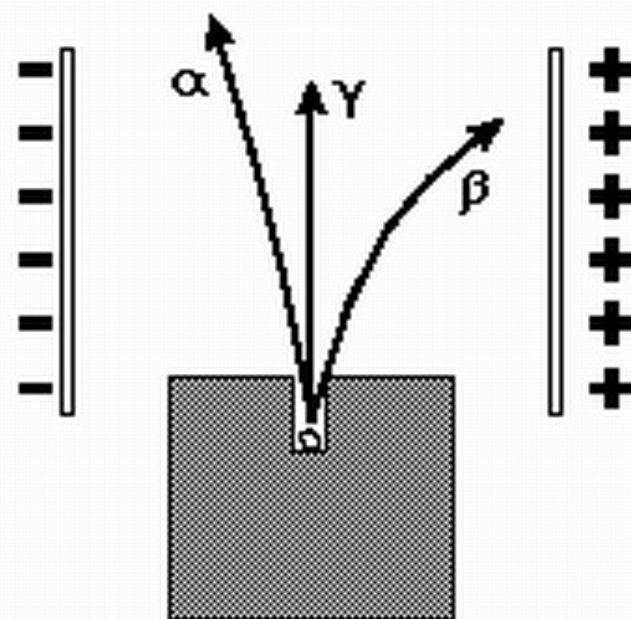
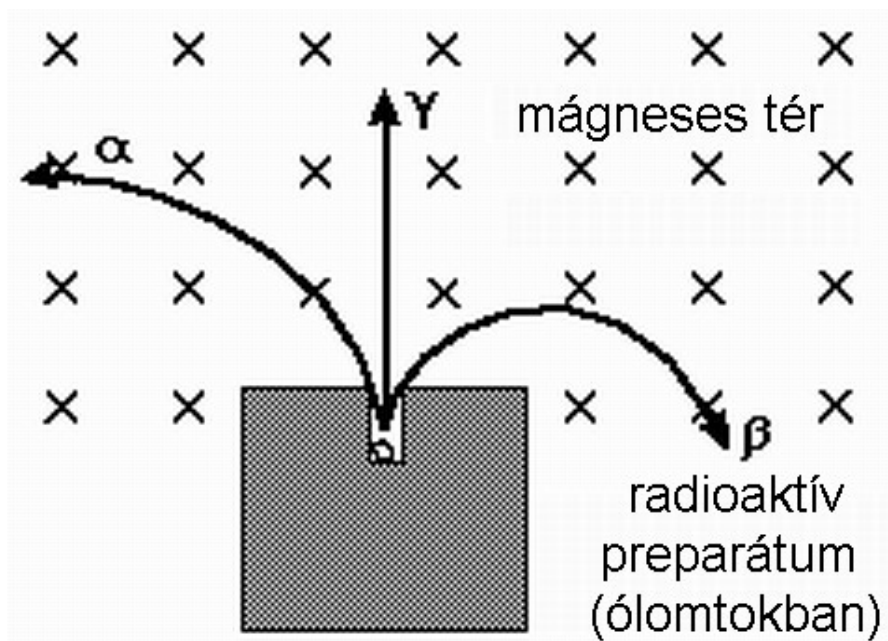
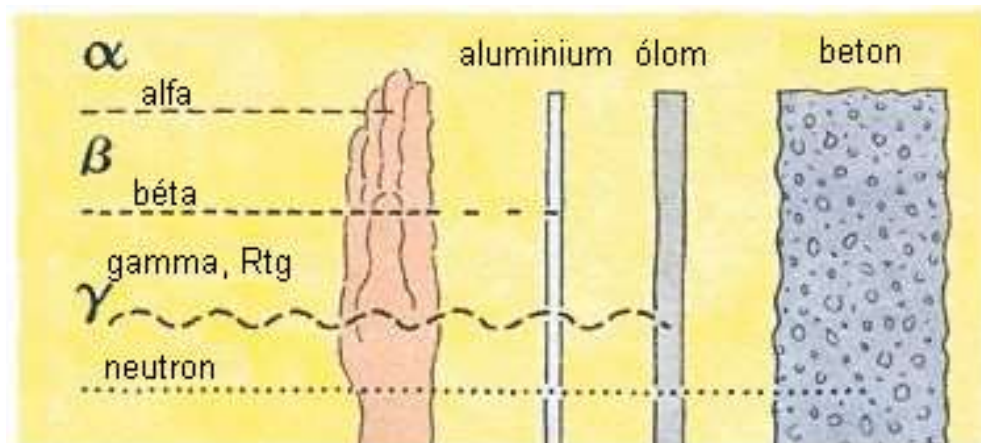
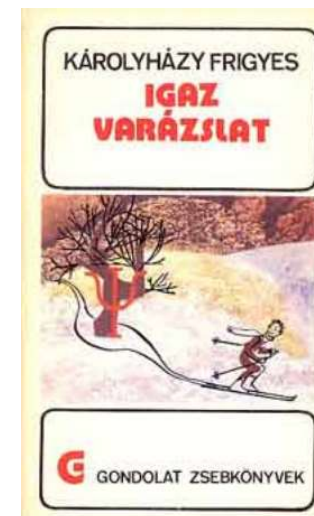


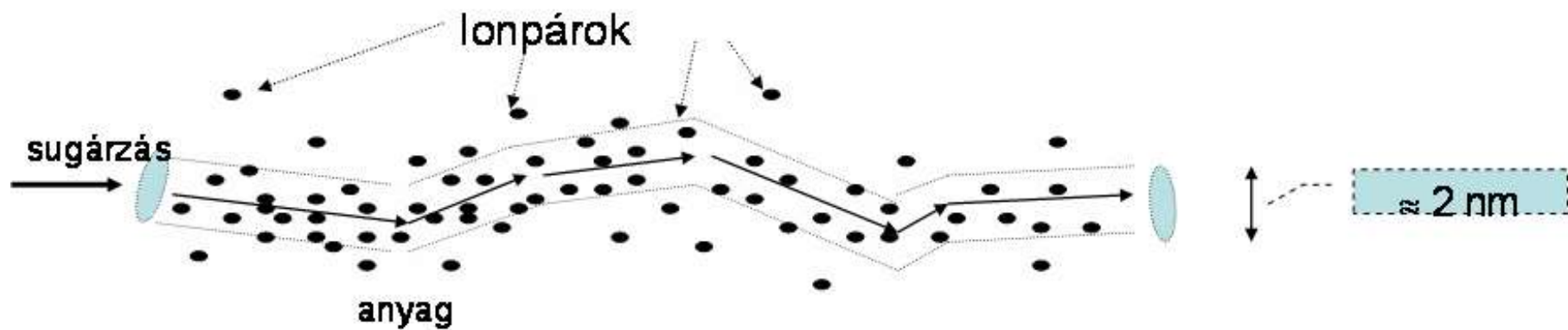
# 1. Az ionizáló sugárzások és az anyag kölcsönhatása





Gondolat, 1976

Az ionizáló sugárzások a hatásukat elsősorban az anyagban keltett ionizáció révén fejtik ki

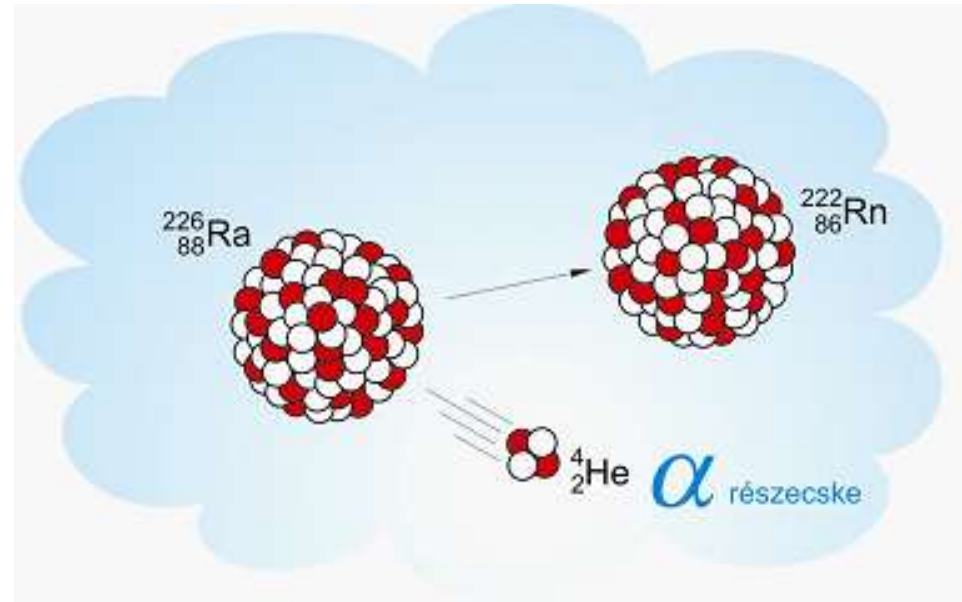


levegőben (átlagosan) 1 ionpár keltéséhez  $34 \text{ eV} = 5.4 \text{ aJ}$  energia szükséges



## Alfa-sugárzás és az anyag kölcsönhatása

alfa-részecske: He atommag



elektromos töltése:  $2e^+$

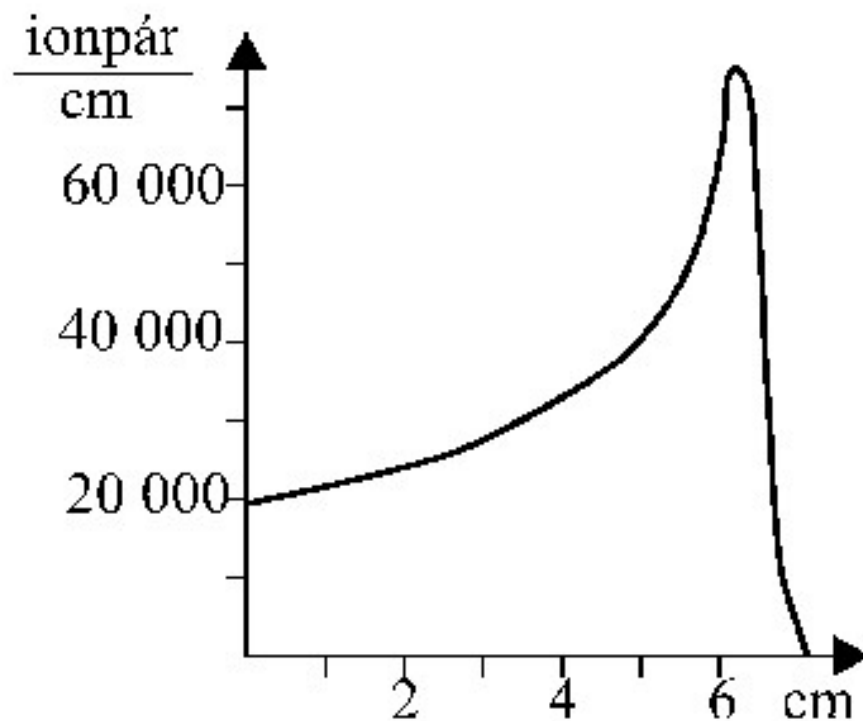
kezdő sebesség több mint 1000 km/s

kinetikus energia néhány MeV

ionizálóképesség jellemzése

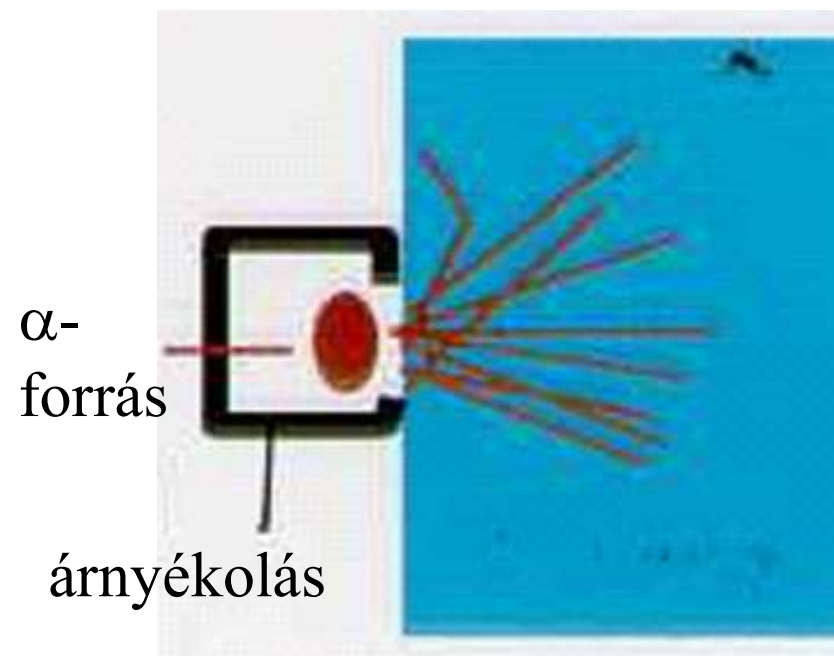
**lineáris ionsűrűség** (fajlagos v. specifikus ionizáció)

$l$  hosszúságú úton  $n$  db ionpárt hoz létre



$^{214}\text{Po}$   $\alpha$ -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  $\mu\text{m}$

**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)

## Béta-sugárzás és az anyag kölcsönhatása

béta-részecske: elektron  
(vagy pozitron)

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

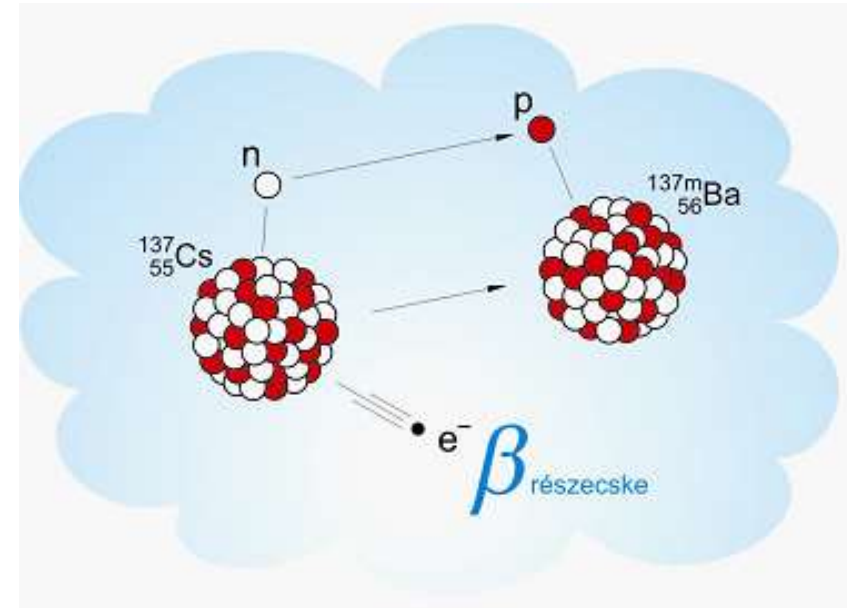
lineáris ionsűrűség: az alfaénál 1000-szer kisebb

