

SUGÁRZÁSOK KÖLCSÖNHATÁSA AZ ANYAGGAL

KELLERMAYER MIKLÓS

SUGÁRZÁSOK FAJTÁI



A sugárzások hogyan hatnak kölcsön az anyaggal?

ELŐADÁSVÁZLAT I.

- Fény
reflexió, refrakció, szóródás, abszorpció
- Ionizáló elektromágneses sugárzások
Röntgensugárzás, γ -sugárzás
- Részecskesugárzások
 α , β , p, n, nehézionok
- Mechanizmusok
szóródás, ionizáció, fotoelektromos hatás, Compton-szórás, párkeltés, magreakció
- Kvantitatív jellemzés
mértékegységek, változók, sugárgyengítés, együttthatók, Bragg-görbe
- Orvosbiológiai alkalmazások

ELŐADÁSVÁZLAT II.

- Definíció
pl., **α -részecske**=He atommag / **Röntgen**=nagyenergiájú fotonok az elektronhéjból
- Kölcsönhatási mechanizmusok
pl., ionizáció, szóródás, magreakció / fotoelektromos hatás, Compton-szórás, párkeltés
- Energiaspektrum
pl., vonalas / vonalas vagy folytonos
- Haladási útvonal
pl., lineáris, de a teljes abszorpció előtt kanyarulatot / lineáris
- Energia/intenzitás veszteség leírása
pl., Bragg-görbe / exponenciális sugárgyengítési függvény

A SUGÁRZÁS ENERGÍÁJA I. FOTONENERGIA

Az energia a frekvenciával nő - hullámhossz csökken



Praktikus energia egység: **elektronvolt (eV)**

1 V potenciálkülönbséggel gyorsított szabad elektron energiája

$$1 \text{ eV} = q \cdot V = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ CV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- 1 TeV: egy repülő szűnyeg mozgási energiája.
- 210 MeV: egyetlen ^{239}Pu atommag hasadásakor felszabaduló energia.
- 200 MeV: egyetlen ^{235}U atom atommag hasadásakor felszabaduló energia.
- 17.6 MeV: deutérium (^2H) és trícium (^3H) fúziójakor (^4He) felszabaduló energia.
- 13.6 eV: hidrogénatom ionizációs energiája. Átlagos kötési energia: $\sim \text{eV}$ / molekula.
- 2.5 eV: kékeszöld foton (500 nm) energiája.
- 1/40 eV: termikus energia szobahőn.

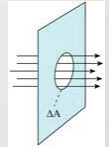
A SUGÁRZÁS ENERGÍÁJA II. ÖSSZENERGIA, ENERGIAELOSZLÁS

A kisugárzott energia *fizikai egységei*

ENERGIA
 $E \text{ [J]}$

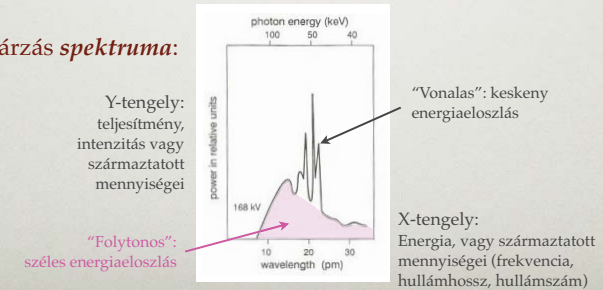
TELJESÍTMÉNY
 $P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} \right]$

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

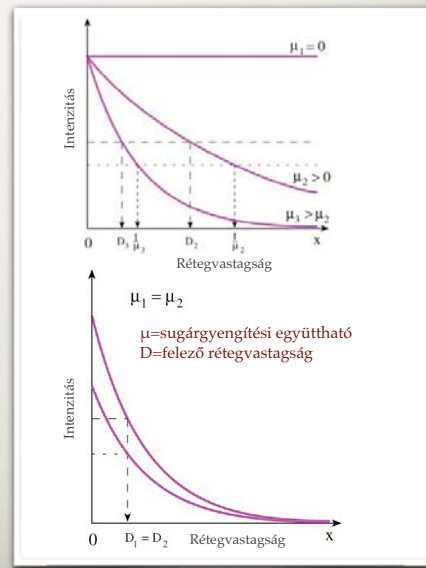
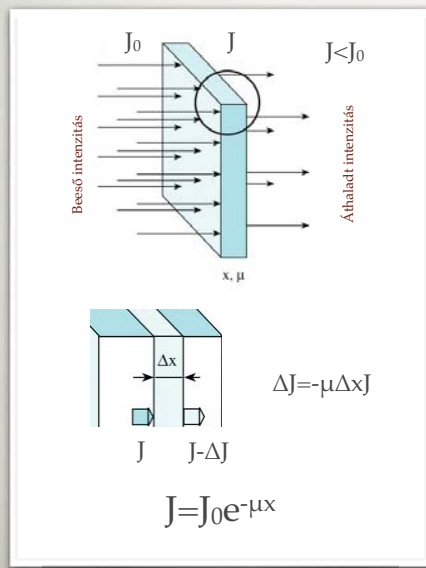


