

JELEN TANANYAG A SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEMEN KÉSZÜLT
AZ EURÓPAI UNIÓ TÁMOGATÁSÁVAL.
PROJEKT AZONOSÍTÓ: EFOP-3.4.3-16-2016-00014

hullámok

(fény, Röntgen-
 γ -sugárzás, stb.)

(Mag)sugárzások

hatása az

(élő) anyagra

sejtek

szövetek

szervek

részecskék

(α , β , n , stb.)

SZERZŐ:
PROF. DR. MARÓTI PÉTER

LEKTOR:
MOLNÁR DÁNIEL

SZÉCHENYI 2020



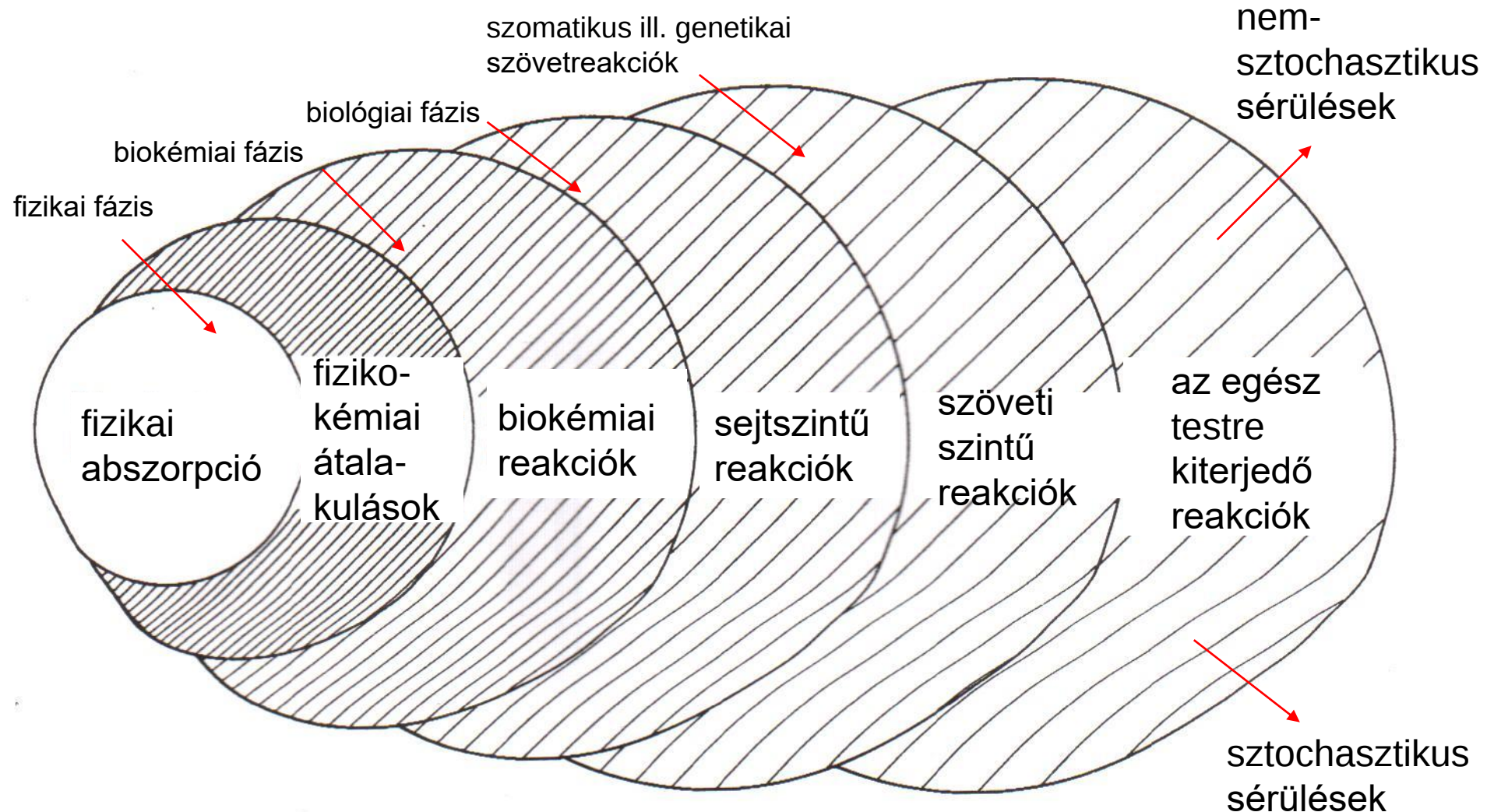
MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Sugársérüléshez vezető reakciók organizmusokban



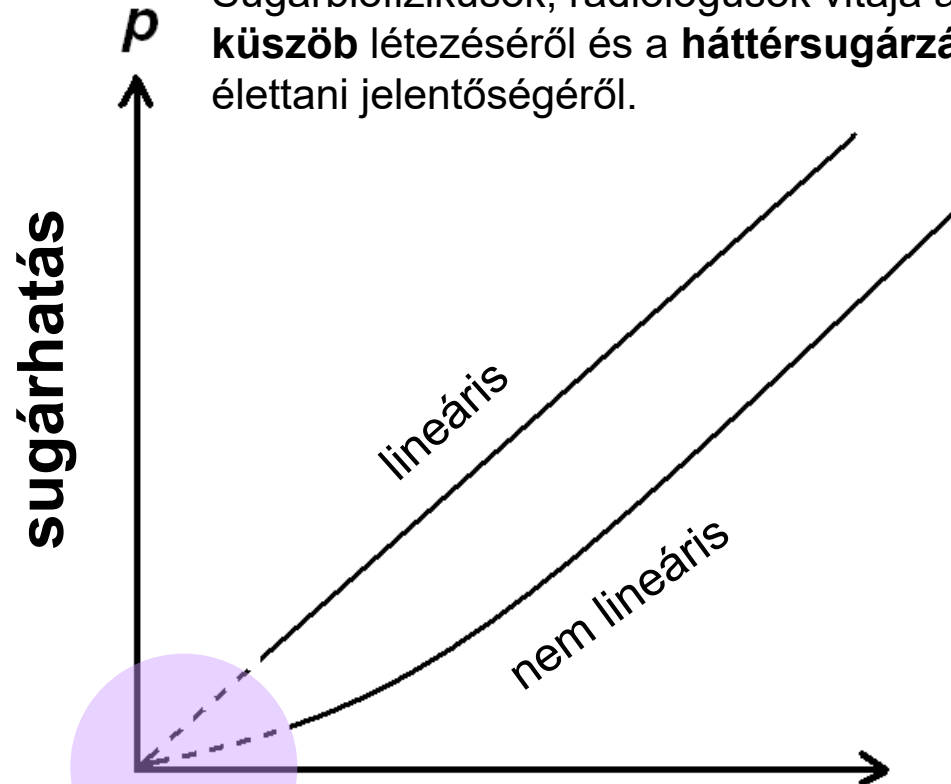
Biológiai hatás (sugárdózis-sugárhatás görbék)

Egyedi sejtre való sugárhatásról van szó, mint pl. **génmutáció**, **szomatikus kromoszómaaberráció** vagy **rákos áttétel-képződés**.

