

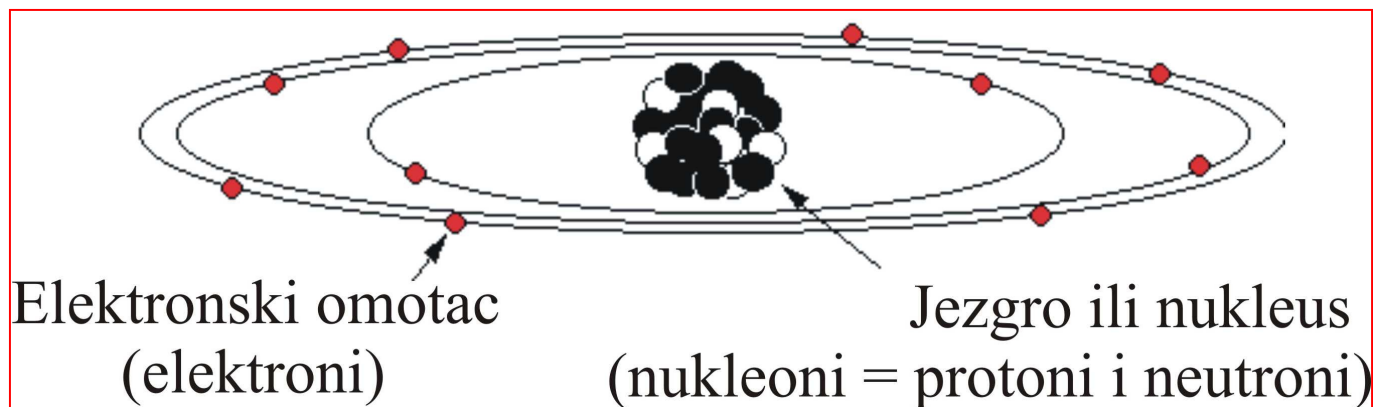
RADIOHEMIJA



ATOM I ATOMSKO JEZGRO

- ✓ Karakteristike elementarnih čestica: elektrona, protona i neutrona
- ✓ Redni i maseni broj hemijskog elementa
- ✓ Izotopi, izobari, izotoni i izomeri
- ✓ Defekt mase
- ✓ Energija veze i energija veze po nukleonu
- ✓ Stabilni i radioaktivni elementi

ATOM I ATOMSKO JEZGRO



<i>Čestica</i>	<i>Simbol</i>	<i>Lokacija</i>	<i>Naelektrisanje / C</i>	<i>Masa mirovanja / kg</i>	<i>Stabilnost</i>
Elektron	e	omotač	$- 1.6 \cdot 10^{-19}$	$9.1094 \cdot 10^{-31}$	stabilan
Proton	p	jezgro	$+ 1.6 \cdot 10^{-19}$	$1.6724 \cdot 10^{-27}$	stabilan
Neutron	n	jezgro	0	$1.6748 \cdot 10^{-27}$	nestabilan

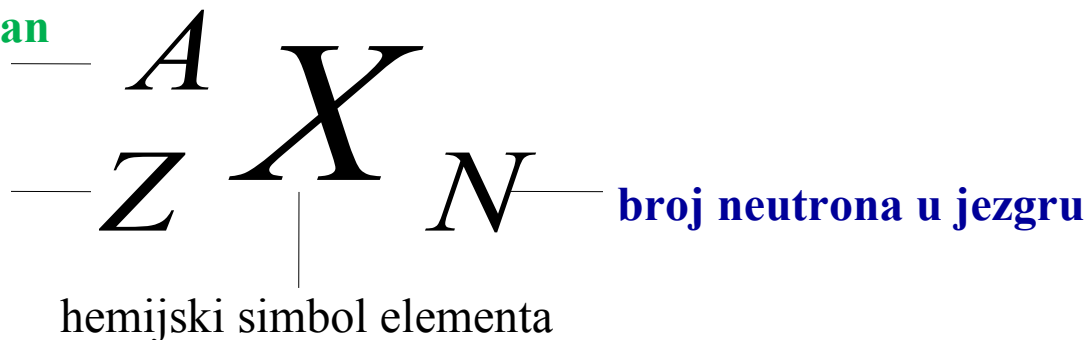
Jedinično naelektrisanje, $e^- = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Atomska jedinica mase, $1 \text{ u} = 1,66053886 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

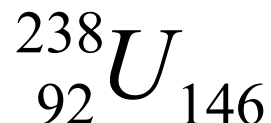
NAJVAŽNIJE KARAKTERISTIKE ATOMSKOG JEZGRA

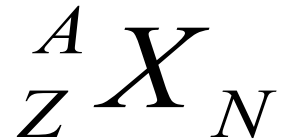
maseni broj (broj nukleona, tj. ukupan broj protona i neutrona u jezgru)

redni ili atomski broj (broj protona u jezgru, tj. broj elektrona u omotaču)



- ✓ Prečnik atomskog jezgra $\sim 10^{-15}$ m, prečnik atoma $\sim 10^{-10}$ m
- ✓ Ukupan broj elektrona u omotaču jednak je ukupnom broju protona u jezgru i predstavlja **redni (atomski) broj Z** .
- ✓ Ukupan **broj neutrona N**
- ✓ Ukupan broj nukleona tj. protona i neutrona, u jezgru predstavlja **maseni broj A** ($A = Z + N$)



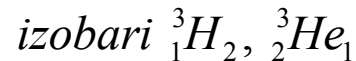


Podela nukleida:

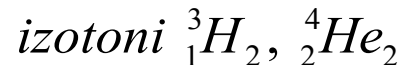
- ✓ *Izotopi* - jezgra istog hemijskog elementa sa istim brojem protona Z i različitim brojem neutrona N , a samim tim i različitim masenim brojem A ($=Z+N$).



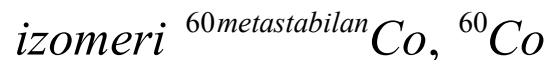
- ✓ *Izobari* - jezgra različitih susednih hemijskih elemenata sa istim masenim brojem A ($=Z+N$), a različitim brojem protona Z i neutrona N .



- ✓ *Izotoni* - jezgra sa istim brojem neutrona N , a različitim brojem protona Z i samim tim i različitim masenim brojem A ($=Z+N$).



- ✓ *Izomeri* - jezgra sa istim brojem protona Z i neutrona N i samim tim i istim masenim brojem A ($=Z+N$), a različitim energetska stanjima.



✓ **Defekt mase $\Delta M(Z, N)$** - razlika između teorijske i stvarne mase atomskog jezgra.

$$\Delta M(Z, N) = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - M_{\text{jezgra}}$$

Z – redni broj
 m_p – masa protona
 N – broj neutrona
 m_n – masa neutrona
 M_{jezgra} – stvarna masa jezgra

✓ **Ukupna energija veze atomskog jezgra $W(Z, N)$** - energija potrebna da bi se jezgro rastavilo na slobodne nukleone.

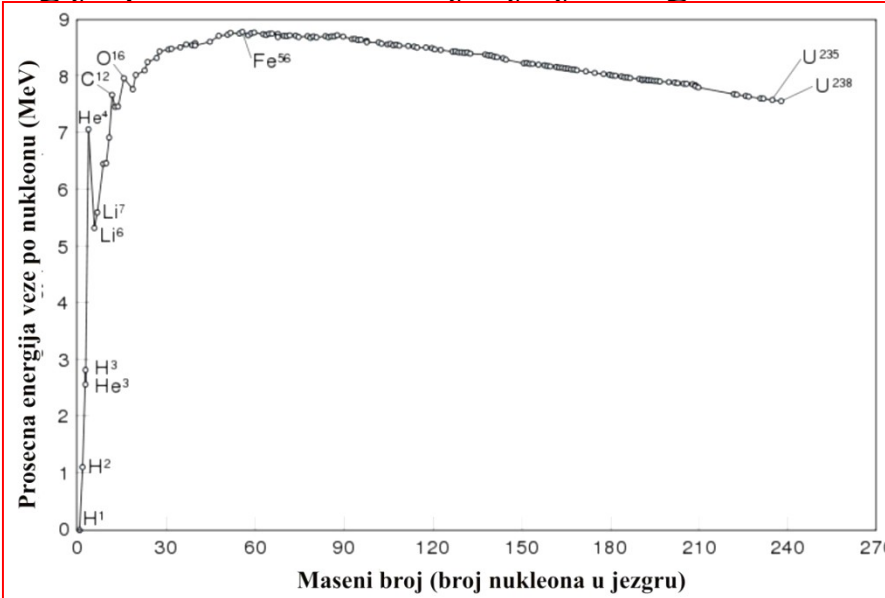
$$W(Z, N) = \Delta M(Z, N) \cdot c^2$$

c - brzina svetlosti ($3 \cdot 10^8$ m/s)

✓ **Energija veze po nukleonu $B(Z, N)$** - srednja energija potrebna za odvajanje jednog nukleona od jezgra.

