

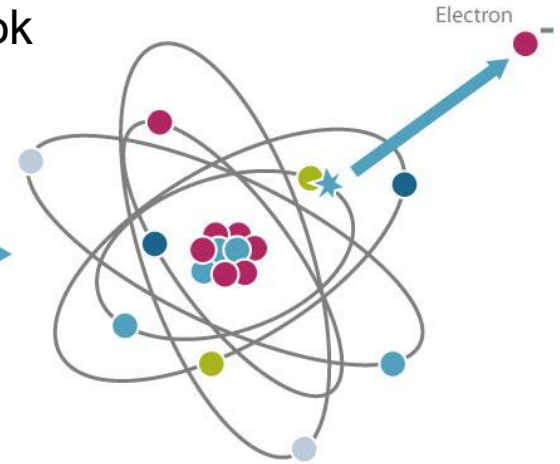
Diagnosztikai képalkotó eljárások fizikai alapjai GEFIT303B

7. előadás: Az ionizáló sugárzások
kölcshatása anyaggal

ionizáló sugárzás: ionizálja az anyagokat és ionpárok keletkeznek

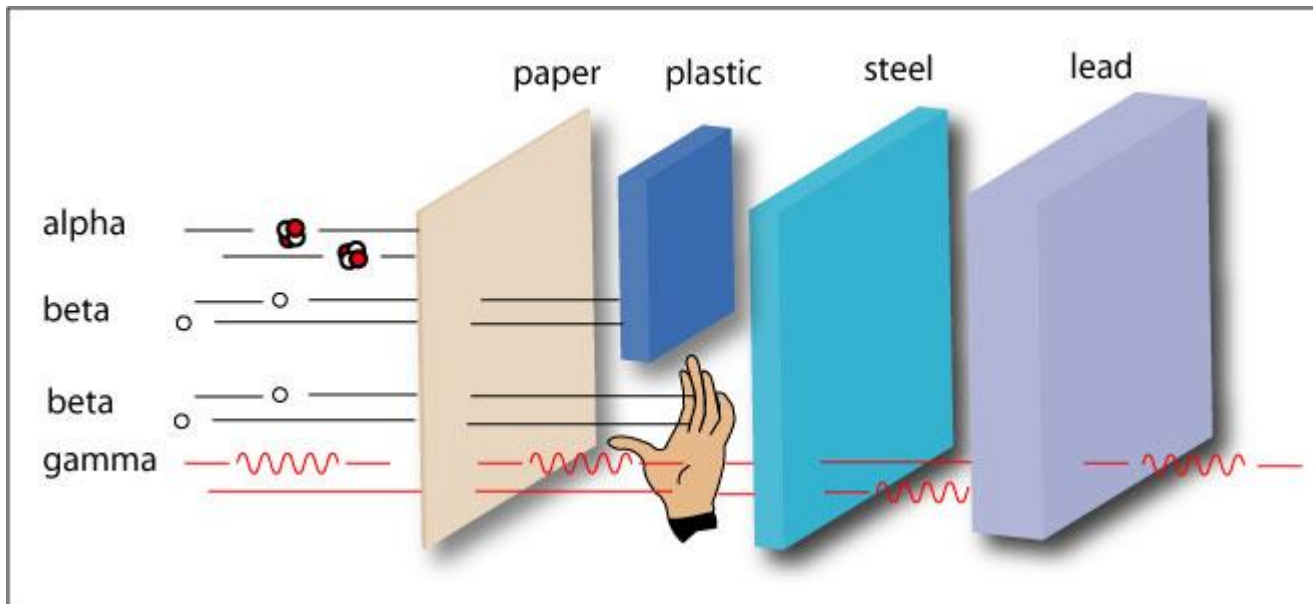
Ionizáció: *atom* → *pozitív ion* + *elektron* (ion+ és e-)

Fordítottja a rekombináció: *ion+* és *e-* → *atom*



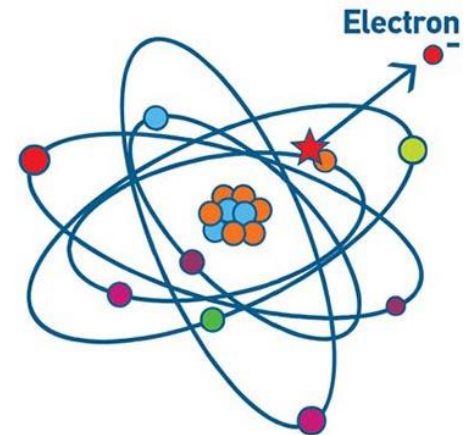
pl.: levegőben 1 ionpár keltéséhez szükséges energia ~34eV pl.: $E_{\alpha} = 6 \text{ MeV}$

$N_{\text{ion}} = 6000000/34 \approx 176000$ ionpár



Áttekintés

- Egy ionizáló részecske kölcsönhathat az egész atommal, vagy annak egy részével, tehát egy elektronnal vagy az atommaggal.
- Az egész atommal általában akkor hathat kölcsön, ha a hullámhossza összemérhető az atom méretével. Az alfa részecske hullámhossza ehhez túl kicsi.
- A kötött elektronnal az ütközés rugalmatlan lehet és gerjesztésre vagy ionizációra vezet.
- A kicsi atommagot (szinte) lehetetlen eltalálni, de a Coulomb-terében eltérülhet a töltött részecske.
- Ha egy részecske többféle kölcsönhatásban is részt vehet, akkor a véletlenül múlik, hogy az atommal éppen hogyan fog. Ezek valószínűsége azonban pontosan kiszámítható.