Sztochasztikus sugárhatás

p : biológiai hatás fellépésének valószínűsége

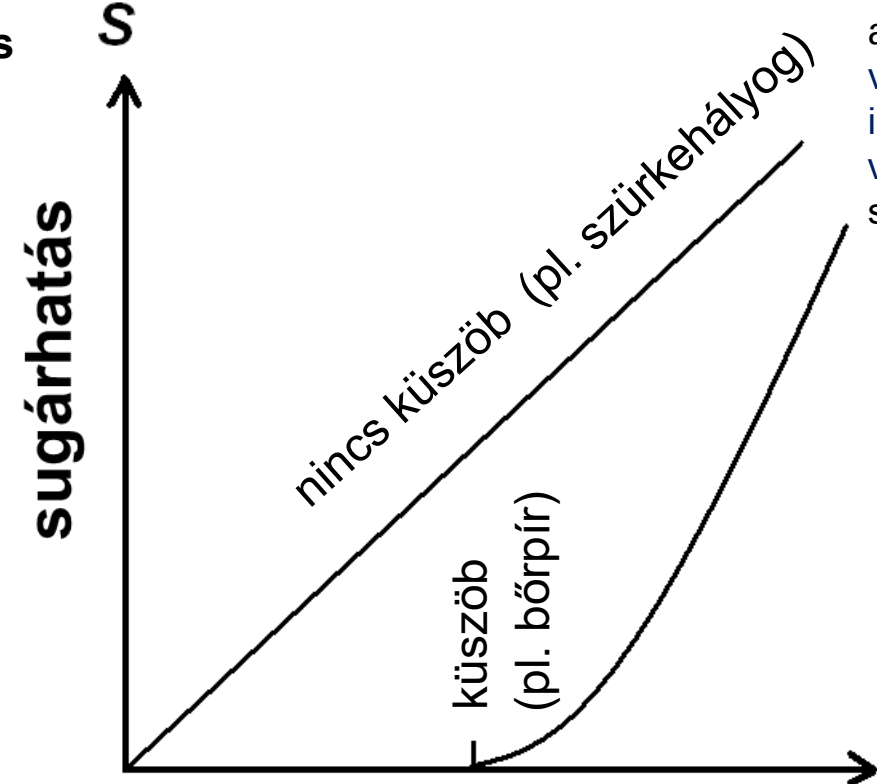
Sugárbiofizikusok, radiológusok vitája a **küszöb** létezéséről és a **háttérsugárzás** élettani jelentőségéről.



Ez a rész (statisztikai okokból) egyáltalán nem vagy csak nehezen mérhető: küszöb jelenléte nem bizonyítható.

Nem-sztochasztikus sugárhatás

S : a biológiai károsodás mértéke



Azok a sugársérülések, amelyek az érintett **szerv** nagyszámú sejtjének megsemmisítésén alapulnak, mint pl. **vérképzőszerv**, **immunrendszer** vagy **nemi szervek** sérülése.

ekvivalencia dózis

A biológiai dózis (ekvivalencia dózis) **H** a sugárzás energiadózisának (**D**) és az értékelési tényezőnek (**q**) a szorzata: **$H = q \cdot D$**