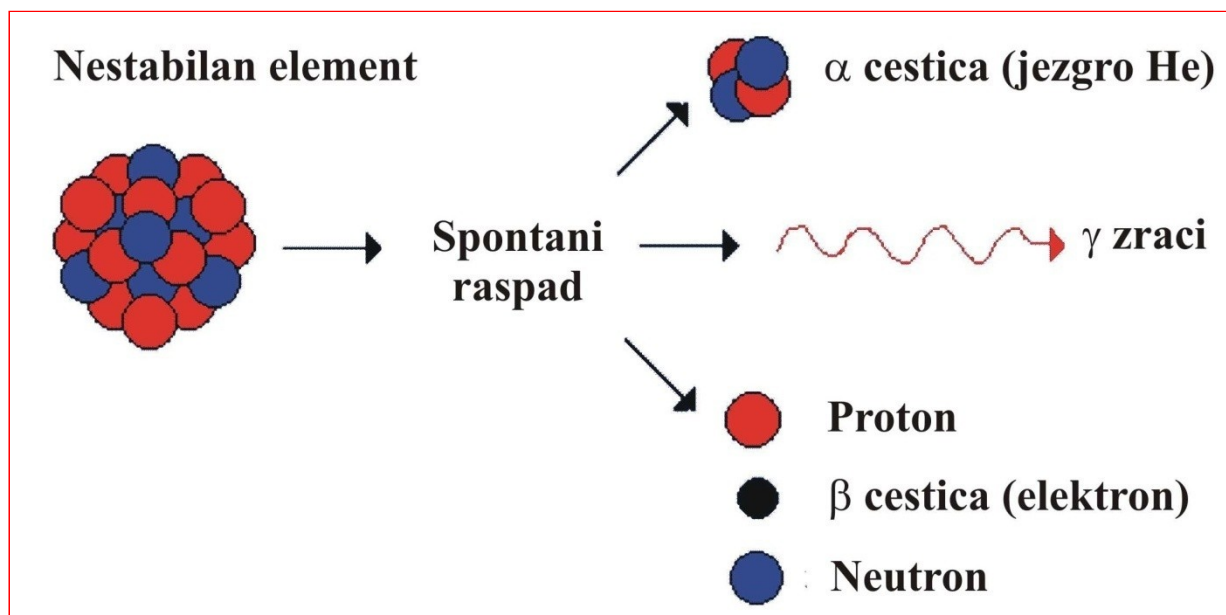
$$B(Z, N) = \frac{W(Z, N)}{Z + N}$$

✓ **Stabilnost atomskog jezgra**



1 eV = $1.60217646 \cdot 10^{-19}$ J

RADIOAKTIVNOST - spontano raspadanje jezgara atoma i prelazak u drugi element, praćeno emisijom nuklearnih čestica sa ili bez pratećeg zračenja.



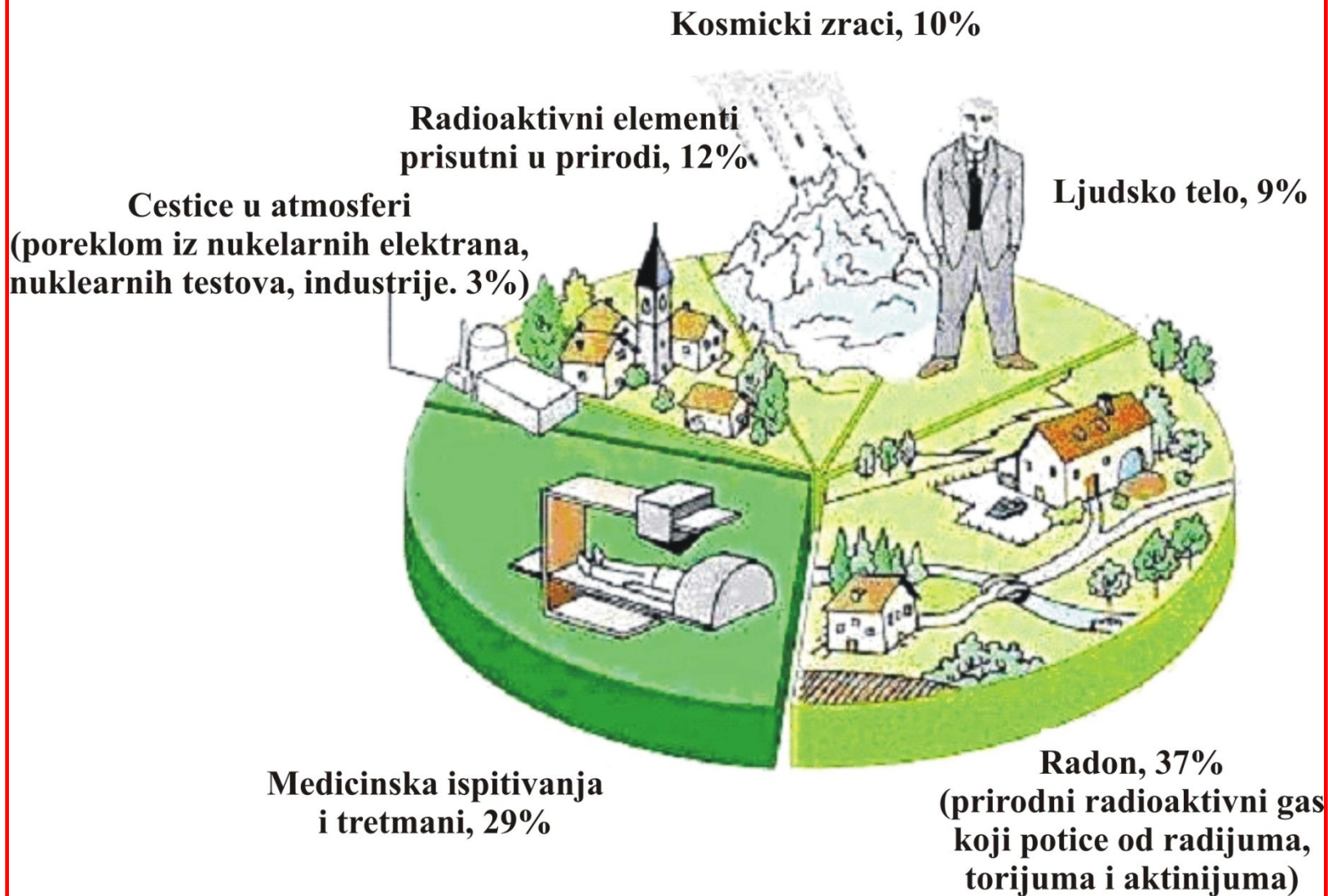
oko 2000 radioaktivnih nuklida i samo 274 stabilnih

ATOM I ATOMSKO JEZGRO - pregled

- ✓ Karakteristike elementarnih čestica: elektrona, protona i neutrona
- ✓ Redni i maseni broj hemijskog elementa
- ✓ Izotopi, izobari, izotoni i izomeri
- ✓ Defekt mase
- ✓ Energija veze i energija veze po nukleonu
- ✓ Stabilni i radioaktivni elementi

RADIOAKTIVNOST

- ✓ Otkriće radioaktivnosti
- ✓ Zakon radioaktivnog raspada
- ✓ Karakteristične veličine radioelemenata:
 - ✓ Vreme poluraspada
 - ✓ Konstanta radioaktivnog raspada
 - ✓ Srednje vreme života
- ✓ Aktivnost i jedinice radioaktivnosti
- ✓ Vrste radioaktivnog raspada:
 - ✓ α – raspad
 - ✓ β - raspad: β^- raspad, β^+ raspad i elektronski zahvat
 - ✓ γ – raspad
 - ✓ Spontana fisija



OTKRIĆE RADIOAKTIVNOSTI

✓ **Otkriće radioaktivnosti** – Anri Bekerel (Henri Becquerel), 1896. god.

✓ **Naziv radioaktivnost** – Marija Kiri (Marie Curie)

✓ **Otkriće polonijuma i radijuma** – Marija i Pjer Kiri (Marie i Pierre Curie), 1898. godine

✓ **Nobelove nagrade:**

■ 1903. godine Marija i Pjer Kiri i Anri Bekerel, Nobelova nagrada za fiziku

■ 1911. godine Marija Kiri, Nobelova nagrada za hemiju



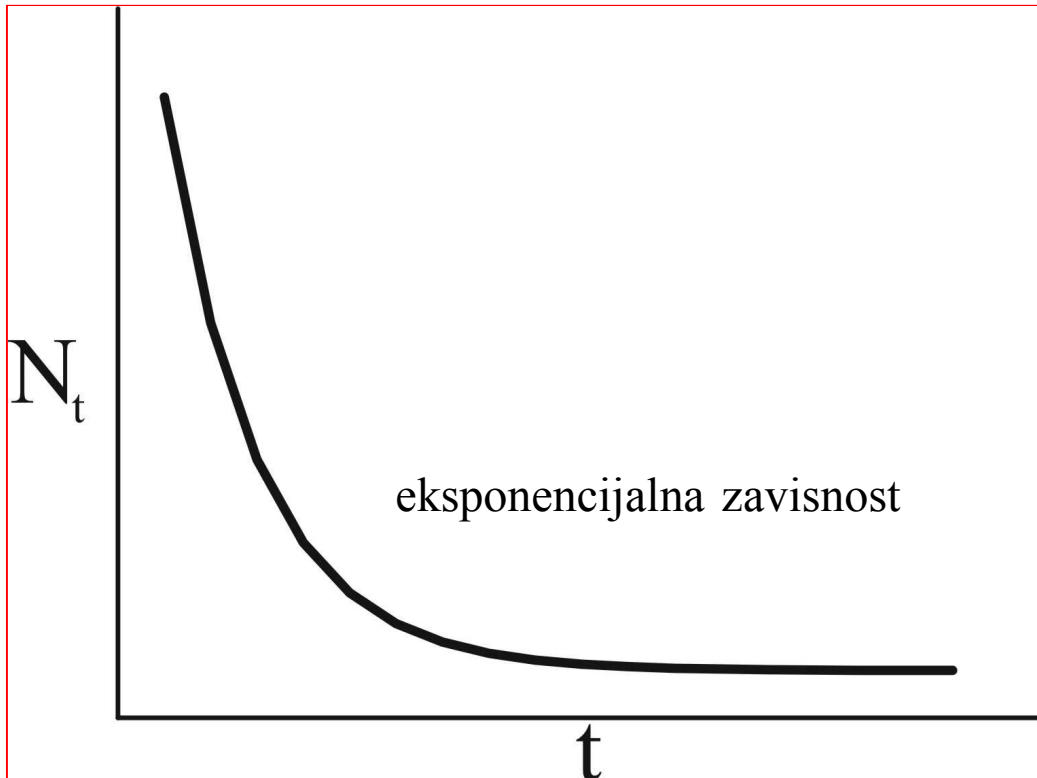
Marie and Pierre Curie

ZAKON RADIOAKTIVNOG RASPADA

Zakon radioaktivnog raspada govori o tome koliki ce broj atoma početnog radioizotopa ostati neraspadnut u izvoru po isteku vremena t od početka posmatranja.

