



## Magsugárzások

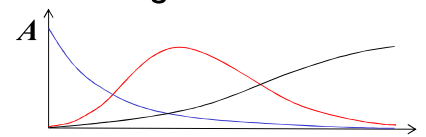
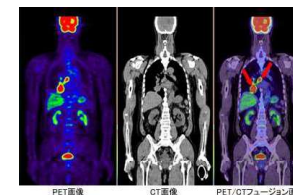
Dr Smeller László

Semmelweis Egyetem  
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet

## Miért érdekes?

Radioaktív izotópok ill. sugárzások


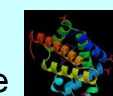


- orvosi felhasználása:
  - diagnosztika (izotópdiaosztika)
  - terápia (sugárterápia)
- gyógyszerészeti vonatkozása:
  - farmakokinetikai vizsgálatok



## Az atommag: radioaktivitás, magsugárzások

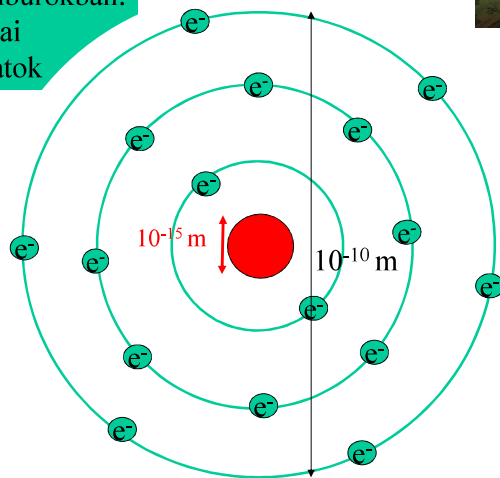
- Atommag, izotóp
- Bomlások, magátalakulások és sugárzások
- Aktivitás
- Bomlástörvény
- Részecskeenergia
- A radioaktív sugárzások gyengülése

## 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

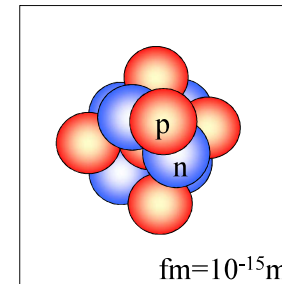
Változások az elektronburokban:  
=>kémiai folyamatok



Az atommag  
átalakulásai:  
=> radioaktivitás



## Az atommag felépítése



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

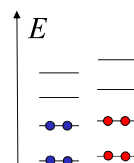
A (tömegszám) = protonszám + neutronszám  
Z (rendszám) = protonszám

99  
43 Tc

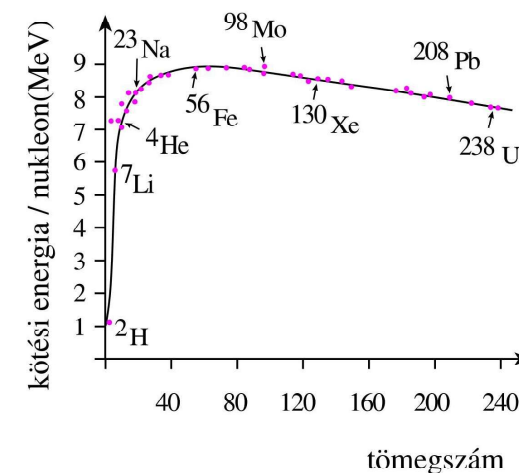
99 nukleon, ebből 43 proton és 56 neutron

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

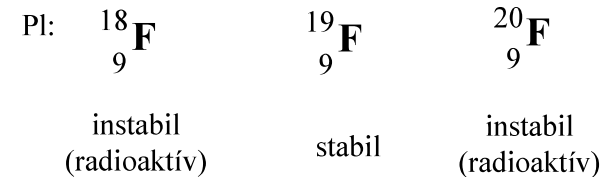
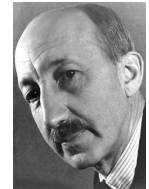
$^{208}_{82}\text{Pb}$  tényleges:  $207,9766 \text{ au.}$