Nehéz töltött részecskék (pl. α -sugárzás) kölcshatása



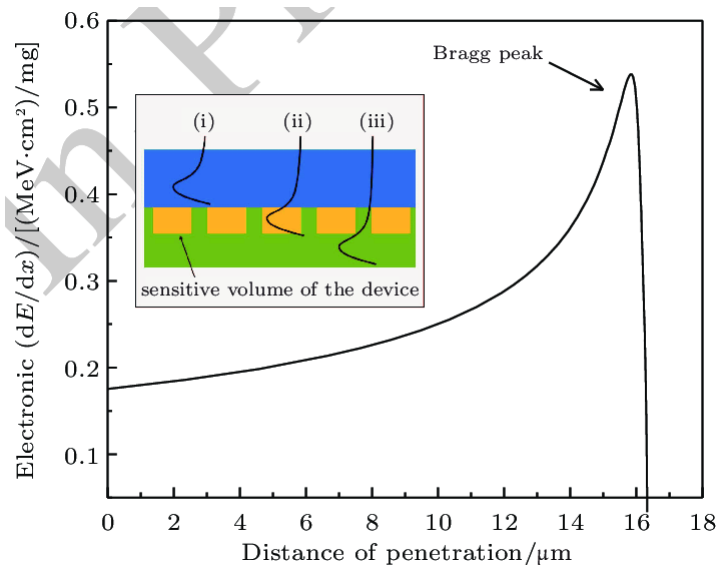
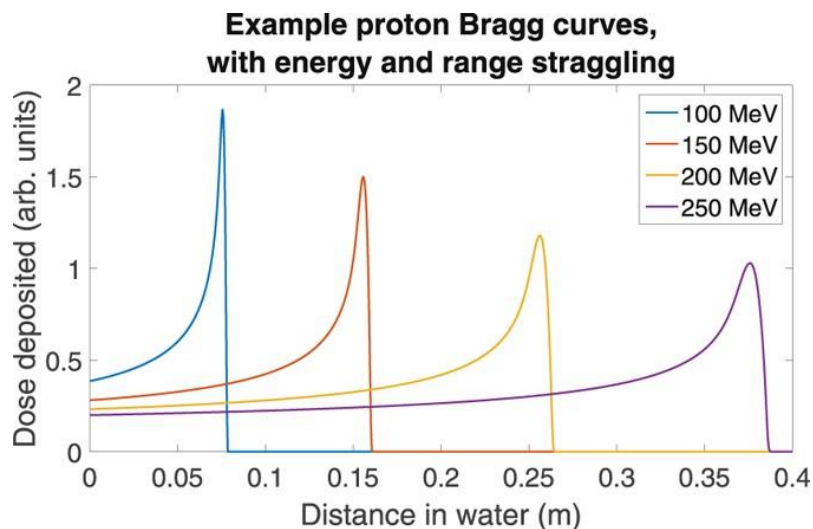
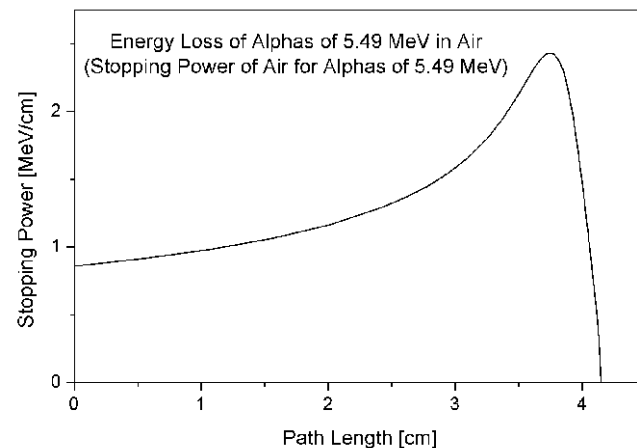
Az **alfa-részecskék** rövid, vastag, egyenes nyomot hagynak a ködkamrában. A teljes energiájukat (5-7 MeV) néhány cm-en adják le, eltérülésük ritka jelenség.

- az elektronokkal való rugalmatlan ütközés dominál (gerjesztés és ionizáció)
- egy ütközés során kevés energiát veszít és kevésbé térül el (nagy tömeg ütközik kicsi tömeggel) → egyenes vonalú lassuló mozgás
- igen sok ütközés kell, hogy elveszítse teljes energiáját
- ugyanolyan energiájú α részecske ugyanolyan közegben, mindig kb. ugyanolyan távolságra jut el
- a **hatótáv** (R: range) határozott

A Bragg-görbe

A nehéz töltött részecske a közegben történő lassulása során egységnyi hosszon egyre több energiát ad le. Ezt a hullámtermészettel a legegyszerűbb magyarázni.