Zakon radioaktivnog raspada

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



N_t - broj neraspadnutih atoma radioizotopa u trenutku t

N_0 - početni broj atoma radioizotopa

e - iracionalna konstanta, $e = 2.718281828$

λ - konstanta radioaktivnog raspada

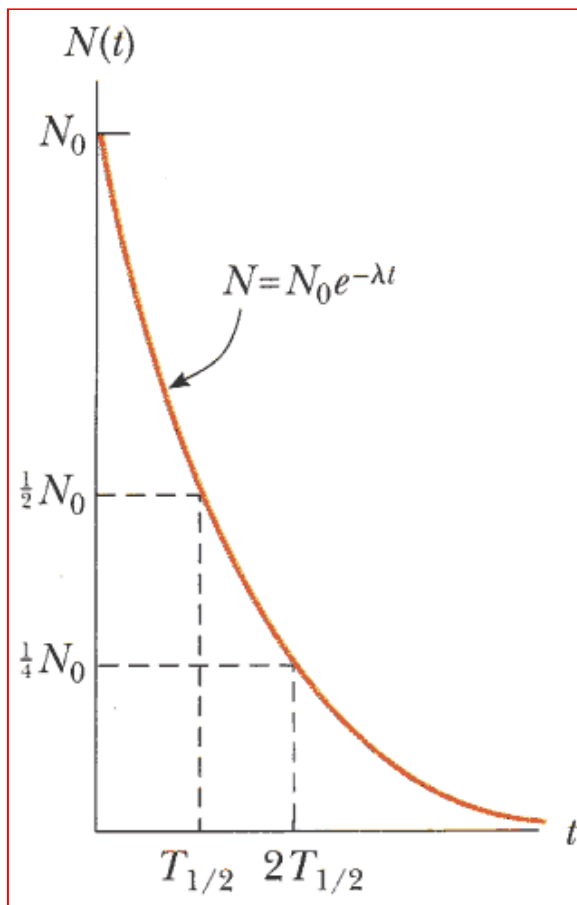
t - vreme

KARAKTERISTIČNE VELIČINE RADIOELEMENATA

- ✓ Vreme poluraspada $t_{1/2}$
- ✓ Radioaktivna konstanta λ
- ✓ Srednji život τ

KARAKTERISTIČNE VELIČINE RADIOELEMENATA

Vreme poluraspada $t_{1/2}$ – vreme za koje se broj prvobitno prisutnih atoma smanji na polovinu.



- ✓ zavisi od vrste radioizotopa (osobina jezgra)
- ✓ ne zavisi od količine radioaktivnih atoma
- ✓ ne zavisi od temperature T , pritiska p , hemijskog okruženja

$$t_{1/2} (^{226}\text{Ra}) = 1600 \text{ godina}$$

$$t_{1/2} (^{32}\text{P}) = 14.28 \text{ dana}$$

uvek, u svakom hemijskom obliku, u svakom agregatnom stanju

KARAKTERISTIČNE VELIČINE RADIOELEMENATA

Radioaktivna konstanta λ govori o tome kolika je verovatnoća raspada jezgra u jedinici vremena.

$$\lambda = \frac{-dN/N}{dt}$$

- ✓ zavisi od vrste radioizotopa (osobina jezgra)
- ✓ ne zavisi od temperature T , pritiska p , hemijskog okruženja

* * * * *

Srednji život τ - verovatno vreme života većine atoma

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{0.693} = 1.443 \cdot t_{1/2}$$

AKTIVNOST i JEDINICE RADIOAKTIVNOSTI

Aktivnost preparata A - apsolutni broj atoma koji se raspao u jedinici vremena (raspad/s)

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

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

$$A_0 = \lambda N_0$$

A – aktivnost u trenutku t

A_0 – aktivnost u početnom trenutku t_0

e – iracionalna konstanta, $e = 2.718281828$

N_t - broj neraspadnutih atoma radioizotopa u trenutku t

N_0 – početni broj atoma radioizotopa

λ – konstanta radioaktivnog raspada

t – vreme

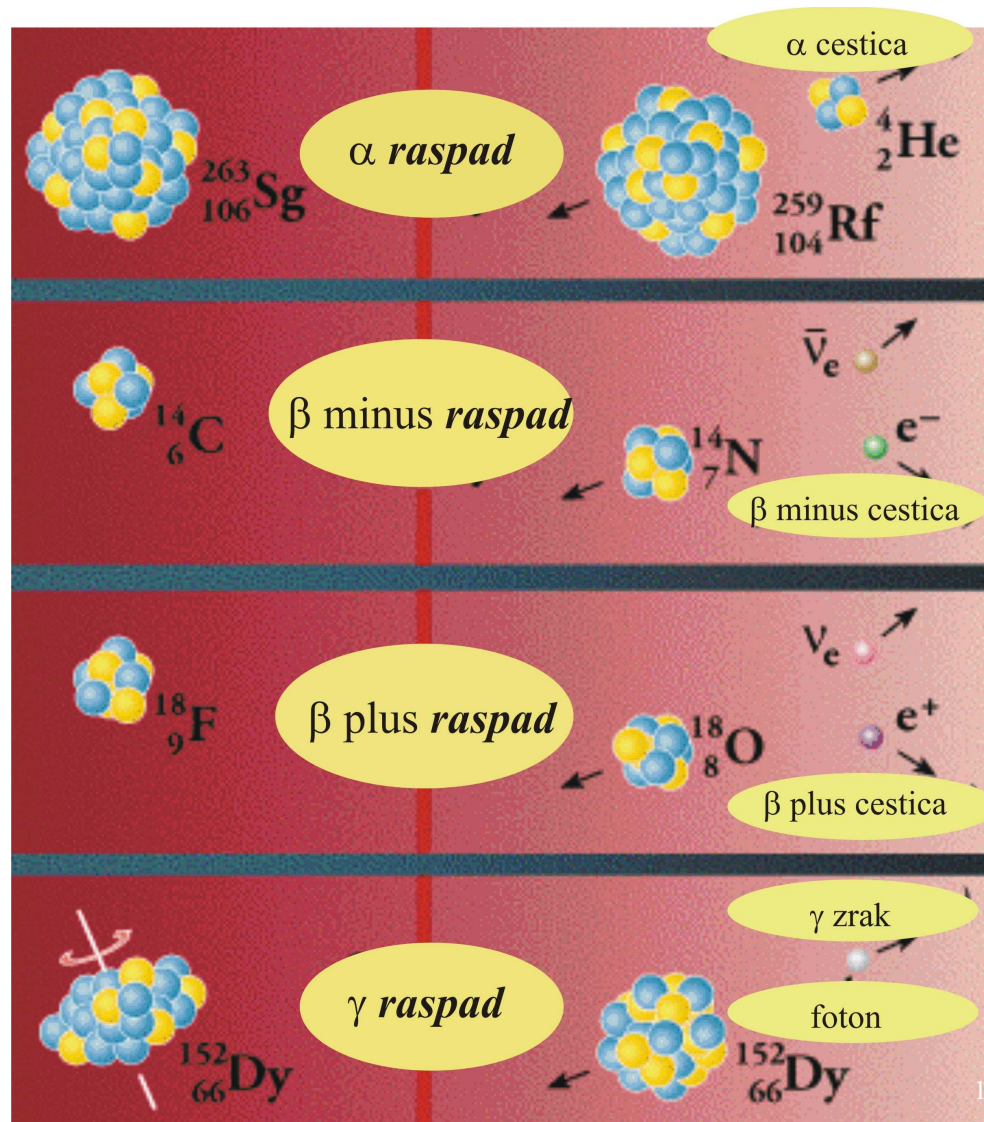
Specifična aktivnost - aktivnost jedinice mase ili jedinice zapremine.

Jedinice za aktivnost

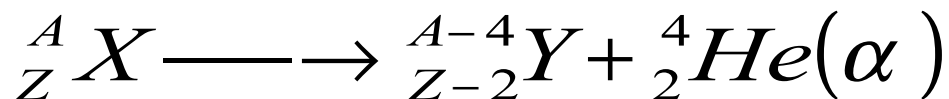
- ✓ Currie Ci (stara jedinica) - radioaktivnost 1g ^{226}Ra
 $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$ raspada/s
- ✓ Becquerel Bq (SI sistem), $1\text{Bq} = 1$ raspad/s
- ✓ Raderford Rd, $1\text{Rd} = 10^6$ Bq

VRSTE RADIOAKTIVNIH RASPADA

- ✓ α – raspad
- ✓ β - raspad:
 - β^- raspad
 - β^+ raspad
 - elektronski zahvat
- ✓ γ – raspad
- ✓ Spontana fisija



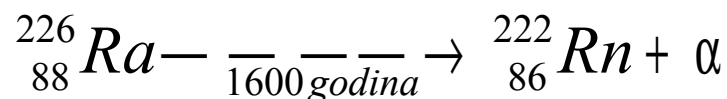
α - RASPAD



jezgro predak

jezgro potomak

α čestica (jezgro helijuma) (!)



- ✓ maseni broj potomka manji za 4 jedinice u odnosu na maseni broj pretka
- ✓ redni broj potomka manji za 2 jedinice u odnosu na redni broj pretka
- ✓ jezgro potomka pripada elementu koji je pomeren za dva mesta u levo u periodnom sistemu elemenata
- ✓ α raspad je karakterističan za nuklide sa $Z > 83$ i $A \geq 210$
- ✓ ${}^{209}Bi$ - najteži stabilan nuklid u prirodi

- Energija zračenja 4 – 10 MeV

Najveći deo energije α raspada odnosi sama α čestica, pa je energija zračenja praktično jednaka energiji raspada.