Milyen *foton energiák* járulnak a kisugárzott energiához?

Sugárzás *spektruma*:



ÁLTALÁNOS SUGÁRGYENGÍTÉSI TÖRVÉNY



FÉNY KÖLCSÖNHATÁSA AZ ANYAGGAL

Beeső nyaláb

Reflexió

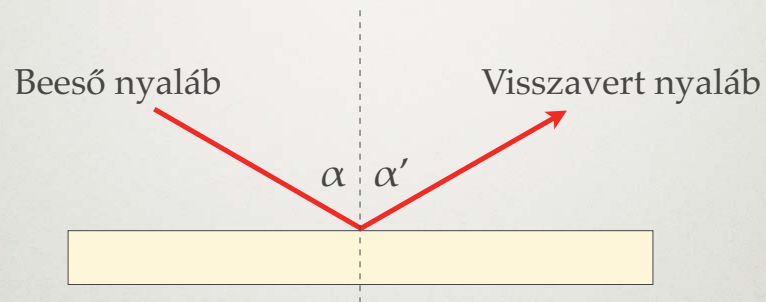
Refrakció

Szóródás

Abszorpció

Emisszió

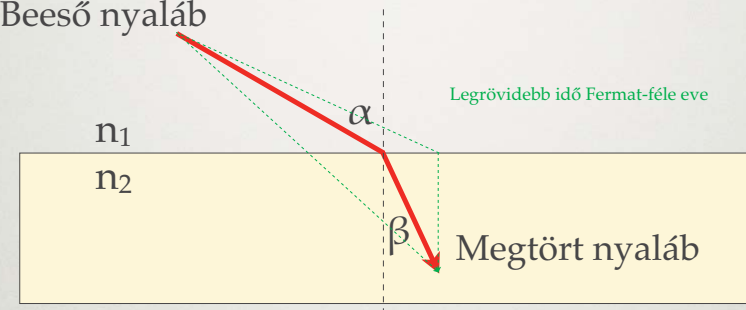
REFLEXIÓ



- Beeső és visszavert nyalábok azonos síkban.
- Beesési és visszaverődési szögek azonosak ($\alpha = \alpha'$)

FÉNYTÖRÉS

Beeső nyaláb



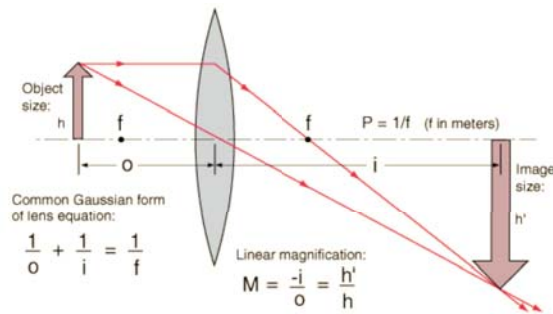
- Beeső és megtört nyalábok azonos síkban.
- Snellius-Descartes törvény:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



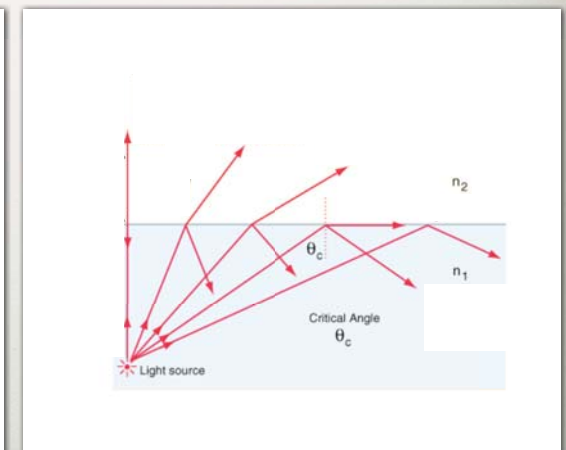
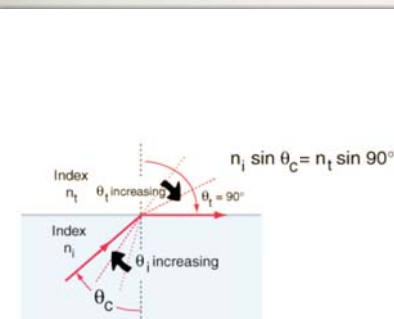
A FÉNYTÖRÉS A LENCSEMŰKÖDÉS ALAPJA

