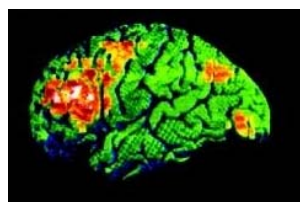
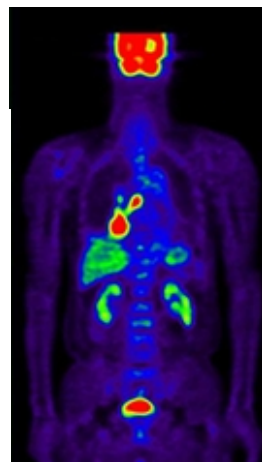
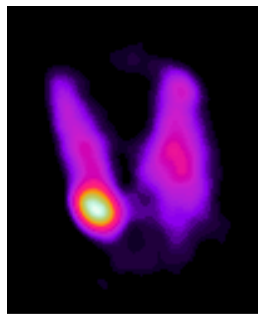
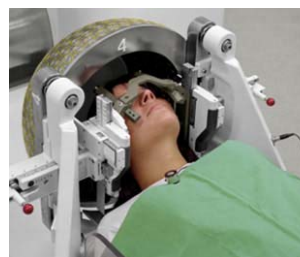


# Az atommag: radioaktivitás, magsugárzások. Az izotópos nyomjelzéses technikák fizikai



alapjai

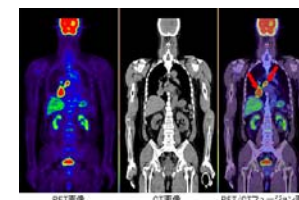
Smeller László





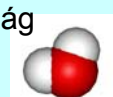


## Miért érdekes?

Radioaktív izotópok ill. sugárzások

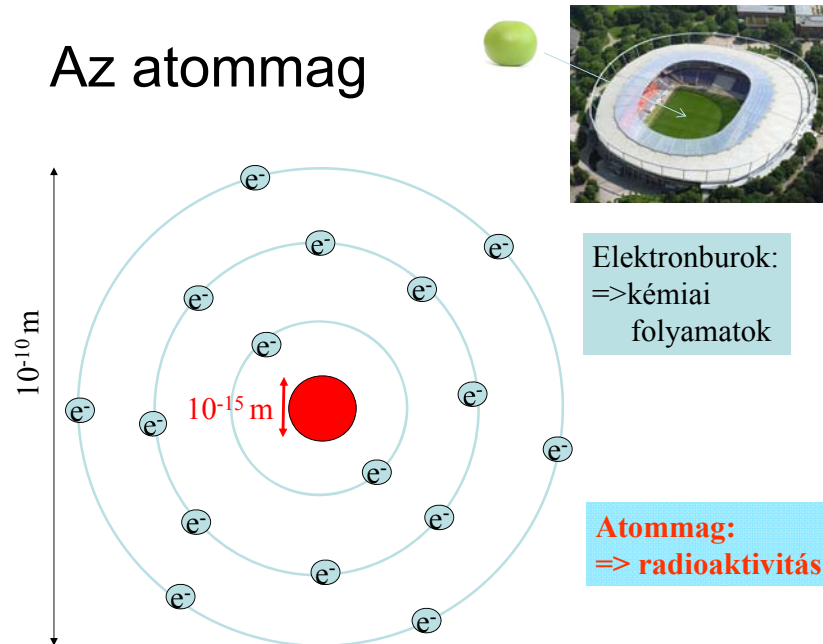
- orvosi felhasználása:
  - diagnosztika (izotópdiagnosztika)
  - terápia (sugárterápia)
  - farmakokinetikai vizsgálatok



## 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 

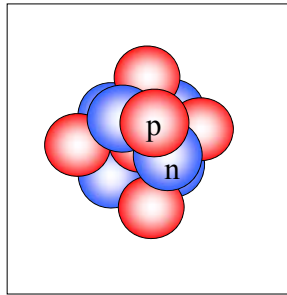
## Az atommag



Elektronburok:  
=>kémiai  
folyamatok

**Atommag:**  
=> radioaktivitás

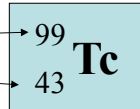
# Az atommag felépítése



	töltés	tömeg
<b>proton</b>	<b>+1 elemi töltés</b>	<b>1 atomi tömegegys.</b>
<b>neutron</b>	<b>0</b>	<b>1 atomi tömegegys.</b>