- Linijski spektar zračenja (energija zračenja je precizno definisana)

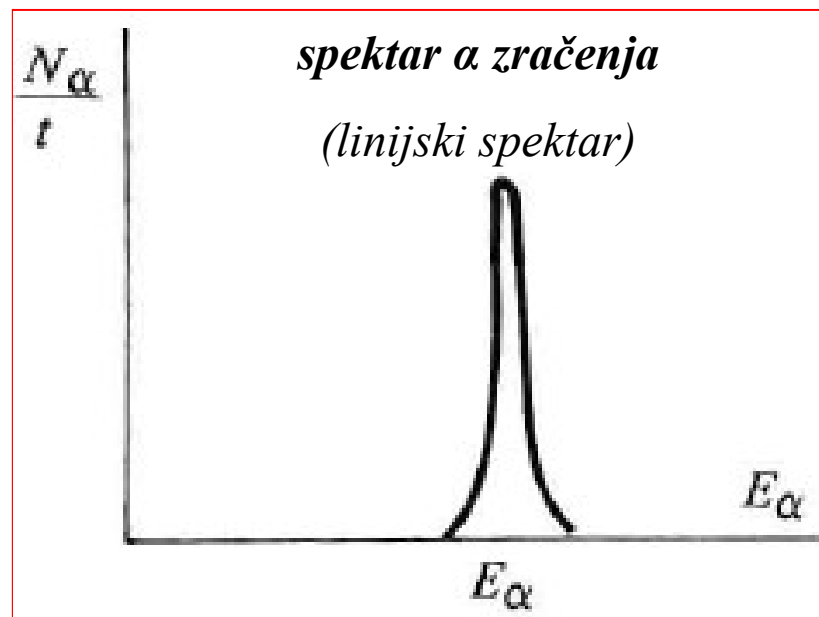
- Brzina α čestica, $v \sim 0,05c$, c - brzina svetlosti

- ***Domet α -čestica*** - rastojanje koje α -čestice pređu od izvora do mesta gde njihov broj naglo opada:

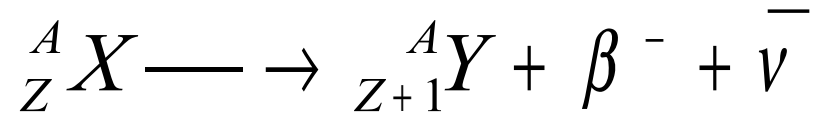
- ✓ u vazduhu nekoliko cm
- ✓ u aluminijumu 0,004 cm

- Prodornost α zračenja oko 100 puta manja od prodornosti β zraka

- Pravolinijsko kretanje kroz gasove



β^- RASPAD



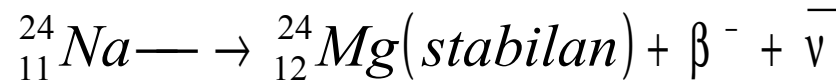
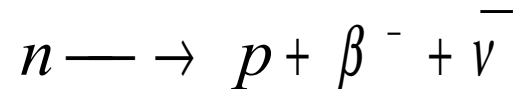
jezgro predak

jezgro potomak

elektron

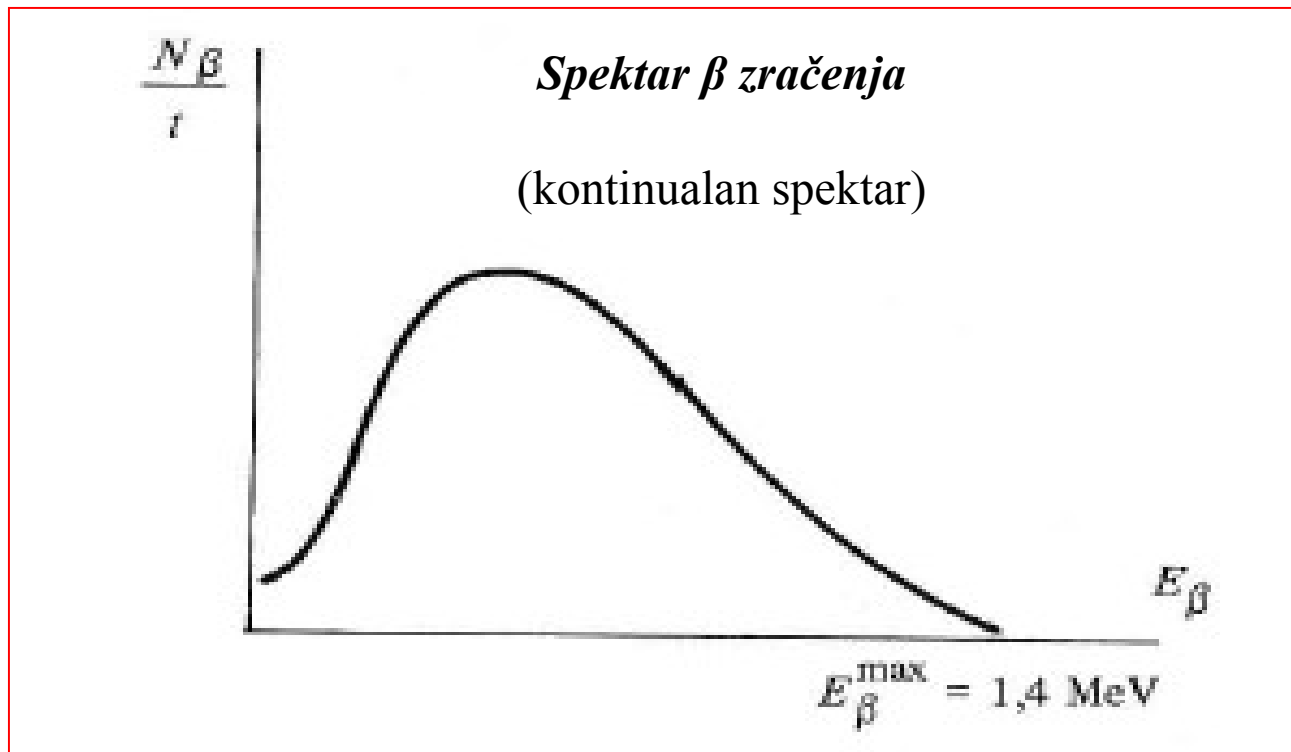
antineutrino (!)

Promena u samom jezgru:

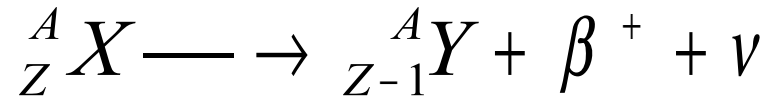


- ✓ Jezgro potomka pripada elementu koji je za jedno mesto pomeren u desno u periodnom sistemu elemenata u odnosu na element kome pripada jezgro predak.
- ✓ Karakterističan za jezgra sa velikim brojem neutrona

- ✓ β čestica se po utrošku energije ukloni u materiju kao običan elektron.
- ✓ Maksimalna energija u spektru β zračenja je $\sim 5 \text{ MeV}$
- ✓ Energija oslobođena pri β raspadu se raspodeljuje između β čestice (e^-) i antineutrina ali ne uvek na isti način te je spektar β zračenja kontinualan.
- ✓ Brzine β^- čestica u opsegu od $0,3c$ do $0,99c$, c - brzina svetlosti

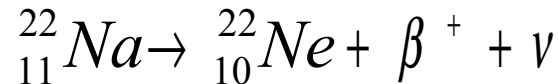


β^+ RASPAD



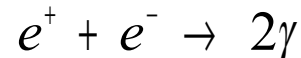
jezgro predak jezgro potomak pozitron (!) neutrino (!)

promena u samom jezgri: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$



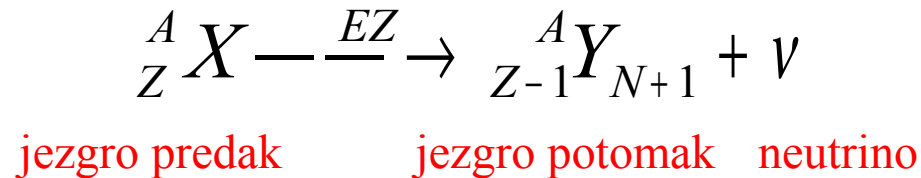
Jezgro potomka pripada elementu koji je za jedno mesto pomeren u levo u periodnom sistemu elemenata u odnosu na element kome pripada jezgro predak.

Anihilacija – prolazeći kroz materiju pozitroni, e^+ , se susreću sa slobodnim elektronima, e^- , i prelaze u dva γ fotona.