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

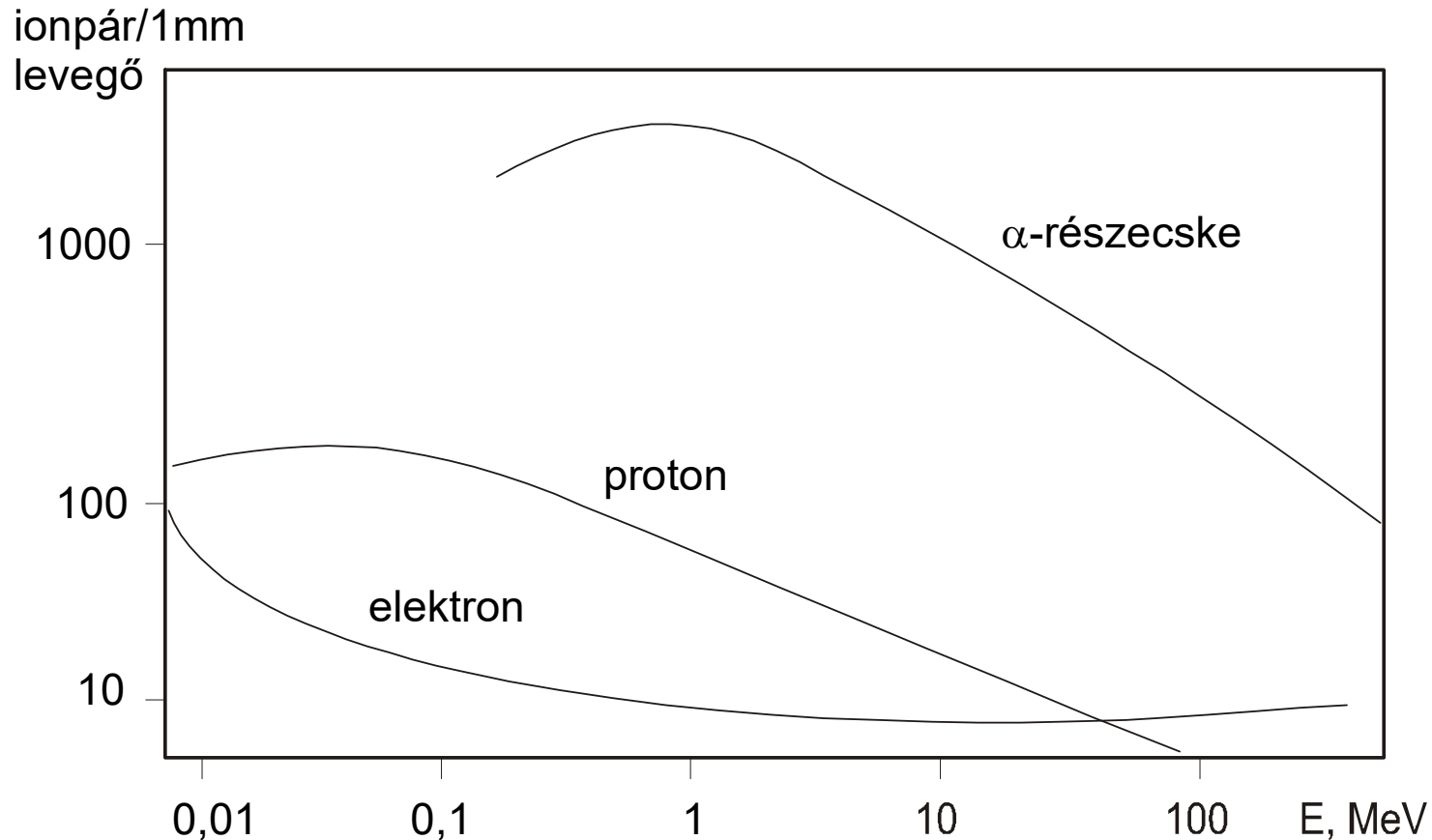
spektruma folytonos (antineutrínó!), így nincs egységes hatótávolság

levegőben: 10 cm- 1 m

víz (szövet): 1 mm-1cm

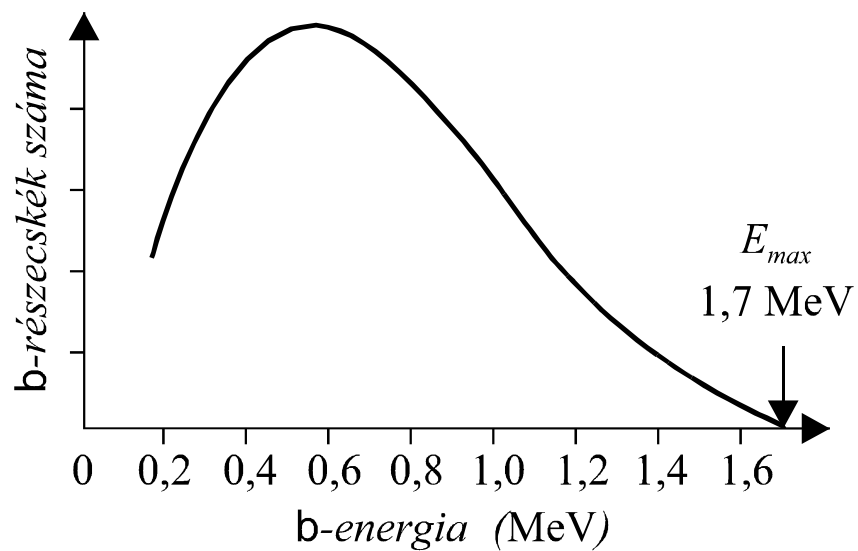


# Töltéssel rendelkező részecskék fajlagos ionizációja levegőben

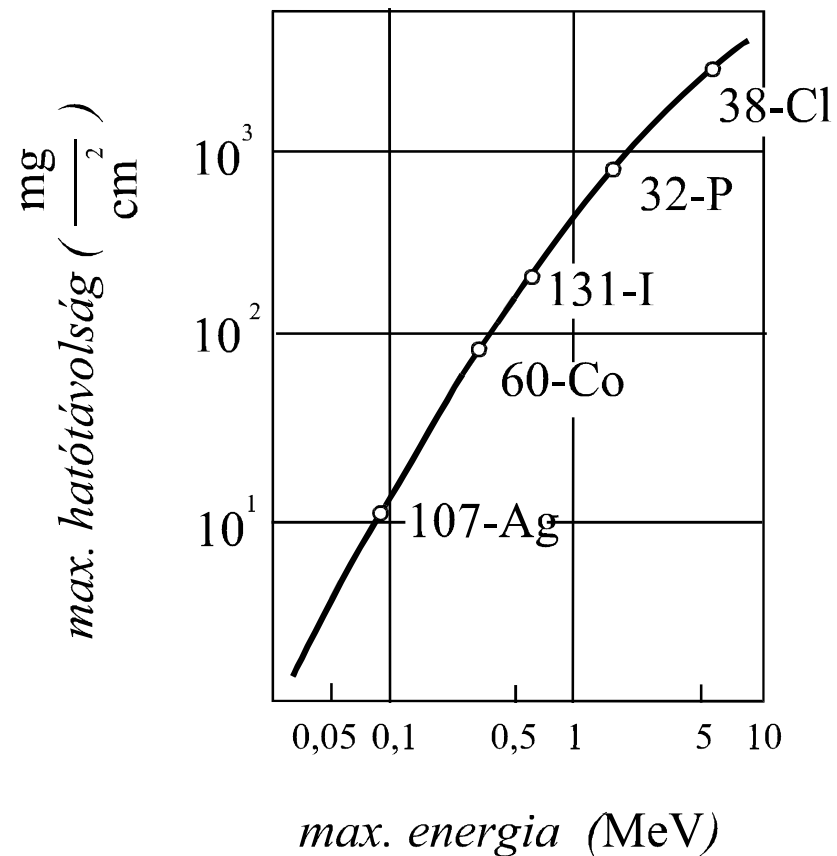
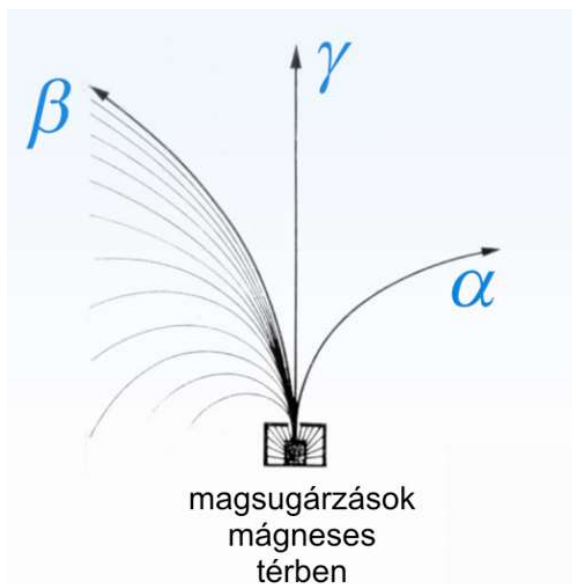


Az  $\alpha$ -, a  $\beta$ - és a proton sugárzás átlagos fajlagos ionizációja a részecske energia függvényében, a levegőben



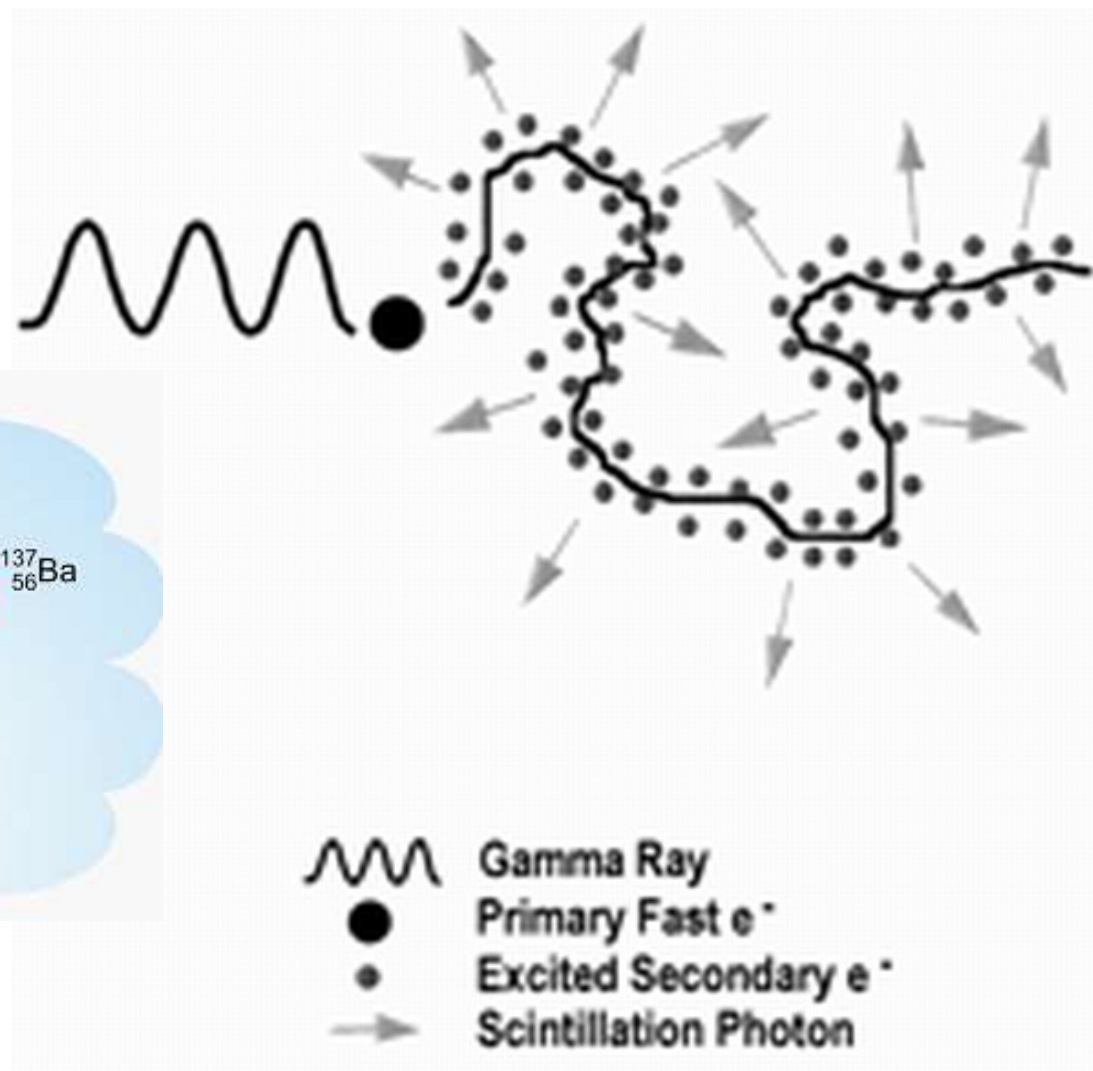
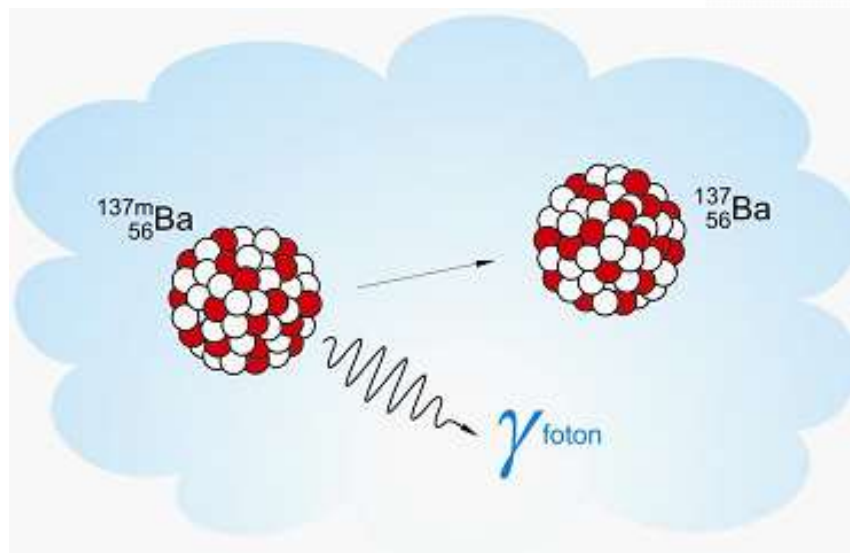


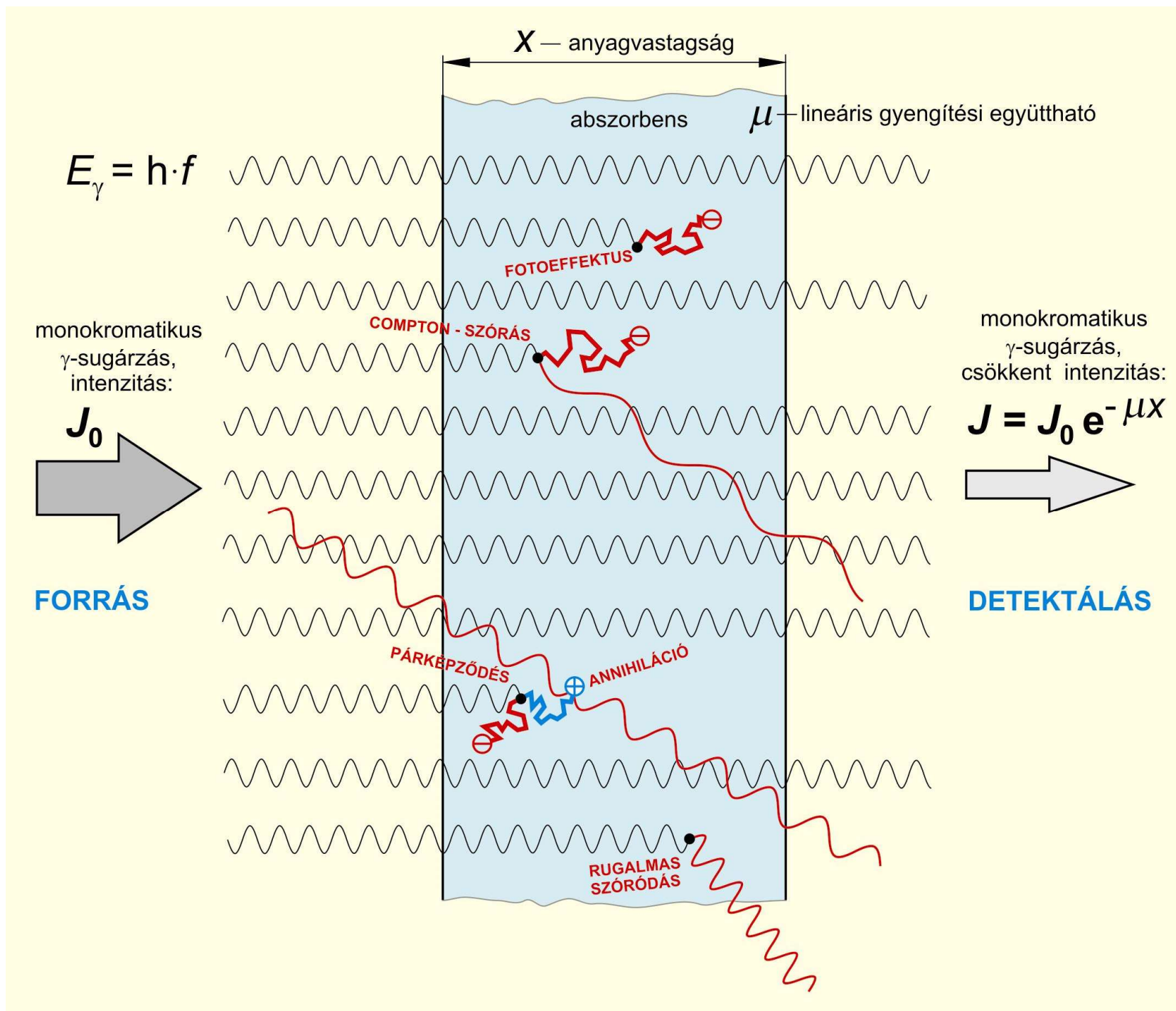
$^{32}\text{P}$   $\beta$ -spektruma  
(Rontó - Tarján 3.2 ábra)

