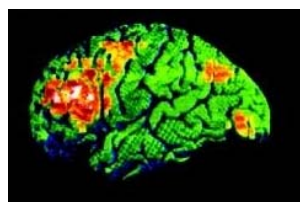
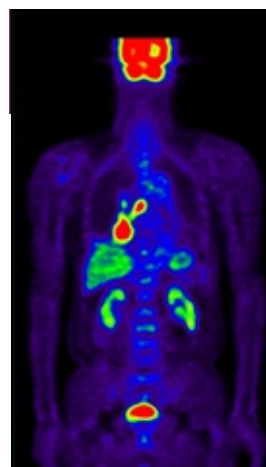
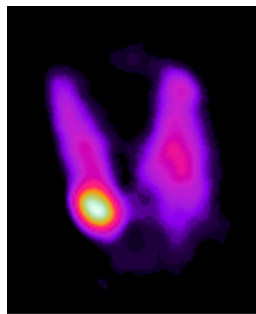


Az atommag: radioaktivitás, magsugárzások. Az izotópos nyomjelzéses technikák fizikai



alapjai

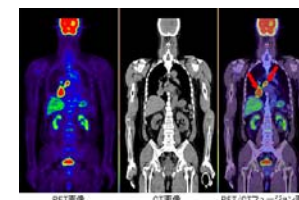
Smeller László




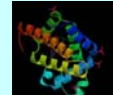


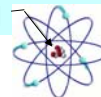
Miért érdekes?

Radioaktív izotópok ill. sugárzások

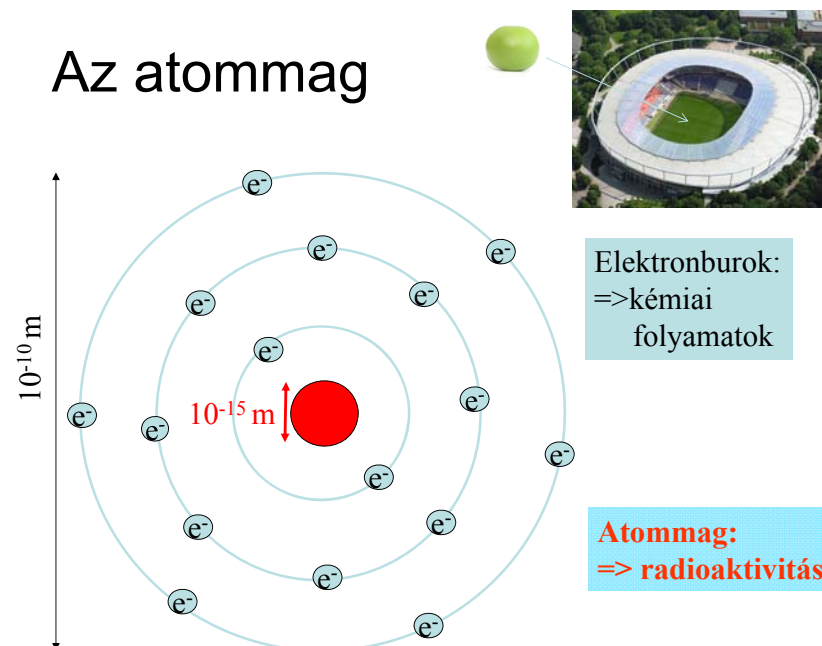
- orvosi felhasználása:
 - diagnosztika (izotópdiagnosztika)
 - terápia (sugárterápia)
 - farmakokinetikai vizsgálatok



