



# Magsugárzások

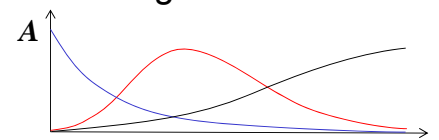
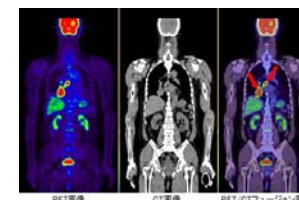
Dr Smeller László

Semmelweis Egyetem  
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet





## Miért érdekes?

Radioaktív izotópok ill. sugárzások

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

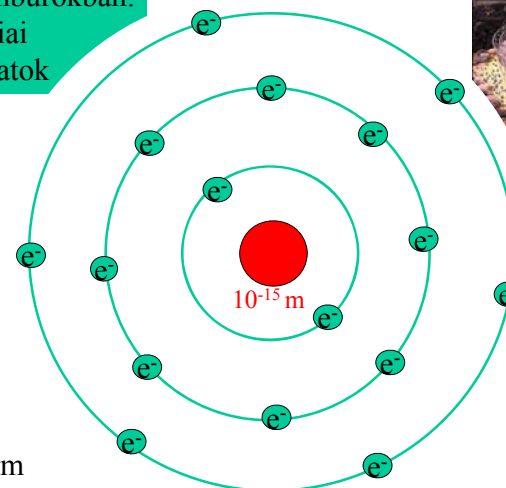


## Méretetek

m		
$10^0$	méter	ember
$10^{-3}$	milliméter	szabad szemmel látható távolság
$10^{-6}$	mikrométer	sejt méret (pl. emberi vvt) 
		$\varnothing 7\mu\text{m}$
$10^{-9}$	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 

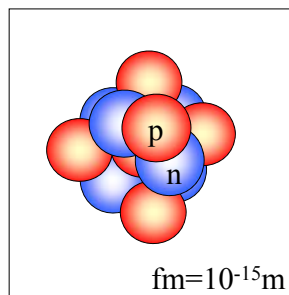
## Az atom felépítése

Változások az elektronburokban:  
=>kémiai folyamatok



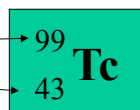
Az atommag  
átalakulásai:  
=> radioaktivitás

## Az atommag felépítése



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

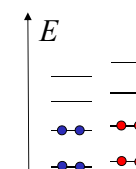
A (tömegszám) = protonszám + neutronszám  
 Z (rendszám) = protonszám



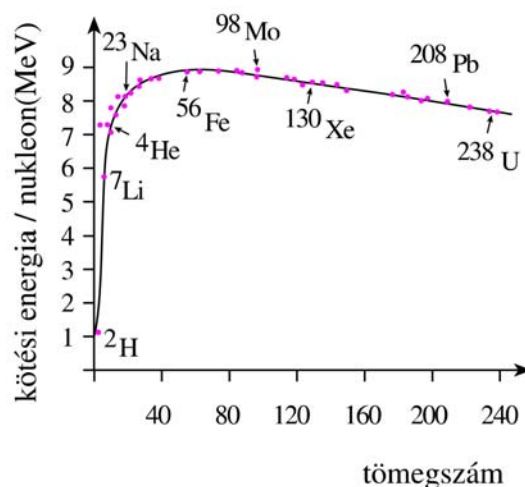
99 nukleon, ebből 43 proton és 56 neutron

## 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.  $^{208}_{82}\text{Pb}$

$$E=mc^2$$

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

$$p: 1,007276 \times 82 = \frac{82,5966 \text{ au.}}{209,6884 \text{ au.}}$$

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

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

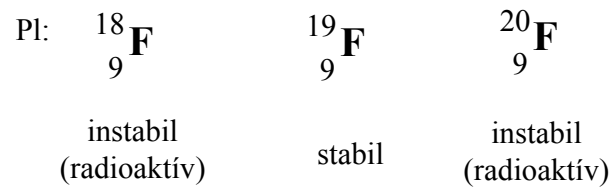
$$= 1,7118 \times 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