- Optikai nyaláb (sugár)
- Sugárdiagram
- Reverzibilitás elve

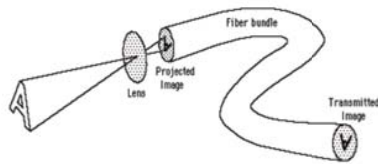
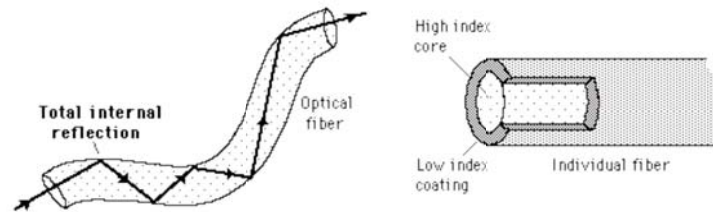


Optikai törőerő (dioptria, m^{-1}): $D = \frac{1}{f}$

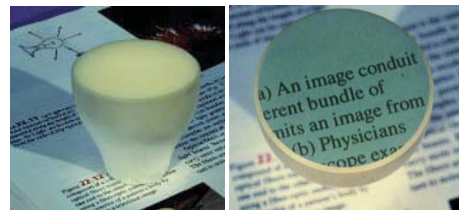
TELJES BELSŐ VISSZAVERŐDÉS



TELJES BELSŐ VISSZAVERŐDÉS ALKALMAZÁSA



•Ha az optikai rostok geometriája megtartott, akkor a köteg a képet hűen továbbítja.



ORVOSI OPTIKAI SZÁLAK: ENDOSZKÓPOK

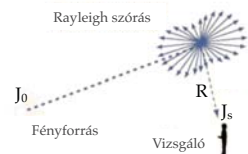
- **Arthroscopy:** diagnostic and therapeutic examination of joints (arthroscopic surgery)
- **Bronchoscopy:** examination of the trachea and bronchi
- **Colonoscopy:** examination of the colon
- **Colposcopy:** examination of the vagina and cervix
- **Cystoscopy:** examination of urinary bladder, urethra uterus, prostate. Through urethra.
- **ERCP (endoscopic retrograde cholangio-pancreatography):** delivery of X-ray contrast agent, via endoscope, into biliary tract and pancreatic duct.
- **EGD (Esophago-gastroduodenoscopy):** examination of upper GI tract (gastroscopy).
- **Laparoscopy:** examination of abdominal organs (stomach, liver, female gonads) through abdominal wall.
- **Laryngoscopy:** examination of the larynx.
- **Proctoscopy:** examination of the rectum sigmoidal colon (sigmoidoscopy, proctosigmoidoscopy)
- **Thoracoscopy:** examination of pleura, mediastinum and pericardium via chest wall.

Célok:

- diagnostics: visual inspection, biopsy, contrast agent delivery
- therapy: surgery, cauterization, removal of foreign objects



FÉNYSZÓRÁS



- Rugalmas ütközés: fotonenergia nem változik
- emisszió rezonáló diopólusok által

$$J_s = J_0 \frac{8\pi^4 N \alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2 \Theta)$$

J_s = szórt fény intenzitása
 J_0 = beeső fény intenzitása
 N = szóró részecskék száma
 α = polarizálhatóság
 λ = hullámhossz
 R = távolság a vizsgáló és szóróközeg között
 Θ = szög