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 

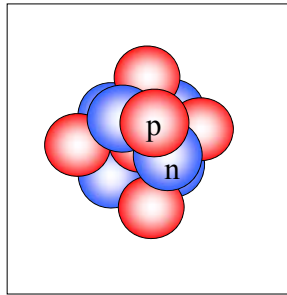
Az atommag



Elektronburok:
=>kémiai
folyamatok

Atommag:
=> radioaktivitás

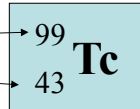
Az atommag felépítése



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

A (tömegszám) = protonszám + neutronszám

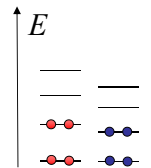
Z (rendszám) = protonszám



99 nukleon, ebből 43 proton és 56 neutron

Az atommag stabilitása

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



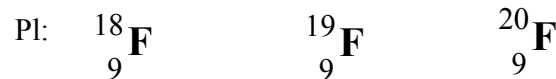
Izotóp

Azonos rendszámú de eltérő tömegszámú atomok

⇒ azonos protonszám eltérő neutronszám

Ugyanannak az elemnek a módosulatai,

⇒ kémiai tulajdonságaik azonosak.



instabil
(radioaktív)

stabil

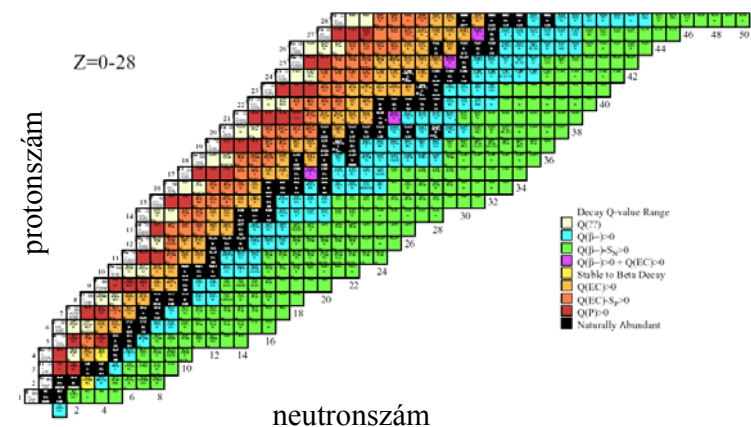
instabil
(radioaktív)