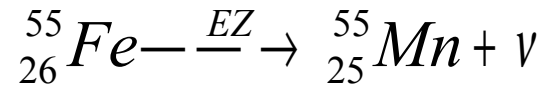


Elektronski zahvat (EZ)

EZ je konkurentan β^+ raspadu.



promena u samom jezgri: $p + e^- \rightarrow n + \nu$

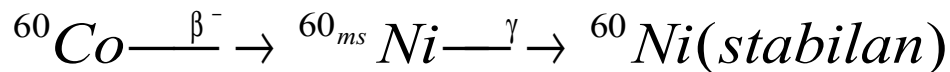
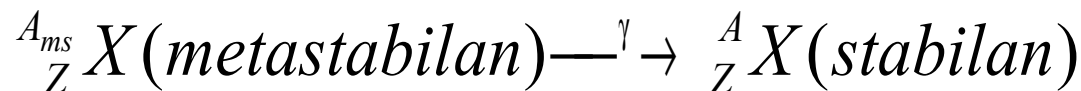


- ✓ Jezgro potomka pripada elementu koji je za jedno mesto pomeren u levo u periodnom sistemu elemenata u odnosu na element kome pripada jezgro predak.
- ✓ Pojava pratećeg X_K zračenja

γ RASPAD

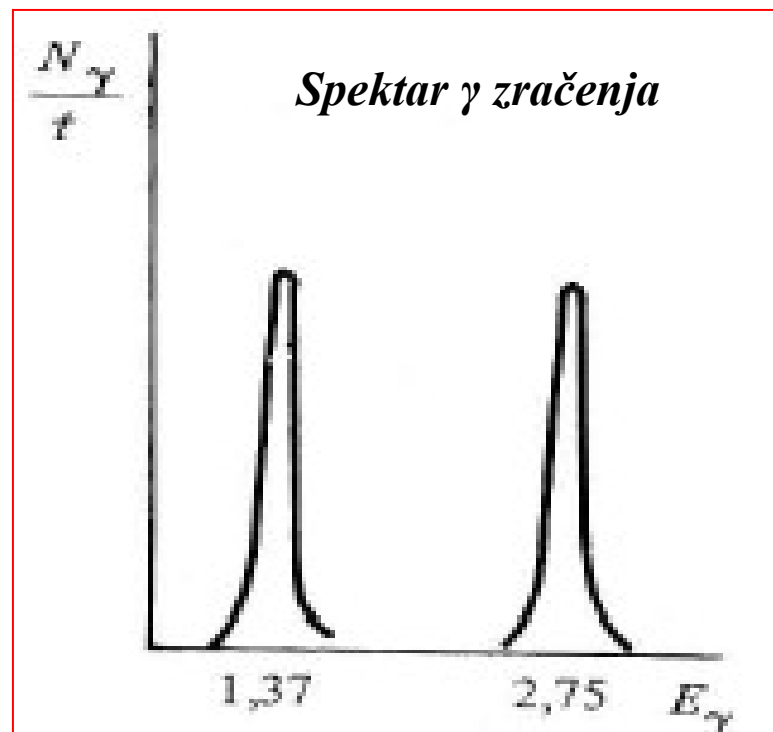
Jezgro potomak u eksitovanom stanju se deekscituje

- ✓ γ prelazom (emisija fotona) ili
- ✓ putem unutrašnje konverzije - jezgro predaje omotaču višak energije; predata energija je veća od energije veze, oslobađa se elektron iz spoljašnje orbite.



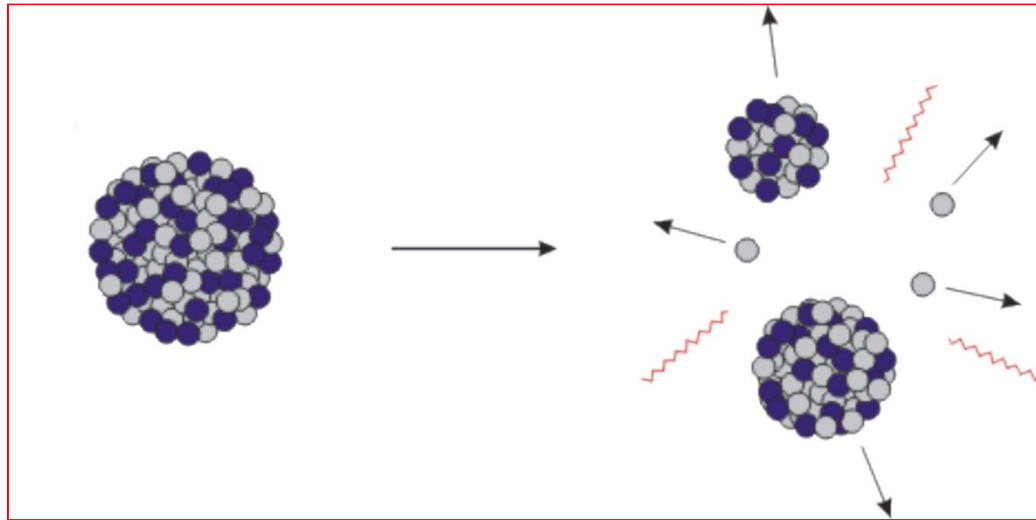
Karakteristike γ zračenja

- ✓ Energije γ -zraka su u intervalu od 104 do 1012 eV
- ✓ γ zračenje je oko 100 puta prodornije od β zračenja.
- ✓ γ zraci ne skreću u električnom polju



SPONTANA FISIJA

Spontana fisija – proces cepanja teškog jezgra na dva lakša koja se nazivaju *fisioni fragmenti*.



- ✓ Karakteristična za teška jezgra
- ✓ Oslobađaju se 2 – 3 neutrona i γ zračenje
- ✓ Oslobađa se energija od oko 250 MeV

VRSTE RADIOAKTIVNIH RASPADA

<i>Tip</i>	<i>Opšta nuklearna reakcija</i>	<i>Primer</i>
α	${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He(\alpha)$	${}^{226}_{88}Ra \xrightarrow{1600 \text{ godina}} {}^{222}_{86}Rn + \alpha$
β^-	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z+1}Y + \beta^- + \bar{\nu}$ $n \longrightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$	${}^{32}_{15}P \longrightarrow {}^{32}_{16}S(\text{stabilan}) + \beta^- + \bar{\nu}$
β^+	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z-1}Y + \beta^+ + \nu$ $p \longrightarrow n + e^+ + \nu$	${}^{22}_{11}Na \longrightarrow {}^{22}_{10}Ne + \beta^+ + \nu$
Elektronski zahvat	${}^A_ZX \xrightarrow{EZ} {}^A_{Z-1}Y_{N+1} + \nu$ $p + e^- \longrightarrow n + \nu$	${}^{55}_{26}Fe \xrightarrow{EZ} {}^{55}_{25}Mn + \nu$
γ	${}^{A_{ms}}_ZX(\text{metastabilan}) \xrightarrow{\gamma} {}^A_ZX(\text{stabilan})$	${}^{60}Co \xrightarrow{\beta^-} {}^{60_{ms}}Ni \xrightarrow{\gamma} {}^{60}Ni(\text{stabilan})$

RADIOAKTIVNOST - pregled

- ✓ Otkriće radioaktivnosti
- ✓ Zakon radioaktivnog raspada
- ✓ Karakteristične veličine radioelemenata:
 - Vreme poluraspada
 - Konstanta radioaktivnog raspada
 - Srednje vreme života
- ✓ Aktivnost i jedinice radioaktivnosti
- ✓ Vrste radioaktivnog raspada:
 - α – raspad
 - β - raspad: β^- raspad, β^+ raspad i elektronski zahvat
 - γ – raspad
 - Spontana fisija

PROLAZ ZRAČENJA KROZ MATERIJU

Prolaz α i β zračenja:

- ✓ Ekscitacija
- ✓
- ✓ Ionizacija
- ✓ Disocijacija

Prolaz γ zračenja:

- ✓ Fotoelektrični efekat
- ✓ Comptonov efekat
- ✓ Stvaranje elektronskih parova

PROLAZ α i β ZRAČENJA KROZ MATERIJU

Prolaz α i β zračenja:

- ✓ Ekscitacija
- ✓ Jonizacija
- ✓ Disocijacija

Uvek su zastupljena sva tri procesa, a udeo svakog pojedinačnog zavisi od osobina atoma (molekula) sredine i osobina zračenja.

Ekscitacija je proces u kome brza naelektrisana čestica predaje nekom od elektrona u omotaču atoma mali deo svoje energije pa elektron prelazi u neki viši energetski nivo posle čega se brzo ($\sim 10^{-14}$ s) vraća u svoje osnovno stanje uz emisiju X zračenja.

Jonizacija je proces u kome visokoenergetska naelektrisana čestica predaje nekom od elektrona u omotaču atoma energije dovoljnu da elektron napusti atom usled čega nastane jonski par: pozitivno naelektrisan atom i negativno naelektrisan elektron koji je napustio atom.

- ✓ *Primarna jonizacija* - energija oslobođena prilikom sudara jonizujućeg zračenja i elektrona.
- ✓ *Sekundarna jonizacija* nastaje ukoliko elektron koji se kreće kroz materiju, sudara sa drugim atomima i tu se oslobađa energija.

Disocijacija je proces pri kom dolazi do reverzibilnog raskidanja hemijske veze usled primljene dodatne energije i hemijska vrsta (molekula, jon i sl.) se rastavlja na jednostavnije delove.

Specifična jonizacija - broj stvorenih jona po centimetru pređenog puta.