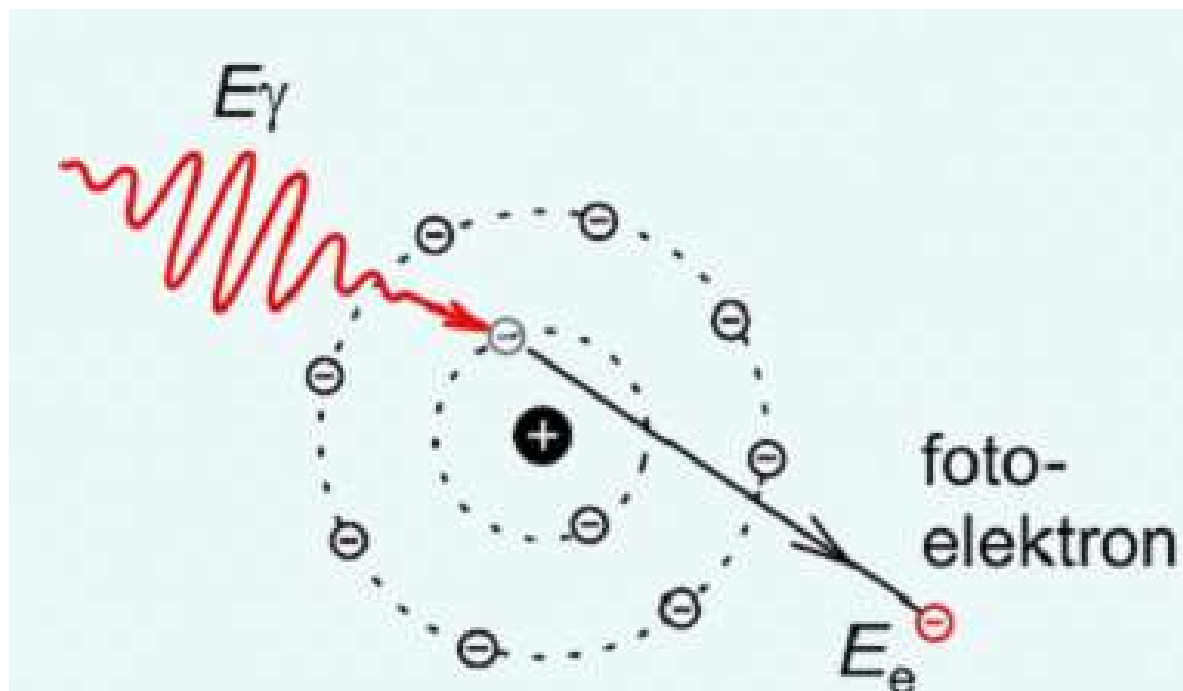


$\beta$  sugárzás maximális  
hatótávolsága a maximális  
energia függvényében  
(Rontó - Tarján 3.3 ábra)

## Gamma/röntgen-sugárzás anyaggal való kölcsönhatása



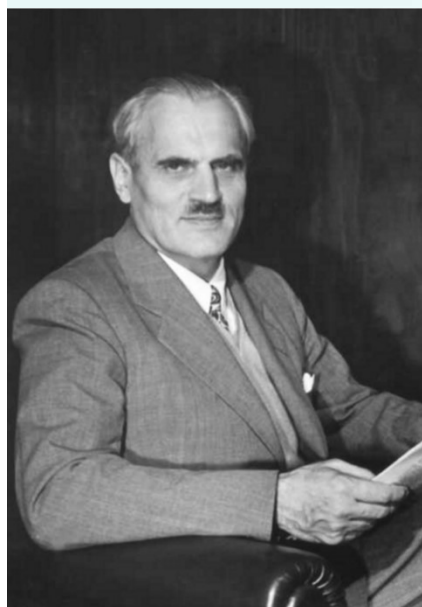
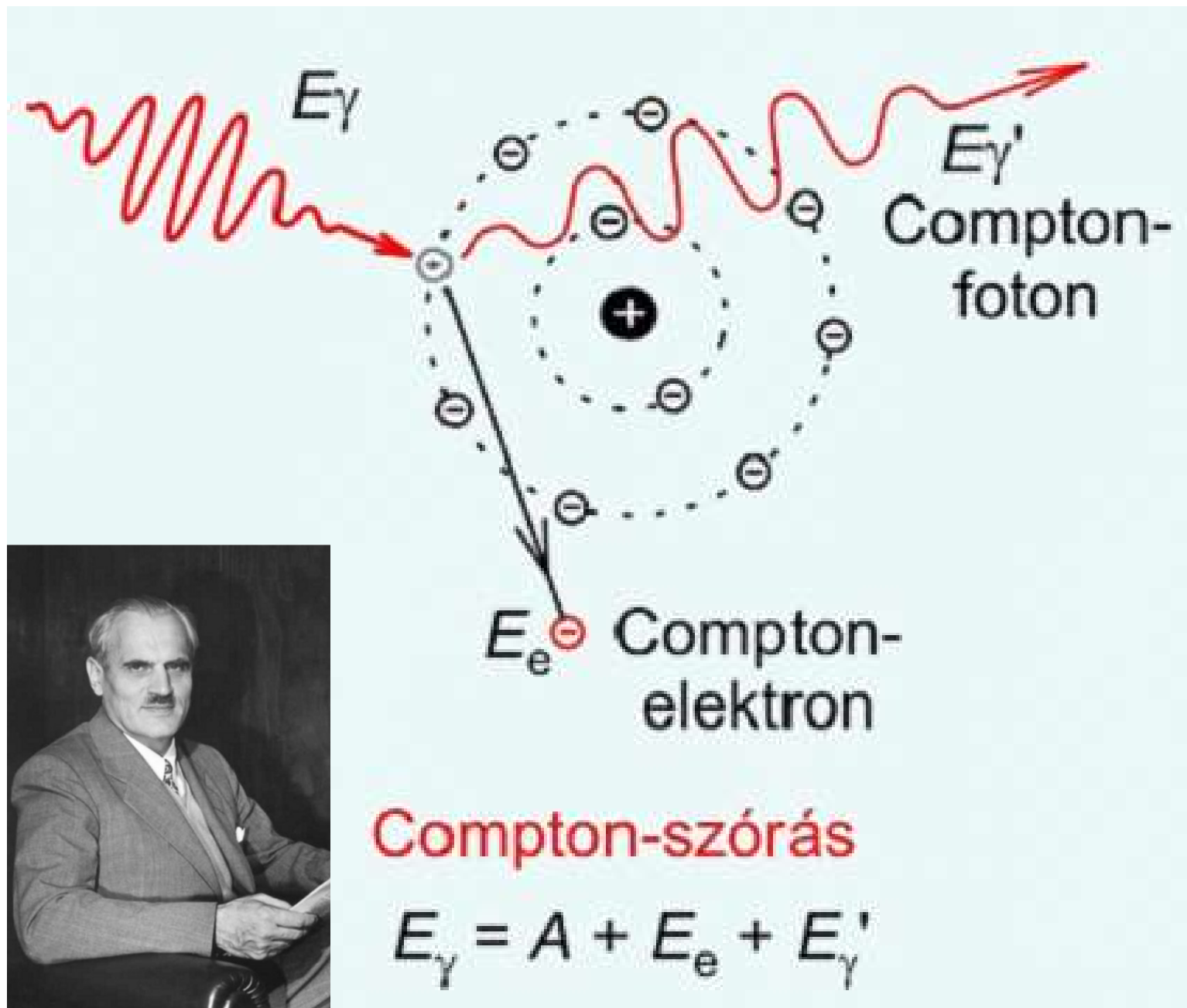




fotoeffektus

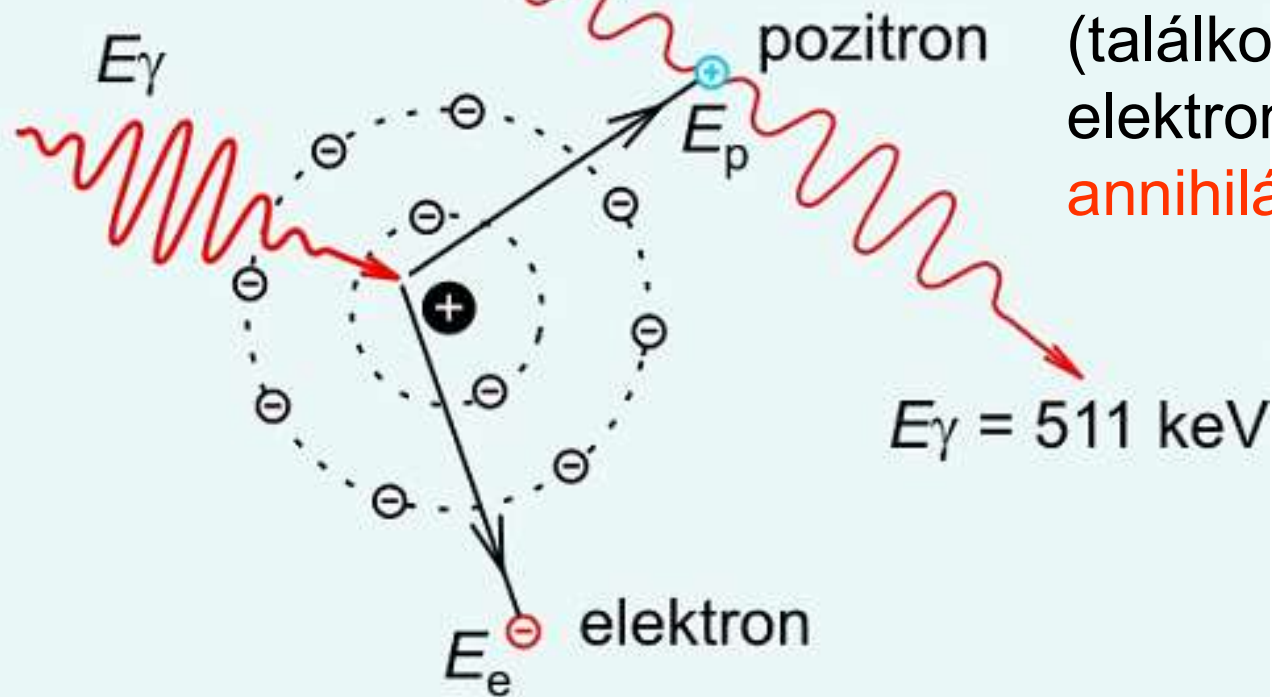
$$E_\gamma = A + E_e$$

$A$  = kilépési munka





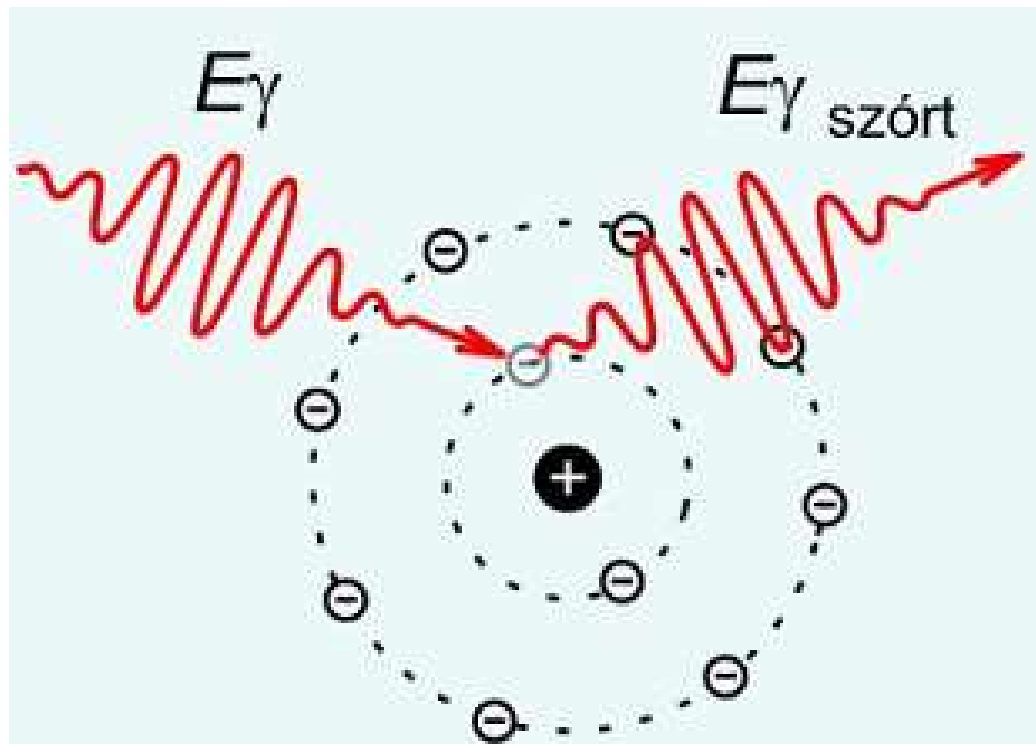
$$E_\gamma = 511 \text{ keV}$$



párképződés

$$E_\gamma = 2 m_e c^2 + E_e + E_p$$

( ha  $E_\gamma > 1022 \text{ keV}$  )



rugalmas  
szóródás

$$E_\gamma = E_\gamma \text{ szórt}$$

# A sugárzás leírására használható fizikai mennyiségek

energia

$$E \quad [\text{J}]$$

teljesítmény

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} \right]$$

intenzitás

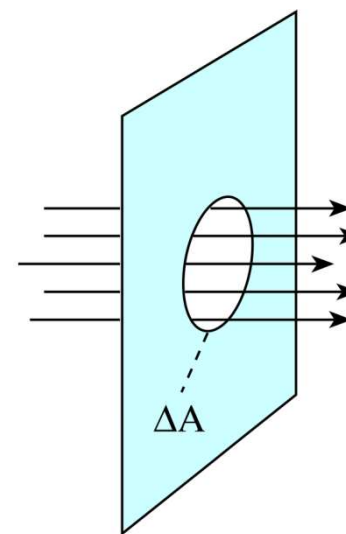
$$J = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

energia áram

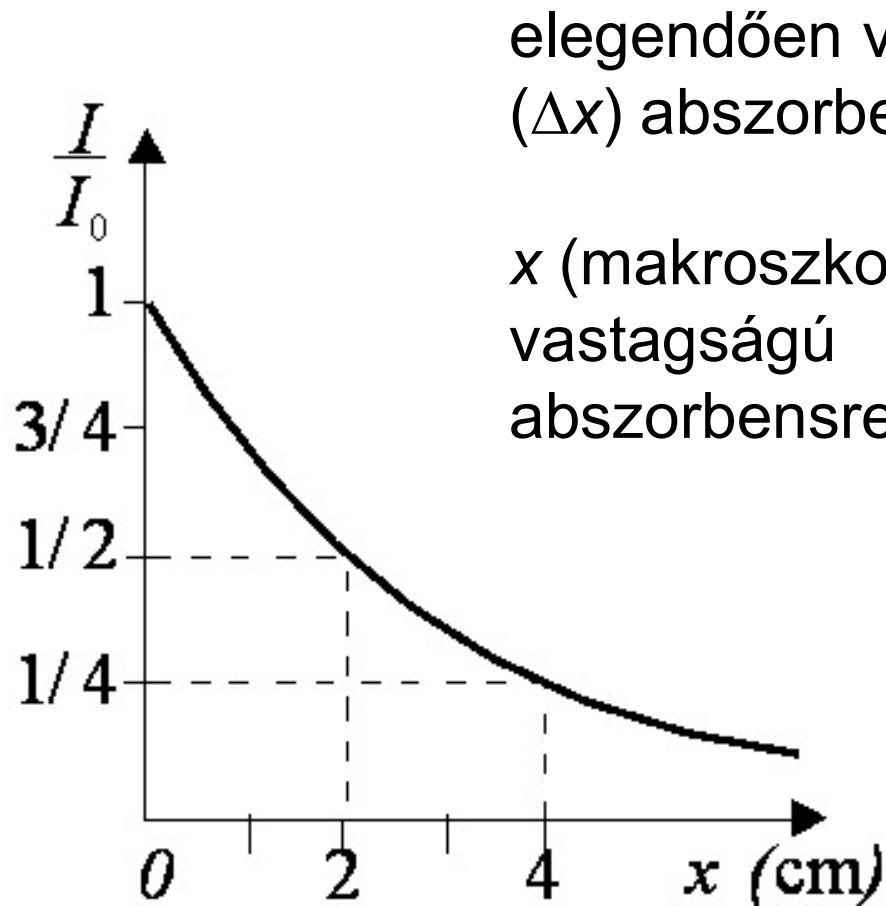
(Power)

spektrum is!

