

# Osnove radioaktivnosti

# Zašto se štitimo od jonizujućih zračenja?

- Direktno izazivaju fizičke, hemijske i biohemijske promene u materiji kroz koju prolaze
- Indirektno izazivaju biološke i genetske promene u ćelijama
- Živa bića nemaju ni jedno čulo koje registruje jonizujuće zračenje

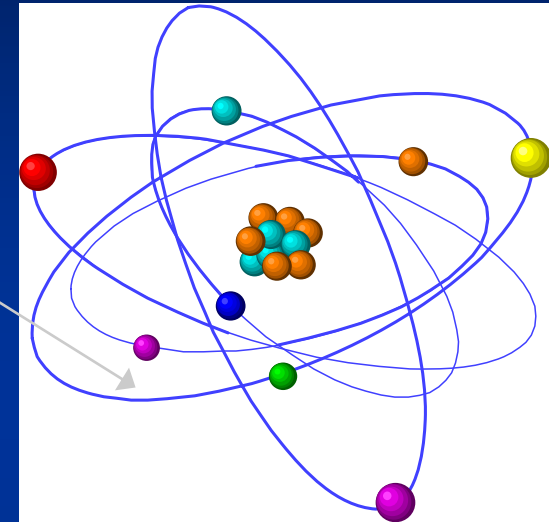
# ATOM

- **Struktura jezgra**

- Protoni i neutroni = nukleoni
- $Z$  – broj protona sa pozitivnim naelektrisanjem ( $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )
- Neutroni su nenaelektrisane čestice (neutralni)
- Broj nukleona = masenom broju  $A$

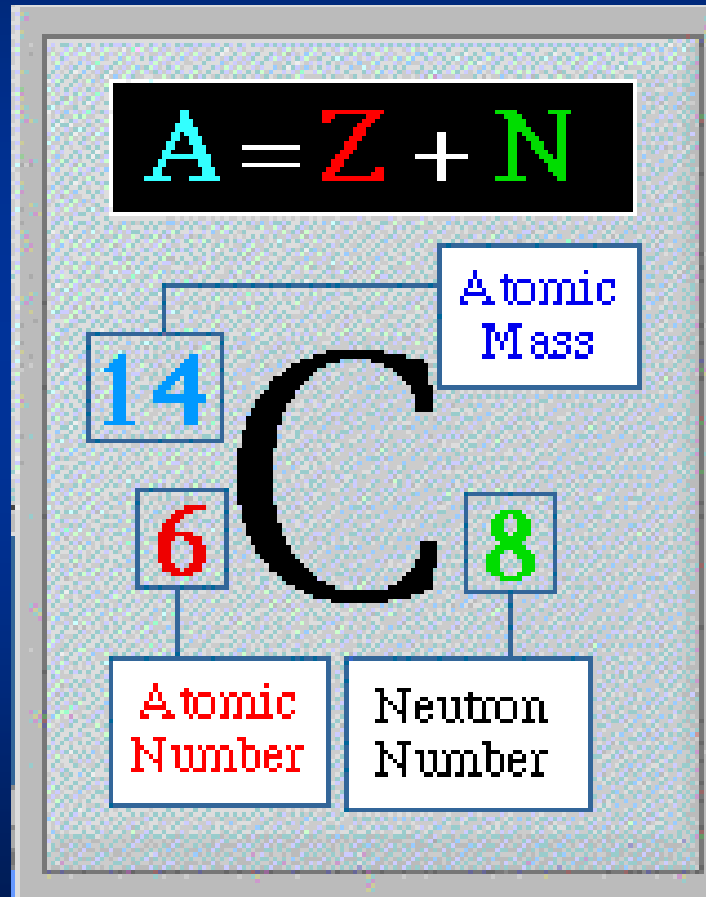
- **Ekstranukleusna struktura**

- $Z$  elektrona (leptoni, lake negativno naelektrisane jednake naelektrisanju protona)



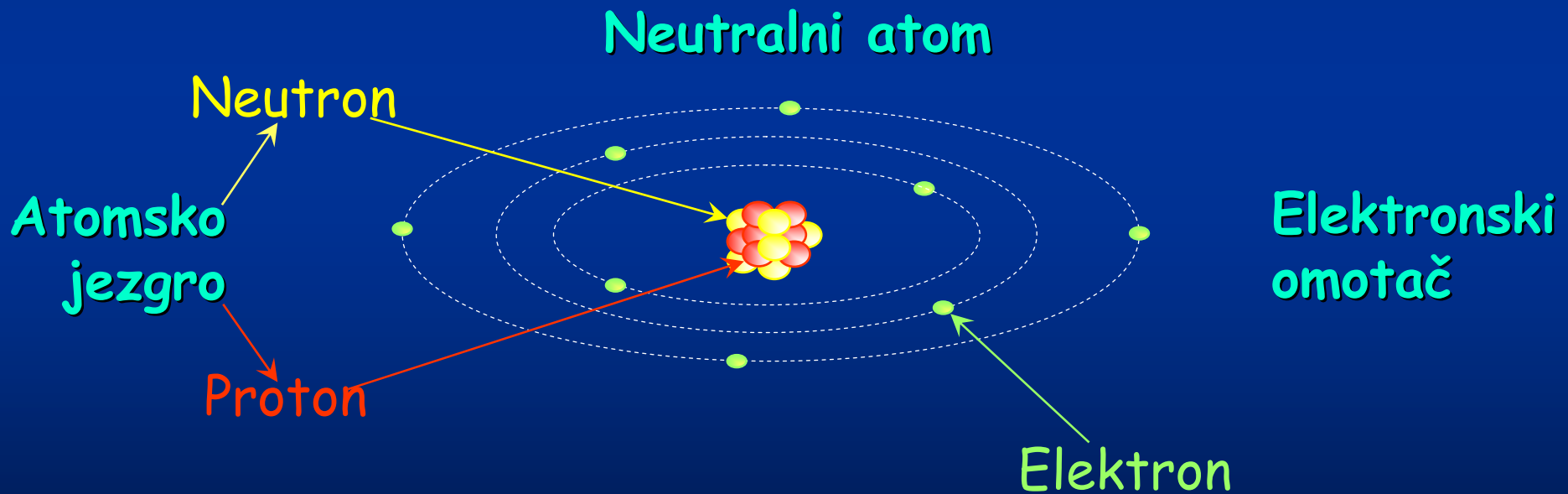
Čestica	Simbol	Masa (kg)	Energija (MeV)	Naelektrisanje
Proton	p	$1.672 \cdot 10^{-27}$	938.2	+
Neutron	n	$1.675 \cdot 10^{-27}$	939.2	0
Elektron	e	$0.911 \cdot 10^{-30}$	0.511	-

# Identifikacija izotopa



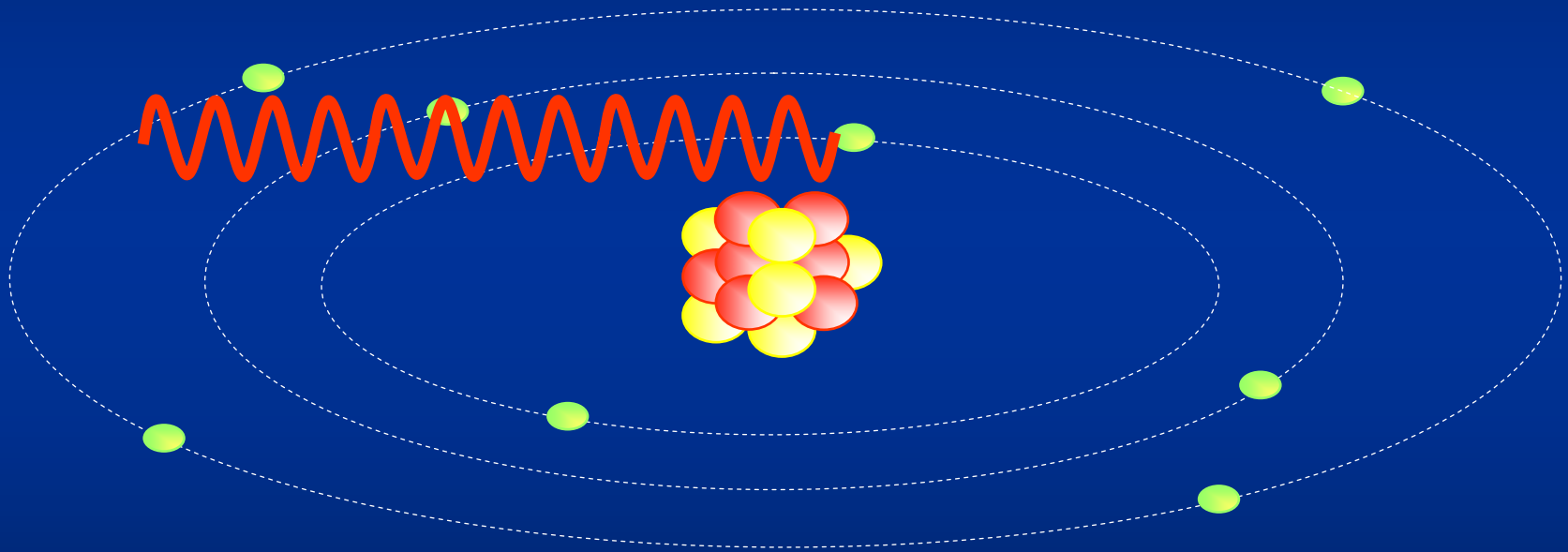
# Jonizujuće zračenje

- Jonizujuće zračenje je ono zračenje koje izaziva jonizaciju materije



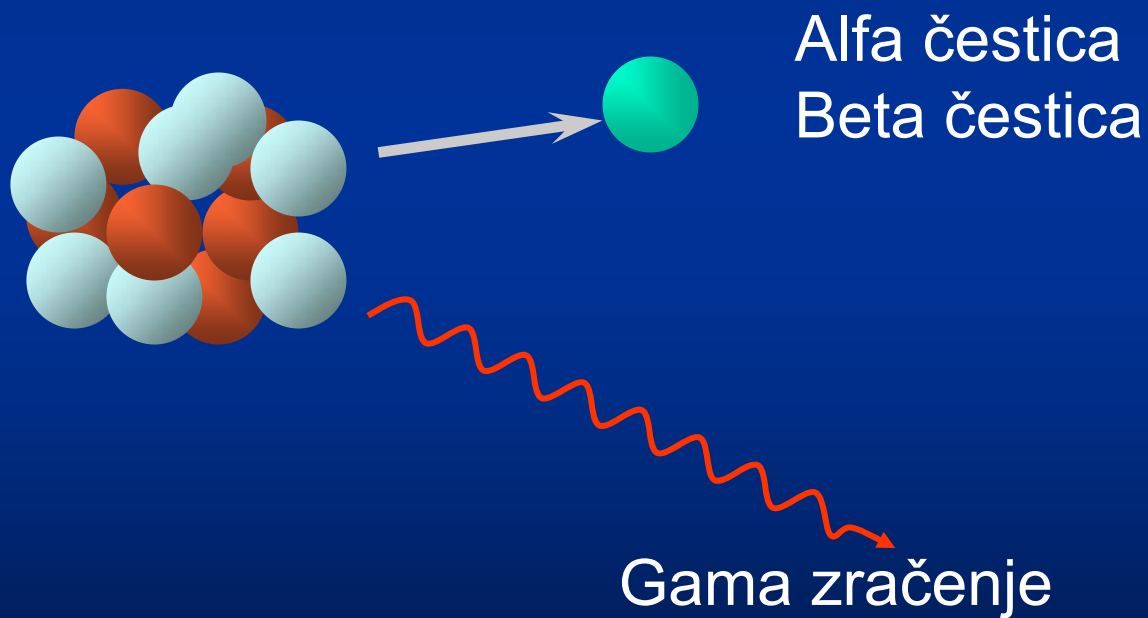
broj protona = broj elektrona

# Jonizacija atoma - eksitacija



**Jonizovan atom:  
broj protona  $\neq$  broj elektrona**

# Deeksitacija



# Vrste jonizujućeg zračenja

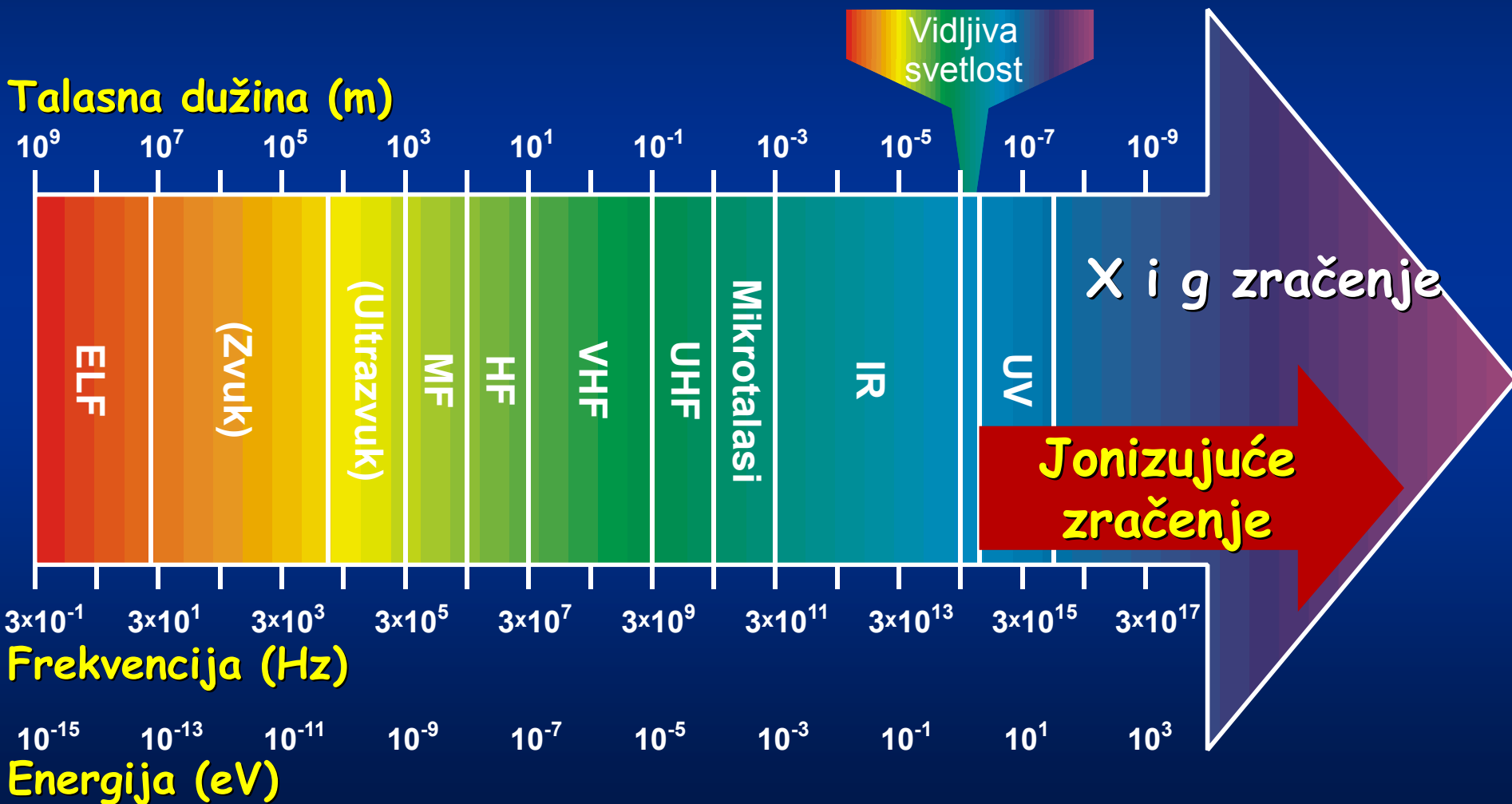
- Jonizujuće zračenje može biti:
  - Elektromagnetno zračenje
    - UV zračenje
    - X-zračenje (Rentgensko zračenje)
    - $\gamma$ -zračenje
  - Čestično zračenje
    - elektroni, pozitroni
    - protoni
    - neutroni
    - deuteroni
    - $\alpha$ -čestice, itd.



# Energija jonizujućeg zračenja

- Definiše se kao kinetička energija čestice odnosno fotona
  - SI jedinica za energiju je **J** (Džul)
  - Uobičajena jedinica za energiju čestica je **eV** (elektron Volt)
  - $1 \text{ J} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ eV}$

# Spektar elektromagnetnog zračenja



# Izvori jonizujućeg zračenja

- Prirodni
  - Kosmičko zračenje
  - Radioaktivni raspad prirodnih radionuklida
- Veštački
  - UV lampe
  - Rentgen cevi
  - Jonski izvori
  - Akceleratori čestica
  - Radioaktivni raspad veštačkih radionuklida

# Nuklidi i radionuklidi

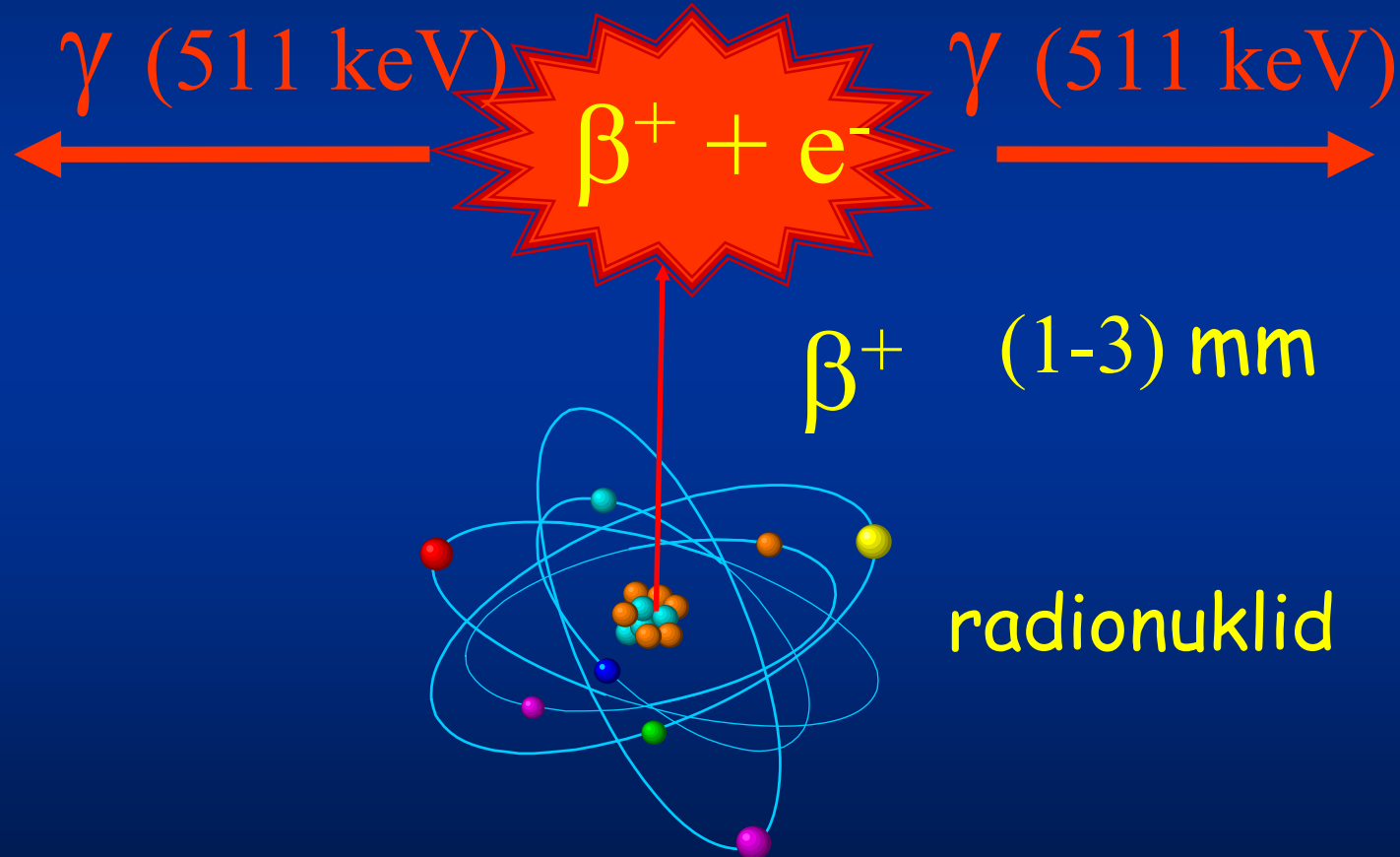
- Nuklidi se među sobom razlikuju po
  - Broju protona
  - Broju neutrona
  - Energetskom stanju
- Izotopi su nuklidi istog hemijskog elementa (imaju isti broj protona) sa različitim brojem neutrona
- Radionuklidi su metastabilni izotopi

# Radioaktivni raspad

- Nuklidi koji poseduju višak energije (radionuklidi) oslobađaju se tog viška i dolaze u stabilno stanje:
  - Emisijom  $\alpha$ -čestice
  - Emisijom  $\beta$ -čestice
  - Internom konverzijom
  - Zahvatom elektrona
  - Spontanom fisijom
  - Emisijom jezgra ugljenika  $^{12}\text{C}$ , itd.

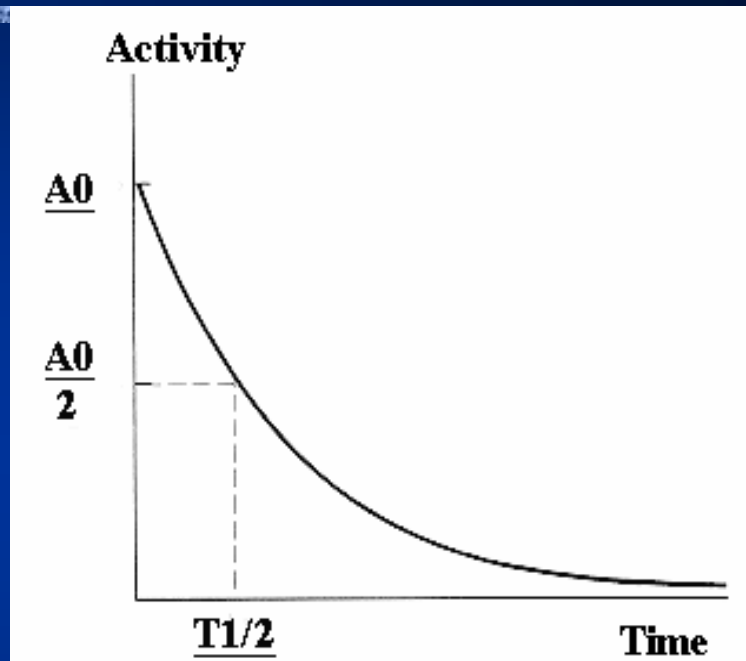
# Pozitronski emiteri za PET

## Anihilacija



# Vreme poluraspada radionuklida

- Radioaktivni raspad je statistička pojava
- Nemoguće je predvideti raspad pojedinačnog radionuklida



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

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

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

# Roditelj-Potomak raspad



$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t}$$

$$B(t) = \frac{A_0 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 \cdot t} - e^{-\lambda_2 \cdot t})$$



- Svi radionuklidi koji se administriraju pacijentima u nuklearnoj medicini ili radioterapiji su veštački dobijeni

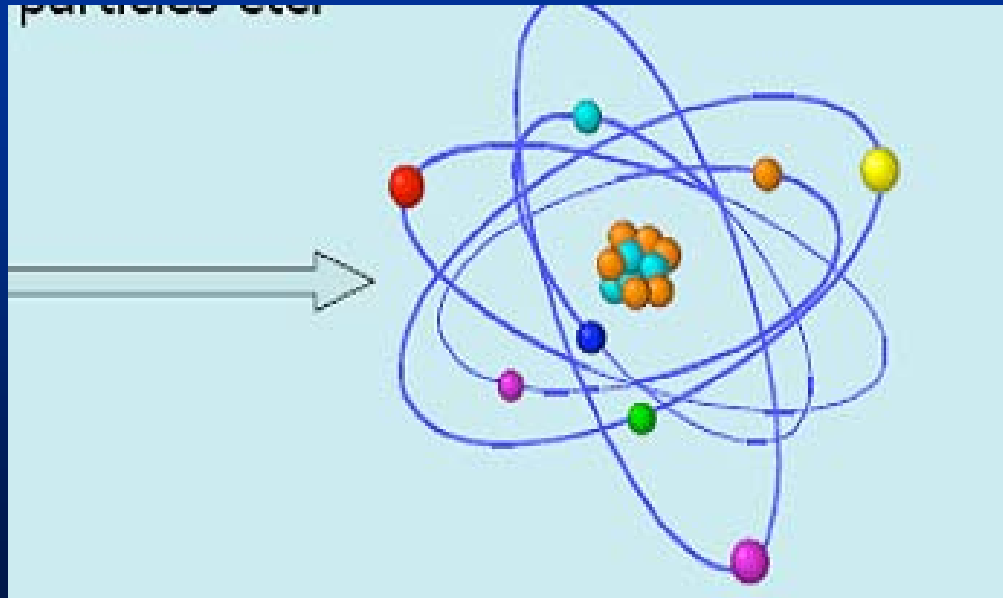
- **Proizvodnja:**

- Akceleratori čestica
- Nuklearno reaktor
- Generator radionuklida

# Bombardovanje (jezgra)mete

Tri osnovne metode:

1. Ubacivanjem mete u nuklearni reaktor pri čemu se dobijaju dugoživeći radionuklidi što je pogodno za obradu i transport
2. Korišćenjem akceleratora čestica (ciklotroni) pri čemu se dobijaju kratkoživeći radionuklidi
3. Korišćenje dugoživećih radionuklida dobijenih iz reaktora koji se raspadaju u kratkoživeće u priručnim generatorima



# Proizvodnja u akceleratoru

Mnogi radionuklidi koji se proizvode u akceleratorima ne mogu da budu proizvedeni u reaktoru.

Prednost proizvodnje u akceleratoru:

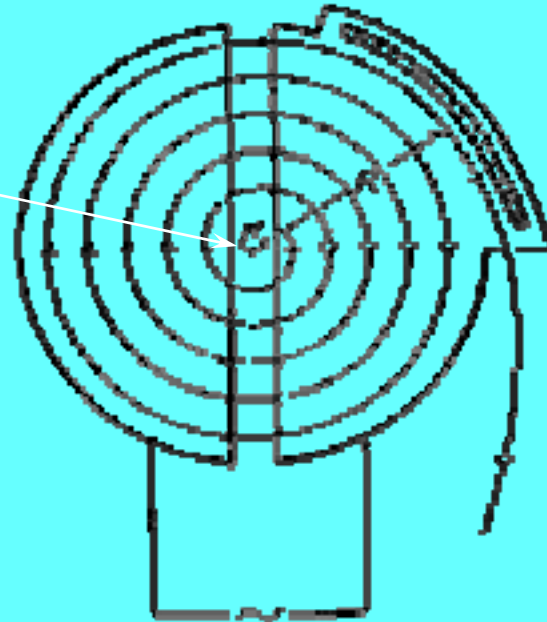
- Radionuklidi veće specifične aktivnosti
- Generiše se manje radioaktivnog otpada

# Radionuklidi proizvedeni u akceleratoru i njihova primena

Primena	Radionuklid
Biološka istraživanja	Bi-205; Bi-206; Be-7; Cd-109; Ru-97; Sb-74; Cu-64; Cu-61; Fe-52; V-48
Dijagnostika,	Tl-201; Xe-127; I-123; Ru-97; Mg-28; F-18
Radioimunoterapija	I-124; In-111; Br-77; Br-80m; Y-88; Zr-89; Sc-47; Cu-67; Cu-64
Roditelji u generatoru	Hg-195m za 195mAu; W-178 za Ta-178; Ba-128 za Cs-128; Xe-122 za I-122; Sr-82 za Rb-82; Zn-62 za Cu-62; Ge-68 za Ga-68
Etaloniranje	Ce-139; Co-57; Fe-55

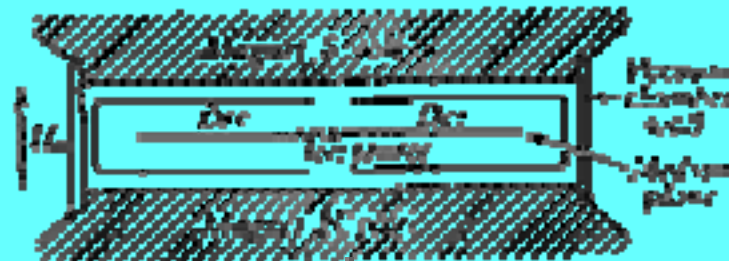
# Ciklotron

Jonski izvor

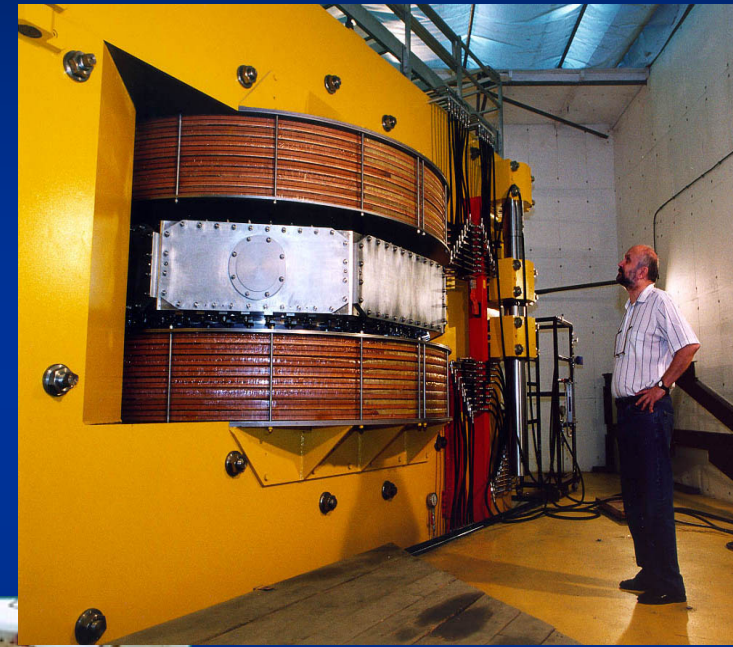


Ekstrakcioni magnet

Naizmenični napon



# Istraživačko- proizvodni ciklotroni-višenamenske mašine



# Mete

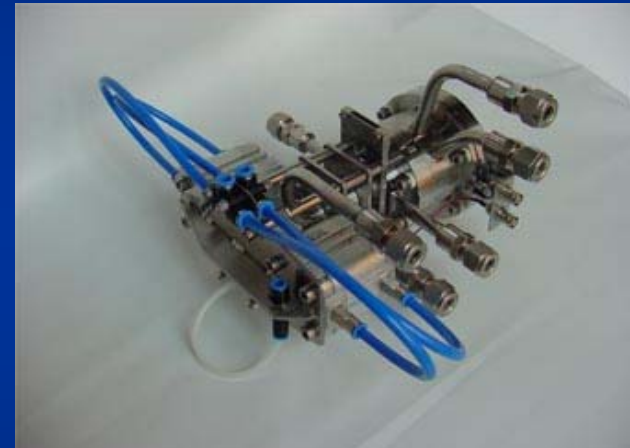
- Proizvodnja bakra

## COmpact Solid Target Irradiation Station



$^{64/67}\text{Cu}$

$^{18}\text{F}$



# PET GENERATORI

U PET tomografiji koriste se kratkoživeći radionuklidi proizvedeni u ciklotronima  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  i  $^{18}\text{F}$ .

Kako su ovi radionuklidi kratkoživeći istražuje se mogućnost korišćenja

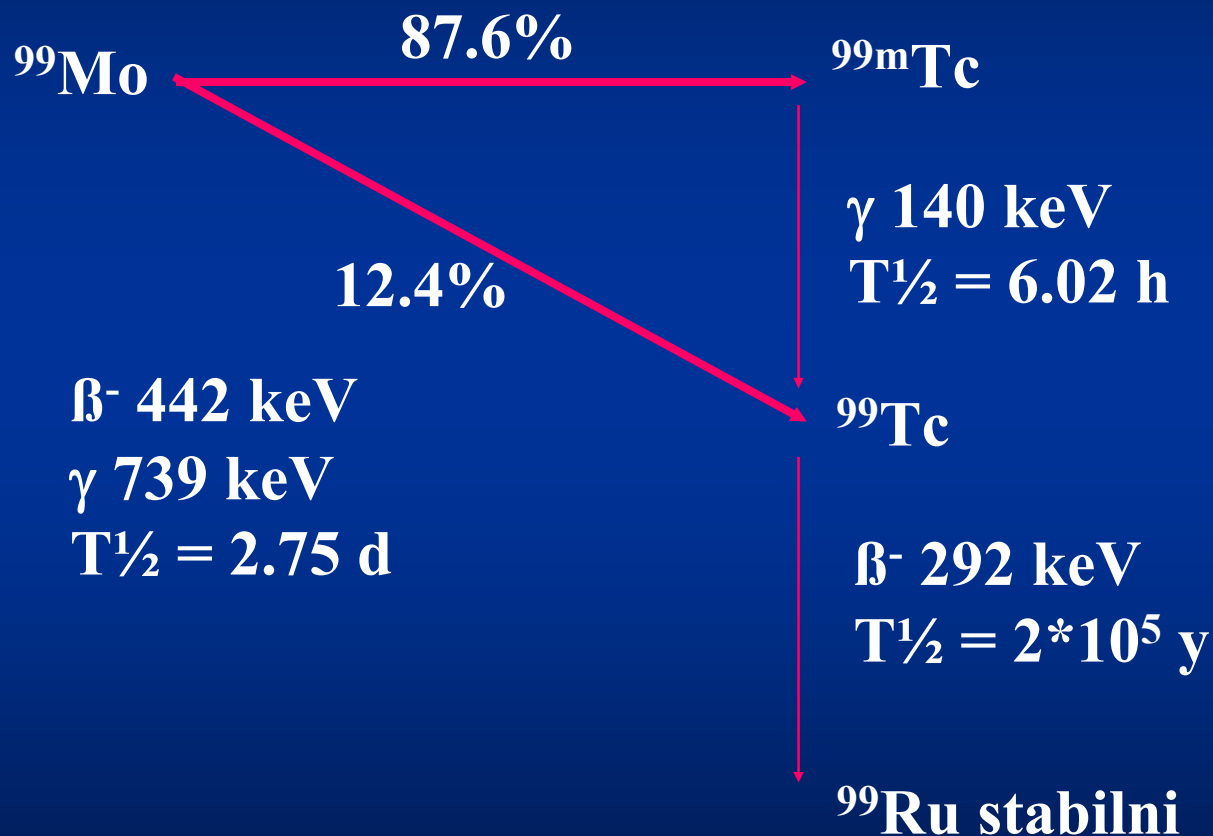
"Roditelj-potomak" sistema (generatora) za dobijanje radionuklida za potrebe PET.



# Generatori radionuklida

- Technecium-99m je najznačajniji radionuklid koji se koristi u nuklearnoj medicini
- Kratko vreme poluraspada od 6 h čini ga nepogodnim za duže čuvanje
- Problem snabdevanja je rešen korišćenjem roditelja Mo-99, koji ima vreme poluraspada od 67 h i omogućava kontinulnu proizvodnju Tc-99m
- Sistem za čuvanje roditelja projektovan tako da se potomak može lako odvojiti za kliničku upotrebu je **GENERATOR RADIONUKLIDA**

# $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$



# Tehnecijum

1 kg U sadrži 1 ng Tc

Prva tehnećijumska krava (uređaj za separaciju  $^{99m}\text{Tc}$  iz fisionog produkta  $^{99}\text{Mo}$ ) napravljena je u BNL 1950.god.



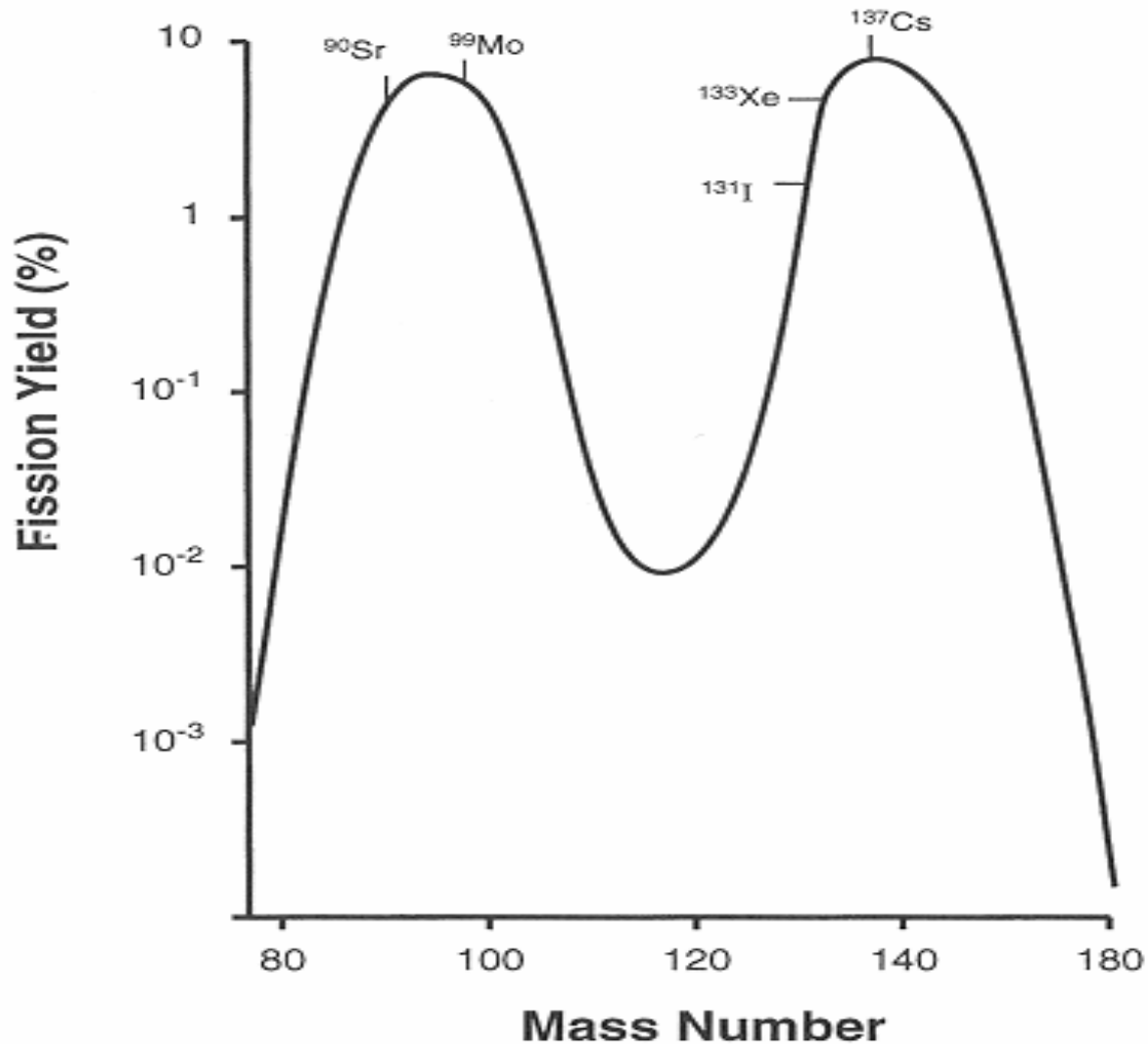
( $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ ) generator



# Proizvodnja radionuklida u nuklearnom reaktoru

- Nuklearni reaktori proizvode klinički relevantne radionuklide iz fisionih produkata ili neutronsom aktivacijom stabilnog materijala mete
- Uranium-235, fission produkt se može hemijski odvojiti od ostalih fisionih produkata koji nemaju stabilne izotope (nosioce)
- Koncentracija tih fisiono proizvedenih radionuklida bez nosilaca je vrlo visoka

# Dvogrba kamila fisionih produkata



# Radionuklidi proizvedeni u reaktoru

Najznačajnija reakcija:  $^{235}\text{U} + n \longrightarrow ^{236}\text{U}$

koji se spontano raspada reakcijom nuklearne fisije  
proizvedeći protone, neutrone, alfa čestice itd.



Iz mete načinjene od stabilnog materijala proizvode  
se radionuklidi pomoću različitih reakcija:



# Neutronska aktivacija

- Neutroni proizvedeni fisijom uranijuma u nuklearnom reaktoru mogu se koristiti za bombardovanje materijala smeštenog u reaktor i time za dobijanje radionuklida
- Proces sadrži zahvat neutrona stabilnim jezgrom
- Gotovi svi radionuklidi proizvedeni neutronsom aktivacijom su beta minus emiteri

# Neke osnovne karakteristike reaktora za proizvodnju radionuklida

- Snaga	(5-400)MW
- Minimalni termalni fluks neutrona u jezgru reaktora	$1,5 \times 10^{18} \text{ n/m}^2\text{s}$
- fluks brzih neutrona u jezgru reaktora	$3 \times 10^{18} \text{ n/m}^2\text{s}$
- fluks termalnih neutrona na kraju kanala	$1 \times 10^{13} \text{ n/m}^2\text{s}$
- fluks termalnih neutrona u kanalu za ozračivanje	$1,2 \times 10^{18} \text{ n/m}^2\text{s}$
- fluks termalnih neutrona u reflektoru kanala za ozračivanje	$9 \times 10^{17} \text{ n/m}^2\text{s}$



# Izvori u teleterapiji

Aktivnosti: (185-370) TBq

Jačina doze na 80 cm od izvora: (100-200) cGy/min

	$^{60}\text{Co}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{152}\text{Eu}$
$T_{1/2}$ [godine]	5,3	30	13,4
Energija [MeV]	1,17 i 1,33	0,662	0,6-1,4
Spec. const jačine $K_{\text{air}}$ [ $\mu\text{Gym}^2/\text{GBqh}$ ]	309	78	250
HVL [cm Pb]	1,1	0,5	1,1
Način proizvodnje	$^{59}\text{Co} + n$ u reaktoru	fisioni produkt	$^{151}\text{Eu} + n$ u reaktoru

# Izvori u brahiterapiji

Radionuklid	Srednja energija fotona [MeV]	$T_{1/2}$	HVL u Pb [mm]
$^{60}\text{Co}$	1,25	5,26 god.	11
$^{137}\text{Cs}$	0,66	30 god.	6,5
$^{198}\text{Au}$	0,41	2,7 dana	2,5
$^{192}\text{Ir}$	0,38	73,8 dana	3
$^{125}\text{I}$	0,028	60 dana	0,02
$^{103}\text{Pd}$	0,021	17 dana	0,01

# U nuklearnoj medicini

Radionuklid	Energija fotona (keV)	Način proizvodnje	Vrsta raspada	$T_{1/2}$
$^{67}\text{Ga}$	93; 185; 296; 388	ciklotron	EC	78 h
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	140	generator	IT (izometr. tranzicija)	6 h
$^{111}\text{In}$	173; 247	ciklotron	EC	68 h
$^{123}\text{I}$	159	Ciklotron	EC	13 h
$^{125}\text{I}$	27; 36	Reactor	EC	60 d
$^{131}\text{I}$	364	Fisioni produkt	$\beta$	8 d
$^{133}\text{Xe}$	80	Fisioni produkt	$\beta$	5,3 d
$^{201}\text{Tl}$	70; 167	ciklotron	EC	73 h

# Interakcija zračenja sa materijom

## Jonizujuće zračenje

### **Naelektrisane čestice – direktno jonizujuće**

- alfa
- beta
- protoni

### **Nenaelektrisane čestice - indirektno jonizujuće**

- fotoni (gama i X)
- neutroni

# Princip interakcije jonizujućih zračenja sa materijom

- Transfer energije:
  - Atomima - ekscitacija
  - Elektronima - jonizacija
  - Jezgrima atoma - neelastični sudari i nuklearne reakcije

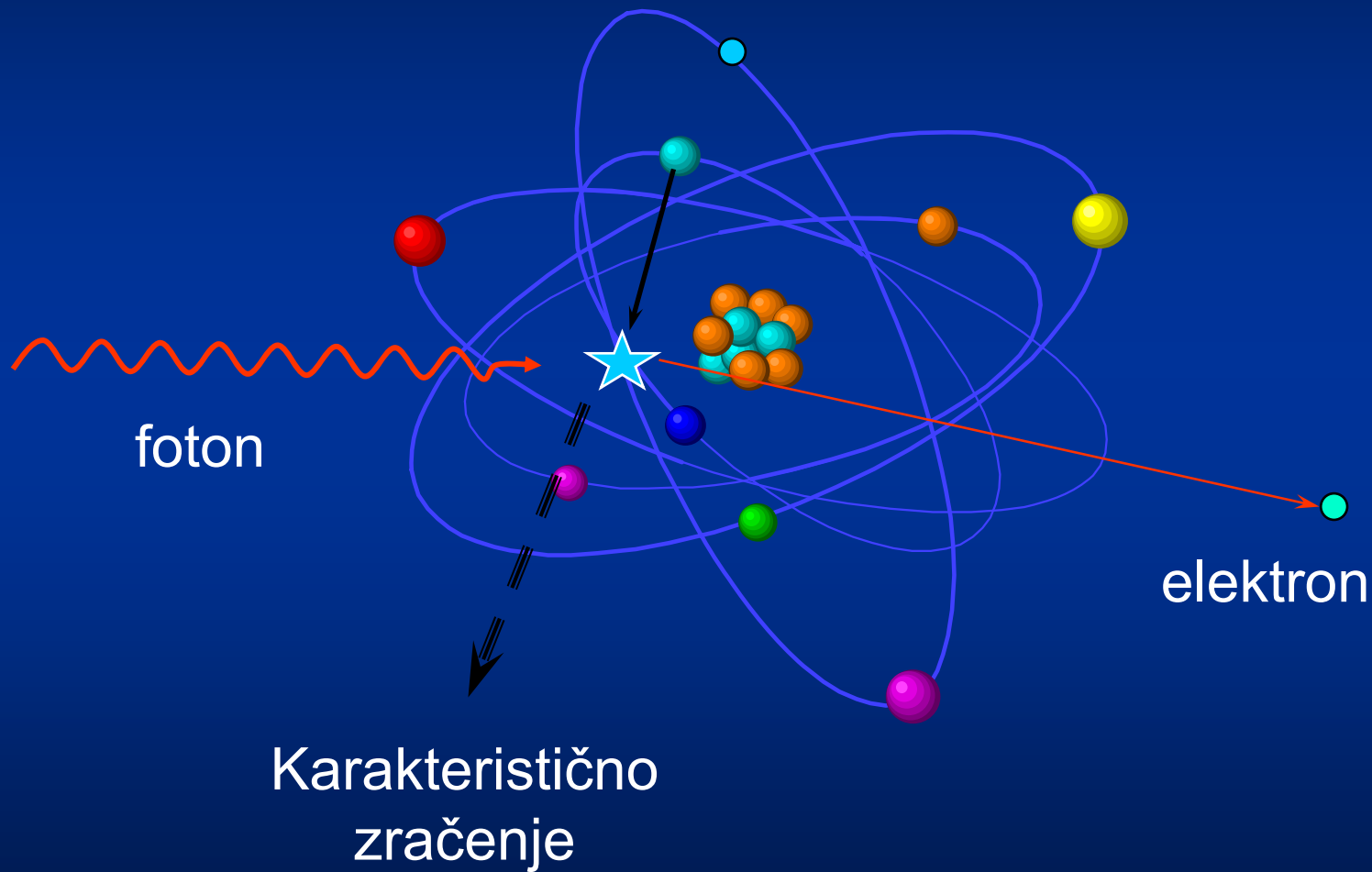
# Princip interakcije jonizujućih zračenja sa materijom

- Razlikujemo tri stadijuma interakcije:
  - Fizički stadijum (jonizacija):  $10^{-16}$  s
  - Fizičko-hemijski stadijum (reakcija jona sa molekulima):  $10^{-6}$  s
  - Hemijski stadijum (sekundarne hemijske i biohemijske reakcije):  $\sim$ s

# Fizički stadijum - elektromagnetno zračenje

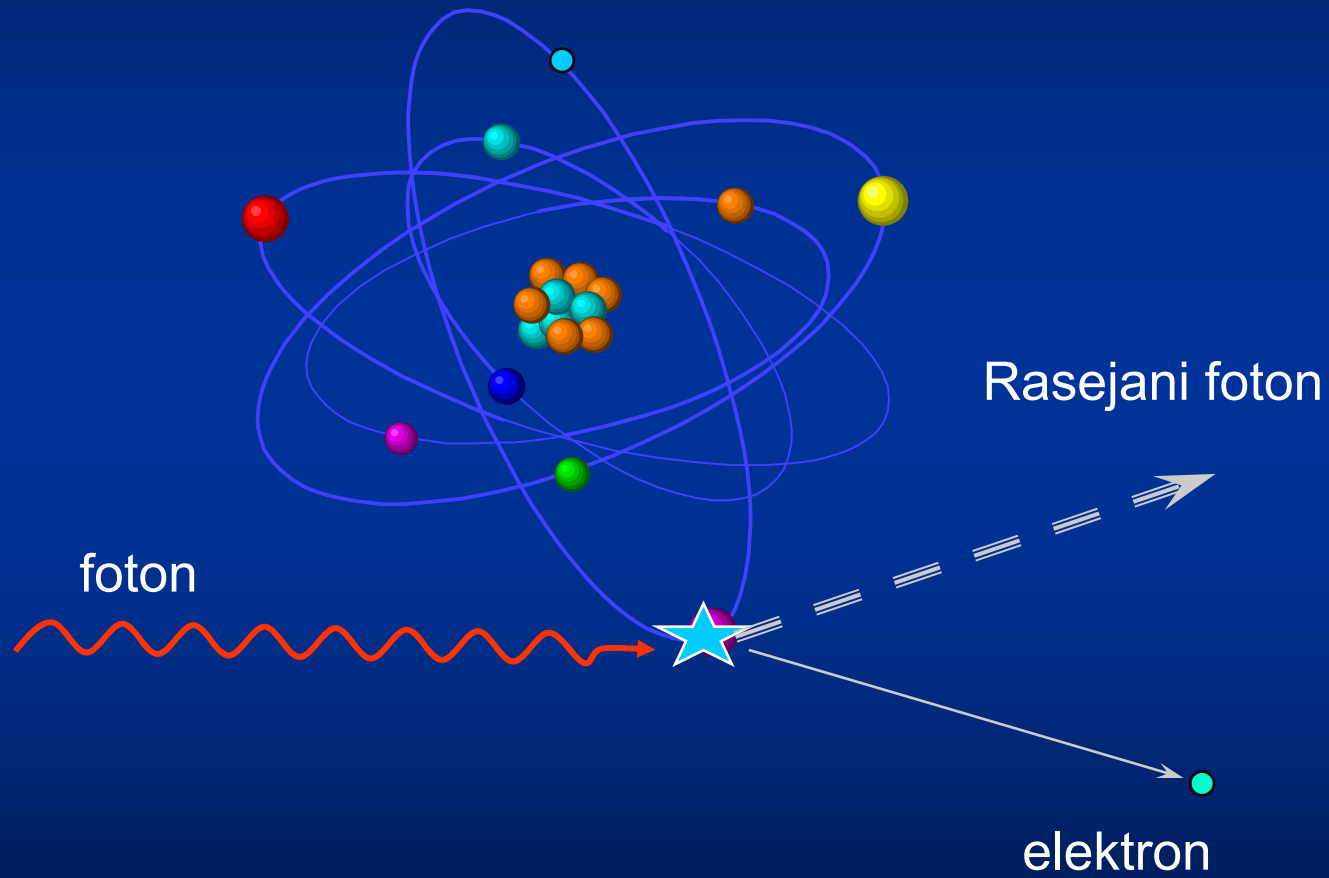
- Interakcije fotona sa elektronima:
  - Fotoelektrični efekat
  - Komptonov efekat
- Dejstvo jakog elektromagnetnog polja na fotone:
  - Stvaranje parova ( $e^- + e^+$ )
- Interakcija fotona sa nuklearnim jezgrom:
  - Fotonuklearne reakcije (najčešće  $\gamma, n$ )

# Fotoelektrični efekat

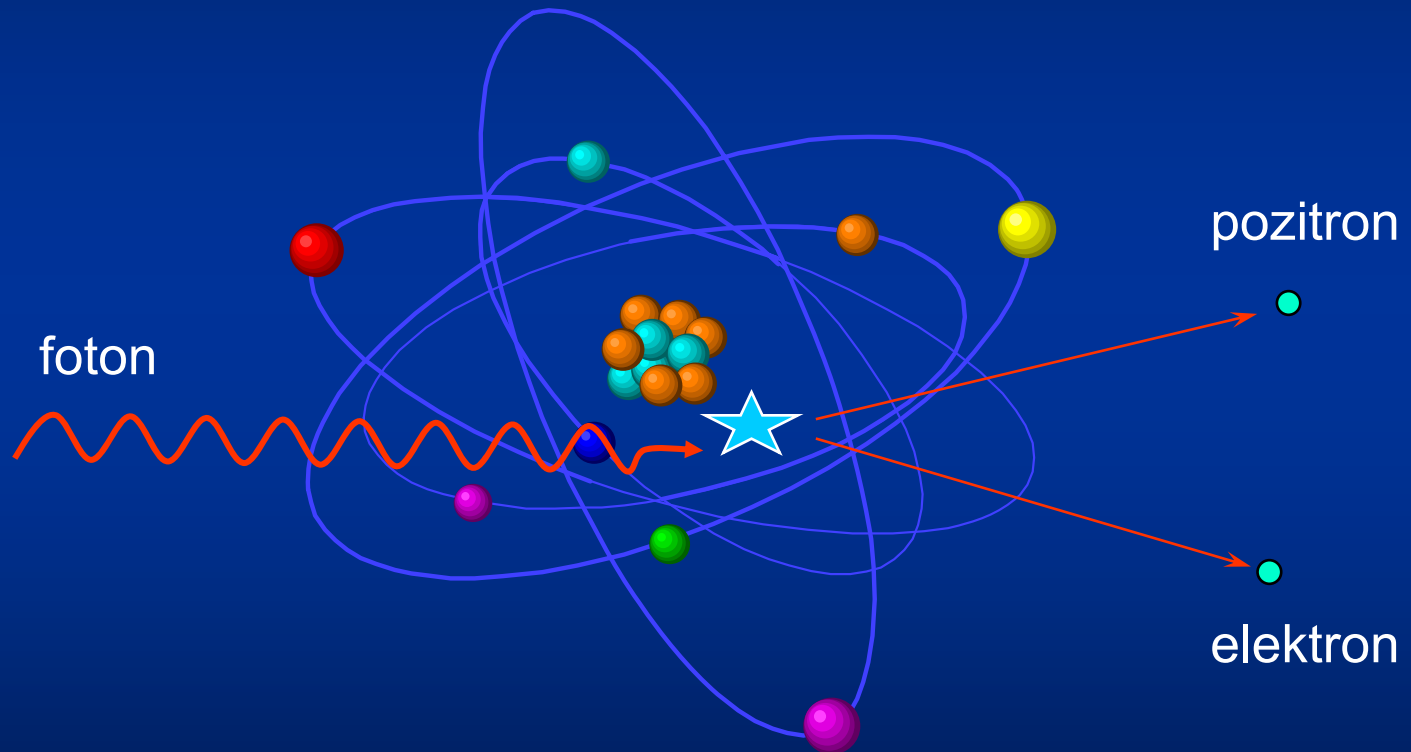




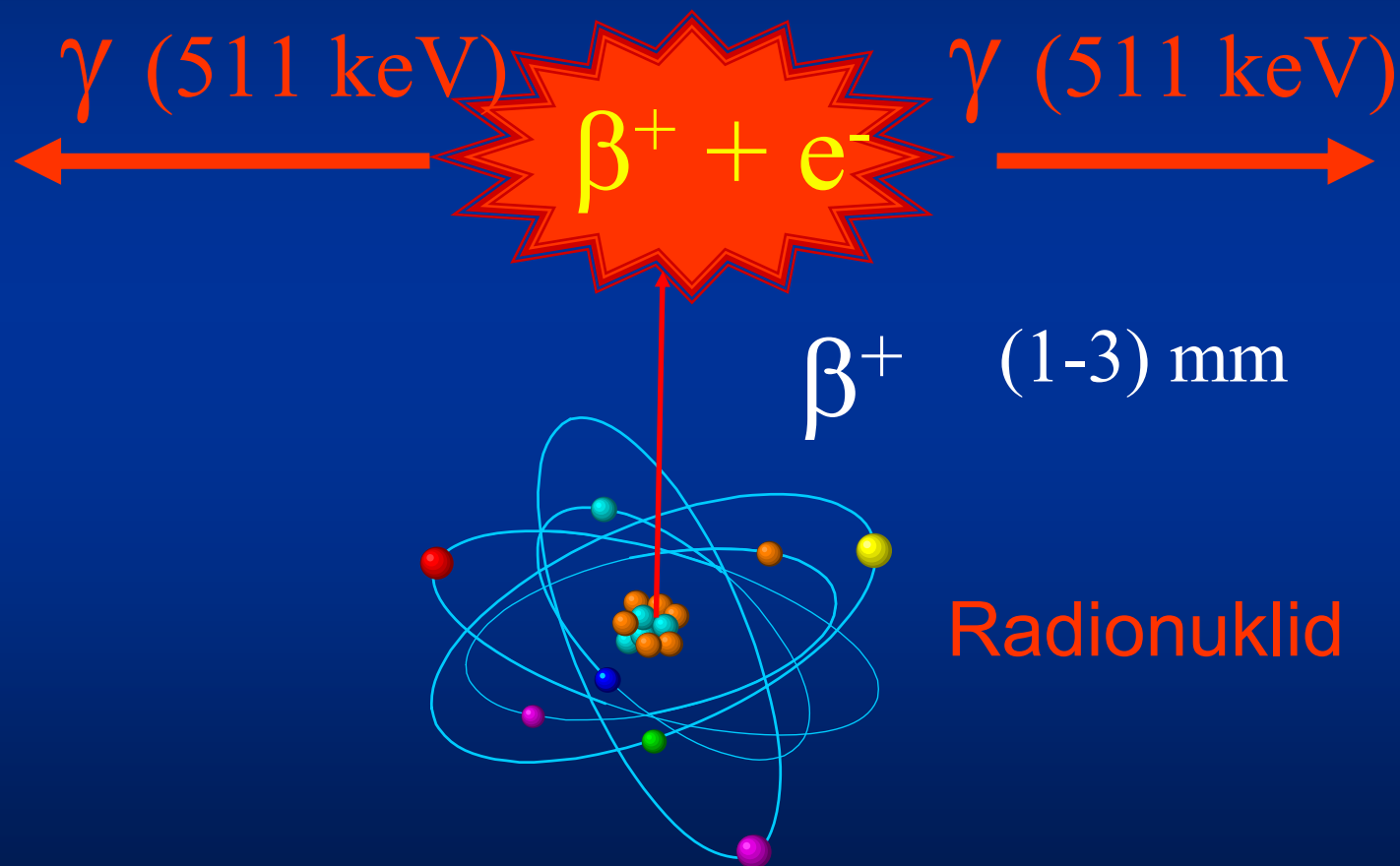
# Komptonov proces



# Proizvodnja parova



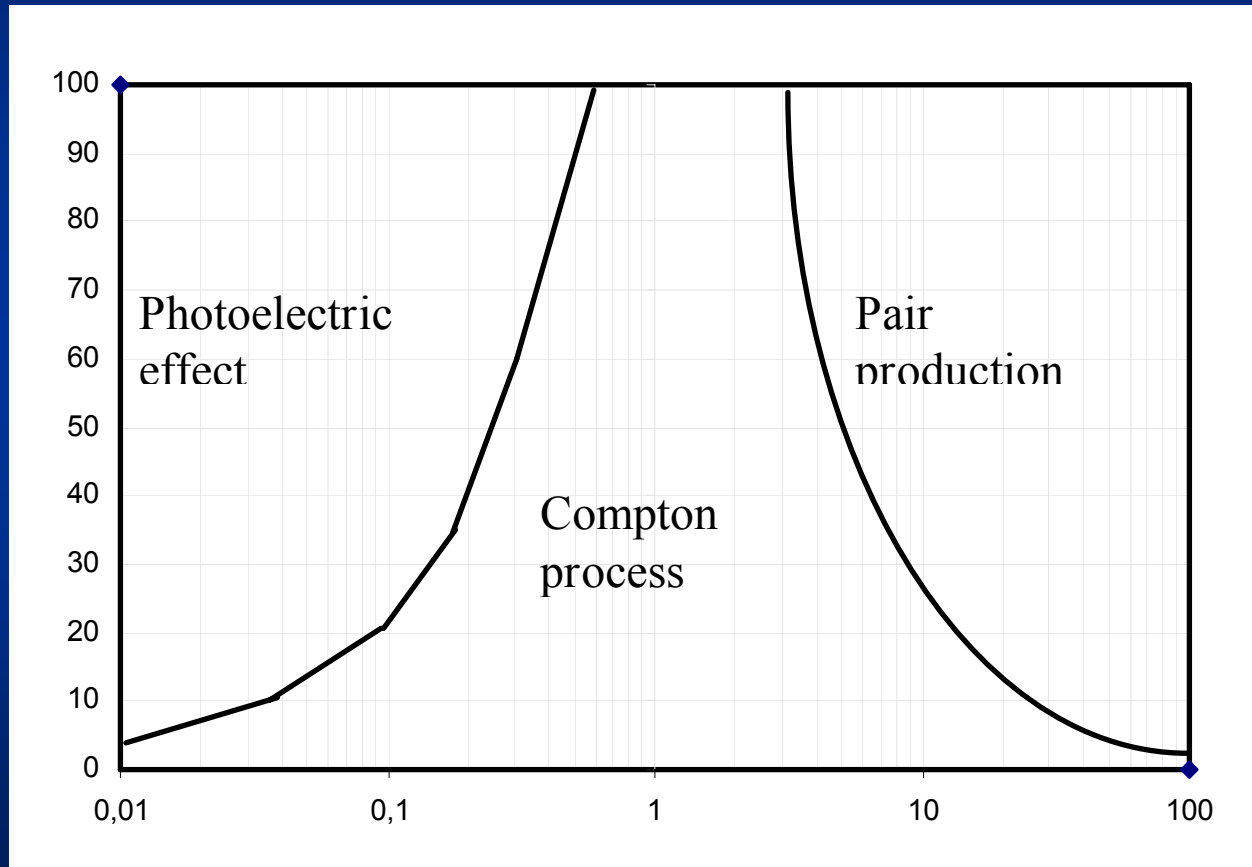
# Anihilacija



# Interakcije fotona sa materijom

## Rezime

Atomski broj (Z)



Photon energy (MeV)

Energija fotona (MeV)

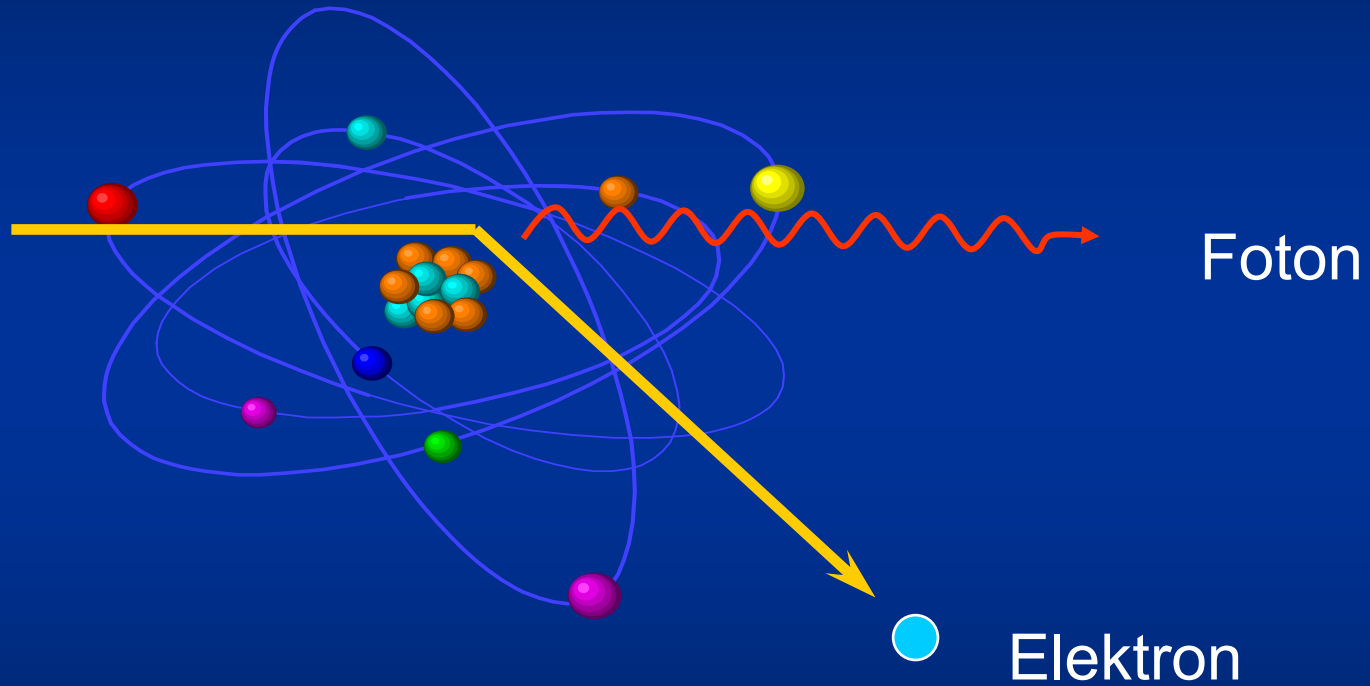
# Fizički stadijum - $\beta$ čestice

- Najverovatnija interakcija  $\beta$  čestica sa elektronima je neelastični sudar
  - U čeonom sudaru elektroni dobijaju svu energiju  $\beta$  čestice
  - U ostalim slučajevima dolazi do značajne promene pravca i energije  $\beta$  čestice
  - Sekundarni elektroni se ponašaju isto kao primarne  $\beta$  čestice
- Pozitroni malih energija podležu anihilaciji

