

Sugárfizikai ismeretek

Átfogó sugárvédelmi továbbképzés

SE 2023 április

Voszka István

1.1. Ismertesse az atomszerkezeti alapfogalmakat

Atommag: $d = 10^{-15}\text{-}10^{-14}\text{ m}$

benne protonok (számuk \rightarrow rendszám-Z)

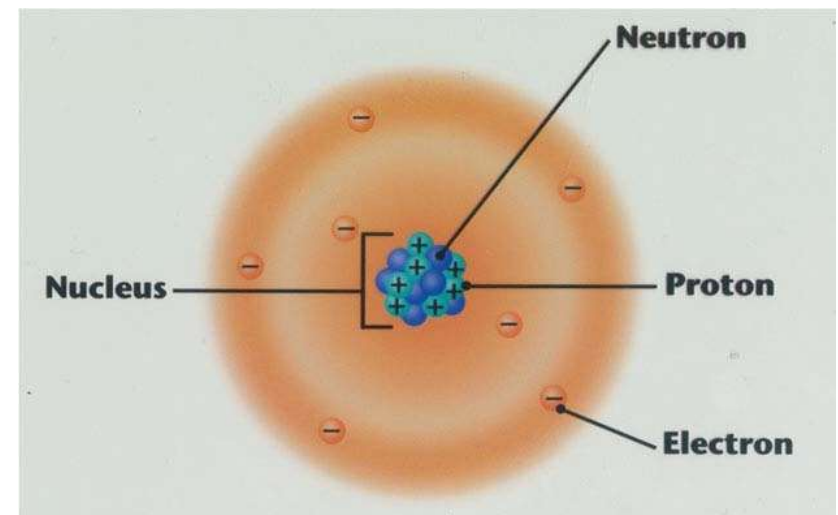
neutronok (protonok + neutronok [nukleonok] száma együtt \rightarrow tömegszám-A)

Magsugárzások: α , β , γ

Elektronburok: $d \approx 10^{-10}\text{ m}$

elektronok száma = protonok száma

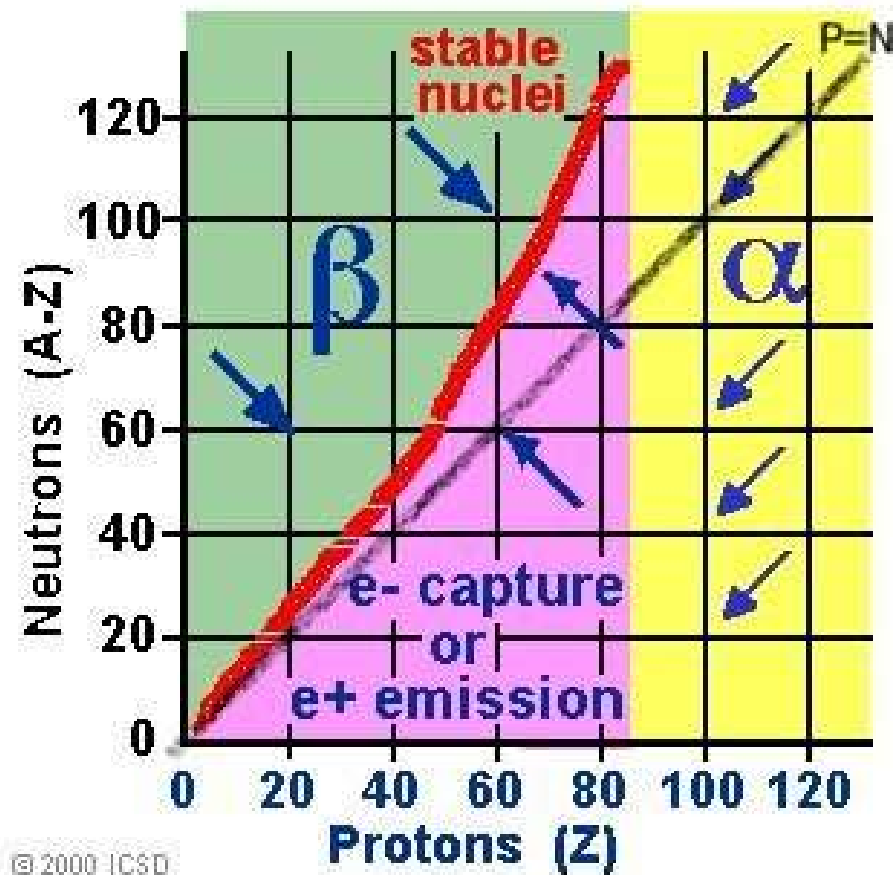
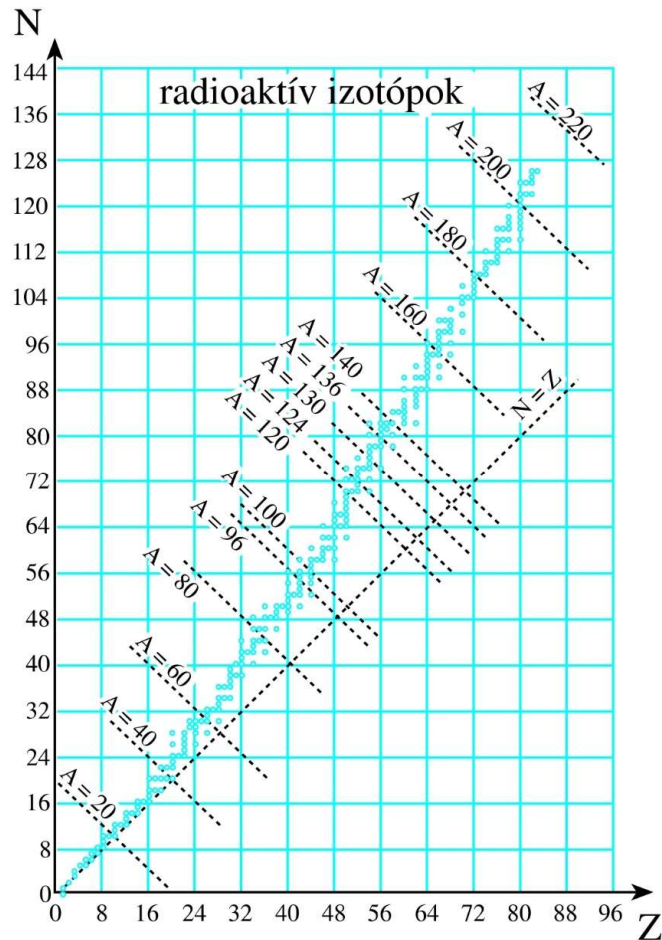
elhelyezkedés meghatározott sugarú és energiájú pályákon



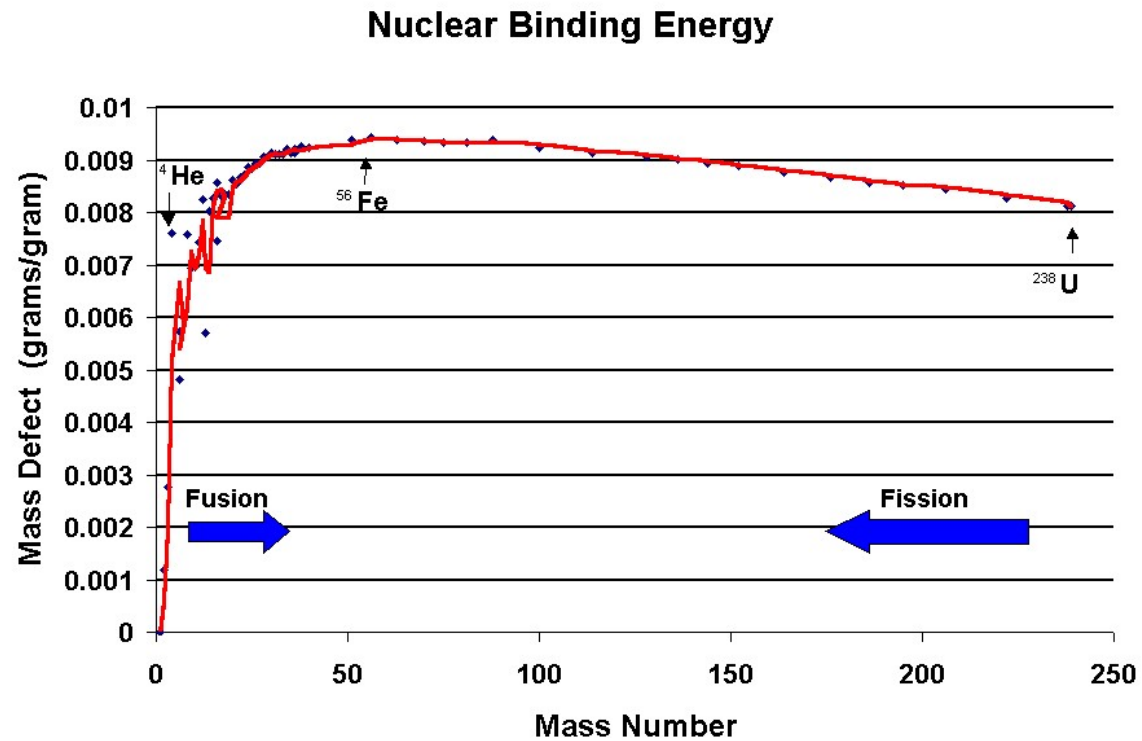
1.2. Az atommag stabilitása, radioaktív bomlás törvénye, bomlási sorok

Magerők, az atommag stabilitása

A protonok és neutronok között vonzó- és taszítóerők hatnak

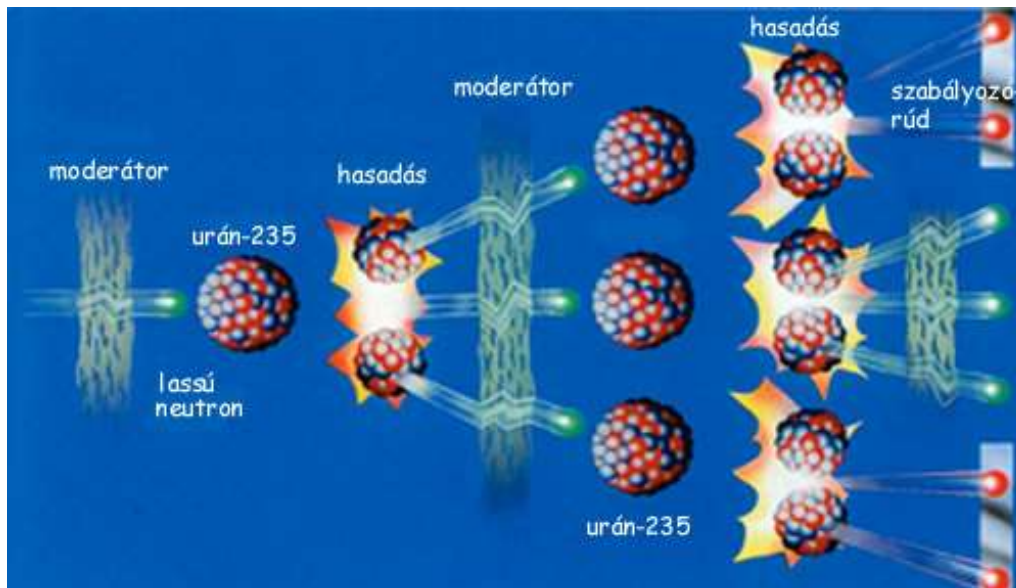


Az egy nukleonra jutó kötési energia közepes méretű magok esetén a legnagyobb (legstabilabb magok)