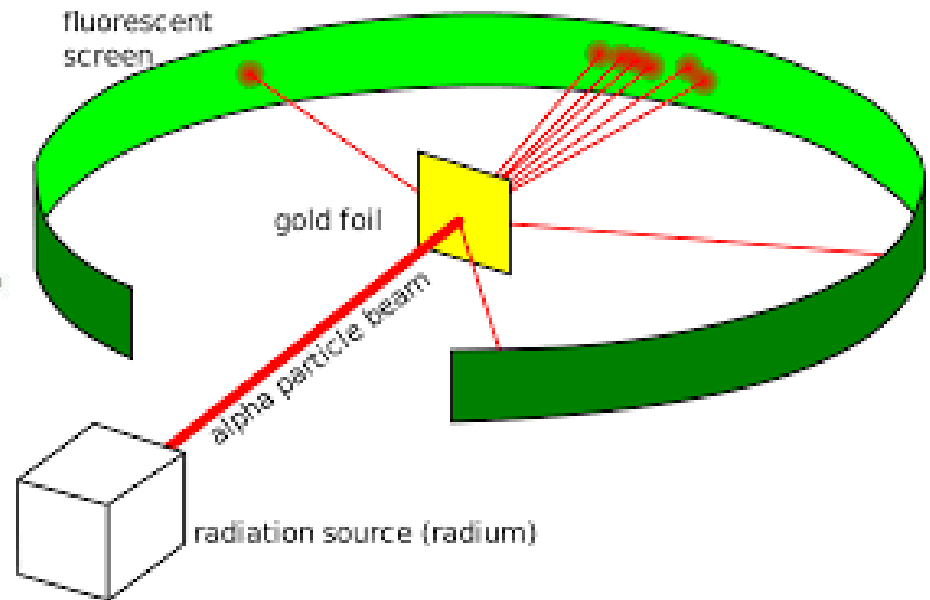
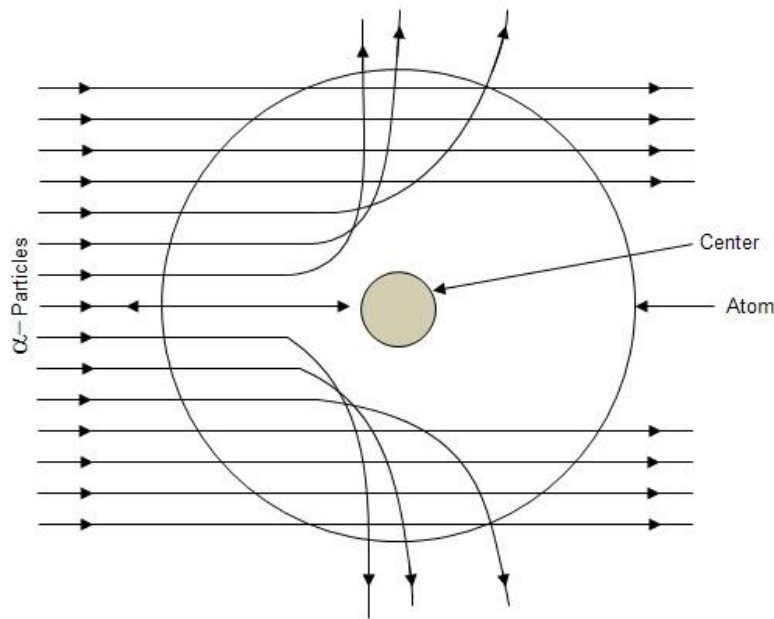
Ott roncsol legjobban, ahol megáll. Ennek a mélységét a kezdeti ionenergiával be lehet állítani.



A Rutherford-szórás

A Rutherford-szórás az alfa-részecskék atommagon történő szóródást jelenti. Ehhez az alfa-részecskének az atommaghoz közel kell elhaladnia ($\sim 10^{-13}$ - 10^{-14} m).

De ez viszonylag ritkán következik be, mert az atommagok messzebb vannak egymástól ($\sim 10^{-9}$ - 10^{-10} m).



Könnyű töltött részecskék (pl. β -sugárzás) kölcsonhatása



A **béta-részecskék** (elektronok) nyoma vékonyabb és hosszabb. A kis elektronok a lefékeződésük során gyakran el is térülnek.

Dominál itt is a rugalmatlan ütközés atomi elektronnal

- nincs pontos hatótávolsága a β részecskéknek
- igen sok energiát is veszthet egy ütközésben (mert közel egyforma tömegek ütköznek)
- nagyon eltérülhet (ua.)