Sugárhatások

I. Elektromágneses hullámok: fény-, Röntgen- és γ -sugarak

Termikus hatás – Felmelegedés

Gerjesztés

Lumineszcencia

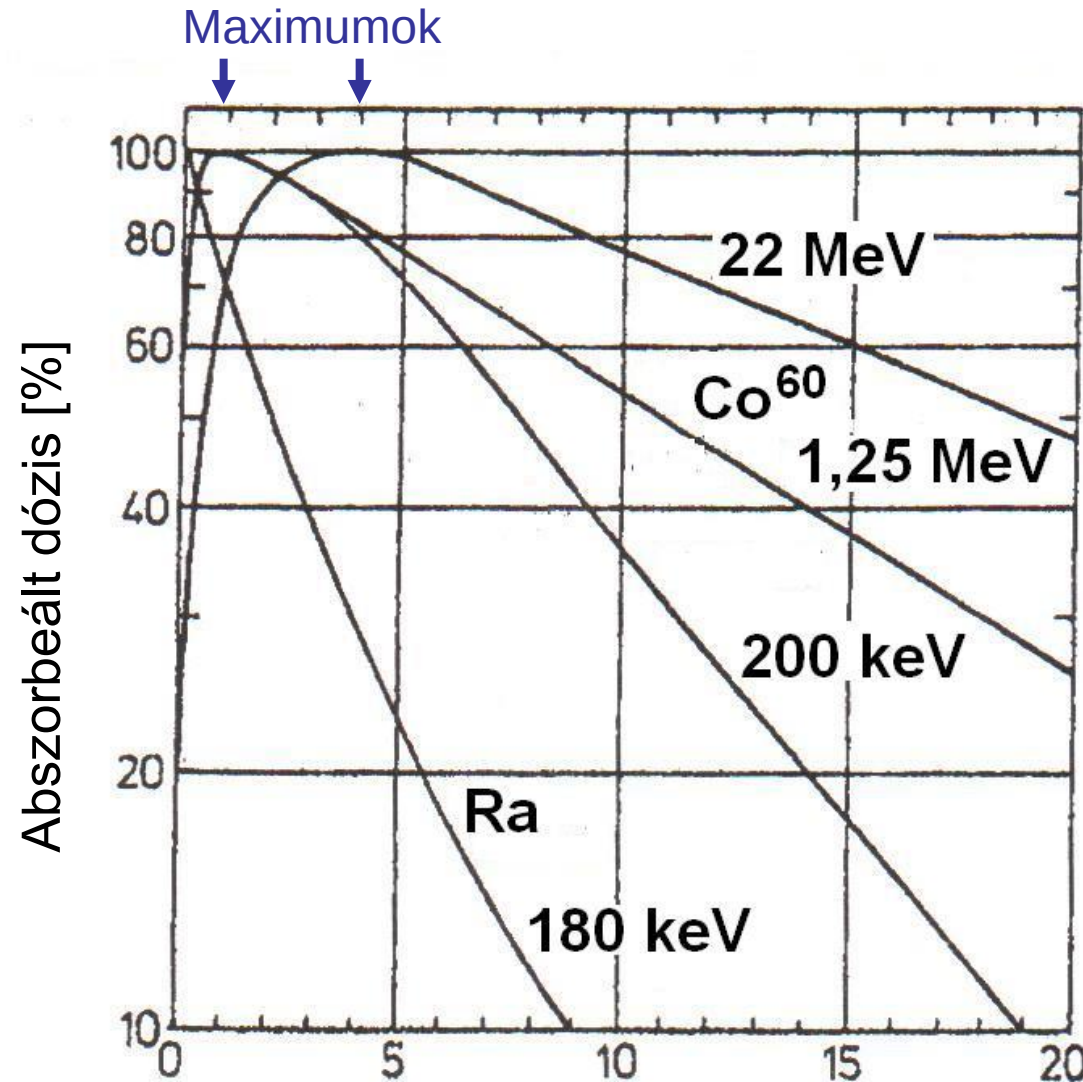
Fotokémiai reakciók

- **Fotolízis**: az elsődleges fotokémiai folyamatok roncsolják a kémiai vegyületeket (pl. ózon (O_3) rétegek roncsolása és keltése a légkör felsőbb (20-25 km) magasságaiban).
- **Fotodisszociáció**: $AB \rightarrow A + B$
- **Fotoszintézis**: szerves vegyületek szintetizálódnak a (Nap)fény energia elnyelése és átalakítása útján.
- **Fotopolimerizáció**: kis szerves molekulákból makromolekulák képződnek fotokémiai reakció útján.

Ionizáció

Az UV, a Röntgen- és a γ -sugárzások ionizáló sugárzások, mert az elnyelő anyagban ionokat keltenek (**invazív** eljárások).

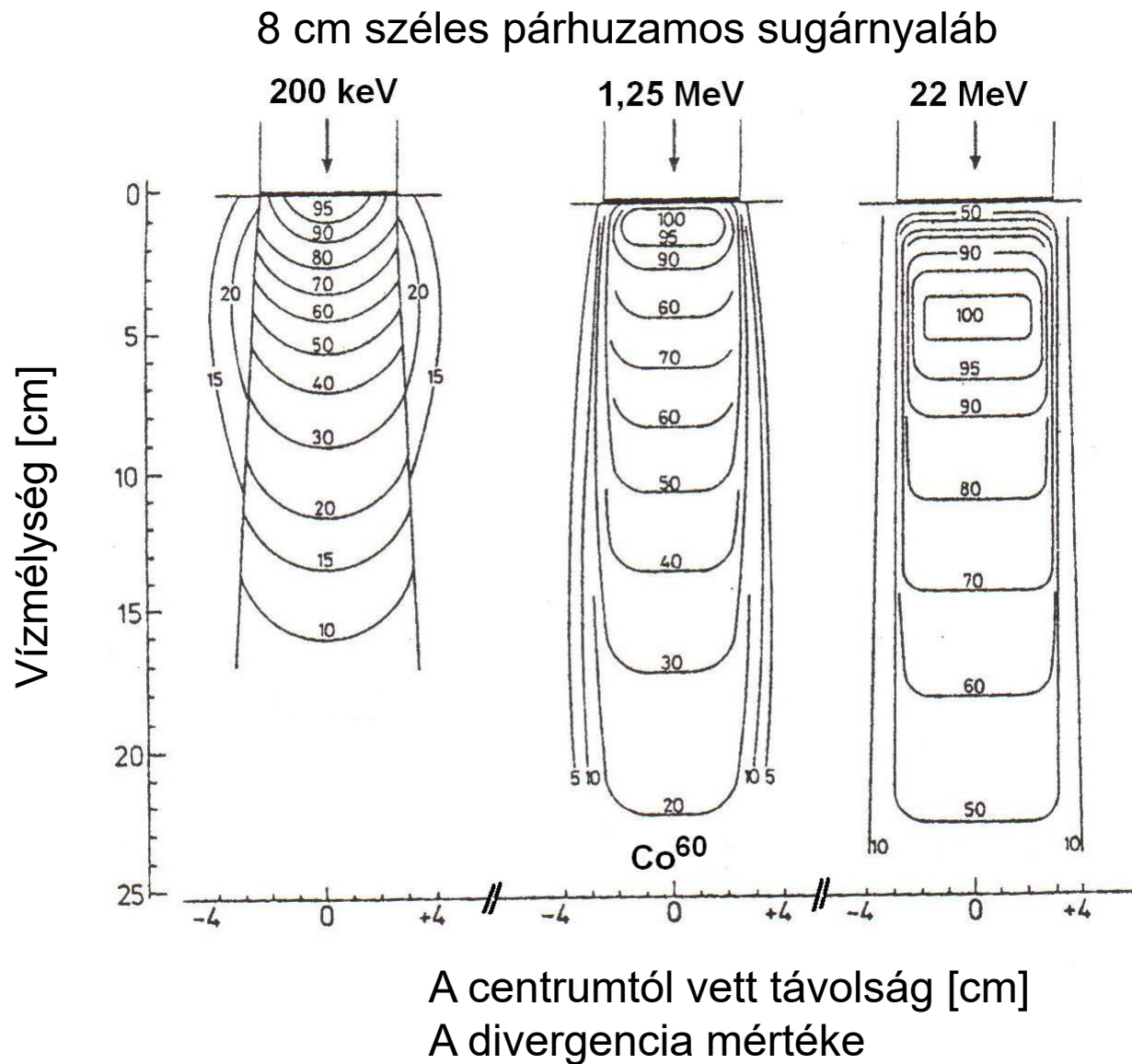
A γ -sugarak energia-függő elnyelődése vízben



A legtöbb energia nem a belépés helyén, azaz a felszínen nyelődik el, hanem az alsóbb rétegekben. Minél nagyobb a sugárzás kvantumjának energiája (azaz minél keményebb a sugárzás), annál mélyebb rétegekre tolódik el az elnyelődés maximuma.

A víz felszínétől vett távolság (mélység) [cm]

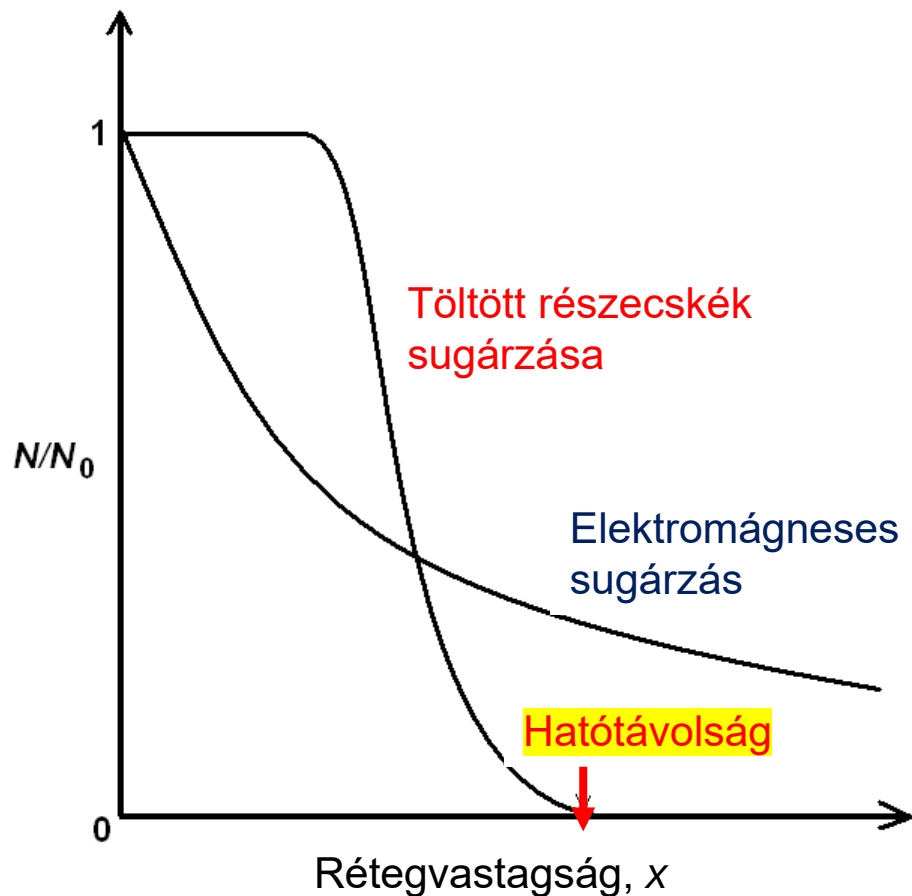
A különböző energiájú γ -sugarak energiaprofilja vízbe való belépés után