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

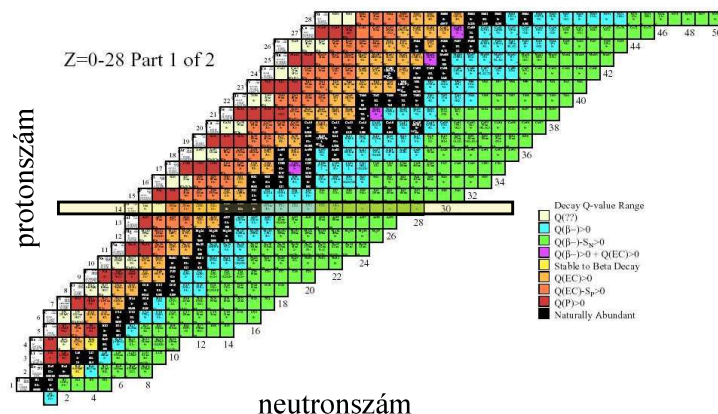
Azonos rendszámú de eltérő tömegszámú atommagok  
 $\Rightarrow$  azonos protonszám eltérő neutronszám  
 ugyanazon elem módosulatai,  
 $\Rightarrow$  kémiai tulajdonságuk ua.



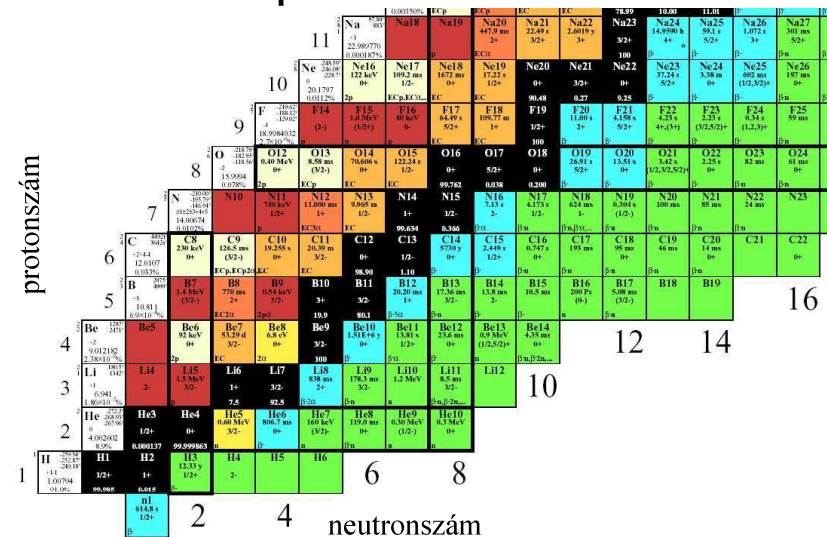
izotóp  $\leftrightarrow$  radioaktív izotóp

## Izotóptáblázat

Table of Isotopes (1998)



## Izotóptáblázat részlet

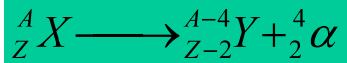


## Izotóptáblázat részlet

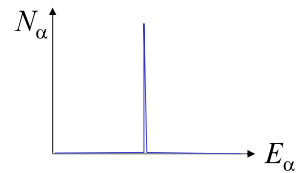
[illegible]

## $\alpha$ - bomlás

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



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



## Bomlások és részecskék

$\alpha$  - bomlás

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

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

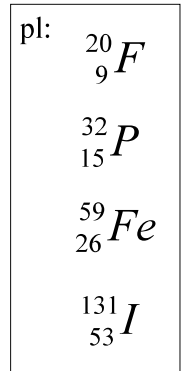
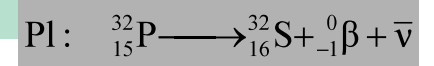
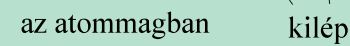
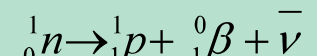
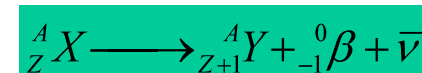
$\beta^-$  részecske = elektron  
 $\beta^+$  részecske = pozitron

## K-elektron befogás

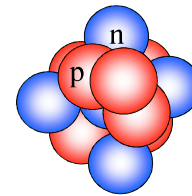
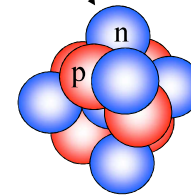
karakterisztikus  
Röntgen-foton