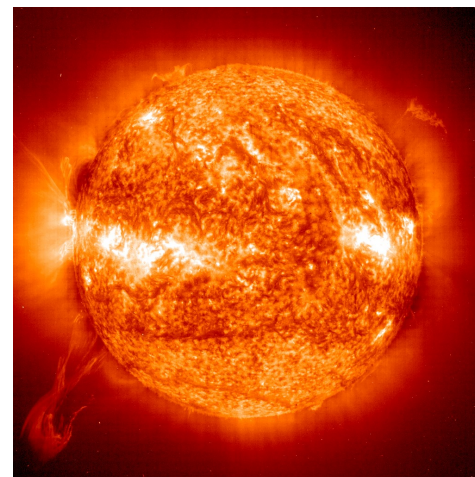
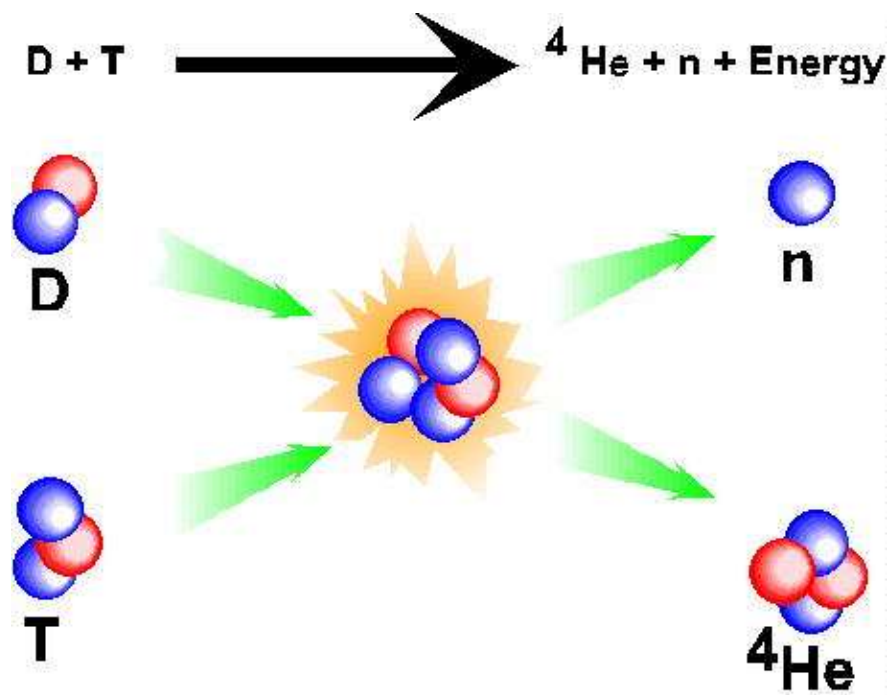


Ezen állapot elérhető:

- nehéz magok hasadásával (atomreaktor, atombomba)



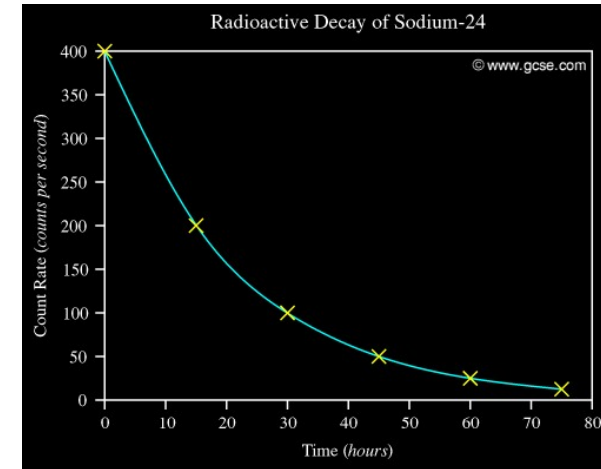
- könnyű magok fúziójával (fúziós reaktor, H-bomba)



4. Radioaktív bomlás, aktivitás

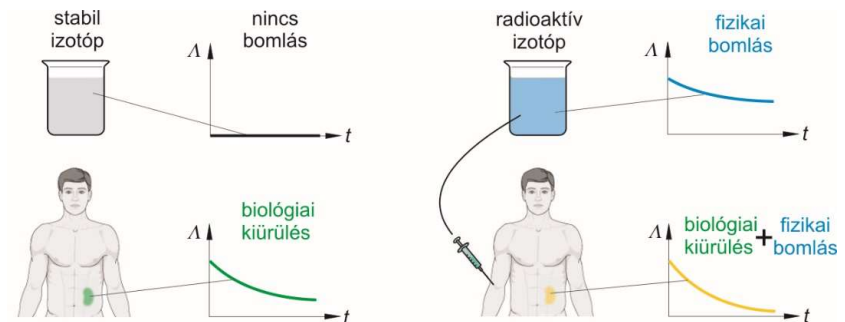
Bomlási sebesség: $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ $\frac{dN}{dt} = \Lambda$
 (aktivitás) [bomlás/s = 1/s = Bq (becquerel)]

$$(1 \text{ Ci (curie)} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq})$$



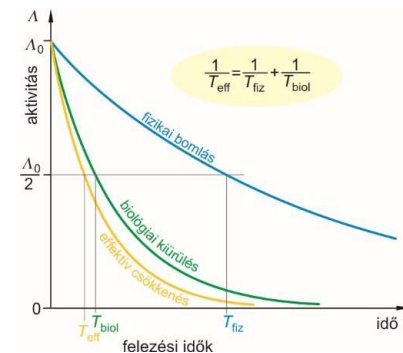
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \lambda = \frac{0,693}{T}$$

$$\lambda = \frac{1}{\tau} \quad \Lambda = \Lambda_0 e^{-\lambda t}$$

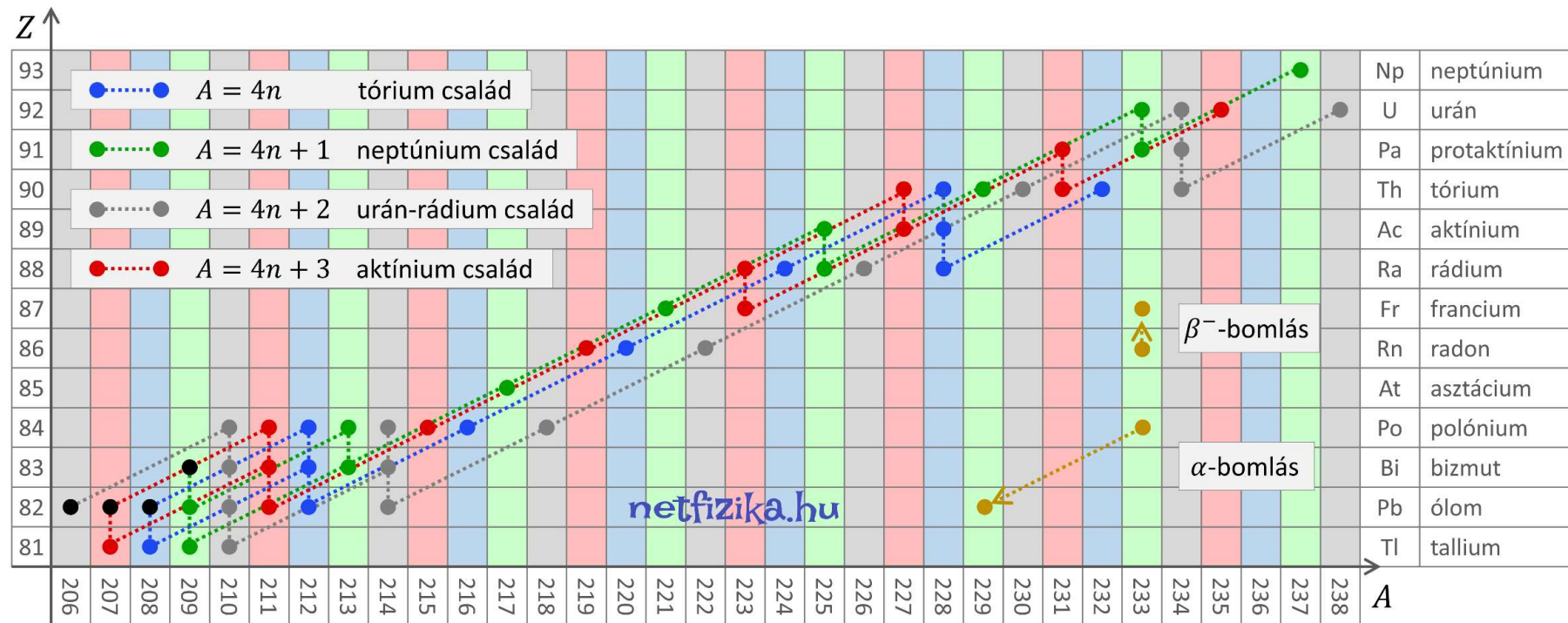


Kapcsolat a felezési idők között:

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{fiz}} + \frac{1}{T_{biol}}$$



Radioaktív bomlási sorok (családok)



Felezési idők nagyságrendje: neptúnium család: millió év, a többi: milliárd év

1.3. Magreakciók sebessége, az aktivitás időtörvénye

Magreakciók sebessége

$$R = \sigma \Phi N_A$$

σ - hatáskeresztmetszet

Φ – beeső részecskék fluxusa

N_A – a célmagok száma egységnyi felületen

Az aktiválás időtörvénye

$$dN/dt = \sigma \Phi N_A - \lambda N \quad \lambda - \text{bomlási állandó}$$

(ha $t = 0$ időpontban a keletkezés mértéke 0, akkor az ismert bomlástörvényt kapjuk)

1.4. Főbb magreakciók típusai, gyakorlati jelentőségük

(n, γ) reakciók a leggyakoribbak

Pl. Na-23 (n, γ) Na-24

Co-59 (n, γ) Co-60

(n,p) reakciók

Pl. N-14 (n,p) C-14 (β^-) N-14

P sugárzás

Pl. C-11 + p \rightarrow N-12 + γ

protondús magok előállítása (PET)