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

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

# Izotóp

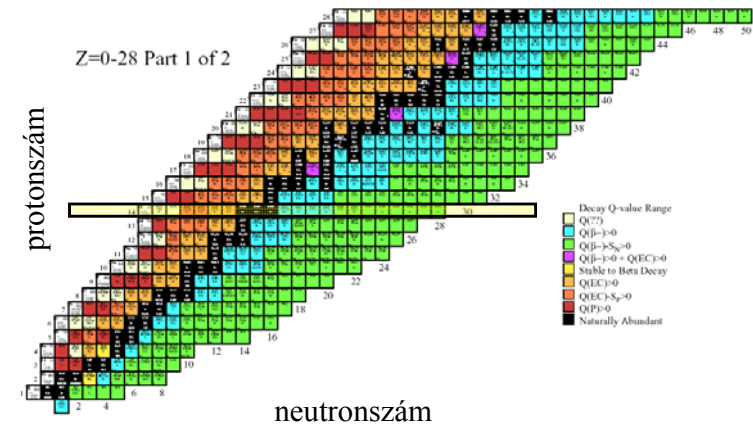
Azonos rendszámú de eltérő tömegszámú atommagok  
=> azonos protonszám eltérő neutronszám  
ugyanazon elem módosulatai,  
=> kémiai tulajdonságuk ua.



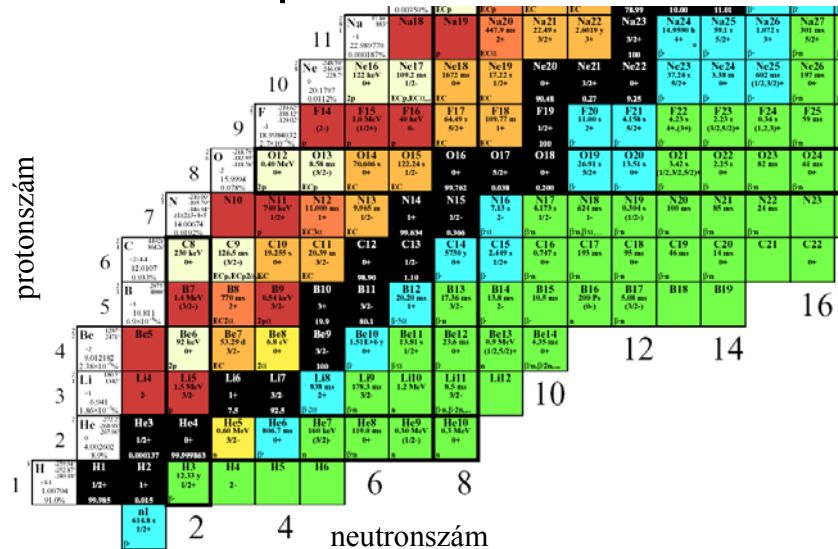
izotóp <-> radioaktív izotóp

# Izotóptáblázat

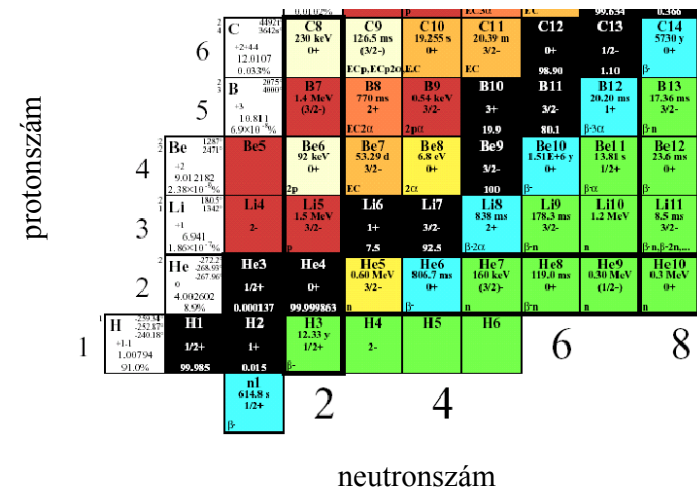
Table of Isotopes (1998)



# Izotóptáblázat részlet



# Izotóptáblázat részlet



# 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

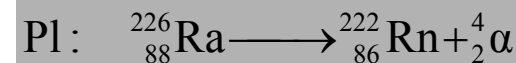
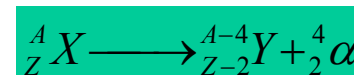
karakterisztikus  
Röntgen-foton