De itt lehet rugalmas ütközés az atommal (nincs energia veszteség)

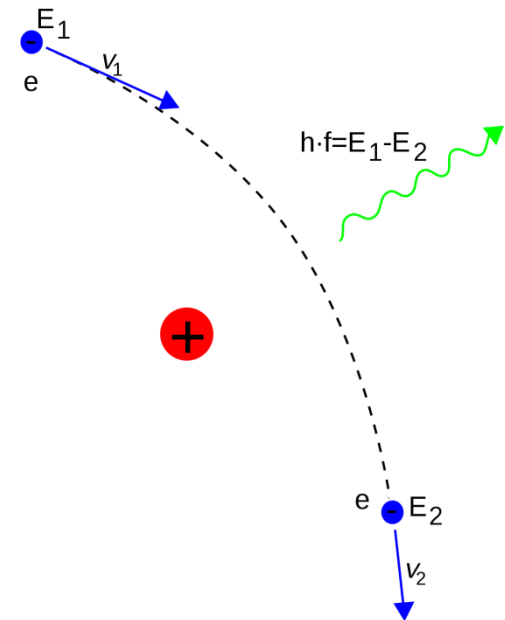
- ez felel az irányszórásért (akár visszaszórás is lehet)

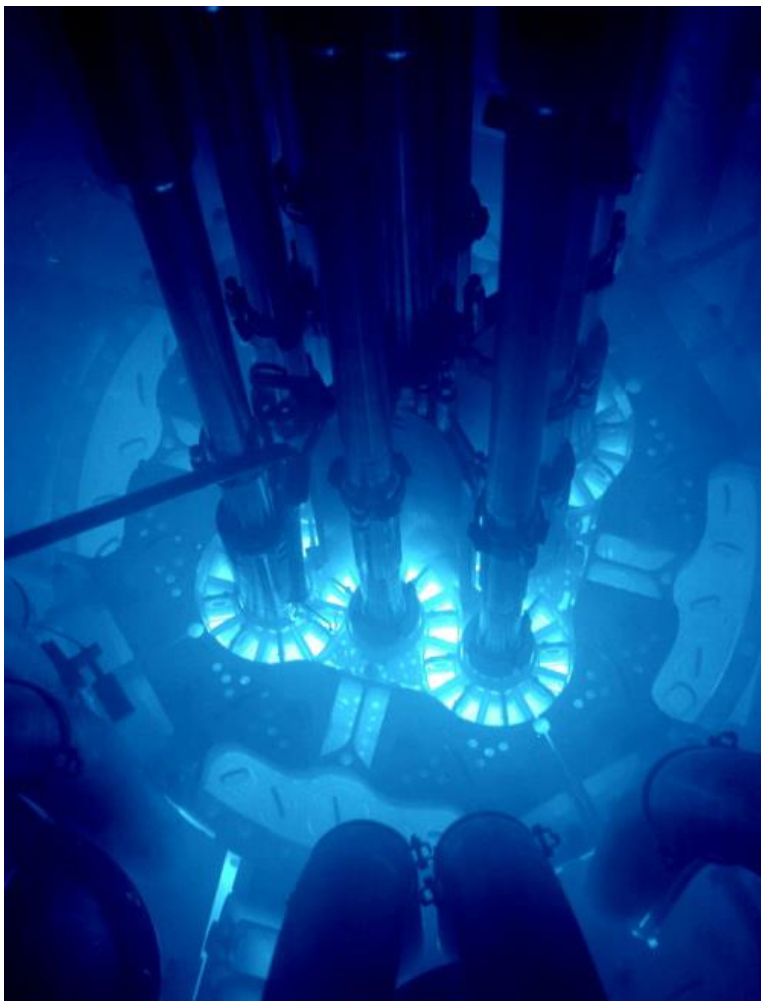
Fékezési röntgensugárzás

A béta-részecske ütközhet az atommaggal is, ez mindenképpen rugalmatlan ütközés lesz. Ugyanis az atommag terében eltérülő elektronnak gyorsulása lesz, a gyorsuló töltés viszont elektromágneses sugárzást bocsájt ki - ez a fékezési röntgensugárzás. Az energia-veszteség ugyanis a béta-részecske lassulását jelenti. Nagyobb tömegű részecskék kevésbé lassulnak, ezért sokkal kisebb fékezési röntgensugárzást bocsájtanak ki.

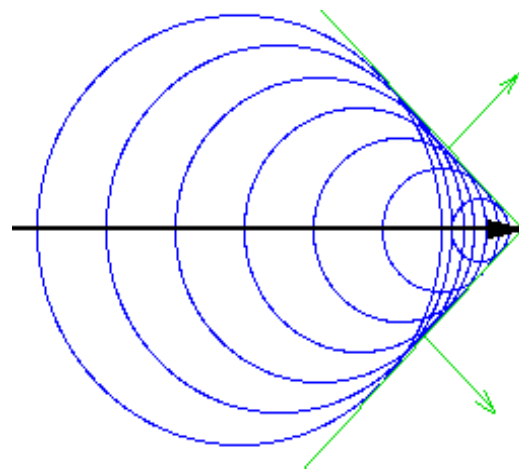
Kb. 80 évig csak így tudtak rtg. sugárzást kelteni. Elég rossz hatásfokú módszer, de nagy energián és nagy rendszámú anód esetén javul a helyzet.

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{sugárzási}}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ionozációs}}} \sim Z * E$$





Cserenkov-sugárzás



A részecske sebessége kisebb a fény vákuumbeli sebességénél, de gyorsabb a adott anyagbeli fénysebességnél.