## Izomer magátalakulás

## $\gamma$ -sugárzás



neutrontúlsúly

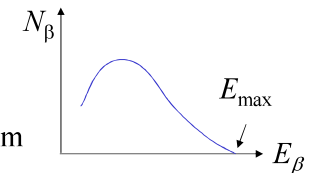


$\beta^-$ -sugárzás

folytonos  
energiaspektrum

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

energiespektrum 



protontúlsúly

## $\beta^+$ - bomlás

$${}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} \beta + \nu$$

$${}_1^1 p \longrightarrow {}_0^1 n + {}^0_{+1} \beta + \nu$$

az atommagban marad      kilép

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

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

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

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

Pl:  ${}^{30}_{15} \text{P} \longrightarrow {}^{30}_{14} \text{Si} + {}^0_{+1} \beta + \nu$

folytonos energiaspektrum  
mesterséges előállítás  
ciklotron (köv. héten)

## Kitérő...

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

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

$\beta^+$  bomlás ?

Megoldás: Einstein féle tömeg-energia ekvivalencia

$$E = mc^2$$

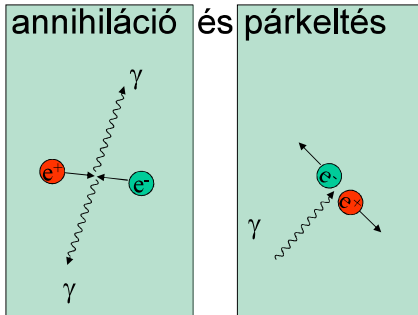
kötött nukleon:

alacsonyabb energiaszint: kisebb tömeg!



## Elektron és pozitron

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



Einstein:  
tömeg-energia  
ekvivalencia

$$E = mc^2$$

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

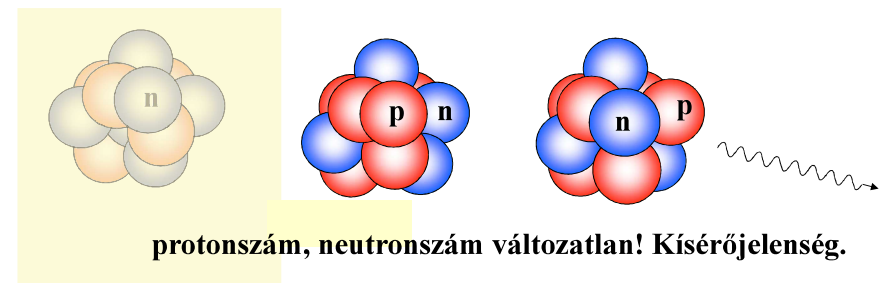
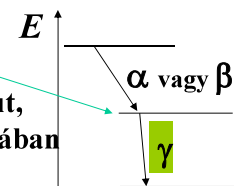
... kitérő vége

## Prompt $\gamma$ -sugárzás

A bomlás után a nukleonok elhelyezkedése

**energetikailag kedvezőtlen** lehet  
(gerjesztett állapotú atommag)

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

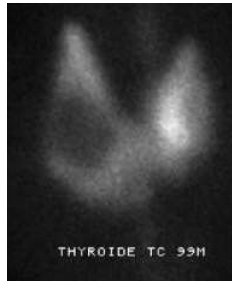


# Izomer magátalakulás

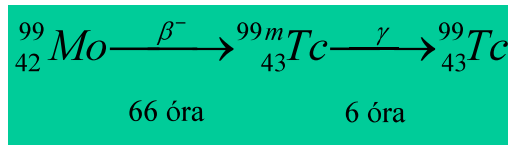
Ha a bomlás utáni mag elég hosszú ideig stabil,  
a  $\gamma$ -sugárzás később keletkezik.  
A két folyamat szeparálható.