izotóp <-> radioaktív izotóp

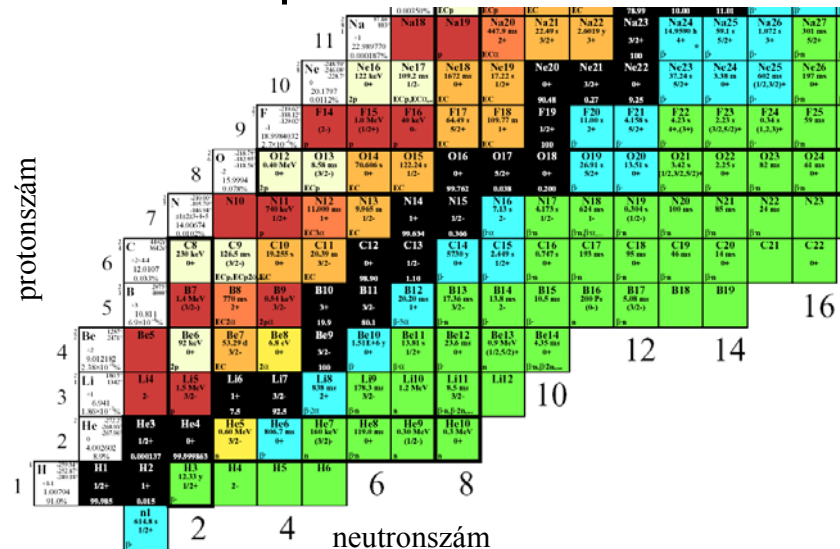


Izotóptáblázat

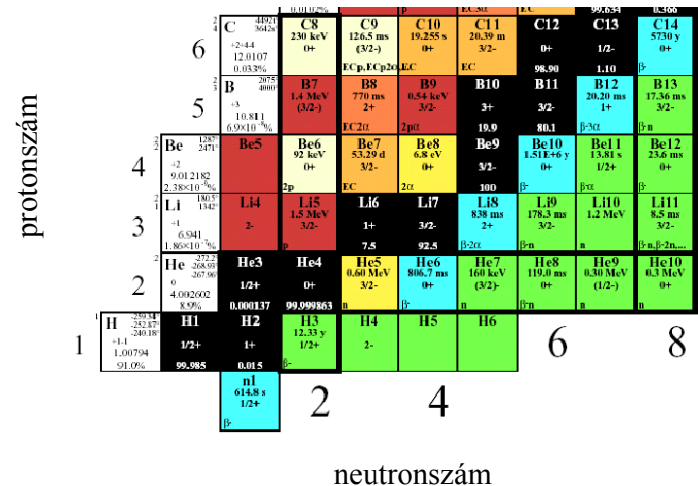
Table of Isotopes (1998)



Izotóptáblázat részlet



Izotóptáblázat részlet



Bomlások és részecskék

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

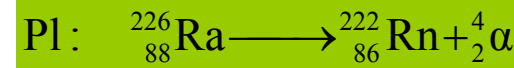
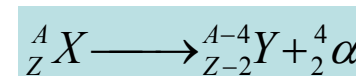
β - bomlás: β^- β^- részecske = elektron
 β^+ β^+ részecske = pozitron

K-elektron befogás karakterisztikus Röntgen-foton

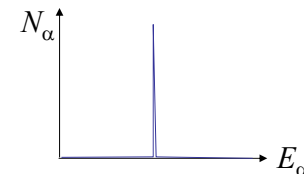
Izomer magátalakulás γ -sugárzás

α - bomlás

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

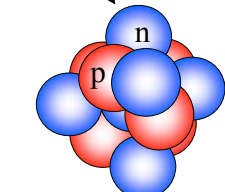


Vonalas energiaspektrum
 $E_\alpha \sim \text{MeV}$



neutrontúlsúly

β^- - bomlás



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

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

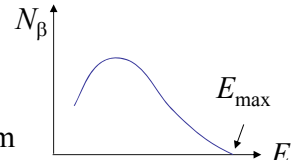
az atommagban marad kilép

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^- -sugárzás

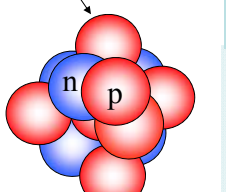
folytonos energiaspektrum



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

protontúlsúly

β^+ - 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^+ -sugárzás

folytonos energiaspektrum mesterséges előállítás

Hogy is van ez?

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

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

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

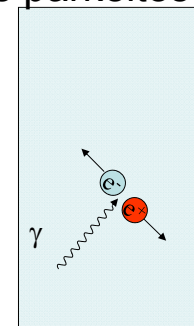
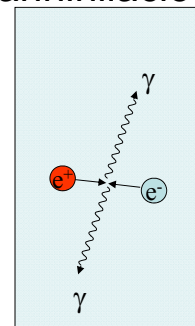
Megoldás: Einstein féle tömeg-energia ekvivalencia

$$E = mc^2$$

kötött nukleon: alacsonyabb energiaszint: kisebb tömeg!

Kis kitérő: elektron - pozitron

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



Einstein:
tömeg-energia
ekvivalencia

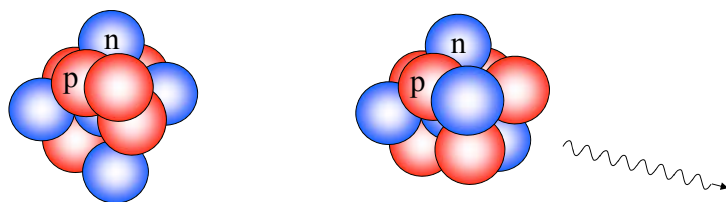
$$E = mc^2$$

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

Prompt γ -sugárzás

A bomlás után a nukleonok elhelyezkedése
energetikailag kedvezőtlen lehet

Átrendeződés: alacsonyabb energiaszintre jut,
a fölös energiát kisugározza γ foton formájában



protonszám, neutronszám változatlan! Kísérőjelenség.