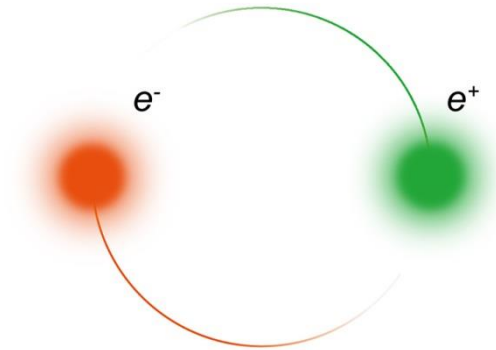
Olyan az esemény, mint mikor a repülő a hangsebességnél gyorsabban megy az égen, de nem ott van ahonnan a hangot halljuk, mert a hang lassabban jut el hozzánk, mint a fény. Csak akkor fogjuk hallani, mikor a „hangkúp” elér hozzánk.

Pozitron annihiláció

A fentiek mind az elektrorra (e^-), mind az antirészecskéjére a pozitronra (e^+) igazak, de a pozitronnal a megállása után más is történik.

A lelassult pozitron egy közegbeli elektronnal kötött rendszert alkot, ez a **pozitrónium**.

(Mint a H-atom, de az atommag helyett pozitron van.)



A pozitron igen gyorsan alapállapotba kerül, az egy helyen lévő elektron-pozitron pár pedig gamma sugárzás kibocsájtása közben **megsemmisül** (annihiláció). Ez igen gyorsan, általában ns-on belül bekövetkezik.

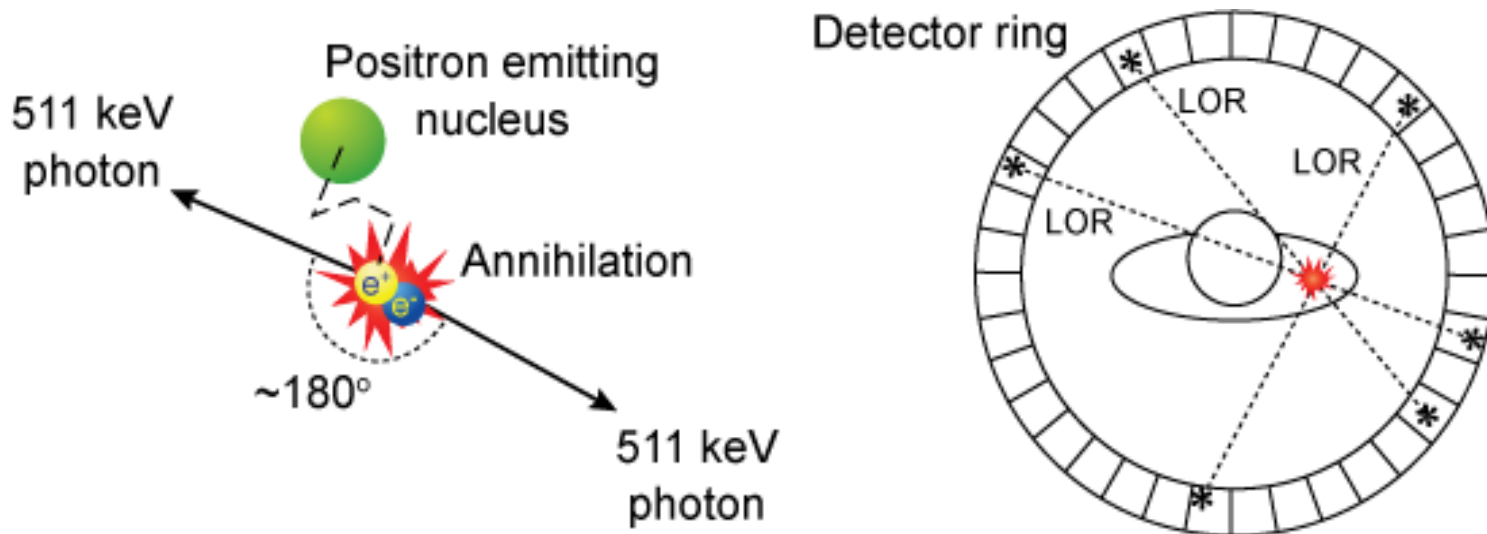
Tipikusan **2 darab γ foton** (gamma foton) keletkezik ($e^- + e^+ \rightarrow 2 \gamma$), ezek lendület összegének zérusnak kell lennie (mivel a pozitrónium is álló volt). Ez csak úgy lehetséges, ha a két foton lendületnagysága (és így energiája is) megegyezik és ellentétes irányba (tehát **180°-os szögben**) emittálódnak.

Pozitron annihiláció/2

A két foton energia összege az elektron-pozitron pár nyugalmi energiájával egyenlő (a tömeg-energia ekvivalencia): $2E_\gamma = 2m_0c^2$

Az adatok behelyettesítése után azt kapjuk, hogy $E_\gamma = 511\text{keV}$.