Izomer magátalakulás

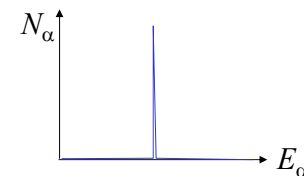
$\gamma$ -sugárzás

## $\alpha$ - bomlás

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



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



neutrontúlsúly

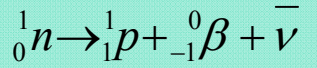
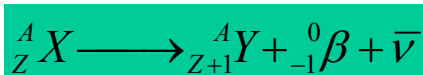
## $\beta^-$ - bomlás

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

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

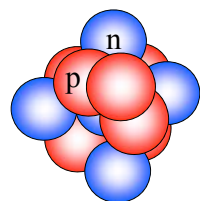
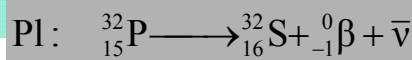
${}^{59}_{26}\text{Fe}$

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



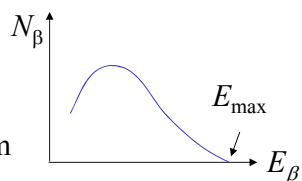
az atommagban  
marad

kilép



$\beta^-$ -sugárzás

folytonos  
energiaspektrum



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

protontúlsúly

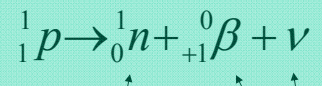
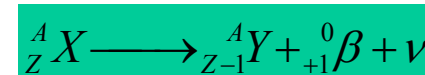
## $\beta^+$ - bomlás

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

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

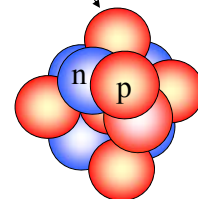
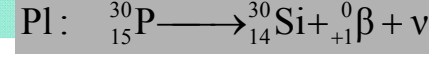
${}^{18}_9\text{F}$

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



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 ?

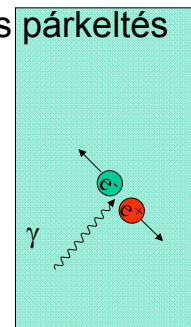
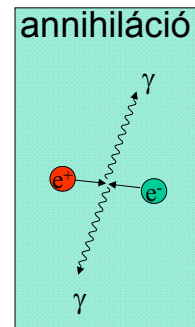
Megoldás: Einstein féle tömeg-energia ekvivalencia

$$E = mc^2$$

kötött nukleon: alacsonyabb energiaszint: kisebb tömeg!

## Elektron és pozitron

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



Einstein:  
tömeg-energia  
ekvivalencia

$$E = mc^2$$

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

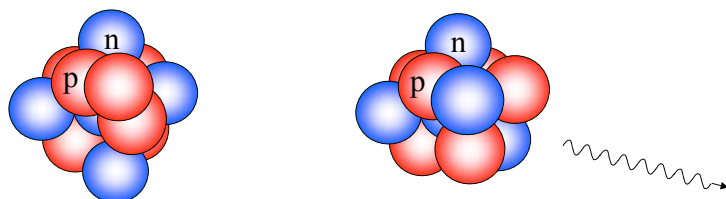
... kitérő vége

## 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



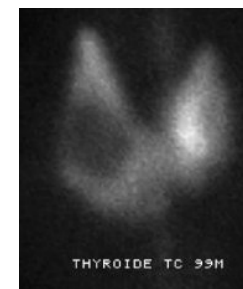
protonszám, neutronszám változatlan! Kisértőjelenség.

## Izomer magátalakulás

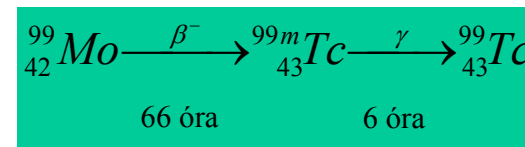
Ha a bomlás utáni mag elég hosszú ideig stabil,  
a  $\gamma$ -sugárzás később keletkezik.

A két folyamat szeparálható.

**Tisztán  $\gamma$ -sugárzó izotóp állítható elő!**  
**=> Izotópdiaгностика**

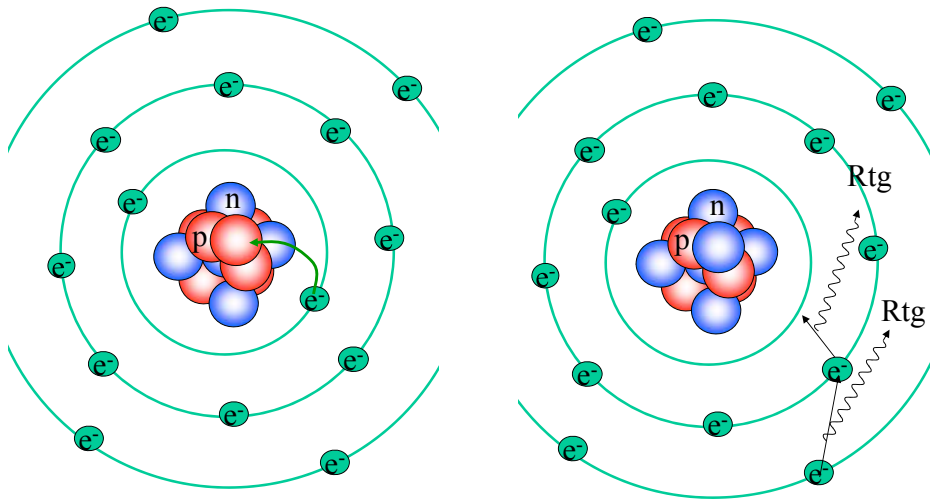


Pl:  $^{99m}\text{Tc}$

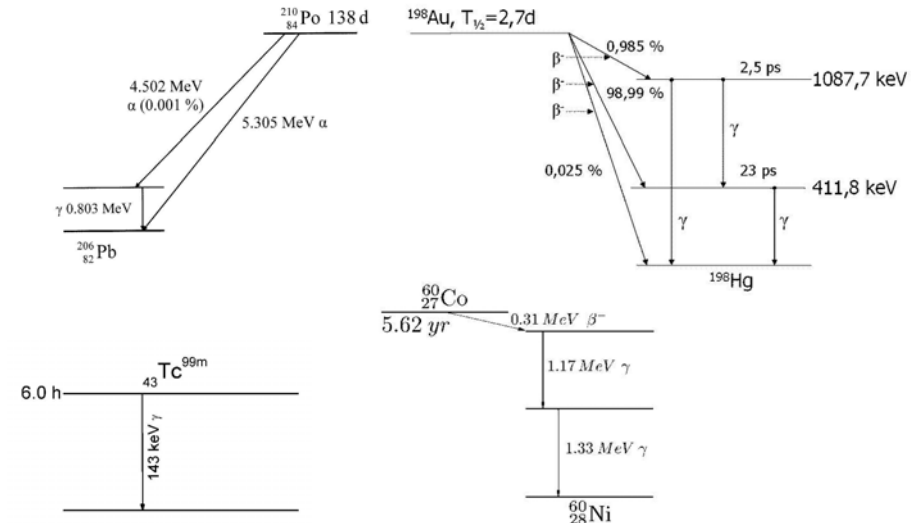




## K-befogás

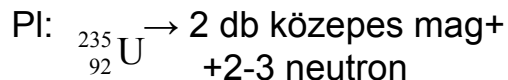


## Példák bomlási sémákra



## Magátalakulások: bomlás, hasadás, fúzió

- Bomlás: kis részecske távozik ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ...)
- Hasadás: kb. két azonos részre hasad (nehéz magoknál)
- Fúzió könnyű magok egyesülése



## 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  ${}^{228}\text{Rn}$

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

# 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 ( $t=0$ )

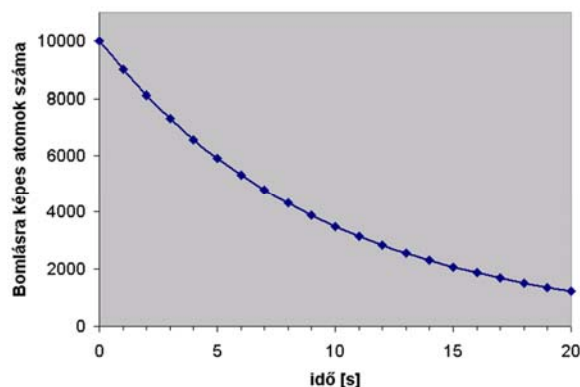
# Példa

- 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)
- ....



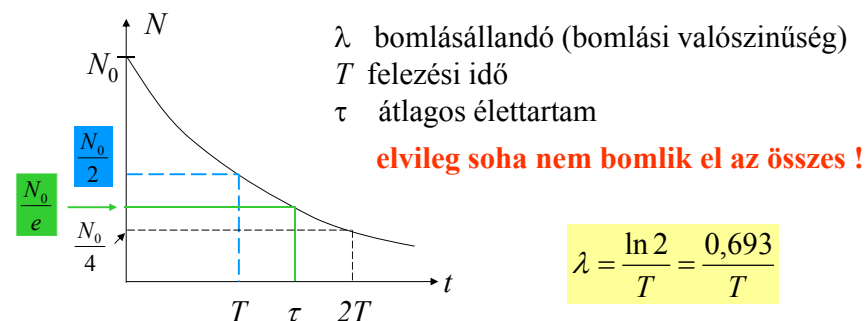
## Példa

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

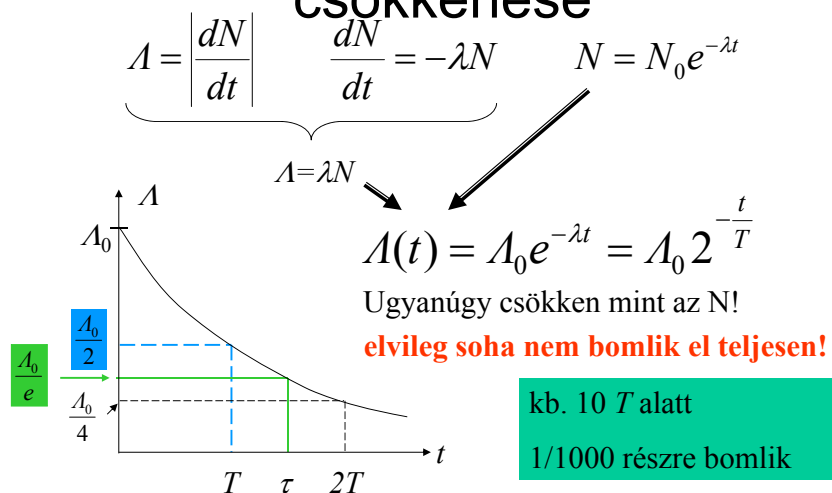


## Felezési idő, bomlástörvény

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

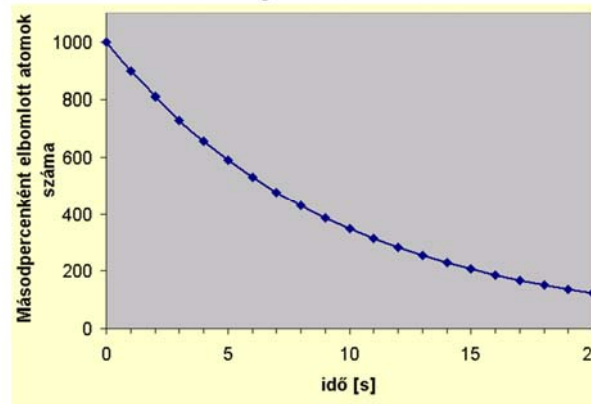


## Az aktivitás időbeli csökkenése



## 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	$^{60}\text{Co}$	5,3 év
$^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ év	$^{59}\text{Fe}$	1,5 hó
$^{40}\text{K}$	$1,3 \cdot 10^9$ év	$^{56}\text{Cr}$	1 hó (28 nap)
$^{14}\text{C}$	5736 év	$^{131}\text{I}$	8 nap
$^{137}\text{Cs}$	30 év	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 óra
$^3\text{H}$	12,3 év	$^{18}\text{F}$	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.

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

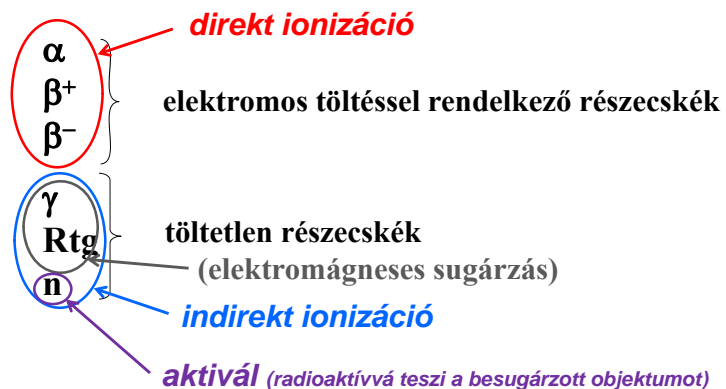
tipikus részecskeenergiák (a magátalakuláskor felszabaduló energia) **MeV** nagyságrendben vannak.