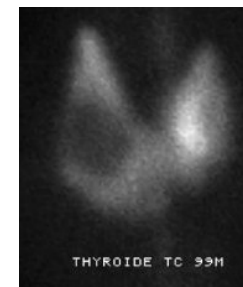
Izomer magátalakulás

Ha a bomlás utáni mag elég hosszú ideig stabil,
a γ -sugárzás később keletkezik.

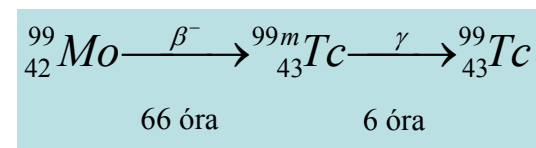
A két folyamat szeparálható.

Tisztán γ -sugárzó izotóp állítható elő!

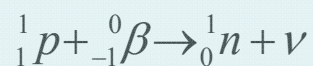
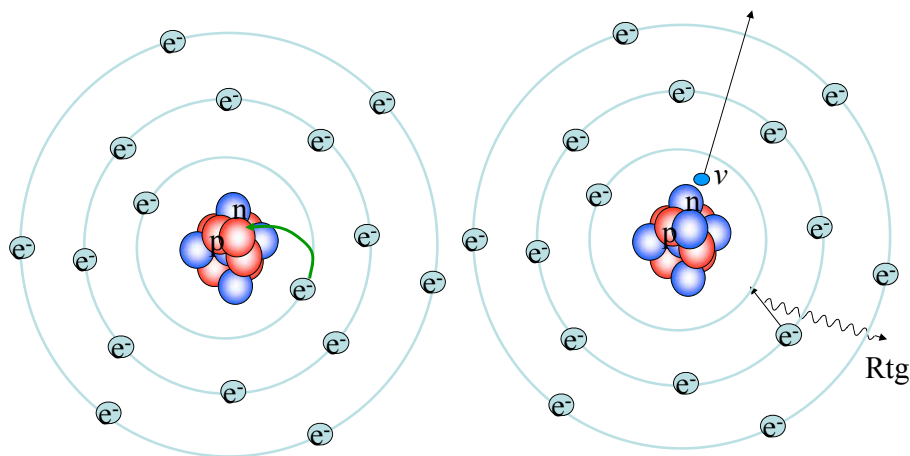
=> Izotópdiaгностика



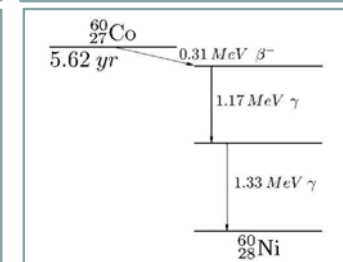
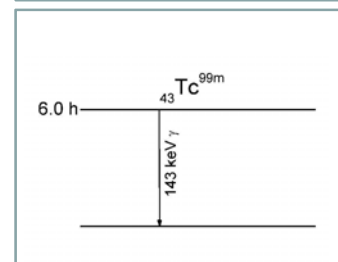
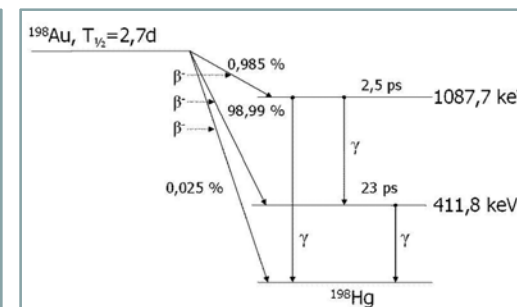
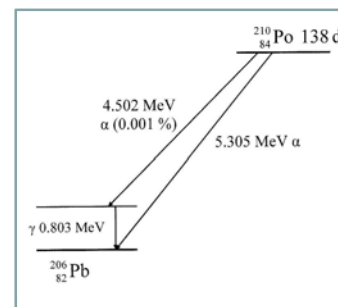
Pl: ^{99m}Tc



