetičke energije, 2–3 oslobođena **neutronska** kao i  **$\gamma$ -zračenje**. Oslobođeni neutroni omogućavaju razvoj i održavanje lančanih reakcija u reaktorima.

## Zakon radioaktivnog raspada

Zakon radioaktivnog raspada govori o tome koliki će broj atoma početnog radioizotopa ostati neraspadnut u izvoru po isteku vremena  $t$  od početka posmatranja. Ovaj zakon može se napisati u diferencijalnom obliku:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

gde je  $\lambda$  **konstanta raspada**, čija je jedinica  $s^{-1}$ , a  $N$  je broj radioaktivnih jezgara. Konstanta raspada govori o tome kolika je verovatnoća raspada jezgra u jedinici vremena.

Integracijom ove jednačine u granicama vremena od  $t=0$  do  $t$  i broja radioaktivnih jezgara od  $N_0$  do  $N_t$ , gde je  $N_0$  **broj radioaktivnih jezgara prisutnih u početnom trenutku** ( $t=0$ ), a  $N_t$  **je broj jezgara polaznog radioizotopa koji ostaje neraspadnut nakon isteka vremena  $t$** :

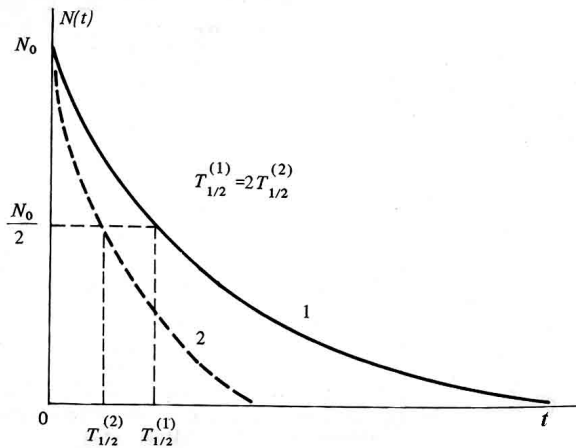
$$\int_{N_0}^{N_t} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda t$$

dobija se sledeći oblik zakona radioaktivnog raspada:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

koji je grafički prikazan na Slici 6.



Slika 6. Grafički prikaz zakona radioaktivnog raspada.

Period vremena na čijem kraju je broj neraspadnutih jezgara ( $N_T$ ) jednak polovini broja radioaktivnih jezgara prisutnih na početku, tj.  $N_T = N_0/2$ , naziva se **vreme (period) poluraspada** i obeležava se sa  $T_{1/2}$ , slika 6. Uvođenjem  $N_T = N_0/2$  za  $t = T_{1/2}$  u izraz (2) dobija se:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\ln 2 = \lambda T_{1/2}$$

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

Sada se zakon radioaktivnog raspada može napisati u obliku:

$$N_t = N_0 e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}} \quad (3)$$

### Aktivnost radioaktivnog uzorka

Broj raspada u jedinici vremena naziva se **aktivnost (A)** datog radioaktivnog uzorka:

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

Na osnovu jednačine (1) sledi:

$$A = \lambda N \quad (4)$$

gde je  $N$  broj prisutnih radioaktivnih jezgara. Kombinacijom izraza (4) i (2) dobijamo:

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}, \text{ gde je } A_0 = \lambda N_0.$$

odnosno:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

$A_0$  je početna aktivnost; to je broj raspada u prvoj sekundi od početka posmatranja, tj. od momenta kada je u radioaktivnom izvoru bilo  $N_0$  radioaktivnih atoma. Jedinice za aktivnost su

1. **Bekerel (Bq)**: aktivnost od 1 Bq znači da se u jednoj sekundi dešava jedan raspad
2. **Kiri (Ci)**: aktivnost od 1 Ci ima onaj izvor u kome se u jednoj sekundi dešava  $3,7 \cdot 10^{10}$  raspada.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

### Zadatak

1,00 g uzorka  $^{226}\text{Ra}$  prisutno je u početnom trenutku i emituje  $3,7 \cdot 10^{10}$  alfa čestica u sekundi. Izračunati konstantu radioaktivnog raspada  $\lambda$  i period poluraspada  $T_{1/2}$ . Odrediti aktivnost posle 999 godina od početnog trenutka.