Minél keményebb a sugárzás (azaz minél nagyobb a sugárzás kvantumjának energiája), annál inkább megmarad a vízbe való behatolás után is a sugárzás nyalábosítottsága (párhuzamossága), azaz az oldalra való szórás annál inkább korlátozódik.

II. Részecskesugárzások (α -, β - p - és n -sugarak)

A sugárzások transzmissziója:



Töltött részecskék sugárzása: N/N_0 kis x rétegvastagságban csak nagyon lassan csökken növekvő rétegvastagsággal, majd (többé-kevésbé) meredeken nullára csökken. Azt a minimális távolságot, amelynél a sugárzás nullára csökken, **hatótávolság**nak nevezzük. A fény-, Röntgen-, és γ -sugarakkal ellentétben, a töltött részecskék sugárzását hatótávolság jellemzi.

Elektromágneses sugárzás: a fotonok számának relatív csökkenése (N / N_0) exponenciális függvény szerint változik (Beer törvénye). A nulla értéket csak határesetben, nagyon nagy rétegvastagság ($x \rightarrow \infty$) esetén éri el.

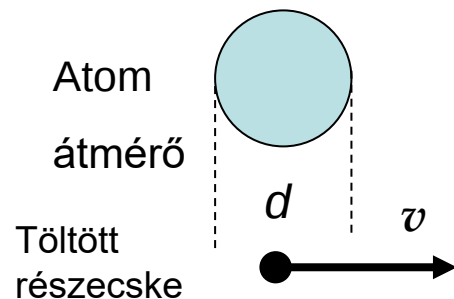
Töltött részecskék sugárzása: köölcsönhatási mechanizmusok

Az anyag **lineáris fékezési képessége** S . A behatoló részecskék a rugalmatlan szórás következtében irányváltozásra és energiaveszteségre kényszerülnek, és lefékeződnek. A Δx útszakaszon ΔE energiaveszteséget szenvednek:

$$S = -\frac{\Delta E}{\Delta x}$$

Az anyag fékezési képessége független attól, hogy milyen aggregációs állapotban van, és csak az átsugárzott tömegtől függ. Ennek alapján célszerű bevezetni a sűrűsége vonatkoztatott **tömeg-fékezési képességet**: S / ρ , amely adott sugárzás- és anyagtípusra állandó. S több folyamatot tükröz.

ütközési fékezés



erőhatás: F

az erőhatás ideje: $\Delta t = d/v$

impulzus-csere: $\Delta p = F \cdot \Delta t = F \cdot d/v$

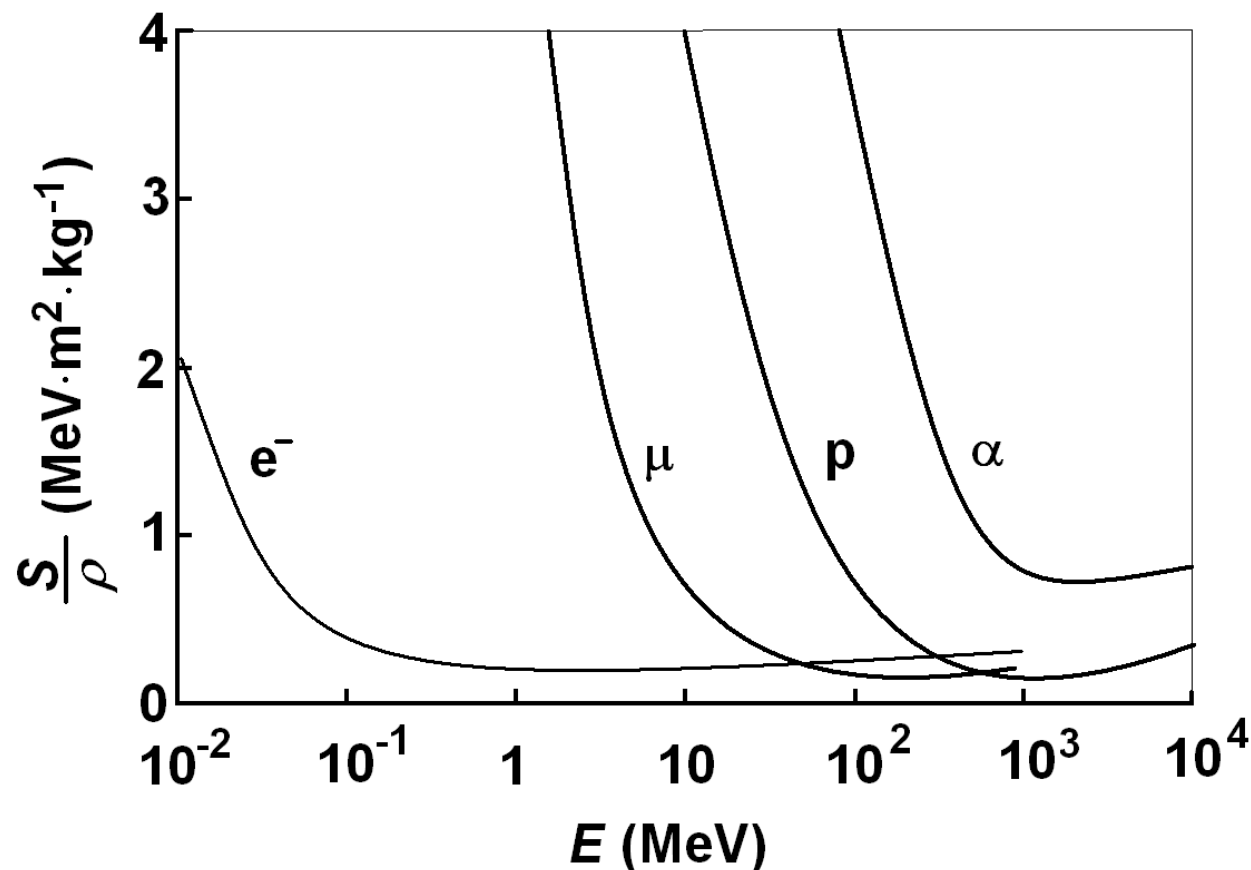
energia-csere: $\Delta E = (\Delta p)^2 \cdot 1/(2m) \sim 1/v^2$