K-befogás (inverz β -bomlás)



Példák bomlási sémákra



Bomlás, hasadás, fúzió

- Bomlás: kis részecske távozik (α , β , γ ...)
- 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) ${}^{21}\text{Ne}$

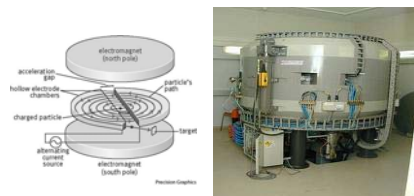
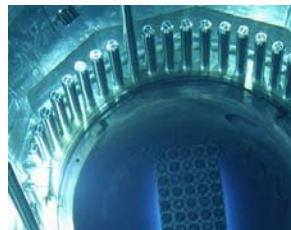
Hogyan állíthatunk elő izotópokat?

Mesterséges izotópok:

β^- bomlók: atomreaktorban.
(neutronbombázással)

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

tisztán γ sugárzók: izotópgenerátor



A radioaktív izotópokat jellemző mennyiségek

Aktivitás (a sugárforrást jellemzi)

Felezési idő (a bomlás sebességét jellemzi)

Részecskeenergia (a sugárzást jellemzi)

Aktivitás (Λ)

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

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

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

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

differentiálegyenlet

megoldása:

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

exponenciális lecsengés!

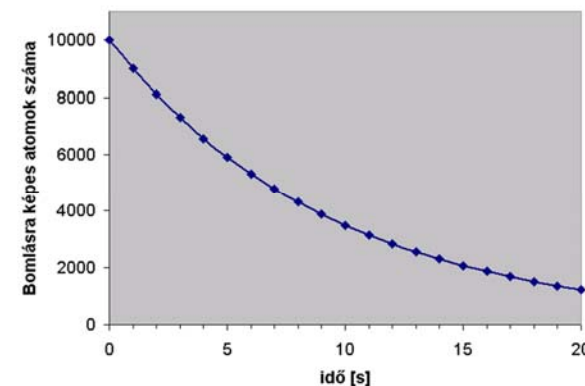
N_0 az elbomlatlan atomok száma kezdetben ($t=0$)

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)
-

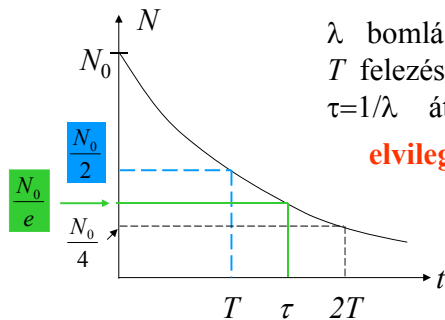
Példa

- 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

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



λ bomlásállandó (bomlási valószínűség)
 T felezési idő
 $\tau = 1/\lambda$ átlagos élettartam

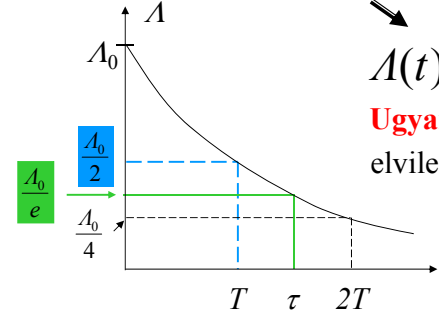
elvileg soha nem bomlik el az összes !