Jonizaciona moć

$$I_{\alpha} > I_{\beta} \gg I_{\gamma} \quad I - \text{jonizaciona moć}$$

vrsta zračenja	jonizaciona moć (jon/cm)
α	10^5
β	100
γ	1

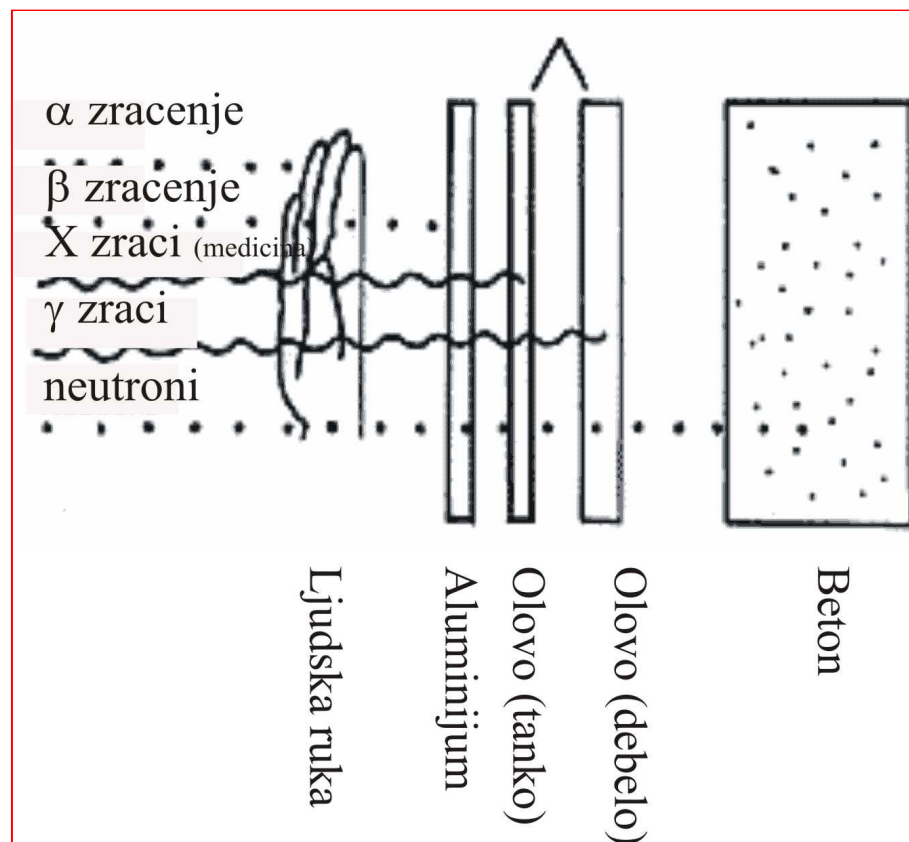
Trag zračenja u maglenoj komori

vrsta zračenja	trag u maglenoj komori
α	kratki, pravi, oštri završeci, skoro iste dužine
β	mного duži, tanji, nepravilniji
γ	mala jonizaciona moć - skoro nema traga

Domet α , β i γ zračenja

$$R_{\gamma} \gg R_{\beta} > R_{\alpha} \quad R - \text{domet}$$

vrsta zračenja	domet u vazduhu	domet u tkivu
α	2 - 8 cm	do nekoliko μm
β	maksimum 10 m	najčešće 0.3 – 0.7 cm, maksimum 1 cm
γ	100 m (za γ zrake nastale u fisiji pri nuklearnim eksplozijama i do 2 – 3 km)	



PROLAZ γ ZRAČENJA KROZ MATERIJU

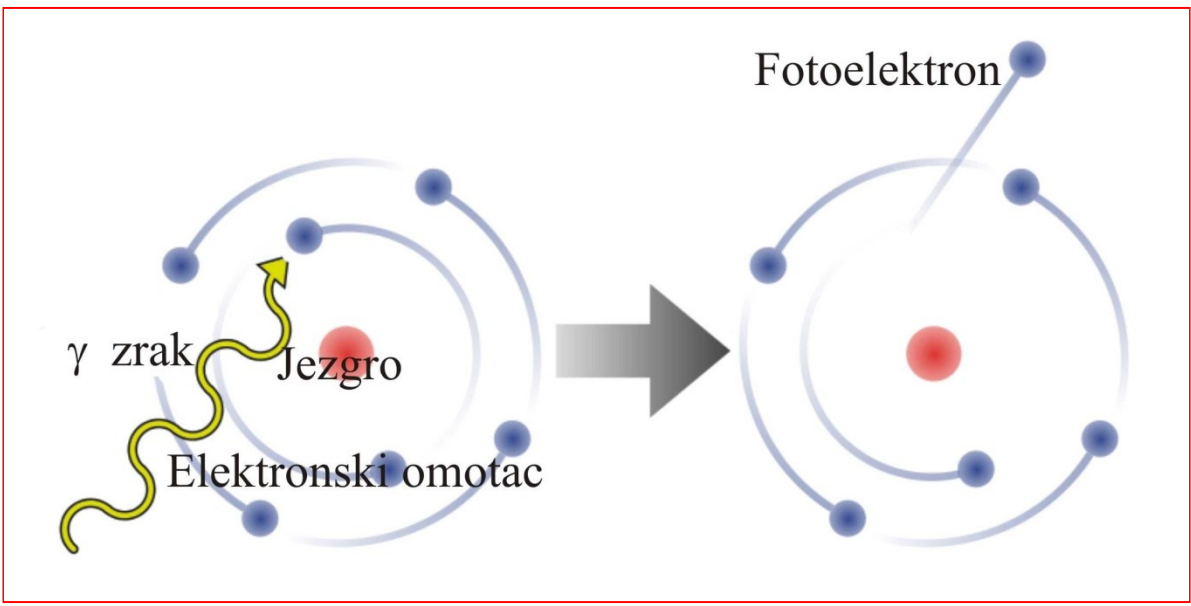
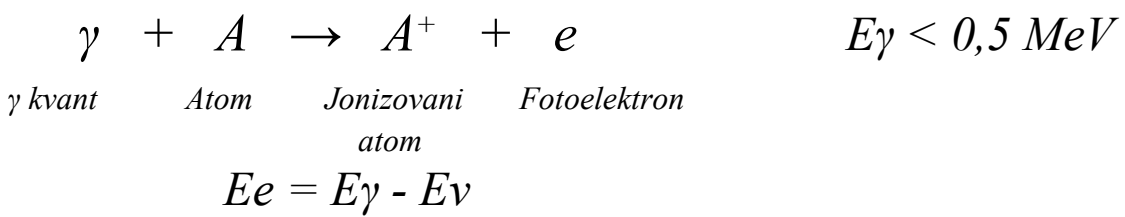
Prolaz γ zračenja:

- ✓ Fotoelektrični efekat
- ✓ Comptonov efekat
- ✓ Stvaranje elektronskih parova

Fotoelektrični efekat

Nastaje kada γ zrak prolazeći kroz materiju pogodi elektron iz omotača atoma i preda mu svu svoju energiju. Samim time zrak prestaje da postoji, a elektron biva izbačen iz elektronskog omotača. Razlika između energije zračenja i energije kojom je dotični elektron bio vezan za jezgro predstavlja kinetičku energiju tog elektrona i služi mu za kretanje kroz materiju. Elektron izbačen na ovaj način naziva se *fotoelektron*.

Fotoelektrični efekat karakterističan je za γ zrake niske energije (manje od 1MeV) i elemente većeg rednog broja.

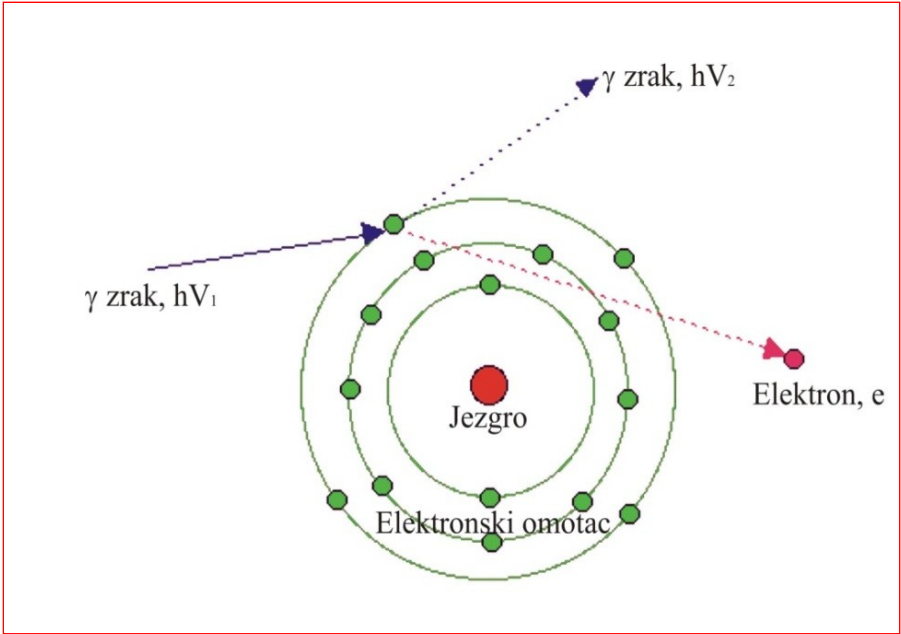


Comptonov efekat

Karakterističan za γ zrake srednje energije (oko 1 MeV) i elemente srednjeg ili nižeg rednog broja.

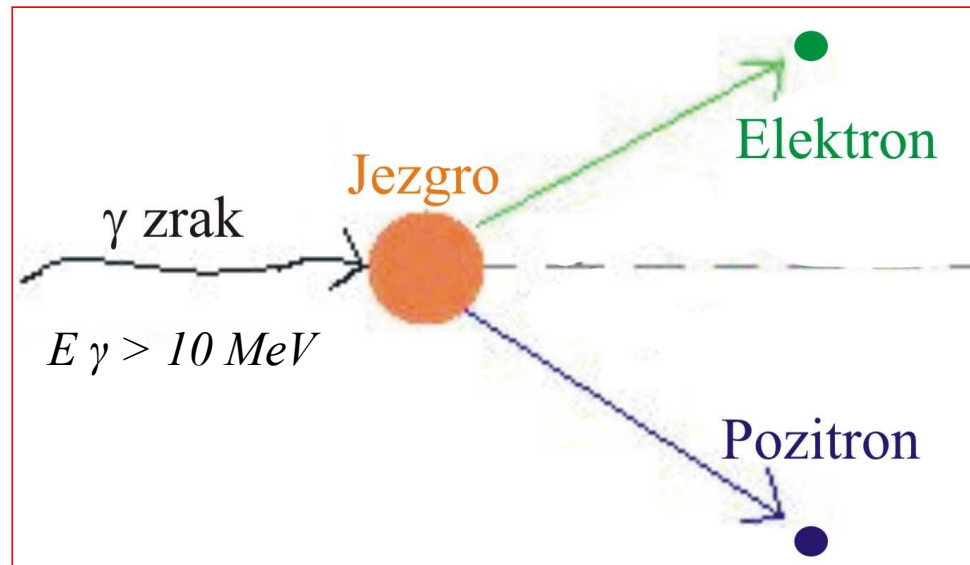
Pri ovom procesu kvant γ zraka udara u elektron iz omotača atoma i predaje mu deo svoje energije. Pri tome elektron izleće iz atoma, a γ zrak nastavlja svoj put u promenjenom smeru i sa smanjenom energijom. Oslobođeni elektron se kreće i jonizuje okolnu materiju.

