

Sugárvédelem és jogi szabályozása

Fejezetek:

1. Mag- és sugárfizikai alapok
2. Dózismennyiségek
3. Az ionizáló sugárzás egészségkárosító hatásai, sugárvédelmi szabályzás
4. Sugárzásmérés alapjai
5. Természetes és mesterséges radioaktivitás, radioaktív hulladékok
6. Sugárvédelmi eljárások és műveletek

Félévközi dolgozatok

- 2021. október 18.
- 2021. december 6.

A helyet és a módot („zárthelyi” dolgozat vagy online forma) később határozzuk meg.

Felhasználható szakirodalom

Fehér I., Deme S. (szerk.): Sugárvédelem (ELTE Eötvös Kiadó, Bp., 2010.)

Kiss D., Horváth Á., Kiss Á.: Kísérleti atomfizika (ELTE Eötvös Kiadó, Bp., 1998)

Környezetmérnöki Tudástár sorozat 14. kötet: Somlai János:
Sugárvédelem

<http://mkweb.uni-pannon.hu/tudastar/anyagok/14-sugvedelem.pdf>

Zagyvai Péter és mások: A nukleáris üzemanyagciklus radioaktív hulladékai (PSI-EK 2013.)

Előadások anyaga:

<https://oktatok.reak.bme.hu/zagyvai/>

Radioaktivitás

*A radioaktív bomlás során a **gerjesztett atommag** szerkezete megváltozik.*

BOMLÁS = új belső szerkezet jön létre, és az új mag részecskesugárzás(ok) kibocsátása révén stabilizálódik – lehet, hogy továbbra is gerjesztett marad, és tovább bomlik.

Az ionizáló sugárzások és a radioaktivitás felfedezésének első lépései:

- **Röntgen** (1895-96): a katódsugárcsövek falán, gyorsított elektronok beérkezését követően, nagyenergiájú fotonsugárzást figyelt meg.
- **Becquerel** (1896): az uránt vizsgálva tapasztalta, hogy annak közelében a fotópapír akkor is megfeketedik, ha nem világítják meg, tehát nem az akkor már ismert foszforeszcenciáról volt szó, az energia kizárólag „belülről” származott.
- **Curie** házaspár (1898): kémiaileg elválasztottak néhány elemet az urán bomlási sorából és megállapították, hogy a radioaktív sugárzás kibocsátása az adott kémiai elem olyan tulajdonsága, amely nem függ annak fizikai és kémiai állapotától.
- **Rutherford** (1911): a bomlás révén keletkezett sugárzások ionizációs tulajdonságainak vizsgálatából megállapította, hogy annak (legalább) két fajtája van:
 - pozitív töltésű részecskékből álló α és negatív részecskékből álló β sugárzás; az α sugárzás szóródásának vizsgálata pedig azt bizonyította, hogy az atomok nem töltik ki a teljes teret, hanem fő tömegük egy nagyon kis térfogatban, az atommagban összpontosul.

Az atommag felépítése:

az atommagok nukleonokból (protonokból és neutronokból) állnak = 10^{-15} m (fm)

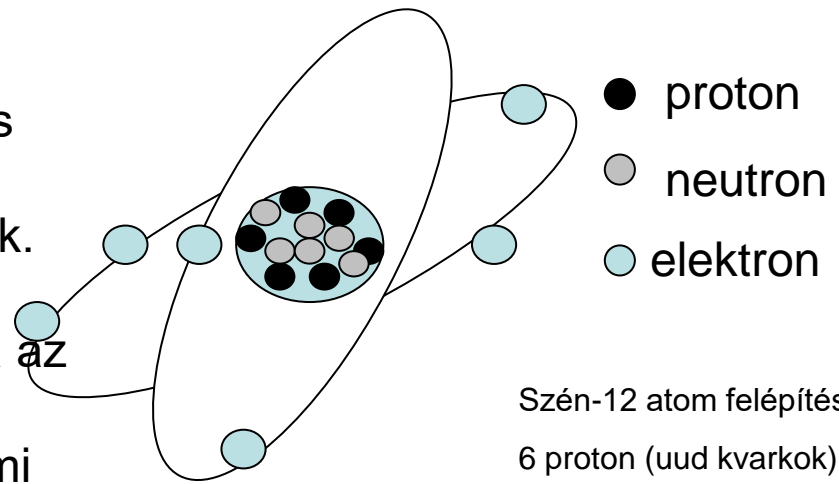
nagyságrendű átmérőjű összetett részecskék.

Protonok száma (Z):

- az elem rendszámát jelenti, meghatározza az adott elem felépítését, kémiai viselkedését

- a proton pozitív töltésű részecske, nyugalmi tömegének (m_0) **938,3 MeV** energia felel meg ($E=m_0 \cdot c^2$ – Einstein ekvivalencia-elve).

Neutronok száma (N): a neutronnak nincs töltése, $m_0 = 939,6 \text{ MeV}/c^2$. Szabad állapotban nem stabil, 10,4 perc felezési idővel bomlik.



Szén-12 atom felépítése

6 proton (uud kvarkok)

6 neutron (udd kvarkok)

6 elektron (lepton)

$$E_{köt} = \Delta m \cdot c^2$$



$$E_{kin} = 0,8 \text{ MeV}$$

Bomlástermékek: proton, elektron, antineutrínó

Tömegszám: $A = Z + N$

Kötési energia = „tömeghiány” = az atom „virtuális” tömege kisebb, mint az őt alkotó nukleonok nyugalmi tömegének összege

Protonok száma (**Z**): - elem rendszáma - meghatározza az adott elem felépítését

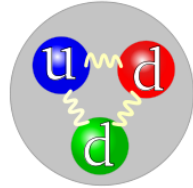
Neutronok száma (**N**):

Tömegszám: **A = Z + N**

Atomsúly \neq A \Rightarrow kötési energia

Proton = 3 (u+u+d) kvark + gluon

Neutron = 3 (u+d+d) kvark + gluon

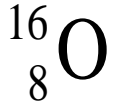


Nuklidok = atommagok: meghatározott proton és neutron számmal rendelkező összetett részecskék.

Egy nuklid lehet **stabil** v. **instabil** azaz **radioaktív**.

Egy nuklid lehet különböző energiaállapotokban (gerjesztett állapot).

Jelölés: rendszámmal és tömegszámmal: ^{16}O (O = 8 proton)



Az atommagokban a protonok és neutronok száma lehet páros (ps) ill. páratlan (pn) - ez döntő jelentőségű a nuklid stabilitása szempontjából.

162 ps, ps

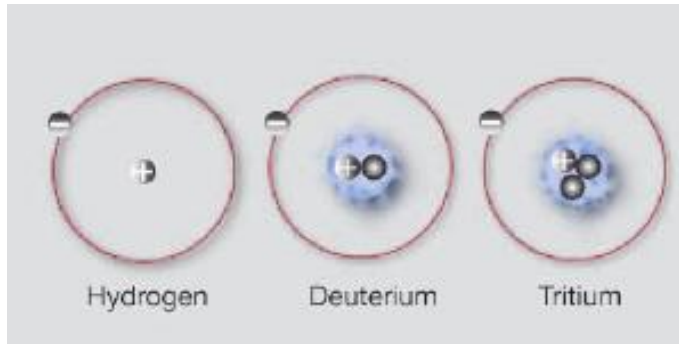
59 ps, pn

49 pn, ps

5 pn, pn

stabil nuklidot ismerünk

EGY ELEMNEK TÖBBFÉLE **IZOTÓPJA** LÉTEZIK:



Hidrogén izotópjai: hidrogén, deutérium, trícium

Vas: 26 protont tartalmaz, a neutronok száma 26-tól 35-ig változhat

Izotópok:

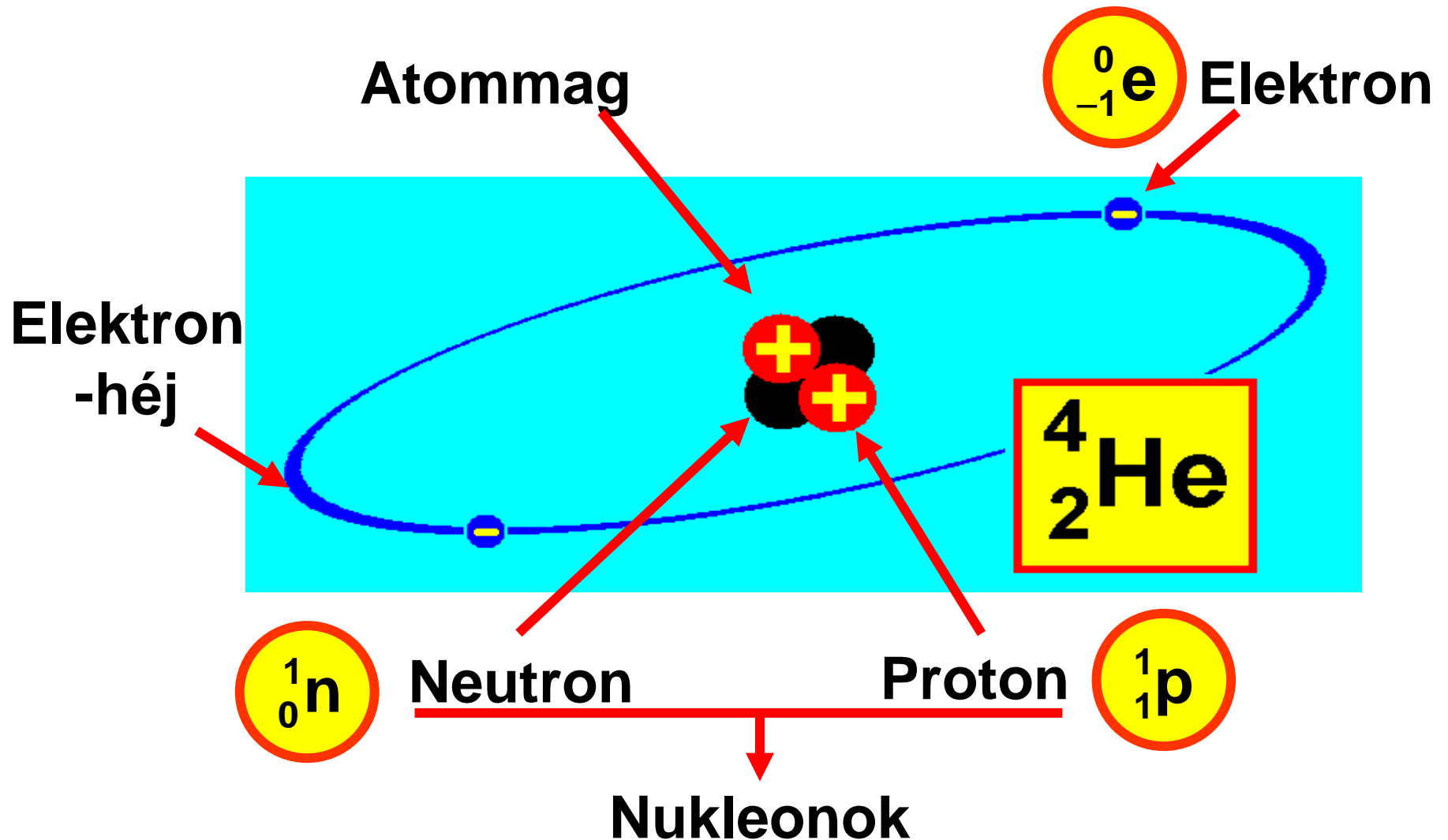
stabil (H, D): az **izotópgyakoriság** jellemzi

radioaktív: a bomlás módja és a bomlás valószínűsége (felezési idő) jellemzi

^3H : β^- - bomló, $T_{1/2}$:12,3 év

<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>

A ${}^4\text{He}$ atomszerkezete



Az atommagokat összetartó erők

Magerők (erős és gyenge kölcsönhatás) sajátosságai:

- a) *vonzók*, intenzitásuk az elektromos erőkénél nagyságrendekkel nagyobb,
- b) *töltéstől függetlenek*,
- c) *rövid hatótávolságúak*, elenyésznek kb. 1,4 fm távolságon túl,
- d) *telíthetők* = egy részecske csak korlátozott számú további részecskére hat

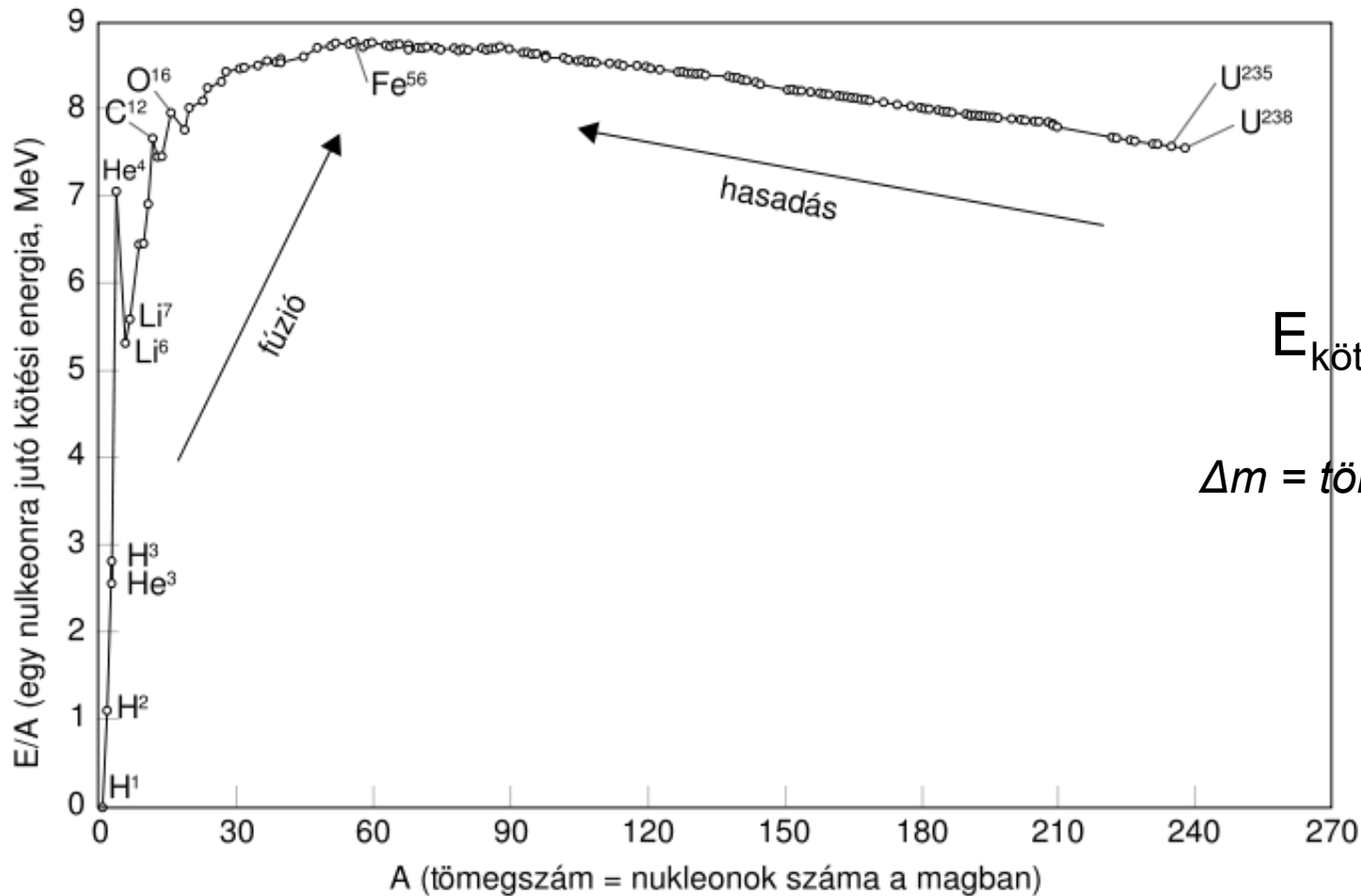
MAGMODELLEK: cseppmodell, héjmodell, fűrtmodell - kollektív modell

Az atommagot alkotó részecskék között a magerők mellett a „klasszikus” erők (tömegvonzás, elektromos és mágneses vonzás és taszítás) is hatnak.

A radioaktivitásban fontos szerepet játszó elemi részecskék

- Spin szerint: fermionok (feles spin: proton, neutron, elektron) vagy bozonok (egész spin: foton)
- Kölcsönhatás szerint: erős k.h.-t is mutató részecskék (hadronok: kvarkokból épülnek fel [barion, mezon]) és csak gyenge k.h.-ra képes részecskék (leptonok: elektron, müon, neutrínó – nem tartalmaznak kvarkokat)
- ❑ Fermionok: Pauli-elv: egy atomnak nem lehet 2 azonos állapotú fermionja
- ❑ Bozonok: „mező”-komponensek, a kölcsönhatások közvetítői (az atommagban: gluon)

„Stabilitás-görbe” – egy nukleonra jutó kötési energia



$$E_{\text{köt}} = (\Delta m) \cdot c^2$$

$\Delta m = \text{tömeghiány}$

A radioaktív bomlás alapegyenletei

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

N: bomlásra képes, azonos
fajtájú atommagok száma
[darab]

λ : bomlási állandó = időegység
alatti bomlás valószínűsége [1/s]
t: idő

A: aktivitás [1/s ; Becquerel; Bq]

$T_{1/2}$: felezési idő [s]

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

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Összetett bomlás: anya- és leányelemek bomlási sorozata

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 \cdot N_2 + \lambda_1 \cdot N_1$$

$$\left(\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 \cdot N_2 \right) \cdot e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 \cdot N_{1,0} \cdot e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{\lambda_2 t}$$

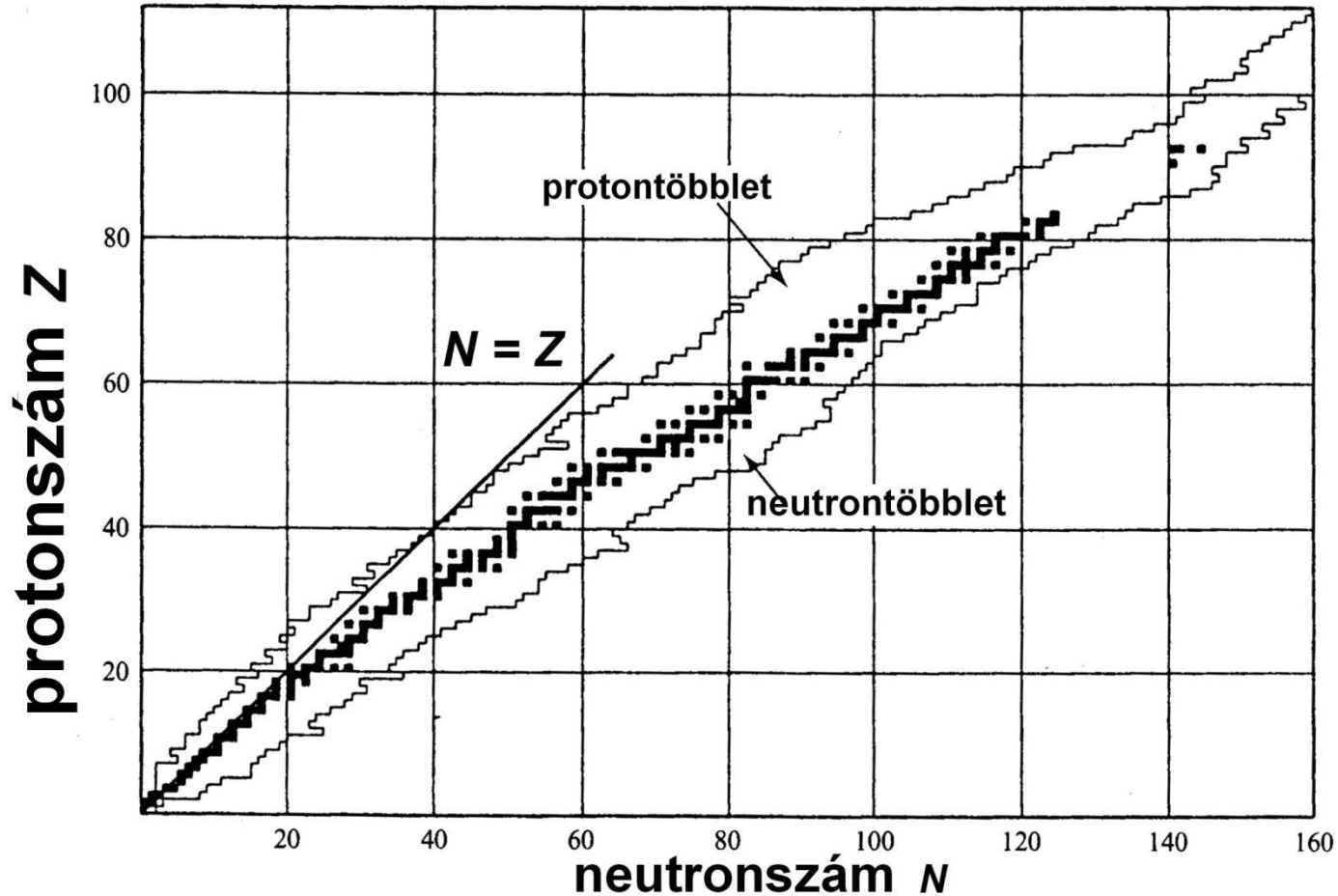
$(u \cdot v)' = u' \cdot v + u \cdot v'$

$$\left(N_2 \cdot e^{\lambda_2 t} \right)' = \lambda_1 \cdot N_1 \cdot e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}$$

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot A_{1,0} \cdot \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right)$$

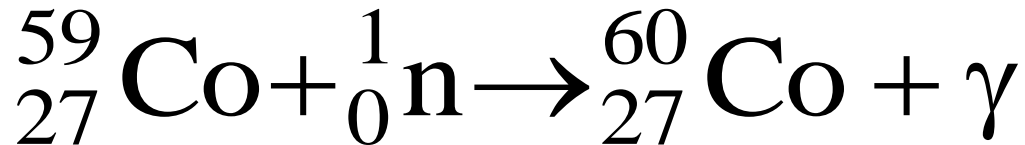
„Szekuláris” egyensúly: ha az anyaelem felezési ideje lényegesen hosszabb = bomlási sebessége sokkal kisebb, mint a leányelemé ($\lambda_2 \gg \lambda_1$) – akkor a leányelem aktivitása hamar „utoléri” az anyaelemét.