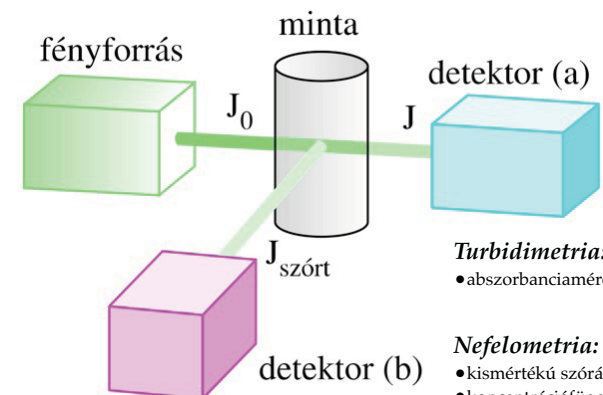


Erős hullámhosszfüggés -> rövid hullámhosszak dominálnak -> kék ég



Ha a részecskeméret nagyobb mint a hullámhossz -> összes hullámhosszon csökkent intenzitás -> szürke felhők

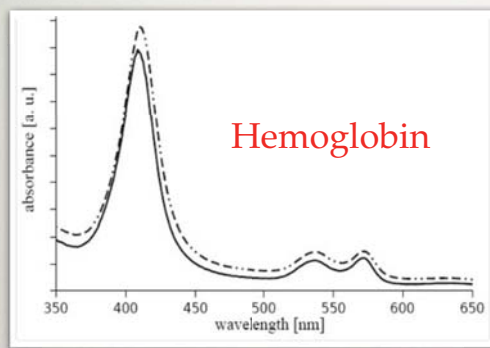
A FÉNYSZÓRÁS ORVOSI ALKALMAZÁSAI



Turbidimetria:
 • abszorbanciamérés

Nefelometria:
 • kismértékű szórás
 • koncentrációfüggés
 • immunkomplexek

FÉNYABSZORPCIÓ



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

$$\lg \frac{J_0}{J} = \mu x \lg e$$

$$\lg \frac{J_0}{J} \approx \mu$$

abszorbancia, optikai sűrűség

$$\lg \frac{J_0}{J} = \epsilon_\lambda c x$$

Lambert-Beer törvény

ϵ_λ = moláris extinkciós együttható

c = koncentráció

IONIZÁLÓ SUGÁRZÁSOK KÖLCSÖNHATÁSA AZ ANYAGGAL

Csoportosítási lehetőségek

Magsugárzások

Energia az atommagból.

pl., α , β , γ , p, n, ...

Röntgensugárzás

Energia az elektrónhéjból.

pl., röntgenfoton

Részecskesugárzás

Nyugalmi tömeg pozitív.

pl., α , β , p, n, ...

Elektromágneses sugárzás

Nyugalmi tömeg zérus.

pl., röntgen, γ

Direkt ionizáló sugárzás

Töltött részecskék.

pl., α , β , p, ...

Indirekt ionizáló sugárzás

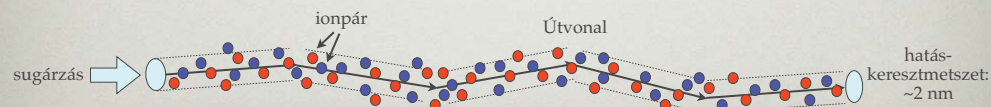
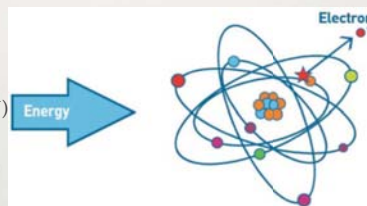
Töltés zérus.

pl., röntgen, γ , n

IONIZÁCIÓ

- Atom vagy molekula ionná konvertálása töltött részecskék eltávolításával vagy hozzáadásával (i.e., elektronok vagy ionok).
- Ionizáció során általában (pl. gáz esetében) ionpárok keletkeznek, amelyek egy szabad elektrónból és pozitív ionból állnak.

Levegőben átlagosan 34 eV (5.44×10^{-18} J = 5.44 aJ) szükséges egy ionpár keltéséhez.



IONIZÁLÓ ELEKTROMÁGNESES SUGÁRZÁSOK

• Fajtái:

Röntgensugárzás

γ -sugárzás

• Forrás:

elektrónhéj (röntgen)

atommag bomlás (γ -sugárzás)

• Energiaspektrum:

folytonos

vonalas (további információ: röntgen előadás)

• Anyaggal való kölcsönhatás mechanizmusa:

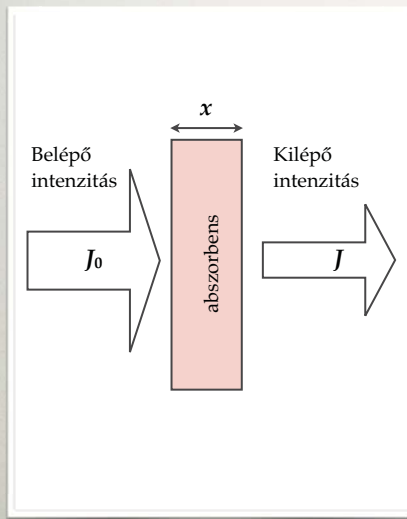
fotoelektromos hatás

Compton szórás

párkeltés

rugalmas szóródás

ÁLTALÁNOS ABSZORPCIÓS MECHANIZMUS



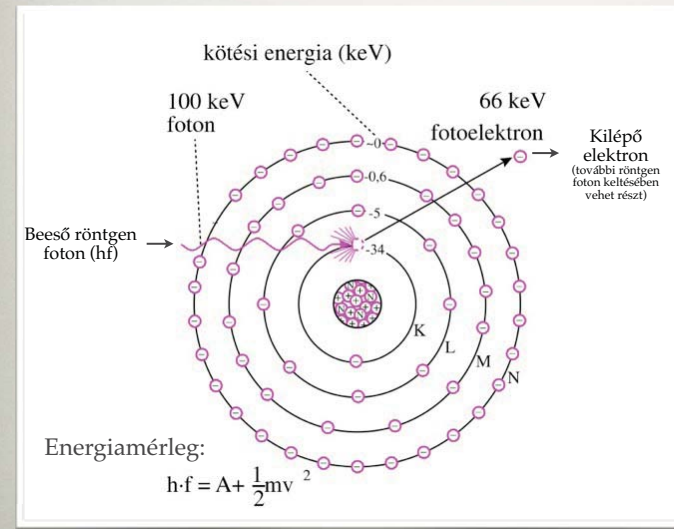
Exponenciális sugárgyengítési törvény

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

$$\mu = \mu_m \rho$$

μ = gyengítési együttható
 μ_m = tömeggyengítési együttható (cm^2/g)
 ρ = sűrűség (g/cm^3)

RÖNTGEN FOTOEFFEKTUS



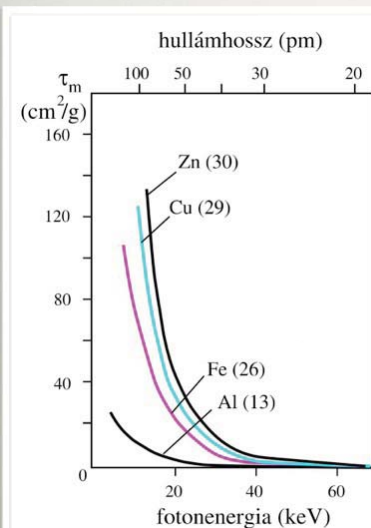
A diagnosztikai röntgenben fellépő legfontosabb hatás

Fotoeffektus gyengítési együttható:

$$\tau = \tau_m \rho$$

τ_m = fotoeffektus tömeggyengítési együttható
 ρ = sűrűség

A FOTOEFFEKTUS FÜGG A FOTONENERGIÁTÓL ÉS A RENDSZÁMTÓL



$$\tau_m = \text{const} \cdot \frac{Z^3}{\epsilon^3} = C \cdot \lambda^3 \cdot Z^3$$

$$C = 5,5-6,5 \text{ cm}^2/\text{g nm}^3$$

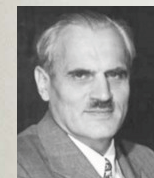
Többkomponensű rendszerben:
 "effektív rendszám" (Z_{eff})

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n w_i Z_i^3}$$

ϵ = fotonenergia
 Z = rendszám
 w = móltört
 n = komponensek száma

| Közeg | Z_{eff} |
|-------------|------------------|
| Levegő | 7.3 |
| Víz | 7.7 |
| Lágy szövet | 7.4 |
| Csontszövet | 13.8 |

COMPTON SZÓRÁS



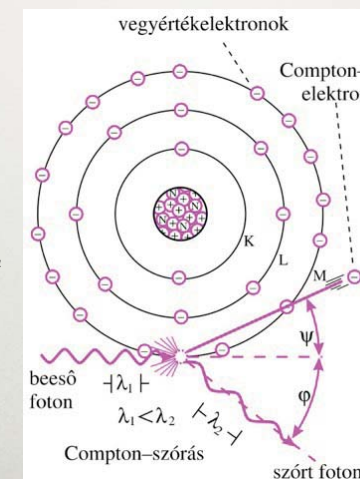
Arthur Holly Compton
 (1892-1962)