Tehát a pozitronok megsemmisülését **511 keV-es gamma sugárzás** jelzi, ezek a fotonok párban keletkeznek és **egy egyenes mentén** (180° -os szögben) **emittálódnak**. $m_0(e^-) = m_0(e^+) = 511\text{keV}/c^2$

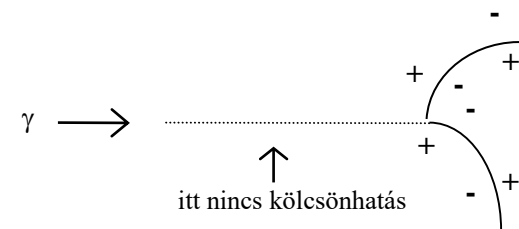
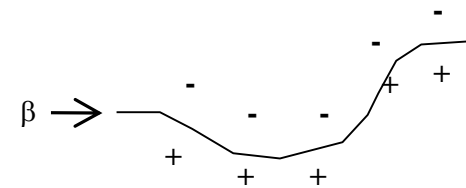
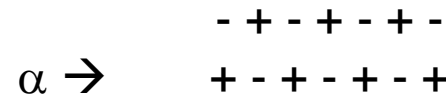


A **PET** (pozitron emissziós tomográfia) ezen az effektuson alapul. Meghatározható az adott szövetbe bejutó β^+ -bomló izotóp eloszlása.

γ -sugárzás és anyag kölcsönhatása (beleértve a röntgent is)

Kölcsönhatása alapvetően különbözik az α és a β sugárzás kölcsönhatásától, mert a γ sugárzás pályája mentén nem keletkeznek ionok, hanem egy ideig halad az anyagban kölcsönhatás nélkül, majd az anyag egy pontján kölcsönhat (vagy akár kölcsönhatás nélkül keresztülmegy az anyagon).

- ha egy α sugárzás belép az anyagba, sűrűn lesznek ionpárok (mikrométerenként több ezer)
- ha egy β sugárzás belép az anyagba, ritkán, és görbe vonalon lesznek ionpárok
- ha egy γ sugárzás belép az anyagba, egy pontig semmi nem történik, majd egy ponton kölcsönhat, úgy akár úgy is átmehet rajta, hogy nem hat kölcsön



A γ -sugárzás és anyag kölcsönhatásának 3 módja

1. **fotoeffektus** : a γ részecske energiája átadódik egy atombeli elektronnak
foton + atom \rightarrow elektron + ion $(h\nu = E_k + \frac{1}{2}mv^2)$

2. **Compton szórás** : foton az atombeli elektronnal hat kölcsön

foton + $e^- \rightarrow$ szórt foton + megkötött elektron

$\Delta\lambda = \Lambda_C (1 - \cos\theta)$ Λ_C az elektron Compton-hullámhossza

ha $\theta = 0^\circ \Rightarrow \Delta\lambda = 0 \rightarrow$ nem ad energiát az elektronnak

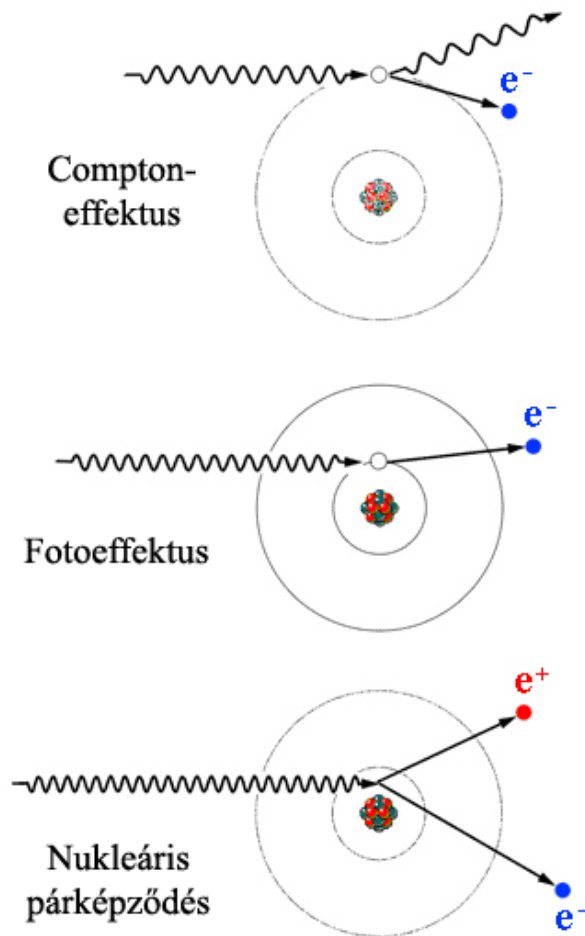
ha $\theta = 180^\circ \Rightarrow \Delta\lambda = 2\Lambda_C \rightarrow$ ekkor a legnagyobb az energia átadás

3. **párkeltés**: atommaggal való kölcsönhatás

foton + atommag $\rightarrow e^- + e^+ +$ meglökött atommag

- a meglökött atommag viszi a foton nagy lendületét

csak egy küszöb-energia felett mehet végbe, mert a fotonnak fedeznie kell az e^- és a e^+ nyugalmi energiáját (1,022MeV). Ennél kisebb energiájú gamma foton nem képes a párkeltésre



A γ -sugárzás gyengülése anyagban

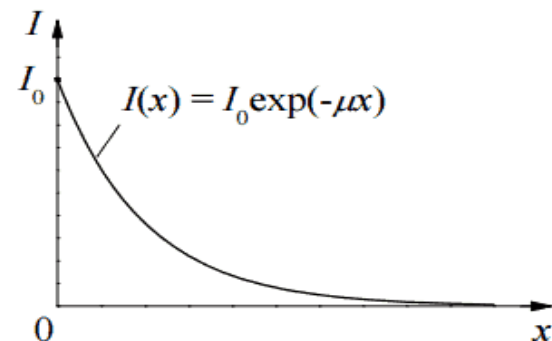
Mindhárom folyamatban egy gyors elektron viszi el a gamma foton energiájának a nagy részét (ezért lesz a β és γ sugárzás biológiai hatása nagyon hasonló).