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

Az aktivitás időbeli csökkenése

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

$A = \lambda N$



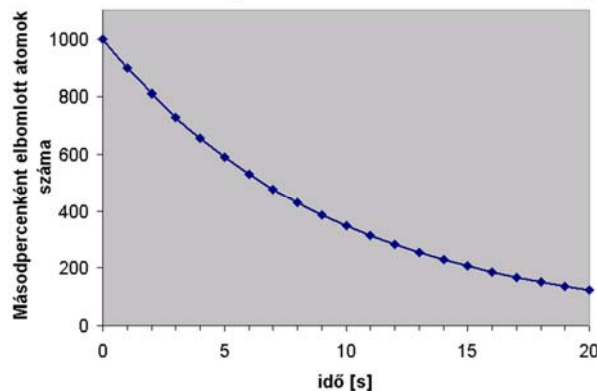
$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

Ugyanúgy csökken mint az N!
 elvileg soha nem bomlik el teljesen!

kb. 10 T alatt
 1/1000 részre bomlik

Példa

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



1000 elbomlott)
 900 elbomlott)
 810 elbomlott)
 729 elbomlott)

A felezési idő az izotóp típusától függ

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

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

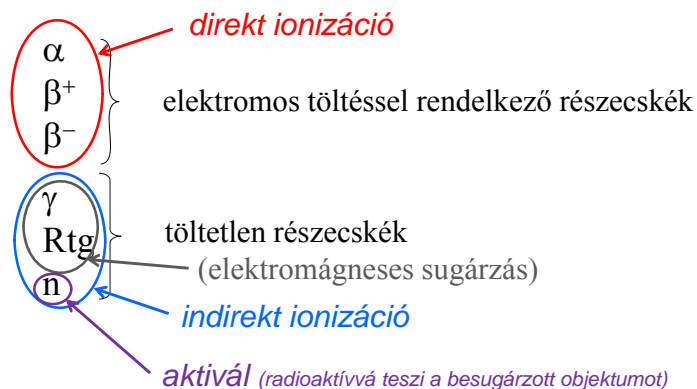
MeV (pJ)

radioaktív
sugárzás
pl. γ



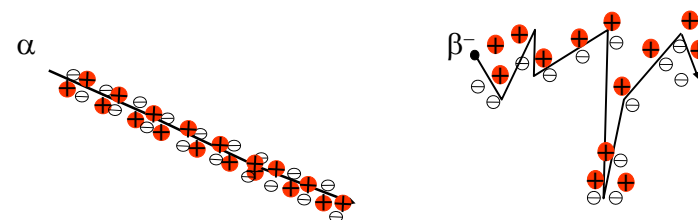
Sugárzások és anyag köölcsönhatása.