Energiamérleg:
 $hf = A + hf_{\text{scatt}} + E_{\text{kin}}$

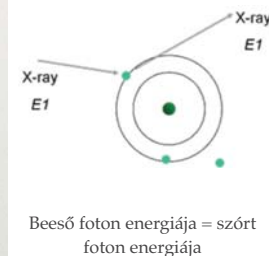
A = kötési energia
 hf_{scatt} = szórt foton energiája
 E_{kin} = Compton-elektron mozgási energiája

Compton-effektus gyengítési együttható:

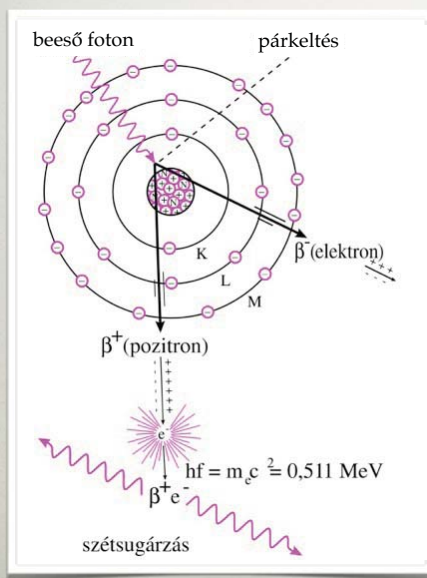
$$\sigma = \sigma_m \rho$$



De!: Rugalmas szóródás



PÁRKELTÉS



Energiamérleg:

$$hf = 2m_e c^2 + 2E_{kin}$$

m_e =elektron tömege
 c =fénysebesség

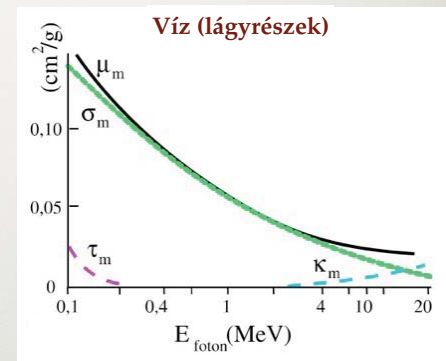
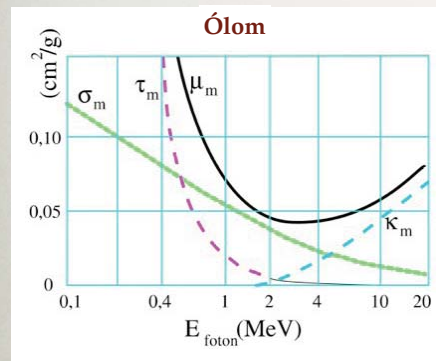
Párkeltés gyengítési
együttható:

$$\kappa = \kappa_m \rho$$

A párkeltés a nagyenergiájú
(terápiás) röntgensugárzás és a
 γ -sugárzás esetében jelentős.

SUGÁRGYENGÍTÉSI MECHANIZMUSOK

Fotonenergia és közeg hatása



$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

μ_m =tömeggyengítési együttható

σ_m =Compton-szórás tömeggyengítési együttható

τ_m =fotoeffektus tömeggyengítési együttható

κ_m =párkeltés tömeggyengítési együttható

SUGÁRGYENGÍTÉSI MECHANIZMUSOK

| Mechanizmus | μ_m változása fotonenergiával (ϵ) | μ_m változása a rendszámmal (Z) | Releváns foton- energiatartomány lágyszövetben |
|--------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| fotoeffektus | $\sim 1 / \epsilon^3$ | $\sim Z^3$ | 10 - 30 keV |
| Compton- szórás | ϵ növelésével lassan csökken | $\sim Z/A$ (A = tömegszám) | 30 keV - 20 MeV |
| párkeltés | ϵ növelésével lassan nő | $\sim Z^2$ | > 20 MeV |

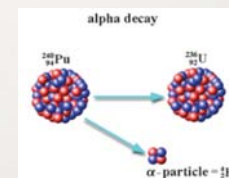
Diagnosztikai röntgen:

- lágyszövet-csont közötti kontrasztmechanizmus: fotoeffektus ($\sim Z^3$)
- lágyszövet belüli kontrasztmechanizmus: Compton-szórás ($\sim \rho$)

ÁLFA SUGÁRZÁS

Alfa részecskék: két protonból és két neutronból álló részecske (He atommag)