A tömeg-fékezési képesség fordítottn arányos a részecske sebességének négyzetével:

$$S \sim 1/v^2$$

Néhány sugárzás tömeg-fékezési képessége levegőben

Minél gyorsabb (energiában „gazdagabb”) a részecske, annál kevesebb energiát ad le ugyanakkora útszakaszon. Az előzőekben bemutatott primitív $1/v^2$ összefüggés kis sebességeknél jól írja le a folyamatokat (nagyobb energiáknál ellenben ellaposodik). A kísérletekben megfigyelhető kapcsolatot a tömeg-fékezési képesség és a részecske energiája között sokkal bonyolultabb modellel lehetne magyarázni.



Lineáris energiatranszfer: LET

Az ionizáló sugárzás az energiáját a besugárzott szövetnek (anyagnak)

- direkt gerjesztéssel és
 - ionizációval (ill. az ezáltal előálló másodlagos részecskékkel)
- adja át.

A lineáris energia-átadás képességét vagy egyszerűbben a lineáris energiatranszfer így definiáljuk:

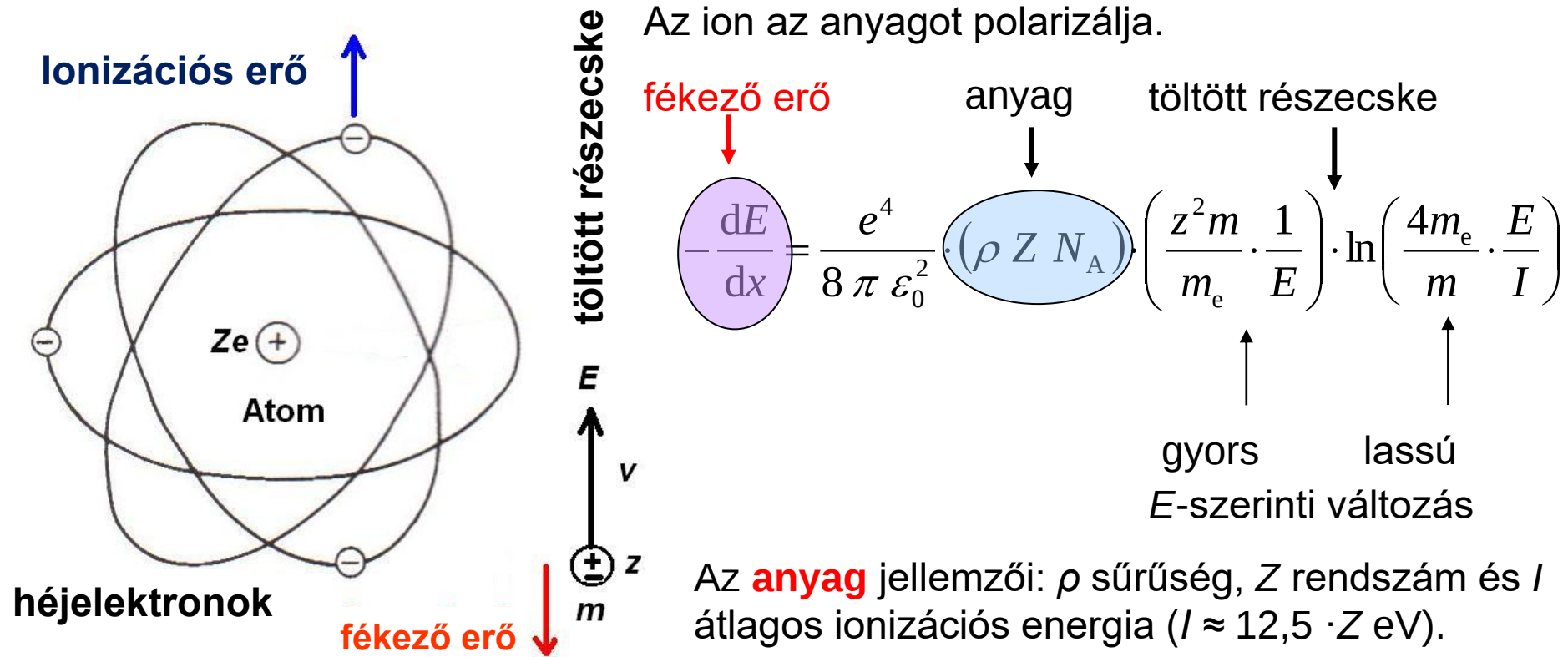
$$L = -\frac{\Delta E_L}{\Delta x} \quad [L] = 1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$$

L nyilvánvalóan kisebb (legfeljebb egyenlő), mint a fékezési képesség $S = -\Delta E / \Delta x$, mivel S a primér részecske teljes energiaveszteségét tartalmazza, amelyet Δx útszakaszon ad le.

L csupán azokból az energiaveszteségi formákból áll, amelyek a gerjesztési és ionizációs folyamatokkal kapcsolatosak:

$$L \leq S.$$

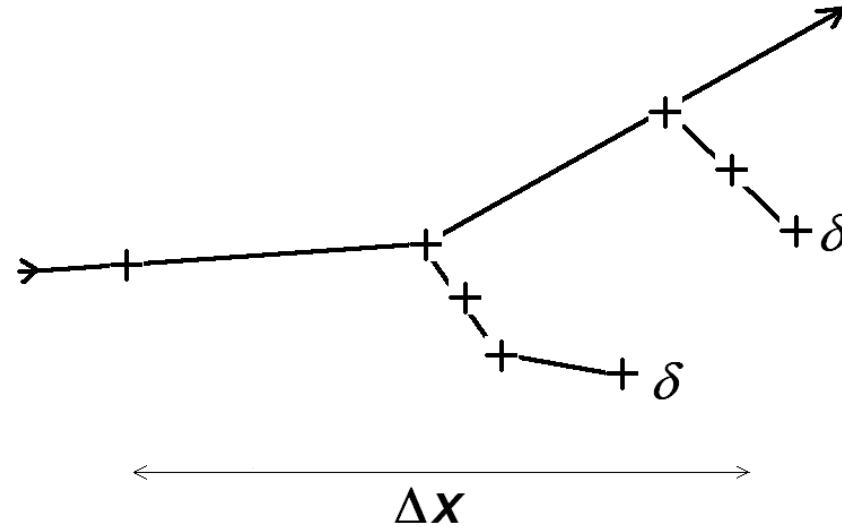
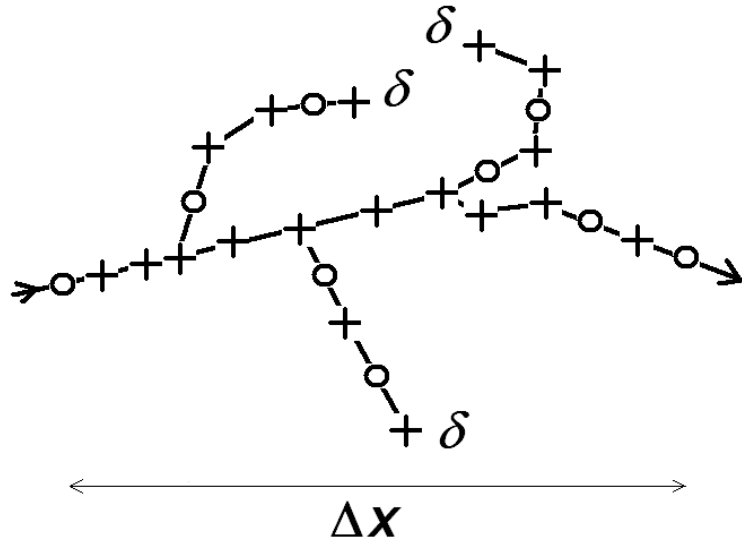
Ionsugarak LET-értékei