A (tömegszám) = protonszám + neutronszám

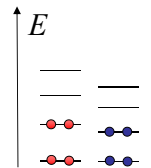
Z (rendszám) = protonszám



99 nukleon, ebből 43 proton és 56 neutron

# Az atommag stabilitása

- Coulomb erő destabilizál!  
(protonok között: taszító hatás)
- Magerő: rövid hatótáv (~fm)  
nagyon erős  
vonzó (töltésfüggetlen)
- A nukleonok diszkrét energiaszinteken helyezkednek el.
- A mag energiája is diszkrét (kvantált)
- Energiaszintek tipikus távolsága MeV
- $eV = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



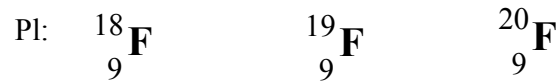
# Izotóp

Azonos rendszámú de eltérő tömegszámú atomok

⇒ azonos protonszám eltérő neutronszám

Ugyanannak az elemnek a módosulatai,

⇒ kémiai tulajdonságaik azonosak.



instabil  
(radioaktív)

stabil

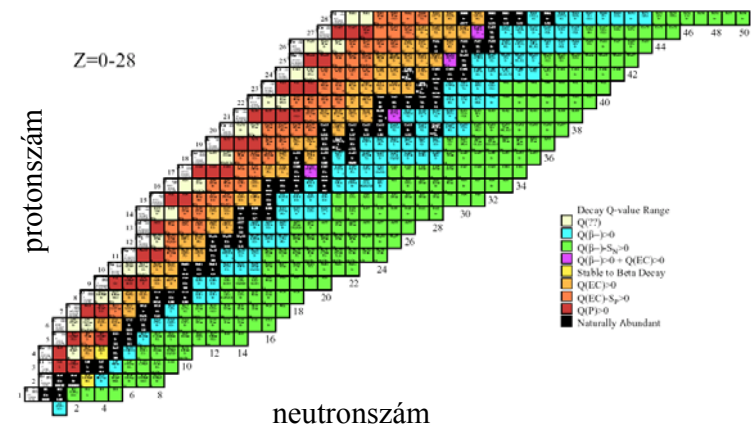
instabil  
(radioaktív)