Keletkezése: alfa bomlás



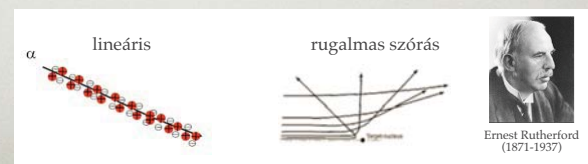
Tulajdonságok:

Elektromos töltés: $2e^+$

Kezdbőbeesség: > 1000 km/s

Mozgási energia: néhány MeV

Spektrum: vonalas



Ernest Rutherford
(1871-1937)

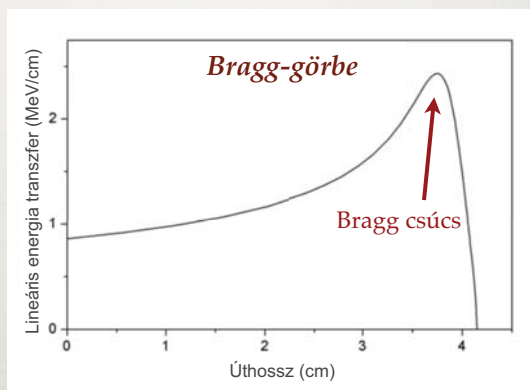
Haladási útvonal

AZALFA SUGÁRZÁS HATÁSAI: IONIZÁCIÓ

Ionizáló sugárzás energiavesztése az anyagban való haladás közben

Lineáris ionsűrűség:
egységnyi úthosszra
eső ionpárok száma
(m^{-1})

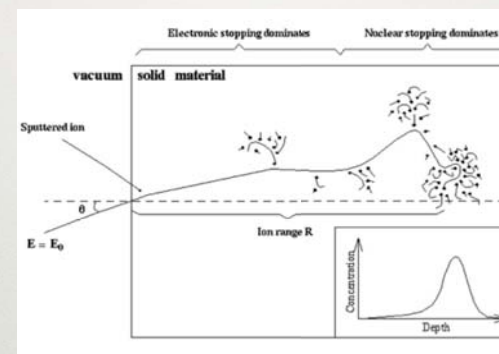
**Lineáris energia
transzfer (LET):**
egységnyi
úthosszra eső
energiavesztés
($\Delta E / \Delta x$) (eV / cm)



Hatótávolság: a részecske által megtett azon távolság, amelyen a részecske energiája a termikus energia értékére csökken.

TÖLTÖTT RÉSZECSKÉK LASSULÁSI MECHANIZMUSA AZ ANYAGBAN

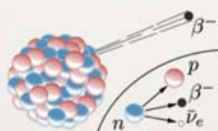
A részecske energiája fokozatosan csökken - hatáskeresztmetszet nő



Alfa-sugárzás további hatásai: karakterisztikus röntgensugárzás, szcintilláció, hőhatás, magreakció (kis valószínűséggel)

BÉTA SUGÁRZÁS

Béta részecskék: nagy energiájú, nagy sebességű elektronok (β^-) vagy pozitronok (β^+)



Keletkezése: béta bomlás

béta- bomlás: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ antineutrino: $\bar{\nu}_e$
béta+ bomlás: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ neutrino: ν_e

Tulajdonságai:

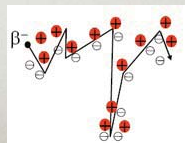
Elektromos töltés: $1e^-$ (or $1e^+$)

Lineáris ionsűrűség: 1000-szer kisebb, mint az alfaé

Spektrum: folytonos (neutrino miatt), ezért a hatótávolság változik

Haladási útvonala:

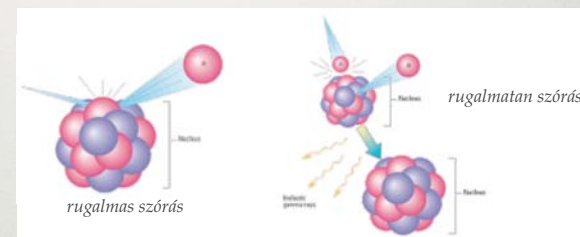
“kacsaringós” (elektrosztatikus hatások miatt)



NEUTRON SUGÁRZÁS

Neutron: szubatomi részecske (n ; n^0), nettó elektromos töltése zérus, tömege a protonénál valamivel nagyobb.

Keletkezése: bizonyos magreakciókban; bombázott atommagok gerjesztett állapotba kerülnek, majd neutron emisszióval relaxálódnak.