Általában:

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

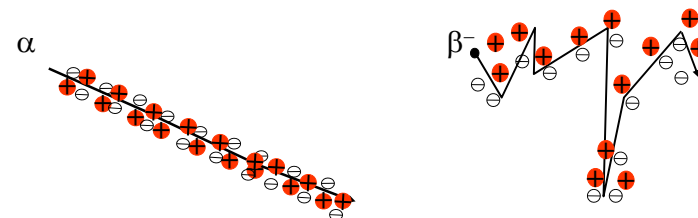
## Sugárzások és anyag kölcsönhatása.

A sugárzások elnyelődése



## Töltött részecskék elnyelődése

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



## Hatótávolság

$\alpha$ -részecske

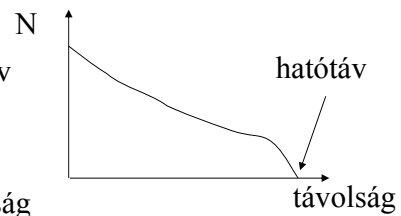
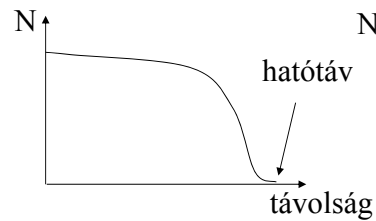
levegőben **néhány cm**

szövetben **0,01-0,1 mm**

$\beta^-$ -részecske

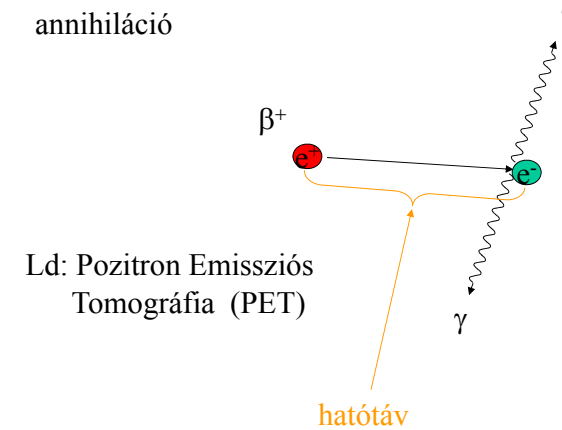
levegőben **m** nagyságrendű

szövetben **cm**

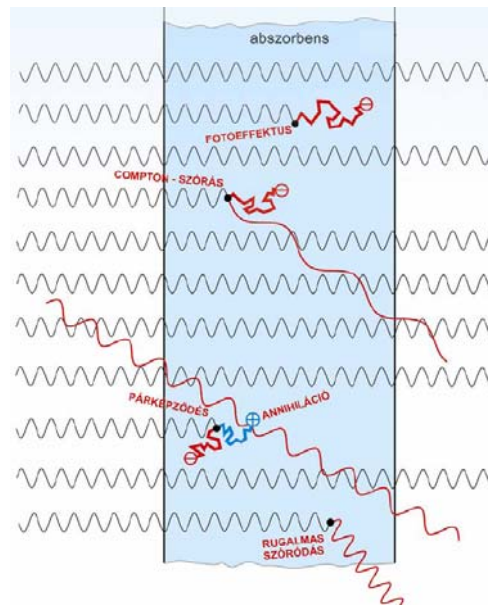


## $\beta^+$ -sugárzás

annihiláció



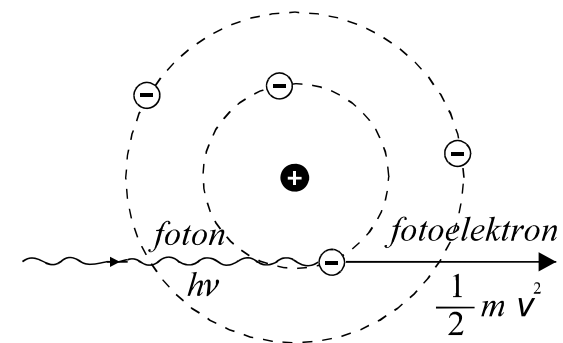
## A $\gamma$ - (és Rtg) sugárzás elnyelődése