izotóp <-> radioaktív izotóp

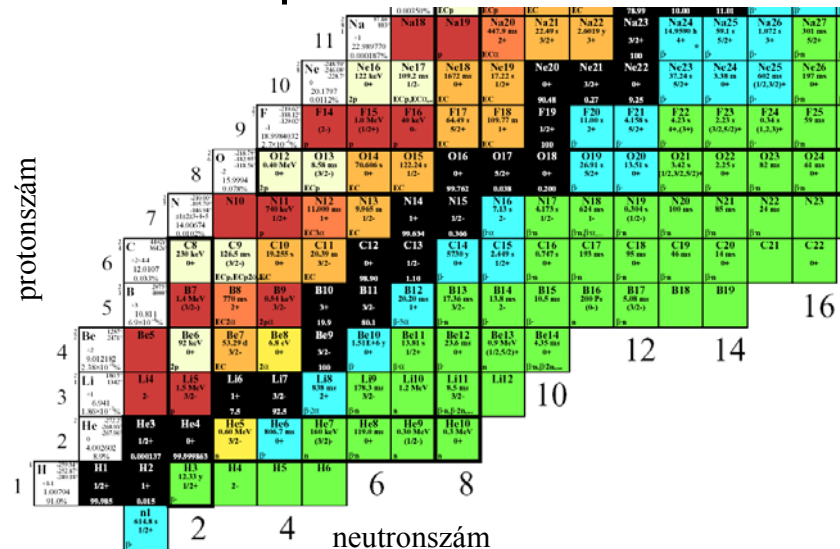


# Izotóptáblázat

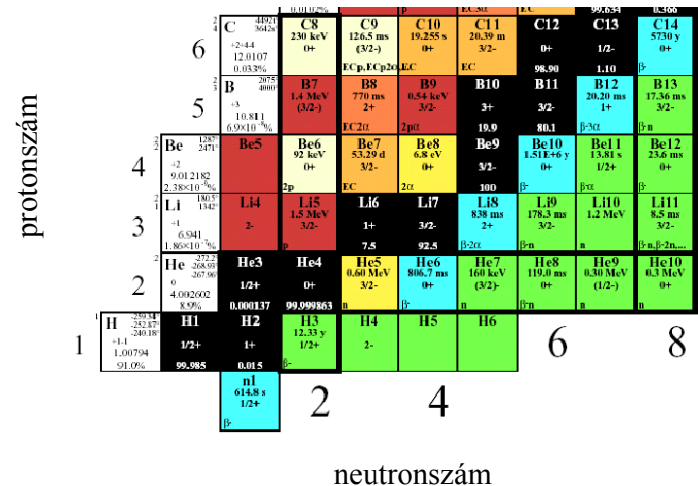
Table of Isotopes (1998)



## Izotóptáblázat részlet



## Izotóptáblázat részlet



## Bomlások és részecskék

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

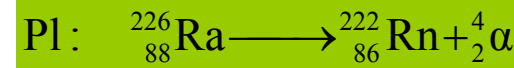
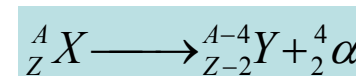
$\beta$  - bomlás:  $\beta^-$   $\beta^-$  részecske = elektron  
 $\beta^+$   $\beta^+$  részecske = pozitron

K-elektron befogás karakterisztikus Röntgen-foton

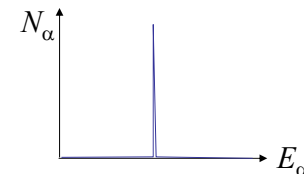
Izomer magátalakulás  $\gamma$ -sugárzás

## $\alpha$ - bomlás

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

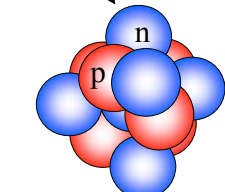


Vonalas energiaspektrum  
 $E_\alpha \sim \text{MeV}$



neutrontúlsúly

## $\beta^-$ - bomlás



$${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0\beta + \bar{\nu}$$

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

az atommagban marad      kilép

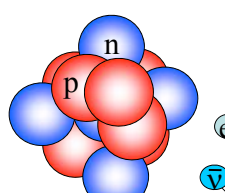
pl:  ${}_{9}^{20}\text{F}$

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

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

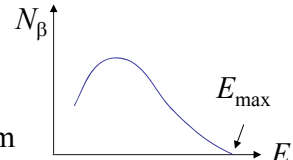
${}_{53}^{131}\text{I}$

Pl:  ${}_{15}^{32}\text{P} \longrightarrow {}_{16}^{32}\text{S} + {}_{-1}^0\beta + \bar{\nu}$



β<sup>-</sup>-sugárzás

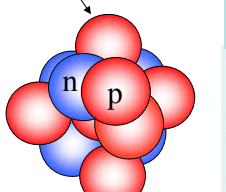
folytonos energiaspektrum



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

protontúlsúly

## $\beta^+$ - bomlás



$${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_{+1}^0\beta + \nu$$

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

az atommagban marad      kilép

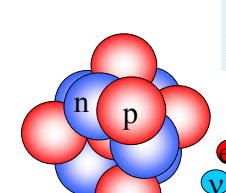
pl:  ${}_{6}^{11}\text{C}$

${}_{8}^{15}\text{O}$

${}_{9}^{18}\text{F}$

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

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



β<sup>+</sup>-sugárzás

folytonos energiaspektrum mesterséges előállítás

## Hogy is van ez?

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

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

$$\left. \begin{array}{l} m_p = 1,672623 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ m_n = 1,674928 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \end{array} \right\} \text{Nyugalmi tömegek!}$$