$$2.6 \cdot 10^{21} \cdot 1 \text{ eV} \stackrel{?}{=} 2.6 \cdot 10^{17} \cdot 10^4 \text{ eV}$$



## A sugárintenzitás gyengülése



elegendően vékony  
( $\Delta x$ ) abszorbensre:

$$\Delta J = -\mu J \Delta x$$

$$\frac{\Delta J}{\Delta x} = -\mu J$$

$x$  (makroszkopikus)  
vastagságú  
abszorbensre:

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

$\mu$ : gyengítési  
együttható

$$\mu = \frac{0,693}{D}$$

pl.  $D = 2$  cm

$D$  felezési rétegvastagság

## A sugárintenzitás gyengülése

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

$$J = J_0 e^{-\mu_m x_m}$$

$$\mu = \mu(Z, \rho; \varepsilon)$$

$$\mu_m = \mu_m(Z; \varepsilon)$$

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

gyengítési  
együttható

tömeg-  
gyengítési  
együttható

$$\mu = \frac{0,693}{D}$$

$$\mu_m = \frac{0,693}{D_m}$$

részleges gyengítési eh.-k

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



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

a kitevő:

$$-\mu X = -\mu_m \underset{\substack{\uparrow \\ \text{sűrűség}}}{\rho} X = -\varepsilon^* \underset{\substack{\uparrow \\ \text{moláris} \\ \text{konc.}}}{c} X = -\sigma \underset{\substack{\uparrow \\ \text{részecske} \\ \text{konc.}}}{n} X$$

$$\mu = \mu(Z, \rho; \varepsilon)$$

gyengítési együttható, 1/cm

$$\mu_m = \mu_m(Z; \varepsilon)$$

tömeggyengítési együttható, cm<sup>2</sup>/g

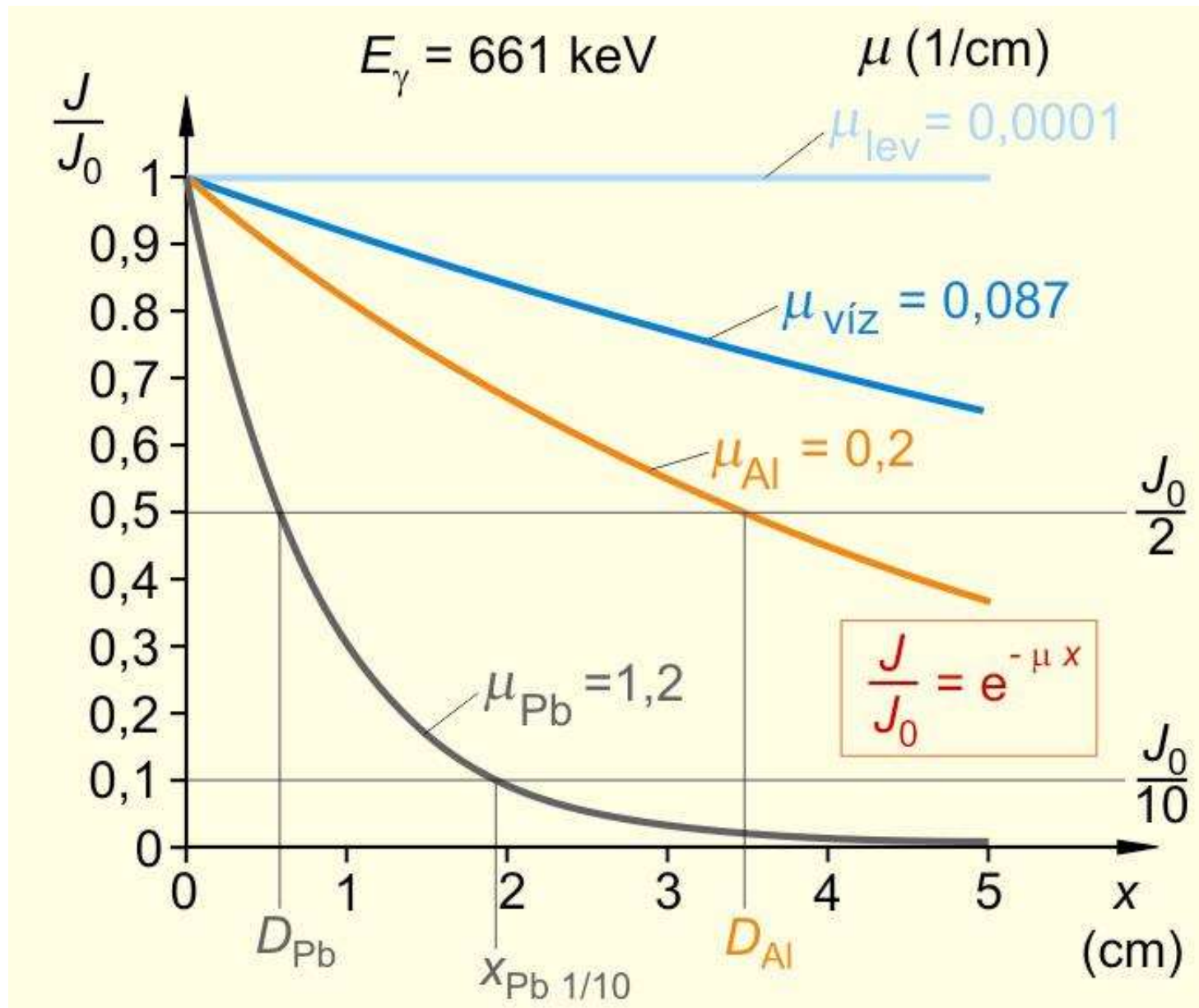
$$\varepsilon^*$$

moláris extinkciós együttható,  
L/(mol\*cm)