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

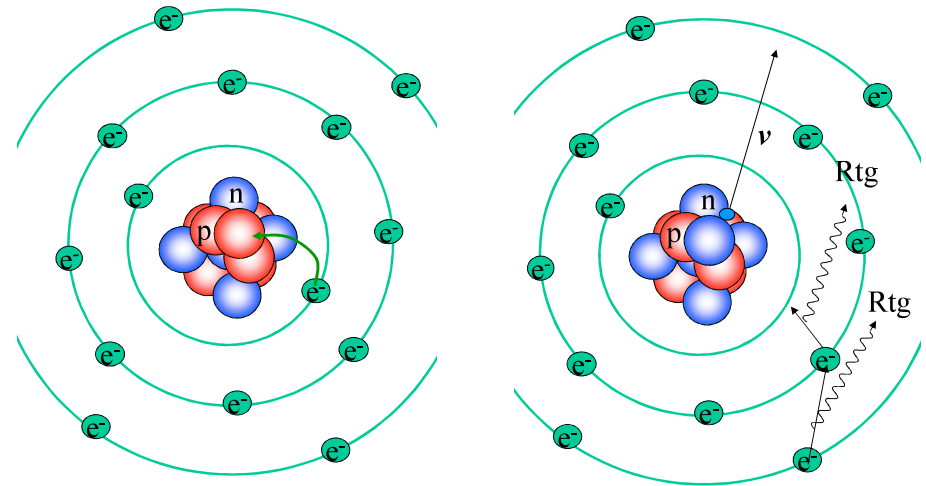
**=> Izotópdiagnosztika**



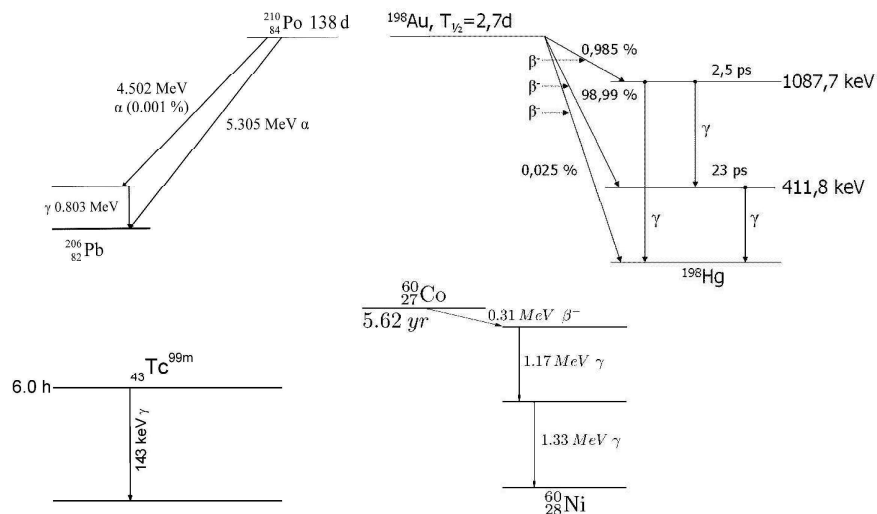
Pl:  $^{99m}\text{Tc}$



## K-befogás



## Példák bomlási sémákra



## Magátalakulások: bomlás, hasadás, fúzió

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

Pl:  $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow 2 \text{ db közepes mag} + 2-3 \text{ neutron}$

- Fúzió könnyű magok egyesülése



## Hogyan jöttek létre az izotópok?

Primordiális izotópok:

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

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

Posztpromordiális izotópok:

Kozmogenikus izotópok:

A kozmikus sugárzás hatására keletk. pl:  $^3\text{H}$   $^{14}\text{C}$

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

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

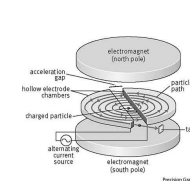
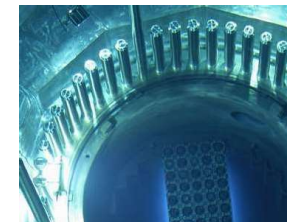
## Hogyan állíthatunk elő izotópokat?