A sugárzások elnyelődése



Töltött részecskék elnyelődése

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



Hatótávolság

α -részecske

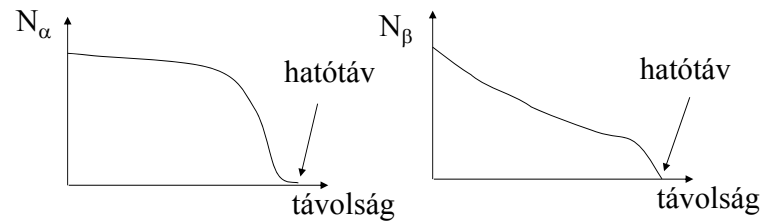
levegőben **néhány cm**

szövetben **0,01-0,1 mm**

β^- -részecske

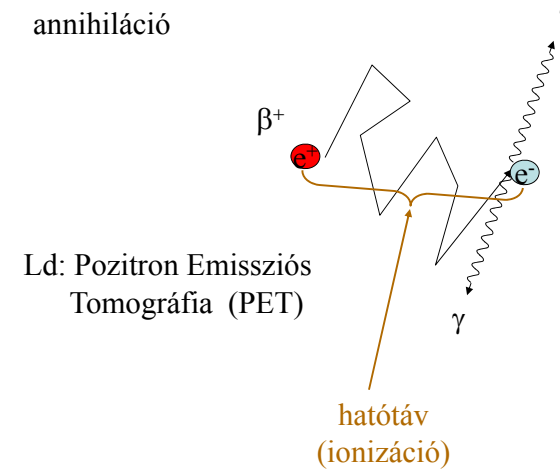
levegőben **m** nagyságrendű

szövetben **cm**



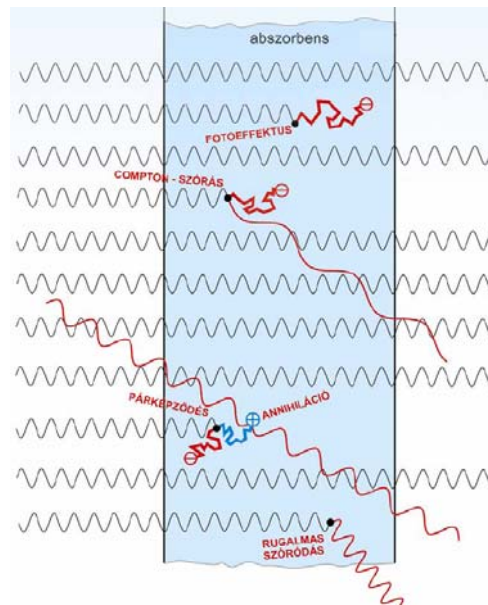
β^+ -sugárzás

annihiláció



Ld: Pozitron Emissziós Tomográfia (PET)

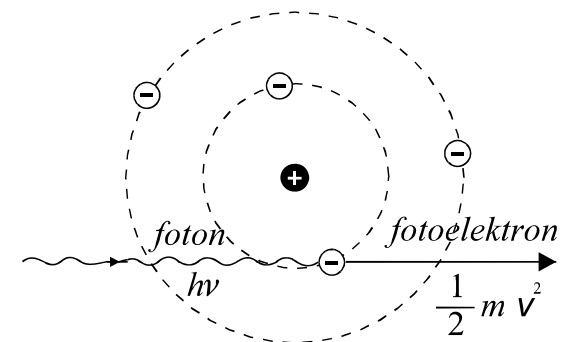
A γ - (és Rtg) sugárzás elnyelődése



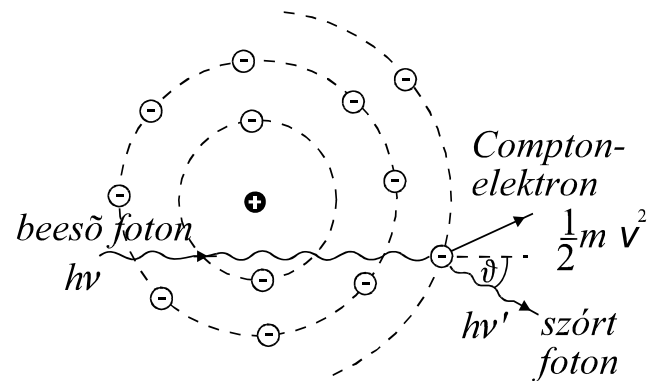
Véletlenszerűen fellépő effektusok által megy végbe:

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

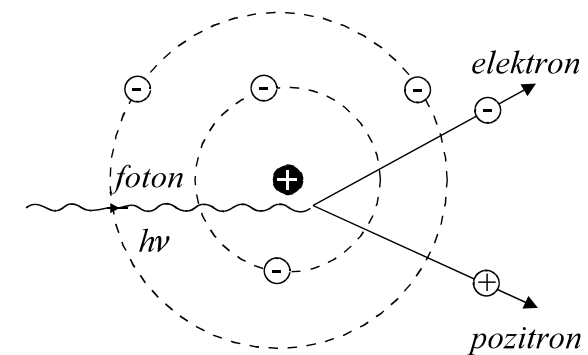
Fotoeffektus



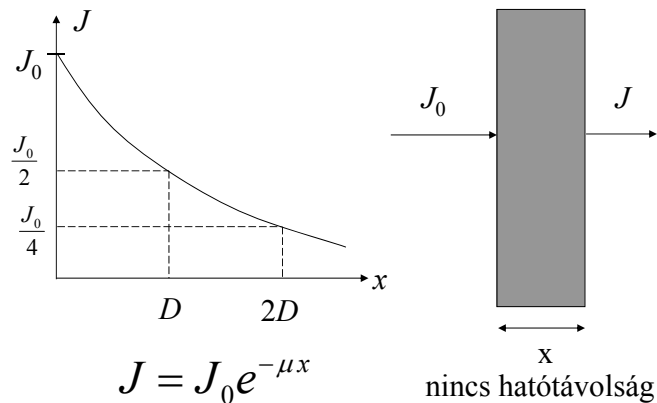
Compton effektus



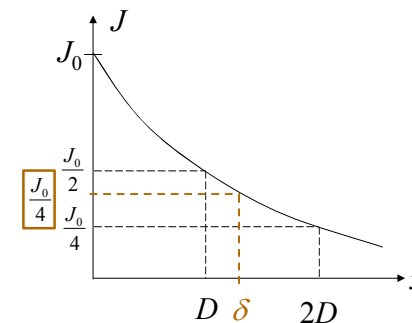
Pároképződés



γ - és röntgensugárzás gyengülése



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



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

μ : (lineáris) gyengítési együttható
mértékegysége: 1/m, 1/cm

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

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

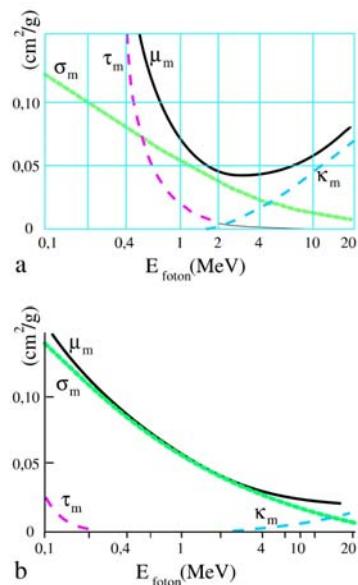
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{tömeggyengítési együttható}$$

Tömeggyengítési
együttható:

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

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

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

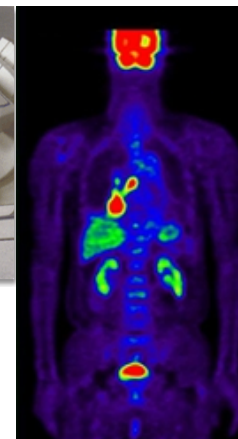
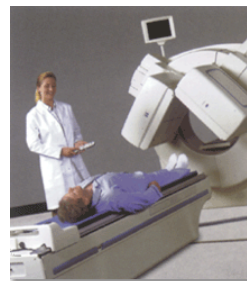


Alkalmazások

(sugárzások és sugárforrások)

Izotópdiagnosztika

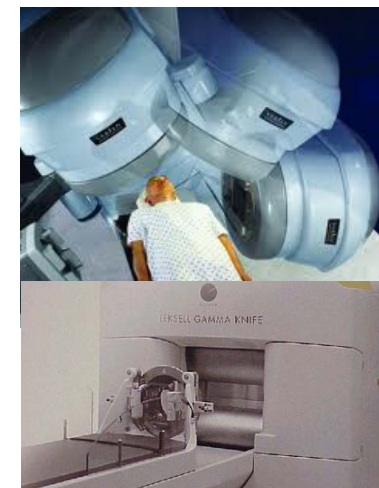
részletesen 2 hét múlva



tűzjelző



Sugárterápia



Alkalmazások

(sugárzások gyengülése)



Rtg sugárzás elnyelődése

izotóptárolás (ólomvédelem)



izotópos fecskendő sugárvédő tokban



Alkalmazások

(sugárzások gyengülése)



ólomüveg



pajzsmirigyvédő ólomgallér



ólomköpeny