1.5. Ismertesse és jellemezze az ionizáló sugárzásokat

Magsugárzások

α -sugárzás

$2p+2n$ kis hatótávolság, nagy fajlagos ionizálóképesség – terápia

β -sugárzás

e^- , vagy e^+ , nagyobb hatótávolság, kisebb fajlagos ionizálóképesség

γ -sugárzás

elektromágneses, nagy áthatolóképesség

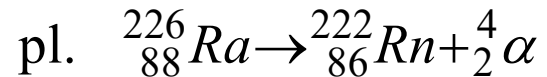
Elektronburokból

röntgensugárzás

elektromágneses, nagy áthatolóképesség

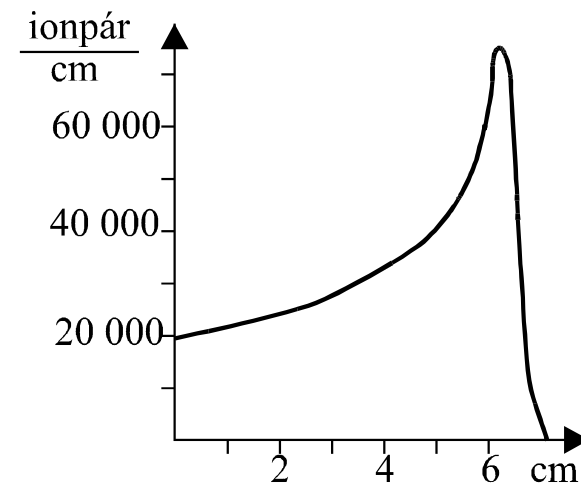
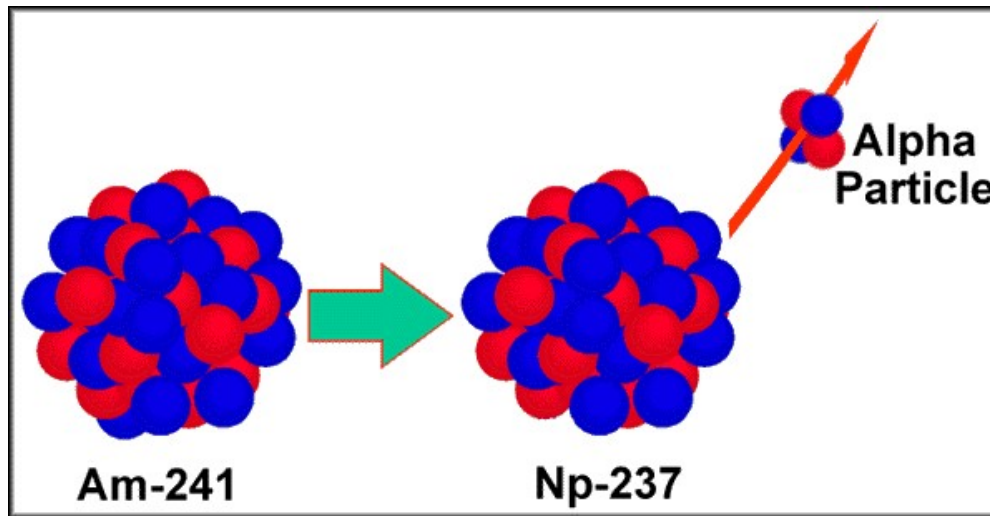
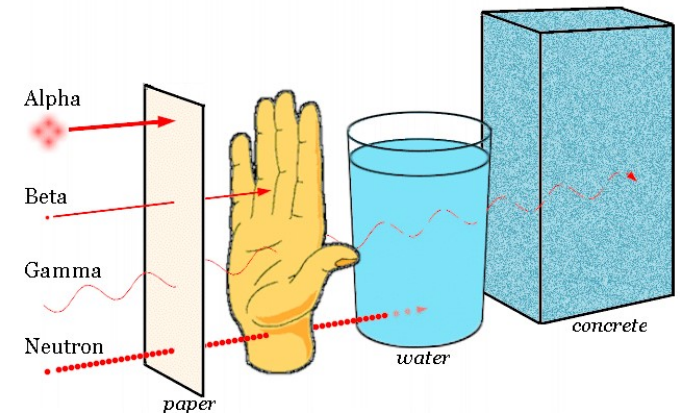
Alfa bomlás

Z 2-vel, A 4-gyel csökken



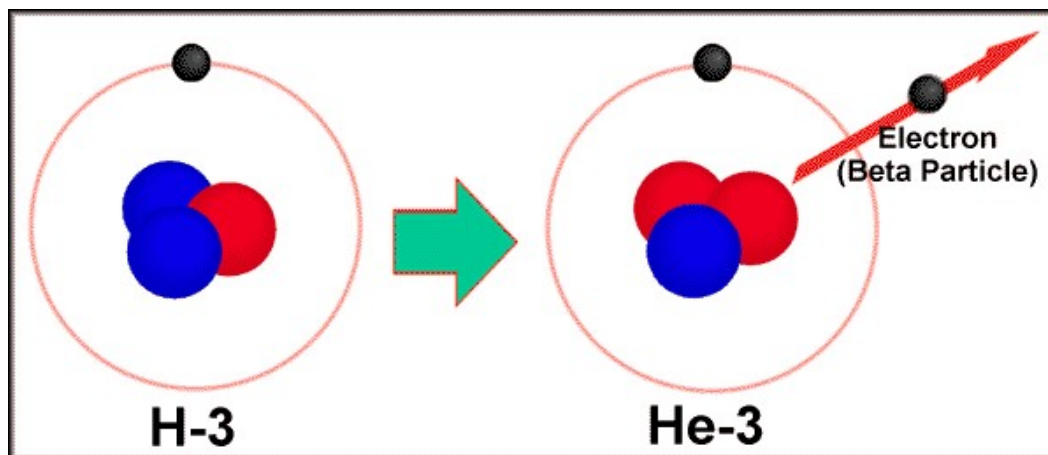
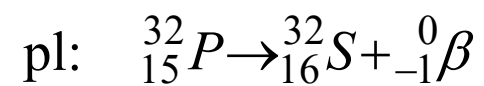
- meghatározott energiájúak (vonalas spektrum)
- hatótávolságuk rövid (vízben, szövetben néhányszor $10\ \mu\text{m}$)

Alkalmazás: csak terápia

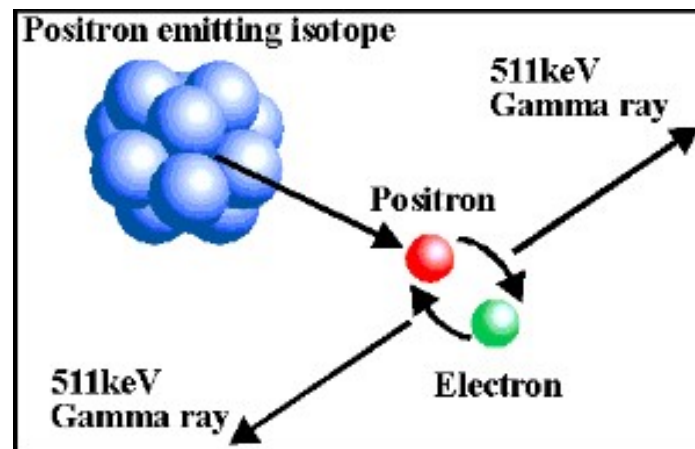
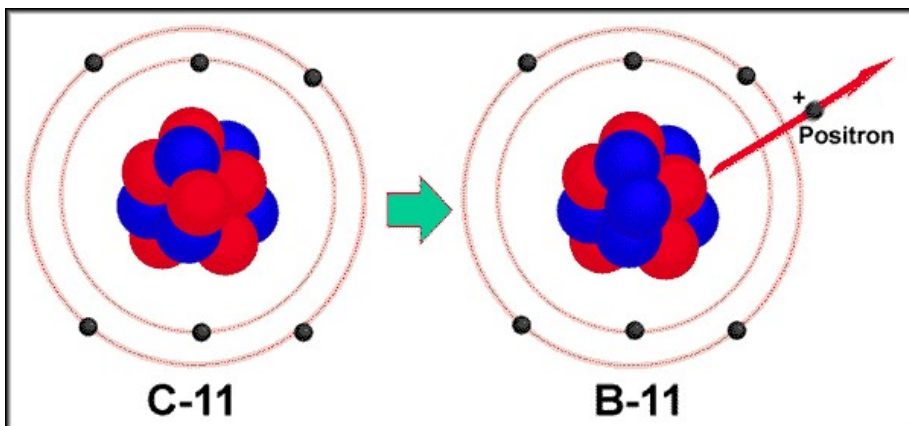
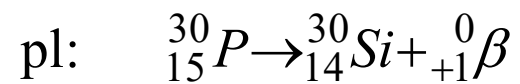


Béta bomlás

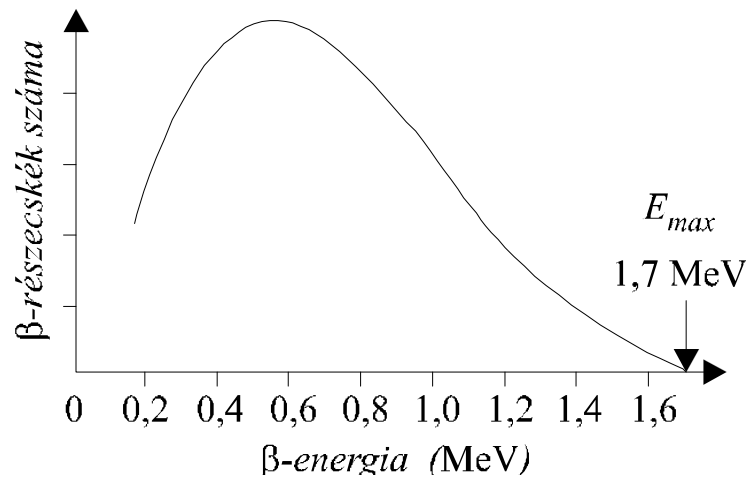
- negatív β -bomlás: Z 1-gyel nő



- pozitív β -bomlás: Z 1-gyel csökken



A mag energiavesztesége adott értékű, a spektrum mégis folytonos. Oka: neutrínó.



Alkalmazás: β^- : terápia és in vitro
 β^+ : PET

Gamma sugárzás

Az α - vagy β -bomlást követően a mag energiatartalékától elektromágneses sugárzás formájában szabadul meg.

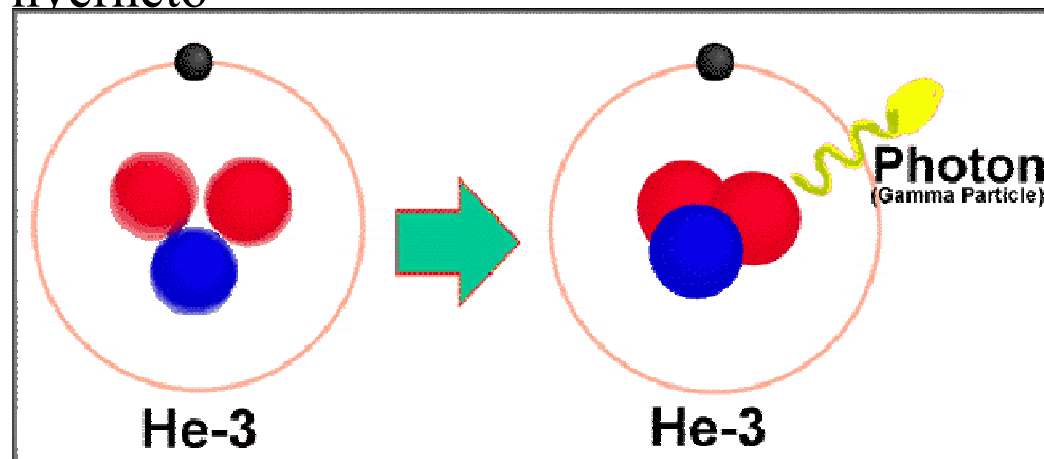
- prompt γ -sugárzás:

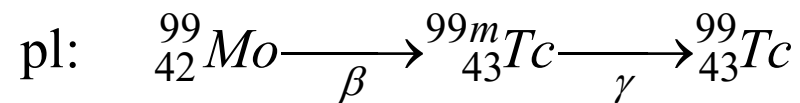
10^{-13} - 10^{-18} s-on belül követi a részecskesugárzást

- izomer magátalakulás:

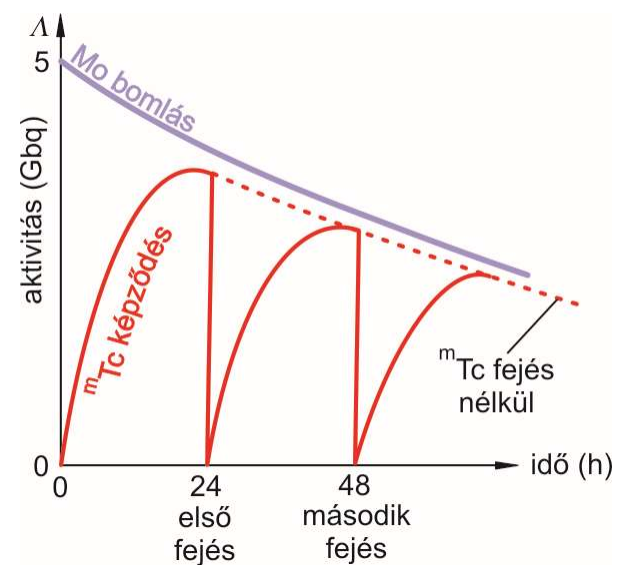
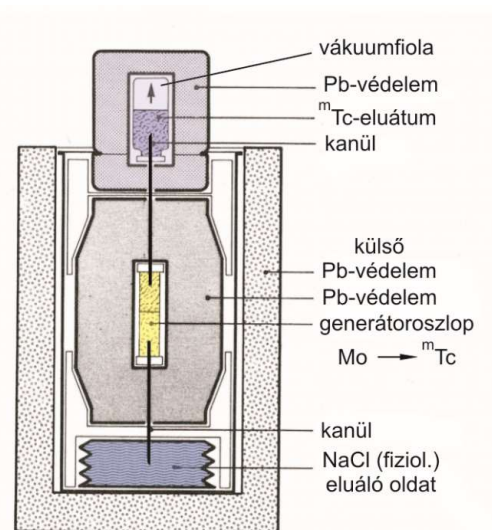
hosszabb, mérhető felezési idővel követi a részecskesugárzást

Előny: a kettő szeparálható, tisztán γ -sugárzó izotóp nyerhető





Alkalmazás: in vivo diagnosztika (igen jól használható)



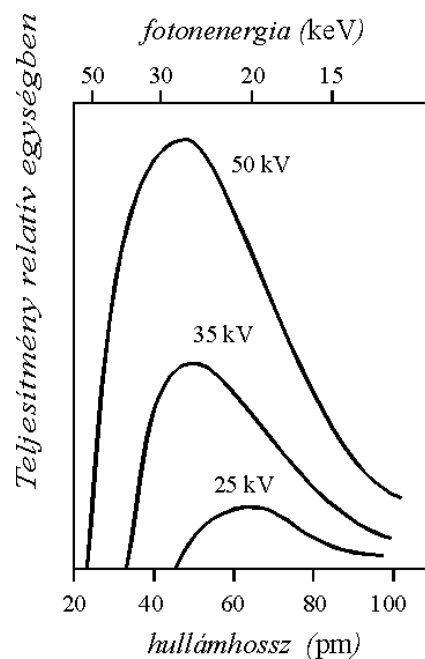
Röntgensugárzás

Típusai: **fékezési sugárzás**

- folytonos spektrum, rövidhullámú határral
- U növekedésével a sugárzás keményedik, az összteljesítmény nő (U^2 -tel arányosan)

$$P = c U^2 I Z \quad \eta = c U Z$$

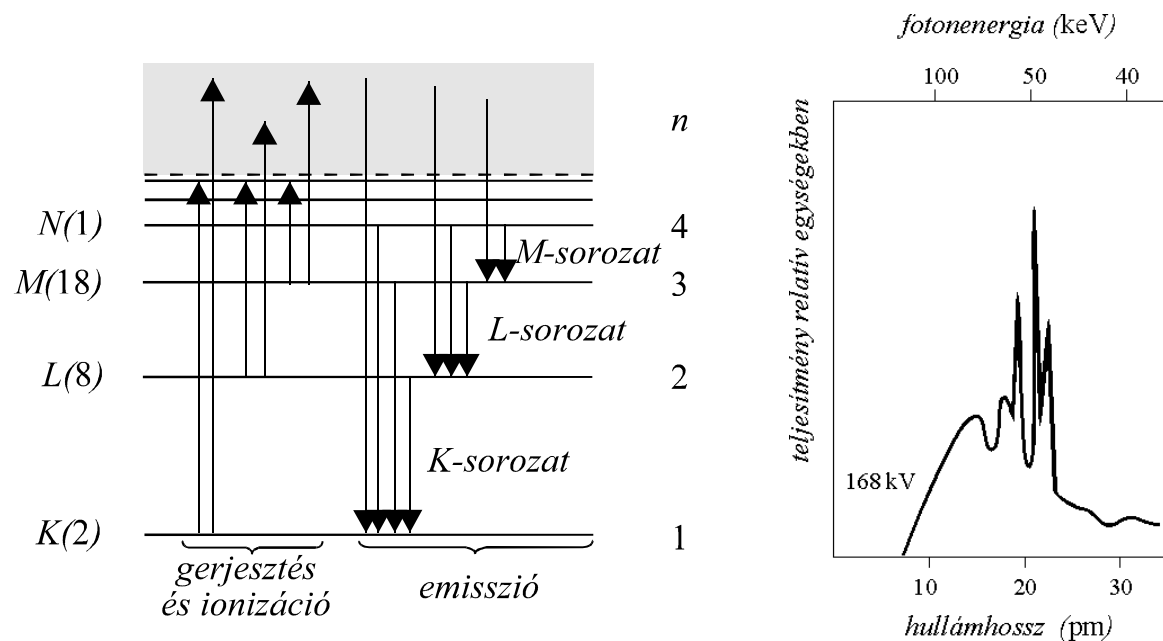
Alkalmazása: röntgen képalkotás

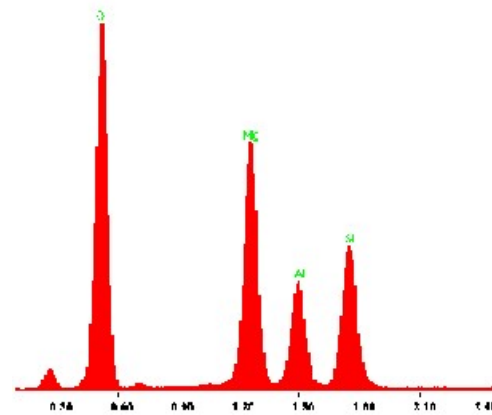
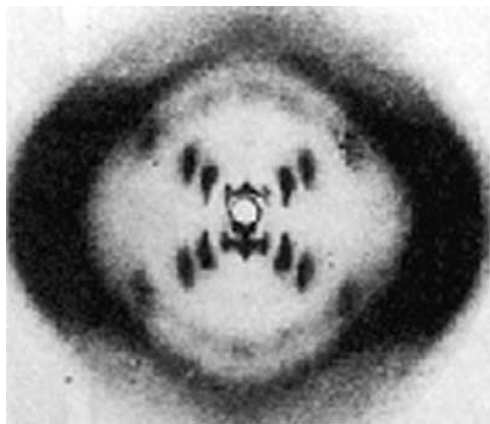


karakterisztikus sugárzás

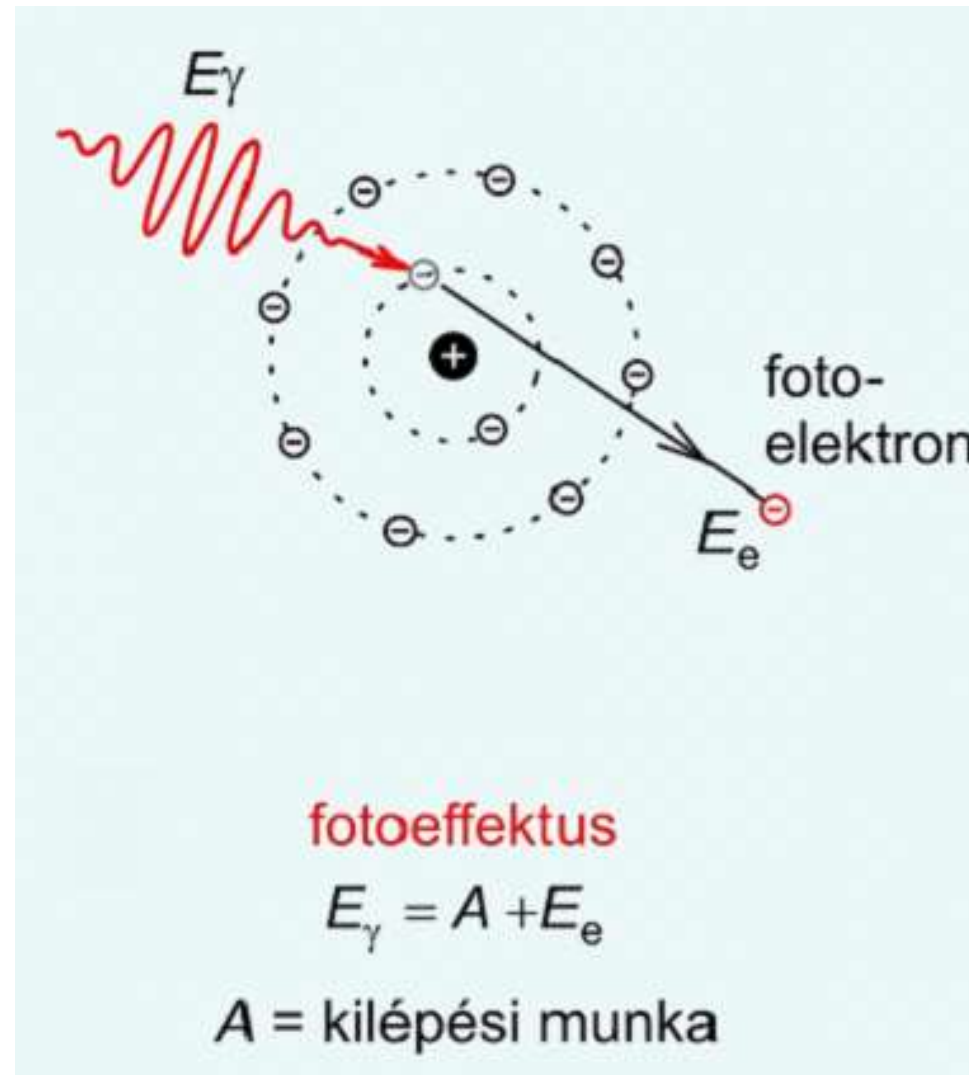
- nagy gyorsító feszültség esetén
- vonalas, az anódra jellemző spektrum

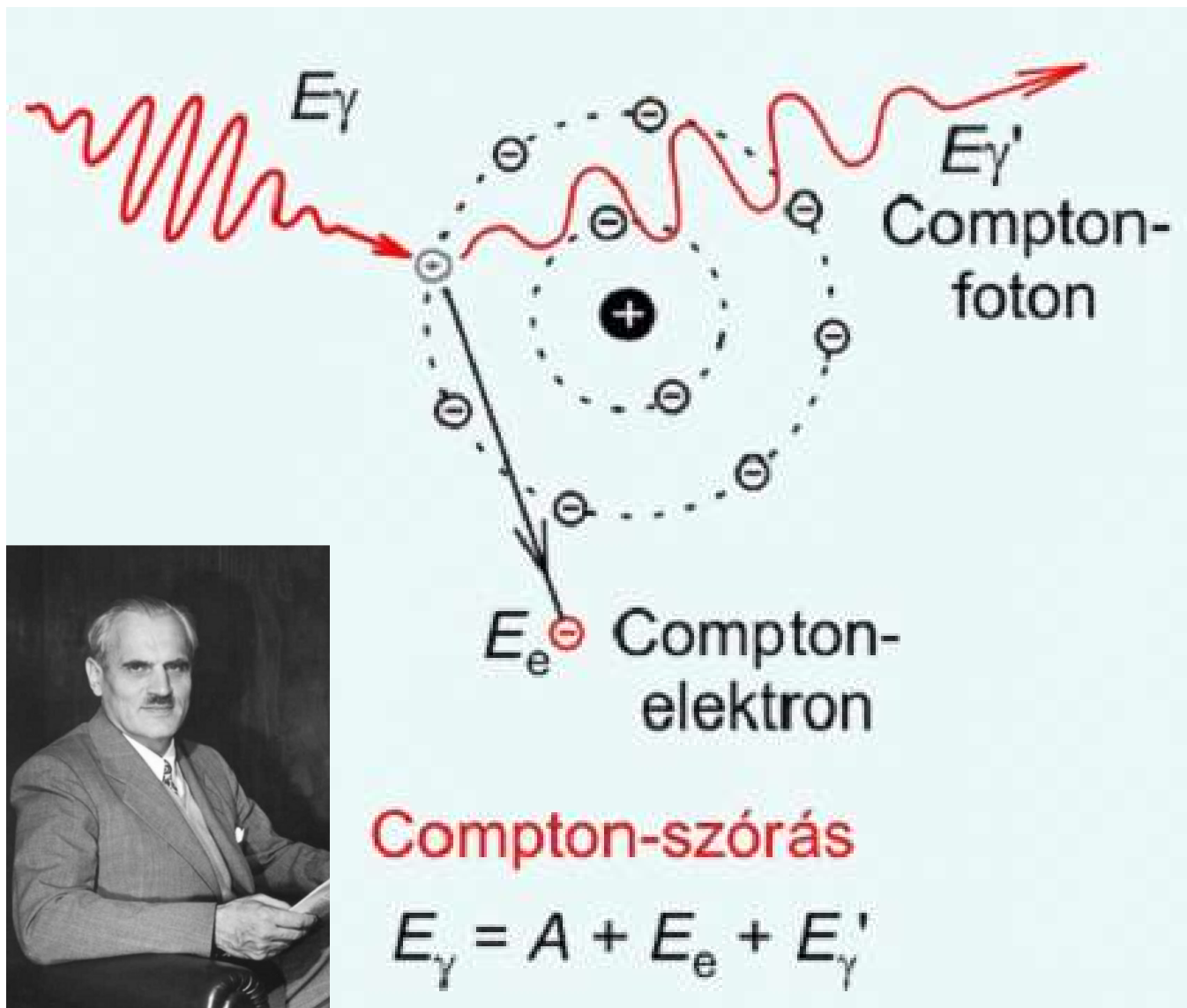
Alkalmazása: csontdenzitometria,
anyagazonosítás, molekulaszervezet vizsgálata

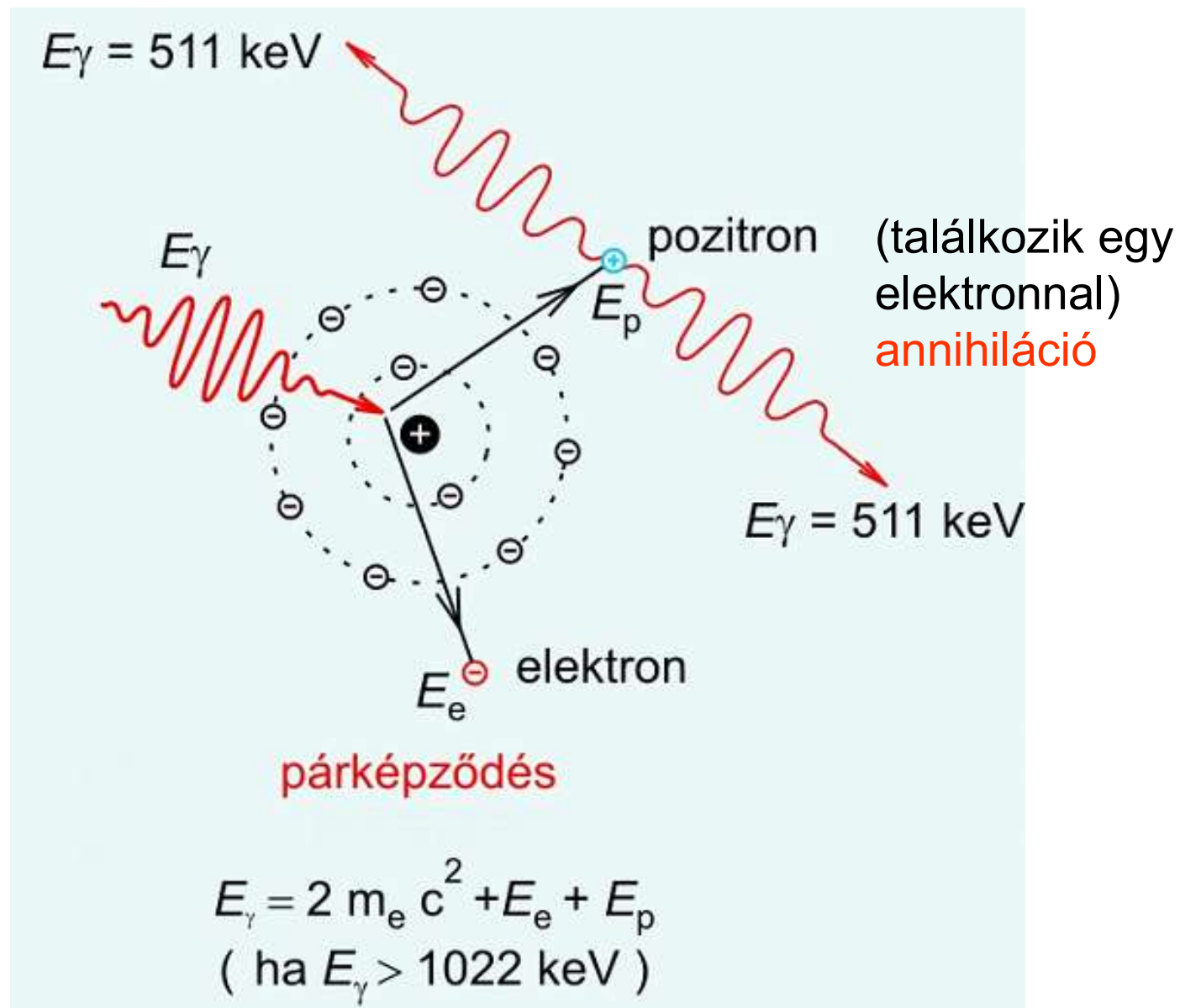




1.6. A gamma sugárzás ionizációs kölcsönhatásai

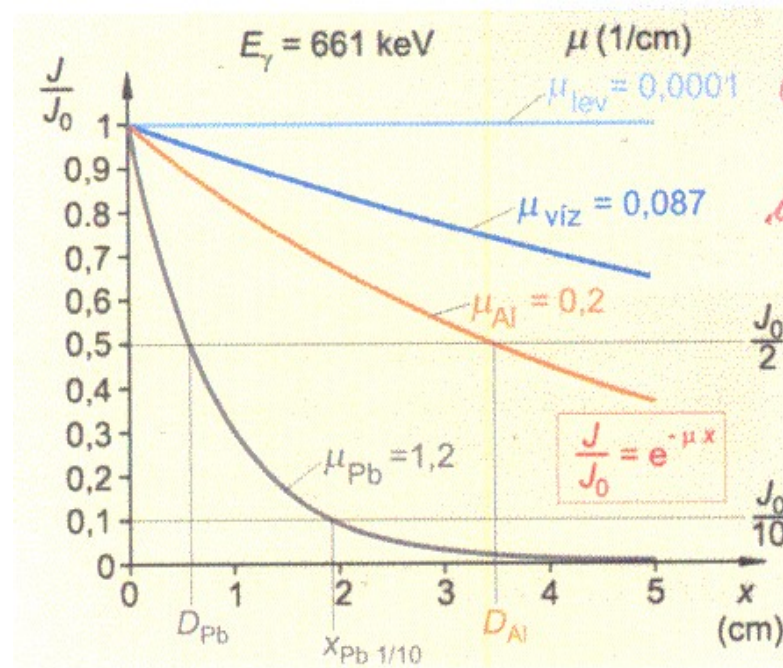
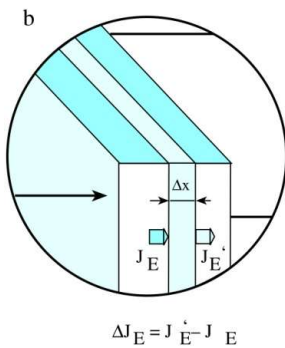
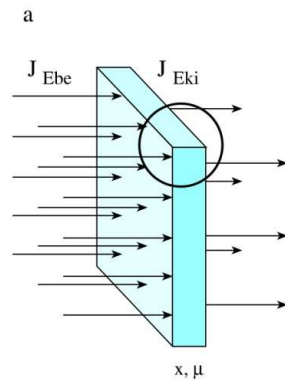




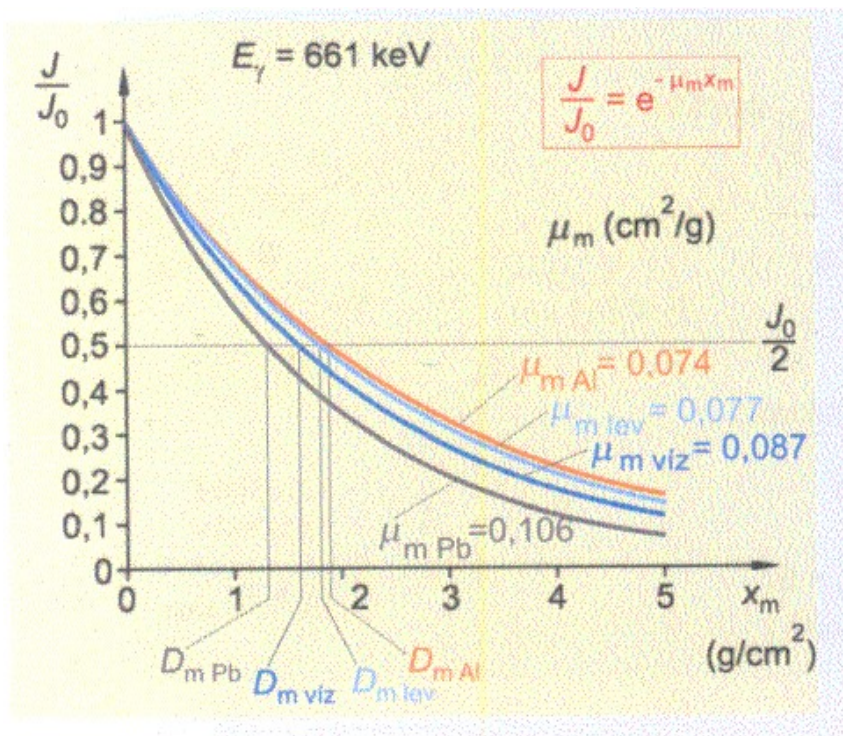
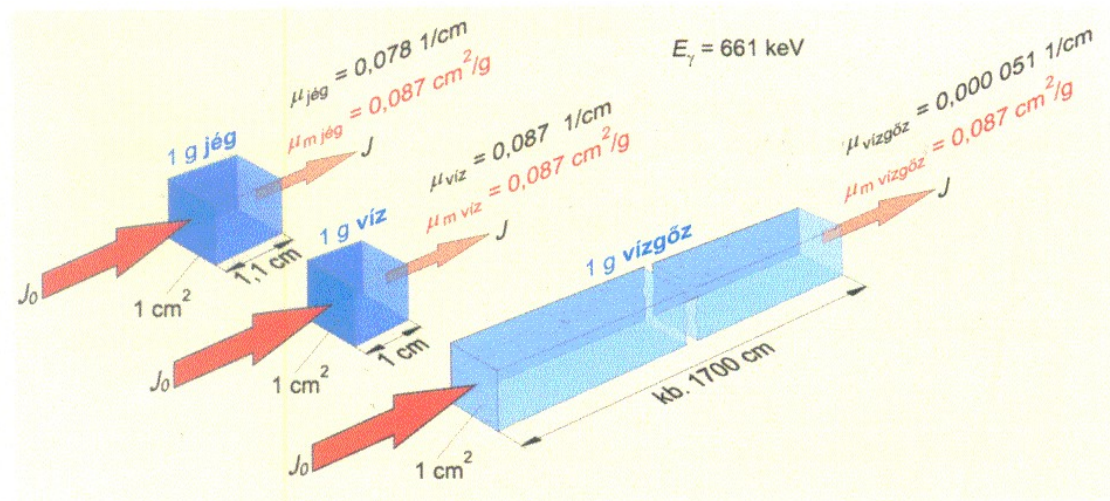


A kölcsönhatások következtében a sugárzás intenzitása gyengül.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \mu = \frac{1}{\delta} \quad \mu = \frac{0,693}{D}$$

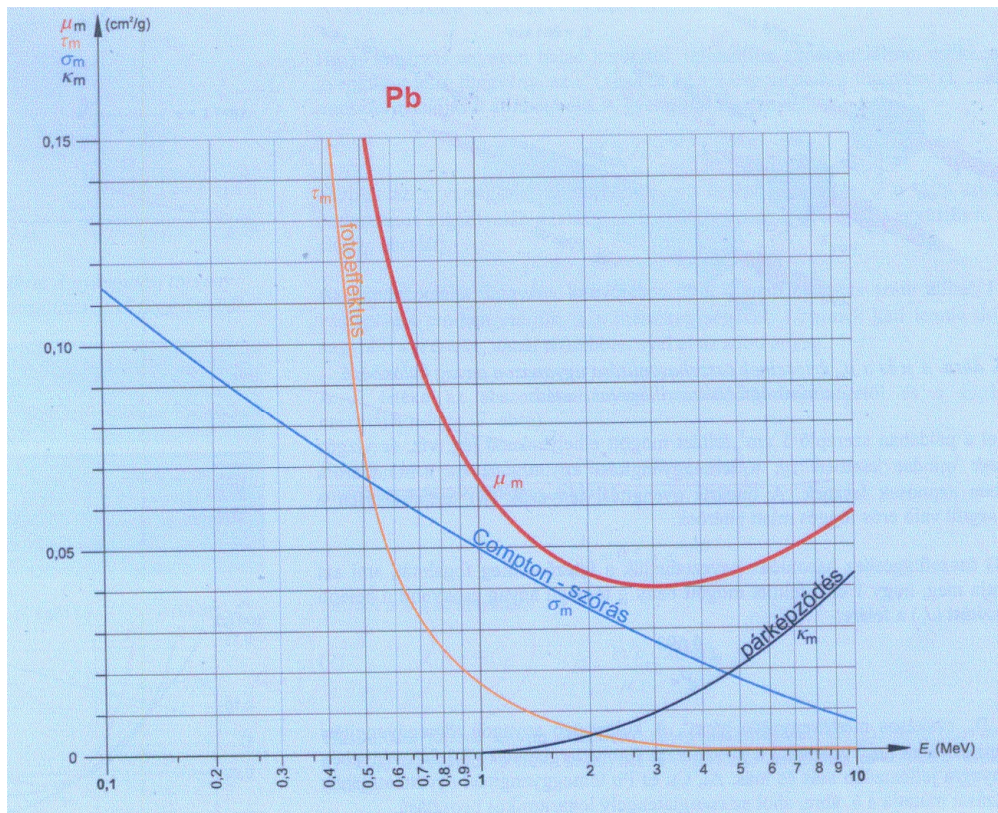


$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$



$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad \text{ill.} \quad \mu_m = \tau_m + \sigma_m + \kappa_m$$

A komponensek aránya a fotonenergiától és a gyengítő anyag minőségétől függ.



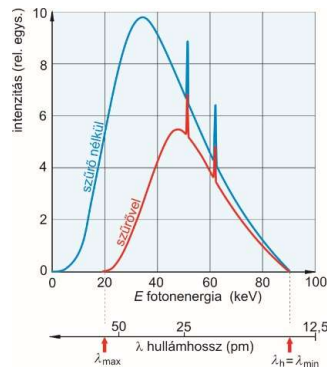
Kisebb fotonenergiáknál (diagnosztikus rtg és γ), nagyobb rendszámú gyengítő anyagoknál (pl. Pb, csont) főleg fotoeffektus.

Erre vonatkozóan: $\tau_m = c \lambda^3 Z^3$

Kisebb effektív rendszámú gyengítő anyagoknál (víz, lágy szövetek)

Főleg Compton-effektus ($Z_{\text{eff,víz}} = 7,69$, $Z_{\text{eff,lev}} = 7,3$)

Erre: $\sigma_m \sim Z$



Gyakorlati következmények:

-sugárvédelem nagy rendszámú anyagokkal

- szűrők

- rtg-diagnosztika (kép kontrasztossága, kontrasztanyagok)

- terápia: kis energia - felületi

- nagy energia – mély

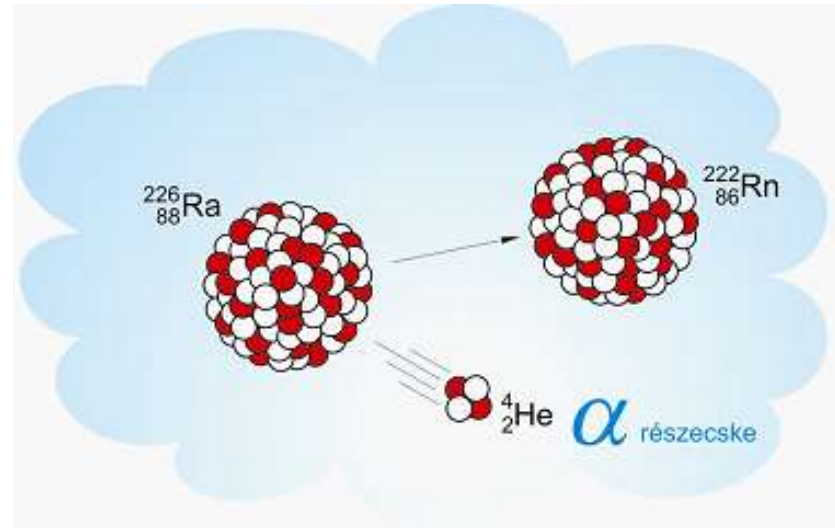
hatótávolság: energiától függ (levegő ~ 100 m, víz ~ dm)

fajlagos ionizáció kisebb, mint β esetén

1.7. Az alfa sugárzás ionizációs kölcsönhatásai

Alfa-sugárzás és az anyag kölcsönhatása

alfa-részecske: He atommag



elektromos töltése: $2e^+$

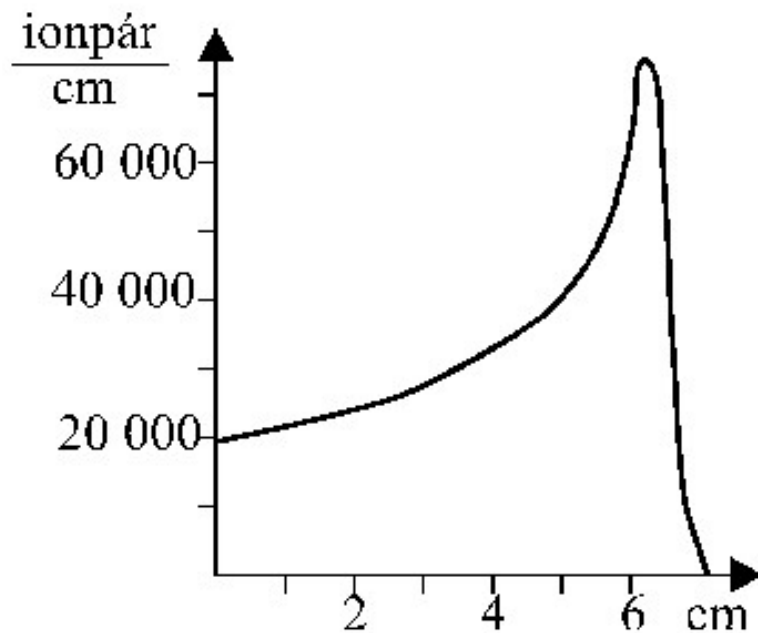
kezdő sebesség több mint 1000 km/s

kinetikus energia néhány MeV

ionizálóképesség jellemzése

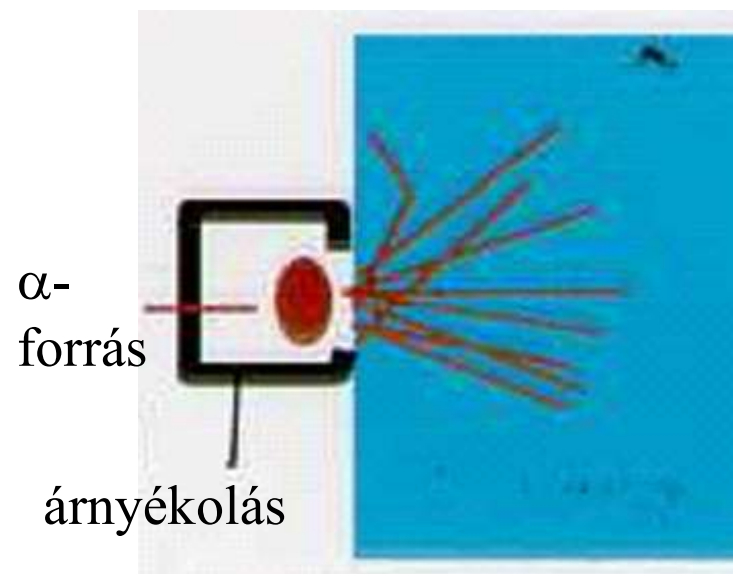
lineáris ionsűrűség (fajlagos v. specifikus ionizáció)

l hosszúságú úton n db ionpárt hoz létre



^{214}Po α -részecskéjének fajlagos ionizációja (levegő esetén) a megtett út függvényében
(Rontó - Tarján 3.1 ábra)

pályája egyenes
(v. atommagon szóródás)



hatótávolság (R, Reichweite): az a távolság, amit egy részecske a
közegben befut, míg energiája a termikus értékre nem csökken

pl. Ra: R (levegőben) = 3.4 cm, R (folyadékban) = 10-100 μm

fékezőképesség: egységnyi úthosszra vonatkoztatott energia
veszteség (*a közeg szempontjából*)

lineáris energia átadás (**LET**, Linear Energy Transfer)
(*a részecske szempontjából*)

$\text{LET} = (\text{lineáris ionsűrűség}) \cdot (\text{1 ionpár keltésére jutó energia})$

egyéb hatások: (ionizáció/gerjesztések)

karakterisztikus röntgen-sugárzás

szcintilláció

biológiai: funkcionális és morfológiai elváltozások

végül: hő

atommaggal való ütközés: magreakció (kis valószínűséggel)

1.8. A béta sugárzás ionizációs kölcsönhatásai

Béta-sugárzás és az anyag kölcsönhatása

béta-részecske: elektron
(vagy pozitron)

elektromos töltése: $1e^-$ (vagy $1e^+$)

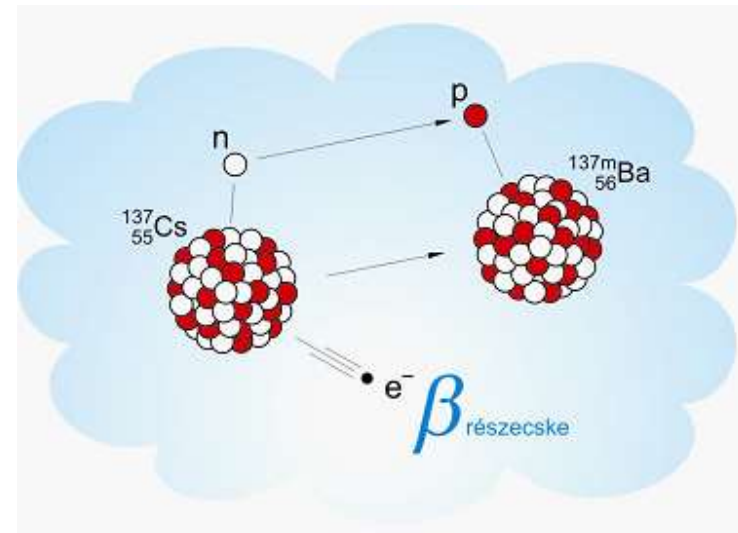
lineáris ionsűrűség: az alfaénál 1000-szer kisebb

pályája zezugos (az elektron szóródik az elektronokon),
visszaszórás is lehet

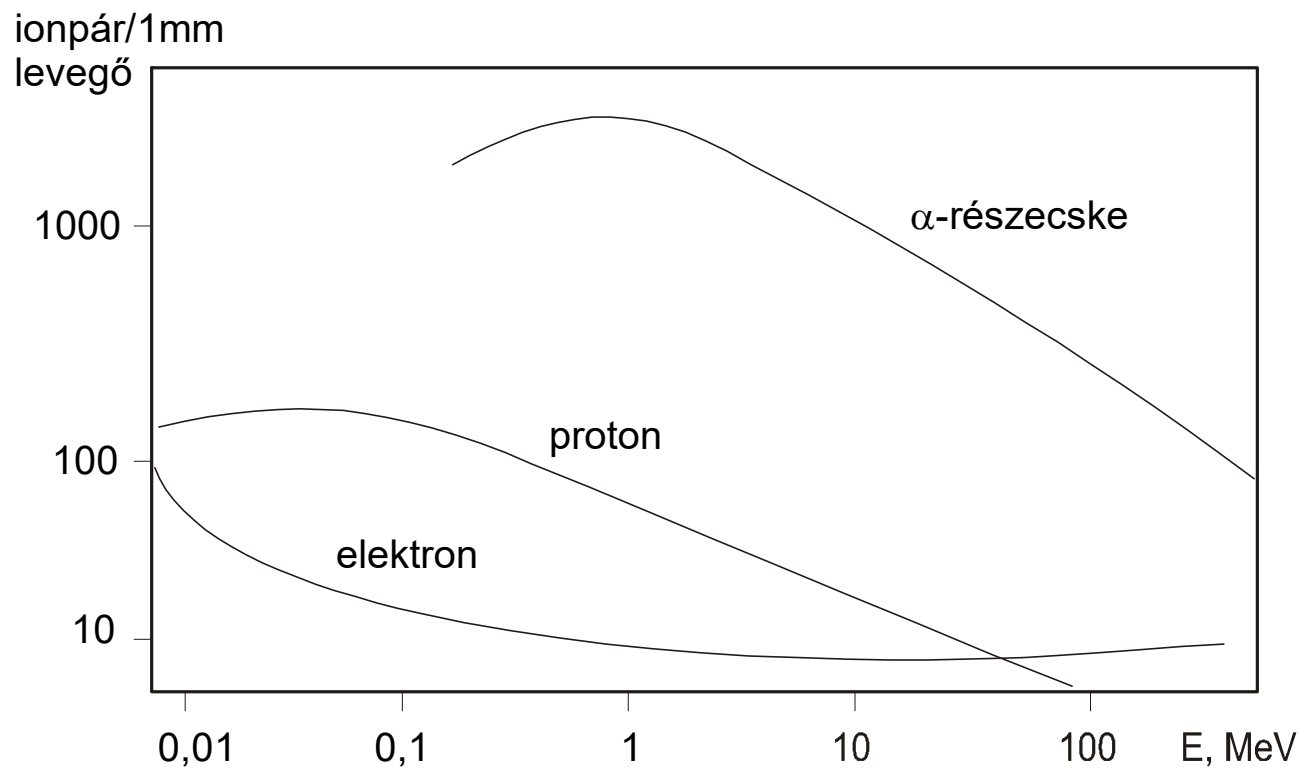
spektruma folytonos (antineutrínó!), így nincs egységes hatótávolság

levegőben: 10 cm- 1 m

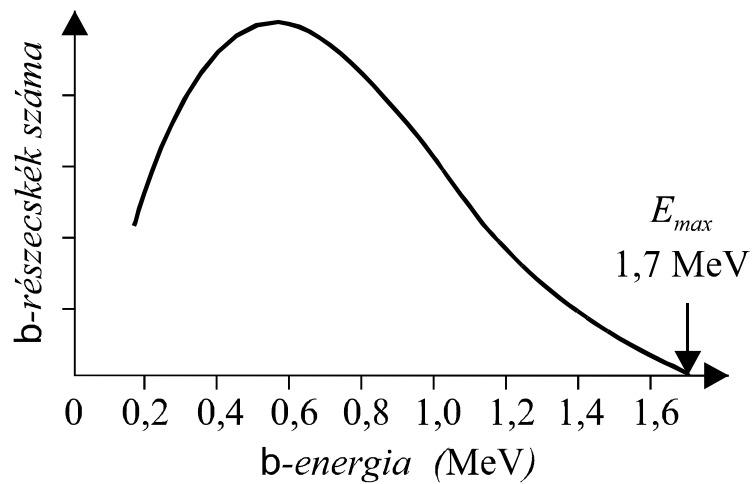
víz (szövet): 1 mm-1cm



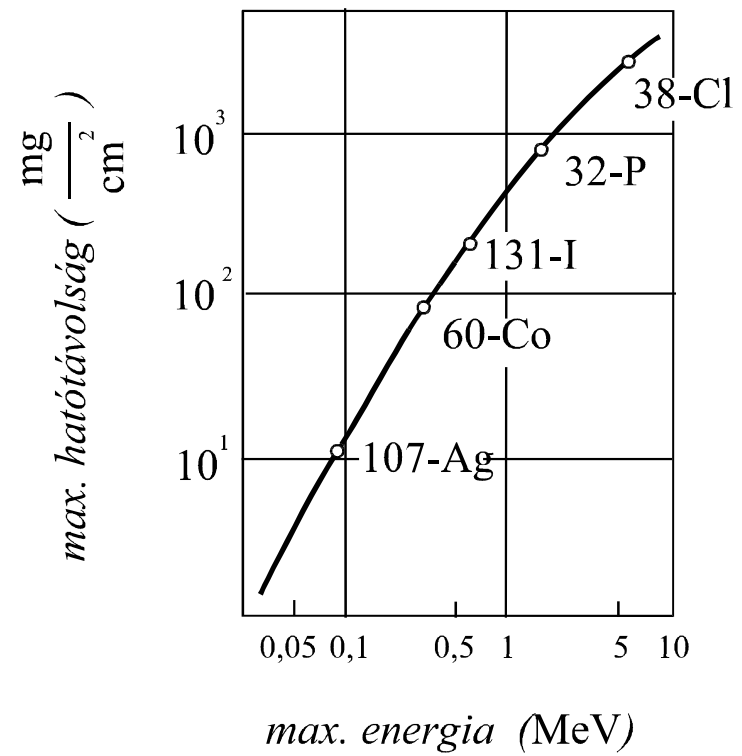
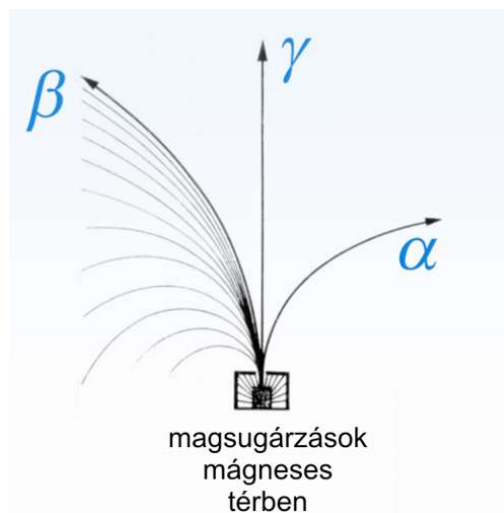
Töltéssel rendelkező részecskék fajlagos ionizációja levegőben



Az α -, a β - és a proton sugárzás átlagos fajlagos ionizációja a részecske energia függvényében, a levegőben



^{32}P β -spektruma
(Rontó - Tarján 3.2 ábra)



β sugárzás maximális
hatótávolsága a maximális
energia függvényében
(Rontó - Tarján 3.3 ábra)

1.9. A részecske fluxus, fluens és fluensteljesítmény fogalma

Fluxus: (fluens intenzitás)

Egységnyi idő alatt egységnyi felületen átáramló adott irányba mozgó részecskék száma

$$F = dN/(dA dt)$$

Fluens (fluence): A sugárzási tér egy meghatározott pontjában az e pont körül megfelelően kis gömb felületen belépő részecskék száma osztva a gömb keresztmetszetével. (m^{-2})

$$\Phi = dN/dA$$

Fluensteljesítmény (fluence rate): egységnyi időre eső fluens. ($m^{-2} s^{-1}$)

1.10. A közölt és elnyelt dózis fogalma

Közölt dózis (kerma – kinetic energy released in matter):

Adott anyag megfelelően kicsi térfogatelemében közvetve ionizáló részecskék (neutron, foton) által felszabadított valamennyi töltött részecske kezdeti kinetikus energiájának összege osztva a térfogatelem tömegével. (J/kg – Gy)

$E_f < 3 \text{ MeV}$, $E_n < 20 \text{ MeV}$ – megfelel az elnyelt dózisnak.

Elnyelt dózis:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \cdots \text{egysége} \cdots \frac{J}{kg} = Gy$$

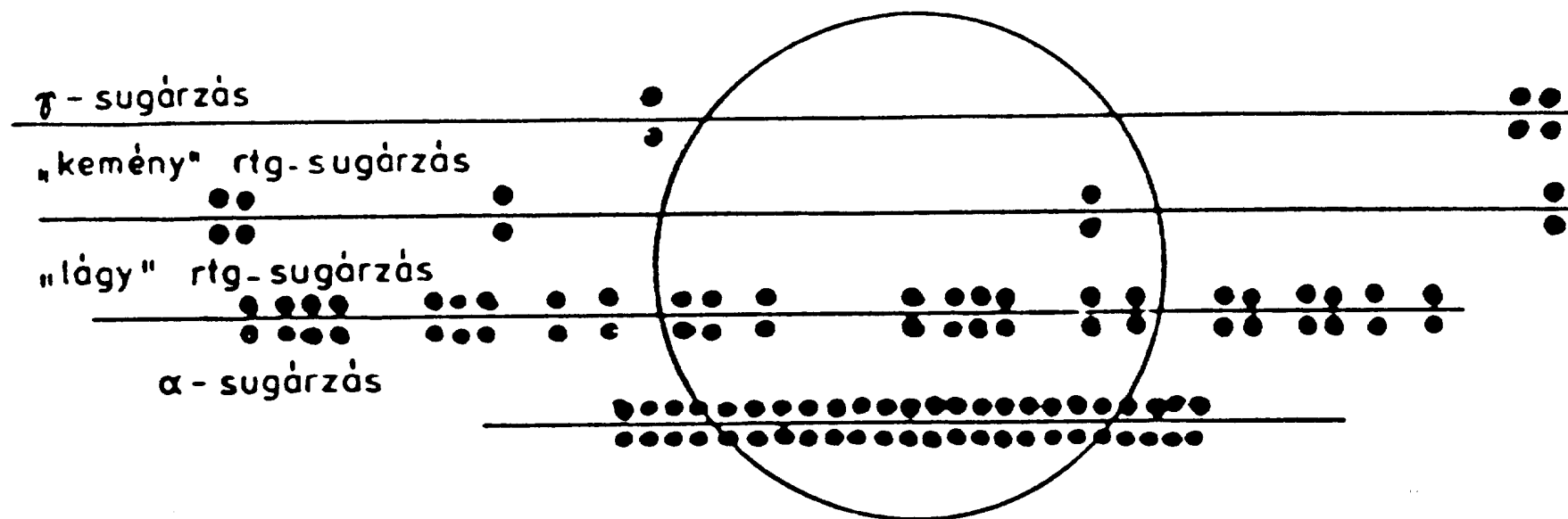
Az elnyelt dózis minden sugárzásra és minden elnyelő anyagra érvényes, de gyakorlatilag mérhetetlen.

A halálos dózis (6 Gy) $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklet emelkedést okoz.

1.11. A LET érték, a minőségi tényező és a relatív biológiai hatékonyság fogalma

LET, Linear Energy Transfer

$\text{LET} = (\text{lineáris ionsűrűség}) * (\text{1 ionpár keltésére jutó energia})$



1.11. A LET érték, a minőségi tényező és a relatív biológiai hatékonyság fogalma

Minőségi tényező (Q) (vagy sugárzási súlytényező (w_R))

Relatív biológiai hatékonyság (RBE – relative biological effectiveness)

$$RBE = D_X / D_R$$

D_X – a referencia sugárzás elnyelt dózisa

D_R – a vizsgált sugárzás elnyelt dózisa

amelyek azonos biológiai hatást okoznak

Referencia sugárzás: gamma, vagy röntgen sugárzás

A sugárzási súlytényező az RBE-n alapul, de független a szövet minőségétől.

1.12. A sugárzási súlytényező és az egyenérték dózis értelmezése

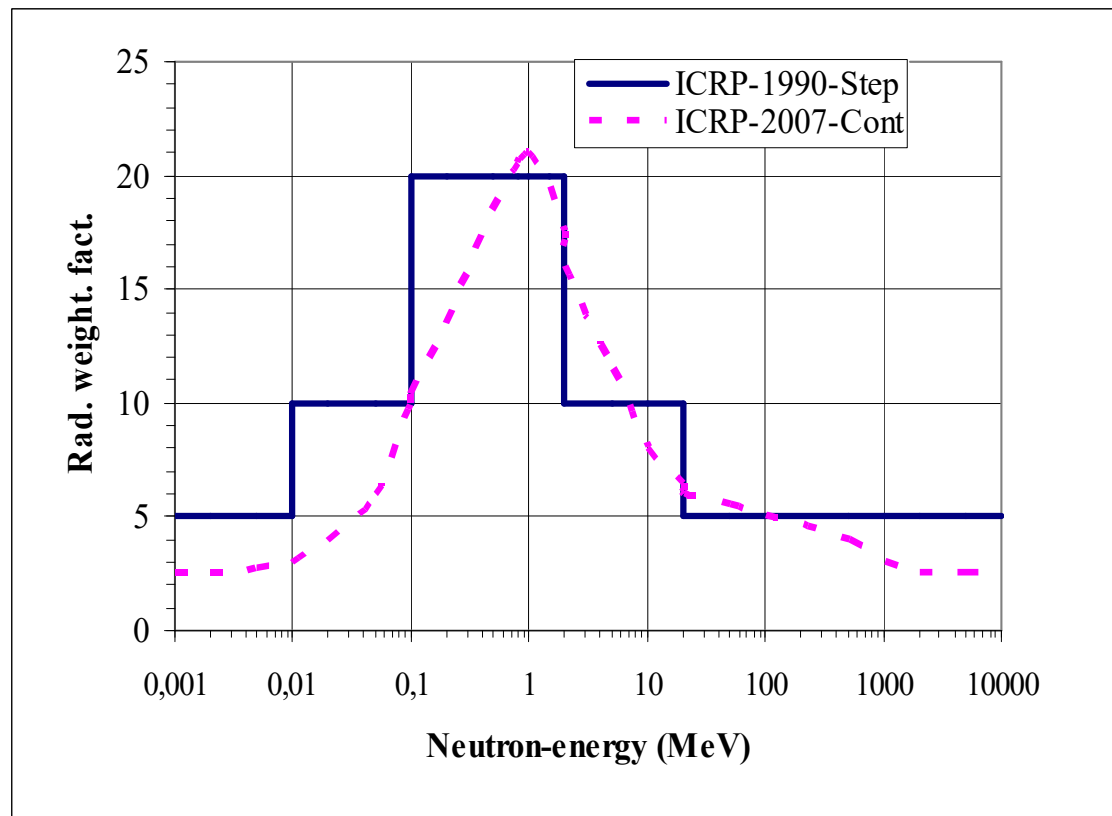
Egyenérték dózis: $H_T = D_{T,R} w_R$ mértékegysége: $J/kg = Sv$

A sugárvédelemben leggyakrabban előforduló típusú és minőségű sugárzások súlytényezője:

6. táblázat. Sugárzási súlytényezők.

Sugárzás fajtája	Sugárzási súlytényező (w_R)	
	ICRP 60	ICRP 103
foton	1	1
elektron, müion	1	1
proton (nem visszaszórt)	5	
proton és pion		2
α -részecske, nehéz magok	20	20
neutronok	5 (< 10 keV) 10 (10 – 100 keV) 20 (100 keV – 2 MeV) 10 (2 MeV – 20 MeV) 5 (> 20 MeV)	folytonos görbével ábrázolták az energia függvényében (2.1. ábra)

Sugárzási súlyozási tényező (w_R) neutronok esetén (ICRP-2007) (International Commission on Radiological Protection)



1.13. Az effektív dózis fogalma, használata és számítása. A dóziskonverziós tényezők származtatása

Effektív dózis: $E = \sum H_T w_T$ mértékegysége: J/kg = Sv

Az egyes szövetek sugárvédelemben használt súlytényezője:

7. táblázat. Az ICRP 60 és ICRP 103 ajánlásában található testszöveti súlytényezők.

Testszövet	Testszöveti súlytényező (w_R)	
	ICRP 60	ICRP 103
tüdő, gyomor, csontvelő, vastagbél	0,12	0,12
emlő	0,05	0,12
ivarmirigyek	0,20	0,08
pajzsmirigy hólyag nyelőcső, máj	0,05	0,04
csontfelszín, bőr	0,01	0,01
agy		0,01
nyálmirigy		0,01
maradék	0,05	0,12
összes	1,00	1,00

A dóziskonverziós tényezők

DCF – dose conversion factor (Sv/Bq) – belső dózistényező

Egységnyi radioaktivitás inkorporációjához köthető effektív dózis. A radionuklid „belső veszélyességének” mértéke.

A dózist főleg a radioaktivitást hordozó anyag tartózkodási ideje szabja meg.

Értéke az egyes izotópokra eltérő és függ az érintett személy életkorától.

1.14. A személyi-, környezeti- és irány szerinti dózisegyenérték fogalma és használata

Dózisegyenérték: Az ICRU (International Committee for Radiological Units) által használt mennyiség.

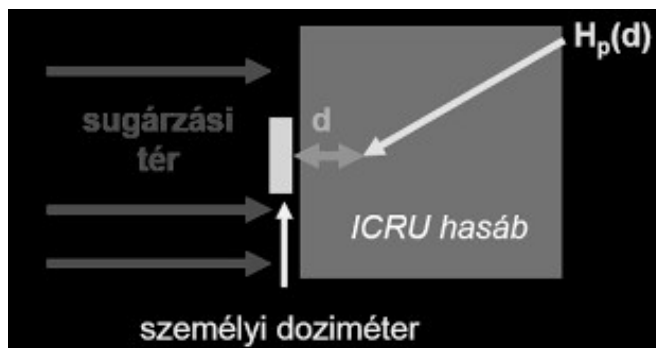
$$H = D * Q$$

Személyi dózisegyenérték (personal dose equivalent) $H_p(d)$

- a testfelület egy meghatározott pontja alatt d mélységben elhelyezkedő lágy szövetre vonatkozó dózisegyenérték.

$d = 10$ mm erősen áthatoló (kis LET értékű) sugárzásokra

$d = 0,07$ mm gyengén áthatoló (nagy LET értékű) sugárzásokra



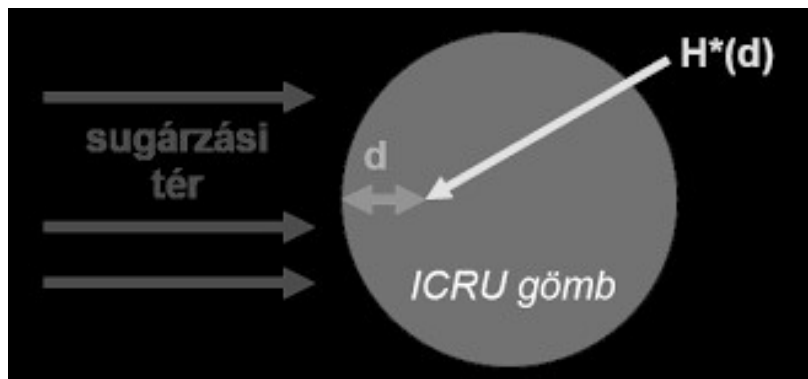
1.14. A személyi-, környezeti- és irány szerinti dózisegyenérték fogalma és használata

Környezeti dózisegyenérték (ambient dose equivalent)

A sugárzási tér egy adott pontjában a $H^*(d)$ mennyiséget úgy határozzák meg, hogy az azzal a dózisegyenértékkel legyen egyenlő, amely az ide tartozó irányított és kiterjesztett sugárzási térben keletkezik az ICRU gömb d mélységében a nyalábbal ellentétes irányú gömbsugáron mérve.

$d = 10$ mm erősen áthatoló (kis LET értékű) sugárzásokra

$d = 0,07$ mm gyengén áthatoló (nagy LET értékű) sugárzásokra



A gömb átmérője 30 cm,
Sűrűsége 1 g/cm^3

1.14. A személyi-, környezeti- és irány szerinti dózisegyenérték fogalma és használata

Irány szerinti dózisegyenérték (directional dose equivalent) $H'(d, \Omega)$

Az a dózisegyenérték a sugárzási tér egy adott pontjában, amelyet a dózisegyenértéknek megfelelő kiterjesztett sugárzási tér eredményezne az ICRU gömb d mélységében, a meghatározott Ω irányú gömbsugáron mérve.

$d = 10$ mm erősen áthatoló (kis LET értékű) sugárzásokra

$d = 0,07$ mm gyengén áthatoló (nagy LET értékű) sugárzásokra