$$h\nu_1 + A \rightarrow h\nu_2 + A^+ + e \qquad 0,5 < E\gamma < 3 \text{ MeV}$$



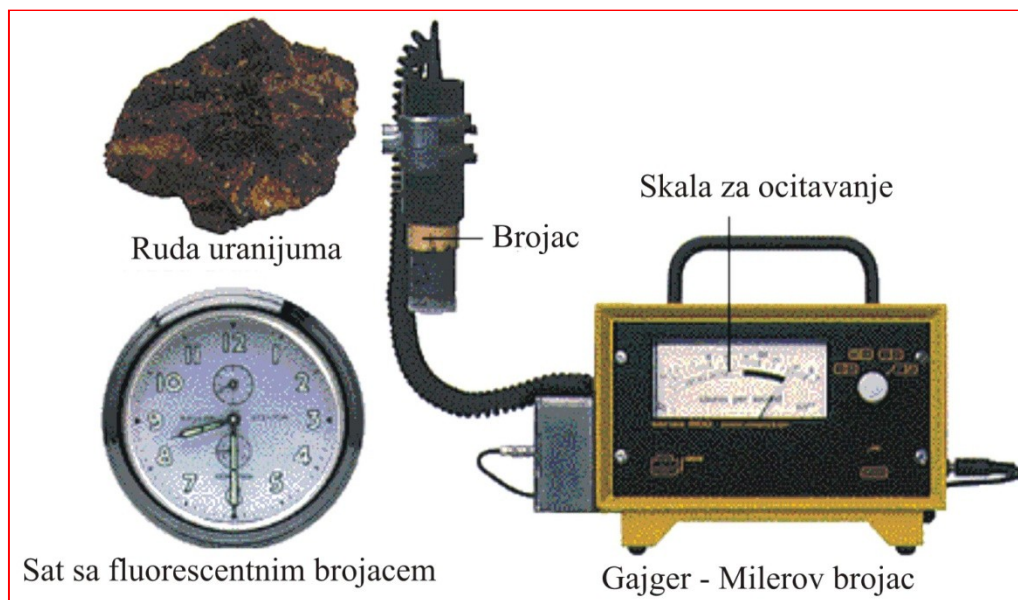
Stvaranje para elektron – pozitron

Dešava se pri interakciji γ zraka energije najmanje 1.02 MeV (dva puta veća energija od energije mirovanja elektrona, 0.51 MeV) sa poljem jezgra atoma. γ zrak prošavši kroz polje prestaje da postoji, pretvorivši se u par elektron - pozitron. Nastali elektron i pozitron gube energiju jonizujući i ekscitujući sredinu kroz koju prolaze. Kad izgubi kinetičku energiju elektron će se prihvatiti za atom pa će atom postati negativan jon. Pozitron će se i situaciji da nema kinetičke energije, spojiti s najbližim elektronom u orbiti atoma. Nestavši elektron/pozitron otpuštaju 2 kvanta γ zračenja energije od po 0.51 MeV.



DETEKCIJA I MERENJE ZRAČENJA

- ✓ Ionizaciona komora
- ✓ Gajger – Milerov (Geiger - Müller) brojač
- ✓ Vilsonova (Wilson) komora
- ✓ Scintilacioni brojač



PROLAZ ZRAČENJA KROZ MATERIJU - pregled

- Prolaz α i β zračenja
 - Ekscitacija
 - Jonizacija (specifična jonizacija, jonizaciona moć, domet)
 - Disocijacija
- Prolaz γ zračenja
 - Fotoelektrični efekat
 - Comptonov efekat
 - Stvaranje elektronskih parova

RADIJACIONA HEMIJA

- ✓ Doza zračenja
- ✓ Apsorbovana doza, jedinice za apsorbovanu dozu i jačina apsorbovane doze
- ✓ Ekspoziciona doza, jedinice za ekspozicionu dozu i jačina ekspozicione doze
- ✓ Ekvivalentna doza, jedinice za ekvivalentnu dozu I jačina ekvivalente doze
- ✓ Q faktor
- ✓ Dozimetri
- ✓ Biološki uticaj zračenja

DOZA ZRAČENJA

Doza zračenja - količina apsorbovane energije jonizujućeg zračenja.

- ✓ Apsorbovana doza D
- ✓ Ekspoziciona doza X
- ✓ Radiološka (ekvivalentna) doza H

APSORBOVANA DOZA ZRAČENJA

Apsorbovana doza D - energija jonizujućeg zračenja apsorbovana po jedinici mase supstance kroz koju zračenje prolazi.

Jedinice za apsorbovanu dozu zračenja:

✓ RAD (Radiation Absorbed Dose, cgs sistem) 1 RAD

✓ Gray (SI sistem) 1 Gy [= J/kg], 1 Gy = 100 RAD

Jačina apsorbovane doze – brzina apsorbovanja energije jonizujućeg zračenja.

Jedinice za jačinu apsorbovane doze: Gy/s [= J/kg·s], RAD/s

	A	B
Ukupna D	4 Gy	4 Gy
Brzina D	1 Gy/h	0,1 Gy/h
Dužina ozračivanja	4 h	40 h
Rezultat	Može uginuti	Blaže posledice

EKSPOZICIONA DOZA ZRAČENJA

Ekspoziciona doza X – sposobnost X i γ zračenja da jonizuje vazduh.

Jedinice za ekspozicionu dozu:

- ✓ Rendgen (cgs sistem) – ona doza koja u 1 cm³ suvog vazduha u normalnim uslovima proizvede toliko jona da nose 1 esj (elektrostaticku jedinicu) elektriciteta bilo kog znaka.
1 r (vazduh) = 0.87 RAD = 8.7 mGy
- ✓ C/kg (SI sistem) 1 C/kg = 3.87·10³ r

Jačina ekspozicione doze je ekspozicija po jedinici vremena i izražava se u (C/kg)/s = C/(kgs)

Ekvivalentna doza (radiološka) H - pokazuje efekat pojedine vrste zračenja na žive organizme. Koristi se u medicini i biologiji.

$$H = D \cdot Q$$

H – ekvivalentna doza

D – apsorbovana doza

Q faktor

Relativna biološka efikasnost date vrste zračenja RBE (cgs sistem), ili **Q faktor** (SI sistem). Čestica koja preda energiju od 3.5 MeV pri 1 μm pređenog puta ima Q faktor jednak 1.

- ✓ $Q = 1$ za X zrake, γ zrake i β čestice
- ✓ $Q = 2,5$ za termalne neutrone
- ✓ $Q = 10$ za α čestice, brze neutrone i protone

Jedinice za ekvivalentnu dozu zračenja:

- ✓ REM (Rontgen Equivalent Mammal/Man)-ekvivalent rendgena za sisare/čoveka (cgs sistem)
- ✓ $1 \text{ REM} = RBE \cdot \text{RAD}$
- ✓ Sivert (SI sistem) $1 \text{ Sv} [= 1 \text{ J/kg}]$, $1 \text{ Sv} = Q \cdot \text{Gy} = 100 \text{ REM}$

Jačina ekvivalentne doze

Granica ekvivalentne doze ili maksimalno dozvoljena doza – najveća apsorbovana doza u biološkom materijalu u toku određenog vremena koja ne dovodi do značajnih somatskih i genetskih posledica.

Dozimetri – instrumenti za merenje doze zračenja na osnovu promene, fizičke ili hemijske, koju izaziva jonizujuće zračenje u nekoj supstanciji, a koja je direktno srazmerna dozi i nezavisna od jačine doze i vrste zračenja.

✓ *Fricke-ov dozimetar*

✓ *Cerijum sulfatni dozimetar*

✓ *Ostali hemijski dozimetri*

KOLIKO SMO OZRAČENI?

Čovek prima godišnju ekvivalentnu dozu zračenja od približno **3,5 mSv**.

✓ Udisanje radona	2 mSv
✓ Ostali radionuklidi uneseni u telo	0,39 mSv
✓ Zemljino zračenje	0,28 mSv
✓ Kozmičko zračenje	0,28 mSv
✓ Ukupna doza od prirodnih izvora	3mSv
✓ Ukupna doza od veštačkih izvora	0,5 mSv

BIOLOŠKI EFEKAT ZRAČENJA

ZAŠTO I KOLIKO JE ZRAČENJE OPASNO?

Učinci raznih ekspozicionih doza zračenja

- ✓ 50 mSv godišnje je najmanja doza za koju postoje dokazi da izaziva maligne tumore.
- ✓ Više od 10 Sv izaziva tešku bolest i smrt u nekoliko nedelja.
- ✓ 1 Sv primljen u kratkom roku izazvao bi radijacijsku bolest (mučninu, gubitak kose), ali najverovatnije ne i smrt.
- ✓ 2-10 Sv primljenih u kratkom roku izaziva smrt s verovatnošću od 50%.