A **részecske** jellemzői: E energia, m tömeg és z az ion töltés-értéke.

Univerzális **állandók**: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C (az elektron elemi töltése),
 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm (a vákuum dielektromos állandója), $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ 1/mol (Avogadro-mennyiség)
 és $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg (az elektron nyugalmi tömege).

Lineáris energiatranszfer: ionizációs sűrűség



O: gerjesztés, + : ionizációs folyamat és δ : másodlagos (szekundér) elektronok

Noha valamennyi részecske ionizál, miközben a pályájukon lefékeződnek, az **ionizációs sűrűségük**ben különböznek. Ennek alapján beszélhetünk

sűrűn (erősen)

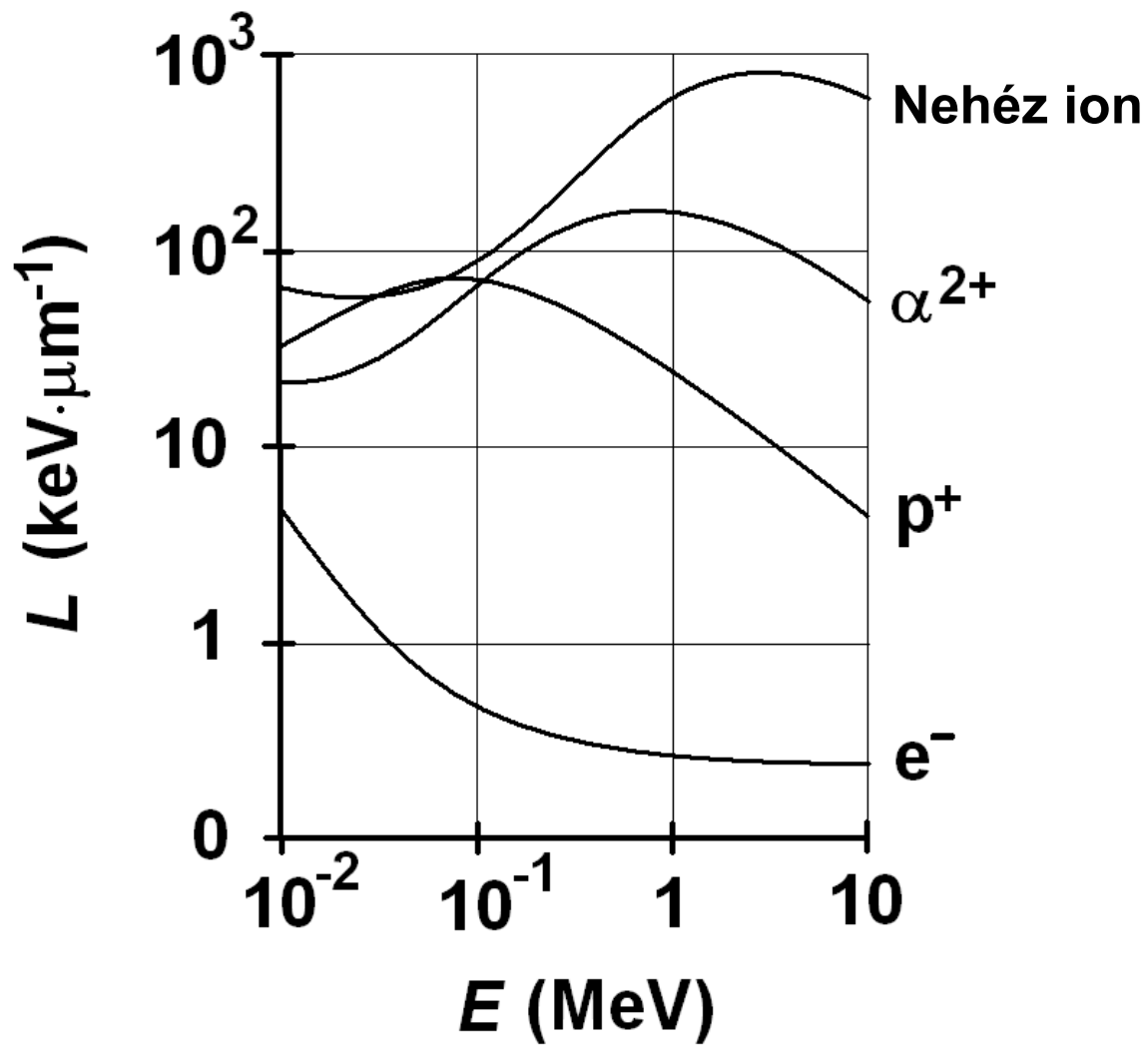
vagy

lazán (gyengén)

ionizáló sugárzásról.

Részecskék LET (L) értékei az energiájuk (E) függvényében

A LET értéket messzemenően a sugárzás részecskéjének **típusa** és **energiája** határozza meg.



A **nehéz részecskék**ből (ionokból, visszalökött atommagokból) álló sugárzásnak van a legnagyobb (legveszélyesebb) ionizálóképessége.

A **könnyű részecskék** (pl. elektronok) sugárzása kis LET értékű, azaz relatíve csekély ionizálóképességű, ezért kevésbé ártalmas.