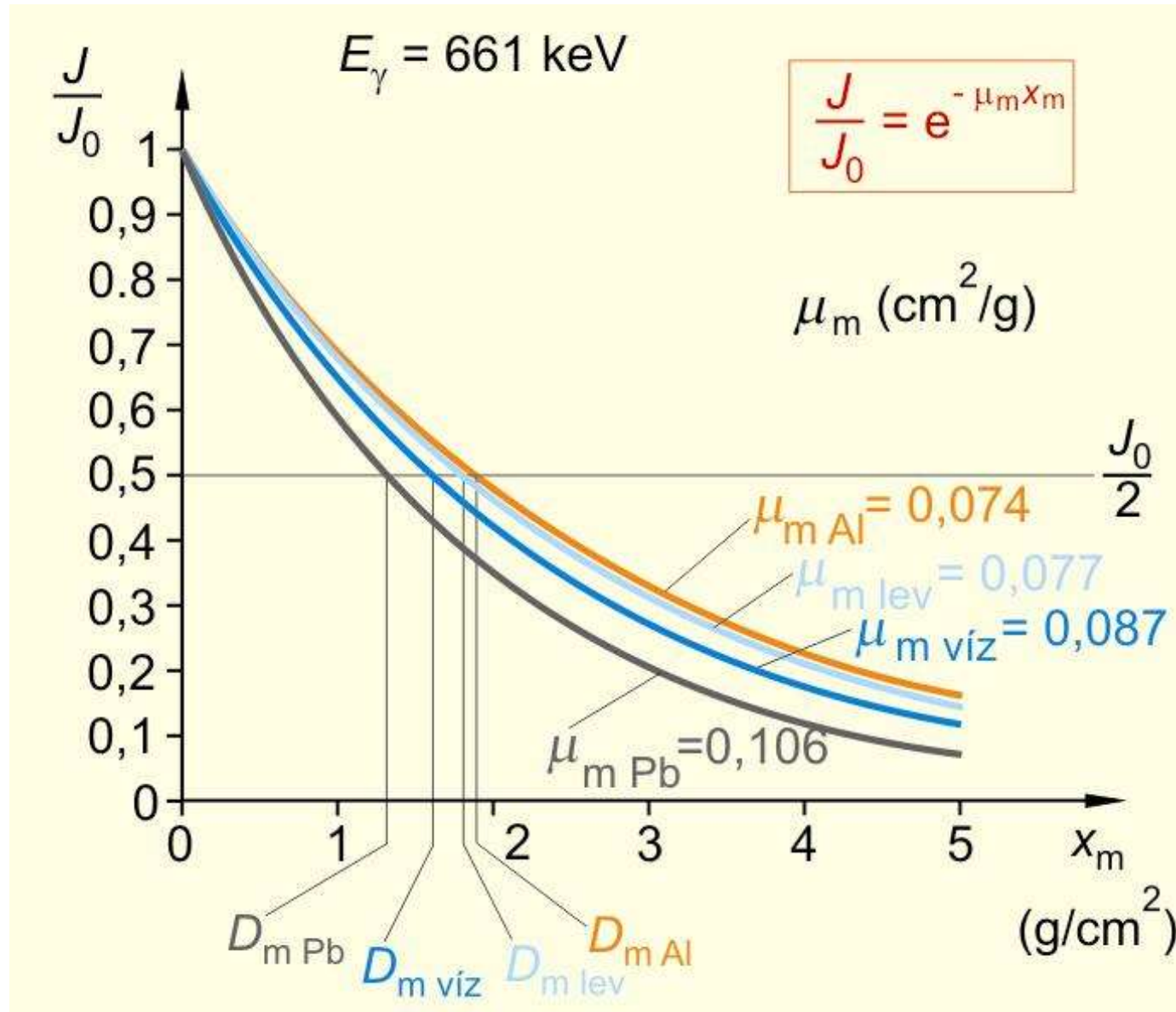
$$\sigma$$

hatáskeresztszmet, cm<sup>2</sup>

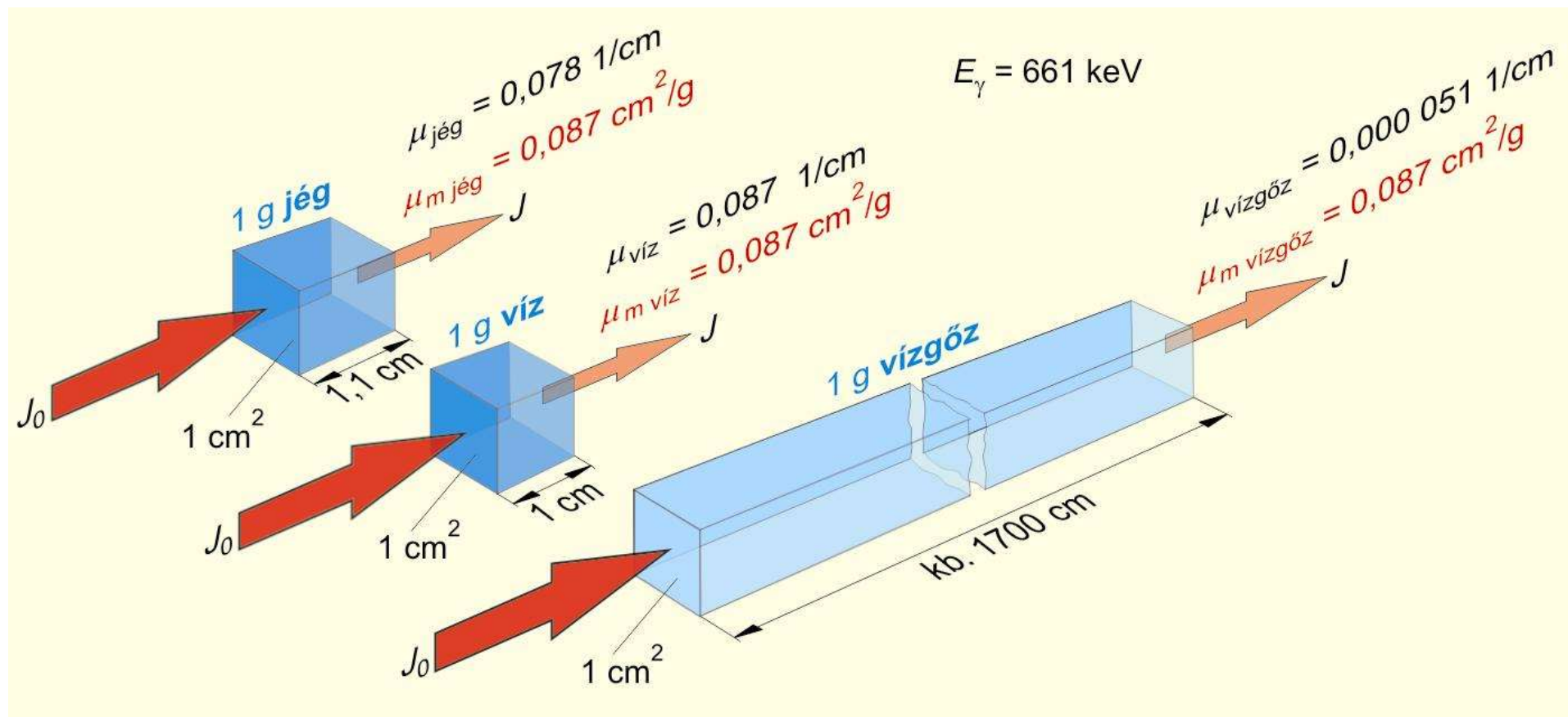
# Gyengítési együttható



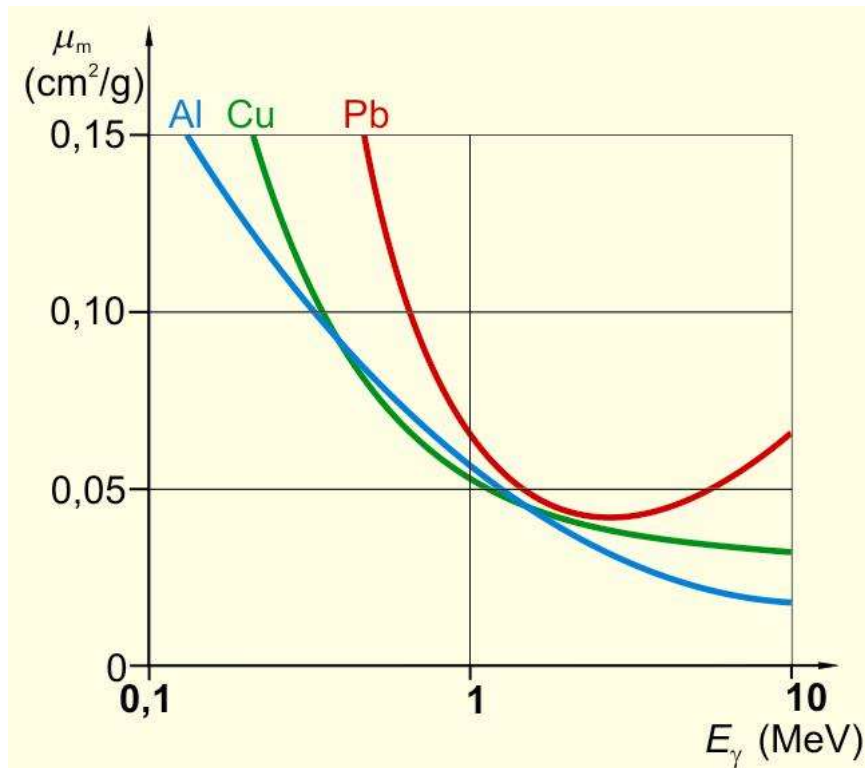
# Tömeggyengítési együttható



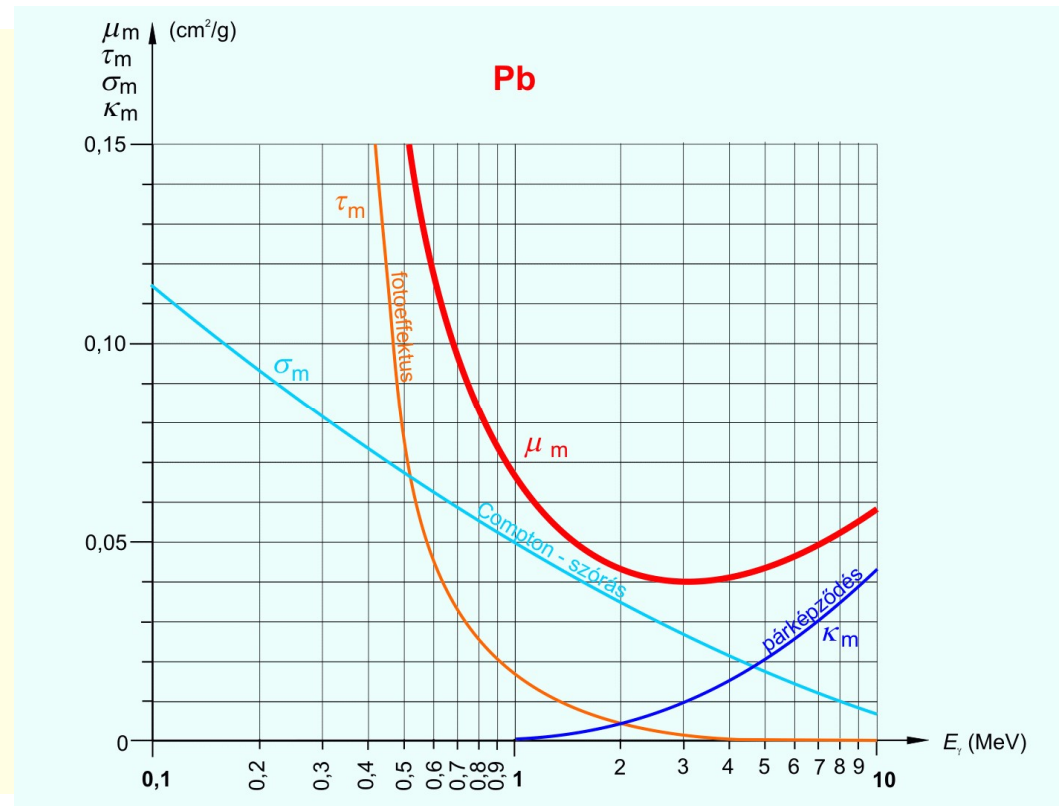
# Gyengítési/tömeggyengítési együttható



## $\mu_m$ fotonenergiától és az abszorbens minőségétől való függése

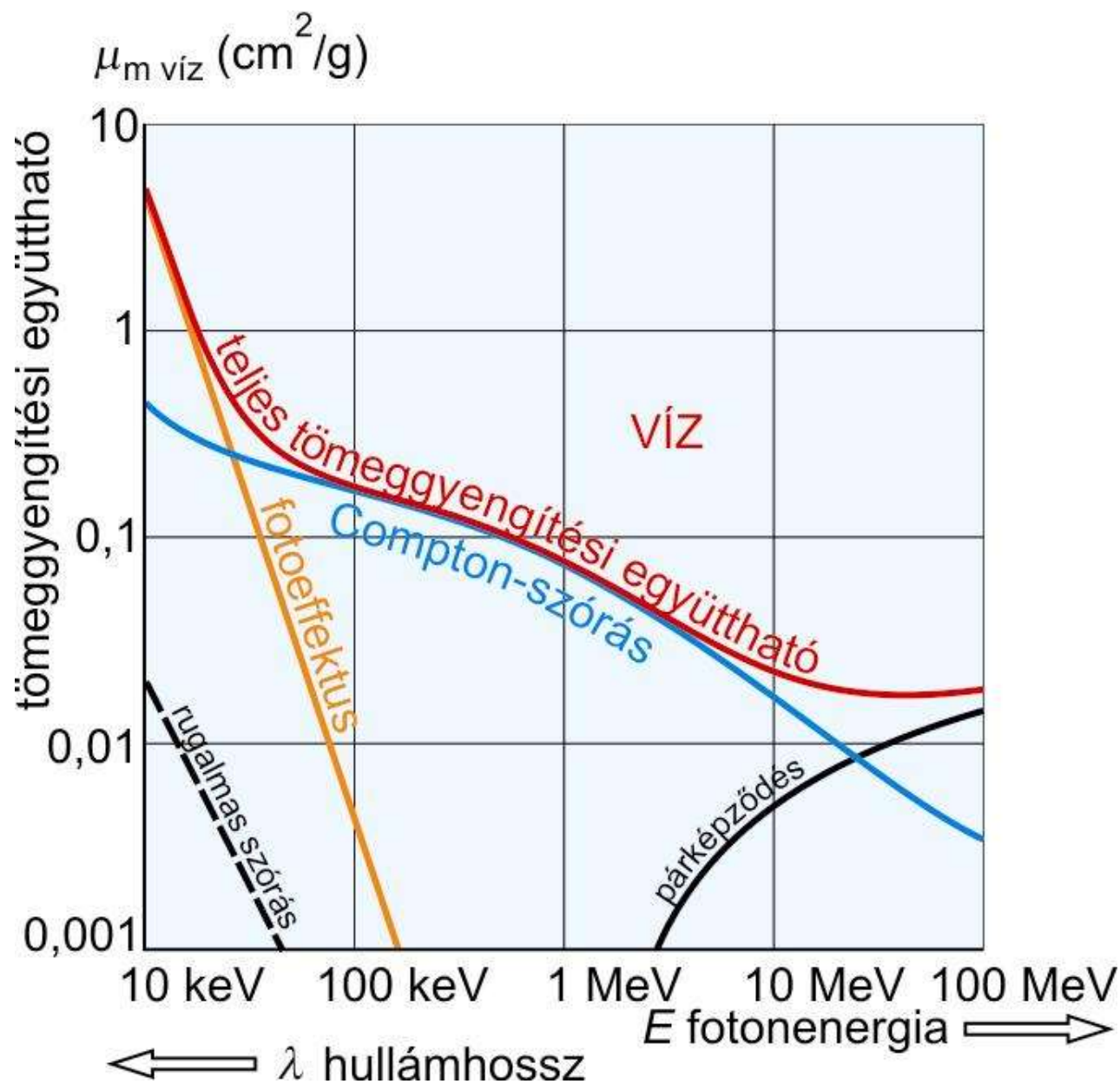


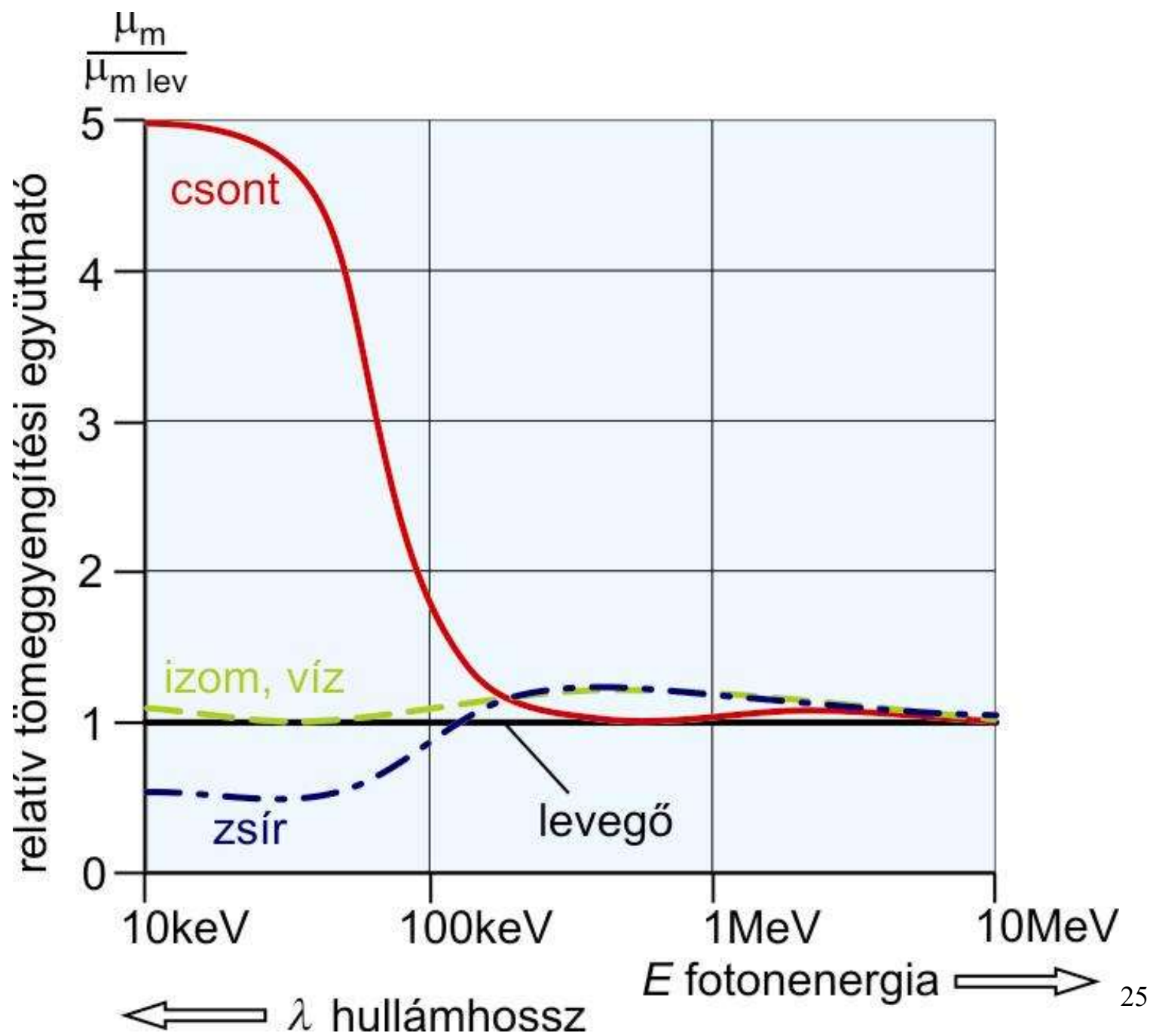
## $\mu_m$ részfolyamatainak fotonenergiától való függése ólom esetén