Efekat na žive ćelije (doza apsorbovana odjednom, celim telom)

- | | |
|---------------|--|
| ✓ 0 – 0,25 Gy | nema promena |
| ✓ 0,25 - 1 Gy | smanjenje broja belih krvnih ćelija |
| ✓ 1 – 2,5 Gy | promene u krvi, ali moguć oporavak |
| ✓ 2,5 – 5 Gy | obavezna hospitalizacija (jedan od dva čoveka umire) |
| ✓ preko 5 Gy | smrt |

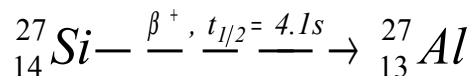
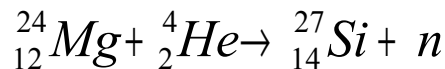
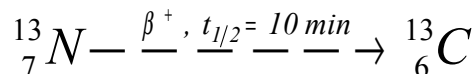
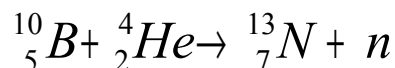
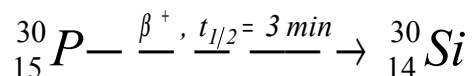
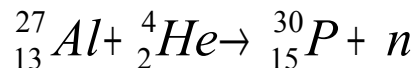
RADIJACIONA HEMIJA – pregled

- ✓ Doza zračenja
- ✓ Apsorbovana doza, jedinice za apsorbovanu dozu i jačina apsorbovane doze
- ✓ Ekspoziciona doza, jedinice za ekspozicionu dozu i jačina ekspozicione doze
- ✓ Ekvivalentna doza, jedinice za ekvivalentnu dozu I jačina ekvivalente doze
- ✓ Q faktor
- ✓ Dozimetri
- ✓ Biološki uticaj zračenja

VEŠTAČKA RADIOAKTIVNOST

Otkriće veštačke radioaktivnosti - Irene i Frederic Joliot-Curie, 1934.

✓ ^{30}P , ^{27}Si , ^{13}N – prvi radioaktivni elementi dobijeni veštačkim pute



✓ Otkriće veštačke radioaktivnosti pruža mogućnost dobijanja radioizotopa najvećeg broja hemijskih elemenata.

PRIMENA RADIOAKTIVNOSTI

- ✓ Usavršavanje instrumenata za detekciju
- ✓ 10^{-7} g – donja granica detekcije mikrohemijskom analizom
- ✓ Nekoliko hiljada atoma - moguća detekcija primenom radioizotopa
- ✓ Izotopi – radioizotopi - razlikuju se samo po emisiji signala koji može da se meri
- ✓ Najčešće primenjivani radioizotopi:
 ^3H , ^{14}C , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{32}P , ^{35}S , ^{36}Cl , ^{38}Cl , ^{40}K , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{56}Mn , ^{55}Fe , ^{64}Cu , ^{125}I , ^{128}I , ^{131}I , ^{131}Ba , ^{140}Ba

Primena radioizotopa kao obeleživača

- ✓ Hemijska istraživanja
- ✓ Primena u analitičkoj hemiji
- ✓ Primena u fizičkoj hemiji
- ✓ Određivanje starosti
- ✓ Primena u medicini
- ✓ Primena u poljoprivredi
- ✓ Prospekcija prirodnih izvora
- ✓ Primena u industriji

Primena radioizotopa za praćenje toka reakcija

Princip metode:

- Napravi se smesa stabilnih i obeleženih molekula koji isto hemijski reaguju
- Obeleženi molekul emituje signal (obeleženi molekul - onaj u kome je radioizotop, radioizotop - obeleživač)
- Dva izotopa istog elementa se ponašaju na potpuno isti način
- Obeleženi i molekul sa stabilnim izotopom moraju biti u istom hemijskom obliku
- Radioizotop mora imati pogodno $t_{1/2}$
- Količina radioizotopa mora biti merljiva
- Primer, obeleživač izotop ^{14}C :



Analitičke metode

Neutronska aktivaciona analiza

Nedestruktivna metoda za određivanje prisustva elemenata u uzorku (kvalitativno) i određivanje sadržaja elemenata u uzorku (kvantitativno).

Princip metode:

- Uzorak se izlaže dejstvu snopa termalnih neutrona
- Dešava se (n,γ) nuklearna reakcija
- Proizvodi se radioizotop traženog elementa
- Na osnovu $t_{1/2}$ detektuje se prisustvo elementa; ako je u uzorku (n,γ) reakcijom aktivirano više elemenata, po vremenima $t_{1/2}$ i vrsti emitovanog zračenja detektuju se elementi
- Primena: za analizu dragocenih uzoraka, arheoloških uzoraka, elemenata prisutnih u tragovima itd.

Određivanje starosti materijala

Princip metode:

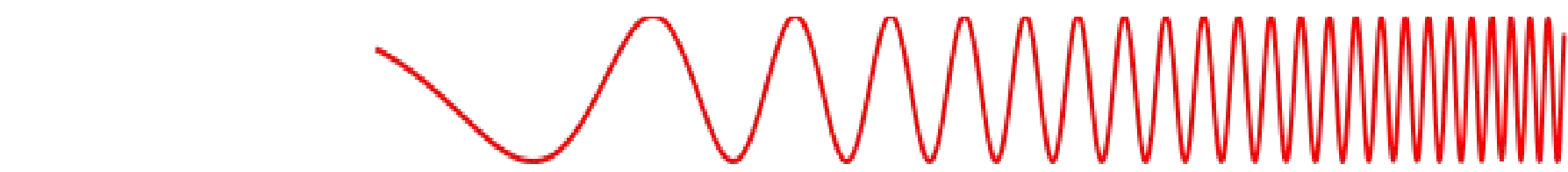
- Poznata vrednost $t_{1/2}$ (karakteristična veličina za radioizotop)
- Meri se aktivnost materijala u datom trenutku
- U živim bićima odnos $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1,6 \cdot 10^{-12} = \text{const.}$
- U prirodi odnos $^3\text{H}/\text{H} = 10^{-18} = \text{const.}$
- Smrt - prestaje razmena materija sa sredinom
- Odnos radioaktivnog i stabilnog izotopa se remeti
- Ne unosi se više radioizotop i njegova količina se smanjuje
- Za uzorke organskog porekla koristi se:
 - Odnos $^3\text{H}/\text{H}$ ($t_{1/2}(^3\text{H}) = 12,35 \text{ god.}$) - za određivanje starosti do 40 godina
 - Odnos $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($t_{1/2}(^{14}\text{C}) = 5730 \text{ god.}$) - za određivanje starosti do 40 000 godina

Radioimunološka analiza (RIA)

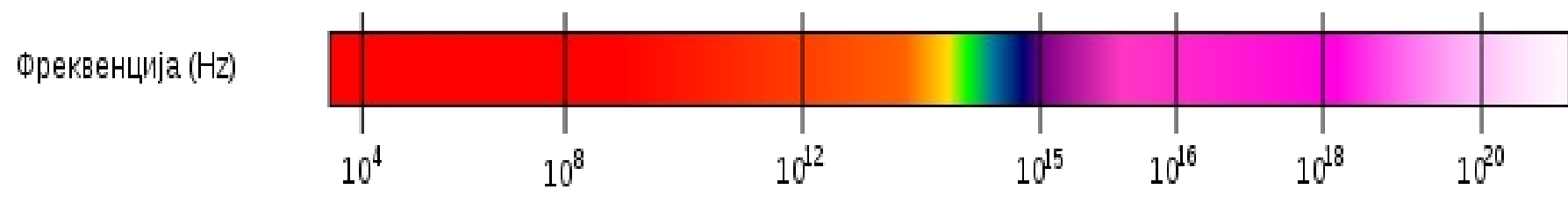
- 1968. god. razrađena metoda
- Primena u medicini i biologiji za:
 - Određivanje koncentracije bioloških sastojaka u telesnim tečnostima (enzima, hormona, steroida)
 - Određivanje koncentracije lekova, droga, ... u krvi
- Primer: određivanje koncentracije antigena hormona insulina u krvnoj plazmi

Prilog 1

Spektar elektromagnetnog zračenja



Врста радијације	Радио	Микроталаси	Инфра црвена	Видљива	Ултра љубичаста	Икс зраке	Гама зраке
Таласна дужина (m)	10^3	10^{-2}	10^{-5}	0.5×10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}



Prilog 2

Međunarodni sistem mernih jedinica (SI)

OSNOVNE MERNE JEDINICE

<i>Veličina</i>	<i>Oznaka jedinice</i>	<i>Naziv jedinice</i>
Dužina	m	metar
Masa	kg	kilogram
Vreme	s	sekunda
Jačina električne struje	A	amper
Termodinamička temperatura	K	kelvin
Svetlosna jačina	cd	kandela
Količina materije	mol	mol

IZVEDENE MERNE JEDINICE

<i>Veličina</i>	<i>Oznaka jedinice</i>	<i>Naziv jedinice</i>
Površina	m ²	kvadratni metar
Zapremina	m ³	kubni metar
Ugao u ravni	rad	radijan
Prostorni ugao	sr	steradian
Gustina	kg/m ³	-
Frekvencija	Hz	herc
Brzina	m/s	-
Ubrzanje	m/s ²	-
Ugaona brzina	rad/s	-
Ugaono ubrzanje	rad/s ²	-

IZVEDENE MERNE JEDINICE - nastavak

<i>Veličina</i>	<i>Oznaka jedinice</i>	<i>Naziv jedinice</i>
Sila	N	njutn
Pritisak	Pa	paskal
Dinamička viskoznost	Pa·s	paskal-sekunda
Kinematička viskoznost	m ² /s	-
Energija, rad i količina toplote	J	džul
Snaga	W	vat
Električni napon	V	volt
Električna otpornost	Ω	om
Električna provodnost	S	simens
Količina elektriciteta	C	kulon
Električni kapacitet	F	farad
Magnetski fluks	Wb	veber
Magnetska indukcija	T	tesla
Induktivnost	H	henri
Svetlosni fluks	lm	lumen
Osvetljenost	lx	luks
Luminacija	cd/m ²	-
Aktivnost radioaktivnog izvora	Bq	bekerel
Ekspoziciona doza jonizujućeg zračenja	C/kg	-
Apsorbovana doza jonizujućeg zračenja	Gy	grej
Ekvivalentna doza jonizujućeg zračenja	Si	sivert