### Rešenje

$$N_0 = \frac{m}{M} N_a = \frac{1,00 \text{ g} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ atoma / mol}}{226 \text{ g / mol}} = 2,66 \cdot 10^{21} \text{ atoma}$$

$$\lambda = \frac{A_0}{N_0} = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}}{2,66 \cdot 10^{21}} = 1,39 \cdot 10^{-11} \text{ s}$$

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} = 5,0 \cdot 10^{10} \text{ s} = 1600 \text{ godina}$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1} \cdot e^{-1,39 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1} \cdot 3,15 \cdot 10^{10} \text{ s}}$$

$$A = 2,4 \cdot 10^{10} \text{ rasp / s}$$

## Nuklearne reakcije

Nuklearna reakcija je proces u kome atomsko jezgro reaguje sa nekim drugim jezgrom, sa elementarnom česticom ili  $\gamma$ -fotonom. Dejstvo čestica na atomsko jezgro- metu zove se bombardovanje, a čestica kojom se vrši bombardovanje zove se projektil.

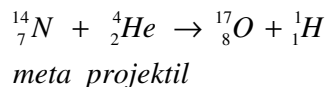
Mehanizam nuklearnih reakcija po Borovom modelu je sledeći:

1. faza traje  $10^{-20}$  s, upadna čestica gubi svoju energiju u sudarima sa nukleonima- formira se prelazno, složeno jezgro koje je u pobuđenom stanju.
2. faza traje  $10^{-12}$  s, u međusobnim sudarima nukleona dešava se da jedan od njih primi dovoljnu kinetičku energiju tako da savladava energiju veze i izlazi iz jezgra. Pri tome se emisijom jedne ili više čestica, ili  $\gamma$ - kvanta pobuđeno složeno jezgro oslobađa viška energije. Ono prelazi na niži energetski nivo- formira se novo jezgro koje može biti stabilno ili radioaktivno.

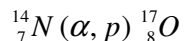
**Način pisanja nuklearnih reakcija** sličan je prikazivanju hemijskih reakcija. Na levoj strani jednačine pišu se komponente koje stupaju u reakciju (jezgro mete i projektil), a na desnoj



strani proizvodi nuklearne reakcije (nastalo jezgro i čestica odnosno  $\gamma$ -zrak koji su pri reakciji izbačeni). Na primer, prva nuklearna reakcija, koju je otkrio Raderford 1919. godine, bila je bombardovanje jezgra  ${}^{14}_7N$  alfa česticama, pri tome se stvara stabilno jezgro  ${}^{17}_8O$  i izbacuje proton  ${}^1_1H$  :



Ova reakcija se piše u skraćenom obliku na sledeći način:



Važno je istaći da u nuklearnoj reakciji ostaje **nepromenjen ukupan broj protona i neutrona** (na levoj i na desnoj strani jednačine).

Kao **projektili** u nuklearnim reakcijama koriste se:

**1. naelektrisani projektili:**

$\alpha$ -čestice (jezgra helijuma,  ${}^4_2He$ )

protoni (jezgra vodonika,  ${}^1_1H$  ili **p**)

deuteroni (jezgra deuterijuma,  ${}^2_1H$  ili **d**)

**2. neutroni**

nuklearne reakcije sa neutronima su (n, $\gamma$ ), (n,p), (n, $\alpha$ ), (n,f)

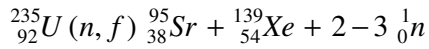
Pozitivno maelektrisani projektili moraju da savladaju potencijalnu barijeru koju stvaraju Kulonove odbojne elektrostatičke sile, da bi ušli u pozitivno naelektrisano jezgro mete. Zbog toga se vrši ubrzavanje pozitivnih projektila u **akceleratorima**, dejstvom električnog i magnetnog polja. Kod neutrona-naelektrisanih projektila, nema potencijalne barijere za ulazak u jezgro.