Mesterséges izotópok:

$\beta^-$  bomlók: atomreaktorban.  
(neutronbombázással)

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

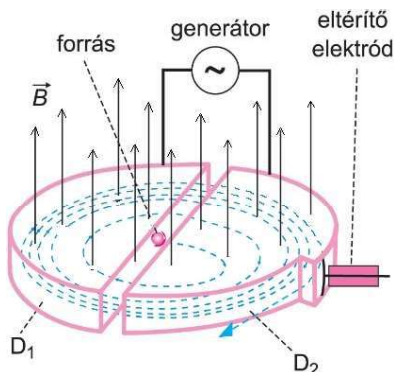
tisztán  $\gamma$  sugárzók: izotópgenerátor



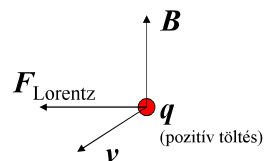
## Ciklotron

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, PBq

mérhetetlenül  
alacsony

természetes  
radioaktivitás  
szintje

in vivo  
diagn.

óvatosan  
dolgozzunk  
vele!

terápiában  
alkalmazott  
aktivitások

## Példa

- Példa:  $N_0=10000$   $\lambda=0,1$  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)
- ....

# 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:

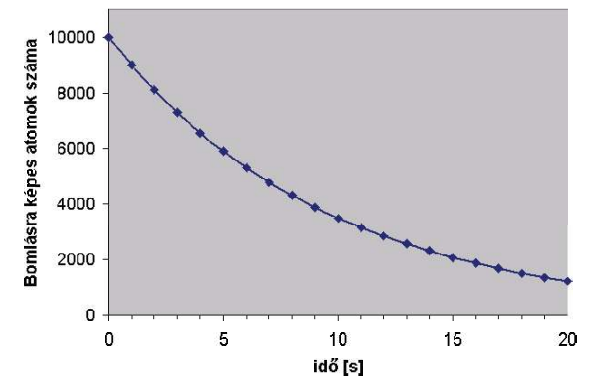
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

exponenciális lecsengés!

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

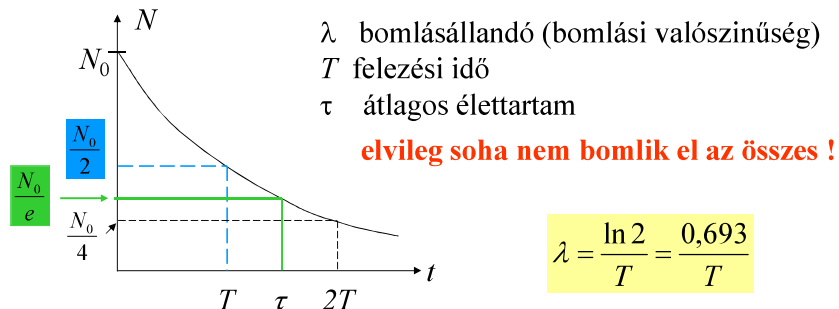
## Példa

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



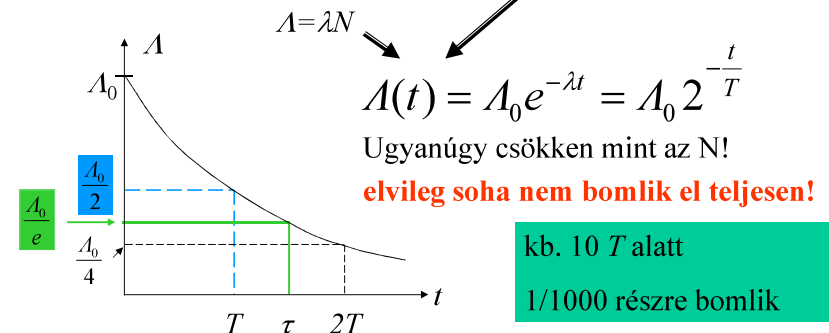
## Felezési idő, bomlástörvény

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



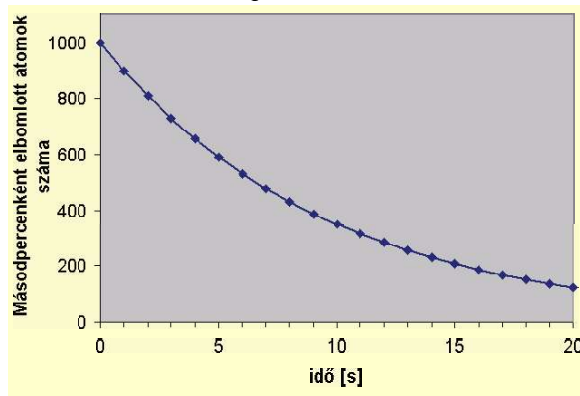
## Az aktivitás időbeli csökkenése

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



## 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

**Ezeket az adatokat  
tilos megtanulni!**

$^{60}\text{Co}$	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

# Részecskeenergia

Általában elektronvoltban (eV) mérik.