Stabil és radioaktív izotópok



Az atommagon belüli pozitív töltések taszító hatásának „kompenzálására” egyre több neutronra van szükség.

Radionuklidok keletkezése



Magreakciókkal:

- Neutronaktiváció = (n,γ) reakciók termikus neutronokkal való besugárzás, átmeneti mag kialakulásán keresztül (prompt γ-sugárzás: a reakció kísérője; ha a reakció terméke radioaktív, akkor általában β⁻ és γ-sugárzó lesz)
- Reakciók gyors neutronokkal: spalláció (n,n'; n,2n; n,α stb.) során
- Reakciók más elemi részecskékkel (p,n; α,n; γ,n reakciók: egy adott küszöbenergia meghaladása esetén jönnek csak létre)

Maghasadással: spontán vagy indukált maghasadás (ez is magreakció tkp.) révén

Radioaktív magok bomlásából, ha a termék nem stabilis

Bomlási módok

$$\Delta E = \sum_p (E_m + E_{kin}) + E_{bs}$$

p: a bomlásban kibocsátott részecskék

m: nyugalmi tömeg

E_{kin} : kinetikus (mozgási) energia

E_{bs} : a „maradék” mag visszalökési energiája

Bomlási módok: korábban létrejött gerjesztett magállapot megszűnése \neq magreakció !

α , β = „közvetlen” bomlási módok

γ = „kísérő” bomlási mód: a többi bomlási mód lezárása, „finomszerkezet”-változás nyugalmi tömeggel rendelkező részecske kibocsátása nélkül

f = fisszió = spontán maghasadás, neutronok kilépése

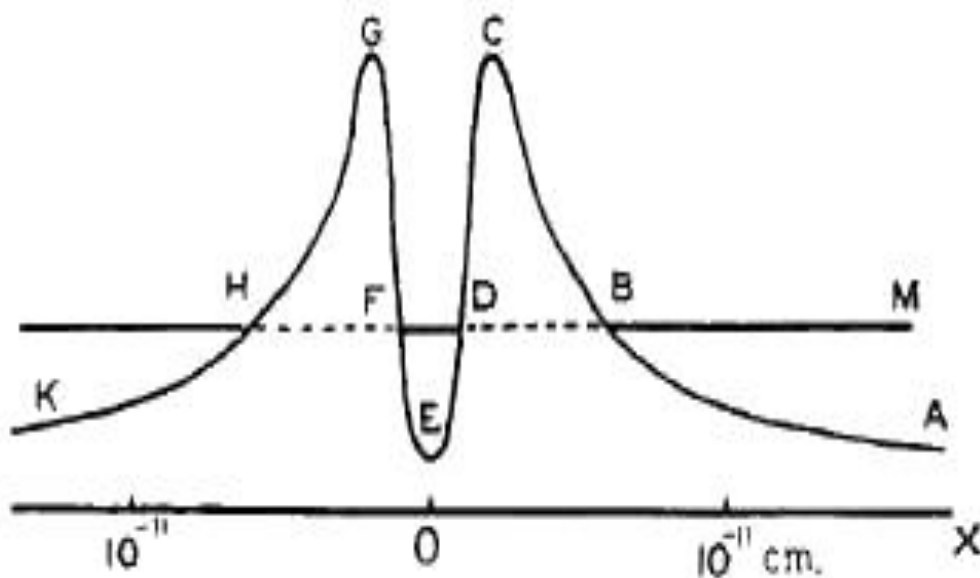
Bomlási módok – alfabomlás

Az **α -bomlás** során a radioaktív atommag egy He^{2+} részecskét, azaz He-atommagot bocsát ki 3 -10 MeV mozgási energiával. Az α -bomlás során az atommag tömegszáma 4-gyel, protonszáma 2-vel csökken. Hajtóereje az erős kölcsönhatás.

„**Diszkrét**” energiaváltozás: E_{kin} jellemző az adott radioizotópra, de megoszlik a részecske mozgási energiája és a visszalökött mag energiája között.

Spektrum: Kibocsátott/mért részecskék száma a mérés alatt a kinetikus/leadott energia függvényében

Bomlási módok - alfabomlás

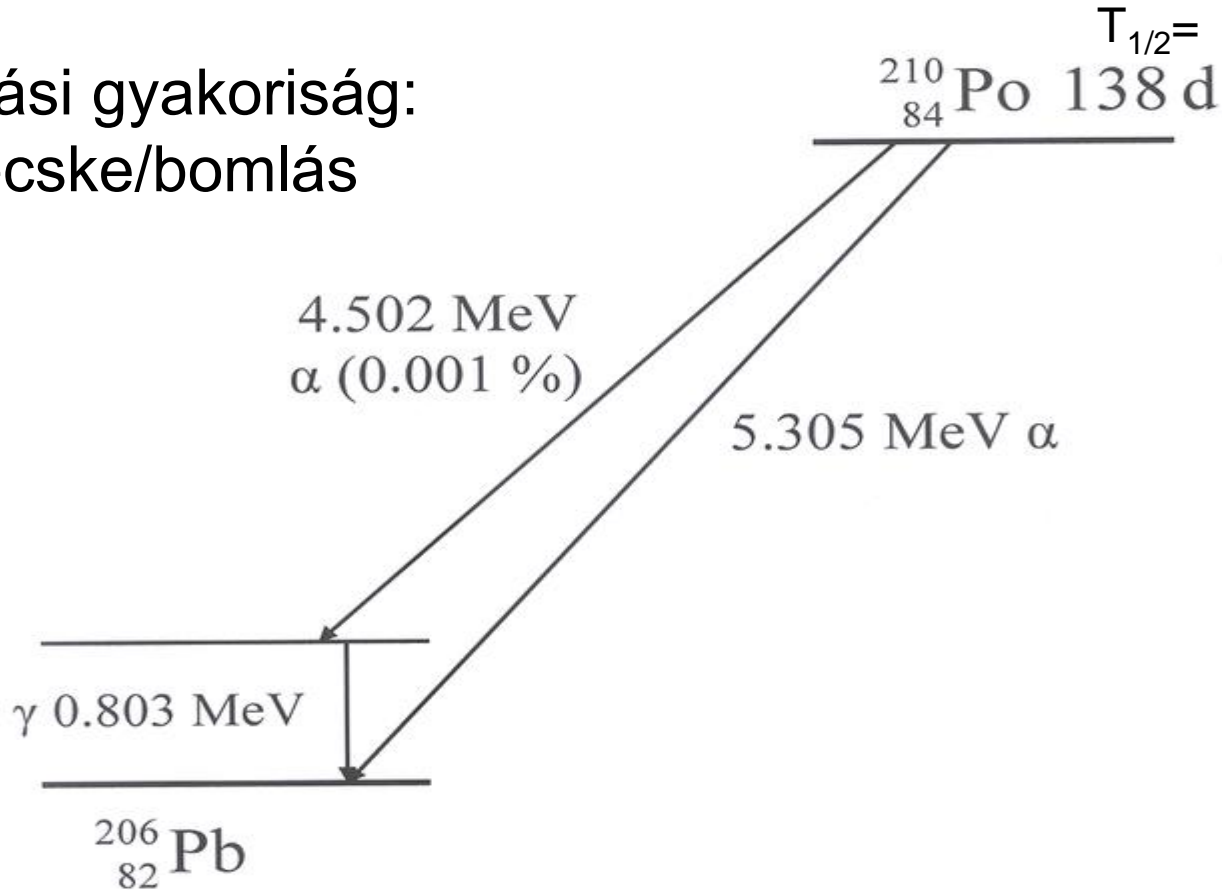


Az alfabomlás
bekövetkezése csak
az „alagút-effektus”
(Gamow, 1928.)
révén lehetséges, ami
„átvezet” a
potenciálgáton.

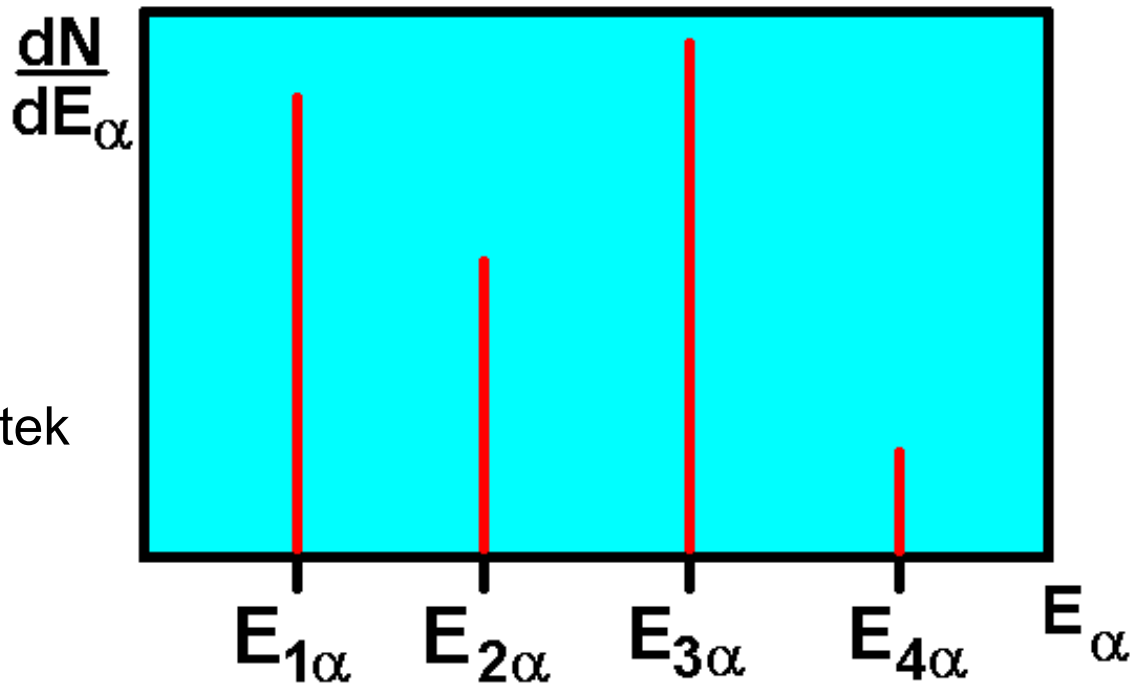
A rajz forrása: <http://www.nature.com/physics/looking-back/gurney/index.html#f1>

Az α -bomlás energiaszerkezetének vázlatja

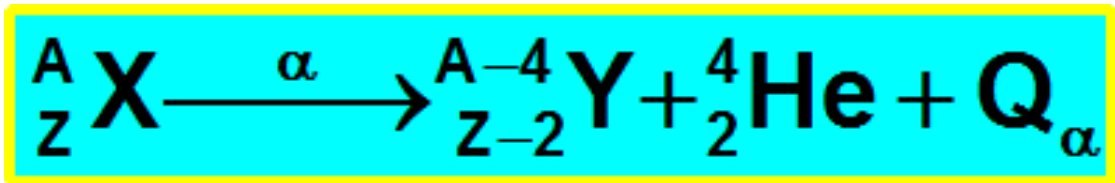
Bomlási gyakoriság:
részecske/bomlás



Alfasugárzás – diszkrét energiák



Ugyanez vonatkozik a gamma átmenetek energiáira is.



Bomlási módok – bétabomlás

A kinetikus energia véletlenszerű (átlagban kb. 1:2) arányban megoszlik az elektron/pozitron és az antineutrínó/neutrínó között. Ezért a részecskék kinetikus energiája nem diszkrét. A bomlás hajtóereje a gyenge kölcsönhatás.

1) β^- : elektron és antineutrínó kibocsátása

$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$: a rendszám eggyel nő

2a) β^+ : pozitron és neutrínó kibocsátása

$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$: a rendszám eggyel csökken

$$e^+ + e^- = 2f$$

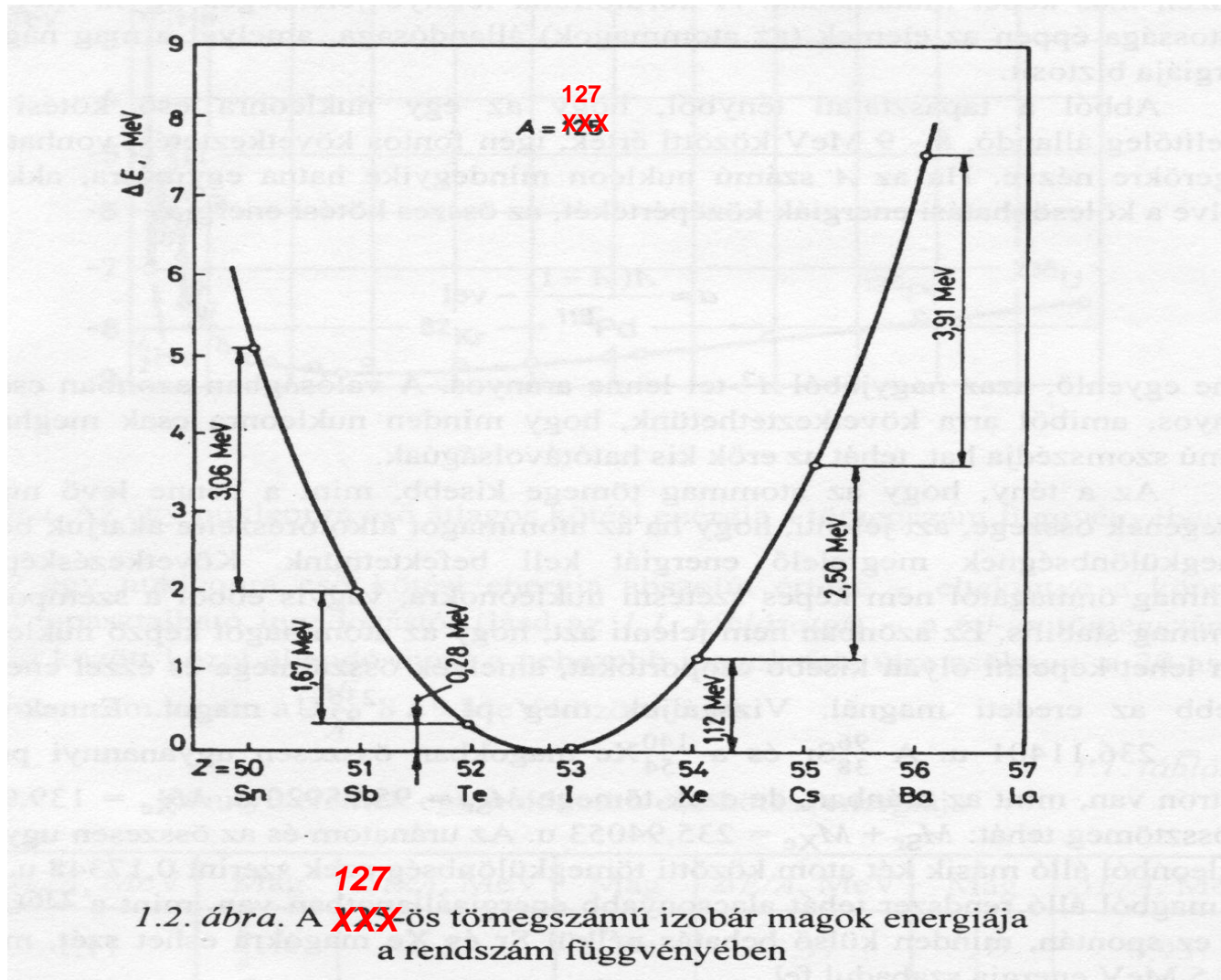
„antianyag” – annihiláció: megsemmisülés

2b) elektronbefogás (EC – electron capture) neutrínó kibocsátása

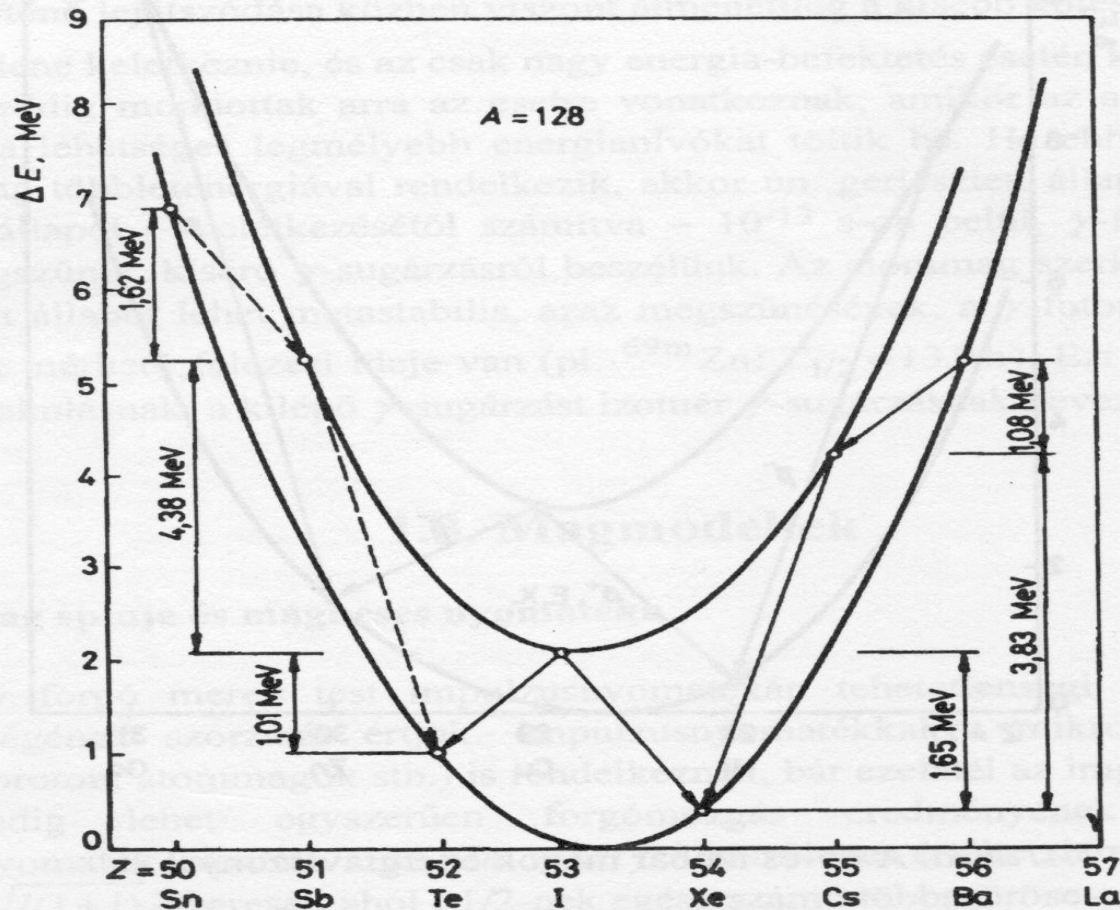
$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$: a rendszám eggyel csökken

A befogás gömbszimmetrikus „s” pályáról történik, az „elfogyott” pályaelektron pótlódik egy külső pályáról – kísérő karakterisztikus röntgensugárzás-kaszád keletkezik

Izobár magcsoport bomlási rendje – páratlan tömegszám



Izobár magcsoport bomlási rendje – páros tömegszám

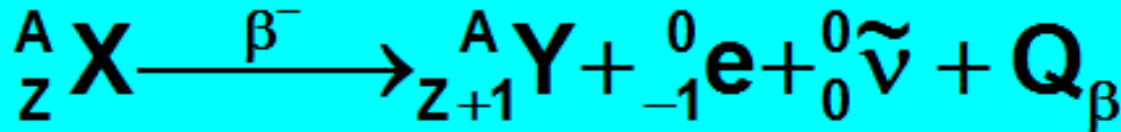
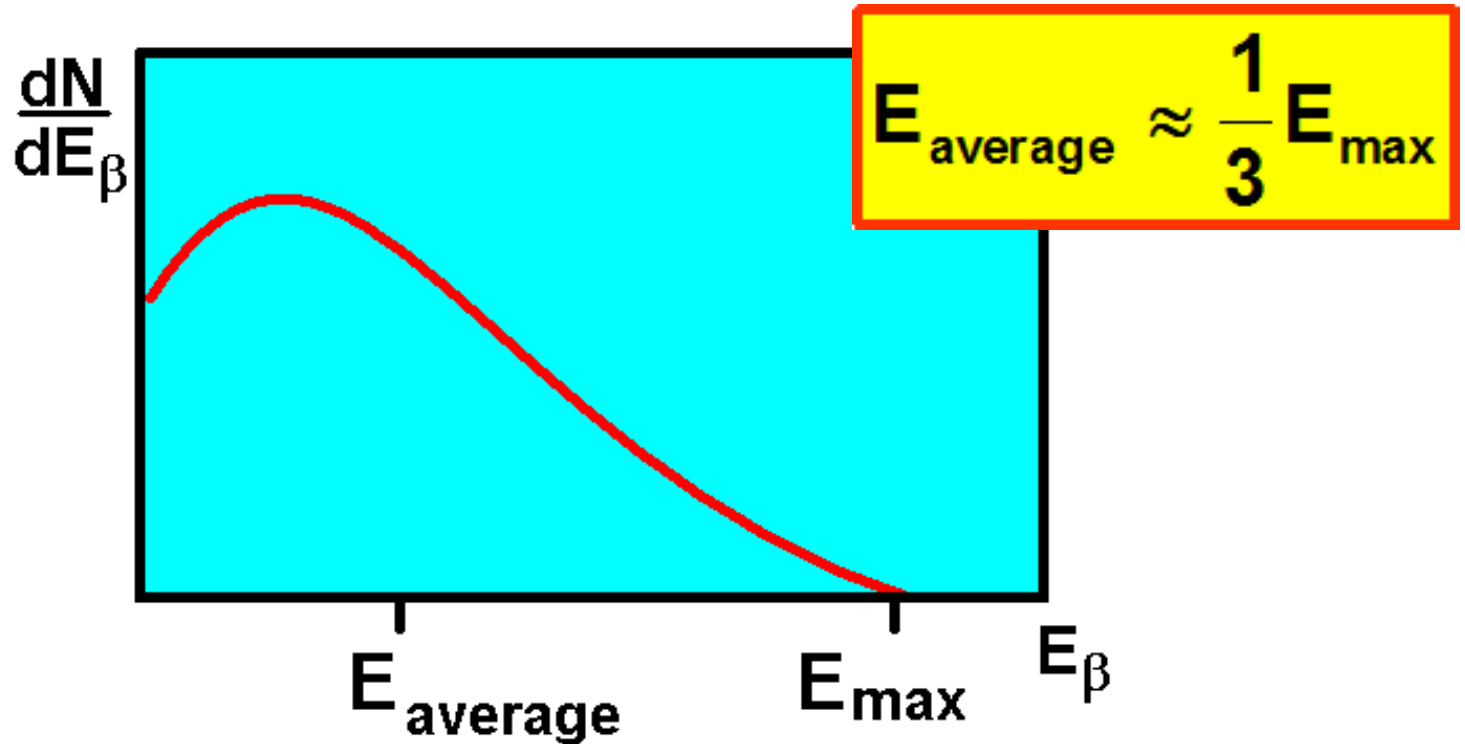


A két „magcsoport”-
ára forrása:

[Radiokémia és izotóptechnika](#)
([Nagy Lajos György, Nagyné László Krisztina](#))
[Műegyetemi kiadó, 1997](#)

1.3. ábra. A 128-as izobár magok energiaviszonyai

Bétasugárzás: folytonos energiaeloszlás



Bomlási módok – gamma átmenet

Gamma átmenet: a nukleonok energiaszintek közötti átrendeződése nyugalmi tömeggel és töltéssel nem rendelkező foton kibocsátásával jár. A γ -bomlás „hajtóereje” nem határozható meg közvetlenül, mint az α - és β -bomlásé, mert ez a bomlási mód csak más magátalakulások „maradék” energiájának leadása során következik be.