Hatásai:

Ionizáció: indirekt hatás.

Rugalmas szóródás

Rugalmatlan szóródás (5 MeV felett): gamma vagy alfa emissziót követő relaxáció.

Neutron befogás: termikus neutron befogódik az atommagba.

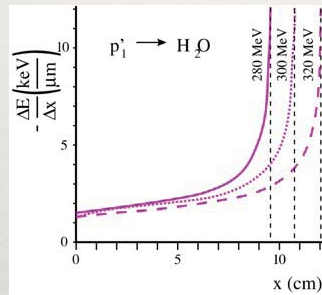
Maghasadás (>100 MeV): mag fragmentumok, neutronok, γ -sugárzás keletkezik.

PROTON SUGÁRZÁS

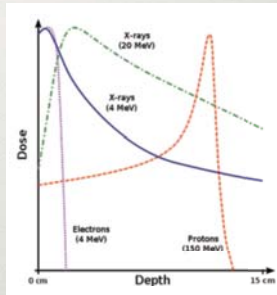
Proton: szubatomi részecske (p ; p^+), töltése $1e^+$.
Az atommag egy vagy több protont tartalmaz.

Terjedése az anyagban az alfa részecskééhez hasonló.

Bragg-görbék és Bragg csúcsok

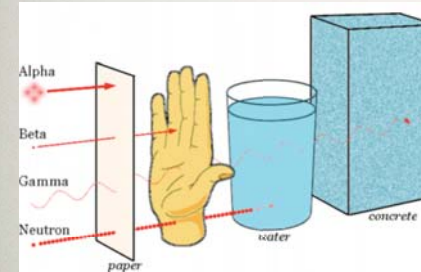


Sugárzások összehasonlításai

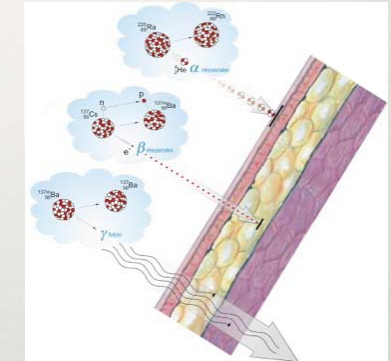
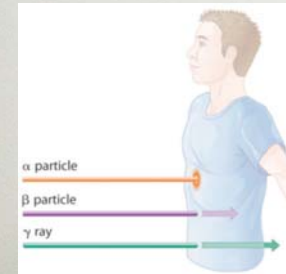


Terápiás jelentőség: mélyen fekvő tumorok terápiája
protonsugárzással

ORVOSBIOLÓGIAI JELENTŐSÉG ÉS ALKALMAZÁSOK

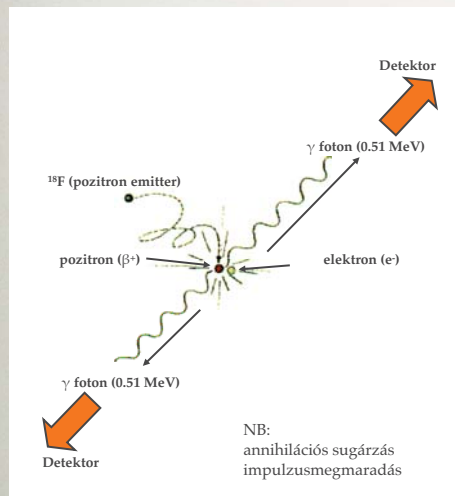


Penetrációs mélység: a sugárzás energiájától és a tömeggyengítési együtthatótól függ.

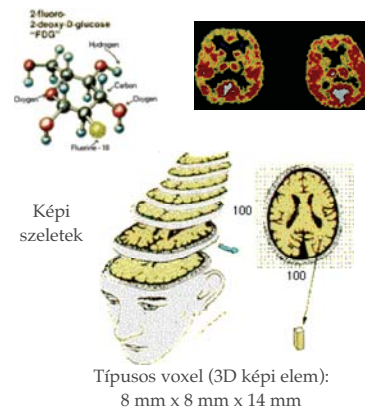


N.B.: ionizáló sugárzások elleni védekezés!

POZITRON EMISSZIÓS TOMOGRÁFIA



Agyi cukoranyagcsere vizsgálata PET-tel



SZUPERPONÁLT MRI ÉS PET KÉPSOROZAT



PET aktivitás: szemmozgatás során
Térbeli rekonstrukció