α -sugárzás

$$1,5 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV}$$

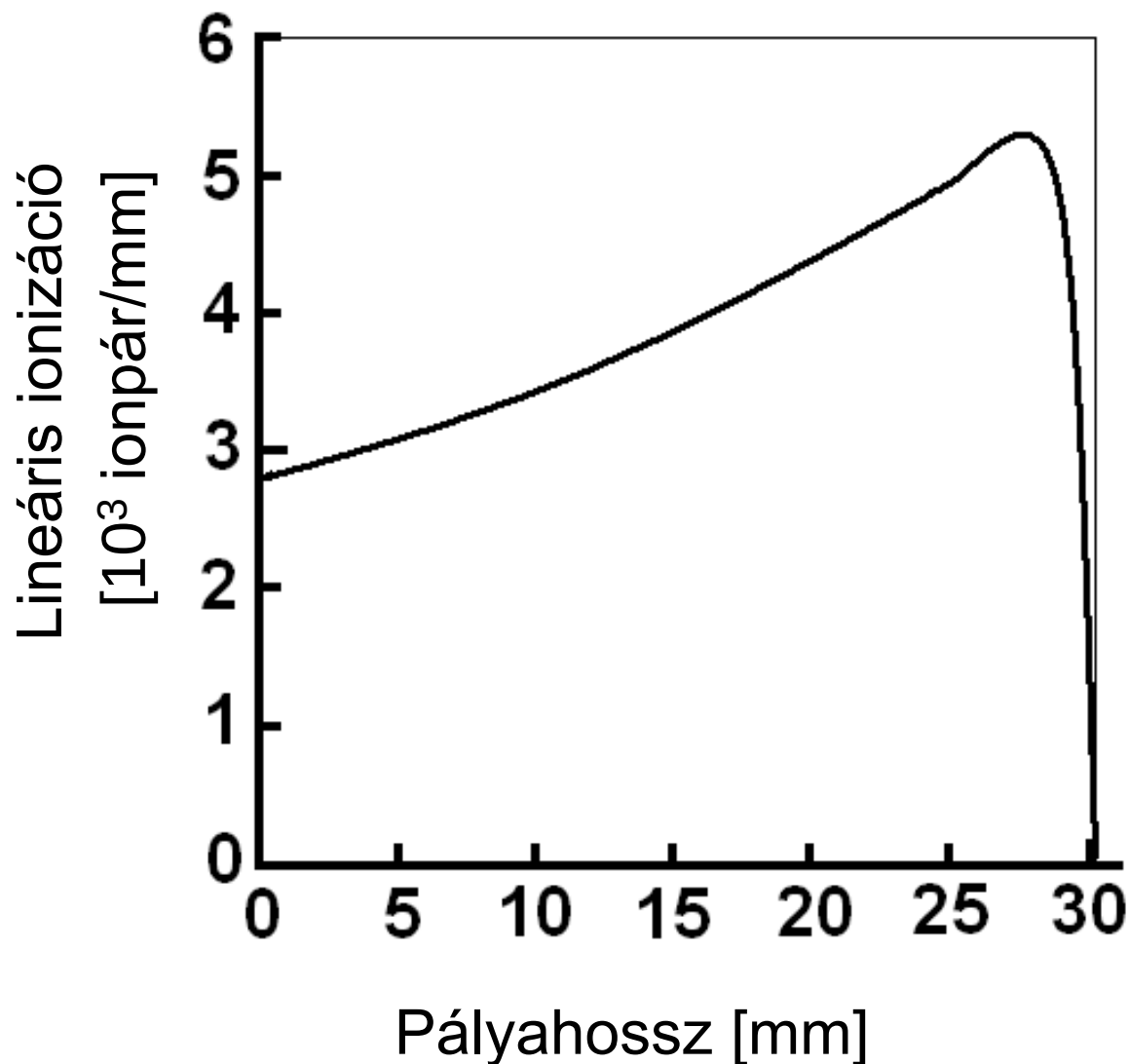
Geiger–Nuttal-szabály:

$$\ln \lambda = A + B \cdot \ln R$$

λ : bomlási állandó, R : hatótávolság, B : konstans és értéke **ugyanaz** mindhárom természetes radioaktív bomlási sorozatra (családra) és A : konstans, de minden radioaktív sorozatra **más és más** értékű.

α -részecske energiája (MeV)	Hatótávolság		
	Levegő (cm)	Alumínium (μm)	Biológiai szövet (μm)
4	2,5	16	31
7	5,9	38	72
10	10,6	69	130

α -részecskék ionizálóképessége levegőben



Lineáris ionizálóképesség: a keltett ionpárok száma a befutott pályahosszra vonatkoztatva.

Az α -részecskék ionizálóképessége erősen növekszik a pályájuk vége felé haladva (esetünkben 30 mm-nél), majd utána meredeken letörik.

Bragg-effektus: a lineáris ionizálóképesség növekszik a részecske csökkenő sebességével.

β -sugárzás

$$0,1 \text{ MeV} < E < 14 \text{ MeV}$$

A β -sugárzás hatótávolsága nagyobb, mint az ugyanolyan energiájú α -részecske hatótávolsága.

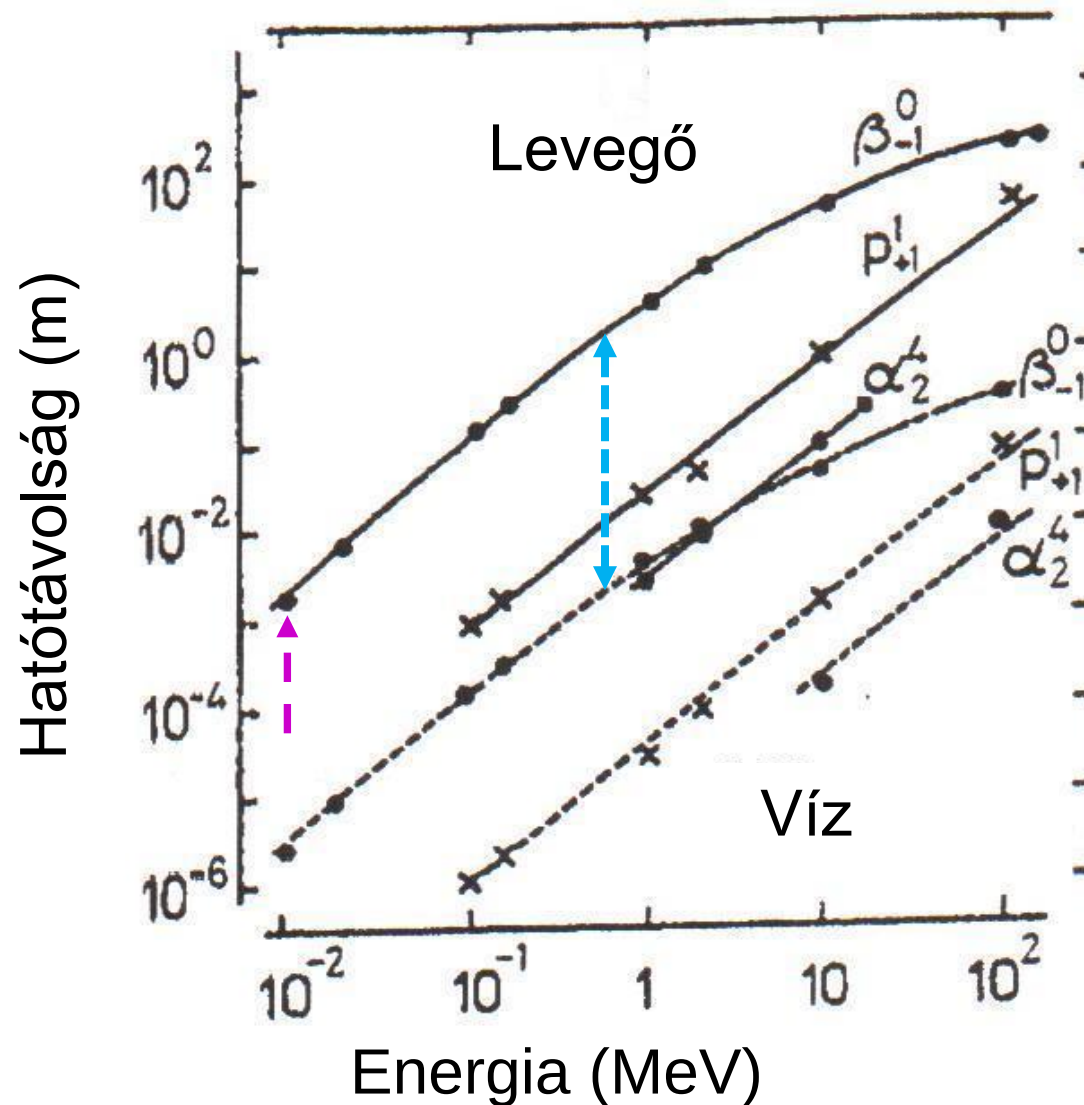
β -részecske energiája (MeV)	Hatótávolság		
	Levegő (m)	Alumínium (mm)	Víz (mm)
1	3,7	2,2	5,1
5	17,5	10,1	25,2
10	39,4	19	50,2