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

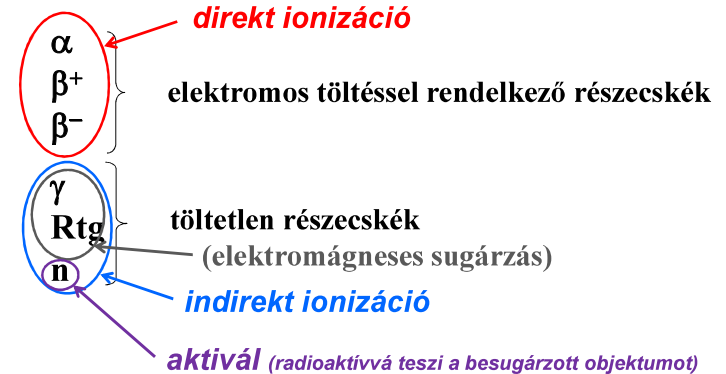
tipikus részecskeenergiák (a magátalakuláskor felszabaduló energia) **MeV** nagyságrendben vannak.

Általában:

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

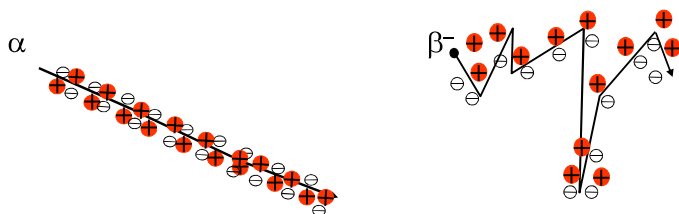
# Sugárzások és anyag kölcsönhatása.

A sugárzások elnyelődése



# Töltött részecskék elnyelődése

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



# Hatótávolság

$\alpha$ -részecske

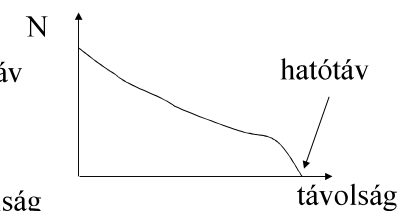
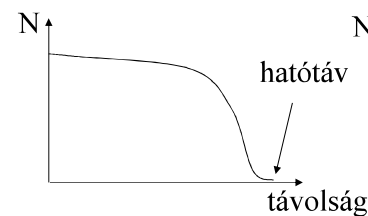
$\beta^-$ -részecske

levegőben **néhány cm**

levegőben **m** nagyságrendű

szövetben **0,01-0,1 mm**

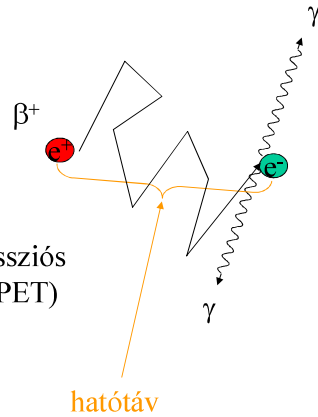
szövetben **cm**



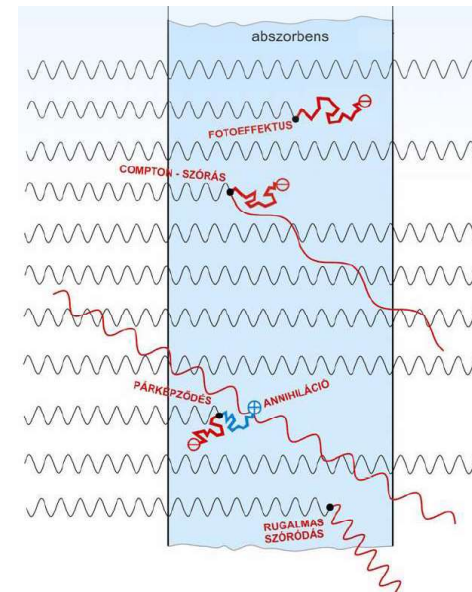
## $\beta^+$ -sugárzás

annihiláció

Ld: Pozitron Emissziós  
Tomográfia (PET)