A gamma intenzitás exponenciálisan csökken, mert a folyamat véletlenszerű

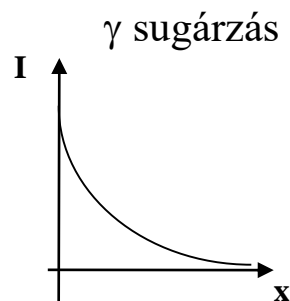
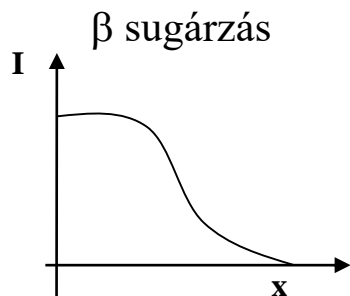
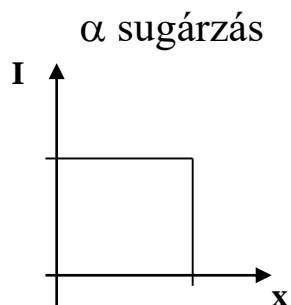
$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

- μ : gyengítési tényező

Nincs olyan vastag árnyékolás, ami az összes gamma fotontól megvédené



A 3 féle sugárzás gyengülésének összefoglalása

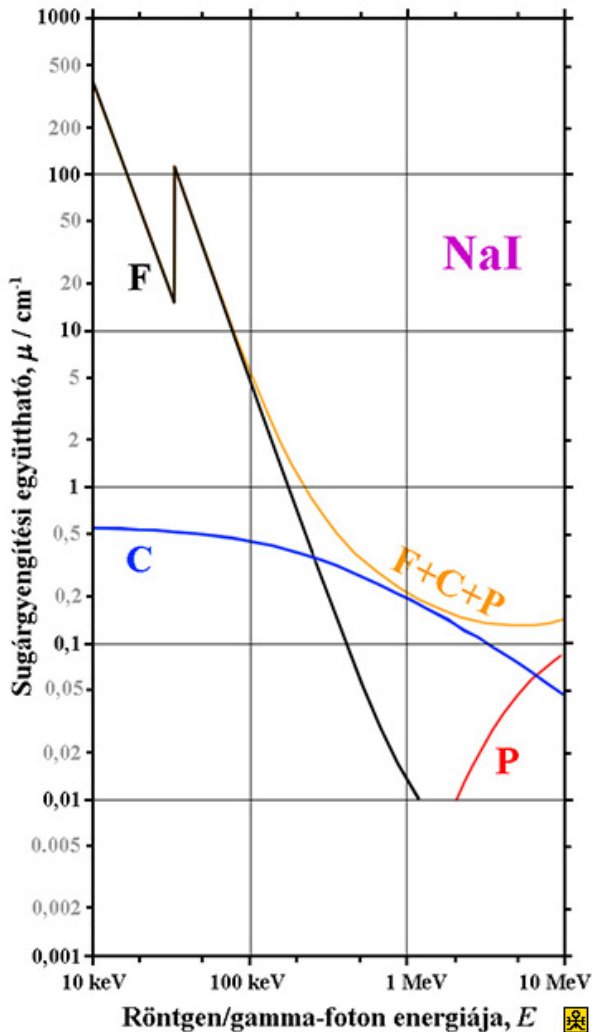


Mindegyik α részecske egy pontig jut el, addigra veszíti el a teljes energiáját, jól meghatározott hatótávolsága van

