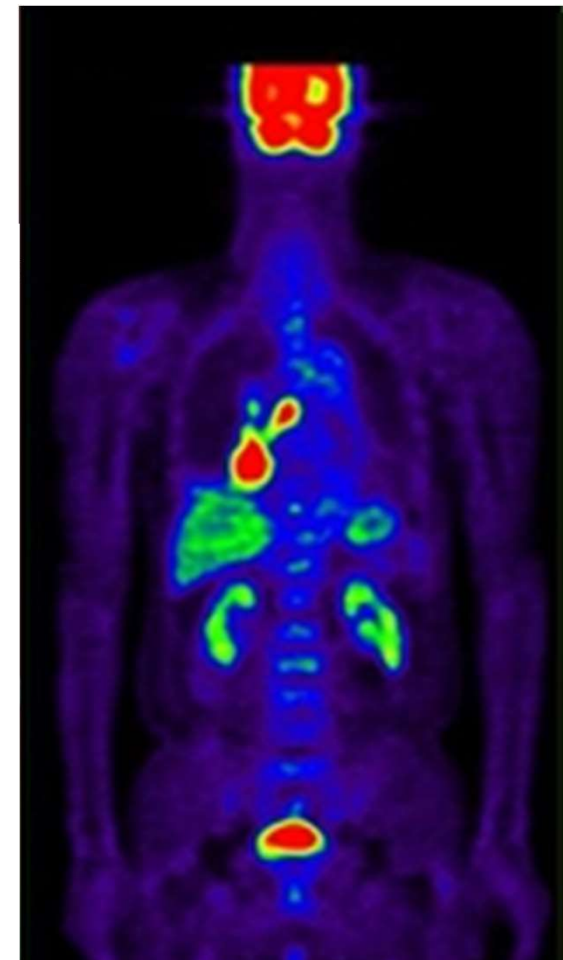
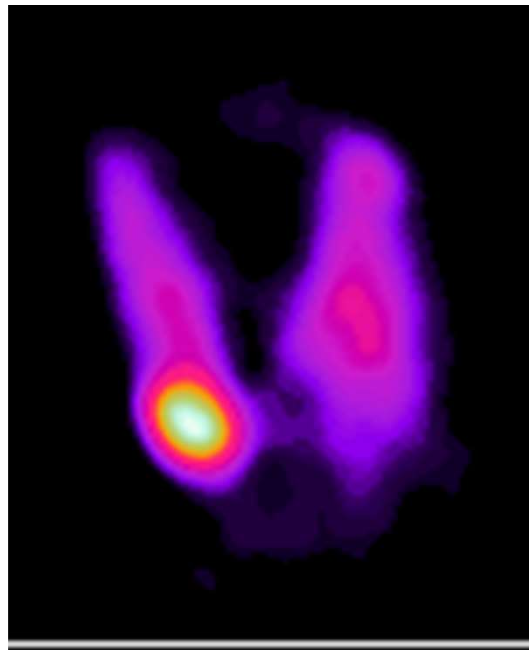
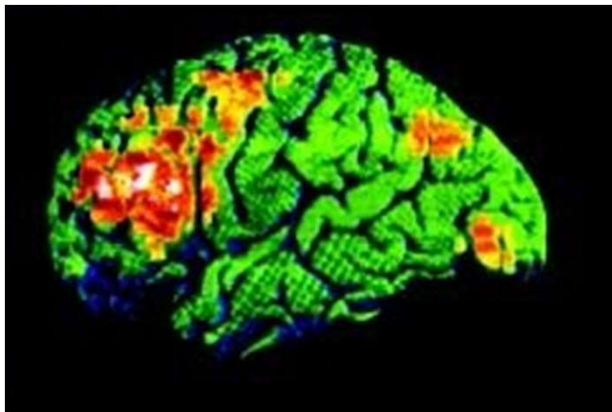


Az atommag: radioaktivitás, magsugárzások. Az izotópos nyomjelzéses technikák fizikai alapjai

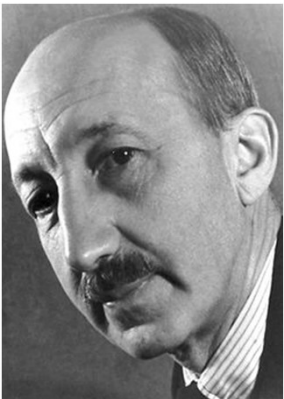
Smeller László



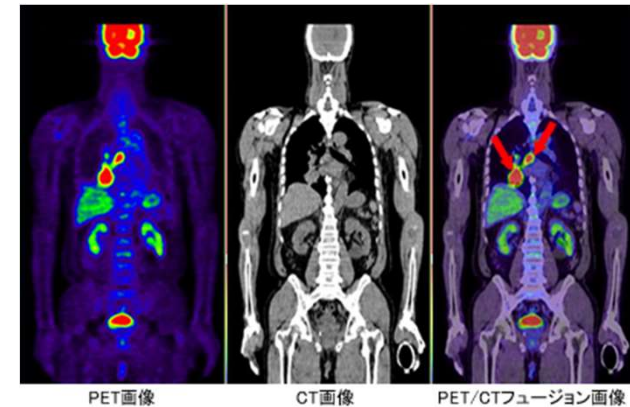
Miért érdekes?

Radioaktív izotópok ill. sugárzások

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





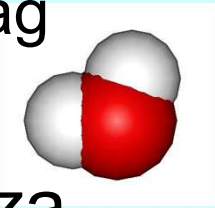
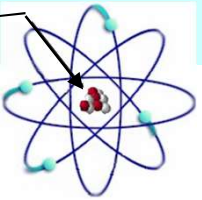

Hevesy György 1885-1966, Nobel díj: 1943



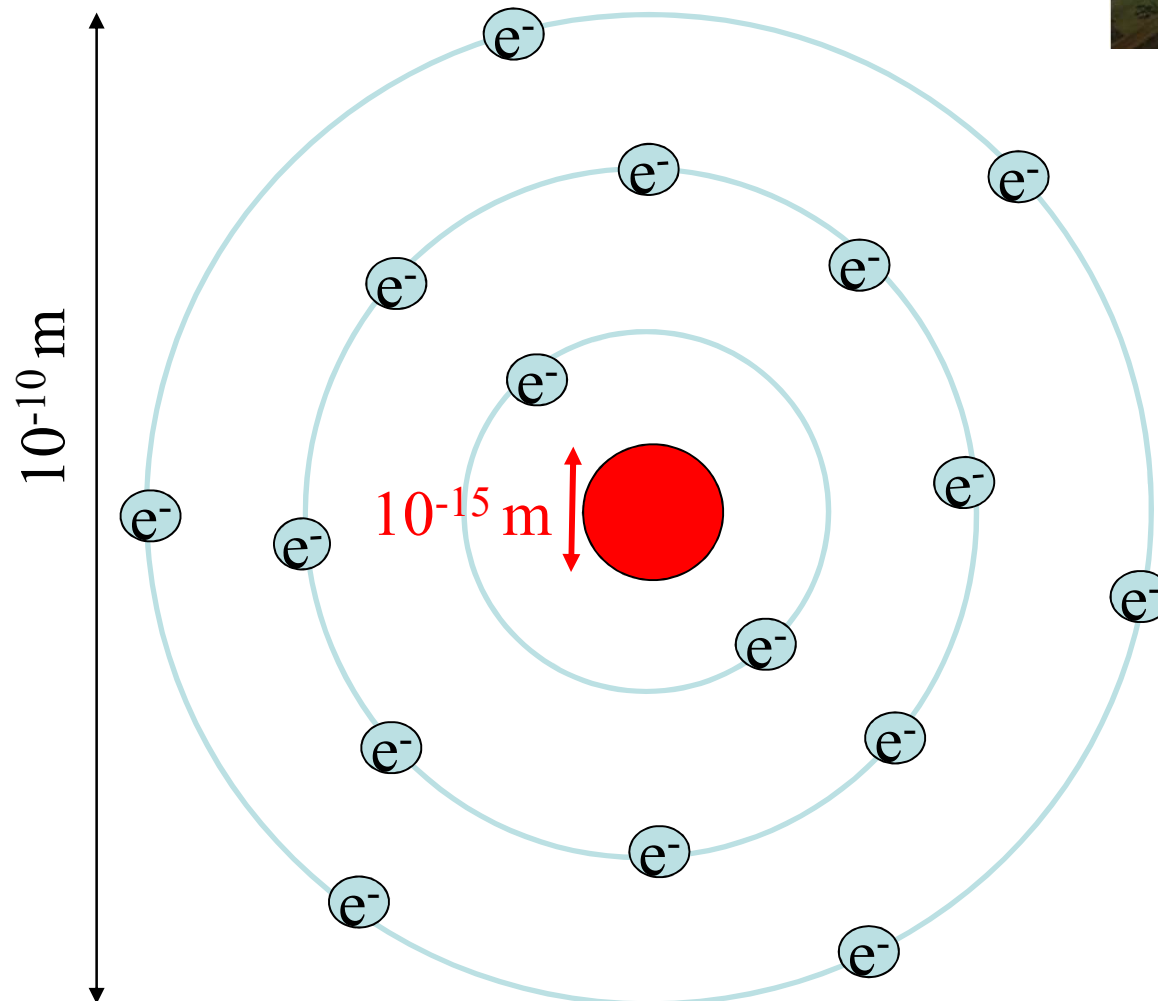
Az atommag, radioaktivitás, magsugárzások

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

Méretek

m		
10^0	méter	ember
10^{-3}	milliméter	szabad szemmel feloldható távolság
10^{-6}	mikrométer	sejt méret (pl. emberi vvt)  $\varnothing 7\mu\text{m}$
10^{-9}	nanométer	fehérje 
10^{-10}	– Ångström =0,1nm=100pm	atom átmérője, kémiai kötéstávolság H atom $\varnothing \approx 1$ Angström (Å) 
10^{-12}	pikométer	röntgensugárzás hullámhossza
10^{-15}	femtométer	atommag  

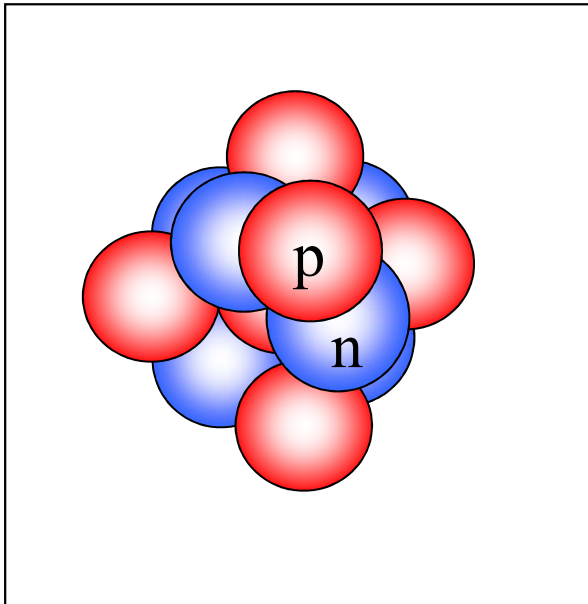
Az atommag



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

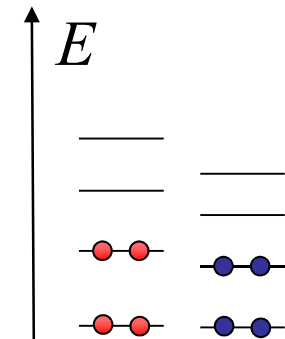
Z (rendszám) = protonszám

99
43 **Tc**

99 nukleon, ebből 43 proton és 56 neutron

Az atommag stabilitása

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



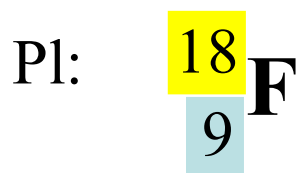
Izotóp

Azonos rendszámú de eltérő tömegszámú atomok

⇒ azonos protonszám eltérő neutronszám

Ugyanannak az elemnek a módosulatai,

⇒ kémiai tulajdonságaik azonosak.



instabil
(radioaktív)



stabil

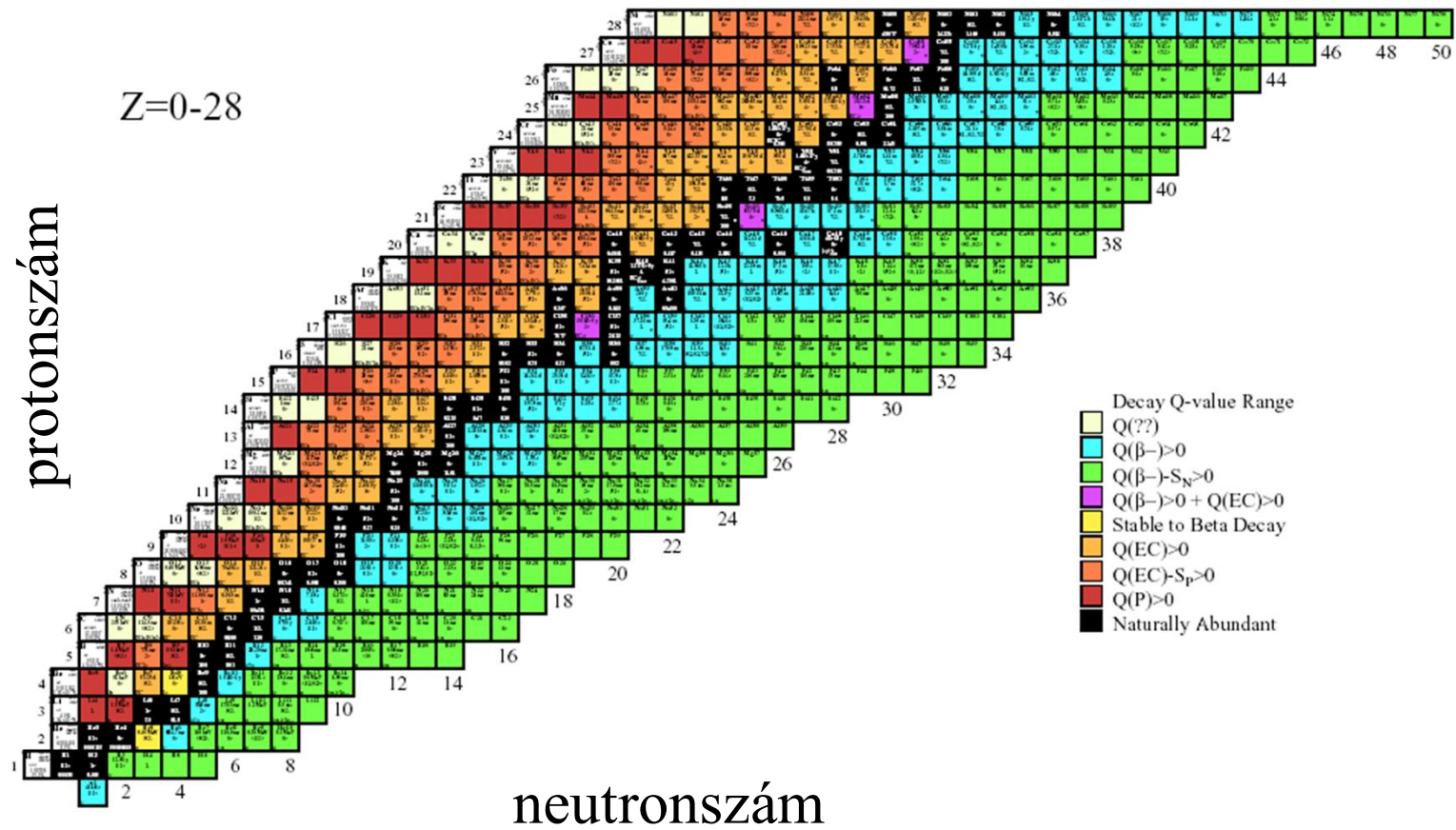


instabil
(radioaktív)

izotóp \leftrightarrow radioaktív izotóp

Izotóptáblázat

Table of Isotopes (1998)



Periodic table of nuclides

protons number

neutrons number

The table displays isotopes with their chemical symbol, atomic number (Z), mass number (A), and half-life. The color of the cell indicates the decay mode: red for alpha decay, orange for beta-minus decay, yellow for beta-plus decay, green for electron capture, and blue for stable isotopes. The table is organized by increasing proton number (Z) from left to right and increasing neutron number (N) from top to bottom.

Bomlások és részecskék

(sugárzások)

α - bomlás

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

β -bomlás: β^-
 β^+

β^- részecske = elektron

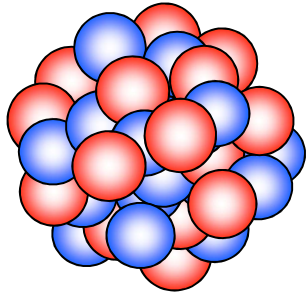
β^+ részecske = pozitron

Izomer magátalakulás

γ -sugárzás

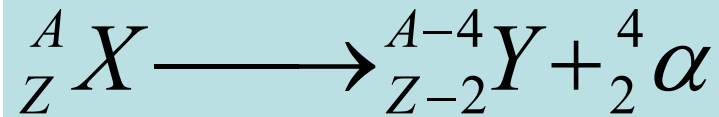
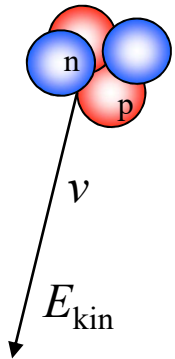
K-elektron befogás

karakterisztikus
Röntgen-foton



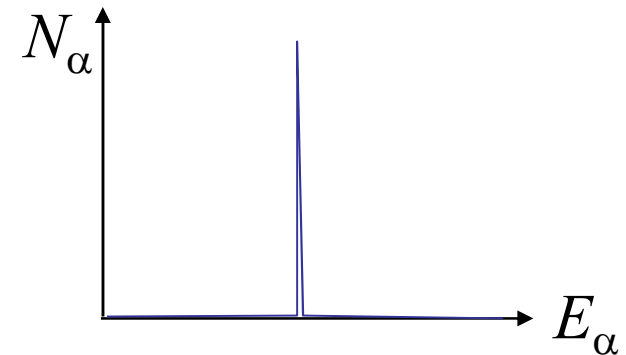
α - bomlás

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

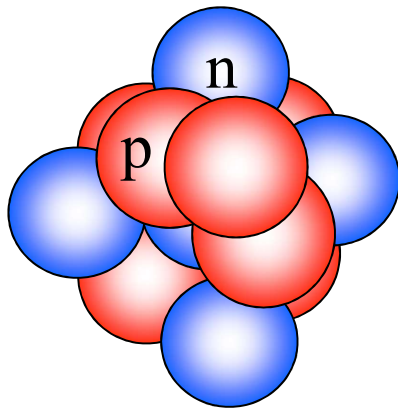
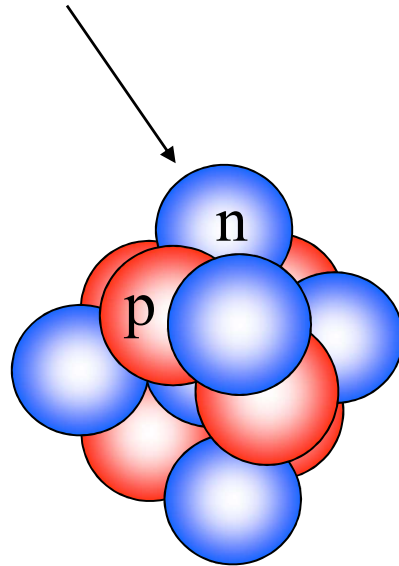


Vonalas energiaspektrum

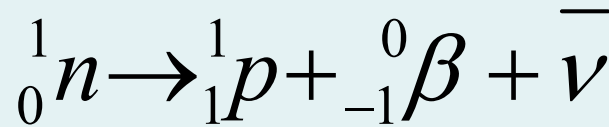
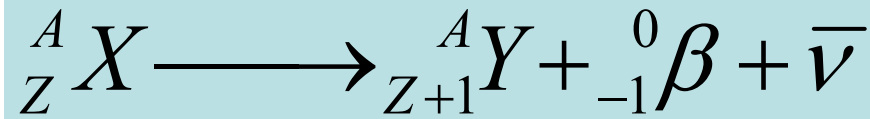
$E_\alpha \sim \text{MeV}$



neutrontúlsúly

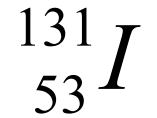
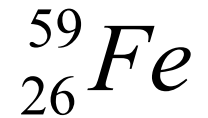
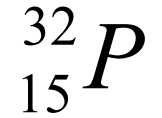
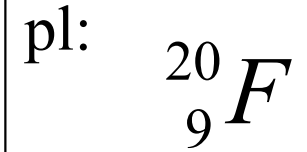
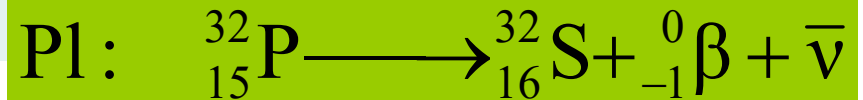


β^- - bomlás



az atommagban
marad

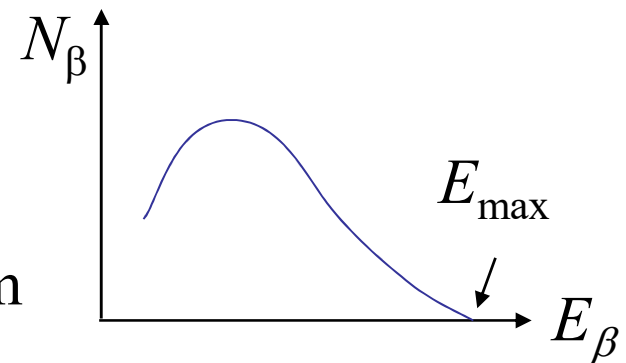
kilép



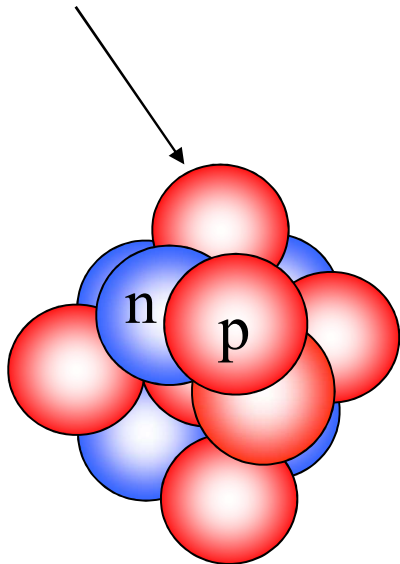
e^- β^- -sugárzás

$\bar{\nu}$ folytonos
energiaspektrum

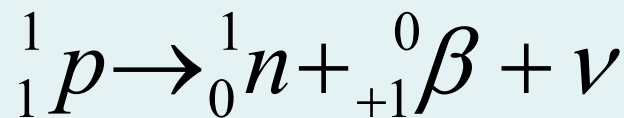
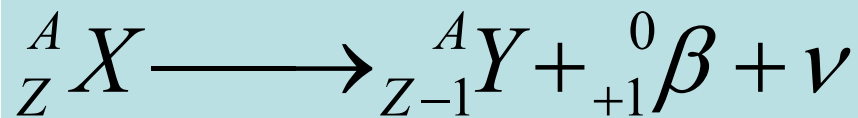
jelölések: $\beta^- = {}^0_{-1} \beta = e^-$



protontúlsúly

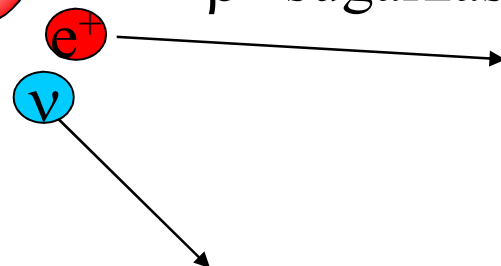
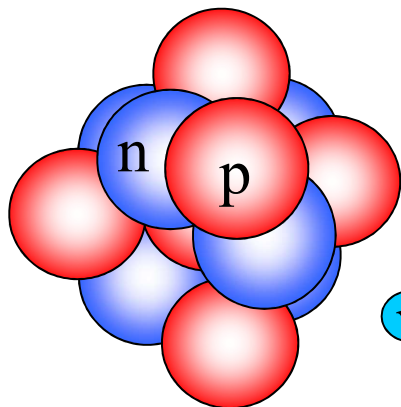


β^+ - bomlás

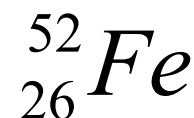
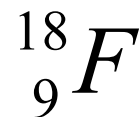
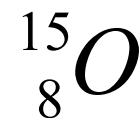
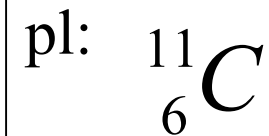
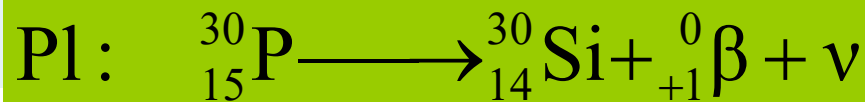


az atommagban
marad

kilép



β^+ -sugárzás



folytonos energiaspektrum
mesterséges előállítás

Kiegészítő anyag érdeklődőknek

Hogy is van ez?

$${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}\beta + \bar{\nu}$$

$${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}\beta + \nu$$

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

Megoldás: Einstein féle tömeg-energia ekvivalencia

$$E=mc^2$$

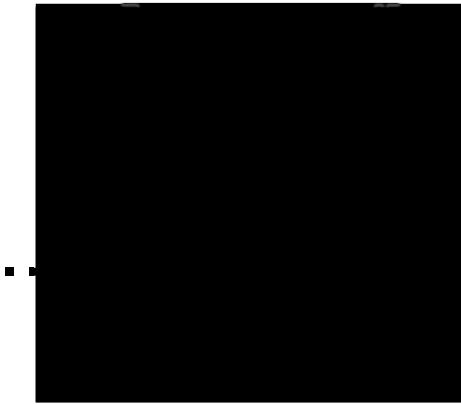
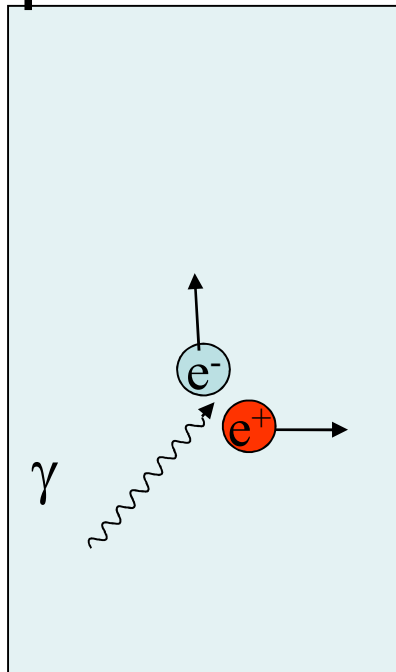
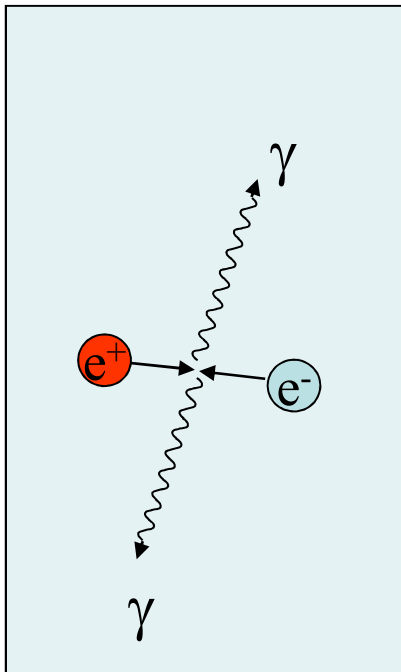
kötött nukleon:

alacsonyabb energiaszint: kisebb tömeg!



Kis kitérő: elektron - pozitron

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



Einstein:

tömeg-energia
ekvivalencia

$$E=mc^2$$

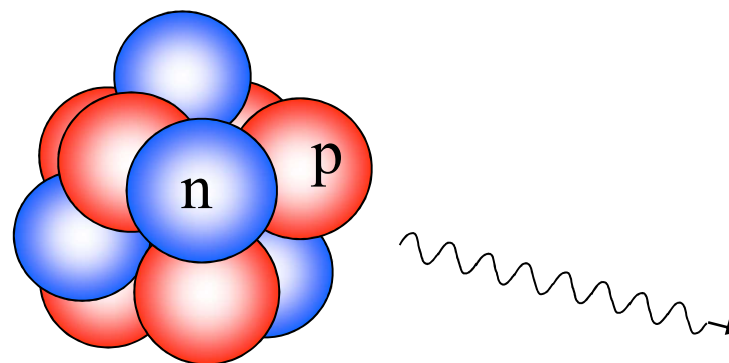
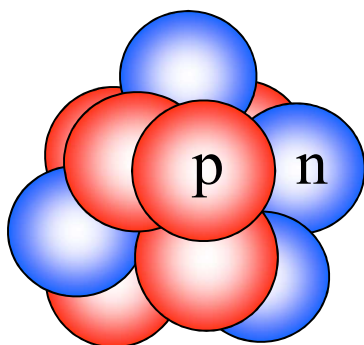
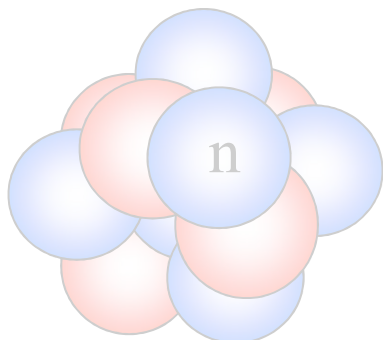
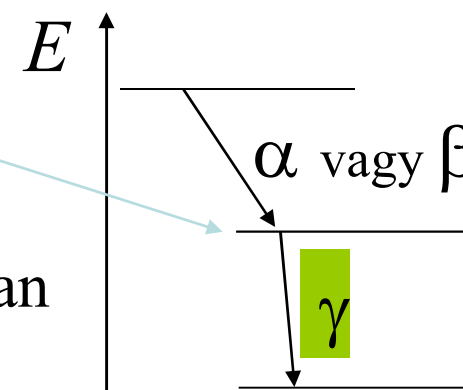
$$m_e c^2 = 511 \text{ keV} \approx 0,5 \text{ MeV}$$

Prompt γ -sugárzás

A bomlás után a nukleonok elhelyezkedése

energetikailag kedvezőtlen lehet
(gerjesztett állapotú atommag)

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



protonszám, neutronszám változatlan! Kísérőjelenség.

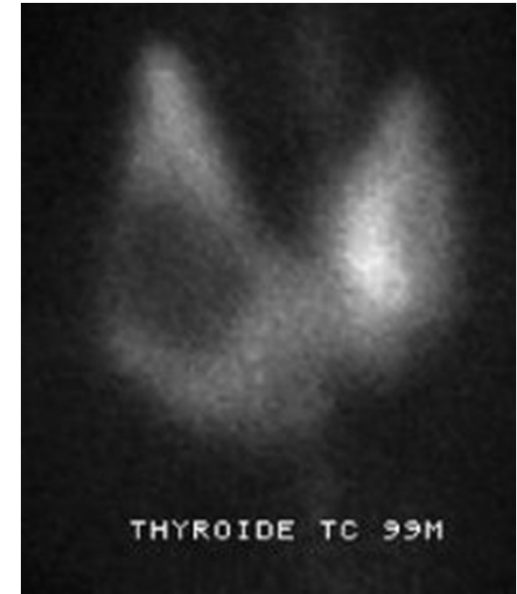
Izomer magátalakulás

Ha a bomlás utáni (gerjesztett állapotú) mag elég hosszú ideig stabil (metastabil), akkor a γ -sugárzás később keletkezik.

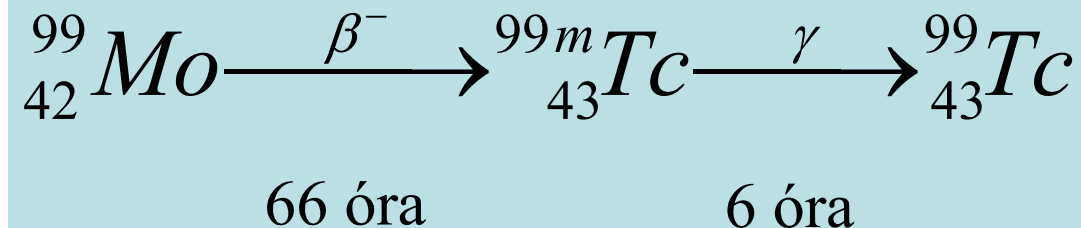
A két folyamat szeparálható.

Tisztán γ -sugárzó izotóp állítható elő!

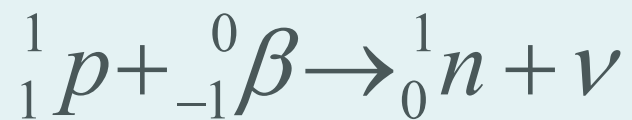
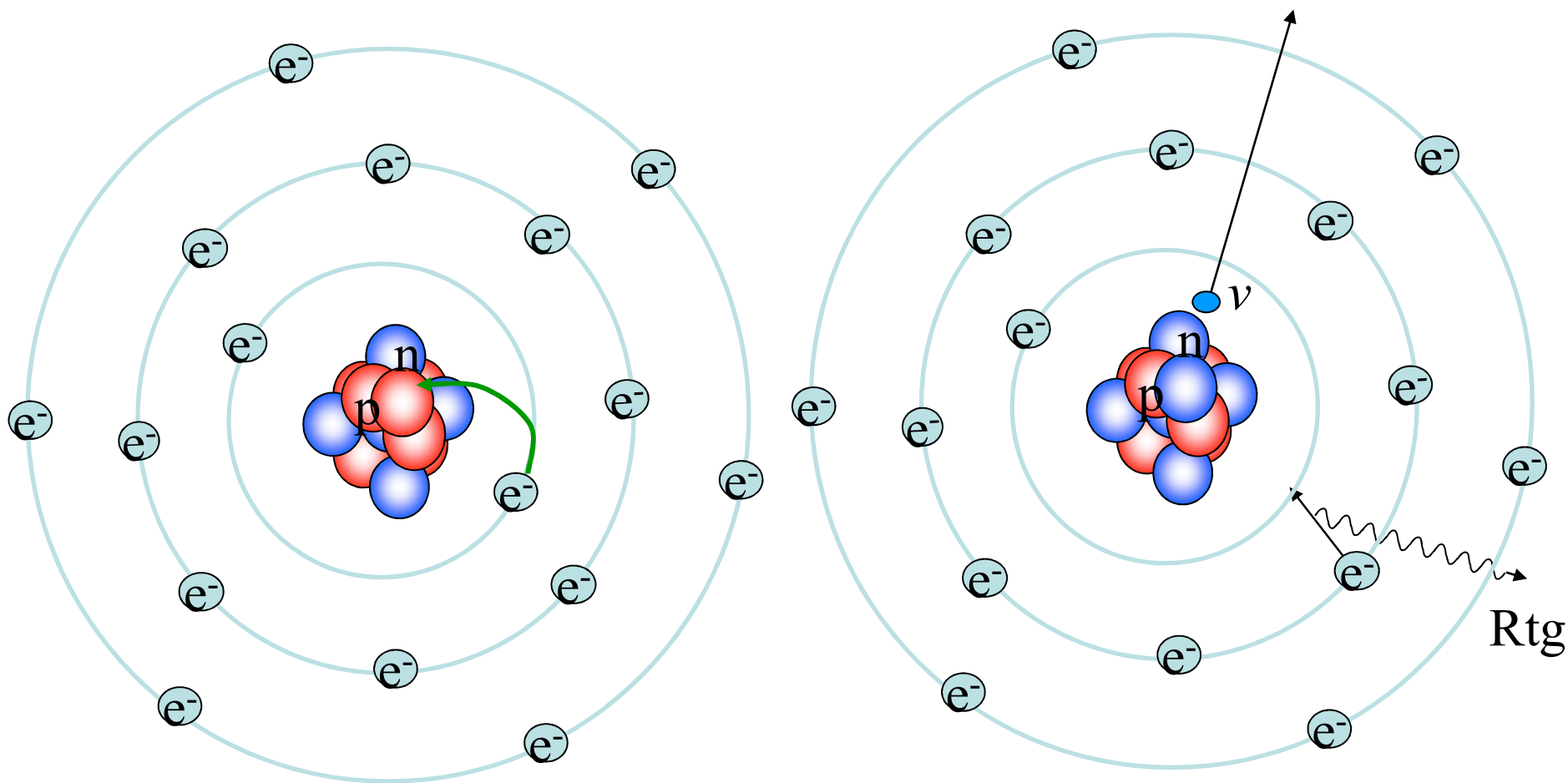
=> Izotópdiaagnosztika



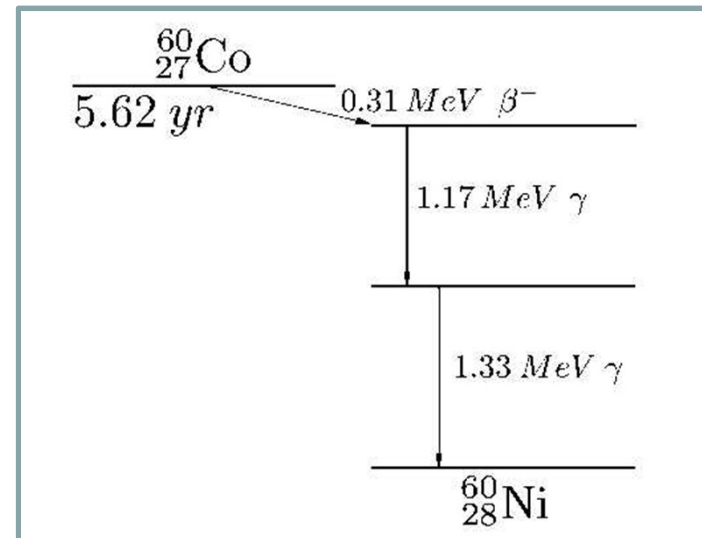
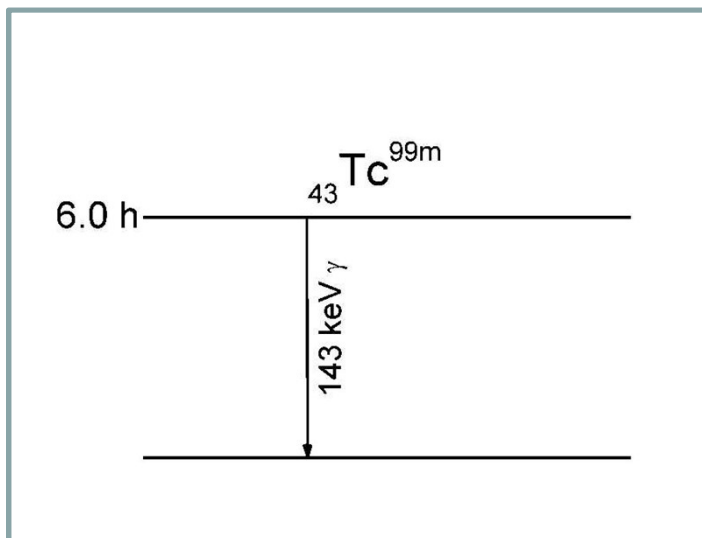
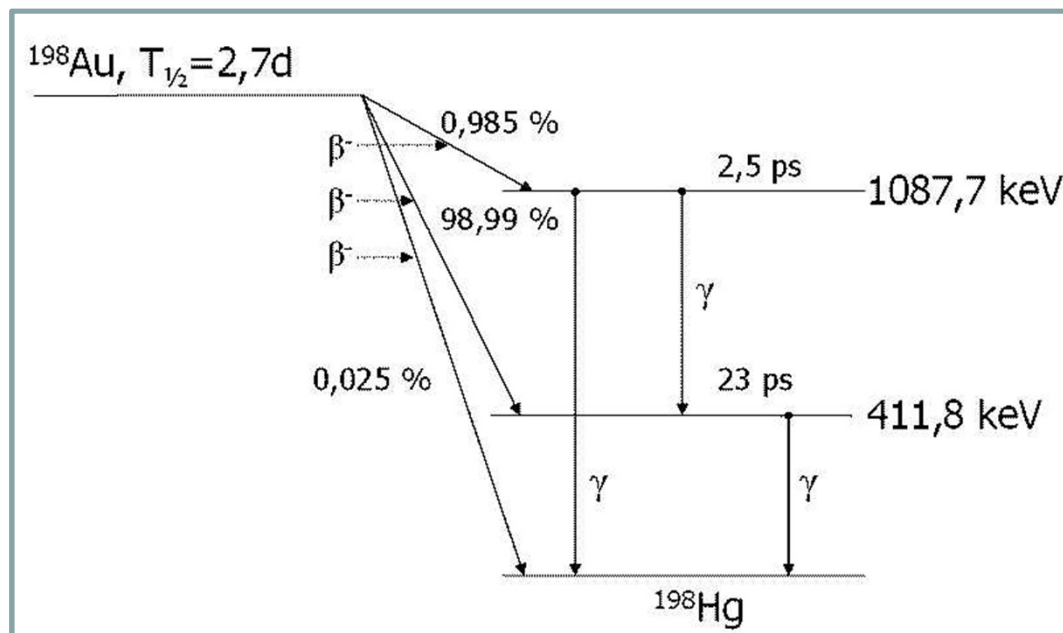
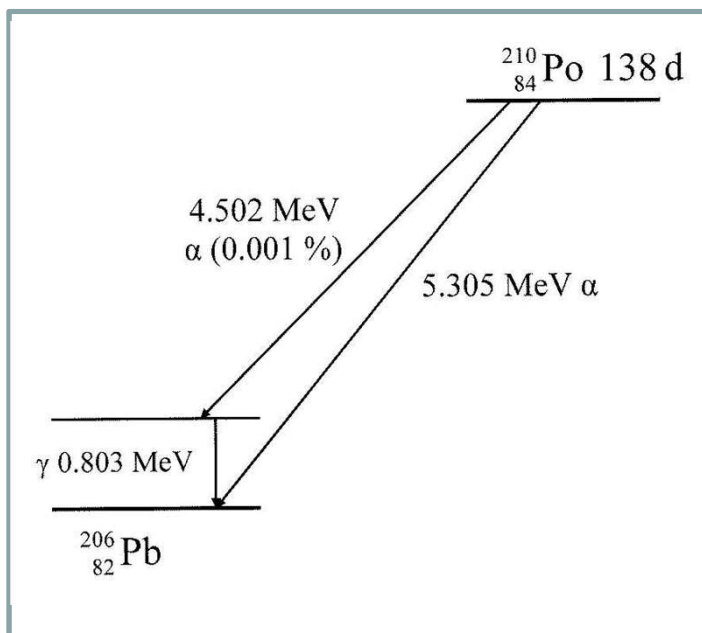
Pl: ^{99m}Tc



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

- Fúzió könnyű magok egyesülése



Kiegészítő anyag érdeklődőknek

Hogyan jöttek létre az izotópok?

Primordiális izotópok:

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

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

Posztprimordiális izotópok:

Kozmogenikus izotópok:

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

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

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

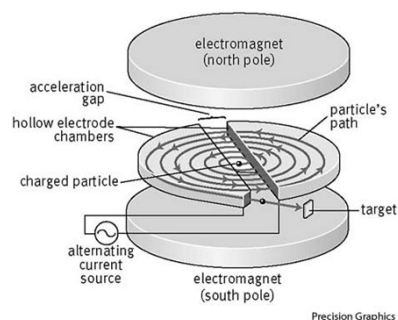
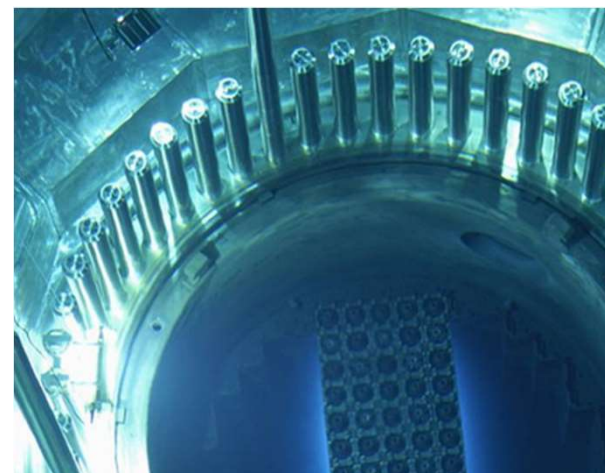
Hogyan állíthatunk elő izotópokat?

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)*

Az emittált részecske fajtája (ld. fent)*

Részecskeenergia (a sugárzást jellemzi)*

* Az izotóp típusától függenek

Aktivitás (Λ)

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

N = a bomlásra képes atomok száma
 t = idő
 $-\Delta N$ = a Δt idő alatt elbomlott atomok száma

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 PBq

mérhetetlenül
alacsony

természetes
radioaktivitás
szintje

in vivo
diagn.

óvatosan
dolgozzunk
vele!

terápiában
alkalmazott
aktivitás

Bomlástörvény: példa

$$N_0 = 10000$$

bomlási valószínűség: $\lambda = 0,1 \text{ } ^1/\text{s}$

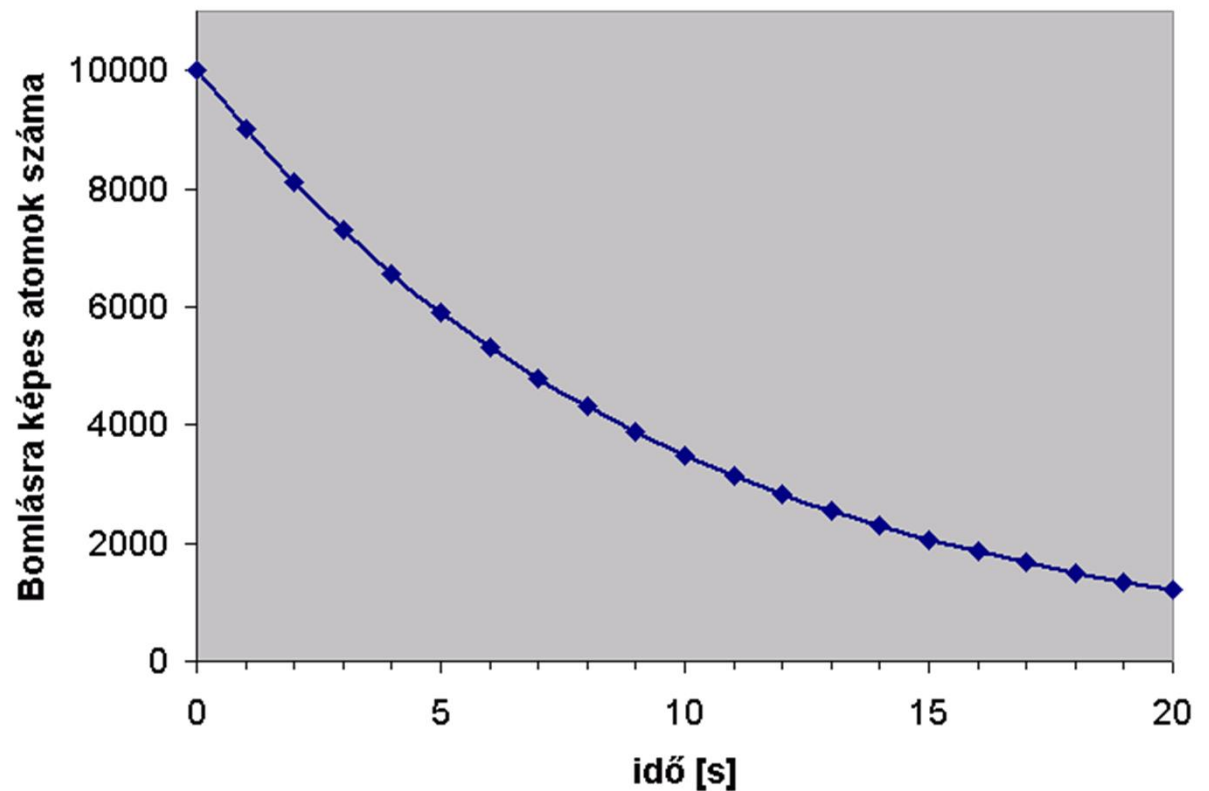
- 1 sec múlva: 9000 ($10000 \times 0,1 = 1000$ elbomlott)
- 2 sec múlva: 8100 ($9000 \times 0,1 = 900$ elbomlott)
- 3 sec múlva: 7290 ($8100 \times 0,1 = 810$ elbomlott)
- 4 sec múlva: 6561 ($7290 \times 0,1 = 729$ elbomlott)
-

Bomlástörvény: példa

$$N_0 = 10000$$

bomlási valószínűség: $\lambda = 0,1 \text{ } 1/\text{s}$

- 1 sec: 9000
- 2 sec: 8100
- 3 sec: 7290
- 4 sec: 6561
-



Bomlástörvény

$$\Delta N \sim N$$

N a bomlásra képes (=elbomlatlan) atomok száma
($-\Delta N$ = a Δt idő alatt elbomlott atomok száma)

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

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

↓
differenciálegyenlet

megoldása:

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

exponenciális lecsengés!

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

Felezési idő, bomlástörvény

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

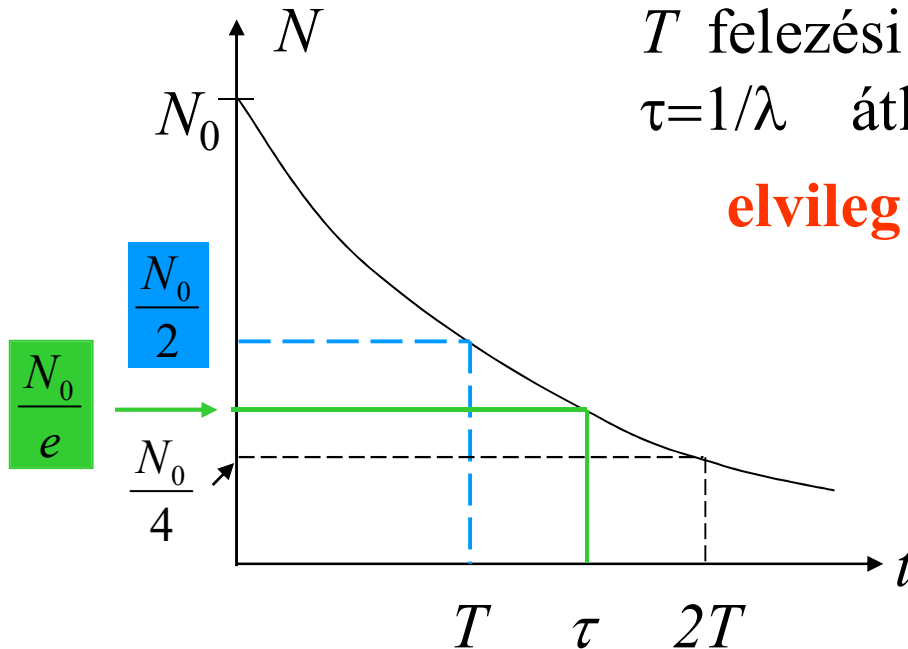
$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

λ bomlásállandó (bomlási valószínűség)

T felezési idő

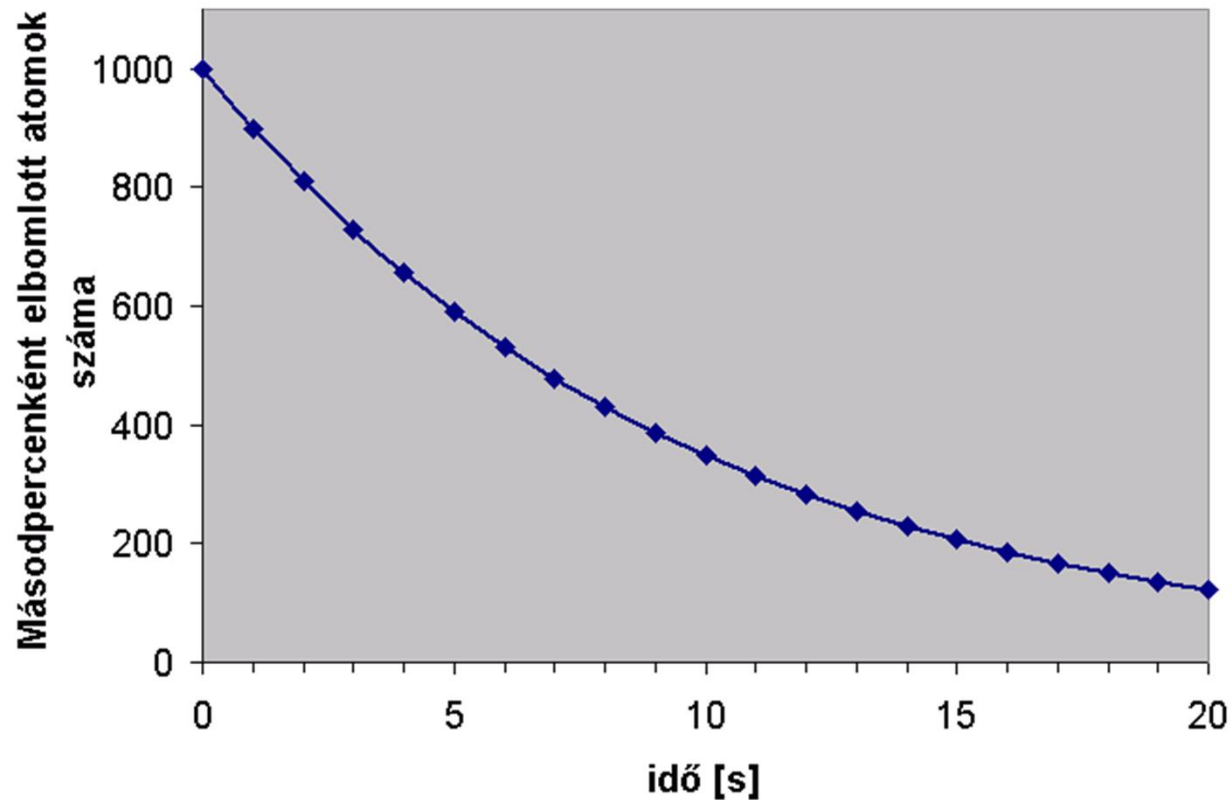
$\tau = 1/\lambda$ átlagos élettartam

elvileg soha nem bomlik el az összes !



Az aktivitás csökkenése.

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



1000 elbomlott)

900 elbomlott)

810 elbomlott)

729 elbomlott)

Az aktivitás időbeli csökkenése

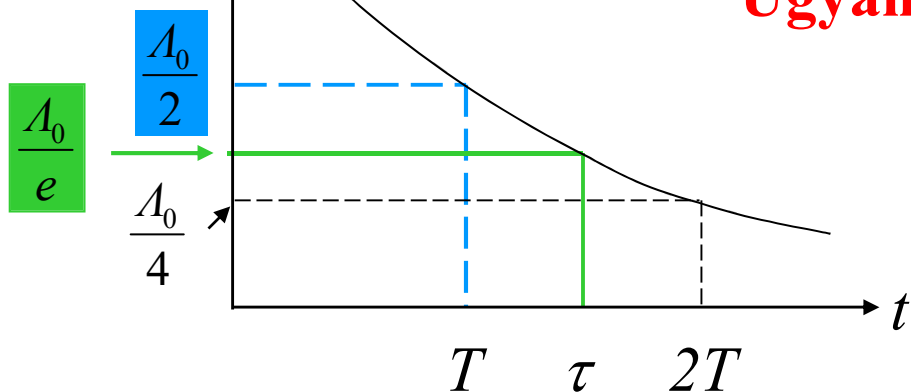
$$A = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \quad \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

$$A = \lambda N$$

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

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

Ugyanúgy csökken mint az N!



kb. 10 T alatt

1/1000 részre bomlik

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.

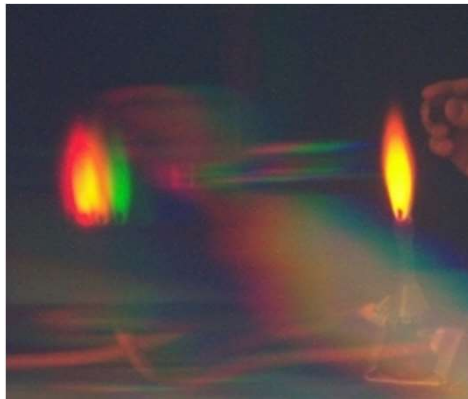
$$\text{eV} = \text{elemi töltés} \times 1 \text{ Volt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 0,16 \text{ aJ}$$

Tipikus energia-nagyságrendek a mikrovilágban

Külső elektronok
gerjesztése,
kilökése

eV (aJ)

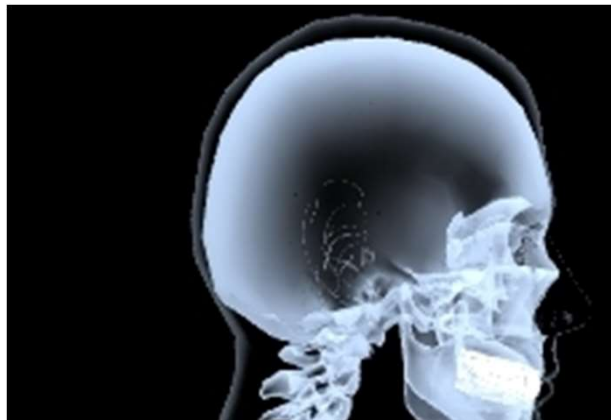
fény



belső elektronpályák
közti átmenet

keV (fJ)

röntgensugár

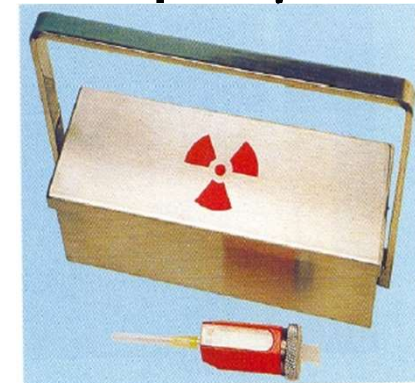


atommag-
átalakulás

MeV (pJ)

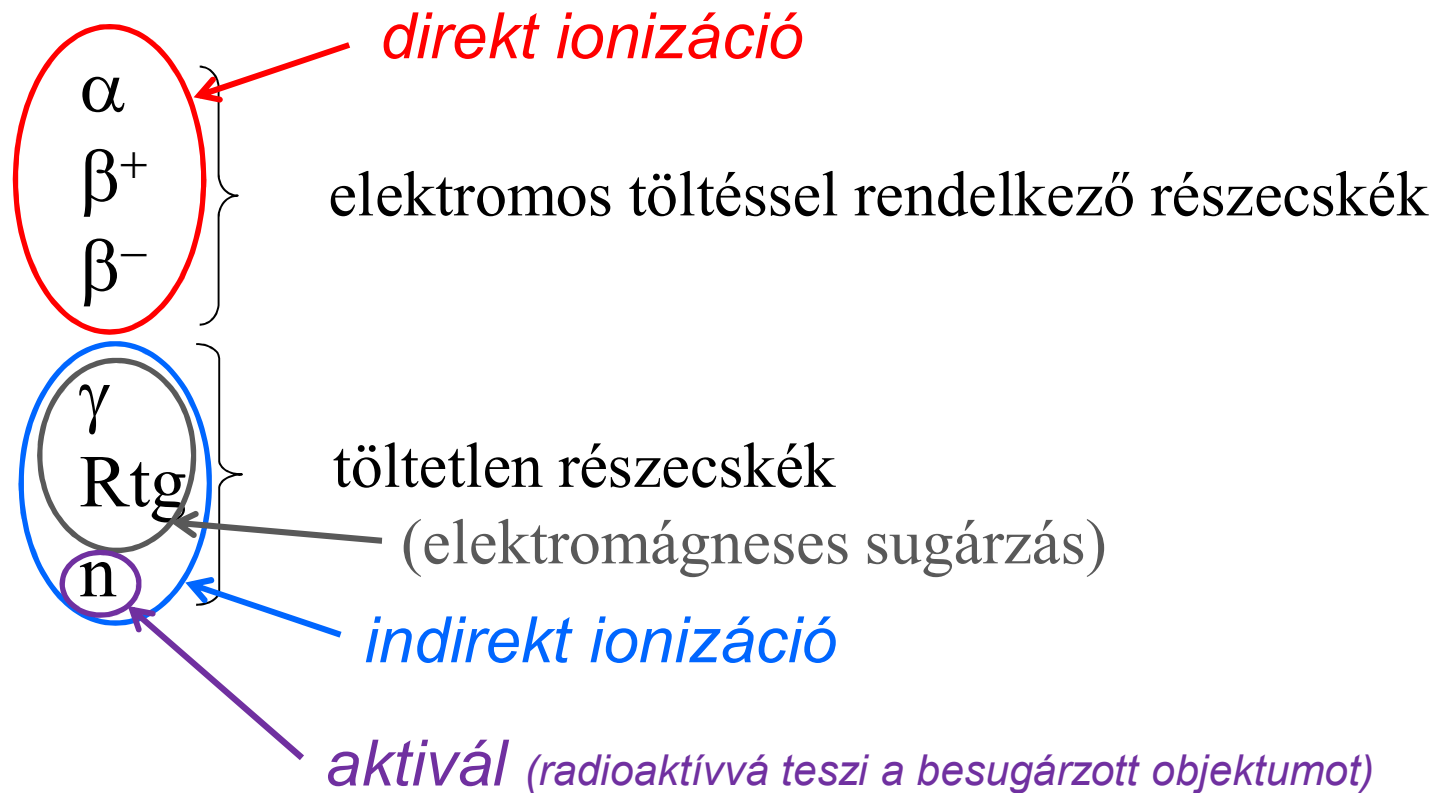
radioaktív
sugárzás

pl. γ



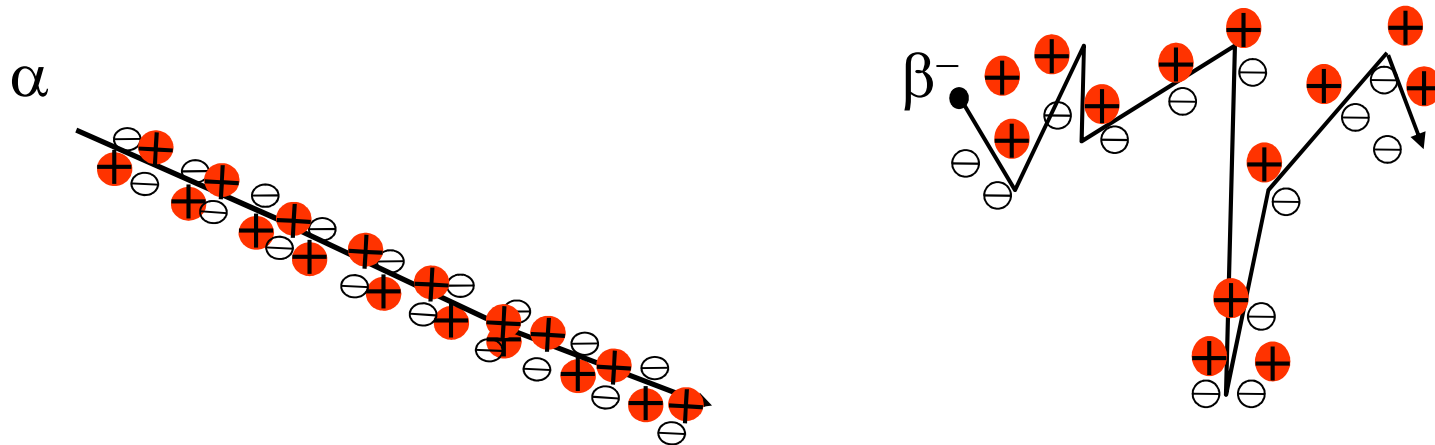
Sugárzások és anyag kölcsönhatása.

A sugárzások elnyelődése



Töltött részecskék elnyelődése

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



Hatótávolság

α -részecske

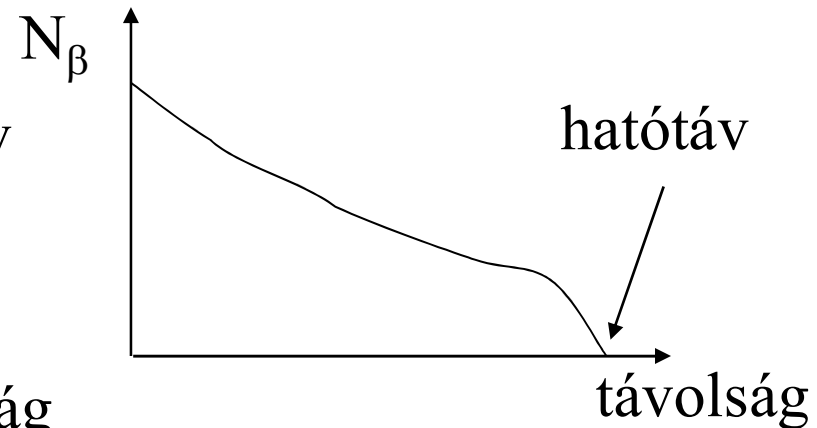
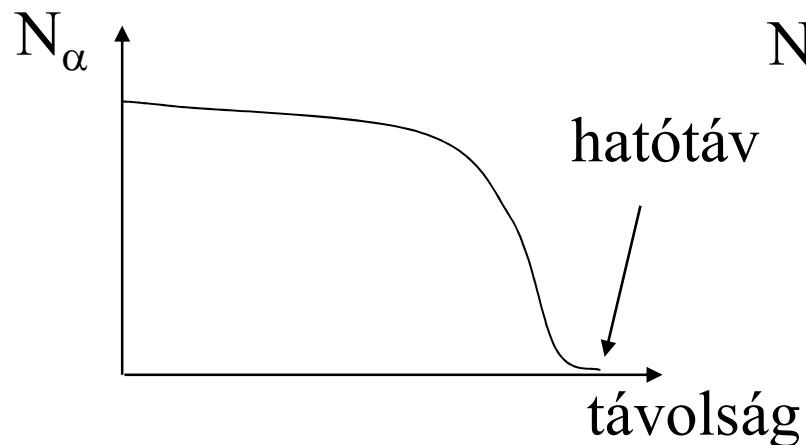
β^- -részecske

levegőben **néhány cm**

levegőben **m** nagyságrendű

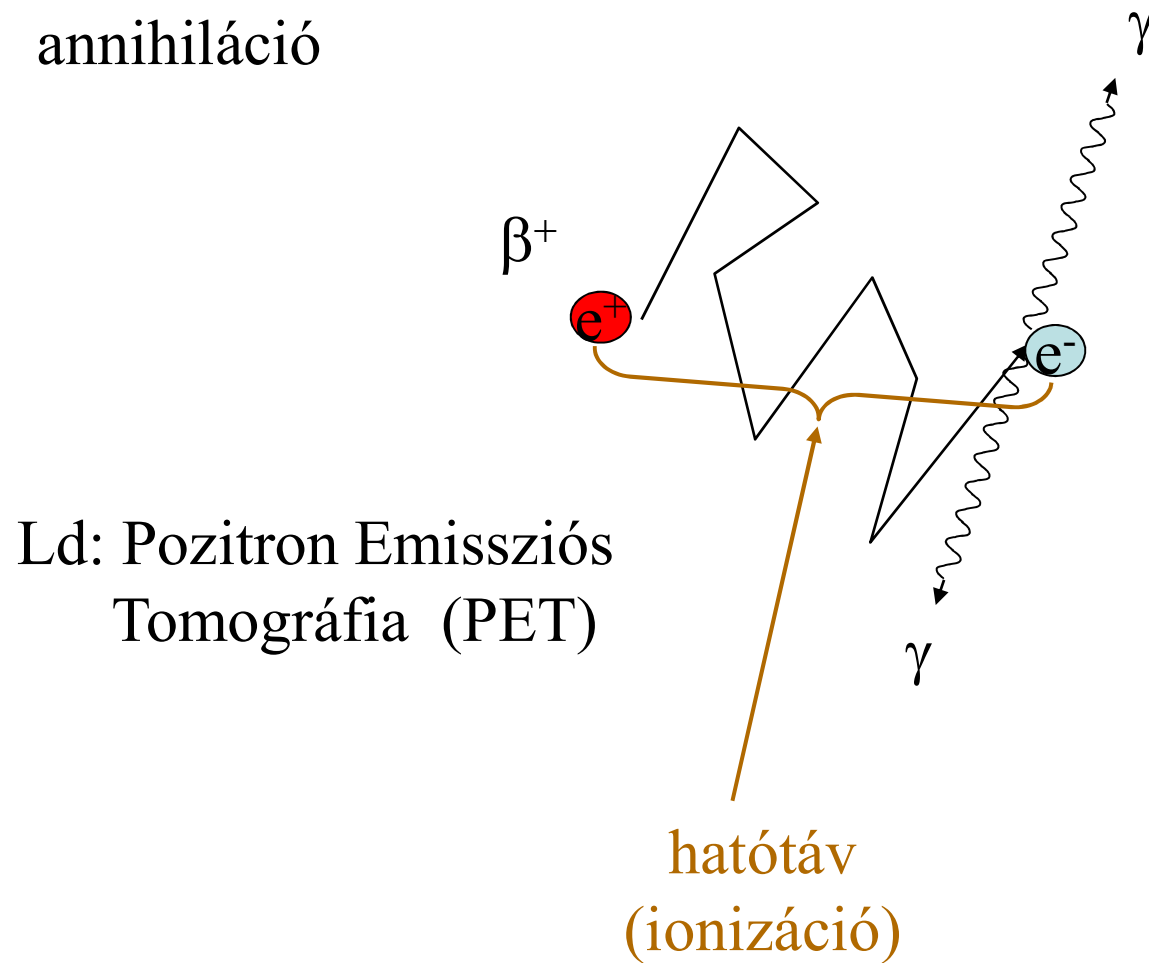
szövetben **0,01-0,1 mm**

szövetben **cm**

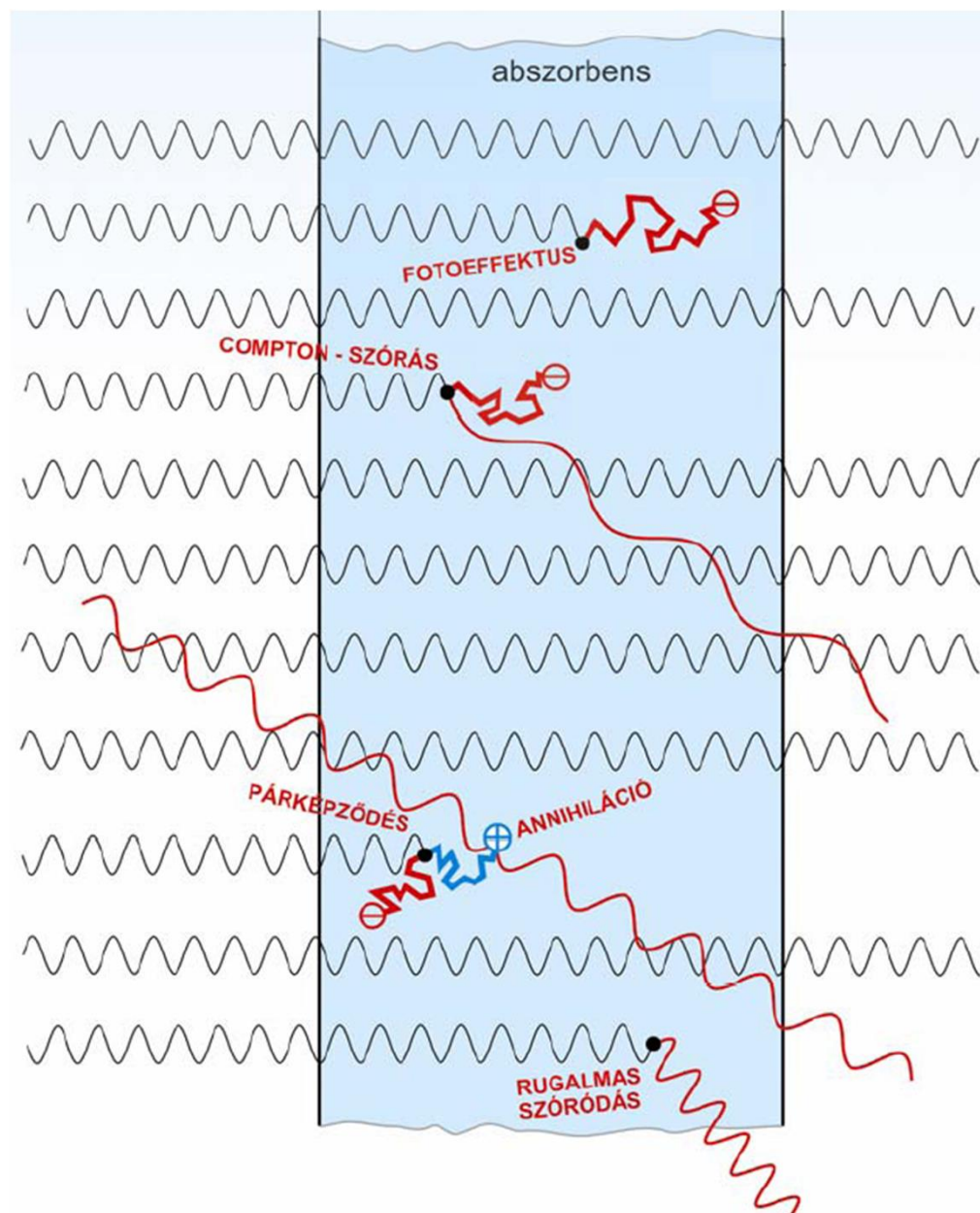


β^+ -sugárzás

annihiláció



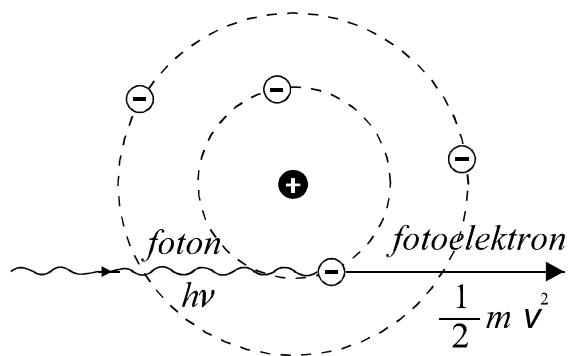
A γ - (és Rtg) sugárzás elnyelődése



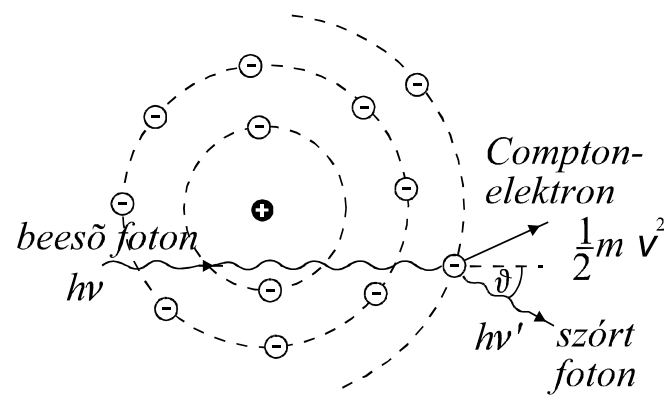
Véletlenszerűen fellépő
effektusok által megy végbe:

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

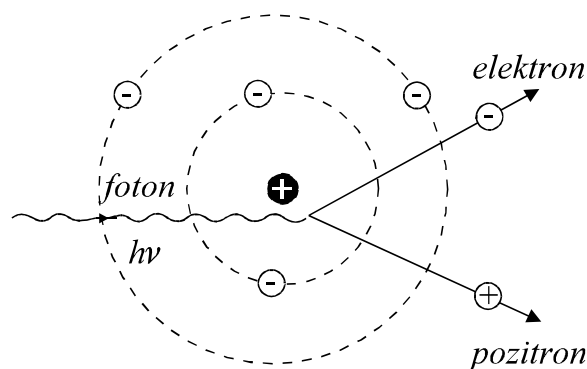
A γ foton-anyag kölcsönhatás formái = = Az elnyelés részfolyamatai



Fotoeffektus

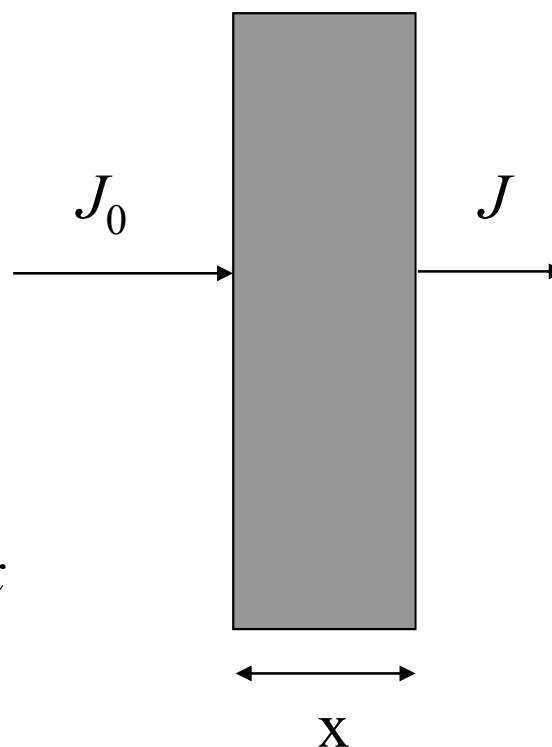
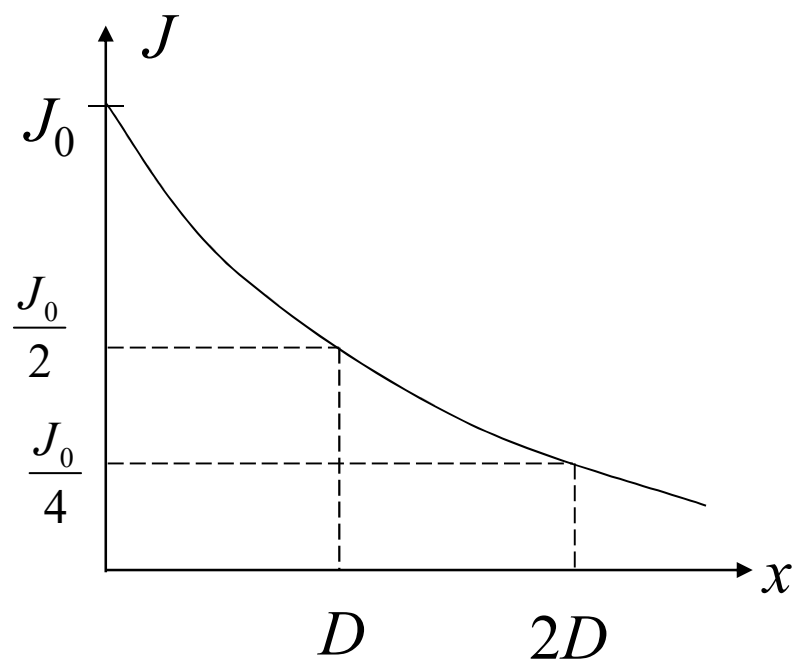


Compton-effektus



Párképzés

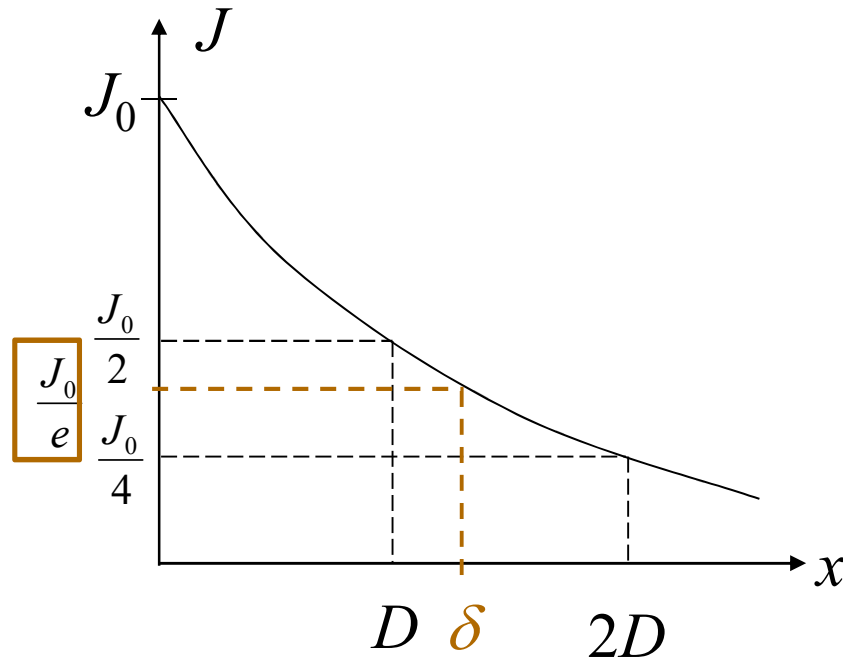
γ - és röntgensugárzás gyengülése



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

nincs 100%-os elnyelés (hatótávolság)!

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)
 $= \mu(\text{anyag}, \rho, E_{\text{foton}}) \sim \rho$

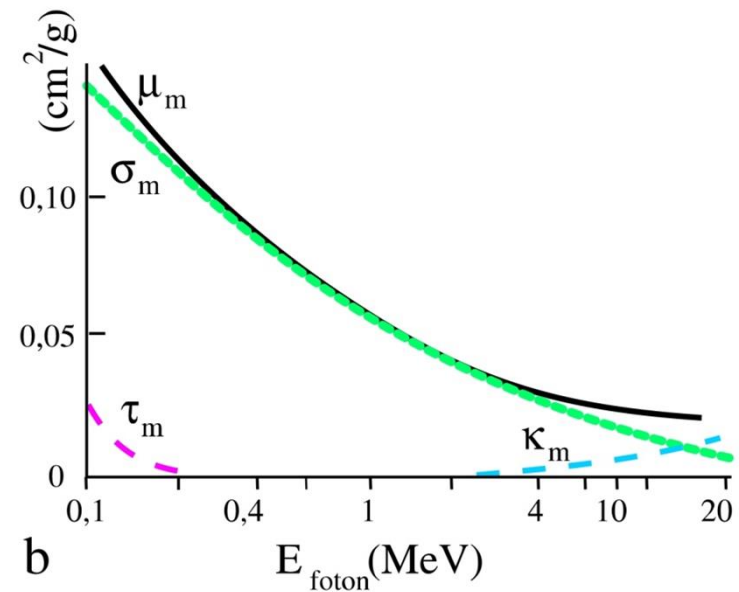
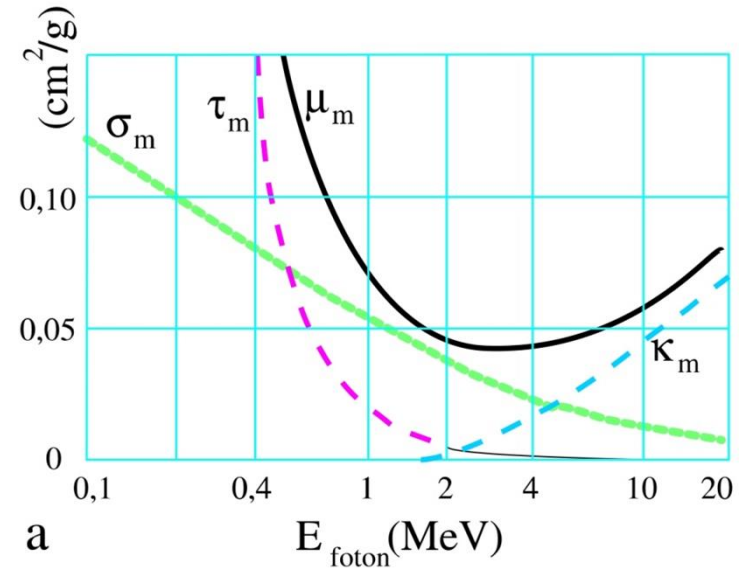
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{tömeggyengítési együttható}$$

Tömeggyengítési
együttható:

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

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

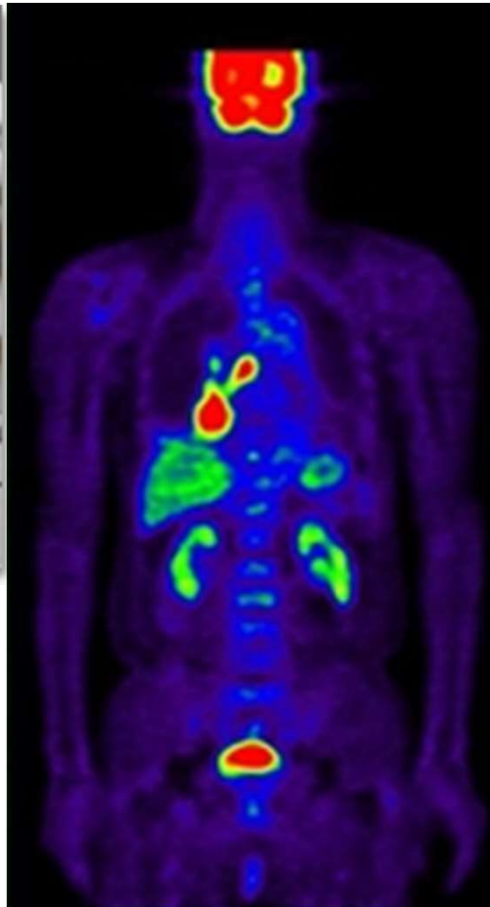
$$\tau_m = c\lambda^3 Z^3$$



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)