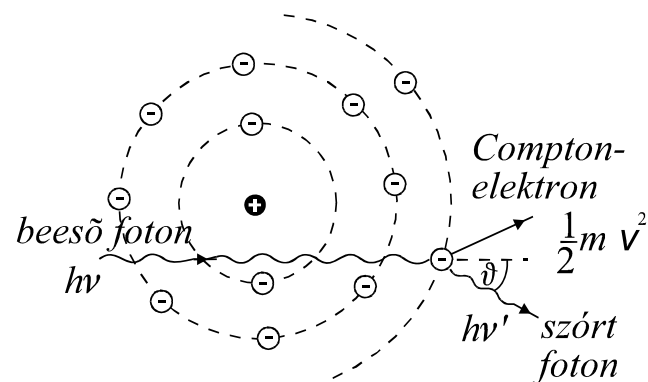
Véletlenszerűen fellépő  
effektusok által megy végbe:

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

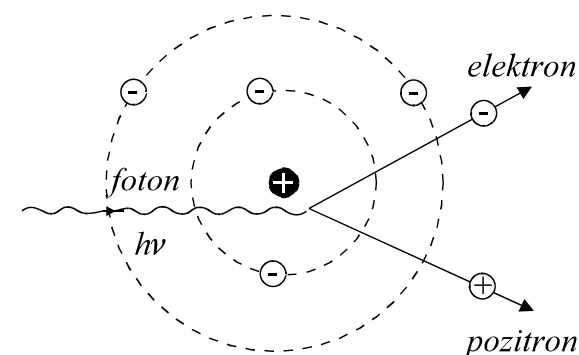
## Fotoeffektus



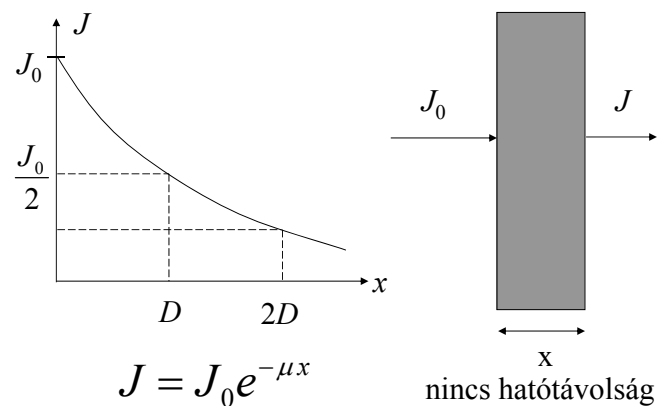
## Compton effektus



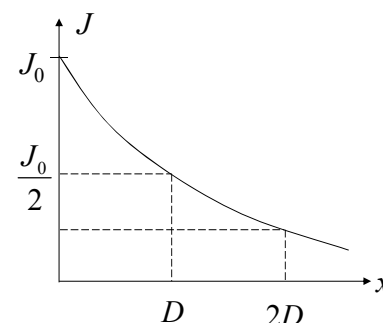
## Pároképződés



## $\gamma$ - és röntgensugárzás gyengülése



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



$$J = J_0 e^{-\mu x}$$

$\mu$ : (lineáris) gyengítési együttható  
mértékegysége: 1/m, 1/cm

$\delta = \frac{1}{\mu}$  „behatólási mélység”  
az intenzitás e-ed  
részére csökken (kb. 37%)

$\mu$ (anyagi minőség, absz. centrumok száma, sugárzás energiája)  
 $= \mu(\text{anyag}, \rho, E_{\text{foton}}) \sim \rho$

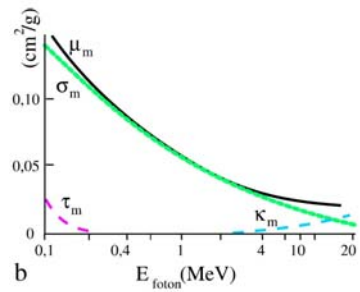
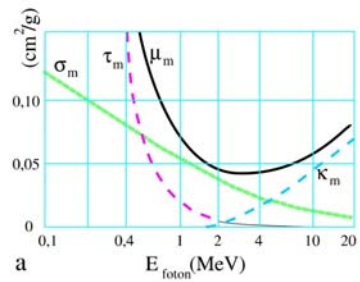
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{tömeggyengítési együttható}$$

tömeggyengítési  
együttható

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m + \kappa_m$$

$$\tau_m = c\lambda^3 Z^3$$



Köszönöm a figyelmet!