Nuklearna reakcija tipa **(n, $\gamma$ )** nastaje zahvatom (apsorpcijom) termalnih neutrona u jezgru atoma mete i prati je emisija  $\gamma$ -kvanta. Pri tome ne dolazi do promene rednog broja atoma mete i proizvod reakcije, pošto ima iste hemijske osobine, ne može da bude odvojen od atoma mete.

Nuklearna reakcija tipa **(n,p)** nastaje zahvatom brzih neutrona ( $E_n > 1$  MeV) od strane jezgra mete; praćena je emisijom protona i dovodi do smanjenja rednog broja za jedinicu. U ovom slučaju nastaje hemijski element različit od polaznog koji se može hemijski odvojiti.

Nuklearna reakcija tipa **(n, $\alpha$ )** nastaje zahvatom brzih neutrona i praćen je emisijom  $\alpha$  čestice. Proizvod koji nastaje ima redni broj manji za dva u odnosu na redni broj mete.

Nuklearna reakcija **(n,f)** naziva se **fisija**. Nastaje zahvatom neutrona u jezgru izotopa  ${}^{235}_{92}U$  (fisibilnog materijala koji se nalazi u prirodnom uranijumu, sa zastupljenošću 0,7 %). Ovu reakciju karakteriše cepanje teškog jezgra mete  ${}^{235}_{92}U$  na **dva fragmenta-dva lakša radioaktivna jezgra. Zbir rednih brojeva fragmenata jednak je rednom broju mete.** Proces fisije ima statistički karakter-postoji oko 40 načina cepanja jezgara  ${}^{235}_{92}U$  pri čemu postoji verovatnoća da nastane oko 300 različitih radioaktivnih produkata fisije. Najveći prinosi odnose se na jezgra sa masenim brojevima oko 95 i 140, odnosno najverovatnije je cepanje  ${}^{235}_{92}U$  na sledeće fragmente:



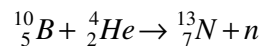
Reakciju fisije prati oslobađanje nuklearne energije od oko 200 MeV i prosečno 2-3 brza neutrona srednje energije od oko 2 MeV po nuklearnoj fisiji. Radom nuklearnog reaktora nastaje veliki broj fisionih radionuklida. Neki od njih sa većim praktičnim značajem su:  ${}_{55}^{137}\text{Cs}$  (T=30 god),  ${}_{53}^{131}\text{I}$  (T=8,1 d),  ${}_{56}^{140}\text{Ba}$  (T=12,8 d),  ${}_{38}^{90}\text{Sr}$  (T=25 god).

### Prirodna radioaktivnost

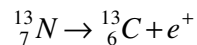
Na Zemlji postoji ukupno oko 330 izotopa (90 hemijskih elemenata). Od toga, stabilnih izotopa je 270, a ostali su nestabilni-prirodno radioaktivni. Zračenja koja nastaju raspadom ovih prirodno radioaktivnih izotopa čine prirodnu radioaktivnost u našoj okolini. Njihovi periodi poluraspada su veliki, tj. tempo raspada je spor. Elementi sa rednim brojem od 84-92 uopšte nemaju stabilnih izotopa i formiraju tri prirodna radioaktivna niza, koja počinju izotopima  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{238}\text{U}$  i  ${}^{232}\text{Th}$ .

### Veštačka radioaktivnost

Veštački radioizotopi proizvode se različitim nuklearnim reakcijama. Prvi put je veštačka radioaktivnost dobivena 1933. god. kada su Frederic Joliot i Irena Curie- Joliot bombardovali  $\alpha$  česticama (polonijuma) mete B, Al i Mg. Primetili su da se nastala emisija pozitrona nastavlja i po prestanku bombardovanja:



$\beta^+$  emisijom nastalog radioaktivnog proizvoda  ${}_{7}^{13}\text{N}$  nastaje stabilan izotop  ${}_{6}^{13}\text{C}$ :



### Detekcija radioaktivnog zračenja

Radioaktivno zračenje pri prolasku kroz materiju interaguje sa njom tako da atome materije jonizuje ili ekscituje. Na osnovu **jonizacije** ili **ekscitacije** atoma materije vrši se detekcija radioaktivnog zračenja. U celom procesu detekcije razlikuju se tri etape a) dospevanje zračenja na detektor, b) delovanje zapremine detektora c) indikacija o detektovanom zračenju.

- a) Zračenje koje pada na detektor može biti čestično (fisioni fragmenti, alfa čestice, protoni, beta čestice, neutroni ili fotoni-gama zračenje). Najčešće, detektor je selektivno osetljiv na jedno zračenje, pa dobija naziv: **detektor za alfa, beta ili gama-zračenje**.
- b) Efikasna (osetljiva) zapremina detektora se sastoji od materije koja se nalazi u specifičnom stanju: pod električnim ili magnetnim poljem, u specifičnom hemijskom stanju i slično. Nakon prolaska zračenja dolazi do energetske promene i stvaranja indikacije o zračenju. Efikasna zapremina može biti u gasnom, tečnom ili čvrstom agregatnom stanju, pa odatle sledi i druga klasifikacija detektora: **gasni, tečni ili čvrsti detektori**.
- c) Indikacija je krajnji rezultat mehanizma detekcije i sastoji se u nekoj fizičkoj promeni: pojavi naelektrisanja, svetlosti, toplote, boje; kristalizaciji, kondenzaciji ili nekoj promeni hemijske ili biološke strukture.

Od gasnih detektora sa električnom indikacijom najpoznatiji su: jonizacione komore (impulsne i integralne strujne), proporcionalni brojači, Gajger-Milerovi i halogeni brojači, elektrolučni (varnični) brojači i gasni scintilacioni brojači. Predstavnici tečnih brojača su: tečni scintilacioni brojači i Čerenkovljevi brojači, a čvrstih: scintilacioni  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  detektori, scintilaciona stakla, kristalni detektori i poluprovodnički detektori.

## Primene radioaktivnih izotopa

Najvažnije primene radioaktivnih izotopa su u nauci (istraživanjima), medicini (nuklearnoj medicini), i poljoprivredi.

### Radioaktivni obeleživači u nauci

- a) Molekuli ili ćelije mogu se markirati tako što se radioaktivni izotop ugrađuje u molekul za vreme njegove sinteze ili već sintetisani molekul razmeni neki od svojih stabilnih atoma odgovarajućim radioaktivnim izotopom. Najčešće korišćeni radioaktivni izotopi kao obeleživači su: tricijum  $^3H$ ,  $^{14}C$  i  $^{32}P$ , čiji su stabilni izotopi prisutni u ćelijskim delovima.
- b) Obeležavanjem supstancija i unošenjem obeležene supstancije u organizam može se pratiti raspodela radioaktivnosti u pojedinim organima ili tkivima i na taj način dobiti bitni podaci o raspodeli biološki aktivnih supstancija u organizmu. Na primer, kod izučavanja metabolizma proteina koriste se aminokiseline obeležene sa  $^3H$  ili  $^{14}C$ . Ovi obeleživači koriste se i kod izučavanja drugih fundamentalnih biohemijskih procesa.
- c) Eritrociti mogu da se obeleže izotopom  $^{51}Cr$  (u epruveti), a zatim se unose u krvotok i na osnovu brzine opadanja radioaktivnosti može se izračunati dužina života eritrocita.
- d) Izučavanje transporta hemijskih elemenata, npr. kalcijuma iz hrane u mleko, ili ugradnja fosfora iz hrane u koštano tkivo, transport joda...
- e) izučavanje sinteze DNA

### Radioaktivni izotopi u medicini

U medicini radioaktivni izotopi se mogu koristiti za postavljanje dijagnoze. Na primer za ispitivanje poremećaja štitne žlezde, koja akumulira jod, koriste se radioaktivni izotopi  $^{123}I$  i  $^{131}I$ . Raspodela radioaktivnog joda u tkivu štitne žlezde ispituje se pomoću fotoskenera. Dalje, radioaktivni izotopi koriste se za lokalizaciju nekih tipova tumora mozga i drugih organa, kao i za ispitivanje funkcije organa. Radioimunološkom analizom određuju se koncentracije antigena i ispituju reakcije antigen-antitelo.

**U poljoprivredi**, primenom radioaktivnih izotopa proučava se brzina apsorpcije pojedinih komponenti iz tla u biljkama.