

## Magsugárzások

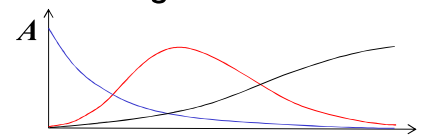
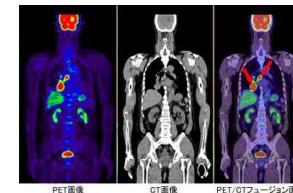
Dr Smeller László

Semmelweis Egyetem  
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet


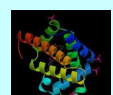
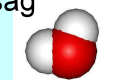
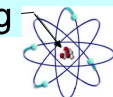
## Miért érdekes?

Radioaktív izotópok ill. sugárzások

- orvosi felhasználása:
  - diagnosztika (izotópdiaosztika)
  - terápia (sugárterápia)
- gyógyszerészeti vonatkozása:
  - farmakokinetikai vizsgálatok

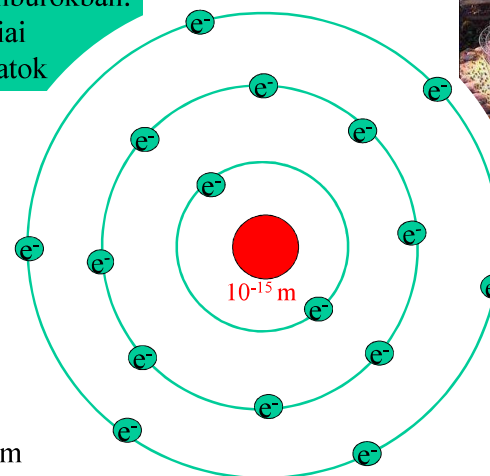


## Méretetek

m		
$10^0$	méter	ember
$10^{-3}$	milliméter	szabad szemmel látható távolság
$10^{-6}$	mikrométer	sejt méret (pl. emberi vvt) 
$10^{-9}$	nanométer	fehérje 
$10^{-10}$	– Angström	atom átmérője, kémiai kötéstávolság H atom $\varnothing \approx 1$ Angström (Å) 
$10^{-12}$	pikométer	röntgensugárzás hullámhossza
$10^{-15}$	femtométer	atommag 

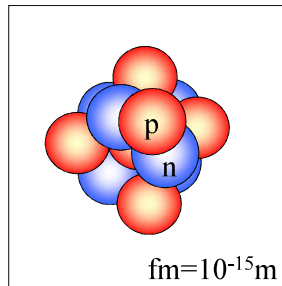
## Az atom felépítése

Változások az elektronburokban:  
=>kémiai folyamatok



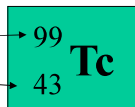
Az atommag  
átalakulásai:  
=> radioaktivitás

## Az atommag felépítése



	töltés	tömeg
proton	+1 elemi töltés	1 atomi tömegegys.
neutron	0	1 atomi tömegegys.

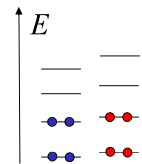
A (tömegszám) = protonszám + neutronszám  
 Z (rendszám) = protonszám



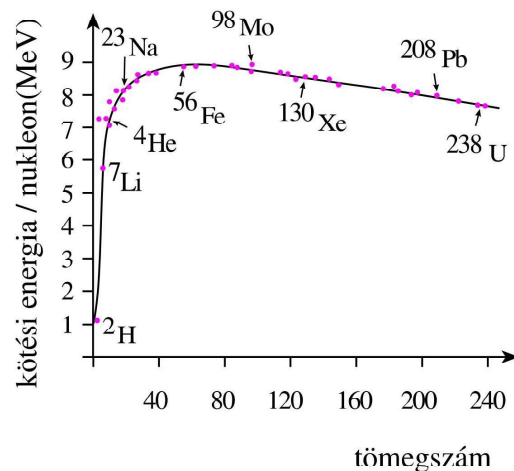
99 nukleon, ebből 43 proton és 56 neutron

## Az atommag stabilitása

- Magerők rövid hatótáv (~fm) nagyon erős vonzó
- Coulomb erő destabilizál!
- A nukleonok diszkrét energiaszinteken helyezkednek el.
- A mag energiája is diszkrét (kvantált)
- Az energiaszintek tipikus távolsága MeV(pJ)



## Mennyire stabil az atommag? Kötési energia



## Energiahiány=tömeghiány: így lehet megmérni a kötési energiát

Tömeghiány, pl.  $^{208}_{82}\text{Pb}$

$$E=mc^2$$

$$n: 1,008665 \times 126 = 127,0918 \text{ au.}$$

$$p: 1,007276 \times 82 = 82,5966 \text{ au.}$$

$$209,6884 \text{ au.}$$

$$^{208}_{82}\text{Pb} \text{ tényleges: } 207,9766 \text{ au.}$$

$$\text{Hiány: } 1,7118 \text{ au.} =$$

$$= 1,7118 \times 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 2,84 \cdot 10^{-27} \text{ kg} (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 2,56 \cdot 10^{-10} \text{ J} =$$

$$= 1,60 \text{ GeV} = 208 \times 7,69 \text{ MeV}$$



# Bomlások és részecskék

$\alpha$  - bomlás

$\alpha$  - részecske =  ${}^4_2\text{He}$  atommag

$\beta$  -bomlás:  $\beta^-$   
 $\beta^+$

$\beta^-$  részecske = elektron

$\beta^+$  részecske = pozitron

K-elektron befogás

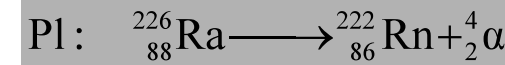
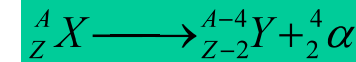
karakterisztikus  
Röntgen-foton

Izomer magátalakulás

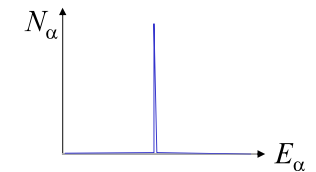
$\gamma$ -sugárzás

## $\alpha$ - bomlás

$\alpha$  - bomlás:  ${}^4\text{He}$  atommag válik le a magról  
nehéz atommagoknál fordul elő  
izotópdiagnosztikai jelentősége nincs



Vonalas energiaspektrum  
 $E_\alpha \sim \text{MeV}$



neutrontúlsúly

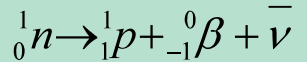
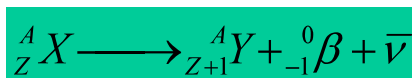
## $\beta^-$ - bomlás

pl:  ${}^{20}_9\text{F}$

${}^{32}_{15}\text{P}$

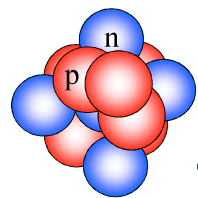
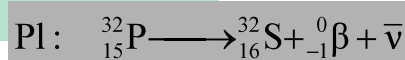
${}^{59}_{26}\text{Fe}$

${}^{131}_{53}\text{I}$



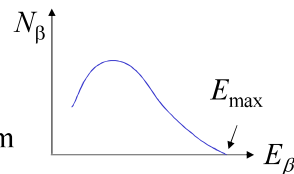
az atommagban  
marad

kilép



$\beta^-$ -sugárzás

folytonos  
energiaspektrum



jelölések:  $\beta^- = {}^0_{-1} \beta = e^-$

protontúlsúly

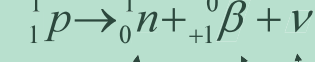
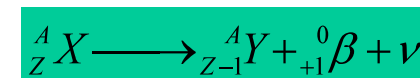
## $\beta^+$ - bomlás

pl:  ${}^{11}_6\text{C}$

${}^{15}_8\text{O}$

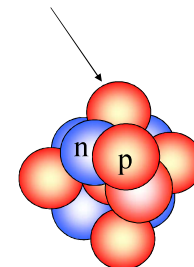
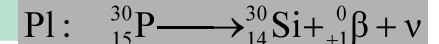
${}^{18}_9\text{F}$

${}^{52}_{26}\text{Fe}$



az atommagban  
marad

kilép



$\beta^+$ -sugárzás

folytonos energiaspektrum  
mesterséges előállítás  
ciklotron (köv. héten)

## Kitérő...

tömegek:  $m_p = 1,672623 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$   
 $m_n = 1,674928 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  } szabad állapotban!

$\beta^-$  bomlás OK mert  $m_n > m_p$

$\beta^+$  bomlás ?

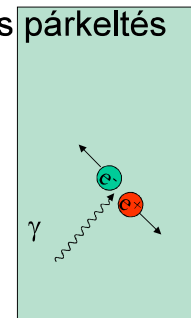
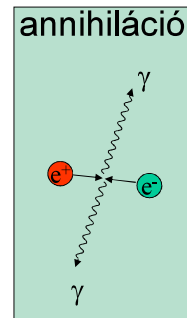
Megoldás: Einstein féle tömeg-energia ekvivalencia

$$E = mc^2$$

kötött nukleon: alacsonyabb energiaszint: kisebb tömeg!

## Elektron és pozitron

- antirészecskék
- tömeg ua, töltés ellentétes ...
- annihiláció és párkeltés



Einstein:  
tömeg-energia  
ekvivalencia

$$E = mc^2$$

$$m_e c^2 = 511 \text{ keV} \approx 0,5 \text{ MeV}$$

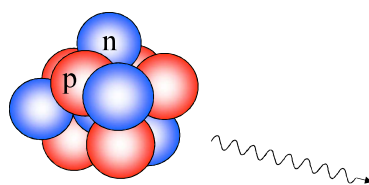
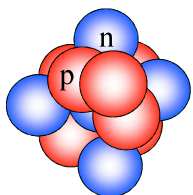
... kitérő vége

## Prompt $\gamma$ -sugárzás

A bomlás után a nukleonok elhelyezkedése  
**energetikailag kedvezőtlen** lehet

Átrendeződés: alacsonyabb energiaszintre jut,  
 a fölös energiát kisugározza  $\gamma$  foton formájában

A  $\gamma$ -sugárzás spektruma vonalas



protonszám, neutronszám változatlan! Kisérőjelenség.

## Izomer magátalakulás

Ha a bomlás utáni mag elég hosszú ideig stabil,  
 a  $\gamma$ -sugárzás később keletkezik.

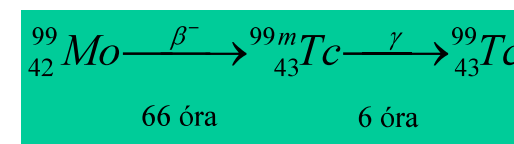
A két folyamat szeparálható.

**Tisztán  $\gamma$ -sugárzó izotóp állítható elő!**

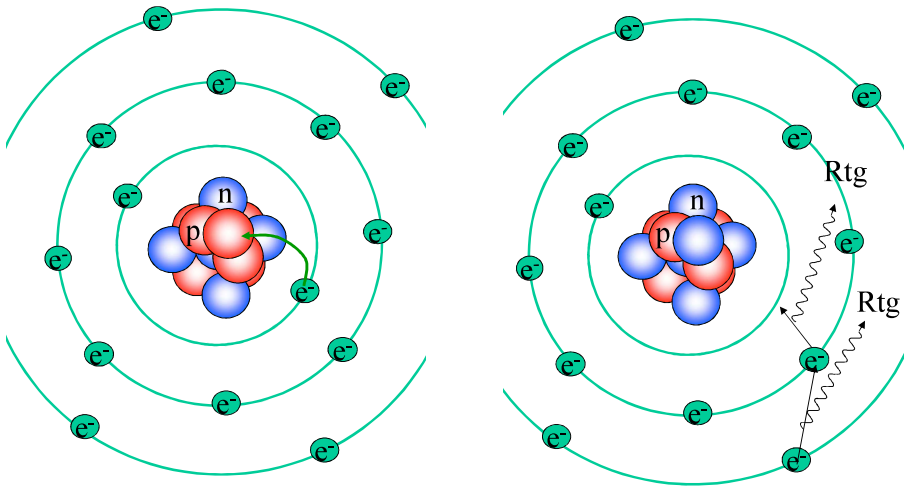
**=> Izotópdiaгностика**



Pl:  $^{99m}\text{Tc}$



## K-befogás

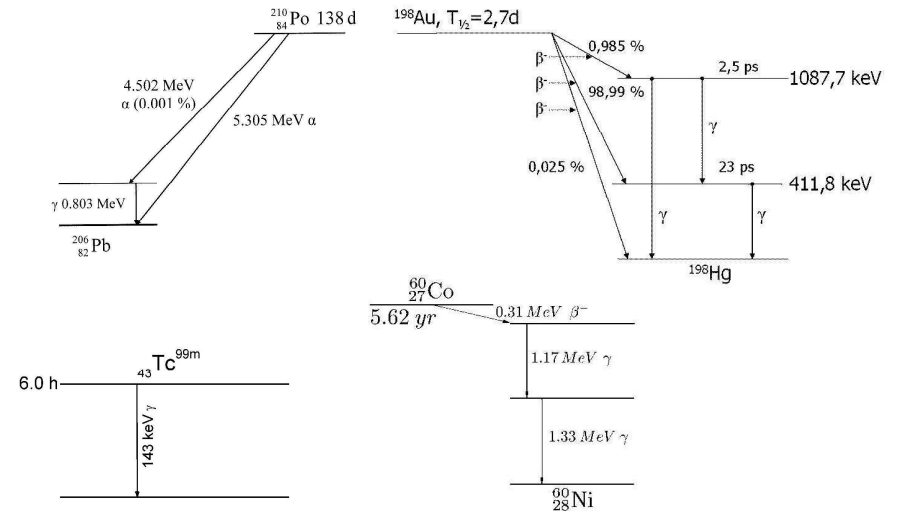


## Magátalakulások: bomlás, hasadás, fúzió

- Bomlás: kis részecske távozik ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ...)
  - Hasadás: kb. két azonos részre hasad (nehéz magoknál)
- Pl:  ${}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow 2 \text{ db közepes mag} + 2-3 \text{ neutron}$
- Fúzió könnyű magok egyesülése



## Példák bomlási sémákra



## Kitérő... Hogyan jöttek létre az izotópok?

### Primordiális izotópok:

A Föld keletkezése előtt keletkeztek (Ősrobbanás, Szupernova robbanás...)

Hosszú felezési idejűek. Pl.:  ${}^{232}\text{Th}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ ,

### Posztprimordiális izotópok:

Kozmogenikus izotópok: A kozmikus sugárzás hatására keletkeznek, pl:  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^{14}\text{C}$

Radiogenikus izotópok: A primordiális izotópok bomlástermékei. pl.:  ${}^{226}\text{Ra}$  and  ${}^{228}\text{Ra}$ ,  ${}^{222}\text{Rn}$

Nukleogenikus izotópok: magreakcióban keletkeztek (pl. spontán hasadás, v. spontán hasadáskor emittált neutron befogásával)  ${}^{21}\text{Ne}$

### Mesterséges izotópok:

Hasadási termékek: különfélék

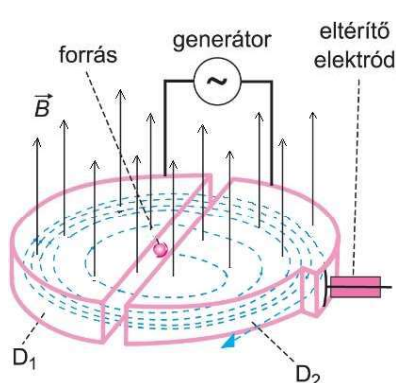
$\beta^-$  bomlók: atomreaktorban (neutron bombázással).

$\beta^+$  bomlók: gyorsítóban (pl. ciklotron) néhány 10 MeV-es protont vagy alfa részecskét lönek be a magba



## Ciklotron

Körpályán gyorsít (általában protont, alfa részecskét)  
Tipikus energia: néhány 10 MeV (50 MeV)



$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$qBv = F_{\text{Lorentz}} = F_{\text{cp}} = mv^2/R$$

## A radioaktív izotópokat jellemző mennyiségek

Aktivitás (a sugárforrást jellemzi)

Felezési idő (a bomlás sebességét jellemzi)\*

Részecske típusa és energiája (a sugárzást jellemzi)\*

\*függ az izotóp típusától

## Aktivitás ( $\Lambda$ )

$$\Lambda = \left| \frac{dN}{dt} \right| \quad \left( = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \right)$$

N= a bomlásra képes atomok száma  
t= idő

Az egységnyi idő alatt elbomlott atomok száma

mértékegysége: becquerel Bq  
1 Bq= 1 bomlás/sec

A gyakorlatban: kBq, MBq, GBq, TBq

mérhetetlenül alacsony

természetes radioaktivitás szintje

in vivo diagn.

óvatosan dolgozzunk vele!

terápiában alkalmazott aktivitás

## Bomlástörvény

$\Delta N \sim N$  N a bomlásra képes (=elbomlatlan) atomok száma

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

$\lambda$ : bomlási állandó, bomlási valószínűség [1/s]  
 $1/\lambda = \tau$  idő! átlagos élettartam

differentiálegyenlet

megoldása:

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

exponenciális lecsengés!

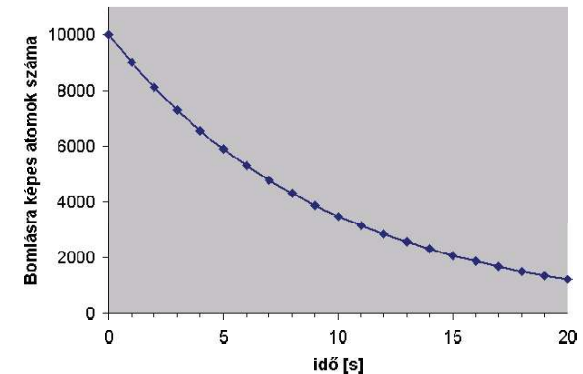
$N_0$  a z elbomlatlan atomok száma kezdetben ( $t=0$ )

## Példa

- Példa:  $N_0=10000$   $\lambda=0,1 \text{ 1/s}$
- 1 sec múlva: 9000 (10000x0,1=1000 elbomlott)
- 2 sec múlva: 8100 (9000x0,1=900 elbomlott)
- 3 sec múlva: 7290 (8100x0,1=810 elbomlott)
- 4 sec múlva: 6561 (7290x0,1=729 elbomlott)
- ....

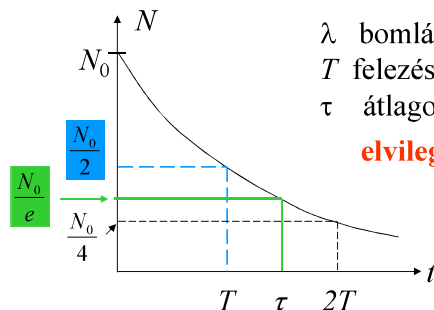
## Példa

- Példa:  $N_0=10000$   $\lambda=0,1 \text{ 1/s}$
- 1 sec 9000
- 2 sec 8100
- 3 sec 7290
- 4 sec 6561
- ....



## Felezési idő, bomlástörvény

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$



$\lambda$  bomlásállandó (bomlási valószínűség)  
 $T$  felezési idő  
 $\tau$  átlagos élettartam

**elvileg soha nem bomlik el az összes !**

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T}$$

## Az aktivitás időbeli csökkenése

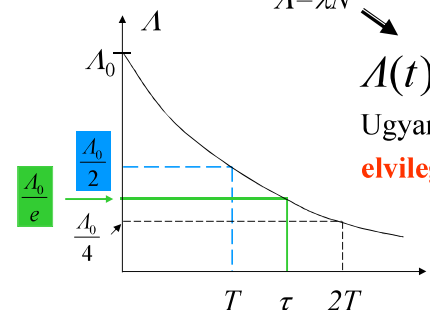
$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| \quad \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A = \lambda N$$

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

Ugyanúgy csökken mint az  $N$ !

**elvileg soha nem bomlik el teljesen!**



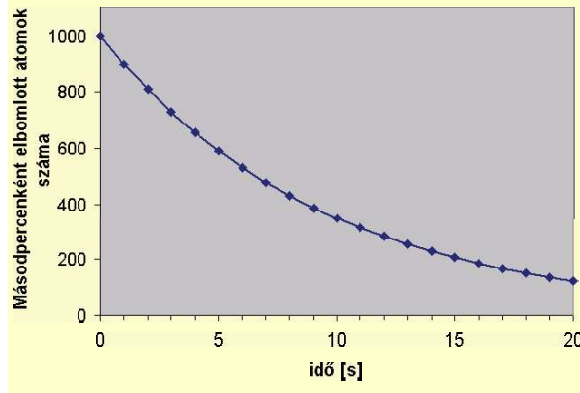
kb. 10  $T$  alatt

1/1000 részre bomlik



## Példa

- Példa:  $N_0 = 10000$   $\lambda = 0,1 \text{ 1/s}$



1=1000 elbomlott)  
 ,1=900 elbomlott)  
 ,1=810 elbomlott)  
 ,1=729 elbomlott)

## A felezési idő az izotóp típusától függ

$^{232}\text{Th}$	$1,4 \cdot 10^{10}$ év
$^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ év
$^{40}\text{K}$	$1,3 \cdot 10^9$ év
$^{14}\text{C}$	5736 év
$^{137}\text{Cs}$	30 év
$^3\text{H}$	12,3 év

$^{60}\text{Co}$	5,3 év
$^{59}\text{Fe}$	1,5 hó
$^{56}\text{Cr}$	1 hó (28 nap)
$^{131}\text{I}$	8 nap
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 óra
$^{18}\text{F}$	110 perc
$^{11}\text{C}$	20 perc
$^{15}\text{O}$	2 perc
$^{222}\text{Th}$	2,8 ms

Ezeket az adatokat  
tilos megtanulni!

## Részecskeenergia

Általában elektronvoltban (eV) mérik.

$\text{eV} = \text{elemi töltés} \times 1 \text{ Volt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

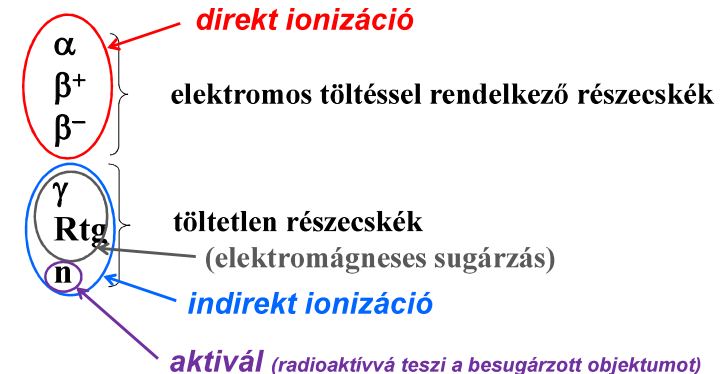
tipikus részecskeenergiák (a magátalakuláskor felszabaduló energia) **MeV** nagyságrendben vannak.

Általában:

**Minél nagyobb a részecskeenergia, annál nagyobb a hatótáv.**  
 (egy adott sugárzáson belül)

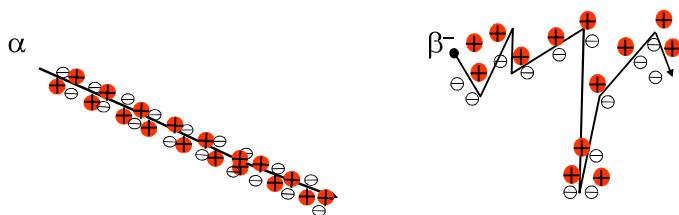
## Sugárzások és anyag kölcsönhatása.

A sugárzások elnyelődése



# Töltött részecskék elnyelődése

Útjuk során ionizálnak, energiájukból folyamatosan leadnak.  
Az energia egy véges úthosszon elfogy. **Hatótávolság**



## Hatótávolság

$\alpha$ -részecske

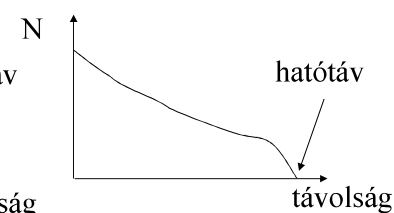
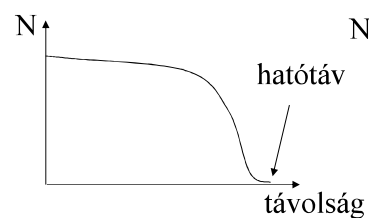
$\beta^-$ -részecske