Az anyaggal való kölcsönhatás mechanizmusa vagy

- rugalmas szórás és/vagy
- rugalmatlan szórás: atomok gerjesztése és ionizációja + fékezési sugárzás.

A β -sugárzás energiavesztésének az abszorbeáló anyag rétegvastagságától való függését széles tartományban a Beer-törvény szerinti exponenciális függés írja le.

α -, β - és p -sugarak hatótávolságai levegőben és vízben



Szinte minden részecskére és energiára a hatótávolság kb. 3 nagyságrenddel kisebb vízben, mint levegőben.

A kis energiájú (10 keV) alfa-sugárzás hatótávolsága levegőben mm nagyságrendű.

Protonsugárzás: Bragg-csúcs, hadronterápia

LET (lineáris
energiatranszfer)

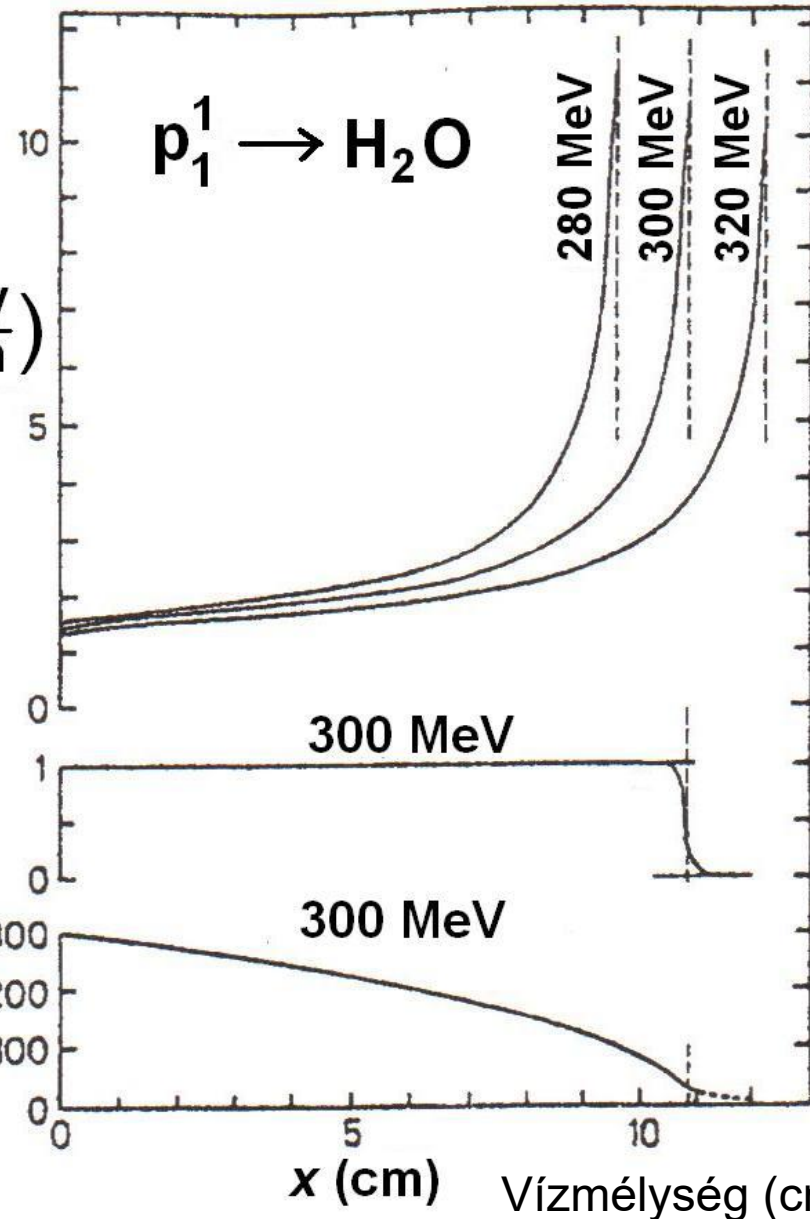
$$-\frac{dE}{dx} \left(\frac{\text{keV}}{\mu\text{m}} \right)$$

Protonszám (normált)

n

Protonenergia

E (MeV)



A vízbe érkező nagy energiájú proton az energiájának nagy részét nem a felületen, hanem a mélyebb vízrétegekben adja le.

Minél nagyobb a proton energiája, annál mélyebb rétegben adja le az energiájának meghatározó részét.

A protonszám ebben a rétegben nagyon élesen csökken.

Ezzel szemben a protonenergia csökkenése sokkal kevésbé meredek.

KÖSZÖNÖM

A HALLGATÓSÁG FIGYELMÉT ÉS

MOLNÁR DÁNIEL ALAPOS LEKTORI MUNKÁJÁT

***JELLEN TANANYAG
A SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEMEN KÉSZÜLT
AZ EURÓPAI UNIÓ TÁMOGATÁSÁVAL.
PROJEKT AZONOSÍTÓ: EFOP-3.4.3-16-2016-00014***

SZÉCHENYI 



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE