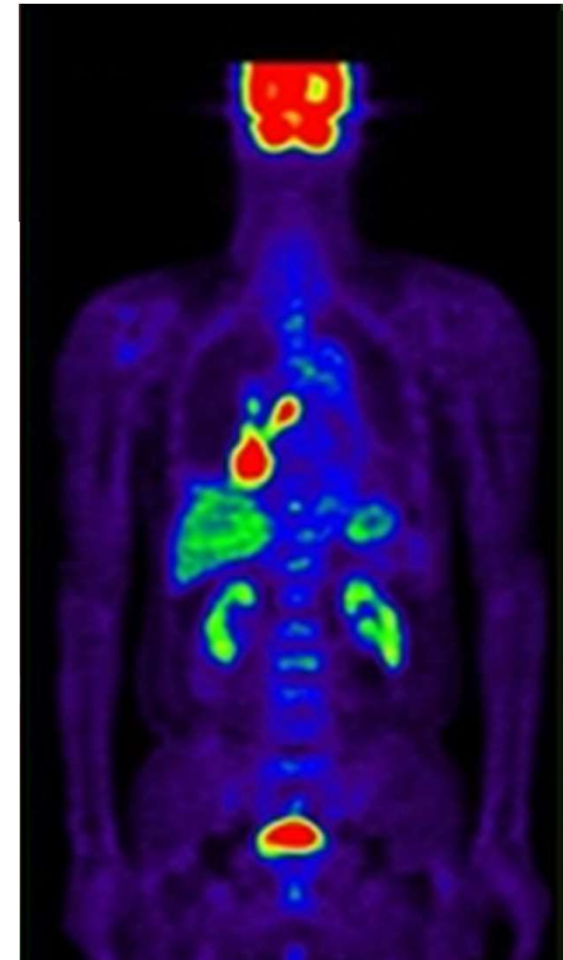
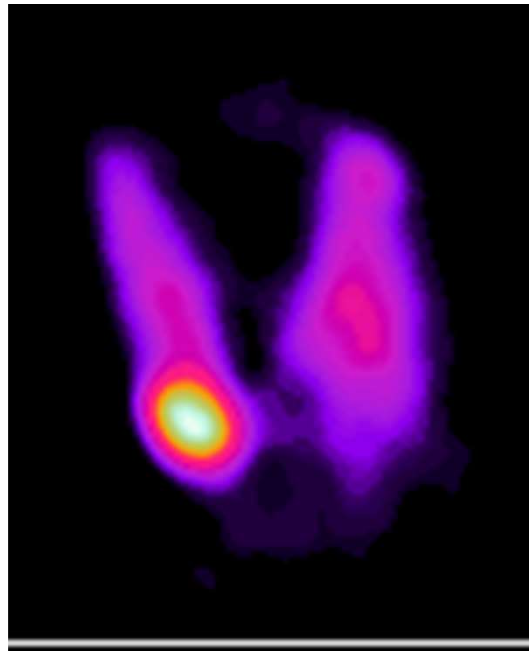
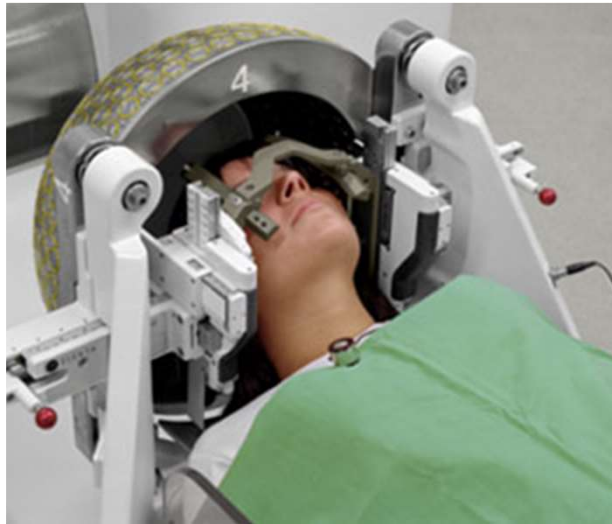
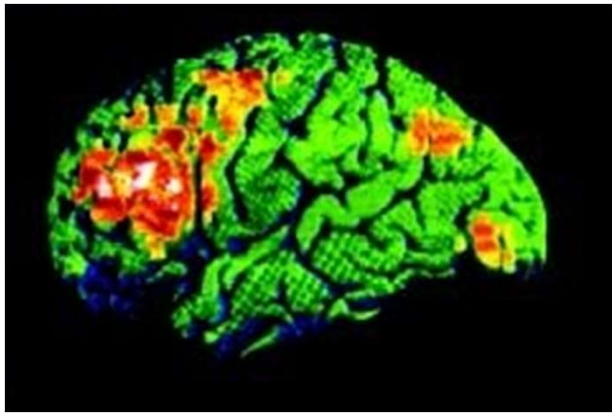


Az atommag: radioaktivitás, magsugárzások. Az izotópos nyomjelzéses technikák fizikai alapjai

Smeller László



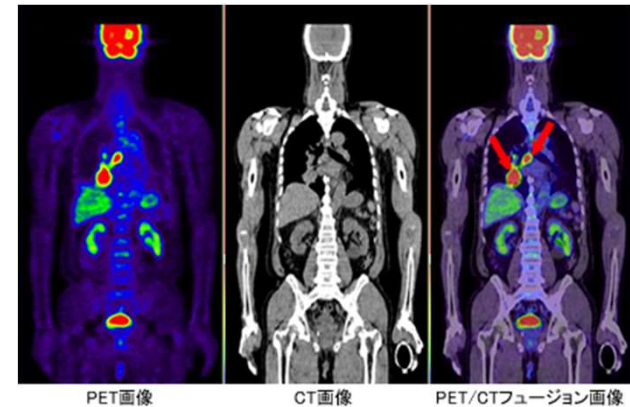
Miért érdekes?

Radioaktív izotópok ill. sugárzások

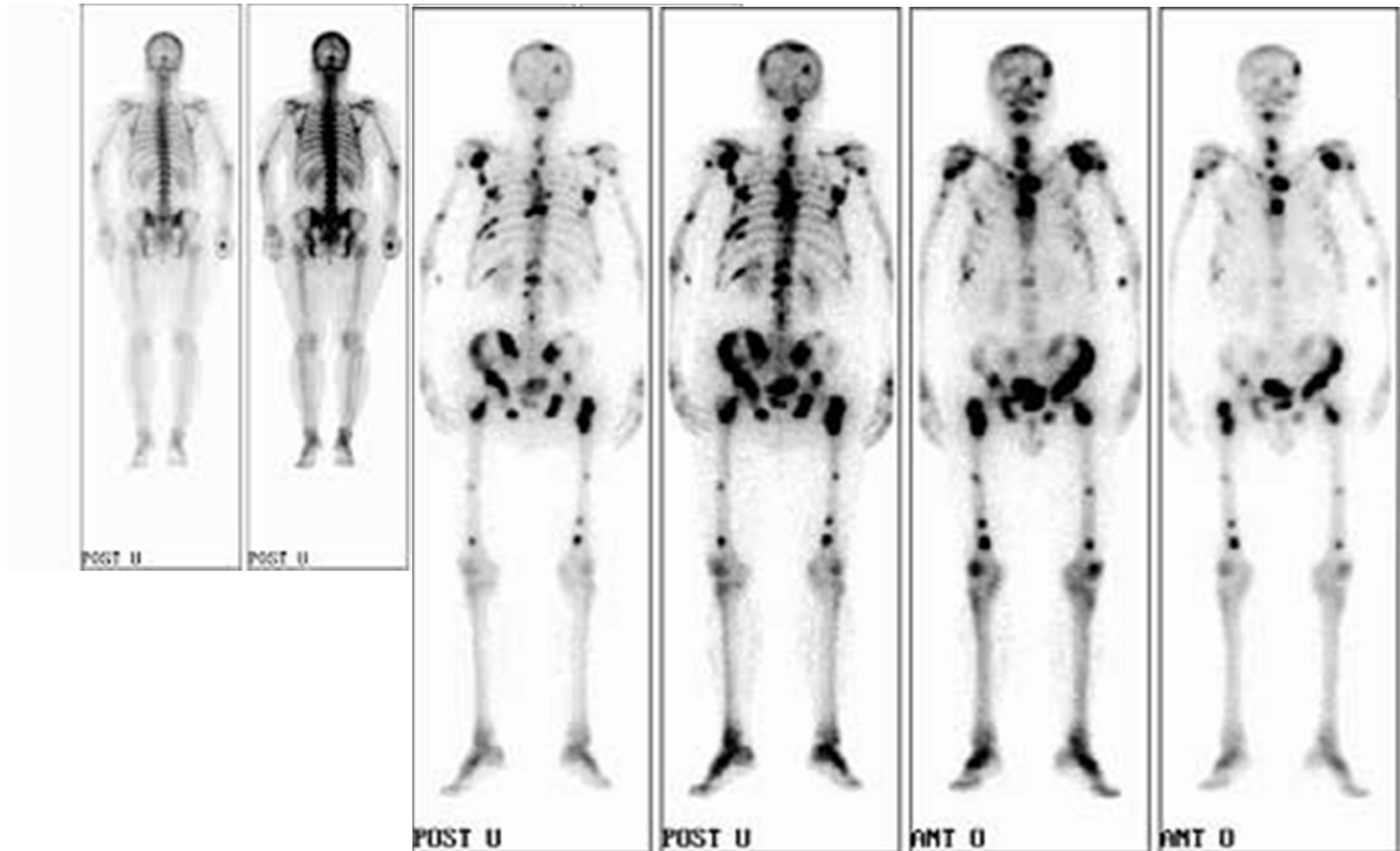
- orvosi felhasználása:
 - diagnosztika
(izotópdiagnosztika)
 - terápia (sugárterápia)
 - farmakokinetikai
vizsgálatok



Hevesy György 1885-1966, Nobel díj: 1943





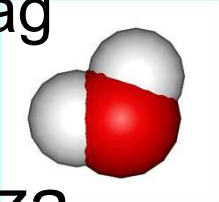
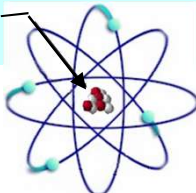

Példa: csontszcintigráfia



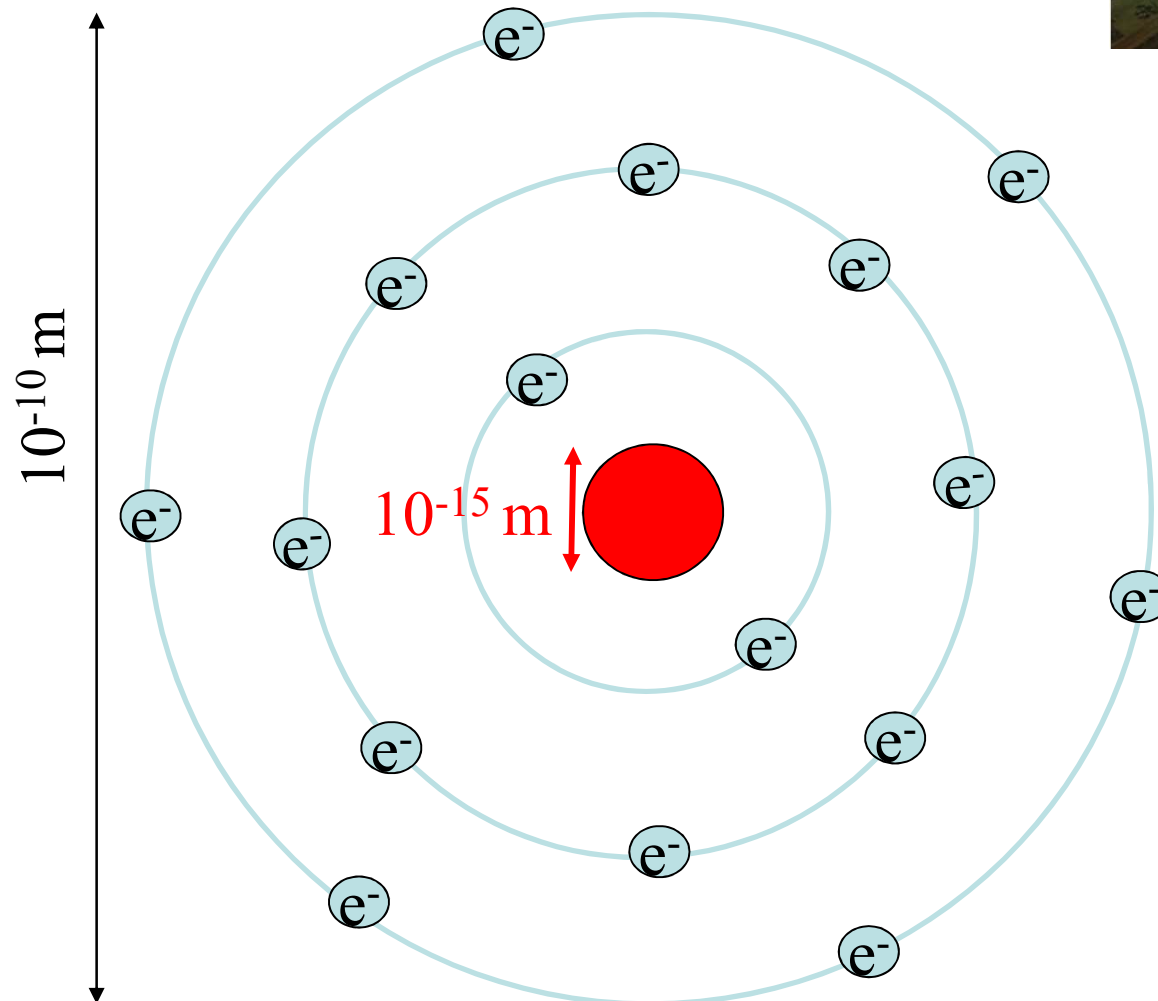
Az atommag: radioaktivitás, magsugárzások

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

Méretek

m		
10^0	méter	ember
10^{-3}	milliméter	szabad szemmel látható 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  

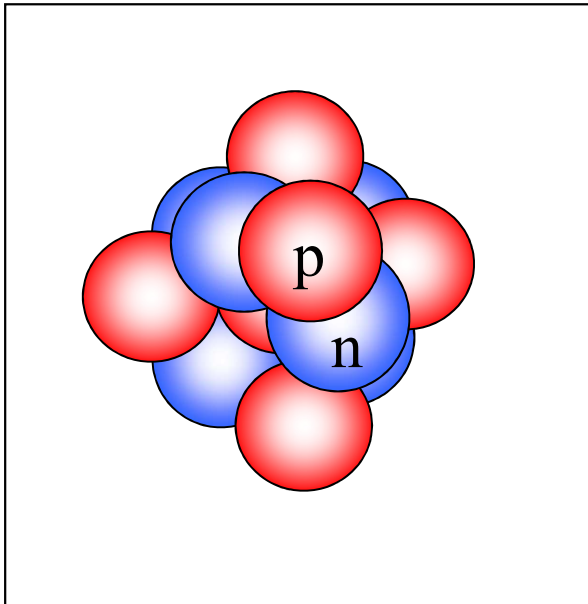
Az atommag



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

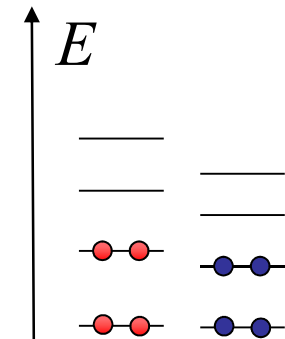
Z (rendszám) = protonszám

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



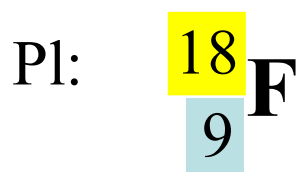
Izotóp

Azonos rendszámú de eltérő tömegszámú atomok

⇒ azonos protonszám eltérő neutronszám

Ugyanannak az elemnek a módosulatai,

⇒ kémiai tulajdonságaik azonosak.



instabil
(radioaktív)



stabil

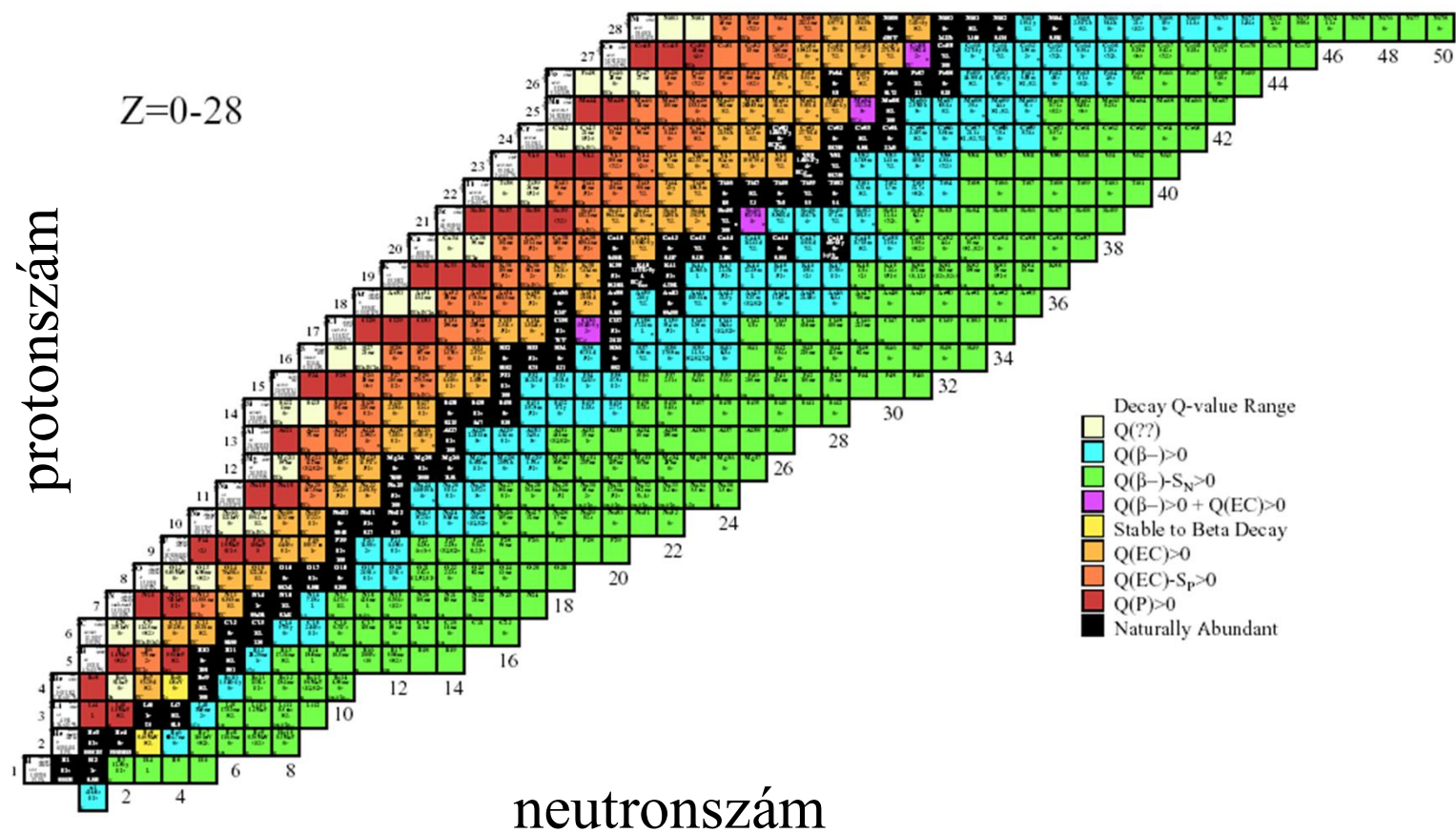


instabil
(radioaktív)

izotóp \leftrightarrow radioaktív izotóp

Izotóptáblázat

Table of Isotopes (1998)



The chart displays the following information for each nuclide:

- Chemical Symbol:** Located at the top of each box.
- Mass Number (A):** Located at the top left of each box.
- Atomic Number (Z):** Located at the top right of each box.
- Neutron Number (N):** Located at the bottom left of each box.
- Decay Mode:** Indicated by the color of the box (red for alpha, blue for beta minus, green for beta plus/electron capture, orange for electron capture, yellow for stable).
- Half-life:** Indicated by the text 't_{1/2}' followed by the value and unit.
- Stability:** Indicated by 's' for stable and 'u' for unstable.

The chart is labeled "protonszám" (proton number) on the left and "neutronszám" (neutron number) at the bottom.

Bomlások és részecskék

(sugárzások)

α - bomlás

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

β -bomlás: β^-
 β^+

β^- részecske = elektron

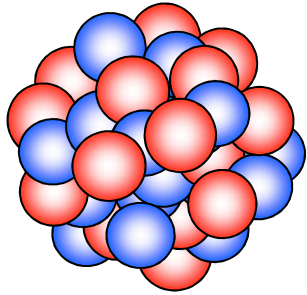
β^+ részecske = pozitron

Izomer magátalakulás

γ -sugárzás

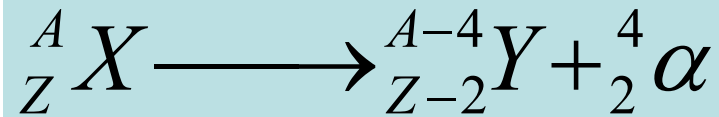
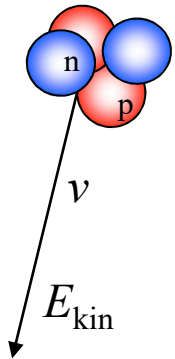
K-elektron befogás

karakterisztikus
Röntgen-foton



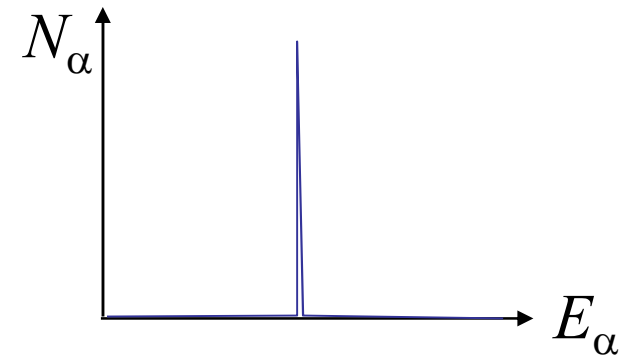
α - bomlás

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

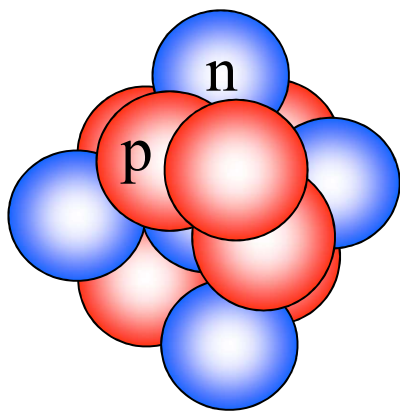
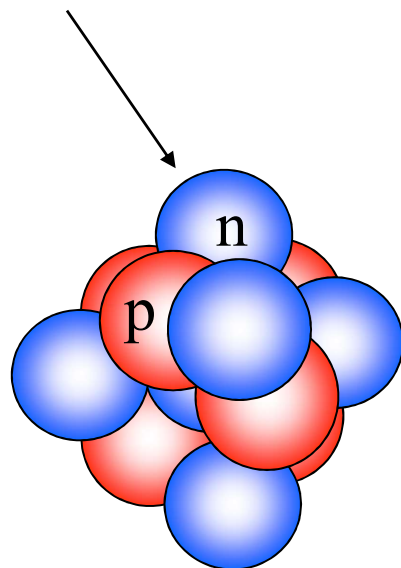


Vonalas energiaspektrum

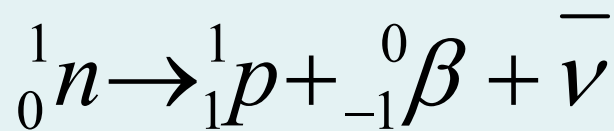
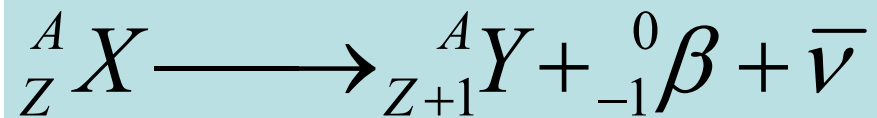
$E_\alpha \sim \text{MeV}$



neutrontúlsúly

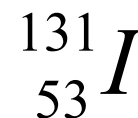
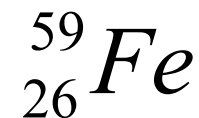
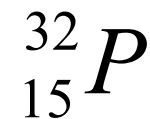
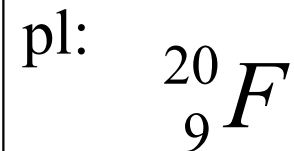


β^- - bomlás



az atommagban
marad

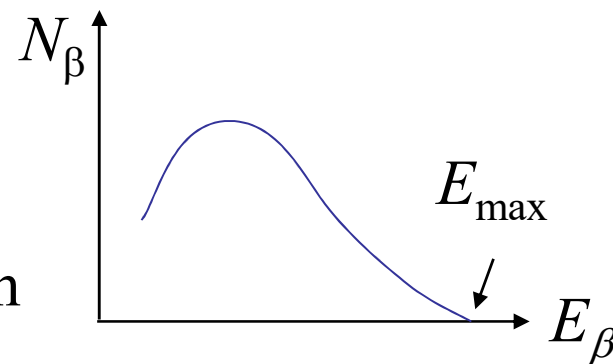
kilép



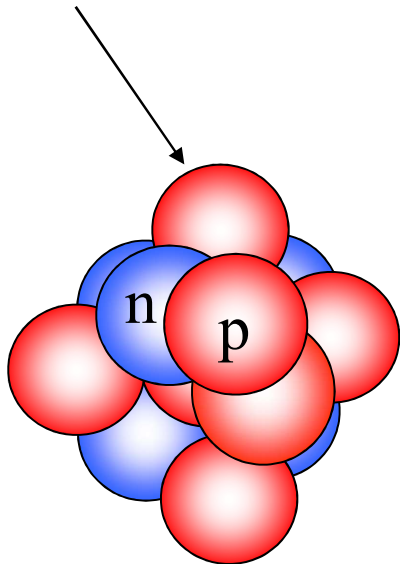
e^- β^- -sugárzás

$\bar{\nu}$ folytonos
energiaspektrum

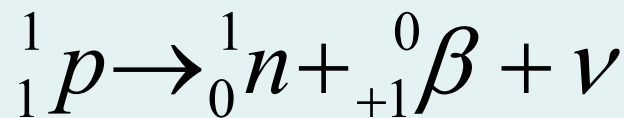
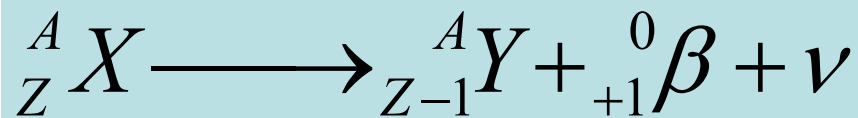
jelölések: $\beta^- = {}^0_{-1} \beta = e^-$



protontúlsúly

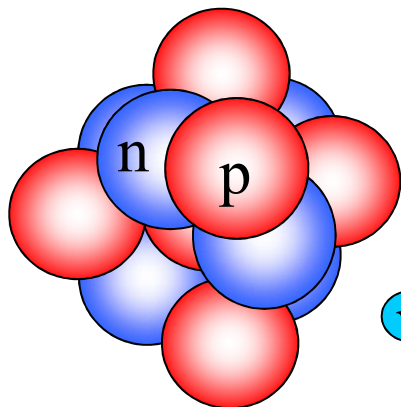


β^+ - bomlás

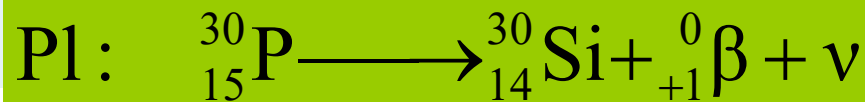


az atommagban
marad

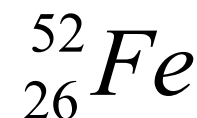
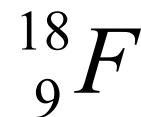
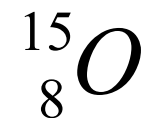
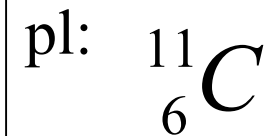
kilép



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

$$E=mc^2$$

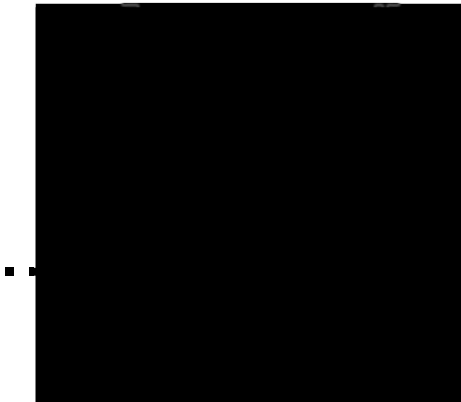
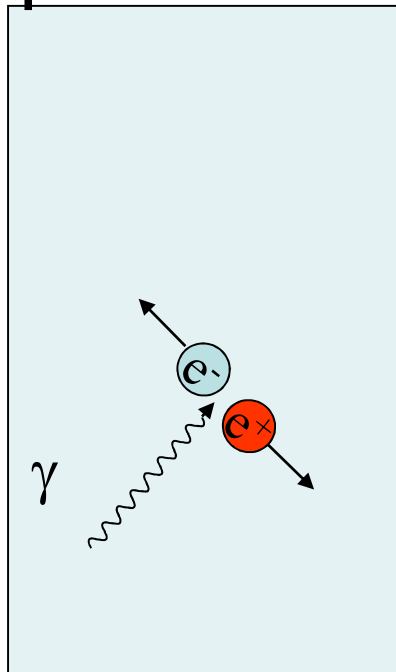
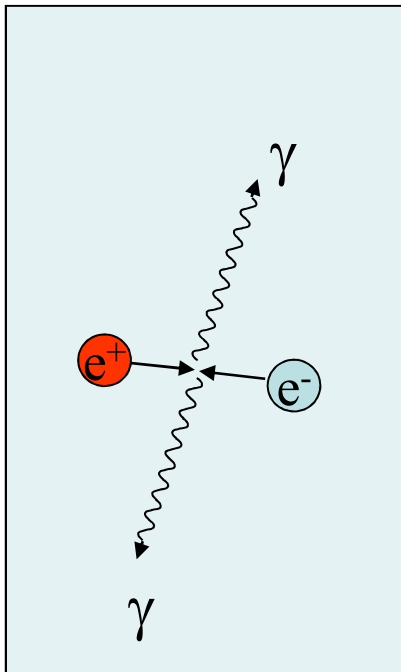
kötött nukleon:

alacsonyabb energiaszint: kisebb tömeg!



Kis kitérő: elektron - pozitron

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



Einstein:

tömeg-energia
ekvivalencia

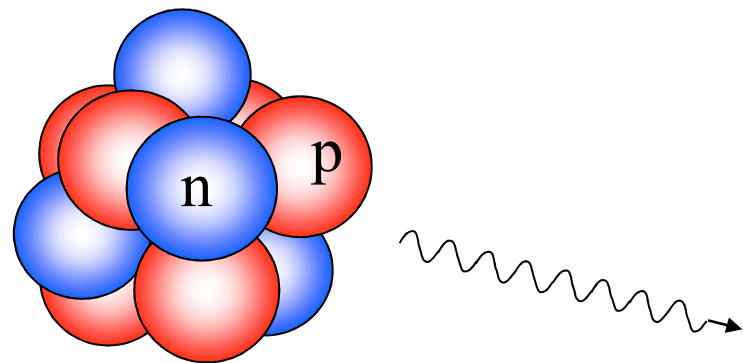
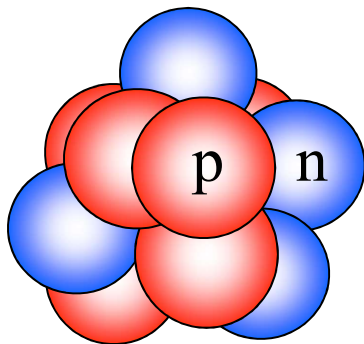
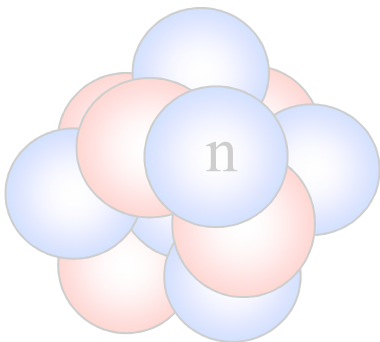
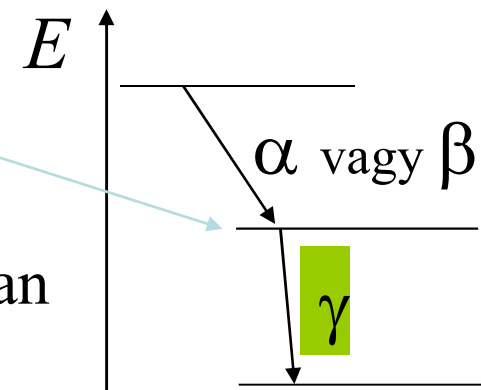
$$E=mc^2$$

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

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.

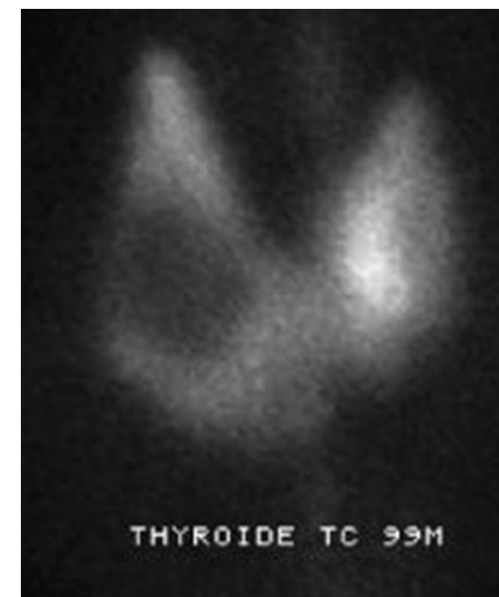
Izomer magátalakulás

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

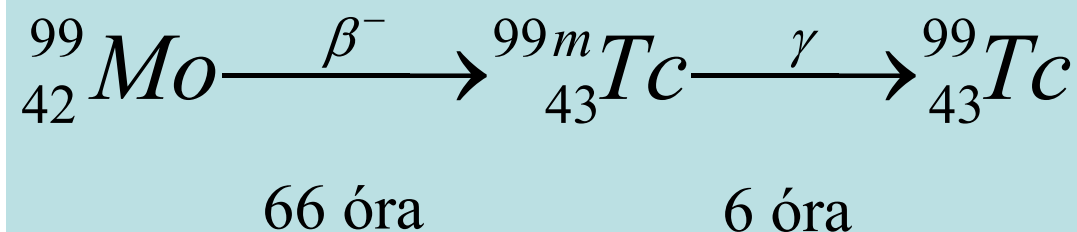
A két folyamat szeparálható.

Tisztán γ -sugárzó izotóp állítható elő!

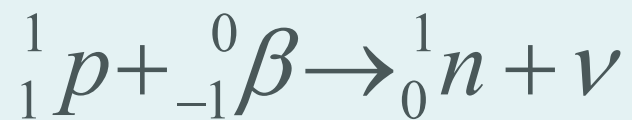
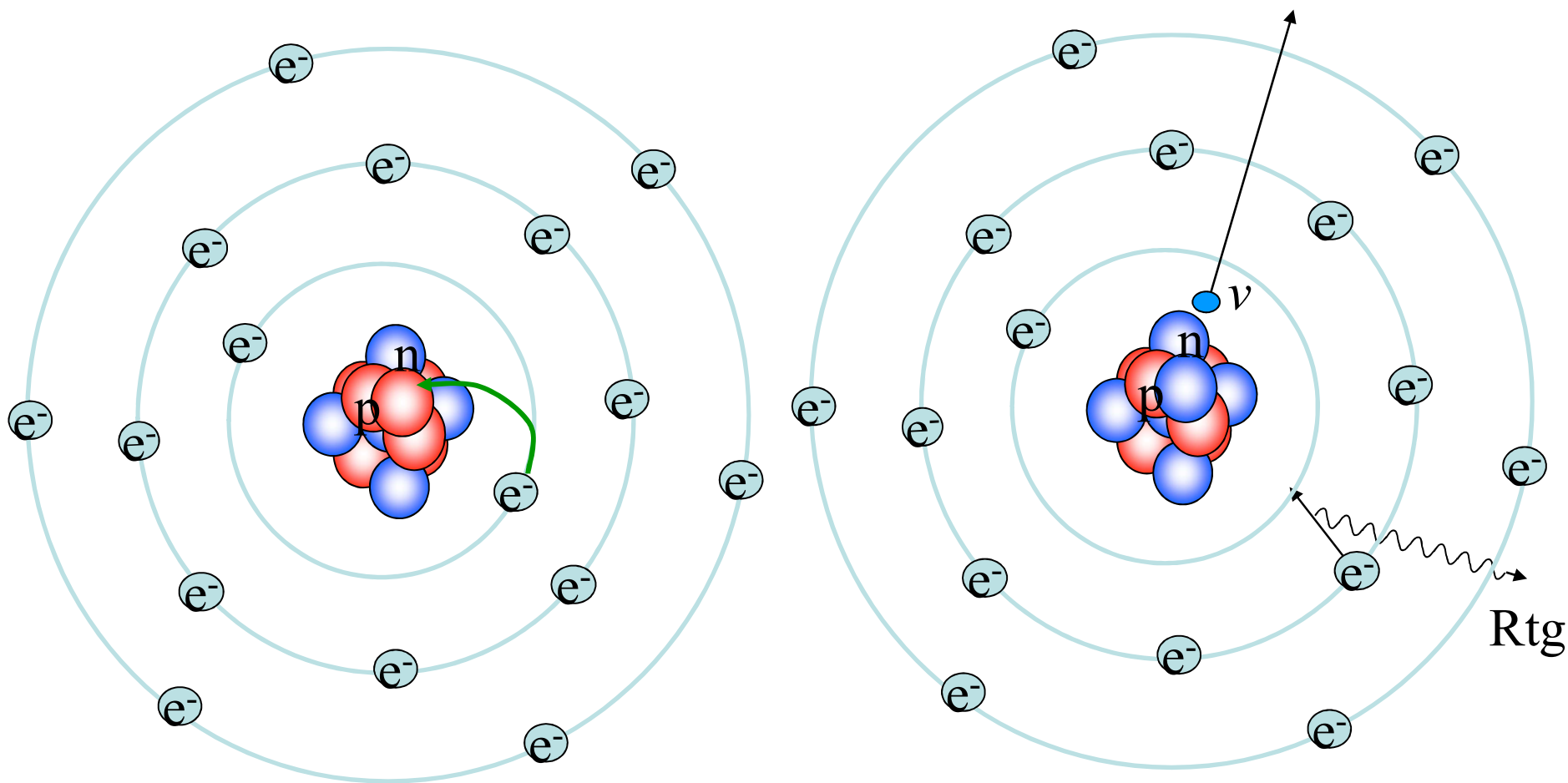
=> Izotópdiaгностика



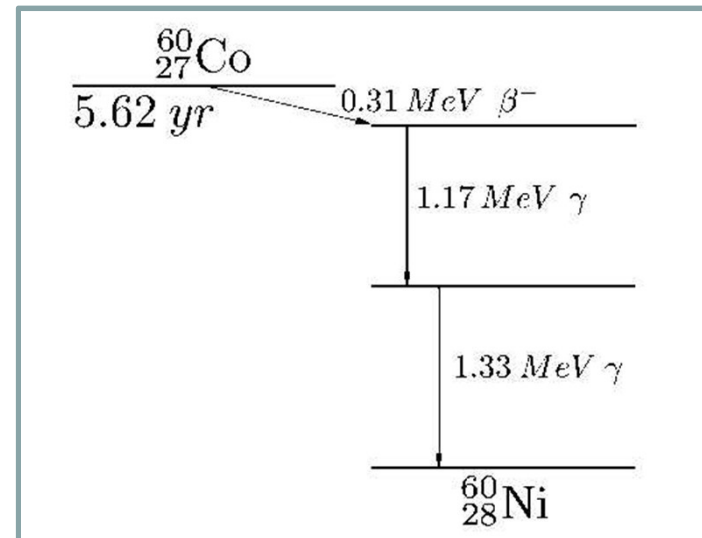
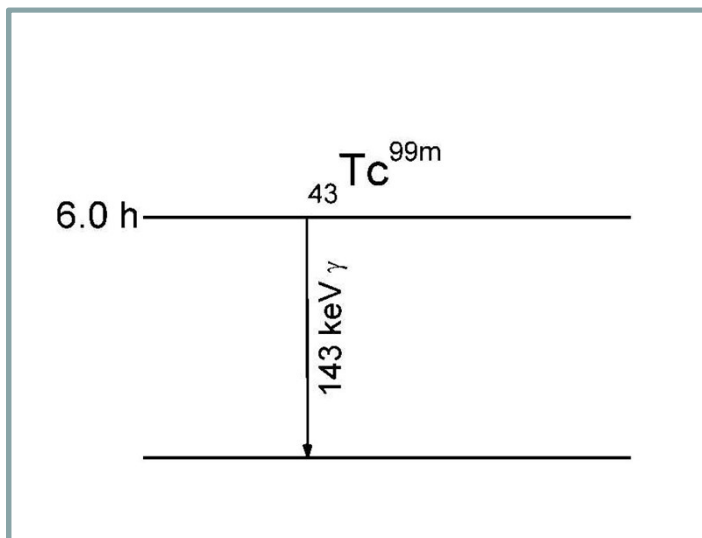
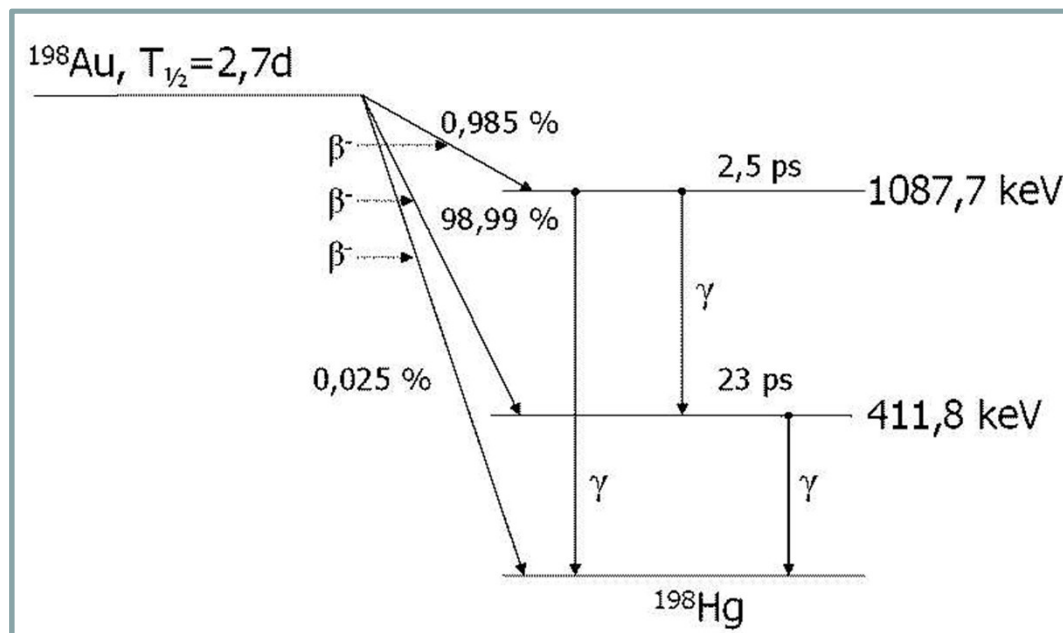
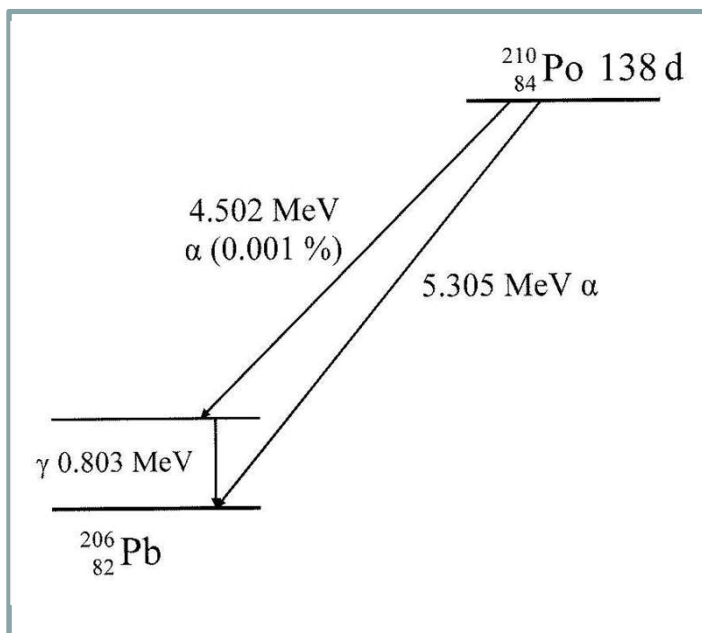
Pl: ^{99m}Tc



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

- 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

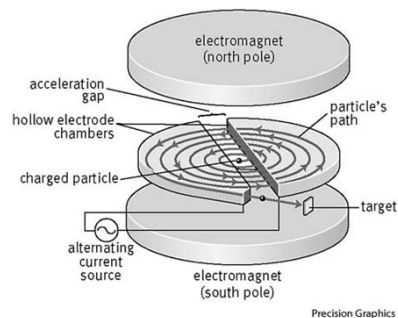
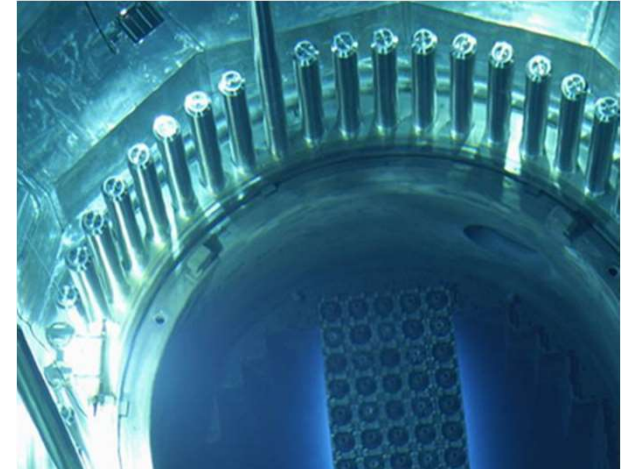
Hogyan állíthatunk elő izotópokat?

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

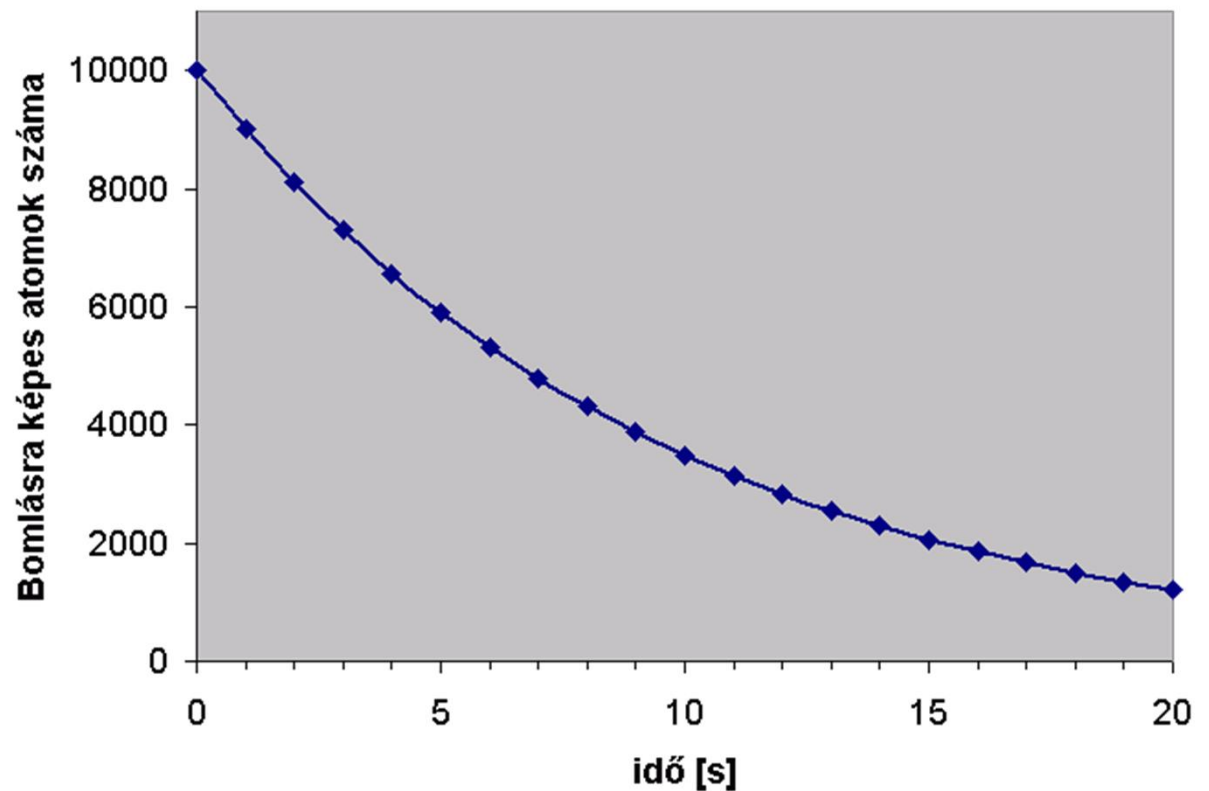
- 1 sec múlva: 9000 ($10000 \times 0,1 = 1000$ elbomlott)
- 2 sec múlva: 8100 ($9000 \times 0,1 = 900$ elbomlott)
- 3 sec múlva: 7290 ($8100 \times 0,1 = 810$ elbomlott)
- 4 sec múlva: 6561 ($7290 \times 0,1 = 729$ elbomlott)
-

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

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

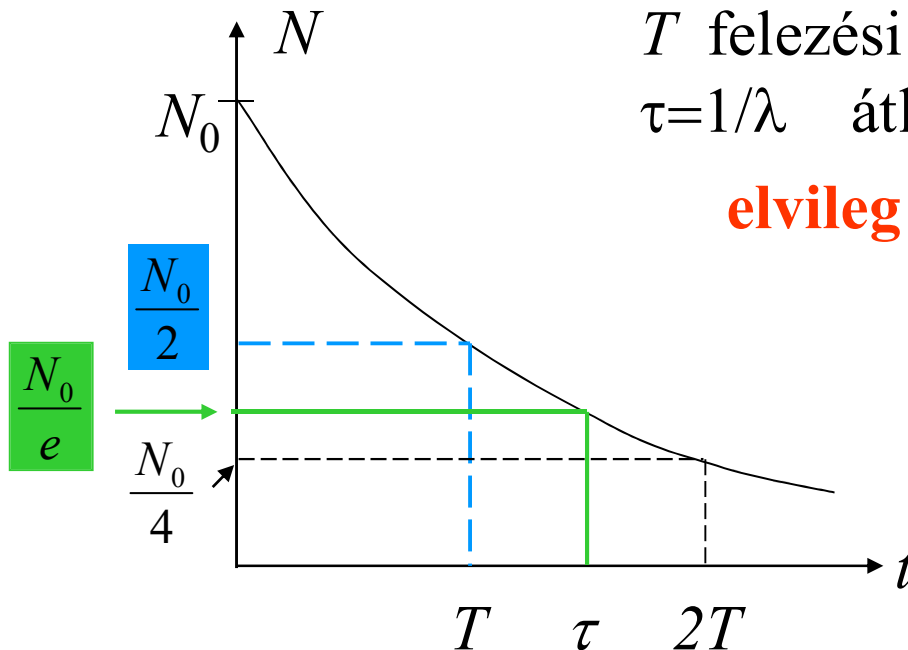
$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

λ bomlásállandó (bomlási valószínűség)

T felezési idő

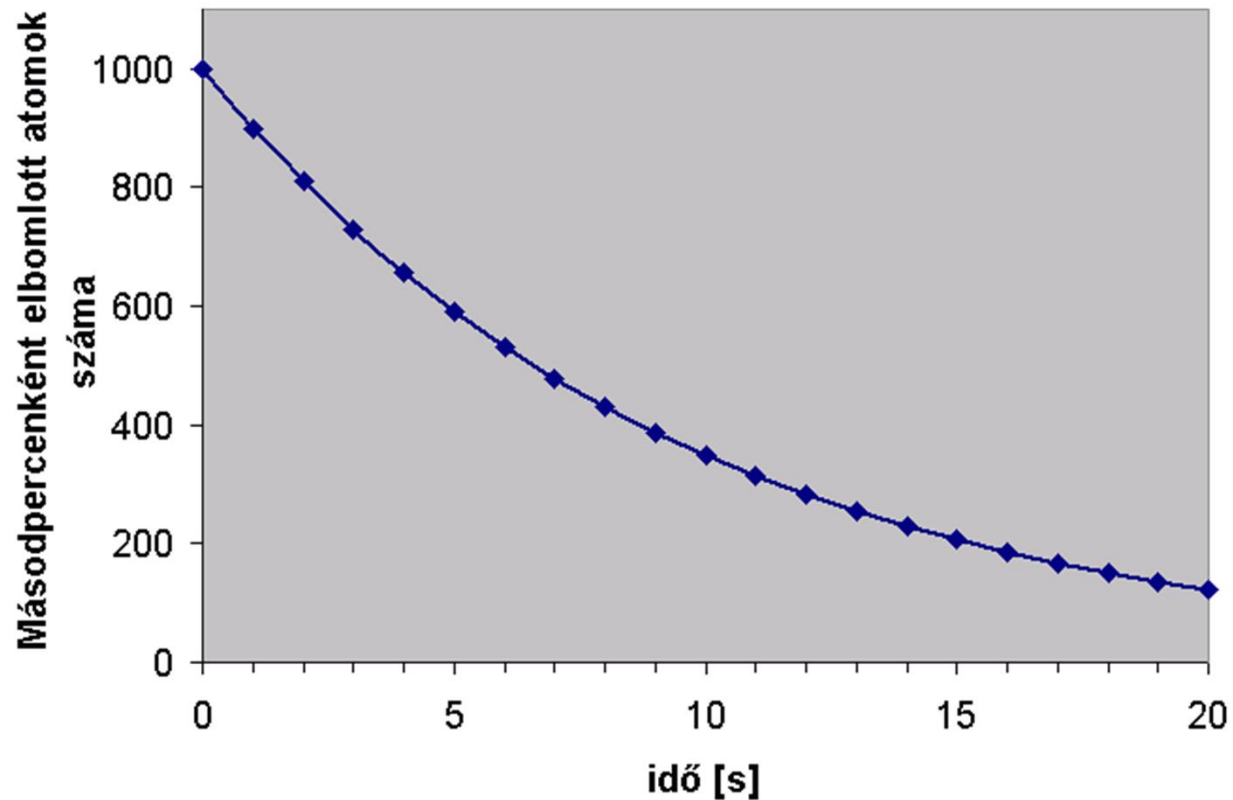
$\tau = 1/\lambda$ átlagos élettartam

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

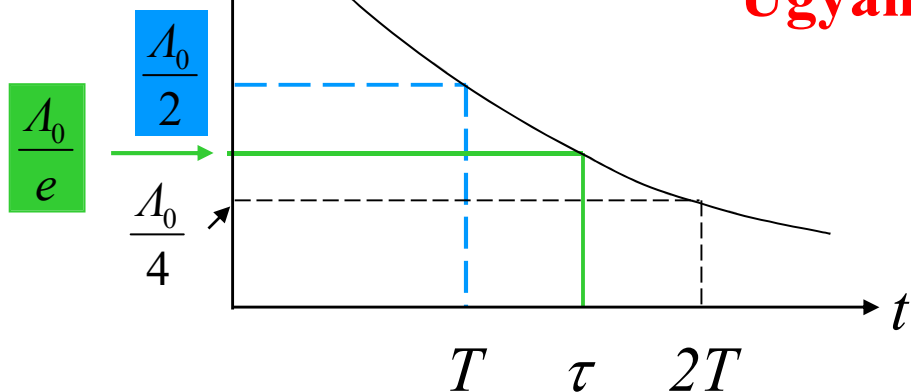
$$A = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \quad \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

$$A = \lambda N$$

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

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

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.

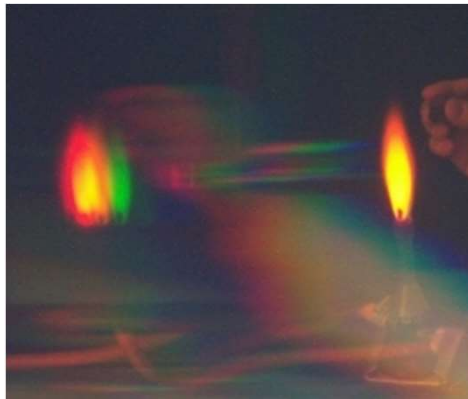
$$\text{eV} = \text{elemi töltés} \times 1 \text{ Volt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 0,16 \text{ aJ}$$

Tipikus energia-nagyságrendek a mikrovilágban

Külső elektronok
gerjesztése,
kilökése

eV (aJ)

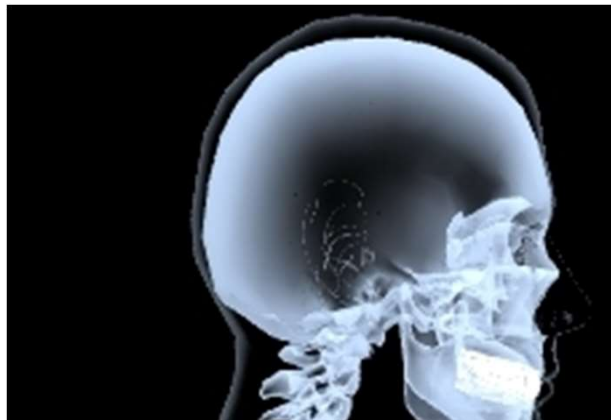
fény



belső elektronpályák
közti átmenet

keV (fJ)

röntgensugár

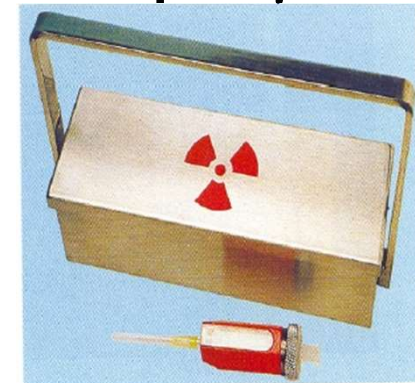


atommag-
átalakulás

MeV (pJ)

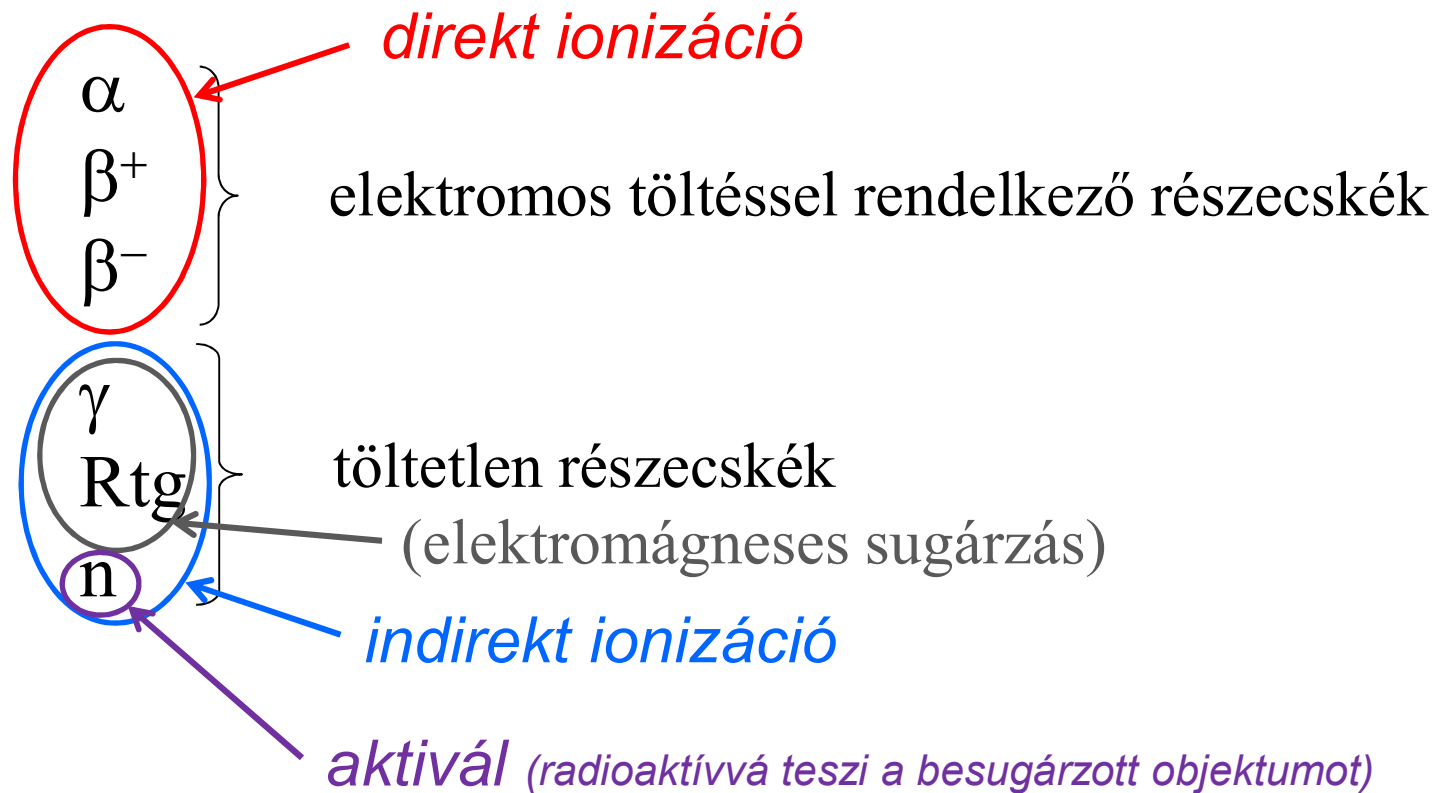
radioaktív
sugárzás

pl. γ



Sugárzások és anyag kölcsönhatása.

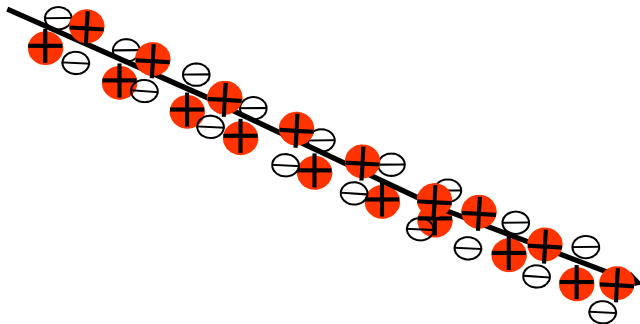
A sugárzások elnyelődése



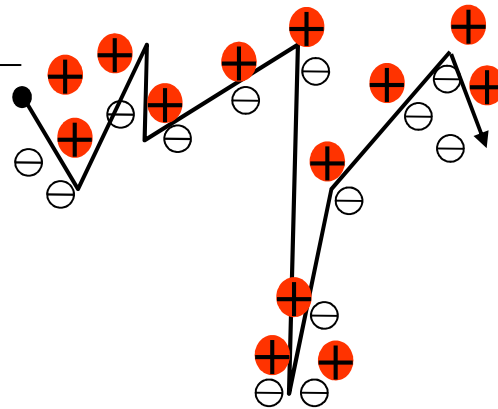
Töltött részecskék elnyelődése

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

α



β^-



Hatótávolság

α -részecske

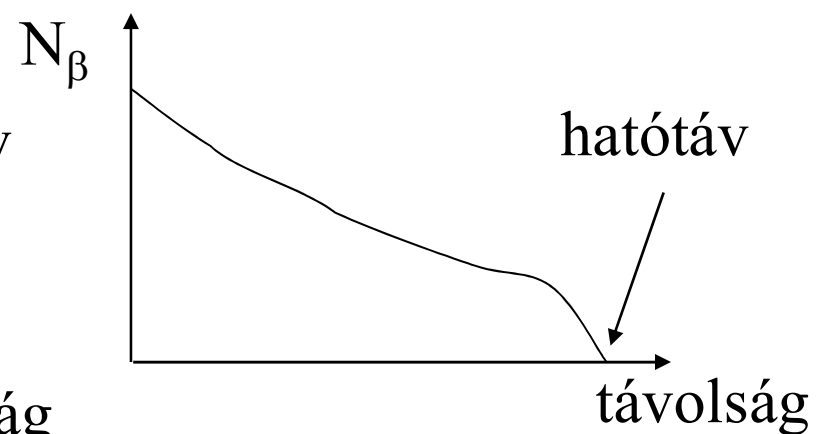
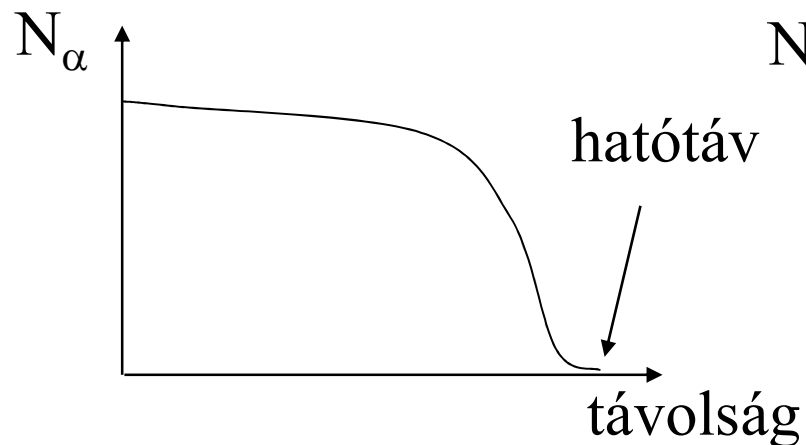
levegőben **néhány cm**

szövetben **0,01-0,1 mm**

β^- -részecske

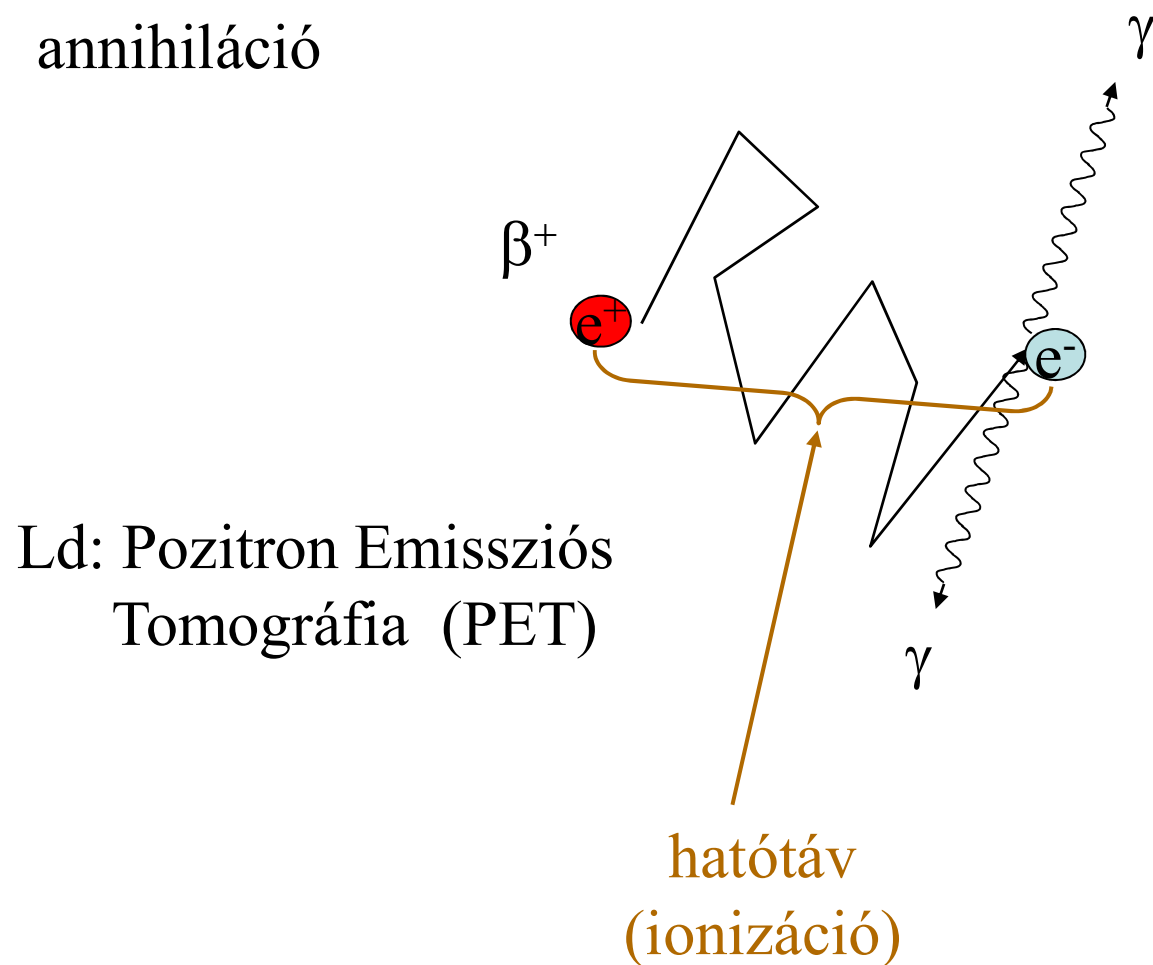
levegőben **m** nagyságrendű

szövetben **cm**

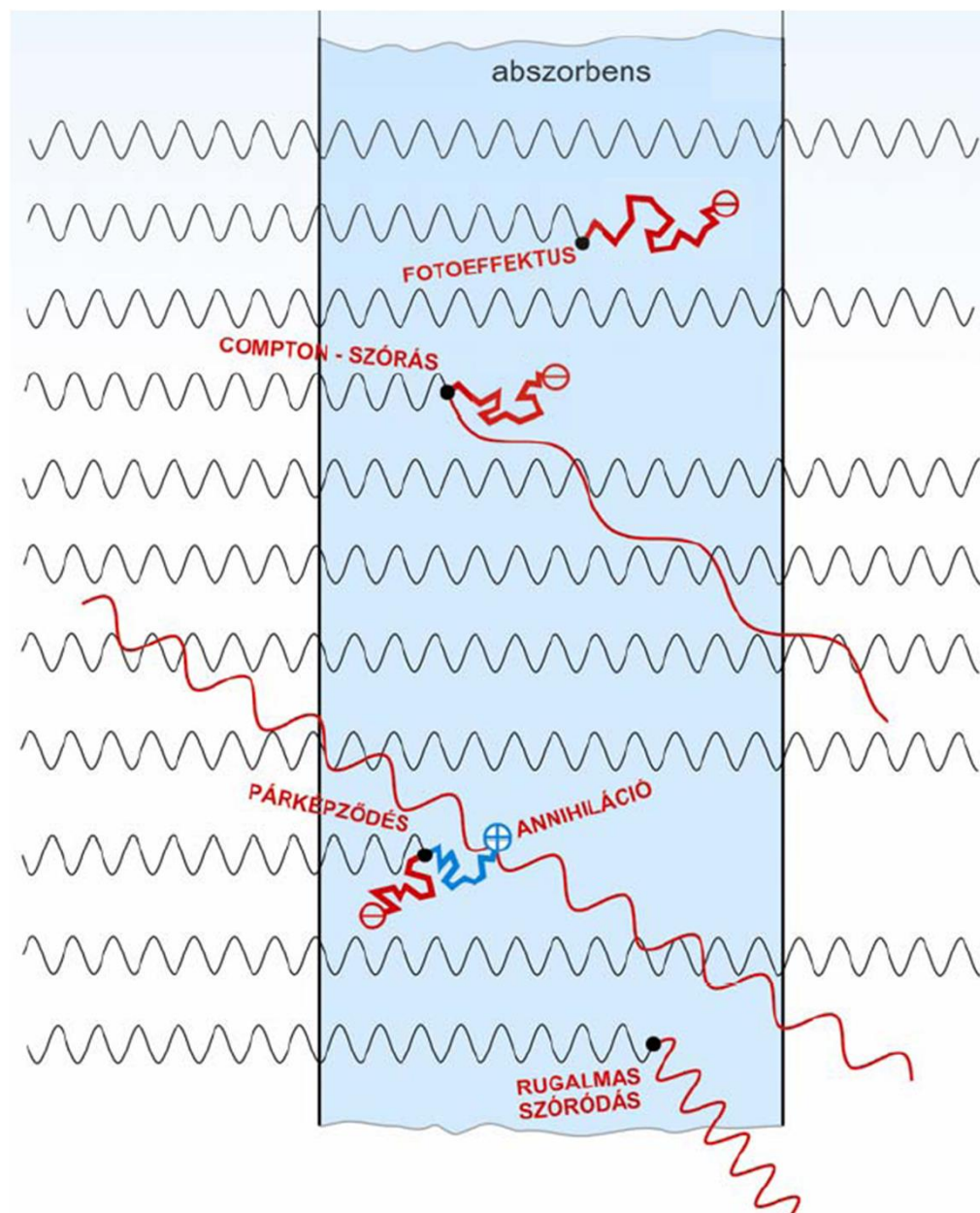


β^+ -sugárzás

annihiláció



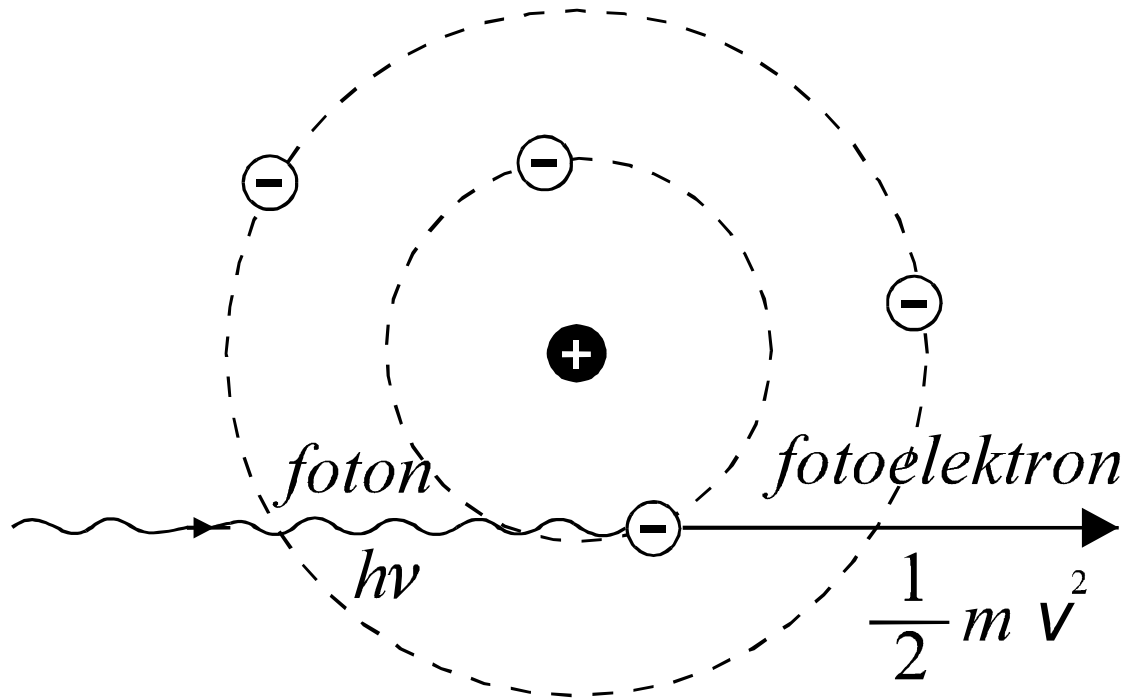
A γ - (és Rtg) sugárzás elnyelődése



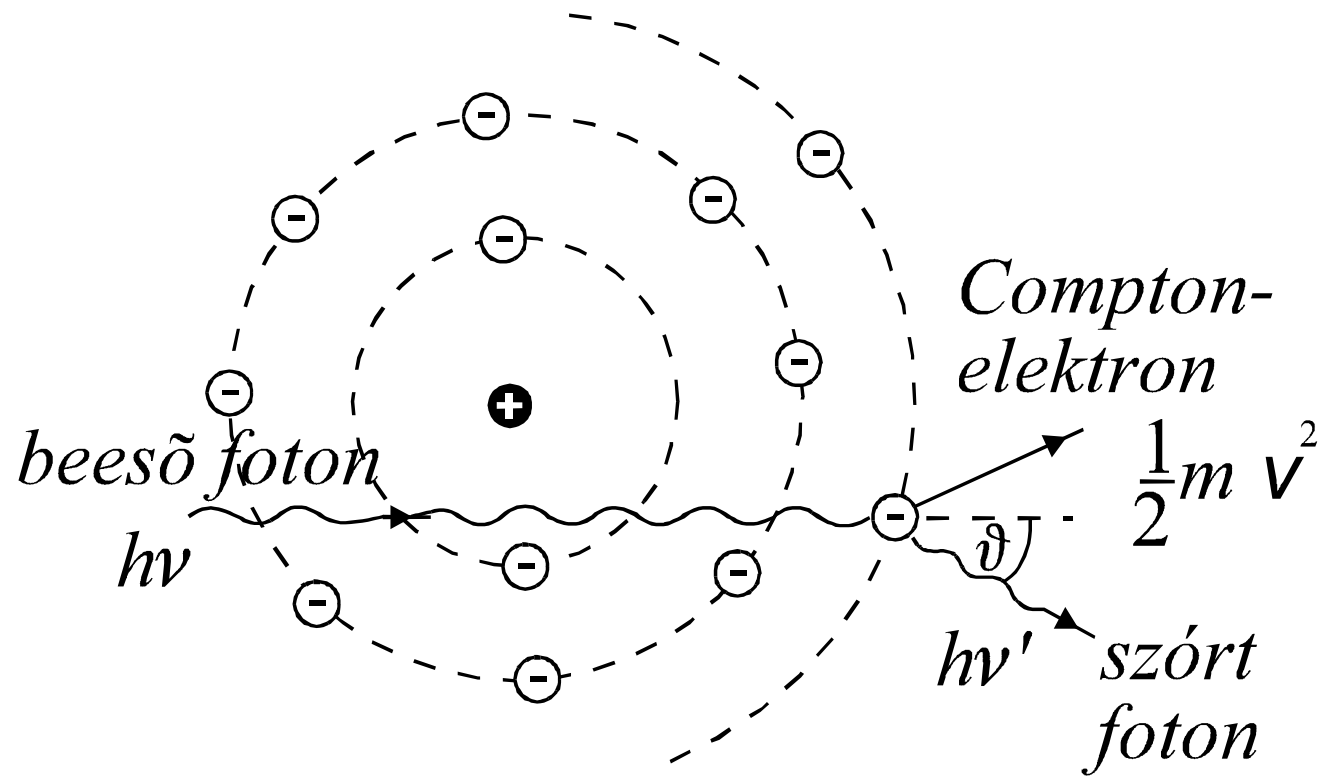
Véletlenszerűen fellépő
effektusok által megy végbe:

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

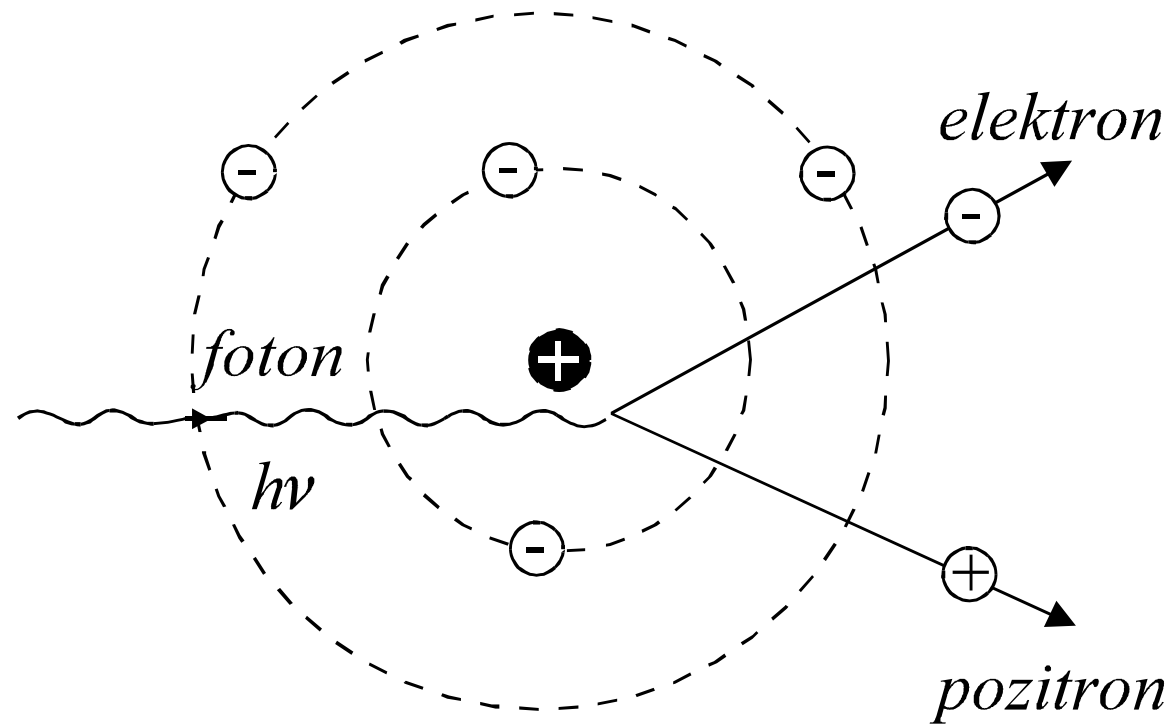
Fotoeffektus



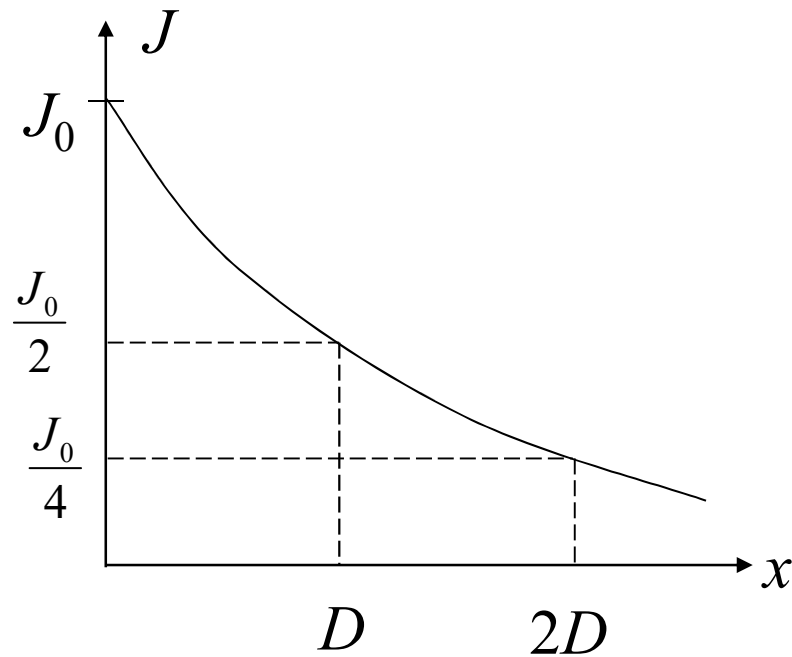
Compton effektus



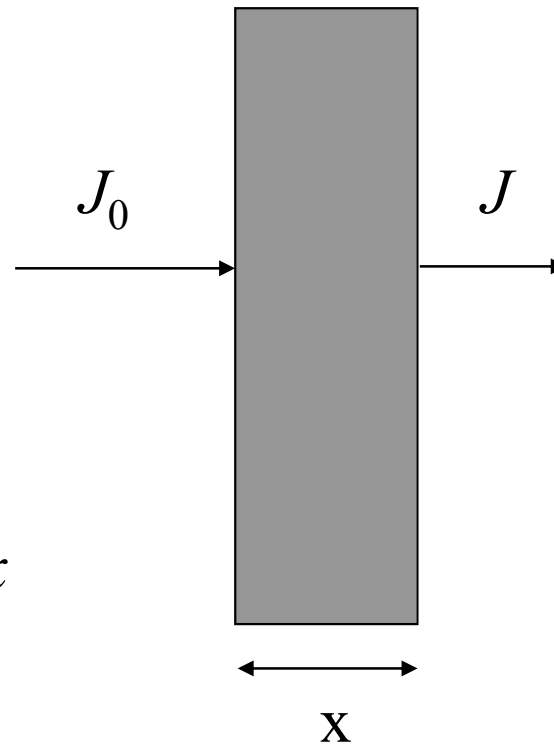
Párképződés



γ - és röntgensugárzás gyengülése

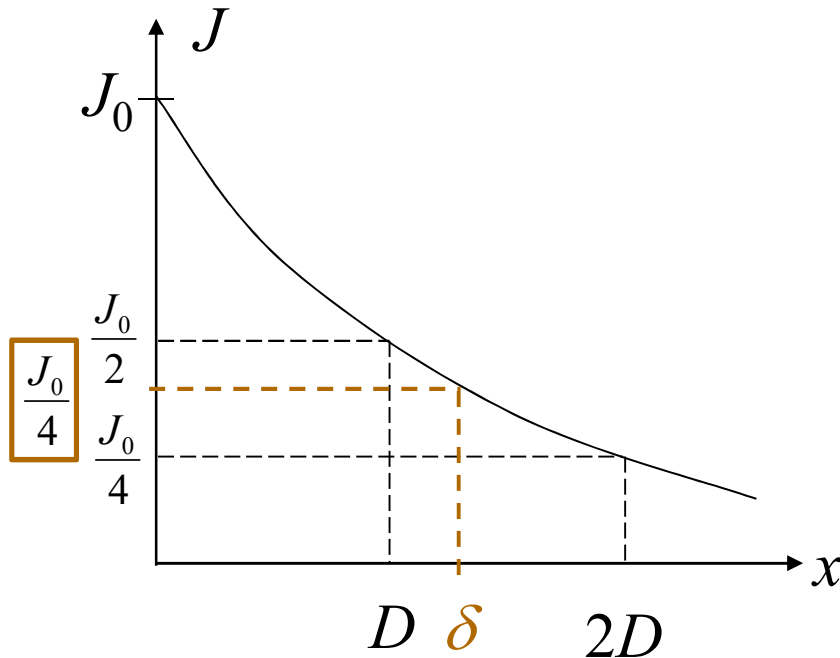


$$J = J_0 e^{-\mu x}$$



nincs 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)
= μ (anyag, ρ , E_{foton}) $\sim \rho$

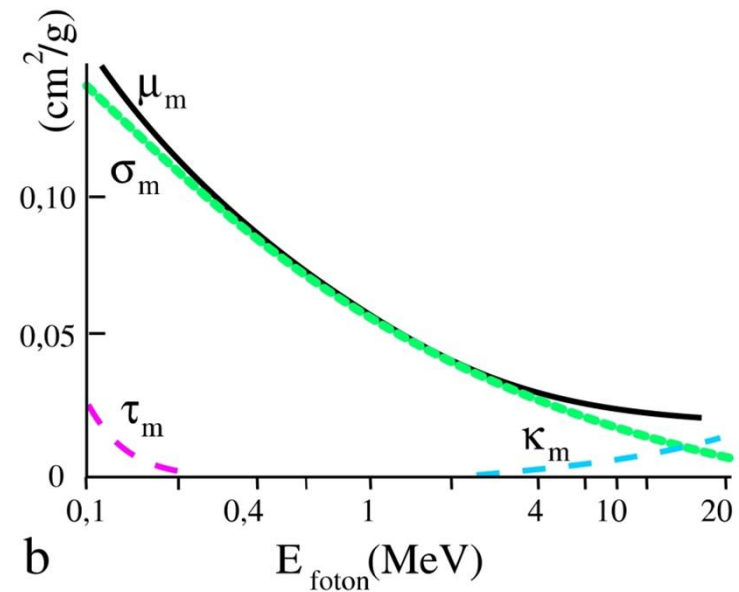
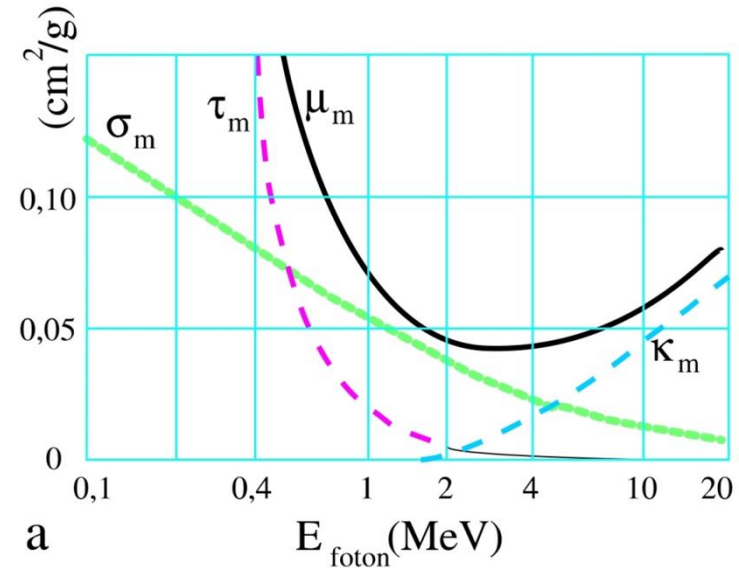
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{tömeggyengítési együttható}$$

Tömeggyengítési
együttható:

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

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

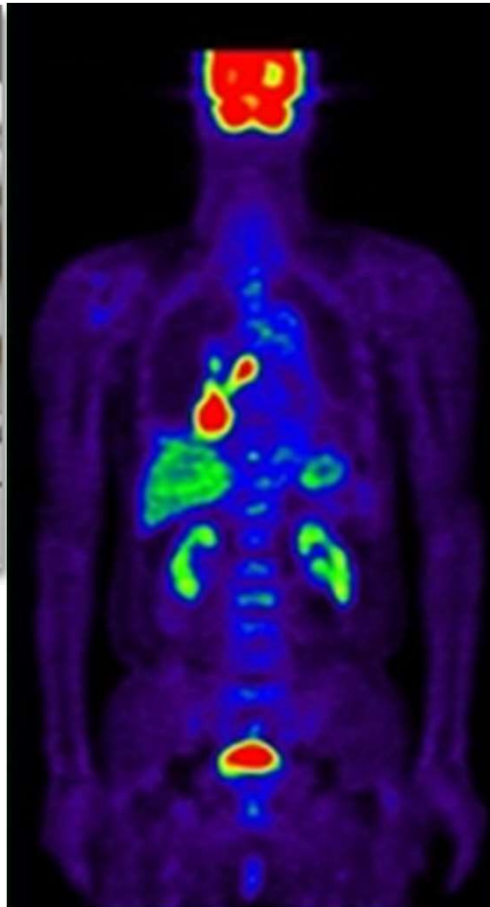
$$\tau_m = c\lambda^3 Z^3$$



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)