## $\mu_m$ részfolyamatainak fotonenergiától való függése víz esetén

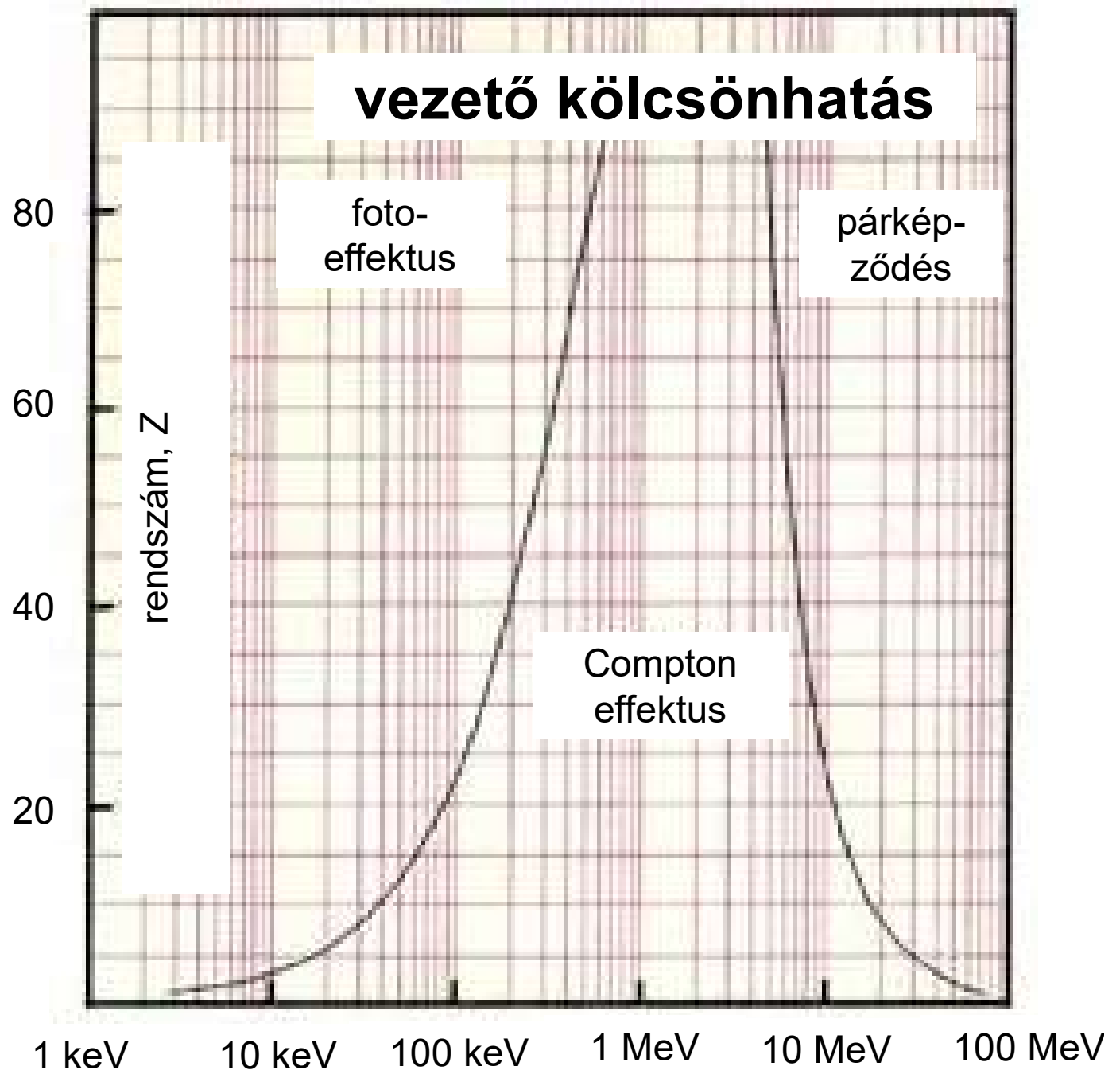




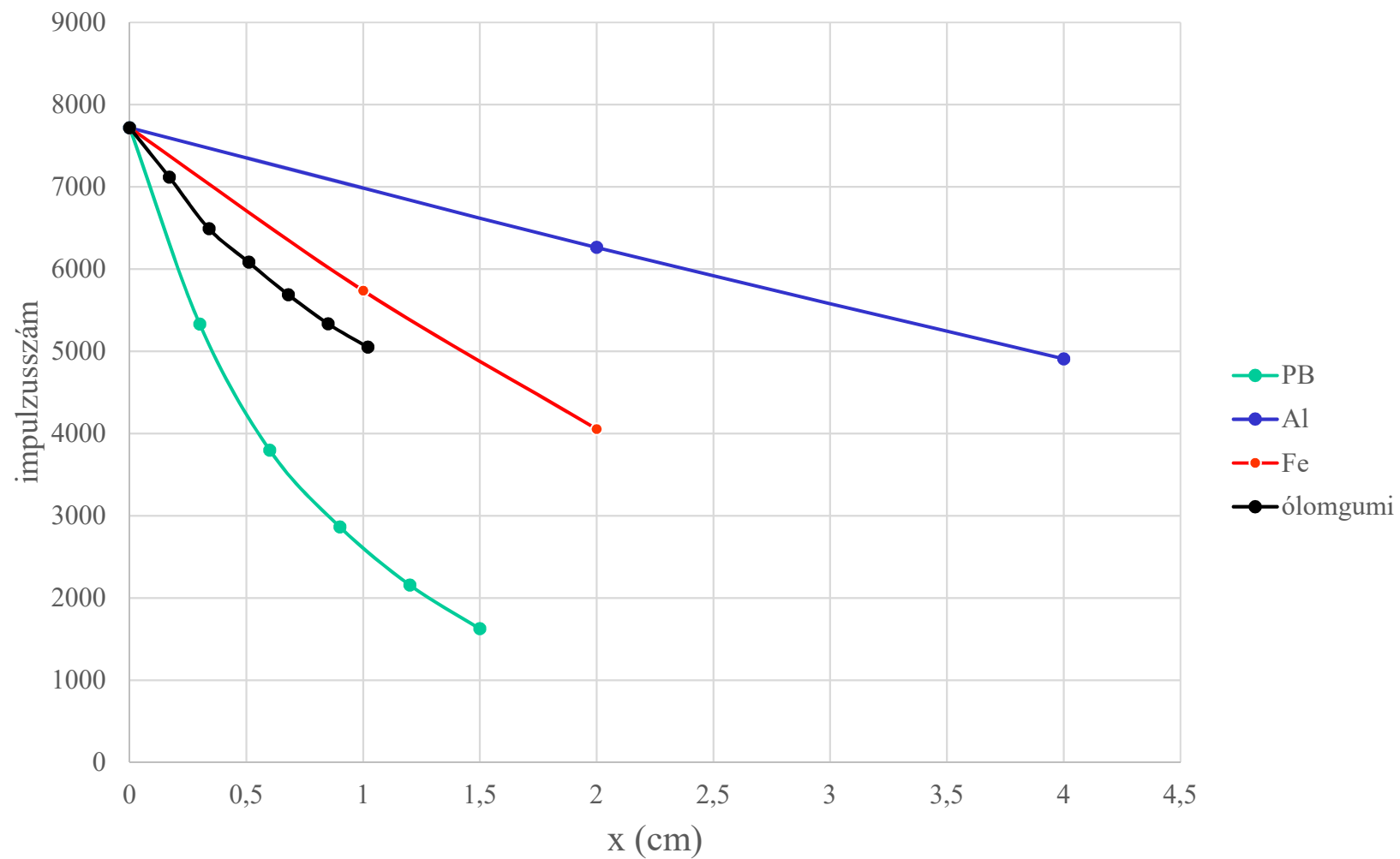
$$Z_{eff} = \sqrt[3]{\sum (f_i Z_i^3)}$$

## Effektív rendszámok

<i>anyag</i>	$Z_{eff}$
zsír	6-7
levegő	7.26
víz	7.5
lágyszövet	7-8
csont	12-14
jód	53
bárium	56
ólom	82



A  $^{137}\text{Cs}$  gamma sugárzásának elnyelődése különböző anyagokban

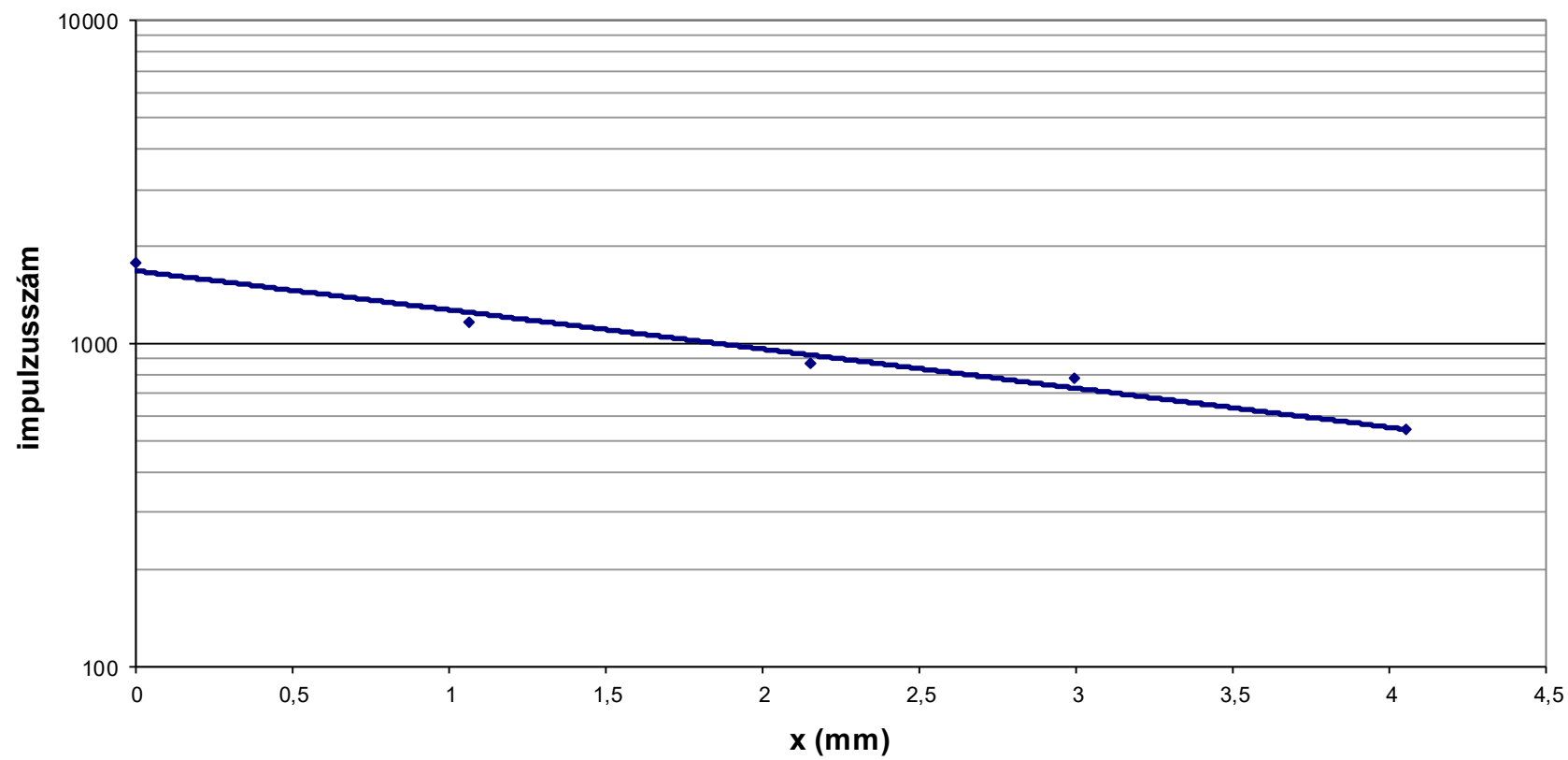


## **A sugárgyengülést jellemző adatok Cs-137 gamma sugárzására (E = 661 keV)**

	<b>sűrűség (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>D (cm)</b>	<b>μ (1/cm)</b>	<b>μ<sub>m</sub> (cm<sup>2</sup>/g)</b>
<b>Pb</b>	11,3	0,678	1,02	0,094
<b>ólomgumi</b>	4,3	1,79	0,387	0,09
<b>Fe</b>	7,9	1,92	0,36	0,046
<b>Al</b>	2,7	5,6	0,12	0,046



**I-125 (E=35,5 keV) sugárzásának gyengülése alumíniumban  
(D= 2,1 mm)**



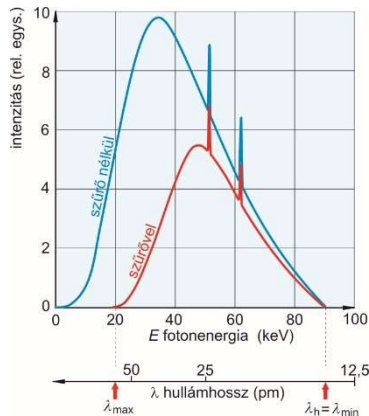
Kisebb fotonenergiáknál (diagnosztikus rtg és  $\gamma$ ), nagyobb rendszámú gyengítő anyagoknál (pl. Pb, csont) főleg fotoeffektus.

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  $\beta$  esetén

## Neutronsugárzás

egyes magreakciók terméke, bombázott atommagok gerjesztett állapotba kerülnek, felesleges energiájuktól neutronkibocsátással szabadulnak meg

elektromos töltéssel nem rendelkezik, ezért csak közvetve ionizál; a kölcsönhatások fajtái:

**rugalmas szóródás** (rugalmas ütközés, proton és neutron tömege egyenlő), a proton ionizál

**rugalmatlan szóródás** (jellemzően 5 MeV felett): a neutronnal kölcsönható atommag gerjesztett állapotba kerül, majd  $\gamma$  vagy alfa kibocsátás

**neutronbefogás** (a termikus neutron beépül az atommagba): radioaktív izotóp keletkezik

**maghasítás** (>100 MeV): magtöredékek, n-ok,  $\gamma$ -sugárzás

# Protonsugárzás

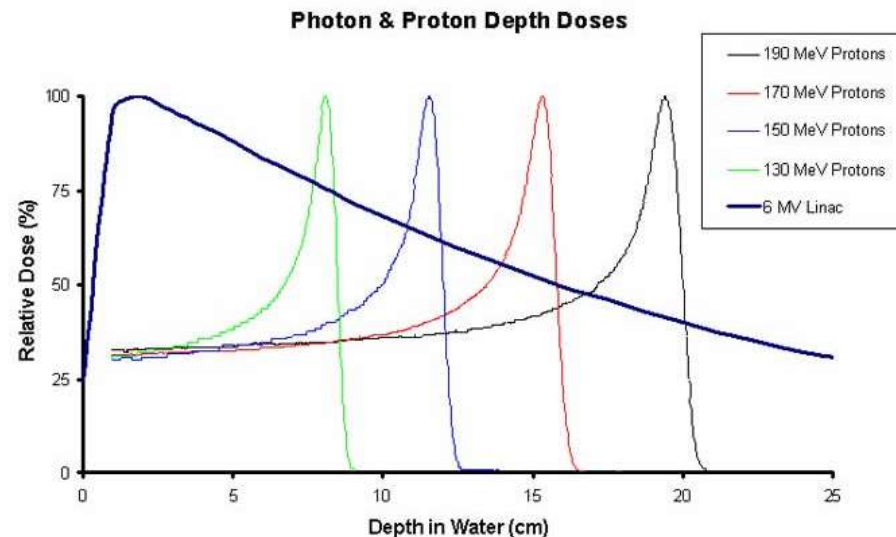
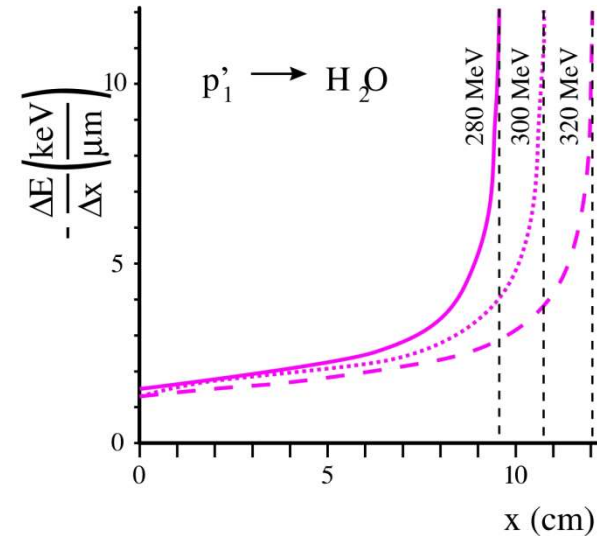
## Bragg csúcsok

protonok közegbeli  
kölcsönhatása  
nagyon hasonló az  
alfa sugárzáséhoz

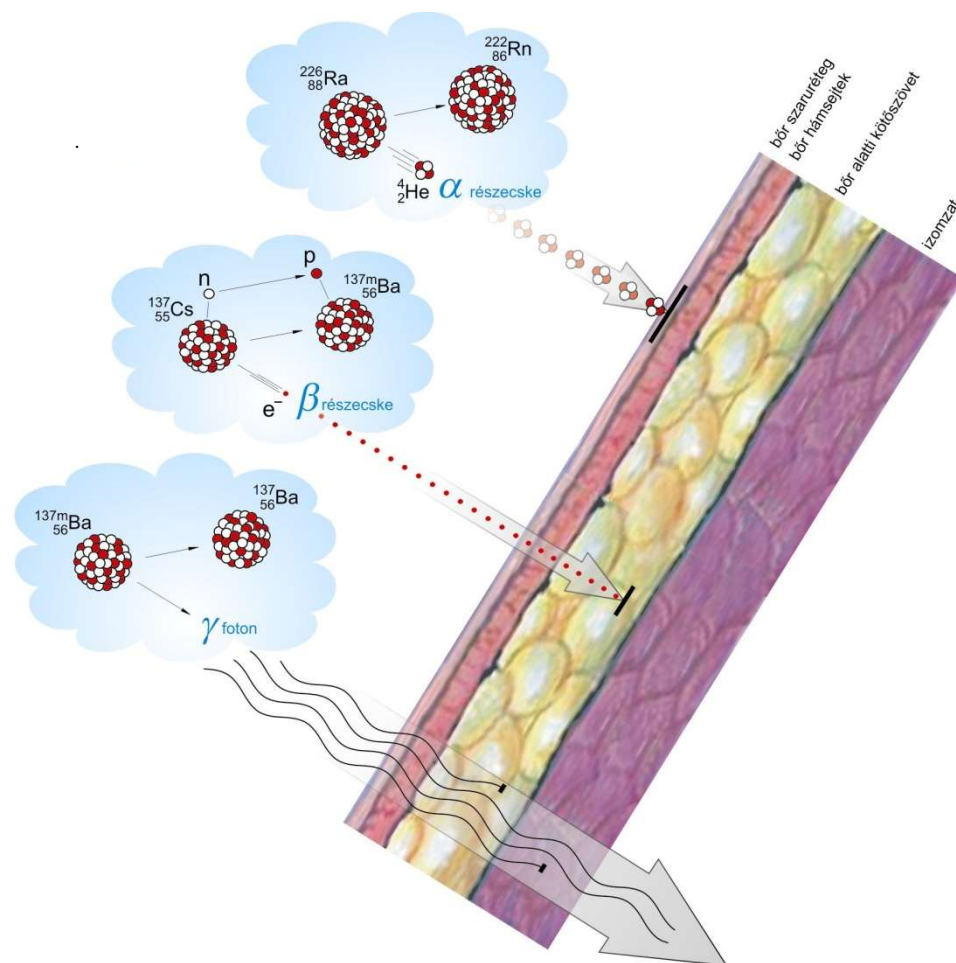
a felülethez közeli  
rétegekben csak kicsi  
a lefékeződés