A különböző β -részecskék különböző távolságra jutnak el, de ennek van maximuma

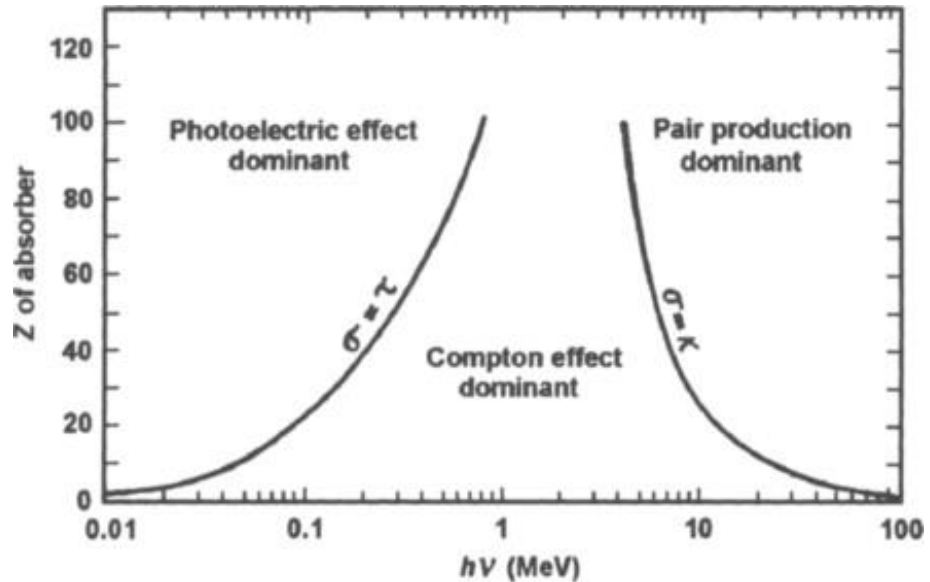
A fotonok véletlenszerűen hatnak kölcsön, exponenciálisan csökken a számuk. Nincs olyan vastag anyag, ami minden fotont elnyelne

A γ -sugárzás gyengülése anyagban/2



A gyengítési tényező 3 komponensének az összehasonlítása (F: fotoeffektus, C: Compton-szórás, P: párkeltés)

A domináns folyamatok a foton energiájának és az anyag rendszámának a függvényében



Látható, hogy a 100keV-es röntgen sugárzás a lágyszöveteken főleg Compton-szóródik, a csontokban pedig fotoeffektussal elnyelődik.

A γ -sugárzás gyengülése anyagban/3

Láttuk, hogy a gamma intenzitás anyagban befelé haladva exponenciálisan csökken:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Ahol μ a (lineáris) gyengítési tényező. A μ tényező adott anyagban (pl. gázban) nyilvánvalóan arányos a sűrűséggel.

Ha különböző anyagok lineáris gyengítési tényezőit tekintjük, akkor azt látjuk, hogy a nagyobb sűrűségű anyagok általában jobban gyengítik a gamma sugárzást.

Mindenképpen célszerű tehát a $\mu = \mu_m \cdot \rho$ átírás,

ahol ρ a sűrűség, μ_m pedig az ún. **tömeggyengítési együttható** (tömeg abszorpciós koefficiens) [m^2/kg].

A 3 féle folyamat közül kettő esetében (Compton-szórás és párkeltés) a μ_m alig függ a rendszámtól. A fotoeffektus esetében viszont μ_m erősen rendszámfüggő, közelítőleg $\mu_m \approx Z^3$.

Ezért szokás a gamma sugárzás gyengítésére nagy rendszámú anyagot használni, mert 1MeV alatt a fotoeffektus dominál.

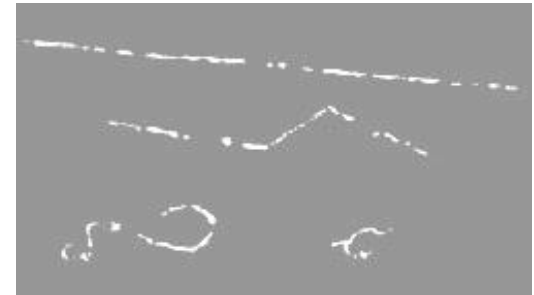
A 3 féle sugárzás nyoma a ködkamrában



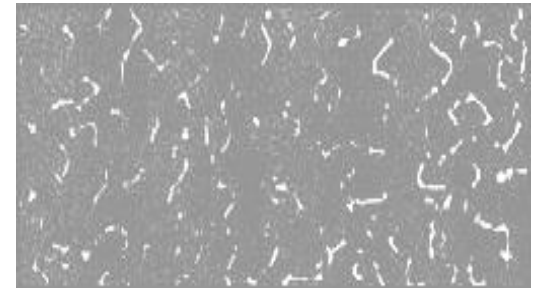
Az **alfa-részecskék** rövid, vastag, egyenes nyomot hagynak a ködkamrában. A teljes energiájukat (5-7 MeV) néhány cm-en adják le, eltérülésük ritka jelenség.



A **béta-részecskék** (elektronok) nyoma vékonyabb és hosszabb. A kis elektronok a lefékeződésük során gyakran el is térülnek.



A **gamma-fotonok** nyoma közvetlenül nem látható. Azonban bármelyik atommal kölcsönhat-hatnak a kamrában. A keletkezett foto- és Compton-elektronok a béta-részecskékhez hasonló nyomot hagynak.



Ellenőrző kérdések

A gamma sugárzás áthatolóképessége nagyobb mint a töltött részecskéké, mert a gamma foton igen kis adagokban adja le az energiáját.

- a) Az állítás igaz, de az indoklás nem
- b) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük nincs oki kapcsolat
- c) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük oki kapcsolat van
- d) Az állítás hamis, de az indoklás önmagában helyes

Adott energiájú alfa részecske adott anyagban kb. mindig ugyanakkora úton fékeződik le, mert az alfa részecske általában igen kis adagokban adja le az energiáját.

- a) Az állítás igaz, de az indoklás nem
- b) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük nincs oki kapcsolat
- c) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük oki kapcsolat van
- d) Az állítás hamis, de az indoklás önmagában helyes