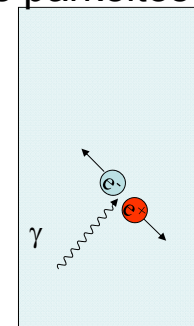
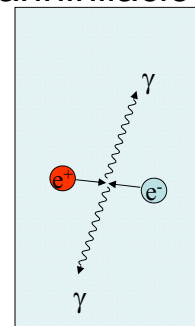
Megoldás: Einstein féle tömeg-energia ekvivalencia

$$E = mc^2$$

kötött nukleon: alacsonyabb energiaszint: kisebb tömeg!

## Kis kitérő: elektron - pozitron

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



Einstein:  
tömeg-energia  
ekvivalencia

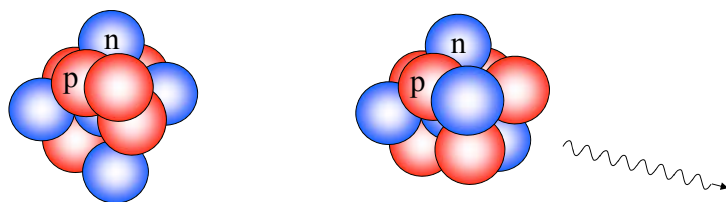
$$E = mc^2$$

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

## Prompt $\gamma$ -sugárzás

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

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



protonszám, neutronszám változatlan! Kísérőjelenség.

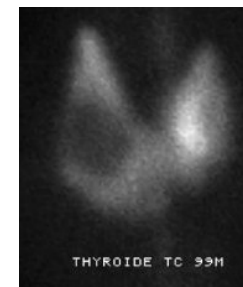
## Izomer magátalakulás

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

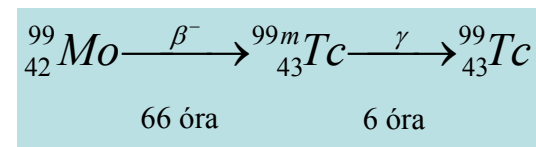
A két folyamat szeparálható.

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

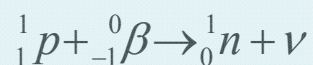
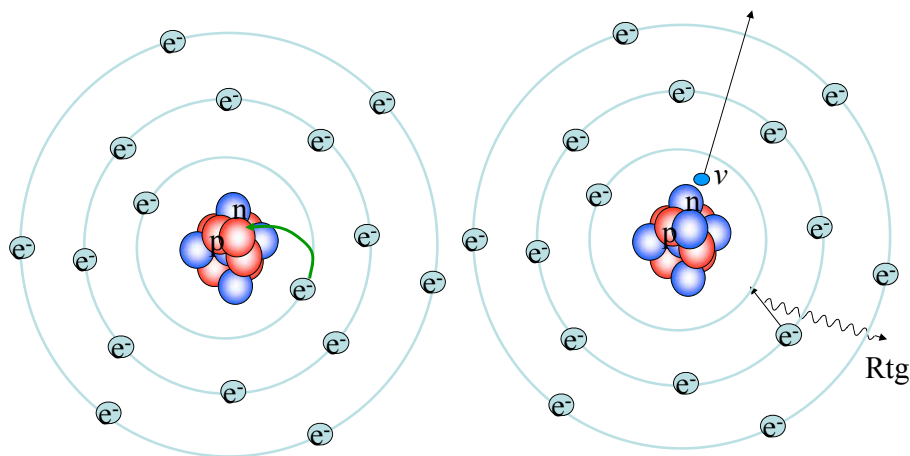
**=> Izotópdiaгностика**