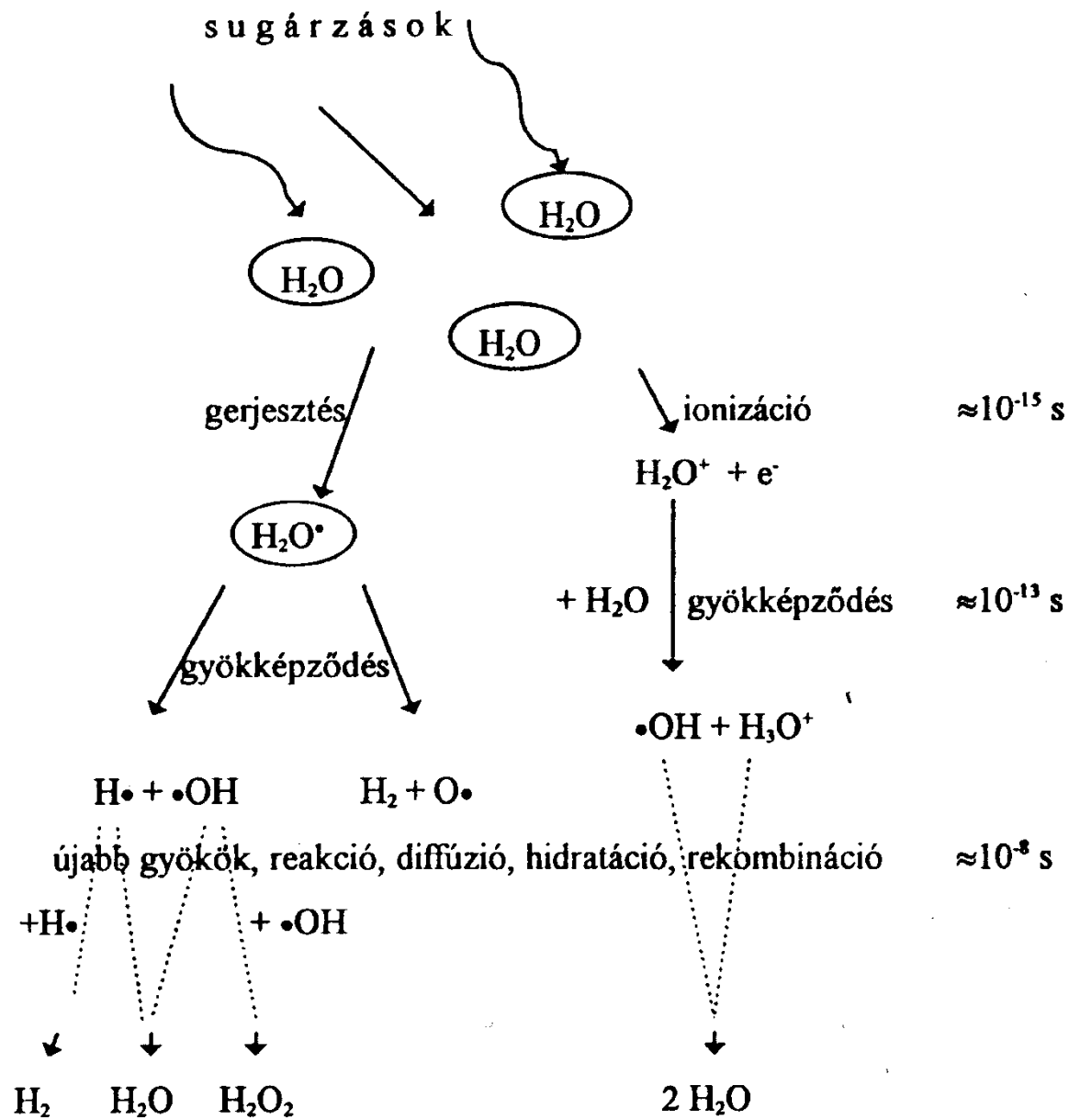
a Bragg csúcshoz  
tartozó behatolási  
mélység: hatótávolság  
terápiás felhasználás!

különböző  
energiájú  
protonsugárzás  
behatolása  
vízbe (DFS  
2.67 ábra)



	alfa	béta	gamma	neutron
áthatolóképesség	nagyon kicsi	kicsi	nagyon nagy	nagyon nagy
veszélyesség	belső	belső/ külső	külső	külső
védelem	papír	műanyag	ólom, beton	víz, beton





### 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:

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

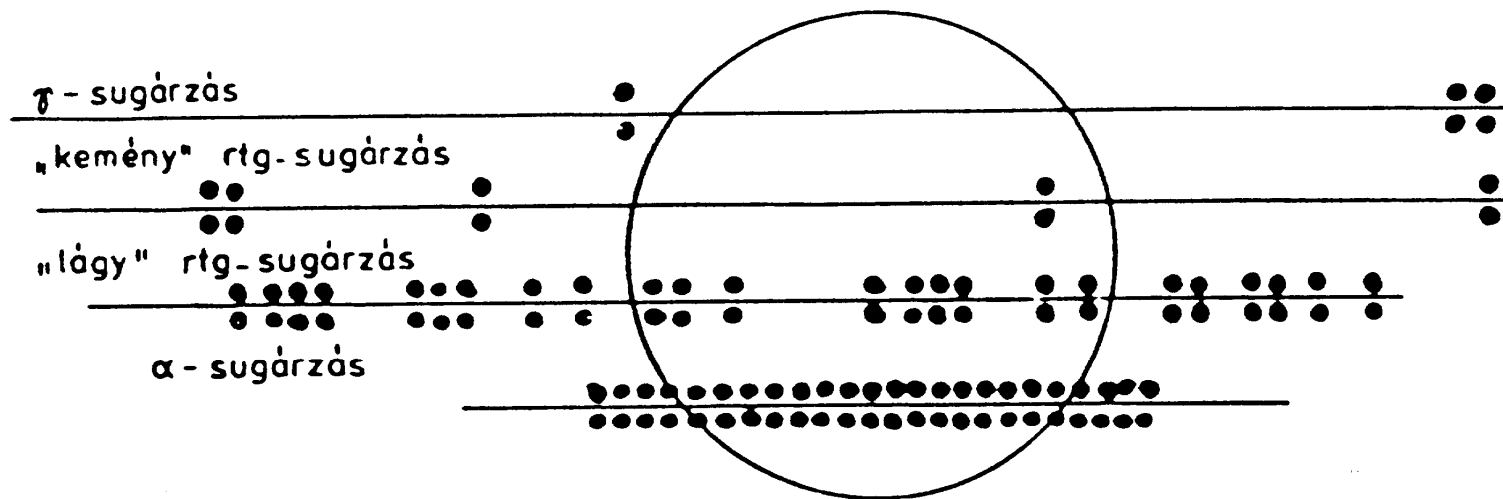
Az elnyelt dózis minden sugárzásra és minden elnyelő anyagra érvényes, de gyakorlatilag mérhetetlen.

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

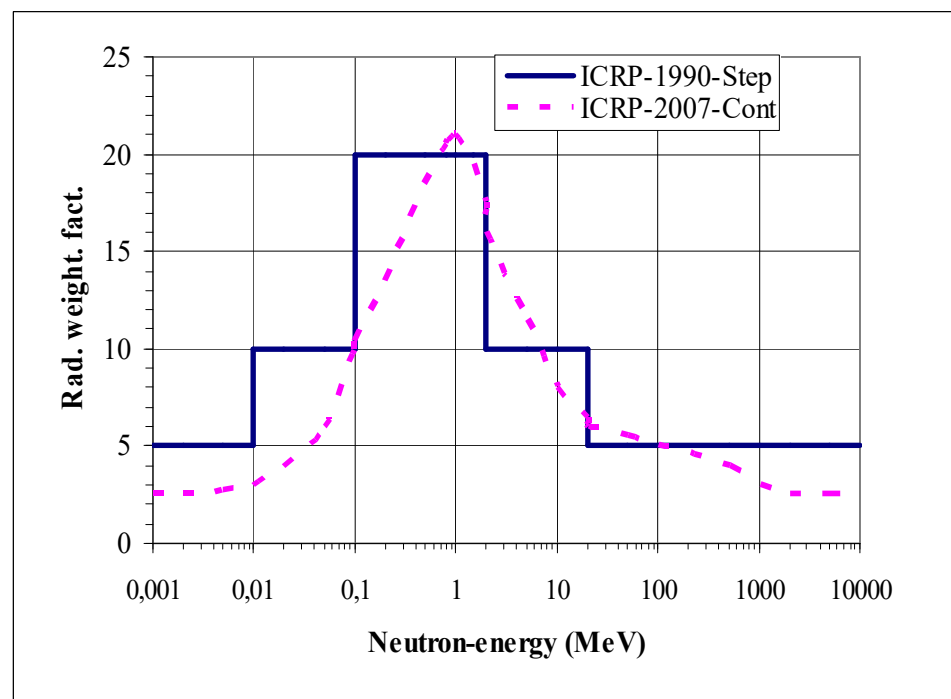
**Egyenérték dózis:**  $H_T = D_{T,R} w_R$  mértékegysége: J/kg = Sv

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, müon	1	1
proton (nem visszaszórt)	5	
proton és pion		2
$\alpha$ -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.

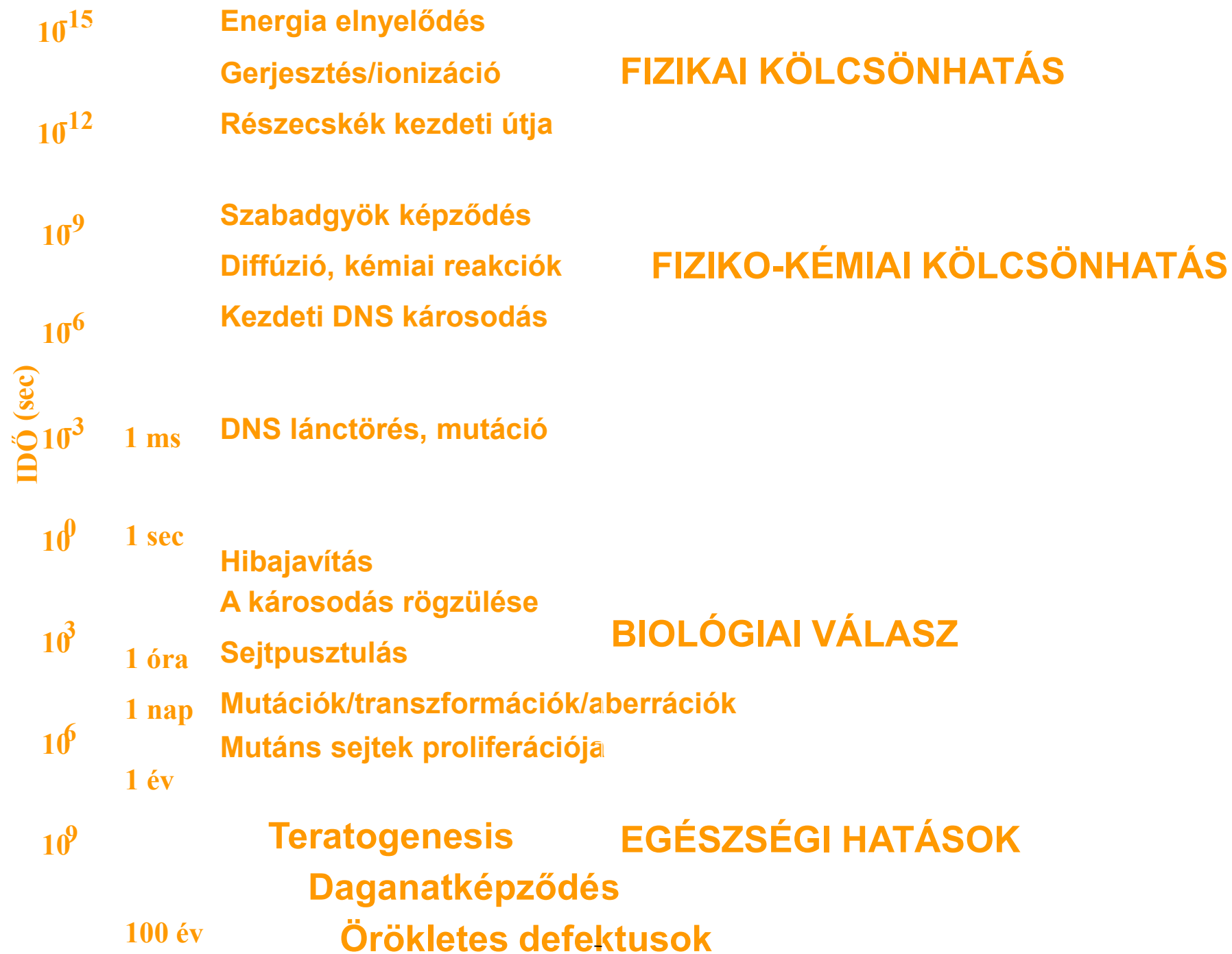


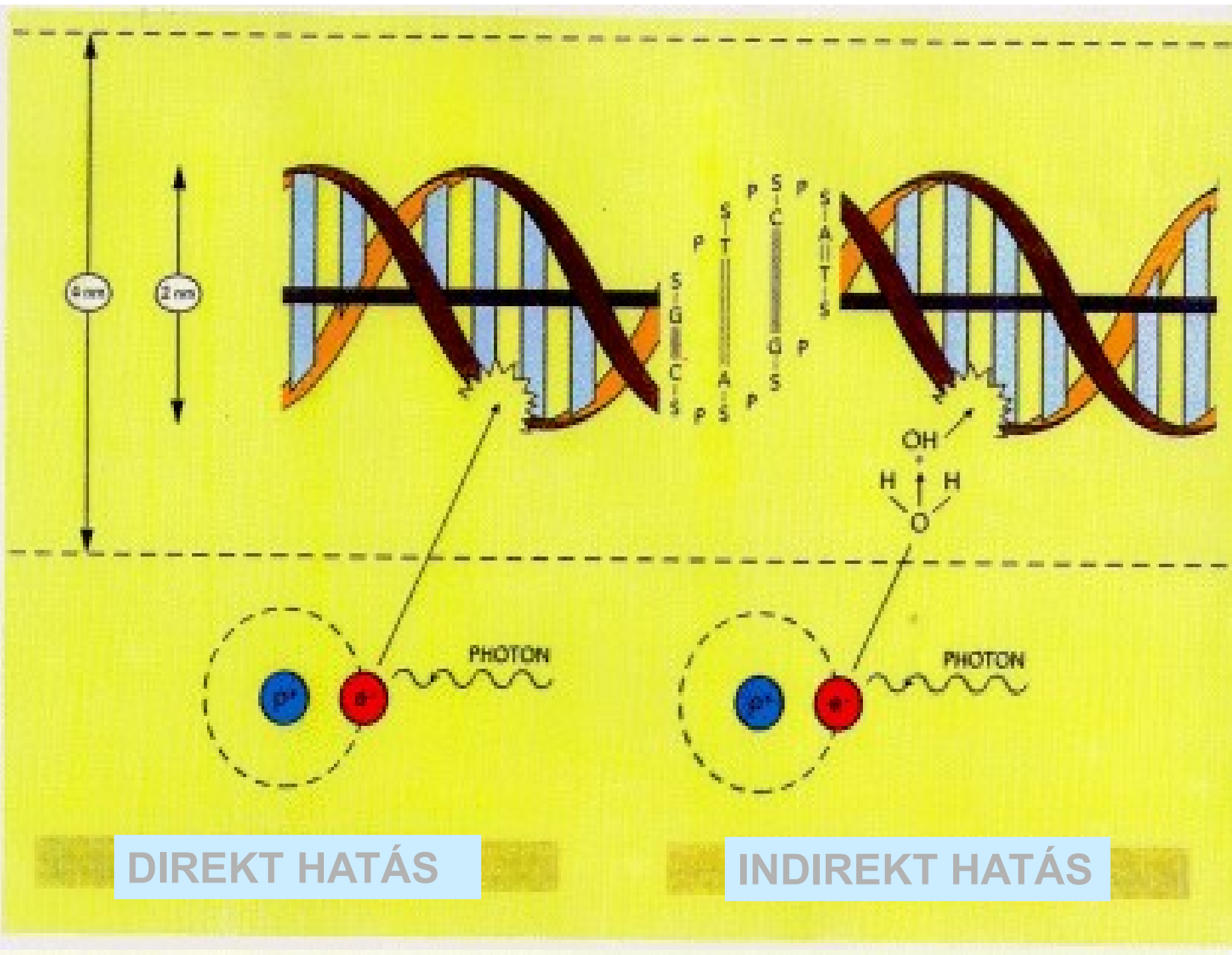


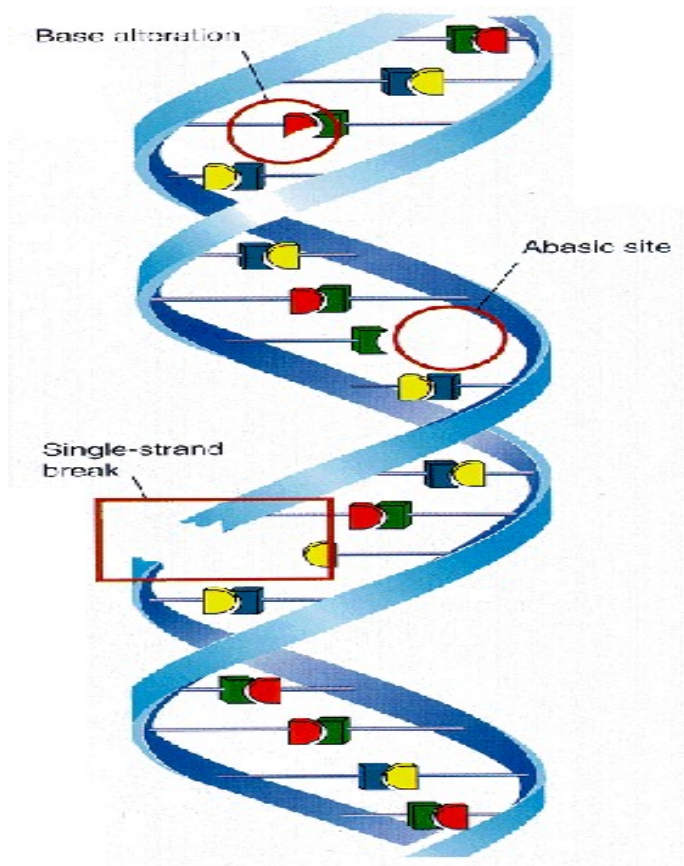
## ***Grotthus (1815) - Draper (1845)***

Csak az elnyelt sugárzás okozhat fizikai, vagy kémiai hatást a szövetekben

(és következményes biológiai hatást)







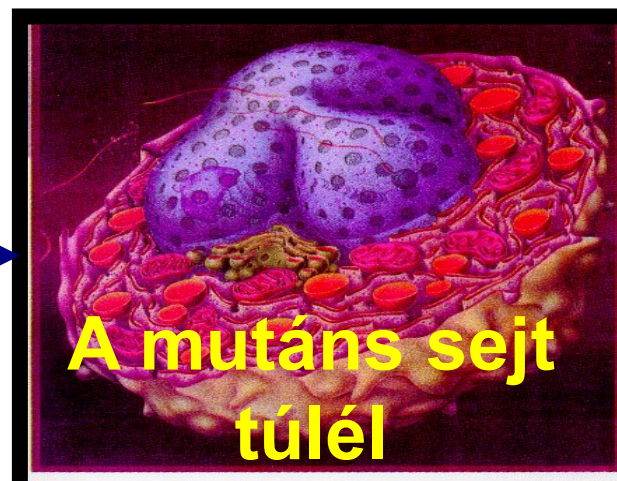
DNS mutáció



életképes sejt



életképtelen sejt



daganat ?