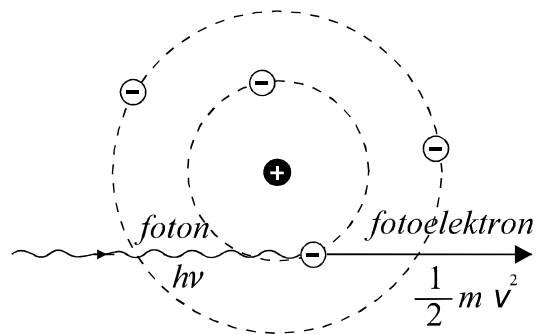
## A $\gamma$ - (és Rtg) sugárzás elnyelődése



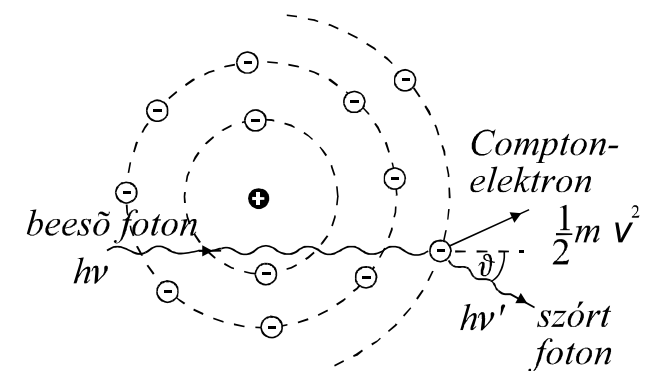
Véletlenszerűen fellépő  
effektusok által megy végbe:

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

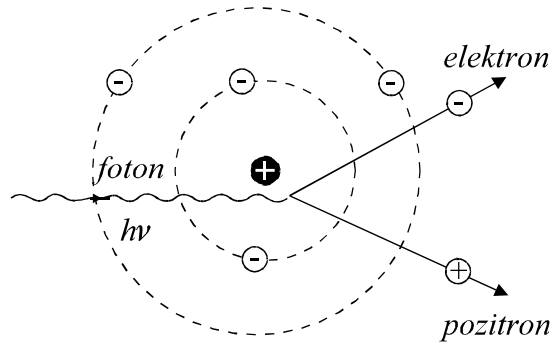
## Fotoeffektus



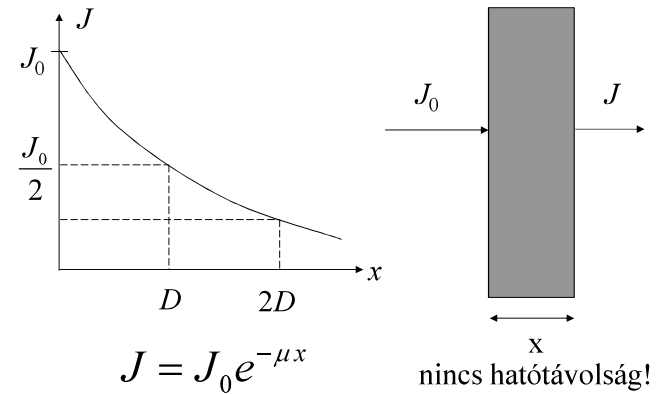
## Compton effektus



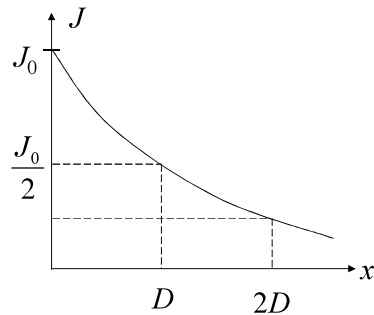
## Pároképződés



## $\gamma$ - és röntgensugárzás gyengülése



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



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

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

$\delta = \frac{1}{\mu}$  „behatolási 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

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

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

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