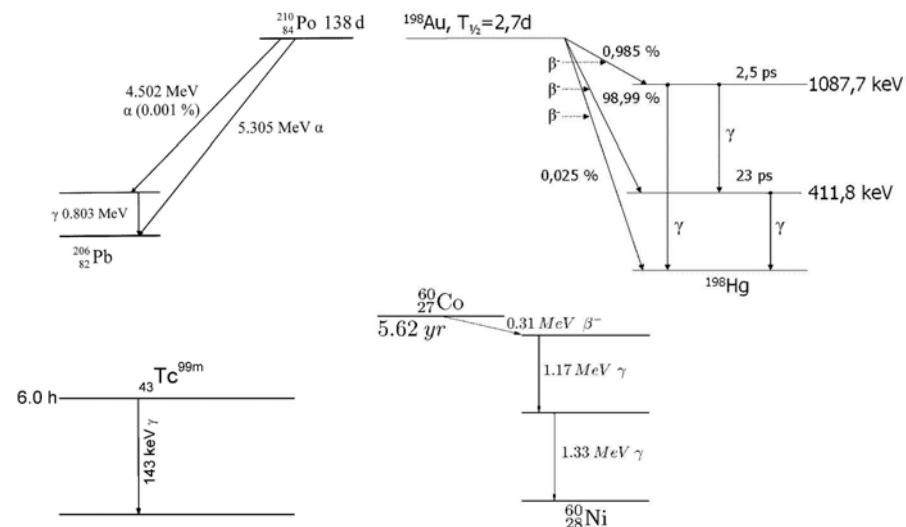
Pl:  $^{99m}\text{Tc}$



## K-befogás (inverz $\beta$ -bomlás)



## Példák bomlási sémákra





## Bomlás, hasadás, fúzió

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



## Hogyan jöttek létre az izotópok?

Primordiális izotópok:

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

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

Posztprimordiális 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)  ${}^{21}\text{Ne}$

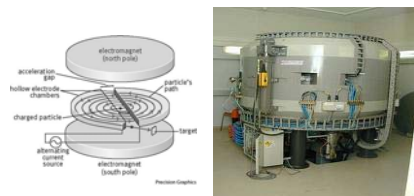
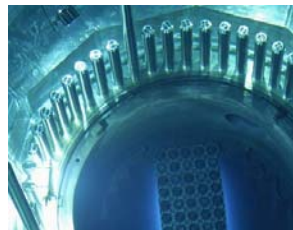
## Hogyan állíthatunk elő izotópokat?

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



## A radioaktív izotópokat jellemző mennyiségek

Aktivitás (a sugárforrást jellemzi)

Felezési idő (a bomlás sebességét jellemzi)

Részecskeenergia (a sugárzást jellemzi)

# 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

Aktivitás= az egységnyi idő alatt elbomlott atomok száma

mértékegysége: becquerel Bq  
1 Bq= 1 bomlás/sec

Régi mértékegys: curie Ci  
1 Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq = 37 GBq

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:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{exponenciális lecsengés!}$$

$N_0$  az elbomlatlan atomok száma kezdetben ( $t=0$ )

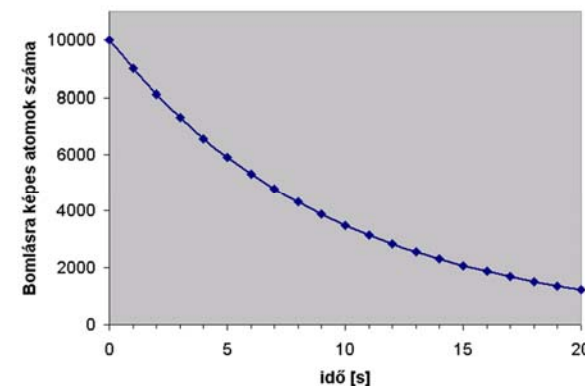
## Példa

- 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)
- ....