levegőben **néhány cm**

levegőben **m** nagyságrendű

szövetben **0,01-0,1 mm**

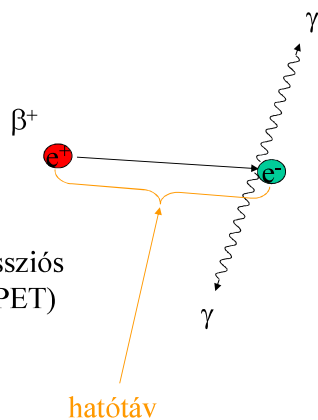
szövetben **cm**



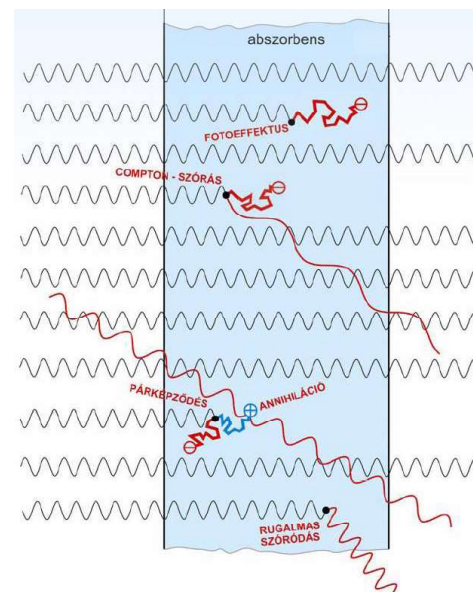
## $\beta^+$ -sugárzás

annihiláció

Ld: Pozitron Emissziós  
Tomográfia (PET)



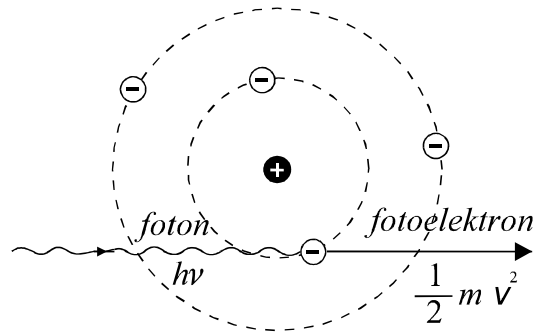
## A $\gamma$ - (és Rtg) sugárzás elnyelődése



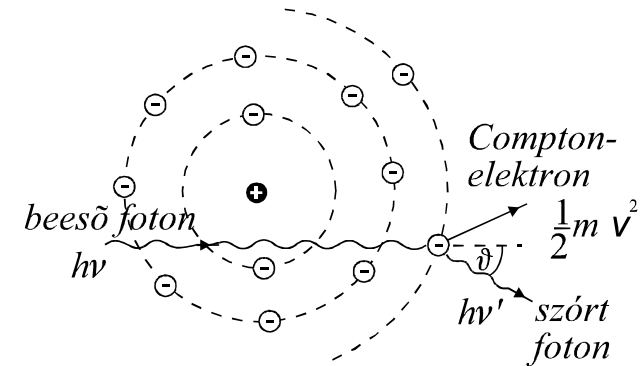
Véletlenszerűen fellépő  
effektusok által megy végbe:

Fotoeffektus,  
Compton-effektus,  
párképződés,  
(rugalmas szóródás)

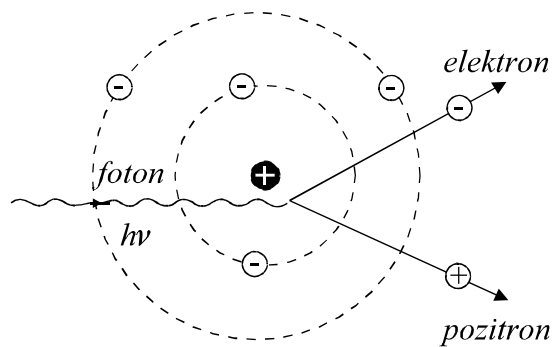
## Fotoeffektus



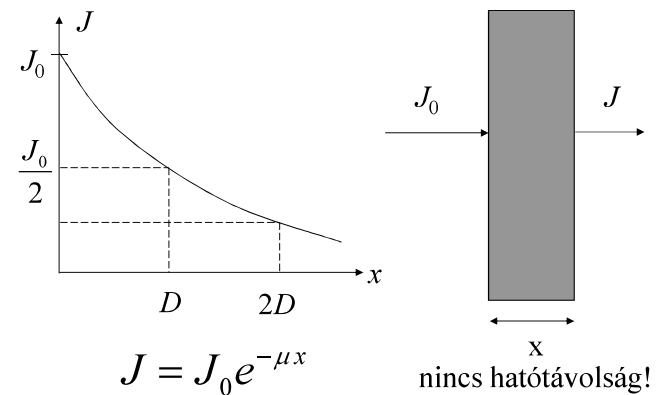
## Compton effektus



## Pároképződés



## $\gamma$ - és röntgensugárzás gyengülése



néhány „ökölszabály”:  $x_{1/10} = 3,33 D$   $x_{1/1000} = 10 D$