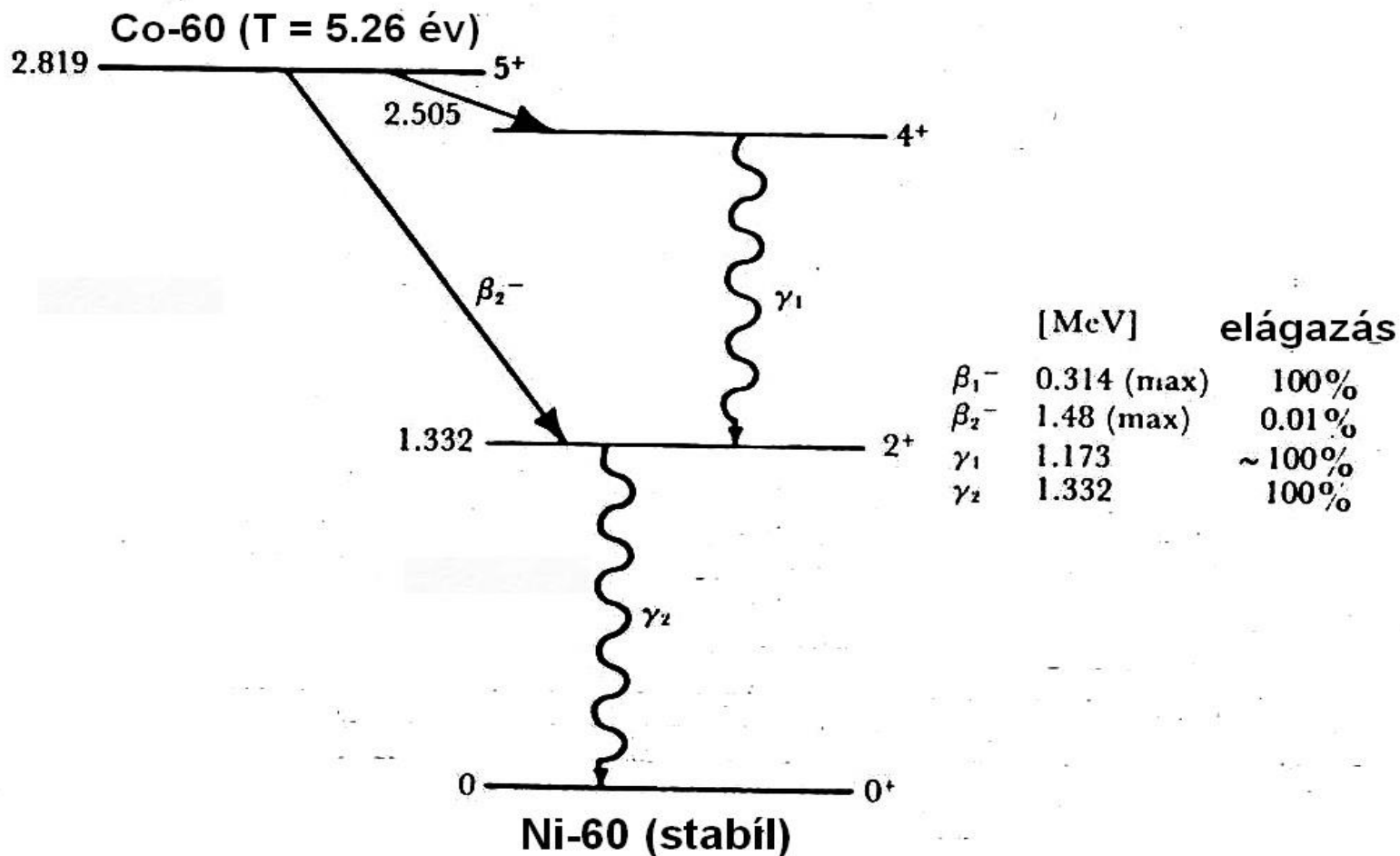
A foton energiája diszkrét, azonos a változáshoz tartozó belső szerkezeti energiaszintek különbségével, ezért jellemző az adott radioizotópra.

A mag belső struktúrájának változása egyes esetekben (főként nagyobb atommagoknál és kisebb energiaváltozásoknál, $E_\gamma < 2-300$ keV) nem foton kibocsátásával jár, hanem az energia egy, általában belső, szimmetrikus atompályán (s pályák) rezidens (azaz a magon „belül” is bizonyos tartózkodási valószínűséggel rendelkező) elektron mozgási energiájává alakul. Ez a *belső konverzió* (internal conversion, IC), amit az elektronbefogáshoz hasonlóan szintén egy karakterisztikus röntgenfoton kibocsátása kell, hogy kövessen.

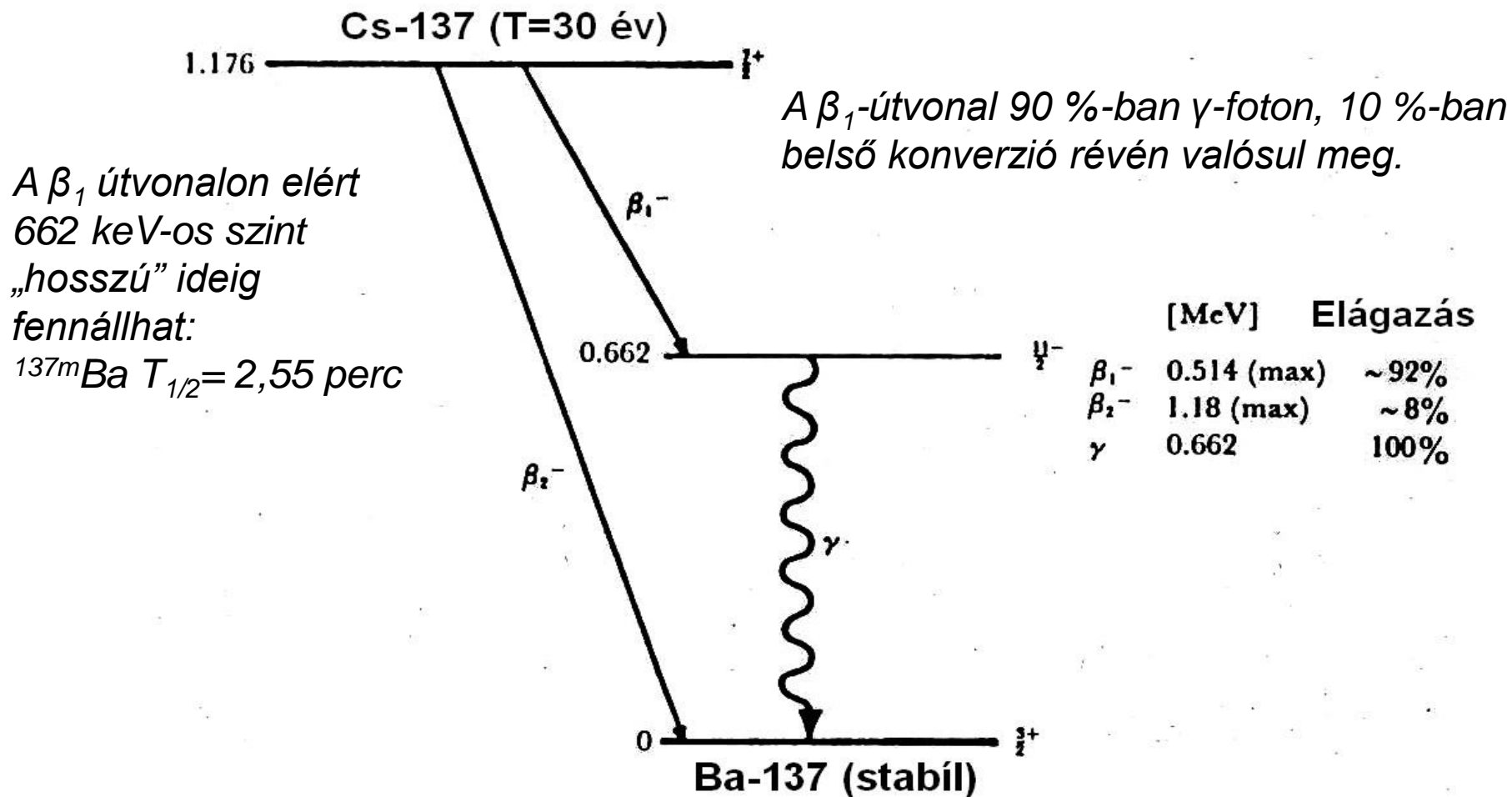
$$E_\gamma \Rightarrow E_{e-,kin} + E_{e-,köt}$$

A belső konverzióval kilépő elektron energiája diszkrét!

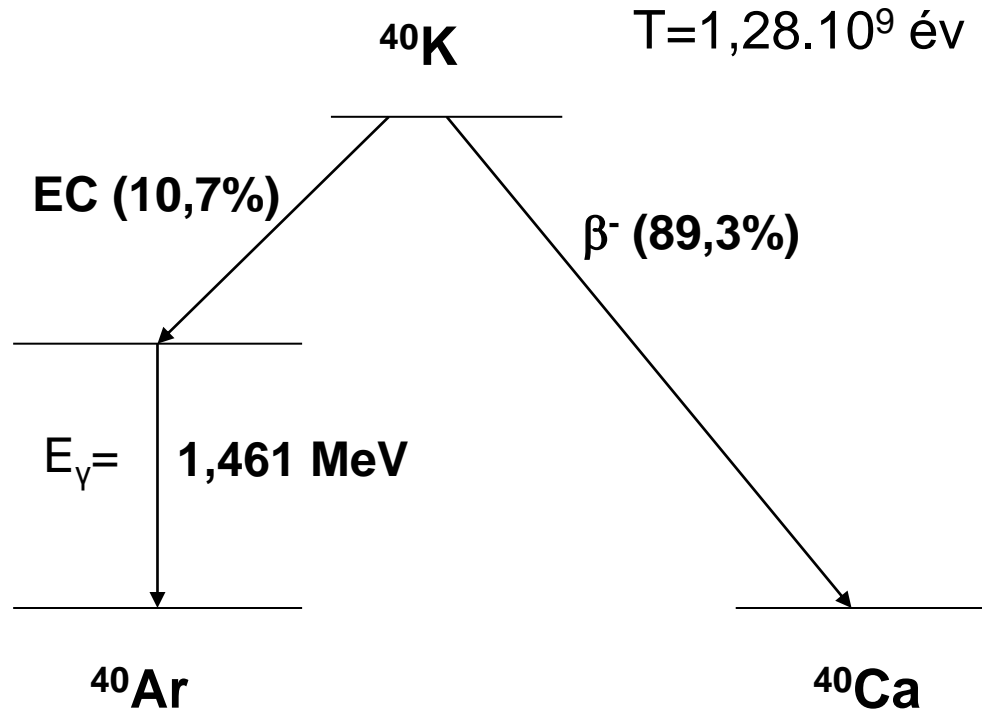
Béta-bomlás és gamma-átmenet energiaszintek és állapotok



Béta-bomlás és gamma-átmenet energiaszintek és állapotok



Béta-bomlásfajták és gamma-átmenet



Számítási példa: az emberi test ^{40}K -tartalmának radioaktivitása

^{40}K felezési ideje $1,28 \cdot 10^9$ év,
az átlagos ember testtömege
(m_e) 70 kg,

az átlagos K-tartalom (c_K):
férfiak 1,7 – 2,7 g/kg,
nők 1,3 – 2,3 g/kg
átlag: 0,2 %

izotóparány (Θ) a kálium 0,0118
%-a ^{40}K

$$A = N \cdot \lambda \quad [\text{Bq}]$$

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{1,28 \cdot 10^9 \cdot 365,25 \cdot 86400} \quad [\text{s}^{-1}]$$

$$N = \frac{m_{^{40}\text{K}}}{M} \cdot N_A$$

$$N = \frac{70 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,18 \cdot 10^{-4}}{40} \cdot 6 \cdot 10^{23}$$

Aktivitás (A):

kb. 4200 Bq

$f_\gamma = 0,107$

Fotonintenzitás:

455 foton/s

$$m_{^{40}\text{K}} = m_{ember} \cdot c_K \cdot \Theta \quad 29$$

A sugárzások és az anyagi közeg kölcsönhatásai

A közeg kölcsönhatásra képes alkotórészei: elektronok, az atomok elektromágneses erőtere, atommagok.

A közeg és a sugárzás közötti kölcsönhatás szerint:

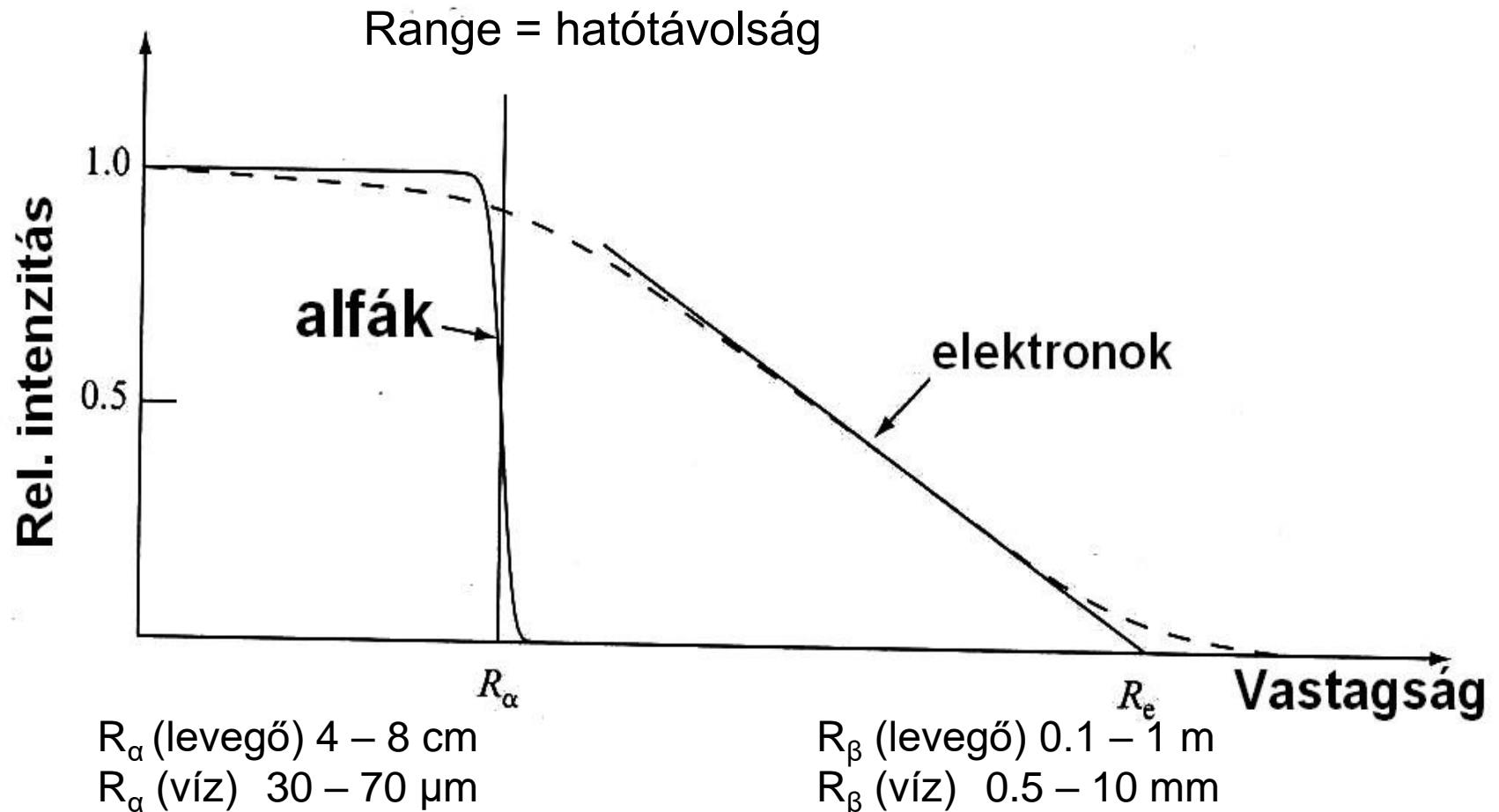
- Közvetlenül ionizáló sugárzások: α , β , γ , röntgen – az elektronoknak képesek azok ionizációjához elegendő energiát átadni. A fotonokkal való ütközés az emberi test, illetve a sugárzást mérő detektorok mérettartományában csak az energiaátadás első lépését jelenti, az átvitel további lépései már a meglökött „primer” elektronhoz köthetők. Az α - és β -részecske „végig” részt vesz az energiaátadásban.

- Közvetve ionizáló sugárzás: neutronok - elektronokkal nem képesek energiát cserélni, de az atommagokkal való kölcsönhatásaik következtében ionizációra képes részecskék jelennek meg.

Az elektronokkal való ütközés sem vezet minden esetben azok ionizációjára. A sugárzás által több lépésben átadott energia egy része (általában 50 - 60 %-a) nem ionizációt, csak gerjesztést eredményez, azaz összességében a közeg termikus energiáját növeli meg.

A gyorsan mozgó szabad töltéshordozók (α^{2+} , β^- -részecskék vagy ionizált szekunder elektronok) az atomok elektromágneses terében fékeződve járulékos fotonsugárzást = folytonos röntgensugárzást kelthetnek.