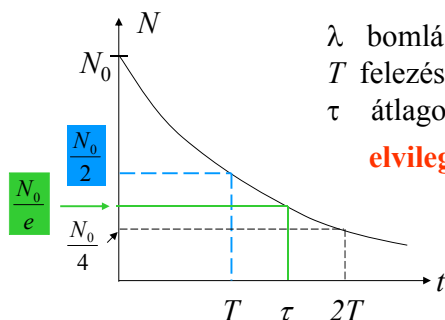
## Példa

- 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

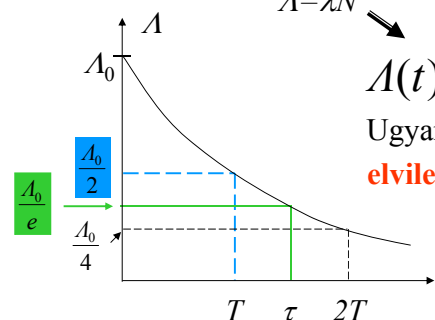
$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| \quad \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A = \lambda N$$

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

Ugyanúgy csökken mint az N!

**elvileg soha nem bomlik el teljesen!**

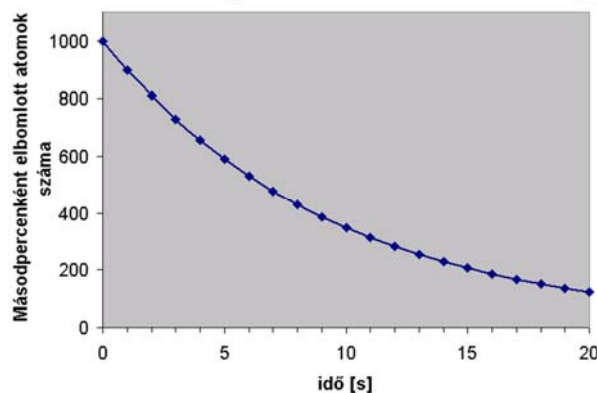


kb. 10  $T$  alatt

1/1000 részre bomlik

## Példa

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



1000 elbomlott)

900 elbomlott)

810 elbomlott)

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

A radioaktív sugárzás tipikus részecskeenergiája  
(a magátalakuláskor felszabaduló energia)

a **MeV** nagyságrendben van.

$$eV = \text{elemi töltés} \times 1 \text{ Volt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 0,16 \text{ aJ}$$

# Tipikus energia-nagyságrendek a mikrovilágban

Külső elektronok  
gerjesztése,  
kilökése

eV (aJ)

fény



belső elektronpályák  
közti átmenet

keV (fJ)

röntgensugár



atommag-  
átalakulás

MeV (pJ)

radioaktív  
sugárzás  
pl.  $\gamma$



# Sugárzások és anyag kölcsönhatása.

A sugárzások elnyelődése

$\alpha$   
 $\beta^+$   
 $\beta^-$   
 $\gamma$   
Rtg

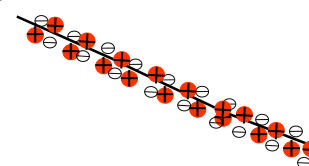
elektromos töltéssel rendelkező részecskék

töltetlen részecskék (elektromágneses sugárzás)

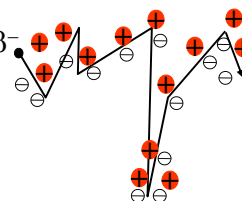
# Töltött részecskék elnyelődése

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

$\alpha$



$\beta^-$



## Hatótávolság

$\alpha$ -részecske

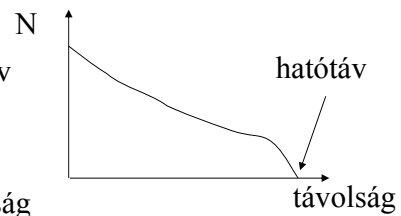
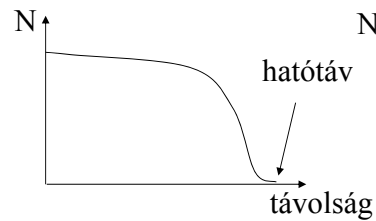
levegőben **néhány cm**