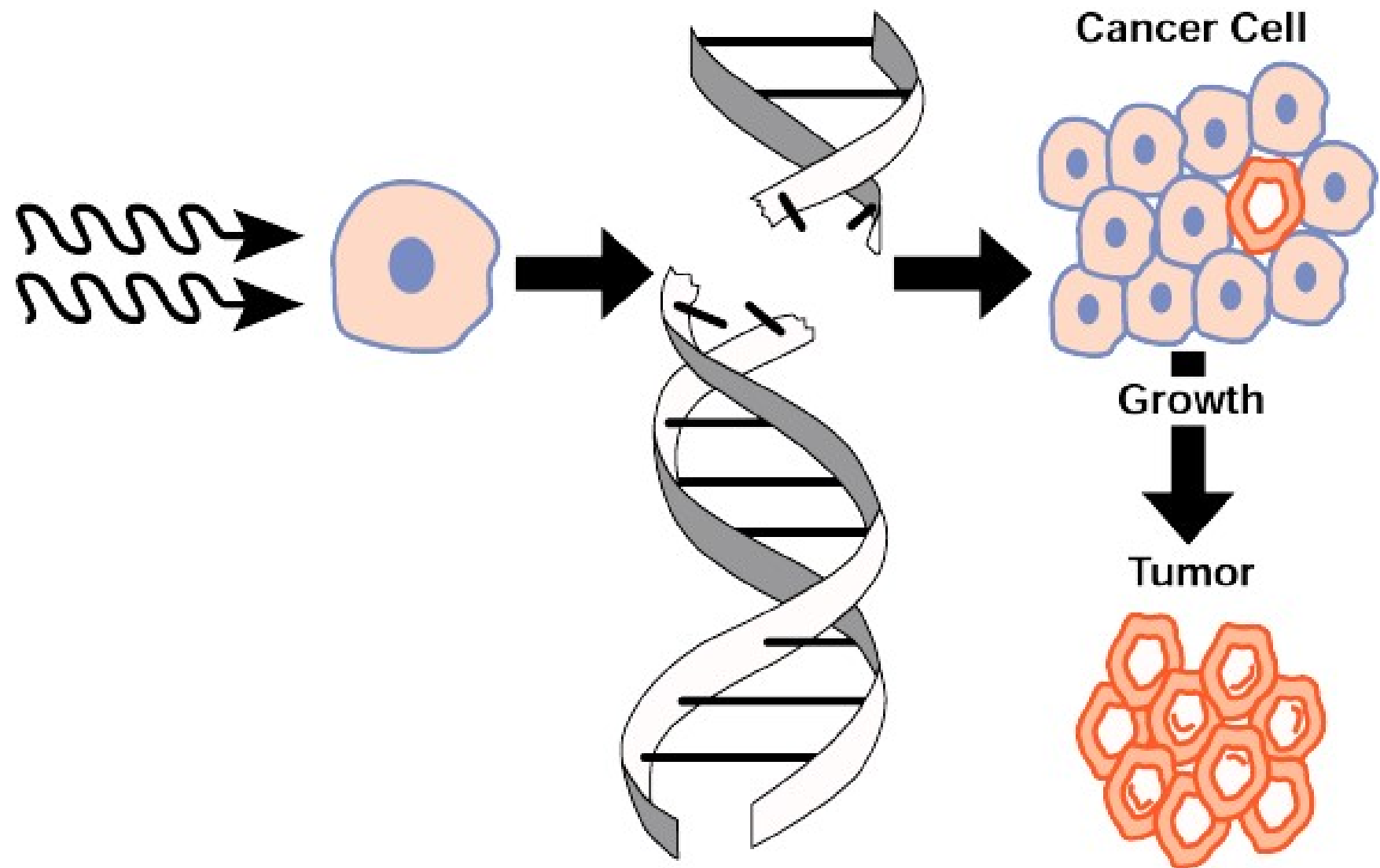
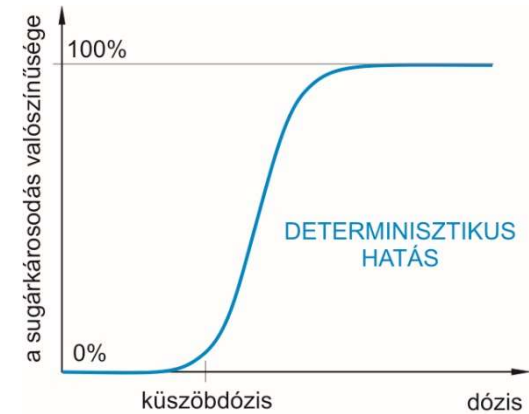


Figure 1. Development of cancer from mutation produced by ionizing radiation.

# A sugárkárosodások fajtái

## Determinisztikus

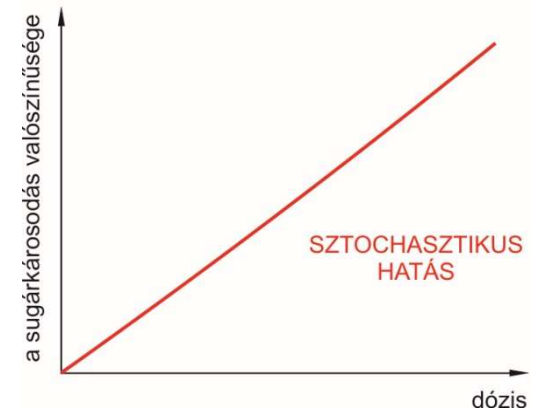
- Csak küszöbdózis felett
- A károsodás súlyossága arányos a dózissal (pl. bőrpír, sugárbetegség)
- Órákon, napokon belül



## Sztochasztikus

Nincs küszöbdózis

- A valószínűsége arányos a dózissal (pl. daganatkeletkezés)
- Évek, évtizedek alatt





## **Bergonié-Tribondeau törvény (1906)** **(sugárérzékenységi törvény)**

(Jean A. Bergonié, francia radiológus, 1857-1925;  
Louis F.A. Tribondeau, francia orvos, 1872-1918)

Egy szövet sugárérzékenysége a szövetben található  
differenciálatlan sejtek számától, a mitotikus  
aktivitásuktól és az aktív proliferáció időtartamától.



# A szövetek sugárérzékenysége

magas	közepes	alacsony
csontvelő lép thymus nyirokcsomók gonádok szemlencse lymphocyták (kivétel a sugárérzékenységi törvény alól)	bőr Mezodermális szervek (máj, szív, tüdő...)	izom csont idegrendszer

# A sugárérzékenységet (SÉ) befolyásoló tényezők

- Fizikai

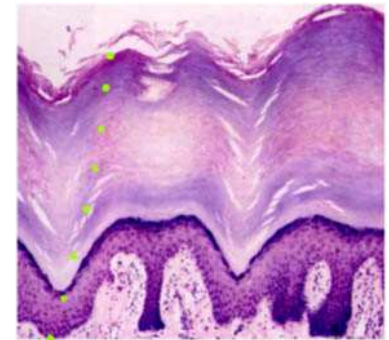
- LET (linear energy transfer):  $\uparrow\uparrow$  SÉ
- Dózisteljesítmény:  $\uparrow\uparrow$  SÉ

- Kémiai

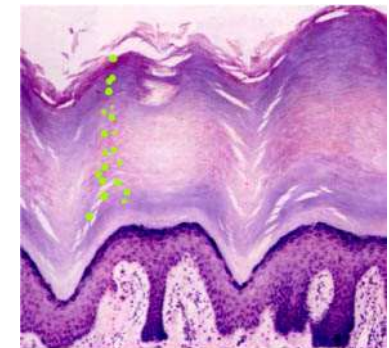
- Növelik: OXIGÉN, citosztatikumok.
- Csökkentik: kén (cys, cysteamine, glutation)

- Biológiai

- Sejtciklus státusz:
  - $\uparrow\uparrow$  SÉ: G2, M
  - $\downarrow\downarrow$  SÉ: S
- A károsodás kijavítása (a szubletális károsodás kijavítható pl. frakcionált dózis)



Specific ionization by X-rays or gamma rays



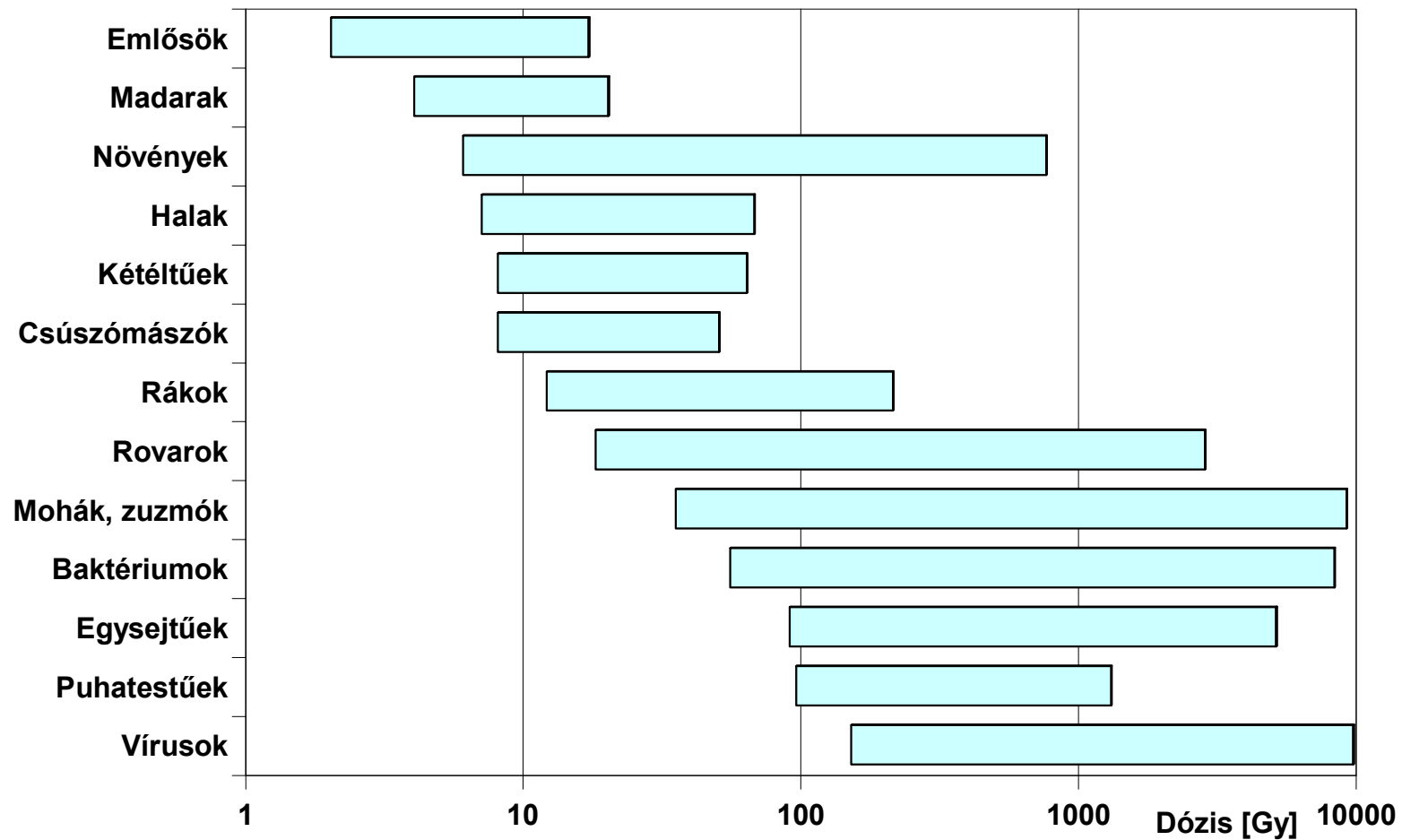
Specific ionization by alpha particles

## Akut sugárbetegség

### Nagy dózisú egésztest besugárzás hatásai

Hatás	Dózis (Sv)
Nincs megfigyelhető hatás	0- 0,25
Enyhe vérsejtszám csökkenés	0,25-1
Jelentős vérlemezke és fehérvérsejt szám csökkenés (átmeneti)	1-2
Súlyos vérsejt károsodás, émelygés, kopaszodás, vérzés, gyakran halál	2-5
Több, mint 80%-ban 2 hónapon belül halál	> 6

# Félhalálos dózisok, akut besugárzás esetén



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

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

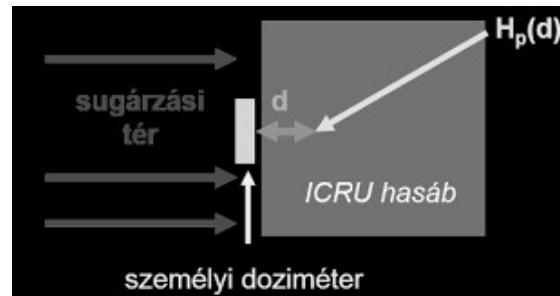
$$H = D \cdot Q$$

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



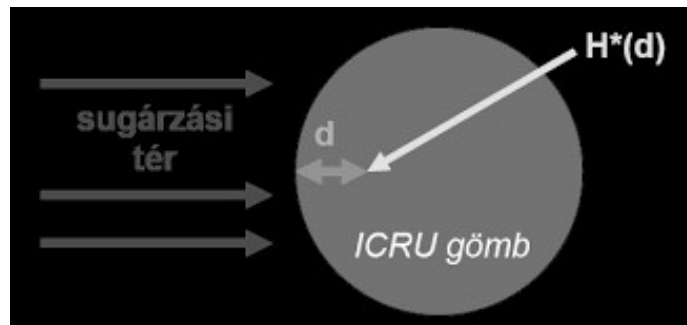
## 1.14. A személyi-, környezeti- és irány szerinti dózisegyenérték fogalma és használata

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  $1 \text{ g/cm}^3$

#### 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  $\Omega$  irányú gömbsugáron mérve.

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

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