Alfa- és bétasugárzás elnyelése az anyagban



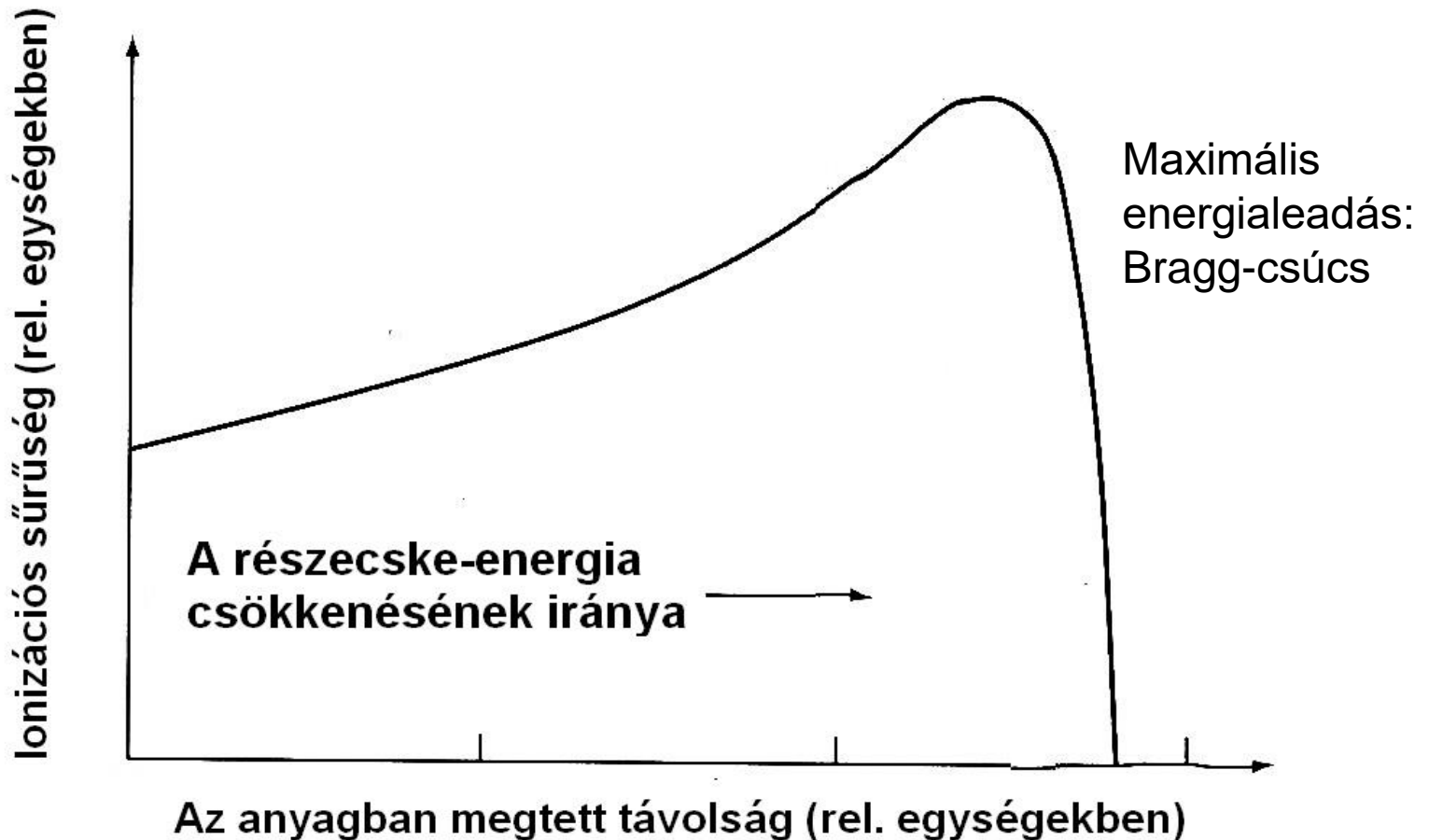
Linear Energy Transfer (LET)

Egységnyi úthosszon leadott energia:

- *LET = az ionizáló sugárzás részecskéinek a pálya mentén leadott energiája*
- *Egységnyi anyagvastagságra eső leadott energia: Stopping Power*

$$\left| \begin{array}{l} LET = \frac{\Delta E}{l} \left[\frac{keV}{\mu m} \right] \\ SP = \frac{\Delta E}{d} \left[\frac{keV}{\mu m} \right] \end{array} \right.$$

Lineáris energiaátadási tényező (LET) alfa- és bétasugárzásra



Alfa- és béta-sugárzás kölsönhatása anyagi közeggel

α -sugárzás LET-értéke vízben: $\sim 100 \text{ keV}/\mu\text{m}$
Energiaátvitel formái: ionizáció vagy gerjesztés
Egy lépésben átadható maximális energia (Q_α):

$$Q_\alpha = \frac{4mME}{(M+m)^2}$$

m: elektron tömege

M: alfarészecske tömege

E: az alfarészecske energiája
a kölsönhatás előtt

β -sugárzás LET-értéke vízben: $<10 \text{ keV}/\mu\text{m}$
Energiaátvitel formái:

- Ütközés elektronnal: ionizáció vagy gerjesztés ($Q_a \approx E$)
- Atomok elektromágneses erőterével: fékezési sugárzás (folytonos röntgensugárzás, energiája a közeg rendszámától is függ), Cserenkov-sugárzás: az adott közegben érvényes fénysebességnél nagyobb sebességű elektron látható fényt is kibocsát.

A hatótávolság lényegesen kisebb, mint az energia-átvitelben részt vevő elektronok összes úthossza!

Az α - és β -sugárzások „gyenge áthatoló képességűek”.

Gamma-sugárzás kölcsönhatása anyagi közeggel

Foton energiaátadása részben hullám- részben anyagi természetű rendszernek – „ütközés”

- Elektronnal (ionizáció – többféle kölcsönhatásban)
- Atommaggal (abszorpció – küszöbreakció, általában csak >5 MeV energiánál, kivételek: ^2H , ^9Be)
- Atommag elektromágneses erőterével (küszöbreakció, csak $>1,02$ MeV energiánál – párkeltés, lásd később)

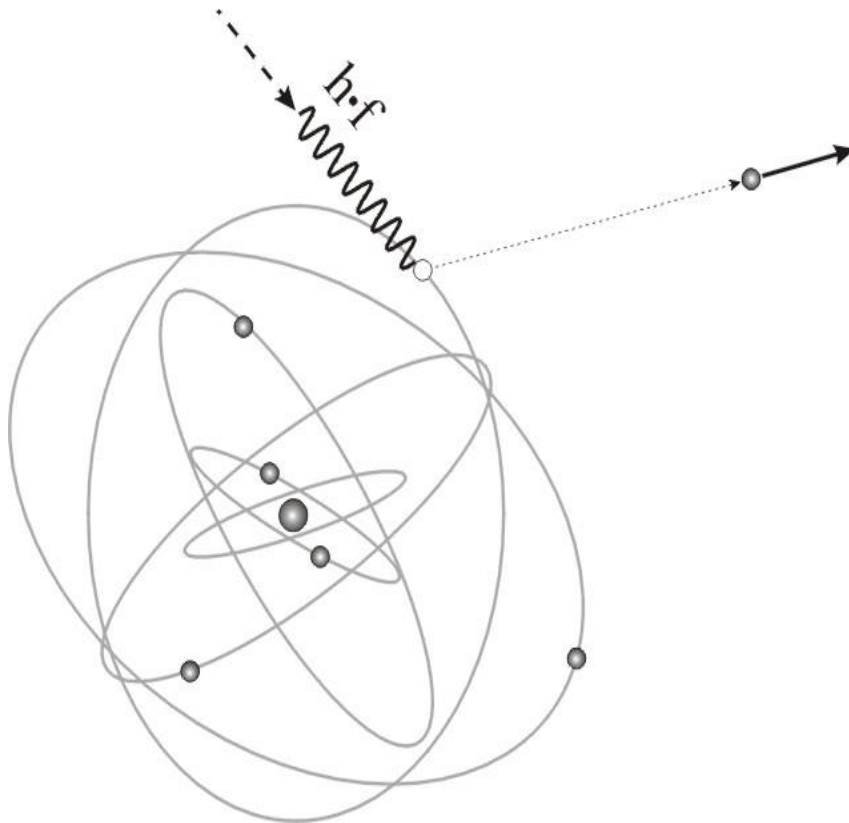
Általános sajátosság: sztochasztikus (véletlenszerű) kölcsönhatás: „fázisfüggő” energiaátvitel – nem adható meg hatótávolság.

Az energiát átvett elektronok kinetikus energiája:

- További ionizációt okozhat;
- Ionizáció nélküli gerjesztést okozhat;
- Szekunder fotonsugárzást (folytonos röntgensugárzást = fékezési sugárzást) kelthet.

A szekunder elektron már azonos módon viselkedik, mint a β -részecske!

Gamma-sugárzás kölcsönhatásai – teljes abszorpció

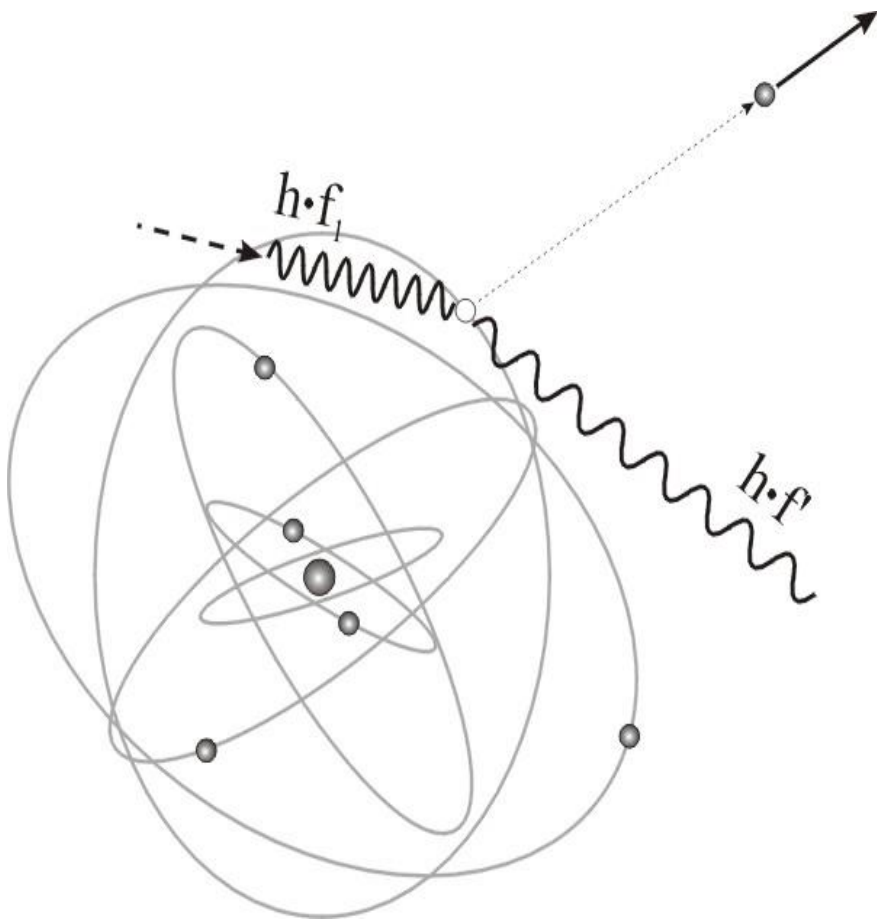


A foton teljes kinetikus energiáját átadja az egyik gömbszimmetrikus „s”-pályán lévő elektronnak. Mivel $E_f \gg E_{ion}$, ezért az elektron nagy sebességgel „távozik” az atompályájáról. A foton megszűnik.

$$E_f = E_{e,ion} + E_{e,kin}$$

(régábbi elnevezése: fotoeffektus)

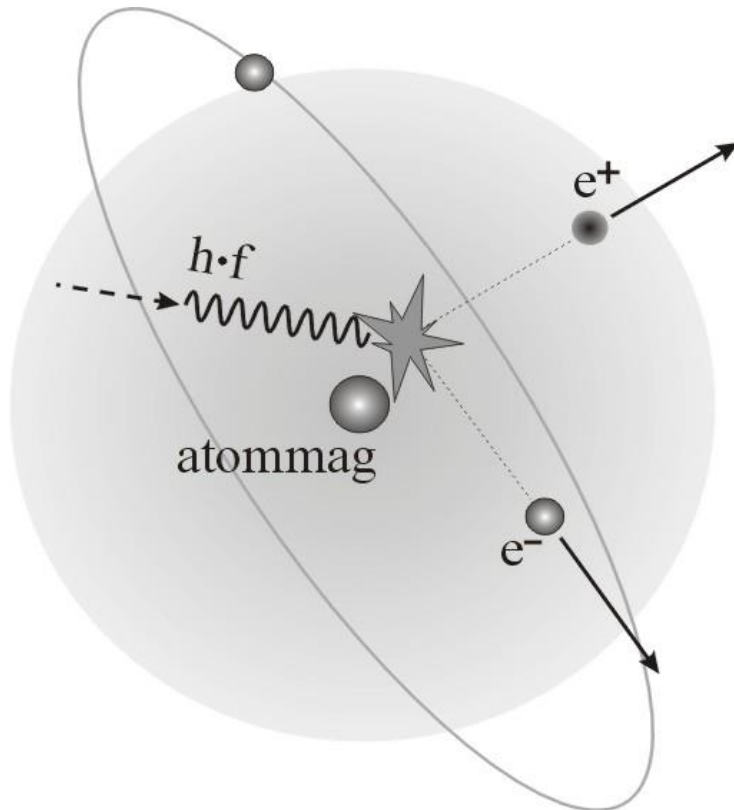
Gamma-sugárzás kölcsönhatásai – Compton-szórás



A foton kinetikus energiát ad át a vele ütköző elektronnak. Mivel $\Delta E_f \gg E_{\text{ion}}$, ezért az elektron nagy sebességgel „távozik” az atompályájáról. A szórt foton az eredetinel kisebb energiával, irányváltozással továbbhalad. A maximális (de nem teljes!) energiaátadás a 180° -os visszaszóráshoz tartozik.

$$E_f = E_{f'} + E_{e,\text{ion}} + E_{e,\text{kin}}$$

Gamma-sugárzás kölcsönhatásai - párkeltés



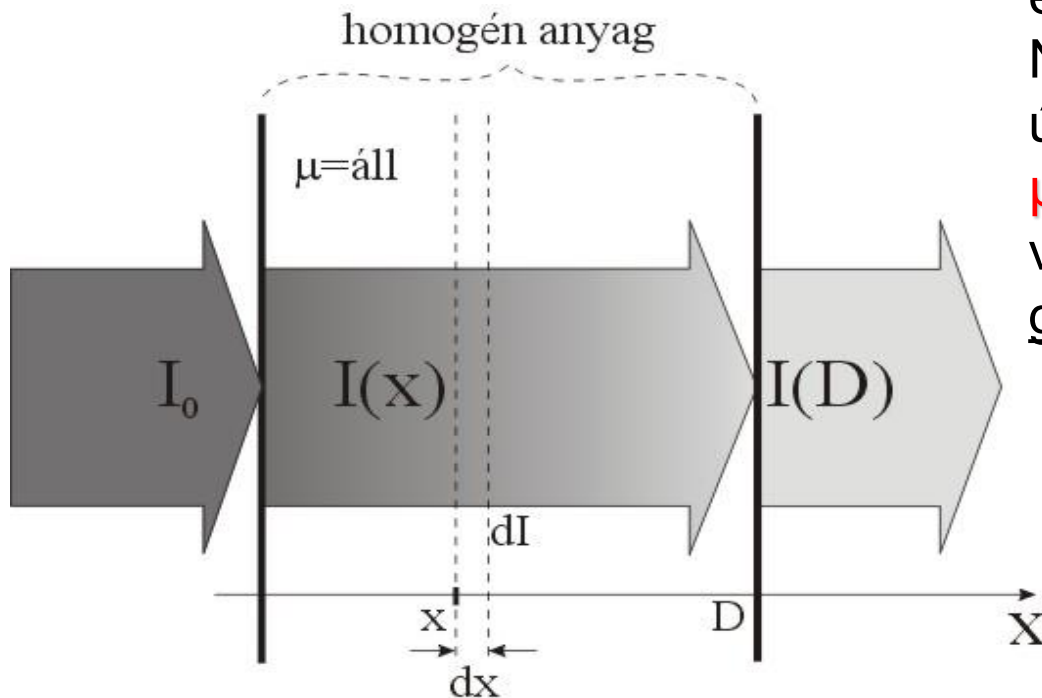
A foton az atommag elektromágneses erőterével lép kölcsönhatásba: átadja teljes energiáját és megszűnik. Egy bozon mozgási energiájából két fermion: e^- és e^+ keletkezik.

$$E_f = E_{e^-,m} + E_{e^-,kin} + E_{e^+,m} + E_{e^+,kin}$$

Csak akkor lehetséges, ha $E_f > 2 \cdot E_{e^-,m}$, azaz $E_f > 1022 \text{ keV}$
 $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$

Gamma-sugárzás kölcsönhatása anyagi közeggel – valószínűségi modell

$$dI = -I(x) \sigma N dx$$



I : részecskeáram [darab/s]
 σ : kölcsönhatási valószínűség egy „partnerre” [-]
 N : partnerek száma egységnyi úthosszon [darab/m]
 $\mu = \sigma \cdot N$ = kölcsönhatási valószínűség [1/m] = lineáris gyengítési tényező

$$dI = -I \cdot \mu \cdot dx$$

Integrálás után:
általános gyengülési egyenlet

Gamma-sugárzás kölcsönhatása anyagi közeggel

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu x)$$

μ : összetett lineáris gyengítési tényező [m^{-1}]

I : a gyengítetlenül áthaladt részecskeáram [s^{-1}]

Egy adott kölcsönhatási esemény (energiaátvitel) mindig csak egy formában történhet = a három reális valószínűségű eseménytípus egymással csak „kizáró vagy” kapcsolatban lehet!

$\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3$ – mindhárom tényező energiafüggő!

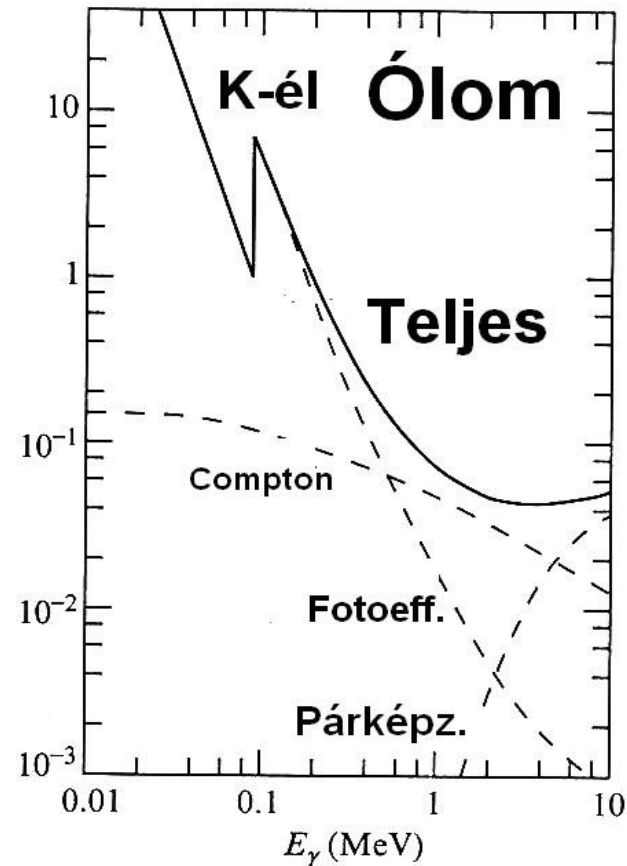
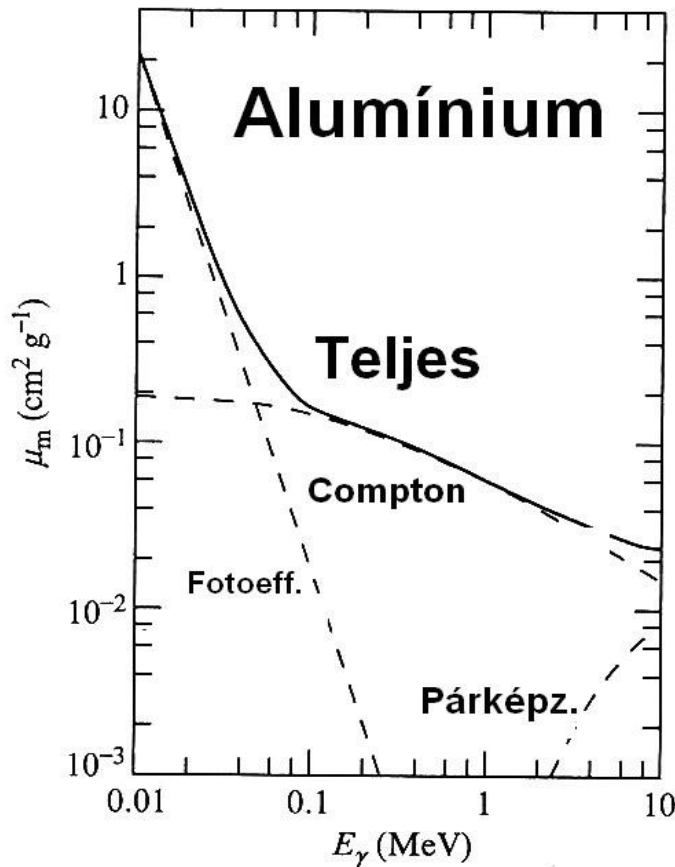
μ/ρ : egységi tömegre vonatkozó gyengítési tényező [m^2/kg]

Felezési rétegvastagságok (cm)

Anyag/ Gamma- energia	100 keV	200 keV	500 keV
Levegő	3560	4360	6190
Víz	4,15	5,1	7,15
Szén	2,07	2,53	3,54
Alumínium	1,59	2,14	3,05
Vas	0,26	0,64	1,06
Réz	0,18	0,53	0,95
Ólom	0,012	0,068	0,42

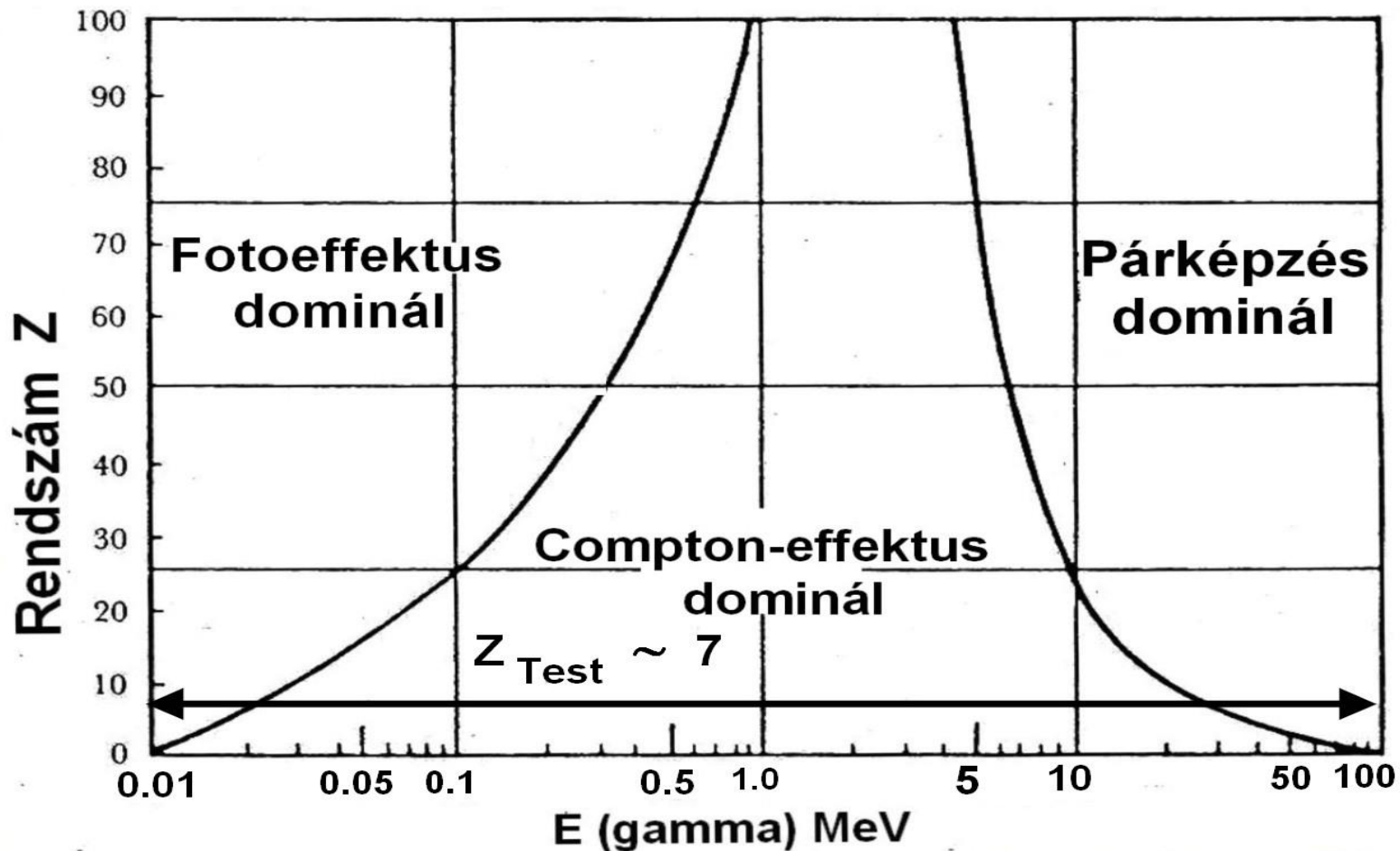
$$X_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Gamma-sugárzás és az anyag kölcsönhatása – rendszám- és energiafüggés



Ez és a következő ábra Nagy L.Gy. - László K. „Radiokémia és izotóptechnika” c. tankönyvéből való

Gamma-sugárzás és az anyag kölcsönhatása – a kölcsönhatások rendszám- és energiafüggése



Dózismennyiségek

$$D = \frac{dE}{dm} \approx \frac{\Delta E}{m} \left[\frac{J}{kg}, Gray, Gy \right]$$

Elnyelt dózis

Fizikai dózis: az anyag tömegegységében elnyelt összes sugárzási energia, csak fizikai kölcsönhatásokat foglal magába.

Bármelyik ionizáló sugárzásra értelmezhető.

Csak ionizáló sugárzásra értelmezett, de nem csak ionizációs energiát jelent, hanem a teljes elnyelt energiát.

Nem tartalmazza az anyagból kilépett (szórt, szekunder) sugárzási energiát.

„Egyesíti” a különböző forrásokból származó energia-beviteleket = a céltárgy dózisát számos egyidejű folyamat összegzett energiájának felvétele jelenti.

Külső foton-dózisteljesítmény

$$\frac{dD}{dt} = \Phi_E \cdot \frac{\mu}{\rho} \qquad \Phi_E = \frac{A \cdot f_R \cdot E_R}{4 \cdot r^2 \cdot \pi}$$

Φ_E : energiaáram-sűrűség (fluxus) [J/(m²s)]

$dN/dt = A$: a sugárforrás aktivitása [bomlás/s = Bq]

f_R : részecske-(foton)gyakoriság [foton/bomlás]

E_R : fotonenergia [J/foton]

μ/ρ : egységnyi tömegrre vonatkozó sugárgyengítési tényező
[m²/kg]

$$\frac{dD}{dt} = k_\gamma \cdot \frac{A}{r^2}$$

Érvényesség: pontszerű γ -sugárforrásra,
gyengítetlen (primer) fotonsugárzásra.
„Izodózis”-felület = r sugarú gömb felszíne
r: távolság a pontszerű sugárforrástól

Négyzetes gyengülési törvény – a dózisszámítás alapja

k_γ : **dózistényező**, szokásos dimenziója: [(μ Gy/h)/(GBq/m²)]

Tartalmazza az összes anyagi és geometriai paramétert

„Szabadon” választhatók: A és r

A sugárbiológiai és a sugárvédelem kapcsolata

A sugárbiológia alapvető feladata, hogy adatokat szolgáltatson a sugárvédelemnek, és ezek alapján biztosítani lehet a lakosság, a sugárveszélyes munkát végző dolgozók és a betegek védelmét, illetve csökkenteni lehet a kockázatot.

A sugárbiológia az ionizáló sugárzásoknak az élő anyagra való hatásaival foglalkozik.

Átmeneti és maradandó károsodást idéz elő a sugárzás, különböző szinten:

- molekula
- sejt
- szövet
- szervezet

Ionizáló sugárzások lehetséges biológiai hatásai

Molekuláris- és sejti szintű:

- DNS károsodás: pontmutáció, kromoszómatörés*
- Fehérje károsodás: indirekt, szabad gyökök hatása, enzimkárosodás*

Szövet- és szervezet szintű:

- Akut sugárbetegség*
- Krónikus sugárártalom (leukémia, malignus daganatok = rák)*

Populáció szintű:

- Magzati károsodás: letalitás, fejlődési rendellenesség*
- Genetikai állomány károsodása: meddőség*

Fizikai hatástól a biológiai hatásig

Elnyelt dózis (fizikai hatás) – ionizáció és gerjesztés

Kémiai változások: az ionok igen reaktív szabad gyököket hoznak létre (vízből, szerves molekulákból)

Biokémiai hatás: a közvetlen ionizáció és/vagy a szabad gyökök megváltoztatják egyes molekulák biokémiai viselkedését (DNS láncok törése stb.)

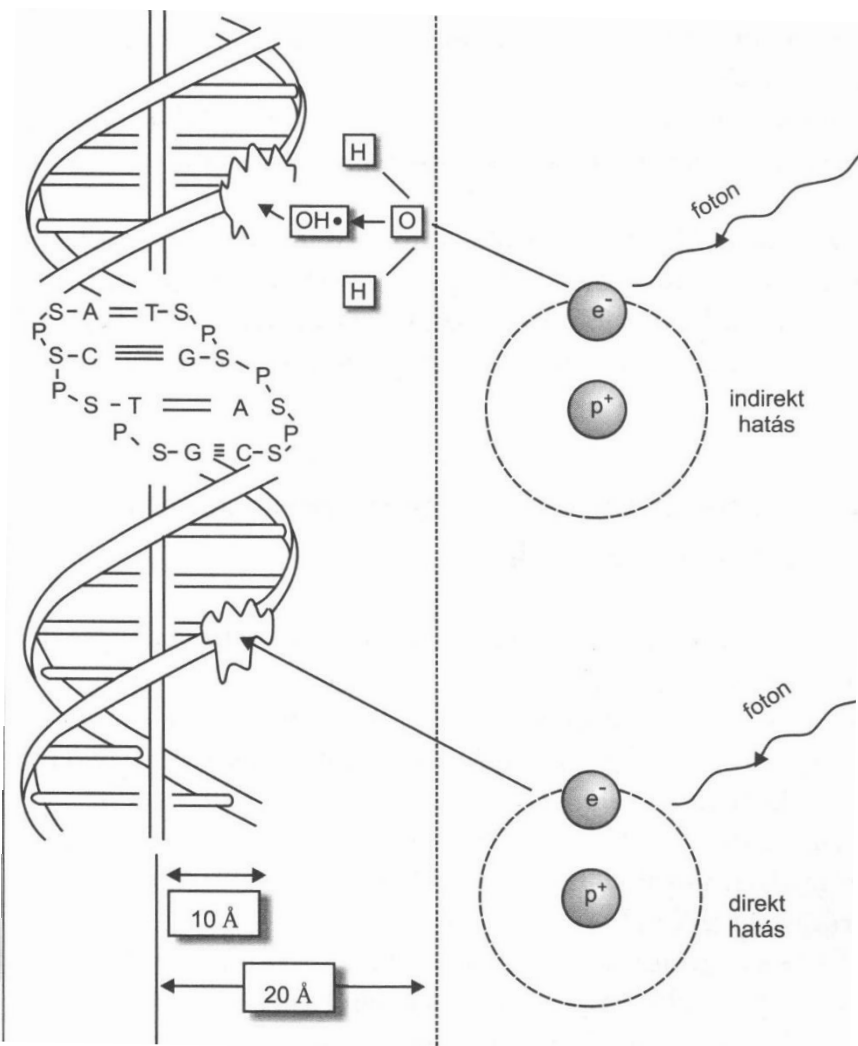
Biológiai hatás: a megváltozott anyagszerkezet megváltoztatja a biológiai „eseményeket”, életfolyamatokat.

A biológiai hatások kialakulásának időbeni lefolyása

A reakciósorozatok több részfolyamatból állnak, amelyek különböző sebességgel, különböző idő alatt mennek végbe és kölcsönösen függenek egymástól.

Fizikai-fizikokémiai fázis		
10^{-17} – 10^{-12} s	Ionizáció:	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{e}^-$
	Gerjesztés:	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^*$
	Disszociáció:	$\text{H}_2\text{O}^* \rightarrow \text{H}^\bullet + \text{OH}^\bullet$
	Hidratált elektron képződés:	$-\text{e}_{\text{aq}}^-$
Kémiai-biokémiai fázis		
10^{-10} –1 s	A hidratált elektron reakciója más szabad gyökökkel A szabad gyökök homogén eloszlása A szabad gyökös reakciók befejeződése	
1– 10^3 s	Biokémiai folyamatok	
Biológiai fázis		
Korai	órák	Sejtosztódás-károsodás, sejt és szöveti változások
	napok–hetek–évek	Idegrendszer, gyomor-béltraktus változásai vérképző rendszer károsodása, szomatikus károsodások

Az energiaátadás módjai biológiai rendszerben



- ❑ **Direkt hatás** – az energia elnyelődése és a kiválasztott elsődleges folyamat ugyanazon a molekulán következik be, amelyen a fixálódott szerkezeti és működésbeli változásokat észleljük.
- ❑ **Indirekt hatás** – az energia abszorpciója, majd az általa kiváltott hatás különböző molekulákon jön létre. Legfontosabb példa a szabad gyök képződés (legtöbbször vízből keletkeznek, nagy a reakcióképességük, külső elektronhéjukon páratlan spinű elektront tartalmazó atomok, molekularészek).

Szabad gyök képződés

- ❑ A szabad gyök olyan atom, melynek külső elektronhéján egy párosítatlan spinű elektron van, így igen reaktív.
- ❑ Képződhet egy atomból vagy atomcsoportból, molekulából.
- ❑ A szabad gyökök reagálnak egymással vagy a sejt molekuláival, így a vízzel is.
- ❑ Reakció során a szerves molekulákból, biomolekulákból is képződhetnek szabad gyökök.
- ❑ A reakciósorozat elsősorban a két sugárzásra érzékeny molekulatípus: a DNS és a membránok többszörösen telítetlen zsírsavmolekuláinak (PolyUnsaturated Fatty Acid - PUFA) károsítását okozhatja.
- ❑ A szabad gyök képződésével a sugárzás hatásának kémiai szakasza kezdődik meg.

Az emberi sejtmag (nucleus) modellje

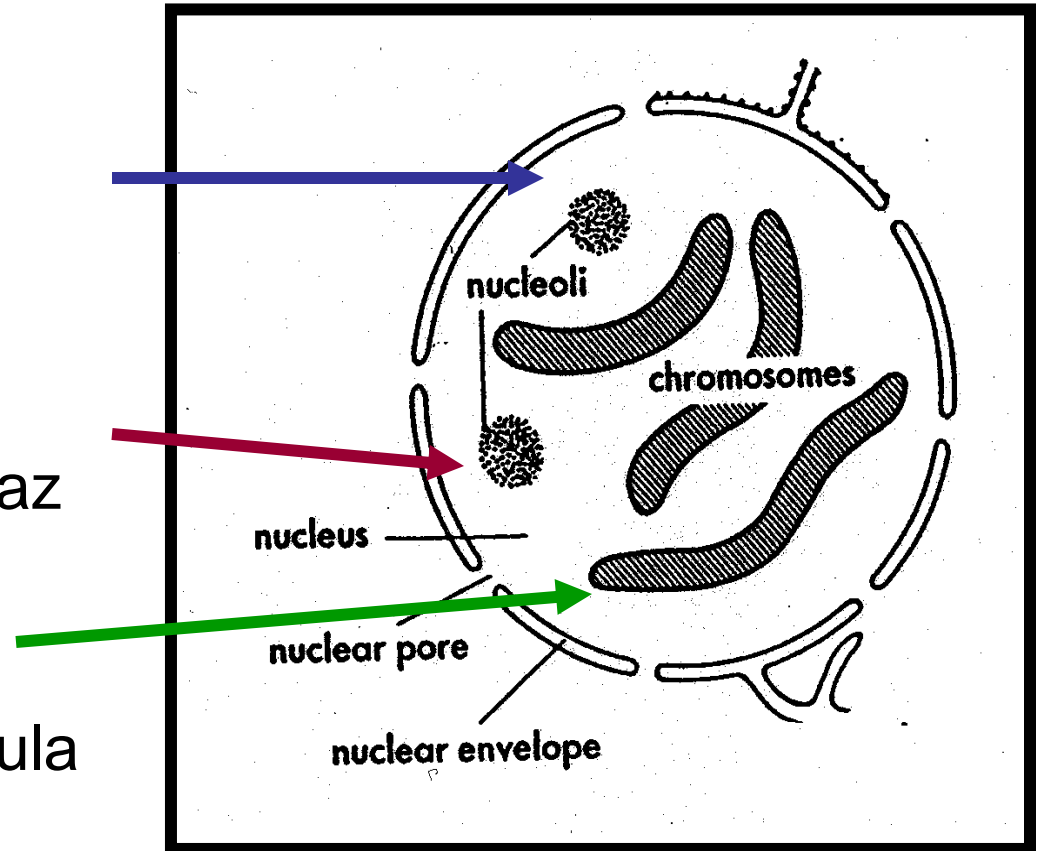
Membrán - burkolat

- félig áteresztő
- elválasztja a sejtmagfolyadékot a citoplazmától

Nucleolus – RNS-t
(ribonukleinsav) tartalmaz

- fehérje és DNS szintézis

DNS – a genetikus kódot tartalmazó makromolekula (dezoxi-ribonukleinsav)



A sejtek adatátviteli rendszere

A következő sejt generációhoz szükséges információt a sejtmag DNS-állománya tárolja.

DNS: cukor- és foszfátcsoportokból felépülő kettős spirál, amelyekhez szerves bázisok kapcsolódnak. Lánclemek: nukleotidok. A kettős láncot a bázisok között hidrogénhidak tartják össze.

DNS-ből felépülő örökítő szerkezeti elemek: kromatin, kromoszómák.

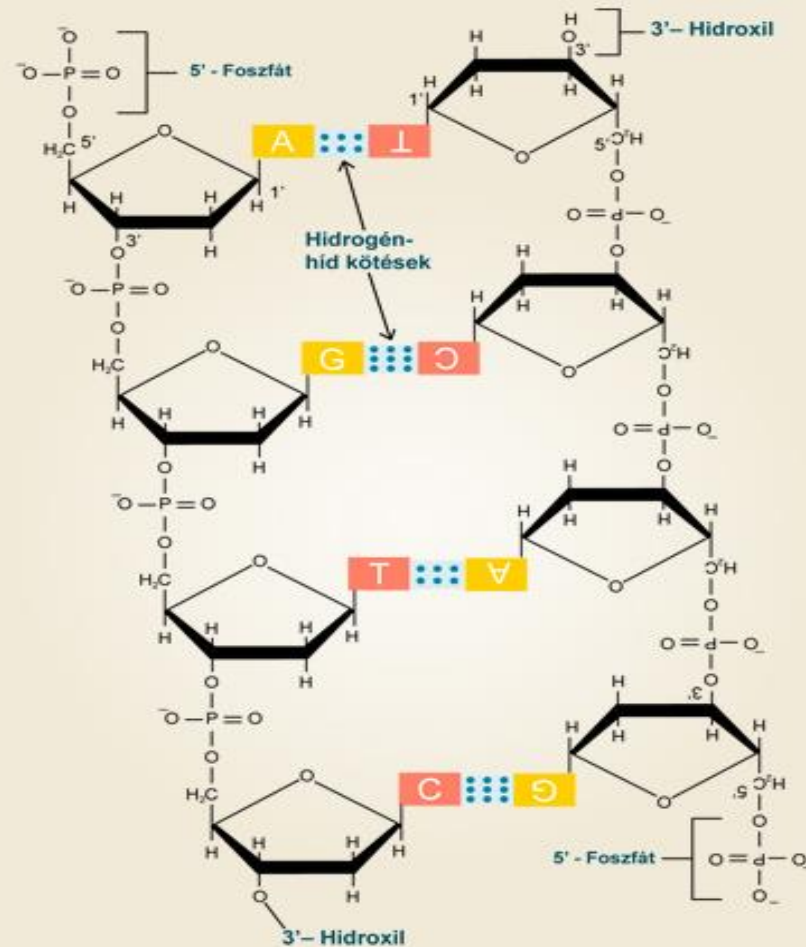
A DNS a sejtet felépítő fehérjék összetételét kódolja.

Gén: a DNS egy fehérjét kódoló, vagy egy sejt tulajdonságot meghatározó darabja.

A gének együtt alkotják az egyed genetikai információit tartalmazó genomot.

A DNS cukor + foszforsav-diészter lánc általános, a különbségeket a lánchoz kapcsolódó bázispárok jelentik.

A sejtek adatátviteli rendszere



8.2. ábra. A DNS másodlagos szerkezete. A két antiparallel lefutású DNS szál az adenin (A) – timin (T) és guanin (G) – citozin (C) bázisok közötti hidrogénhíd kötésekkel kapcsolódik össze kettőshélix szerkezetet alkotva

Biomolekulák sérülései

A sejtben kétfajta sugárzásra különösen érzékeny célpont van, sérülésük komoly biológiai következményekkel jár.

*Egyik a sejttagon belül a kromatin struktúrába rendeződött **DNS-készlet**, a másik a sejt **membránrendszere**.*

Ezek a sejti organellek sérülhetnek az ionizáló kvantumok közvetlen hatására, vagy szabadgyökök képződésén közvetetten.

Ionizáló sugárzások káros hatásai

9. táblázat. 1 Gy kis LET-értékű sugárzás okozta károk gyakorisága egy emlőssejt magjában	
Első fizikai események	
ionizációk a sejtmagban	100000
ionizációk a DNS-ben	2000
gerjesztések a DNS-ben	2000
Biokémiai károk	
DNS egylánc-törés	1000
8-hidroxiadenin-képződés	700
timinkárosítás	250
DNS kettőslánc-törés	40
DNS-fehérje keresztkötés	150
Sejtszintű károsodások	
sejtpusztulás	0,2–0,8
kromoszómaaberráció	1
HPRT-mutáció	10^{-5}

HPRT = hypoxanthine phosphorybosyl transferase a „génhibák” felderítését végző enzim

A sejtekben sugárhatásra létrejövő károsodások

- A **letális károsodás** azt jelenti, hogy a sejt a sérülést nem képes kijavítani, és mindenféleképpen el fog pusztulni. Ha két törés keletkezik, akkor mindkét lánc sérülése fennáll, a törtvégek messze kerülhetnek egymástól. Emiatt letális kromoszómaaberrációk alakulhatnak ki, ami ún. mitotikus sejthalálhoz vezethet. Ionizáló sugárzás hatására a sejt nem azonnal pusztul el, hanem még megkísérel osztódni, s csak ezután következik be az apoptózis.
- A **potenciálisan letális** károsodás letális károsodás lenne, de a sejt bizonyos feltételek mellett képes kijavítani, pl. lehetőségük van arra, hogy a javító mechanizmusok működése beinduljon és a potenciálisan letális károsodásokat a sejt kijavítsa.
- A **szubletális** károsodás egy kevésbé súlyos, kijavítható sérülés (ebben az esetben sugárhatásra általában egyláncú DNS-törés keletkezik, melyet a sejt a javító mechanizmusok (DNS repair-rendszer) segítségével gyorsan ki tud javítani).

Az ionizáló sugárzások biológiai hatásai

A biológiai hatások osztályozása:

Szomatikus: a hatást elszenvedő személyen jelentkezik

Genetikai: a személy utódain jelentkezik

Determinisztikus: A károsodás súlyossága függ a dózistól, a hatás egy bizonyos küszöbdózis fölött következik be.

Sztochasztikus: A károsodás valószínűsége függ a dózistól, küszöbdózis nincs.

Szomatikus és genetikus hatás; determinisztikus hatás

A két sugárbiológiai hatásmód megkülönböztetésének csak akkor van értelme, ha a genetikai anyag intracellulárisan helyezkedik el.

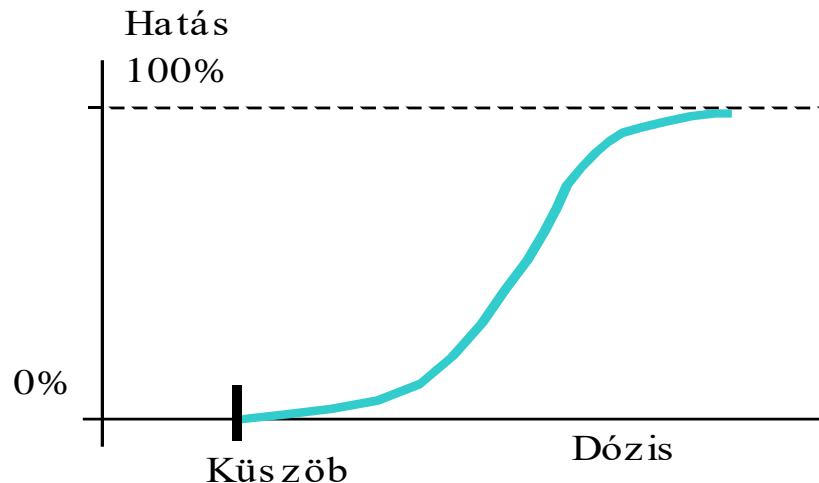
Ha egy csírsejt sugárártalma az utódokban nem manifesztálódik, úgy az ártalom a csírsejt szomatikus, de nem genetikai ártalmának minősül.

A szomatikus determinisztikus hatás egyik jellemző adata az $LD_{50/30}$ -érték. Ez akkora sugárdózisnak felel meg, amely a kérdéses populáció 50%-át 30 napon belül elpusztítja, illetve a besugárzott molekulák felét inaktiválja.

Az ionizáló sugárzás determinisztikus hatása

Determinisztikus hatás:

- küszöbdózishoz kötött (érzékeny szövetekre: 0.3 – 0.4 Gy, magzat: 0.1 Gy)
- szövetpusztulást okoz a sugárzás
- akut/azonnali hatás
- életveszélyes károsodások: központi idegrendszer, emésztőrendszer, vérképző rendszer



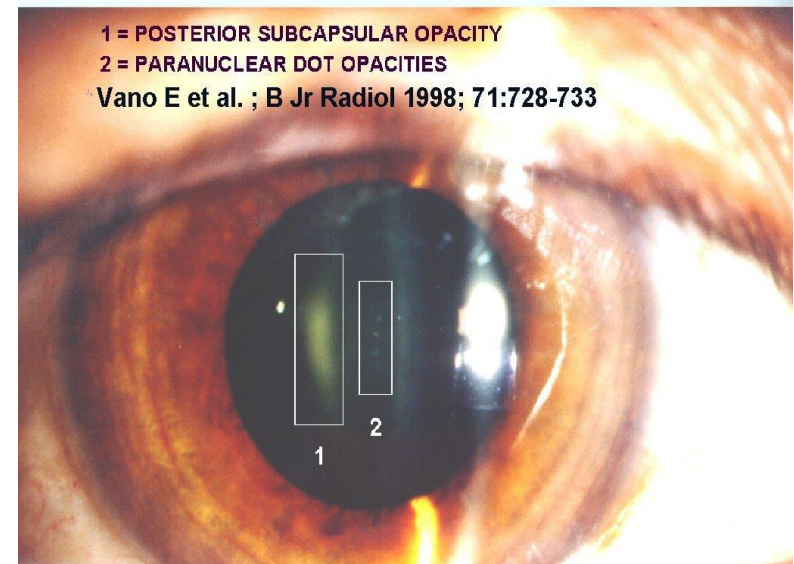
Determinisztikus hatások

Küszöbdózis felett a sugárzás károsító hatása egyértelmű

- ❑ *Determinisztikus jellegű, mindenkinél elkerülhetetlenül fellép*
- ❑ *A hatás súlyossága arányos a dózissal*

A determinisztikus hatások típusai

- ❑ **Sugársérülés:** lokális expozíció
következménye
- ❑ **Sugárbetegség:** egész test expozíció
következménye



AZ AKUT SUGÁRBETEGSÉG SZAKASZAI

1 Gy-nél nagyobb dózis (egész test)

- 1. Kezdeti szakasz*
- 2. Lappangási szakasz*
- 3. Kritikus szakasz*
- 4. Regeneráció szakasza*

8 Gy már mindig halálos dózis

Kezdeti szakasz (néhány óra) tünetei:

*hányás,
étvágytalanság,
émelygés,
fejfájás,
levertség,
mozgáskordinációs zavar*

*Minél nagyobb
a dózis, annál
rövidebb a
kezdeti szakasz*

Lappangó szakasz: 2-3 Gy dózisonál 3-4 hét is lehet
10 Gy nincs lappangás

Kritikus szakasz:

*magas láz, pontszerű bőrbevézések
vérbében elváltozások
immunrendszer károsodása
egésztest dózis 3-4 Gy 60 napon belül halál*

Csernobil:

4.2-6.3 Gy	21 sugársérült	14 túlélő
2-4 Gy	43 sugársérült	42 túlélő

Regeneráció szakasza: kedvező lefolyás, a 3 szakasz tünetei
visszafejlődnek

genetikai eltérések kimutatása 0.15 Gy citogenetika

Szövetek sugárérzékenységi sorrendje

1. *Nyirokszövet*
2. *Fehérvérsejtek, csontvelői éretlen vörösvérsejtek*
3. *Gyomor-, béltraktus-nyálkahártya*
4. *Ivarsejtek*
5. *Bőr osztódó sejtrétege*
6. *Erek*
7. *Mirigyszövetek, máj*
8. *Kötőszövet*
9. *Izomszövet*
10. *Idegyszövet*

Determinisztikus hatást kiváltó dózis

$$ND = D \cdot RBE(R)$$

ND: necrotic dose = szövetpusztulást okozó elnyelt dózis

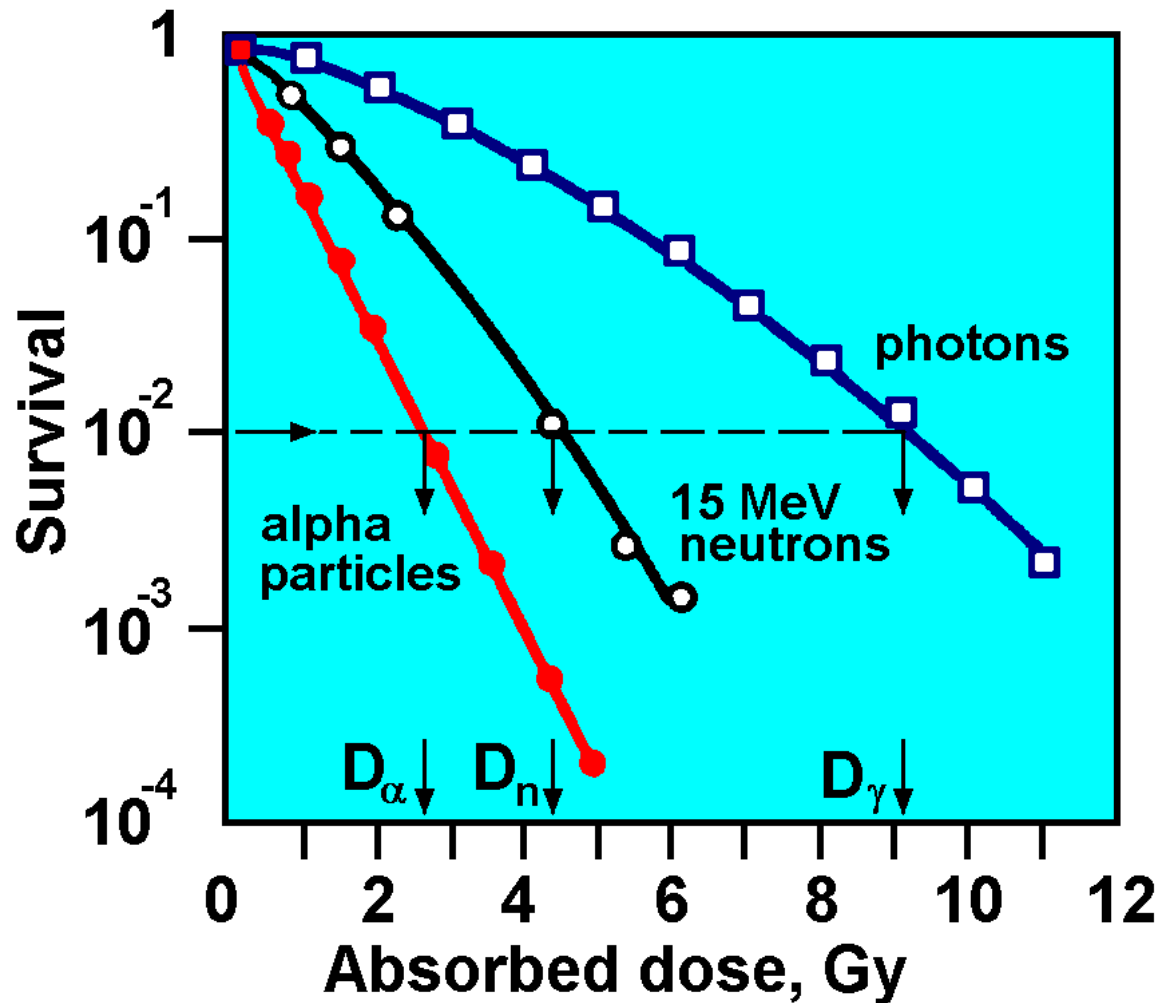
RBE: relative biological effectiveness = relatív biológiai egyenérték (károkozó képesség) – egyaránt jellemzi a sugárzástípusát és az expozíció körülményeit!

R: sugárzástípus

Relatív biológiai egyenérték (RBE)

- Az egyes sugárfajták nekrotikus biológiai károsító hatását az un. relatív biológiai hatással (RBE értékkel = relative biological effect) jellemezzük).
- Az RBE érték megmutatja, hogy hányszor nagyobb az adott sugárzás biológiai hatása a 250 kV-os röntgengéppel keltett sugárzás hatásánál.
- Az RBE érték függ attól is, hogy milyen típusú biológiai végpontnál nézzük.
- Az RBE belső sugárterhelésnél a sugárzást hordozó anyag fizikai és kémiai tulajdonságaitól is erősen függ.
- *A neutronsugárzás RBE értéke 2-6-szorosa a röntgensugárzásénak, a fotonok RBE értéke megközelítőleg 1, az energiától függetlenül.*

A sugárzás minőségének szerepe a determinisztikus hatásban - kísérlet



$$D_{\alpha} < D_n < D_{\gamma}$$

$$RBE_{\alpha} = \frac{D_{\gamma}}{D_{\alpha}}$$

$$RBE_n = \frac{D_{\gamma}}{D_n}$$

$$RBE_{\alpha} > RBE_n$$

Az ionizáló sugárzás sztochasztikus hatása

A „fő célpont” a sejtmag DNS-állománya

Őssejtek és szöveti sejtek osztódása: mitózis – ennek során az új sejt DNS-e átveszi a kiindulási sejttől az szöveti funkciókra vonatkozó információt.

Információ-átadási hiba esetén

- életképtelen az új sejt, vagy
- a hibás információt kijavítja egy mechanizmus, vagy
- a hibás információra nincs szüksége a sejtnek, vagy
- hibás sejt keletkezik, amely tumorsejtté alakulhat.

Az ionizáló sugárzás (a dózis) is okozhat DNS-hibát, ennek károsító hatása véletlenszerű.

Sztochasztikus hatás

Az ionizáló sugárzás hatása nem különbözik a természetes mutációktól, csak növelheti azok gyakoriságát.

A testi sejtekben átlagosan $0,77 \cdot 10^{-9}$ DNS-mutáció keletkezik osztódásonként és bázispáronként. Az emberi genom átlagos hossza $6,4 \cdot 10^9$ bázispár, így minden osztódásnál hozzávetőlegesen öt mutáció keletkezik; függetlenül a "különleges" környezeti hatásoktól.

(forrás: <http://mutaciok-a-szomszedban.blogspot.hu/>)

Az ionizáló sugárzás determinisztikus és sztochasztikus hatása

Sejti életciklus:

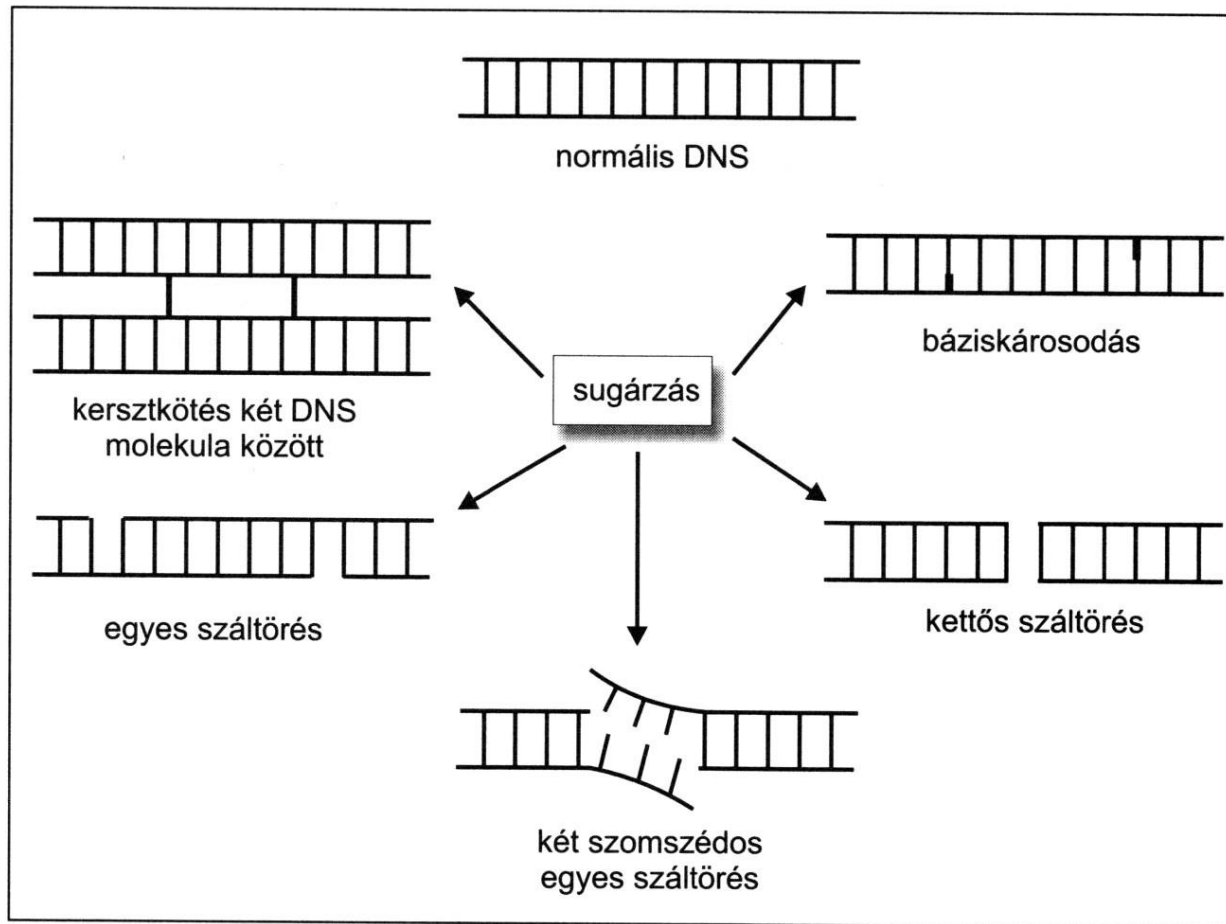
mitózis – interfázis – mitózis vagy apoptózis

Sejti rendszerek sérülése:

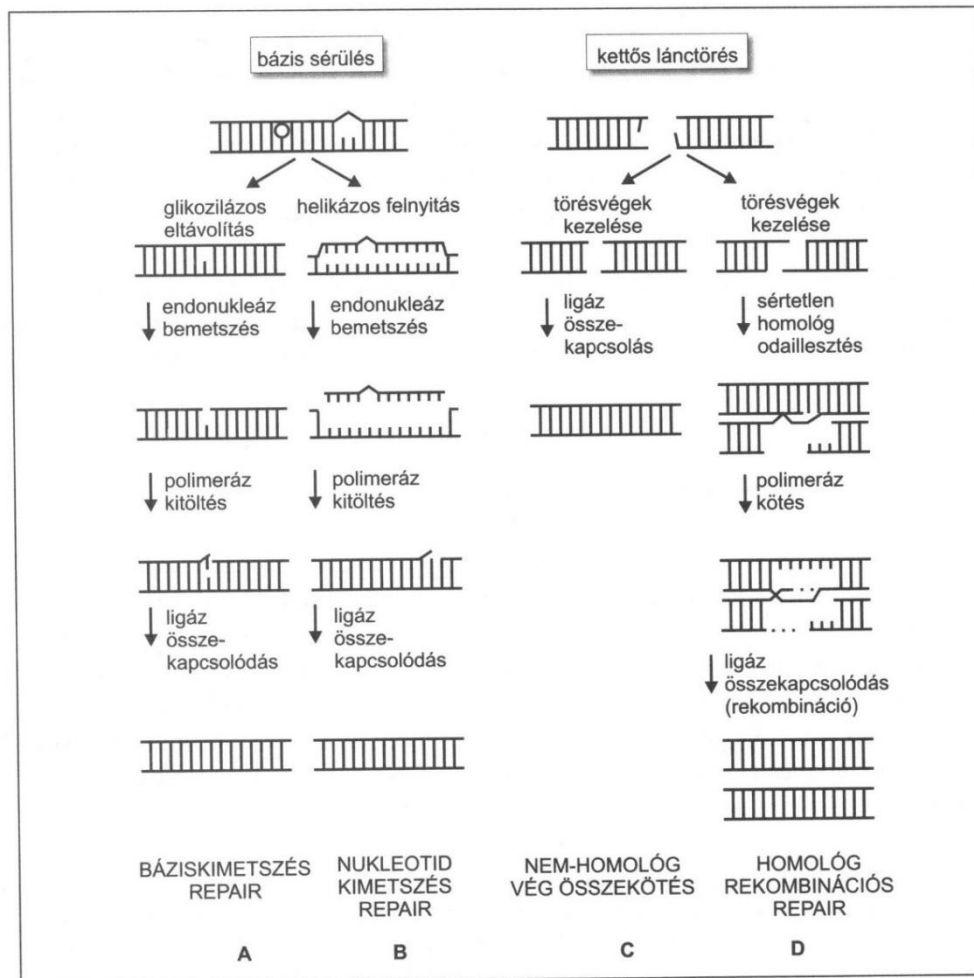
- Azonnali pusztulás: nekrozis
- Életképtelenség: apoptózis
- DNS-lánchibák: fennmaradás → mutáció

DNS lánchibák javítása „repair” enzimekkel

DNS molekula sugárkárosodásának lehetőségei



DNS molekula sugárkárosodásának helyreállítása – enzimes „repair” folyamatok

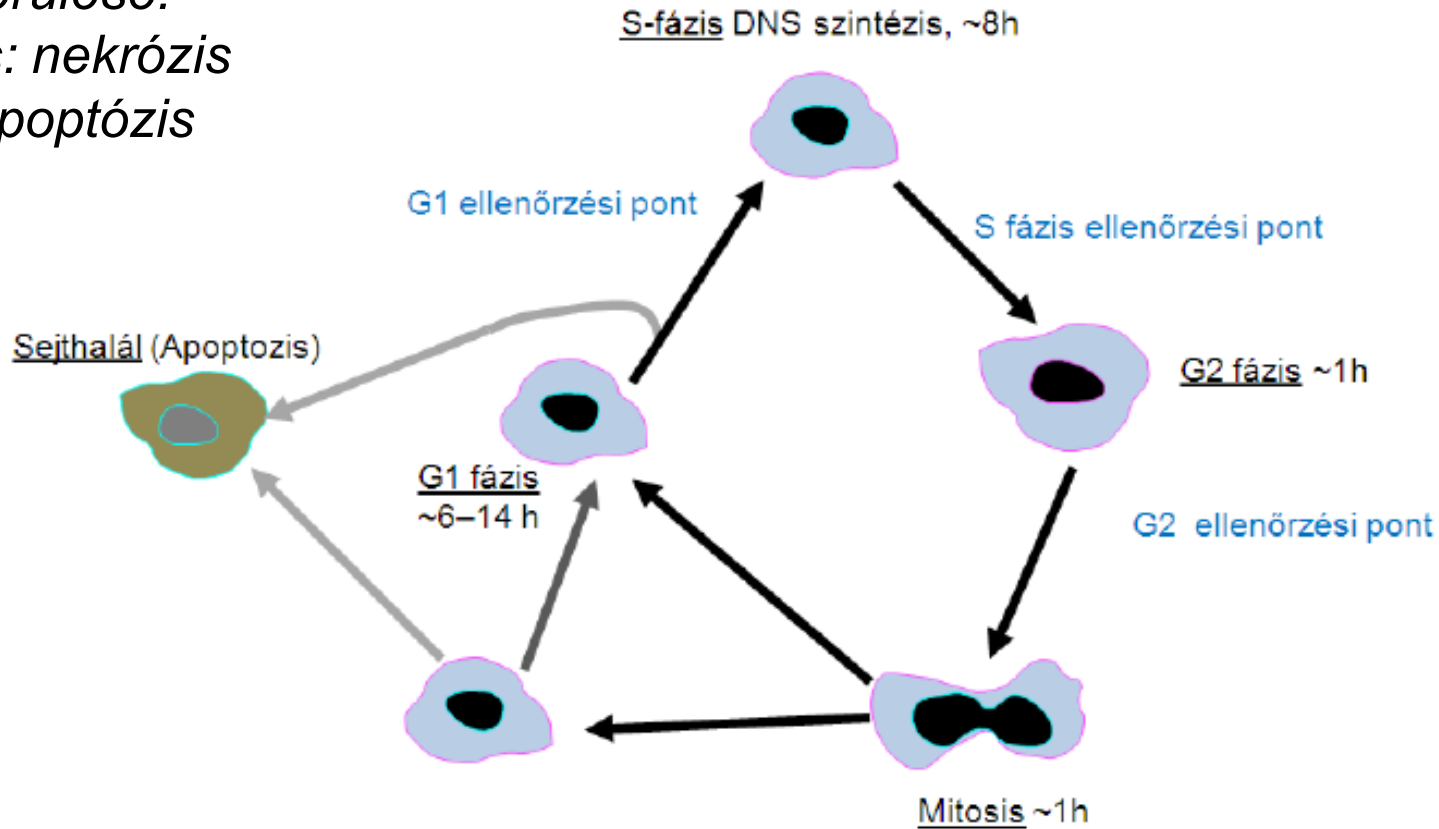


36. ábra. A DNS károsodását helyreállító mechanizmusok vázlatos szemléltetése

- A: a sérült bázist egy specifikus glikoláz kimetszi, a DNS-lánc felnyitása után a hiányt egy polimeráz enzim segítségével kitölti
- B: a sérült bázist néhány oligonukleotiddal együtt eltávolítja, a szemben lévő lánc mintául vételével a hiányt kitölti
- C: a kettős lánc-törésben a végeket összekapcsolja
- D: a kettős lánc-törést egy azonos nem sérült molekula mintájára kijavítja. A láncok egymásba hatolása lehetővé teszi a kiegészítő szakasz újraszintézisét, majd a láncok visszaalakulását és összekötését