szövetben **0,01-0,1 mm**

$\beta^-$ -részecske

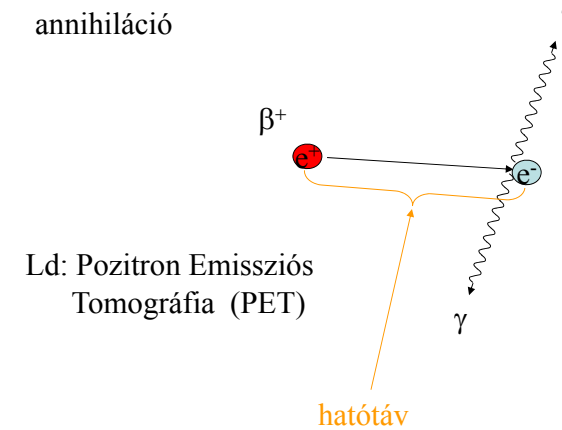
levegőben **m** nagyságrendű

szövetben **cm**

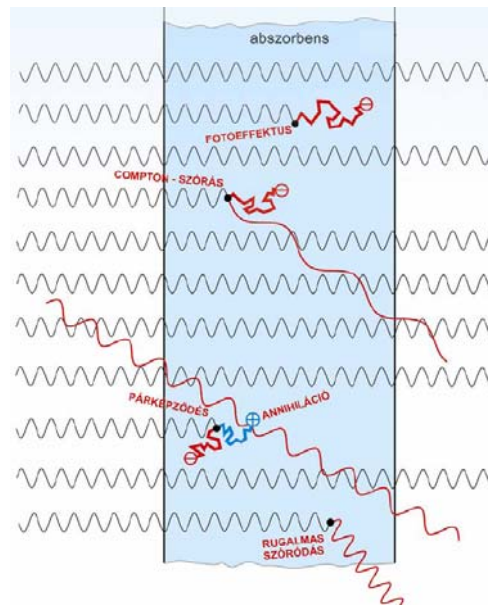


## $\beta^+$ -sugárzás

annihiláció



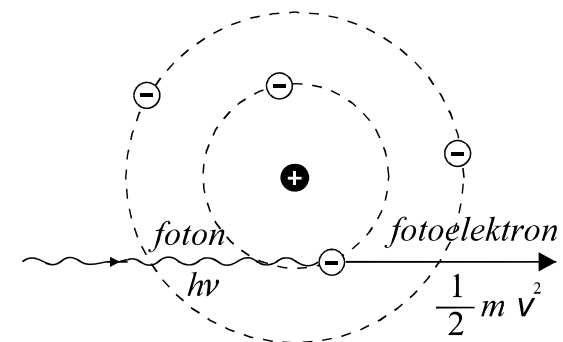
## A $\gamma$ - (és Rtg) sugárzás elnyelődése



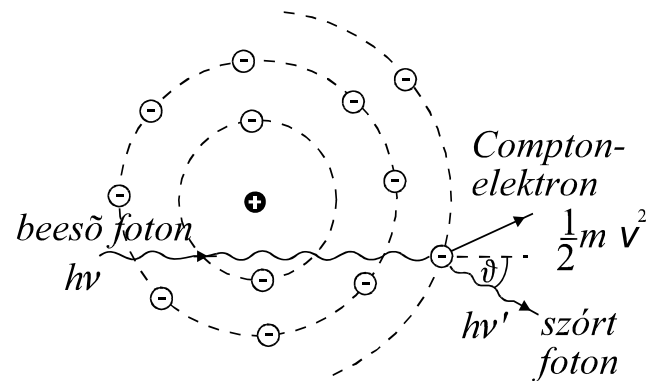
Véletlenszerűen fellépő  
effektusok által megy végbe:

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

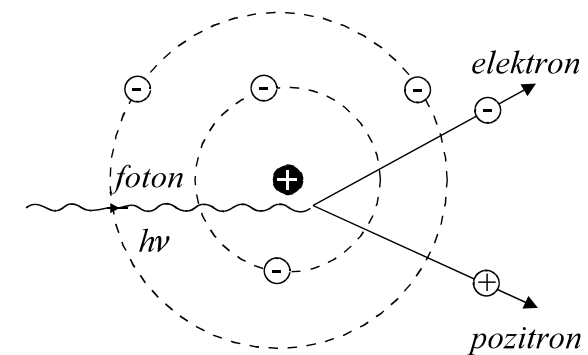
## Fotoeffektus



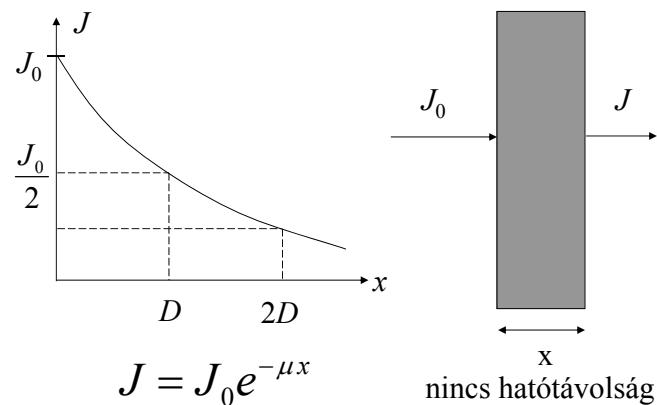
## Compton effektus



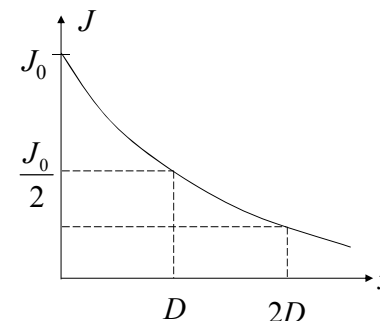
## Pároképződés



## $\gamma$ - 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:  $1/m$ ,  $1/cm$

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

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

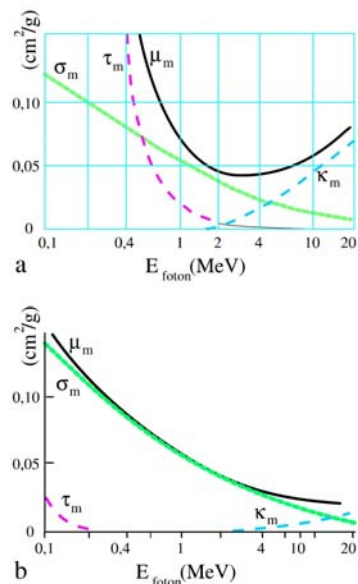
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{tömeggyengítési együttható}$$

Tömeggyengítési  
együttható:

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

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

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

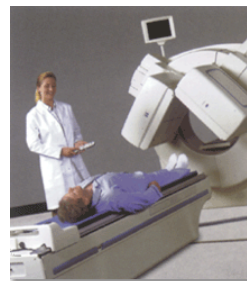


## Alkalmazások

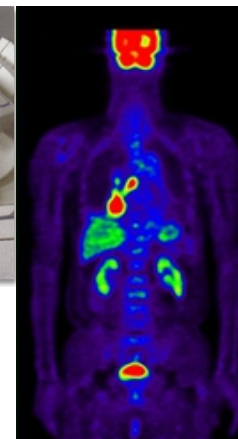
(sugárzások és sugárforrások)

### Izotópdiagnosztika

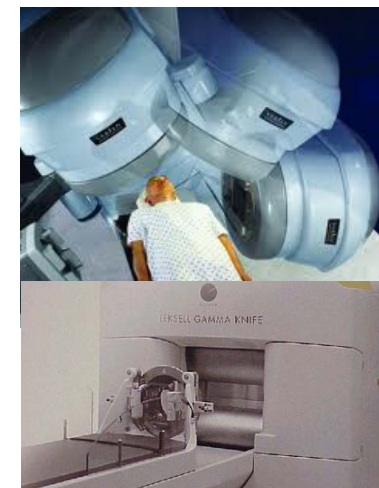
részletesen 2 hét múlva



tűzjelző



### Sugárterápia



## Alkalmazások (sugárzások gyengülése)



Rtg sugárzás elnyelődése

izotóptárolás (ólomvédelem)



izotópos fecskendő sugárvédő tokban



## Alkalmazások (sugárzások gyengülése)

ólomüveg



ólomköpeny



pajzsmirigyvédő ólomgallér