# Zakočno zračenje

- Prolazak elektrona u jakom elektromagnetnom polju može rezultovati zakočnim zračenjem (bremsstrahlung)
  - Razlika u energiji pre i nakon "kočenja" elektrona se oslobađa u formi fotona - zakočnog X zračenja
  - Izvor elektromagnetnog polja koje izaziva zakočno zračenje su jezgra teških elemenata

# Bremsstrahlung



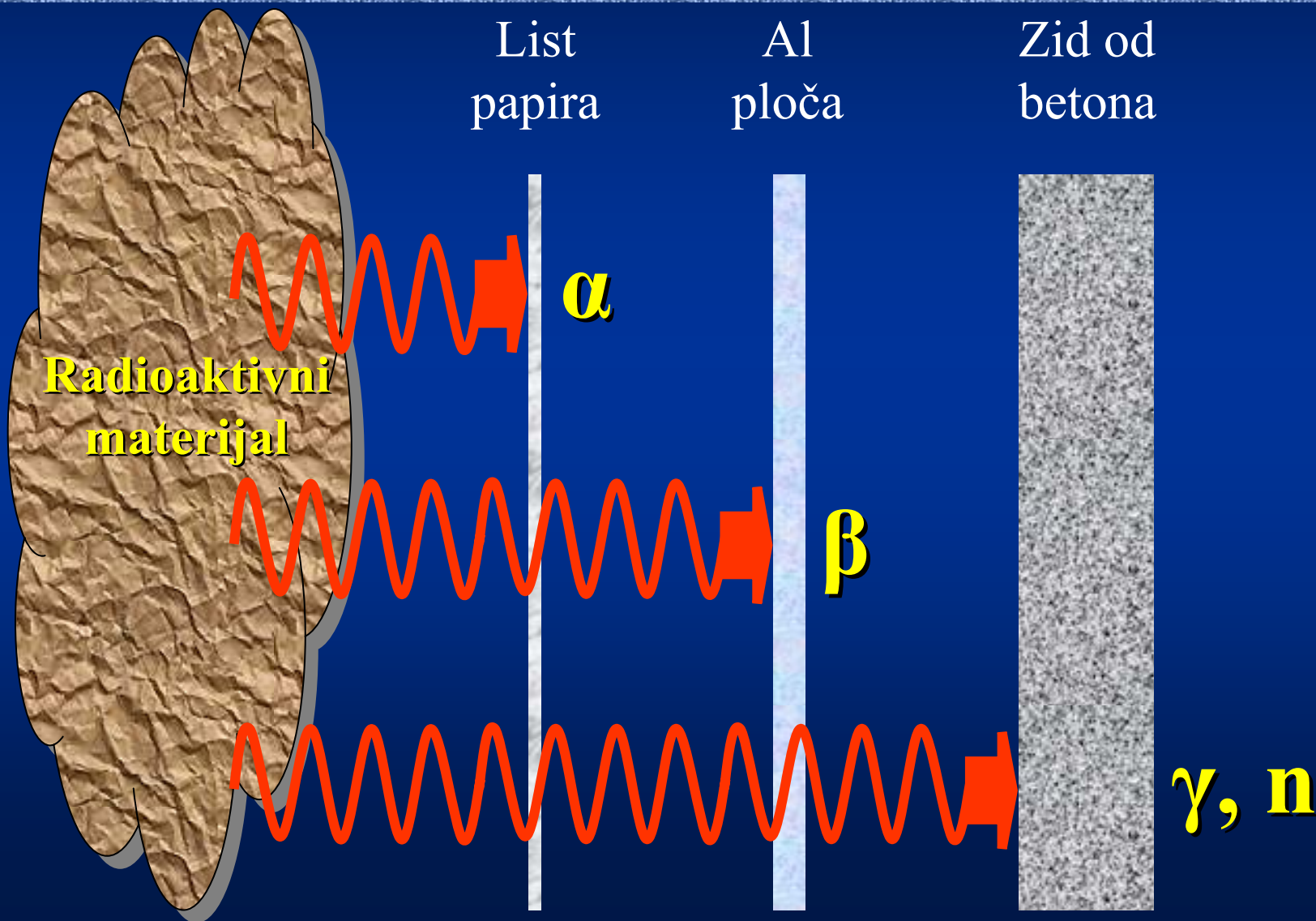
# HVL

Thickness of an absorber necessary to reduce the transmission of radiation to 50 percent (HVL).

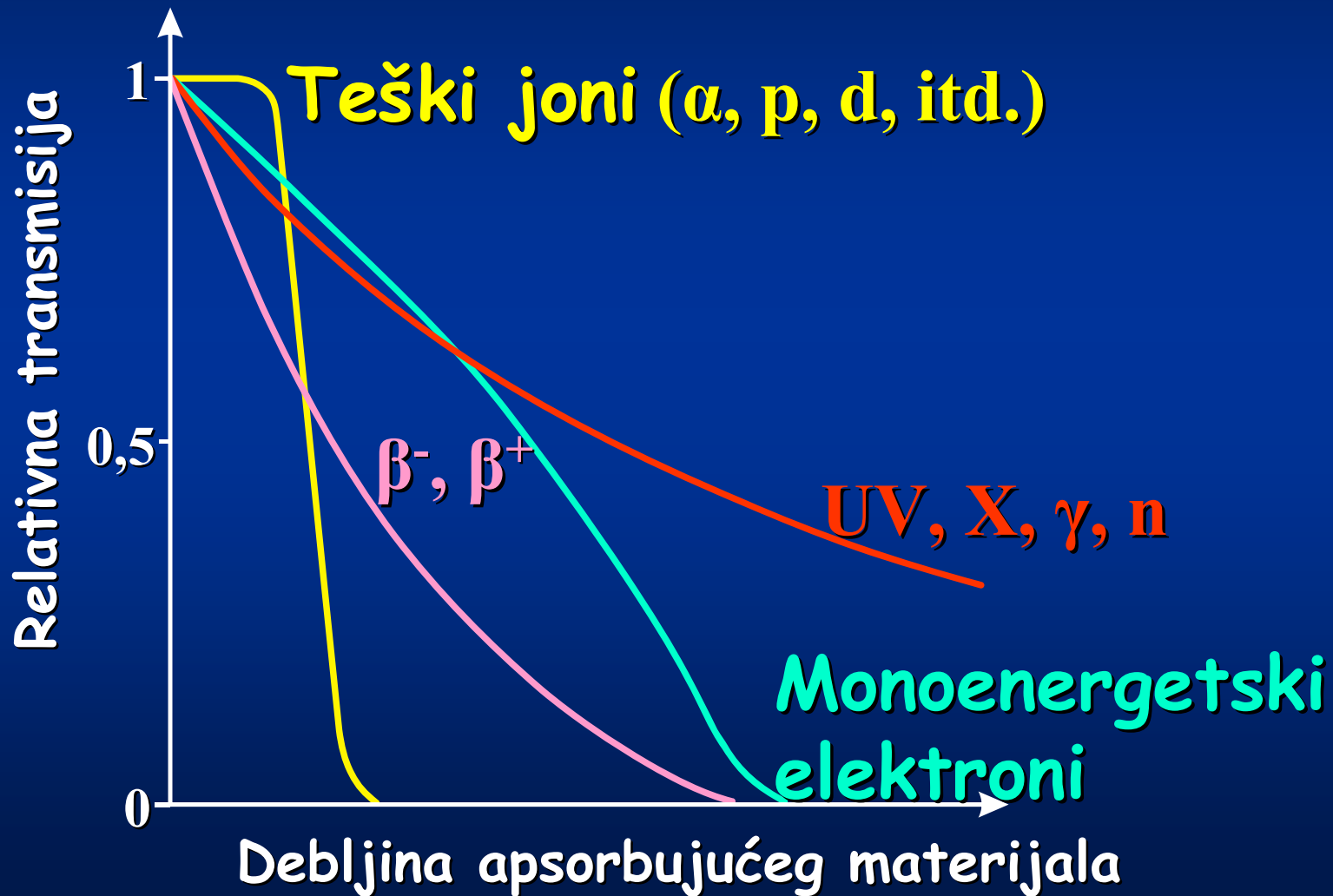
Radiation quality	HVL (mm)	
	Concrete	Lead
50 kV	4.3	0.06
100 kV	10.6	0.27
200 kV	25	0.52
500 kV	36	3.6
1 MV	44	7.9
2 MV	64	12.5
5 MV	96	16.5
10 MV	119	16.6
20 MV	137	16.3



# Prodornost jonizujućeg zračenja



# Relativna prodornost jonizujućih zračenja



# Radijaciona otpornost nekih polimernih materijala

Materijal	Otpornost, MGy	Upotrebljivost na 1 m od mete (60 Sv/h)
PEEK	10	~20 godina
Epoksidna smola	10	~20 godina
Poliimid (kapton)	1	~2 godine
NBR	1	~2 godine
Viton	0,1	~70 dana
Teflon (PTFE)	0,0001	~2 sata

# Najčesešće terminološke greške

- Radioaktivan - ozračen
- Kontaminiran - ozračen
- Promptno zračenje - indukovana aktivnost
- Aktivnost - doza