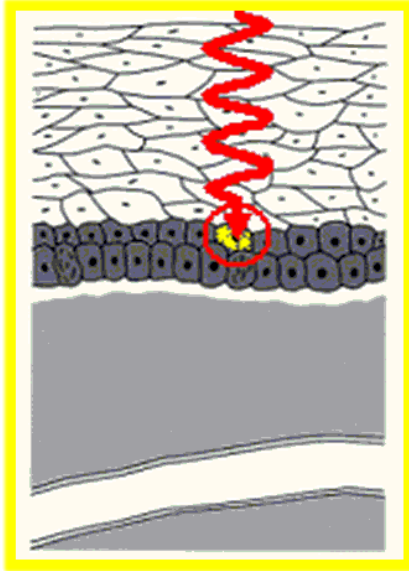
Sejti élekciklus

Sejti rendszerek sérülése:
Azonnali pusztulás: nekrozízis
Életképtelenség: apoptózis

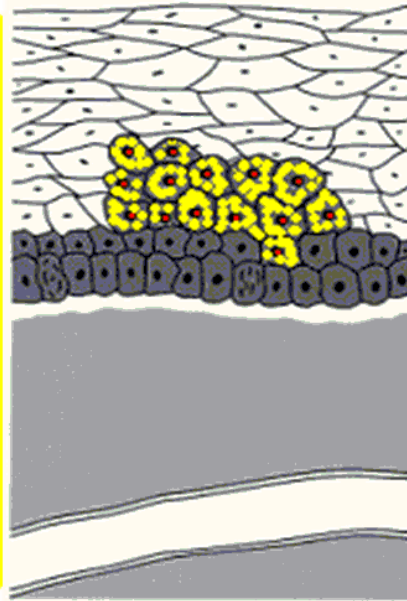


DNS-lánchibák: **fennmaradás** → **mutáció**
DNS lánchibák **javítása** „repair” enzimekkel

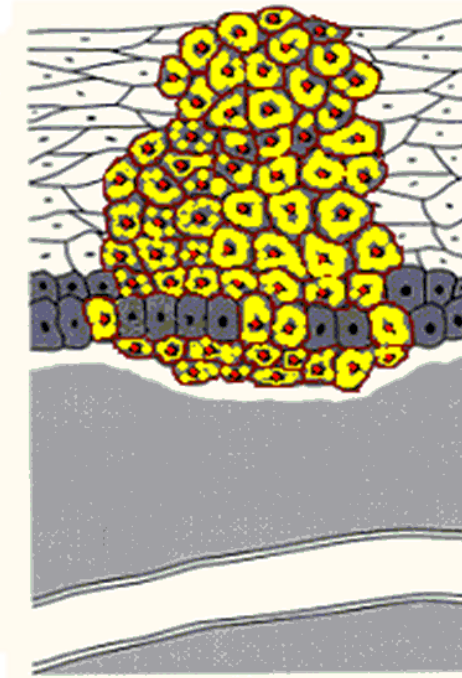
Sztochasztikus károsító hatás



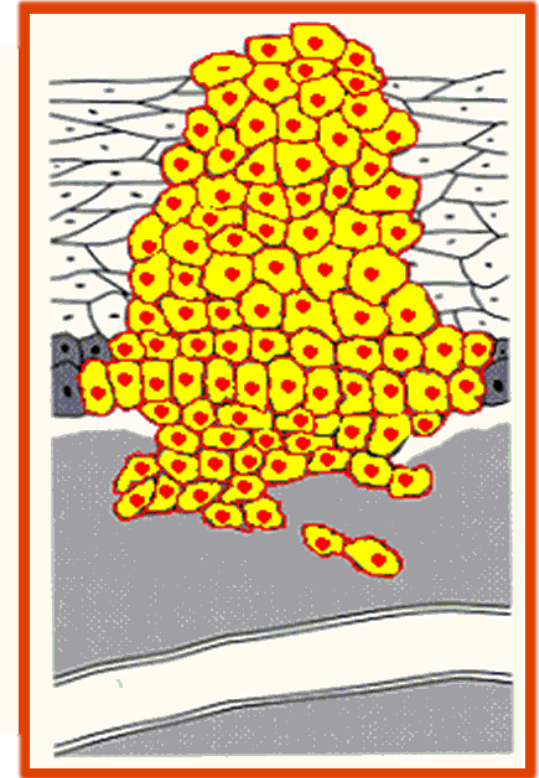
Kezdeti
"találat"



Dysplasia



Jóindulatú
daganat



**Rákos
daganat**

Évek a besugárzás után

Egyenértékdózis – az ionizáló sugárzás sztochasztikus biológiai hatásával arányos mennyiség

$$H = D \cdot w_R \text{ [Sievert, Sv]}$$

w_R sugárzási tényező - a LET függvénye

$$w_{R,\alpha} = 20$$

$$w_{R,\gamma} = 1$$

$$w_{R,\beta} = 1$$

$$w_{R,n} = 2,5 \div 20 \text{ a neutron-energia függvényében}$$

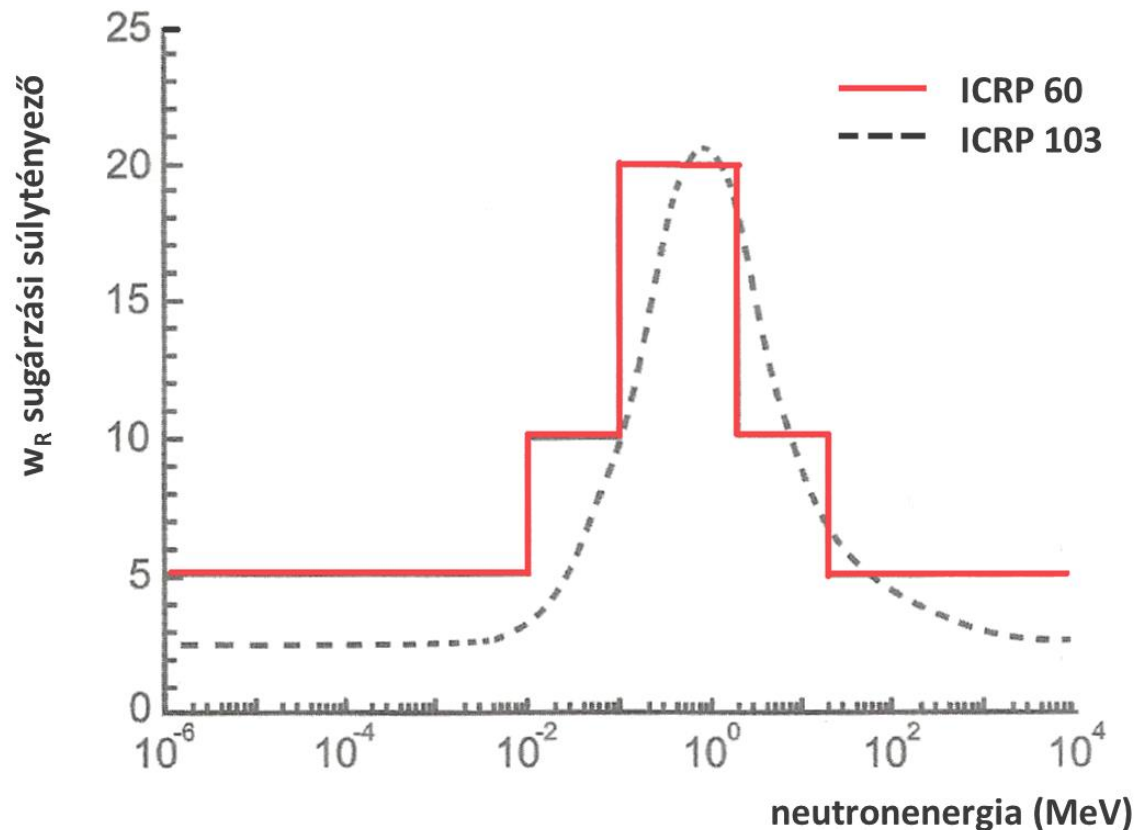
A sejt méretű élő térfogatba bevitt energia (mikrodózis) dönti el az elnyelt dózis veszélyességét (kártételét).

„Antropomorf” dózisfogalom és mértékegység: a sugárzási tényezők csak emberre érvényesek, más fajtájú élőlényeknél mások lehetnek.

Az egyenértékdózis CSAK a sztochasztikus hatás jellemzésére szolgál – a sugárzási tényező az egy sejtben okozható DNS-hibák számával arányos.

Egyenértékű dózis változó sugárzási tényezővel - neutronok

A sugárzási súlytényező értékének ábrázolása a neutronok energiájának függvényében az ICRP 103 ajánlása alapján.



A dózist okozó sugárforrás és a dózist elszennvedő személy kölcsönös pozíciója szerint külső és belső sugárterhelés jöhet létre.

$$E = (H_E) = \sum_T H_T w_T [Sv]$$

Effektív dózis

w_T szöveti súlyozó tényező

$$\sum_T w_T = 1$$

2007-ben, az ICRP#103 kiadványban javasolt szöveti súlyozó tényezők:

ivarszervek $w_T=0,08$ (genetikus hatásra)

szomatikus hatásokra

legérzékenyebbek

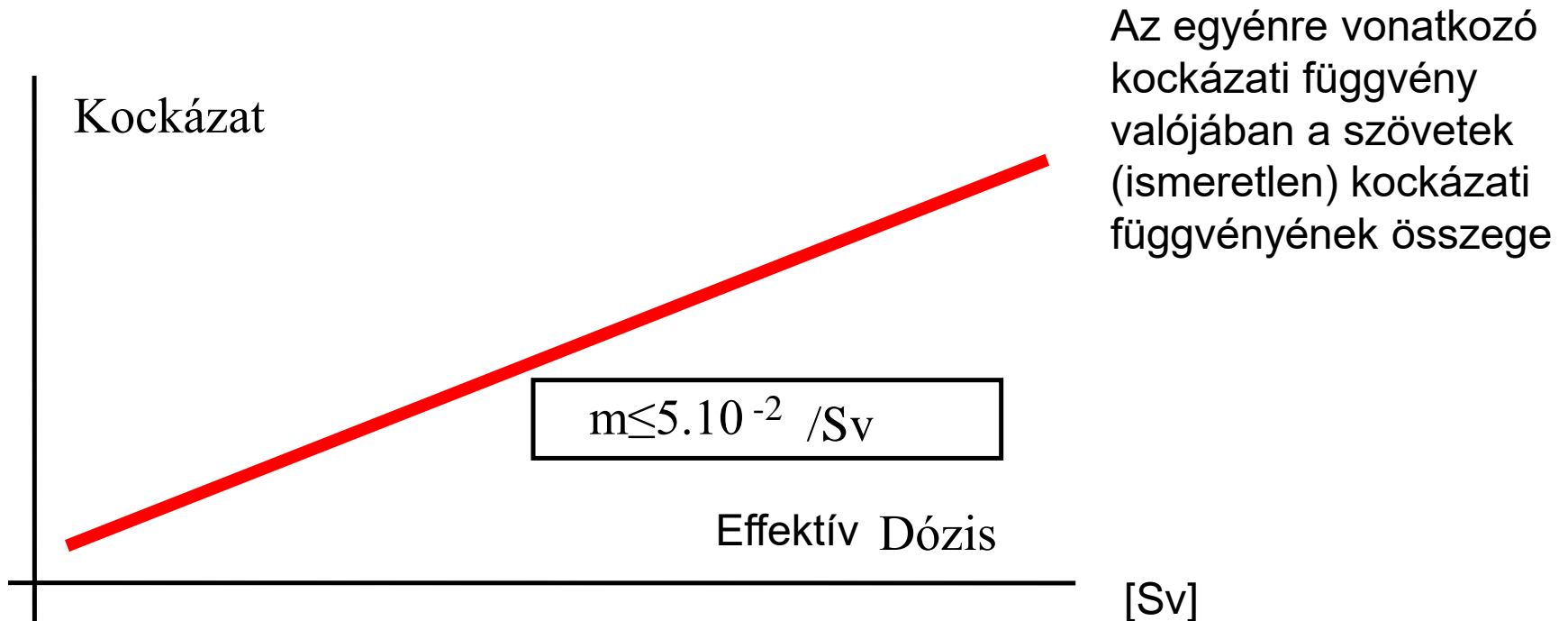
$w_T=0,12$ tüdő, gyomor, belek, vörös csontvelő, emlő

érzékenyek $w_T=0,04$ máj, vese, pajzsmirigy stb.

kissé érzékeny $w_T=0,01$ bőr, csontfelszín

Az ionizáló sugárzás sztochasztikus hatása:

- nincs küszöbdózis (kis dózisok hatása nem igazolt)
- sejtmutációt okoz a sugárzás (javító mechanizmusok)
- kockázat-dózis-függvény lineáris (?)



Ezt az összefüggést a Hiroshima és Nagasaki elleni atomtámadások túlélőinek statisztikájából határozták meg.

Biztonság és kockázat

Biztonság definíciója:

Gyakorlati bizonyosság arról, hogy meghatározott körülmények között egy ágens okozta expozíció nem eredményez káros hatást. A kockázat ellentéte.

Kockázat definíciója:

Speciális körülmények között megvalósuló expozíció okozta káros hatások valószínűsége egy szervezetben, rendszerben vagy (al)populációban.

Veszély-, kockázat- és expozíció becslésben használt fogalmak egységes harmonizált gyűjteménye (Országos Közegészségügyi Központ Budapest 2005)]

Kockázatbecslés

Adott célszervezetre, -rendszerre vagy -(al)populációra adott ágens expozíciója által jelentett kockázat számításának vagy becslésének folyamata, amihez hozzátartozik kísérő bizonytalanságok azonosítása, figyelembe véve az ágens inherens jellemzőit, valamint a sajátos célrendszer jellemzőit.

A kockázatbecslés négy lépésből áll: a veszély-azonosítása, a veszélyjellemezése (kapcsolódó kifejezés: *dózis-válasz becslés*), expozícióbecslés és kockázatjellemezés. Ez az első eleme a kockázatelemzés folyamatának.

Veszély-, kockázat- és expozíció becslésben használt fogalmak egységes harmonizált gyűjteménye (Országos Közegészségügyi Központ Budapest 2005)]

A kockázat – effektív dózis függvény

Elfogadott modell: LNT (linear – no threshold)

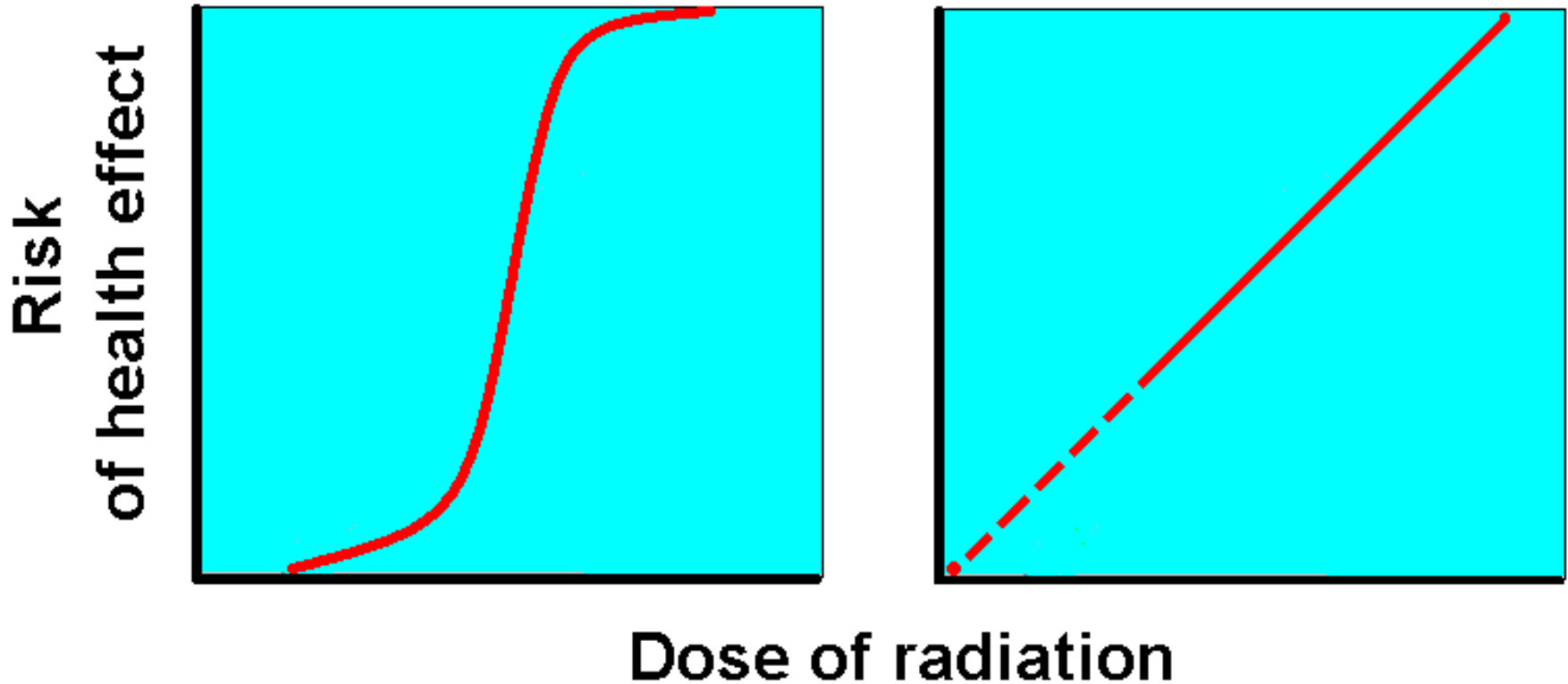
Kérdőjelek:

- A függvény megállapításához „tiszta” adatok (pontos mérések, „minta” és „kontroll csoport” szükségesek) – de hogyan?
- Hormézis: a kis dózisok „immunitást” okoznak ?
- Szupralinearitás: a kis dózisoknál nincs nekrozis: „javul” a mutáns sejtek túlélési hányada ?
- Nonlinearitás: nagyobb dózisoknál az elpusztult nagyszámú sejt „sürgős” pótlása gyorsítja az osztódási ciklust – ez is mutagén hatású ?
- A függvény „összes” kockázatra vonatkozik, de a tumor szervekben manifesztálódik. „Primer” tumor vagy metasztázis ?
- Mennyi időn át adhatók össze a dózisok?
- Bystander- (szomszéd-) hatás?

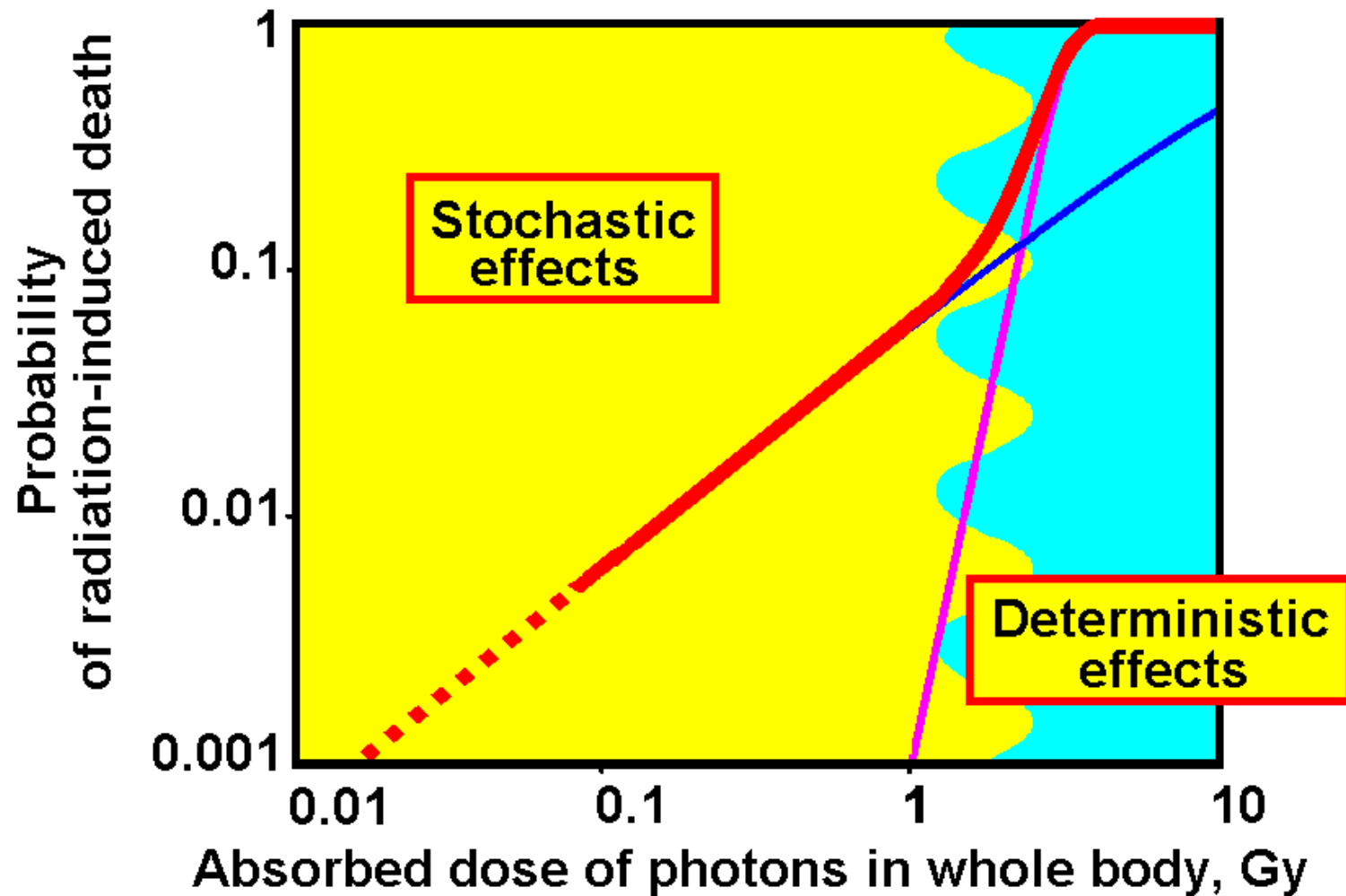
Az ionizáló sugárzás hatásai - összefoglalás

Deterministic

Stochastic



A sugárzás káros hatásának függése a dózistól - összefoglalás



Kockázatok összehasonlítása: 10^{-6} -nyi kockázat = 1 mikrorizikó

Nemzetközi statisztikák szerint kb. 1 mikrorizikó kockázatot jelent:

*2500 km utazás vonaton,
2000 km utazás repülőn,
80 km autóbuszon,
65 km autón,
12 km kerékpáron,
3 km motorkerékpáron,
egy cigaretta elszívása,
két hónap együttélés egy dohányossal,
meginni egy palack bort,
kövér embernek még egy vajás szendvicset enni,
egy órán át Budapest belvárosában lélegezni,
egy hétig házban aludni,
öt éven belül méhcsípéstől meghalni és
tíz éven belül villámcsapást kapni.*

*Forrás: Marx György: Születni veszélyes -
http://epa.oszk.hu/00700/00775/00001/1999_01_04.html*

Kockázatok összehasonlítása

Tevékenység, foglalkozás	mikrorizikó/év-ben kifejezett kockázat
Kereskedelmi munka	2-3
Gyári munka	10-100
Hivatásos autóvezetés	400
Építőipari munka	400
Szénbányászat	800
Elektromos távvezeték építés	1200
Mélytengeri halászat	800
Gyilkosság, Magyarország	30
Öngyilkosság, Magyarország	490
Dohányzás okozta halálesetek, Magyarország	3000

Forrás: Marx György: Születni veszélyes - http://epa.oszk.hu/00700/00775/00001/1999_01_04.html

További dózismennyiségek

Lekötött dózis (H_C): pillanatszerű bevitellel inkorporálódott, és a szervezetben 1 évnél tovább jelenlévő radioaktív anyag effektív dózisa

$$H_C = \int_0^T \frac{dH_E}{dt} dt$$

Gyermekeknél $T = 70$ év, felnőtteknél $T = 50$ év

Kollektív dózis: Egy embercsoport tagjai által egy adott sugárforrástól kapható effektív dózisok összege.

$$C = \sum_i H_{E,i} \cdot n_i \quad [\text{személy.Sv}]$$

Elvileg sem mérhető - csak az emisszió mértékéül használható!

Sugárvédelmi szabályozás

Nemzetközi ajánlások, irányelvek:

ICRP #103 (2007), IAEA General Safety Requirements (GSR) Part 3
(2014) IBSS = international basic safety standards,
2013/59/EURATOM direktíva.

Magyar jogszabályok: a fentiekkel teljes összhangban.

2011. évi LXXXVII. tv. (atomtörvény)

- Általános és személyi sugárvédelem: 487-491/2015. kormányrendeletek, felelős hatóság: Országos Atomenergia Hivatal (OAH)
- Radioaktív hulladékok: 487/2015. és 27/2018. korm.r. - OAH
- Környezeti kibocsátások: 15/2001. sz. KöM. r., felügyelőségek és OAH
- Nukleáris biztonság: 118/2011 és 37/2012. sz. korm. r. = Nukleáris Biztonsági Szabályzat kötetei - OAH

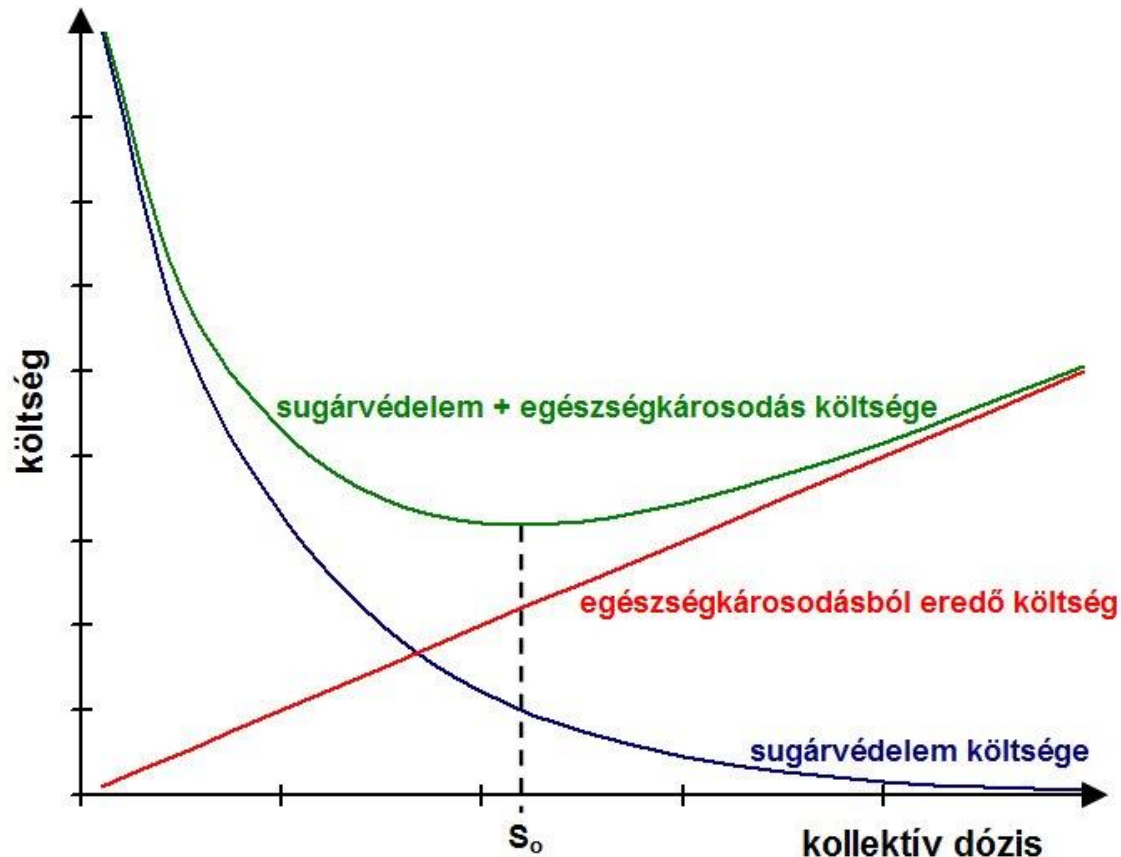
Sugárvédelmi szabályozás

- Determinisztikus hatáshoz vezető „forgatókönyv” legyen lehetetlen még „tervezhető balesetek” (design basis accident) esetén is
- Csak az „alkalmazásokhoz” kapcsolható dózis korlátozható, a *kizárólag* természetes eredetű nem – a korlátozás a többletdózisra vonatkozik = kizárás (*exclusion*)
- Szabályozandó sugárzási helyzetek: tervezett, baleseti, fennálló

A sugárvédelem alapelvei

- Indokoltság: a sugárforrás alkalmazásának több előnye legyen, mint kára (*justification*)
- Optimálás: az „alkalmazás” a lehető legnagyobb előnnyel kell, hogy járjon – optimális dózisszint – tervezési alap – ALARA (As Low As Reasonably Achievable - *optimization*)
- Egyéni korlátozás – immissziós és emissziós korlátok – át nem léphetők, ha a tervezési alap helyes volt. (*limitation*)

Optimálás - ALARA-elv



ALARA (As Low As Reasonable Achievable) - A dóziskorlát alatti észszerűen elérhető legalacsonyabb szint = célérték

A sugárvédelmi szabályozás alá tartozó sugárzási helyzetek

- ICRP 103 (2007), IAEA GSR Part 3 és EU BSS (Basic Safety Standards – 2013/59/EURATOM) alapján:
Tervezett, veszélyhelyzeti és fennálló sugárzási helyzetek
- EU BSS (42. pont): A sugárzási veszélyhelyzetekhez és a meglévő (=fennálló) sugárzási helyzetekhez tartozó vonakoztatási szintek bevezetése ugyanolyan módon segíti az egyének védelmét és más társadalmi kritériumok figyelembevételét, mint a tervezett sugárzási helyzetekhez tartozó dóziskorlátok és dózismegszorítások.

Sugárvédelmi korlátok tervezett sugárzási helyzetekre

„Elhanyagolható dózis” $\leq 10 - 30 \mu\text{Sv}/\text{év}$ – közvetlenül nem deklarált szabályozó \rightarrow a MENTESSÉG és FELSZABADÍTÁS alapja – ilyen kicsi dóziskövetkezménynél a védelmi ráfordítások nem indokoltak

DL (dose limit) – dóziskorlát - *immisszió* korlátozása (487/2015. k.r.):

effektív (lekötött) dózis; a külső és belső sugárterhelés összege

foglalkozási korlát $20 \text{ mSv}/\text{év}$ (rendkívüli engedéllyel 5 év átlagában)

sugárvédelemmel kapcsolatos tanulmányokat folytató hallgatók $6 \text{ mSv}/\text{év}$

lakossági korlát $1 \text{ mSv}/\text{év}$

szemlencsére, végtagokra további egyenértékdózis-korlátok

DC (dose constraint) - dózismegszorítás - *emisszió* korlátozása (a létesítmények engedélyében): egy, a kritikus (lakossági vagy foglalkozási) csoporthoz tartozó fiktív személynek (=reprezentatív személynek) az adott sugárforrástól származó effektív dózisa

kiemelt létesítményekre $DC = 0,1 - 0,03 \text{ mSv}/\text{év}$ \rightarrow kibocsátási szintek az egyes radionuklidokra

$$DC \ll DL$$

s: emissziós forrás (*source*)

$$DL \neq \sum_s DC_s$$

Sugárvédelmi szabályozás

Mentesség: Előzetes döntés alapján nem tartozik az atomtörvény hatálya alá az a radioaktív anyag,

a) amelyben a radionuklid teljes aktivitása, vagy

b) amellyel kapcsolatos tevékenység során az anyagban előforduló radionuklid egységnyi tömegre vonatkoztatott aktivitás koncentrációja

nem haladja meg a külön jogszabályban meghatározott mentességi szintet.

Mentességi szint (exemption level): [Bq] és [Bq/g] – a legkedvezőtlenebb forgatókönyv mellett sem okozhat az elhanyagolhatónál (= **10 μ Sv/év**) nagyobb dózist. (IAEA GSR Part 3 = 487/2015.k.r.: specifikus mentességi szint)

Előzetes mentesség = az alkalmazás tervezése során sem kell védelmi intézkedéseket alkalmazni, mert kicsi a károsítás kockázata.

Sugárvédelmi szabályozás

Felszabadítási szint (*Clearance level*)

A hatóság által meghatározott, aktivitás-koncentráció [Bq/kg] vagy [Bq/m²] egységekben kifejezett értékek, amelyeknél, ill. amelyek alatt a korábban még ellenőrzött sugárforrások kivonhatók a hatósági felügyelet alól. Feltételes és feltétlen felszabadítás: a forгатókönyvtől függően vagy függetlenül szabadítható fel az anyag.

Korábban, az alkalmazásuk folyamán felügyelt (védelmi intézkedésekkel korlátozott) anyagok = üzemi és leszerelési radioaktív hulladékok – az alkalmazás befejezése, valamint kezelés után lecsökkent a kockázatuk – nem okoznak nagyobb dózist az elhanyagolhatónál. (= **10 μSv/év**) (IAEA GSR Part 3 = 487/2015. k.r.: általános mentességi szint)

Származtatott emissziós határértékek

Az egy személybe *bejutó* aktivitás (A_{\max}) sokkal kisebb, mint a *kibocsátható* (A_{ki})

$$\sum_i (A_{i,\max} \cdot e(g)_i) \leq DC$$

A_{\max} : Az adott dózismegszorítást betartva még bevihető aktivitás az i -edik nuklidból
 $e(g)$: belső dózistényező (egységnyi aktivitás által okozott belső sugárterhelés, ld. még később is)

$$KHK = \sum_i \frac{A_{i,ki}}{KH_i} < 1$$

$$A_{i,\max} \ll A_{i,ki} \text{ és } A_{i,\max} = f(A_{i,ki})$$

A normális üzemelés során kibocsátott aktivitásra **kibocsátási határérték (KH)** vonatkozik [Bq/év]. Kibocsátási határérték kritérium: KHK

Az emissziós korlátozás két lényegi eleme, a létesítmény környezetében élő lakosságra vonatkozó *dózismegszorítás* és a létesítményből

- * levegőbe és
- * vízi úton

kibocsátott *radioaktivitás* közötti kapcsolatot a **TERJEDÉSI MODELLEK** teremtik meg. A modell és egy valóságos terjedési folyamat összevetése a validálás.

A szabályozásban szereplő „standard” mérendő dózismennyiségek

- A dózismérők pusztán a fizikai (elnyelt) külső dózis mérésére alkalmasak
- A biológiai dózis a test minden pontján más, még homogén külső dózistérben is
- Személyi dózisegyenérték $H_p(d)$ – az emberi testszövetben d mm mélységben mérhető dózis
- Környezeti dózisegyenérték $H^*(d)$ – a standard összetételű ICRU gömbben (76% O, 11% C, 10% H, 3% N) d mm mélységben mérhető dózis
- Áthatoló sugárzásra $d = 10$ mm
- Gyengén áthatoló sugárzásra $d = 0,07$ mm

Irányadó szintek a dóziskorlátozáshoz baleset-elhárításban résztvevő személyek részére

Beavatkozás

$H_p(10)$

Életmentés

$< 500 \text{ mSv}^{(*)}$

Magyarország: 250 mSv

Determinisztikus sugárhatás megakadályozása

$< 500 \text{ mSv}$

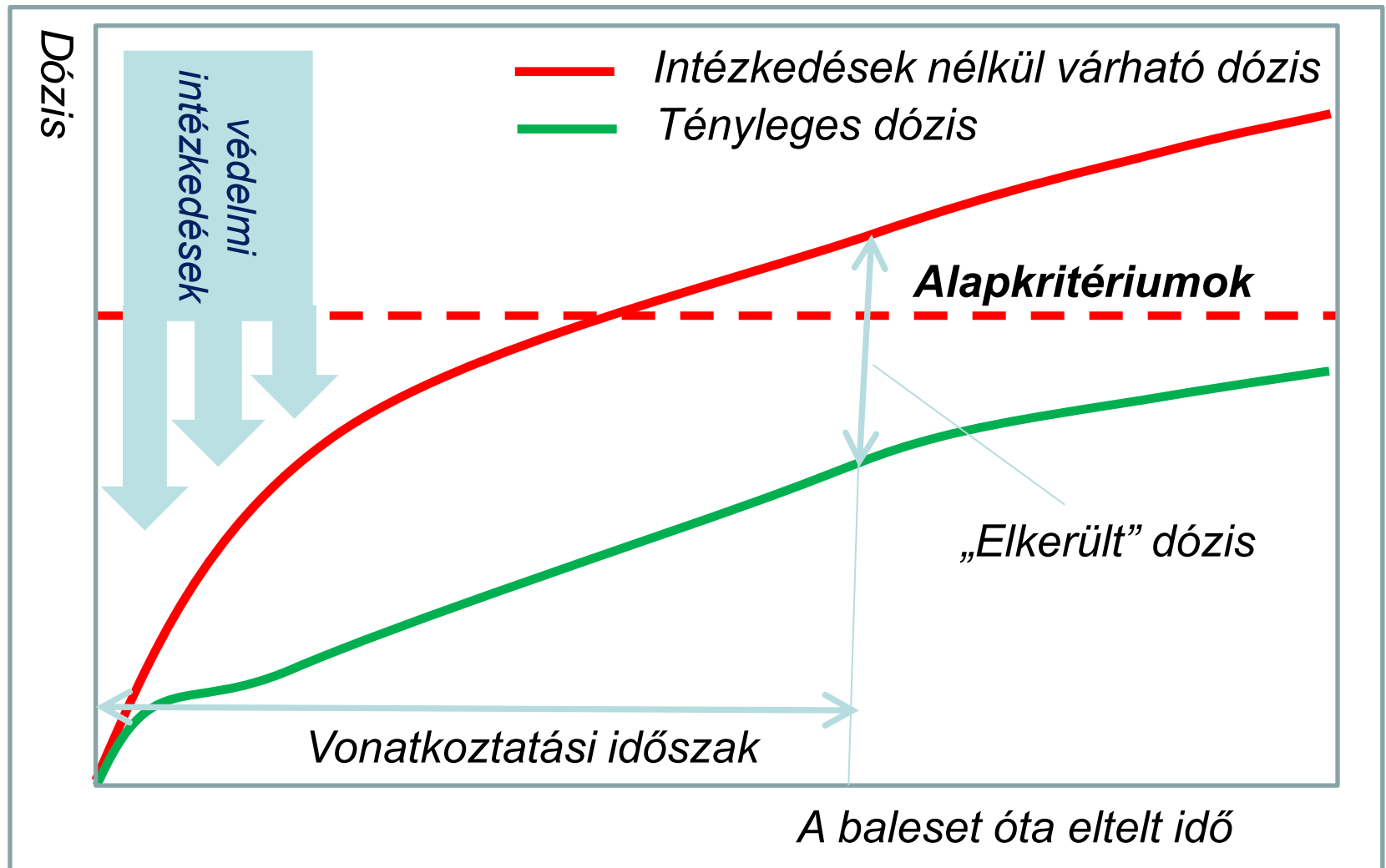
Súlyos baleset kifejlődésének megakadályozása

Nagy kollektív dózis megakadályozása

$< 100 \text{ mSv}$

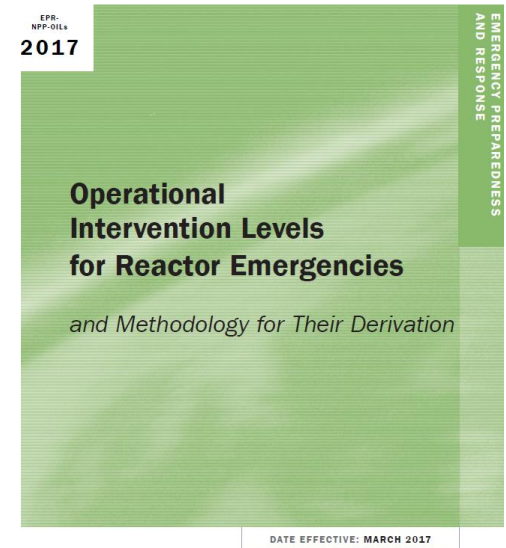
(*) Ez a szint túlléphető, amikor a másokkal kapcsolatban elérhető kedvező hatás fontosabb, mint a beavatkozó személy kockázata, a beavatkozó önként cselekszik, megismerte és elfogadja a kockázatot.

Balesetelhárítás tervezése – vonatkoztatási szint, alapkritériumok (10 – 100 mSv) az egyes besugárzási útvonalakra

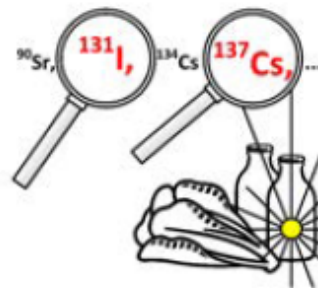


Származtatott intézkedési szintek (SzISz = OIL) élelmiszerek fogyasztásának tilalmára

Két, γ -spektrometriával könnyen meghatározható radionuklidot jelöltek ki: ^{131}I -t (az első hetekben jelentős) és ^{137}Cs -t (hosszú felezési idejű) reaktorbalesetektől származó kibocsátásokhoz. Ha $c_A < \text{OIL7}$, akkor az élelmiszerfogyasztásból származó dózis $< 10\text{mSv}$, az erre vonatkozó alapkritérium.



OIL7 1000 Bq/kg of I-131 and
200 Bq/kg of Cs-137



MONITORING OF FOOD,
MILK^e AND DRINKING
WATER SAMPLES

Activity concentration of I-131^f
and Cs-137^f in food, milk and
drinking water samples

A környezeti sugárzás monitorozásának szabályozása

489/2015. kormányrendelet (azóta többször módosítva) a lakosság természetes és mesterséges eredetű sugárterhelését meghatározó környezeti sugárzási helyzet ellenőrzési rendjéről és a kötelezően mérendő mennyiségek köréről – OKSER: Országos Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző Rendszer

Az ellenőrző adatszolgáltató központok segítségével végzett OKSER adatgyűjtési tevékenység minimális terjedelme: környezeti dózisteljesítmény, aktivitáskoncentráció: levegő, felszíni víz, ivóvíz, tej, egyéb élelmiszerek és takarmányok.

Jelentési szintek ^{137}Cs -re: levegőben $3 \cdot 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$, tejben $0,5 \text{ Bq/dm}^3$

*2021. X. 11. Az 1. félévközi dolgozat anyaga*⁹⁹