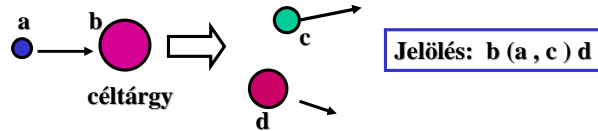


# Mag- és neutronfizika 7. előadás

## Emlékeztető:



Reakcióenergia:  $Q = (M_a + M_b - M_c - M_d) \cdot c^2$

Reakciósebesség:  $R = \phi \cdot N \cdot \sigma$  Fluxus:  $\phi$  Céltárgy atomok száma:  $N$

Mikroszkopikus hatáskeresztmetszet:  $\sigma = \frac{R}{N \cdot \phi}$  atomsűrűség

Makroszkopikus hatáskeresztmetszet:  $\Sigma = \rho \cdot \sigma$

I. additivitás:  $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_c + \sigma_f + \dots$  (több fajta reakció)

II. additivitás:  $\Sigma_t(\text{össz}) = \Sigma_t(1) + \Sigma_t(2) + \dots + \Sigma_t(N)$  (több anyag)

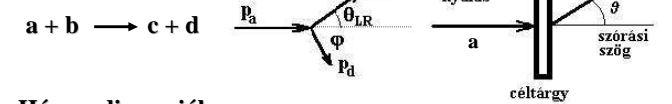
1/23

## Differenciális hatáskeresztmetszet

Hatáskeresztmetszet:  $\sigma = \frac{R}{N \cdot \phi}$  — Annak a „sebessége”, amire éppen kíváncsiak vagyunk.

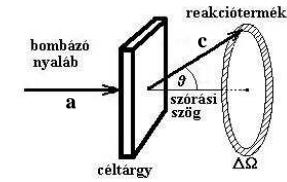
Részletekre is kíváncsiak lehetünk!

### Szögfüggés



Három dimenzióban:

Arra vagyunk „kíváncsiak”, hogy adott  $N$  és  $\phi$  mellett időegység alatt hány részecske lép ki a  $(\vartheta, \vartheta + d\vartheta)$  szögintervallum által meghatározott  $d\Omega$  térszögbe.



2/23

Kis geometriai kitérő.

Ismert:

szög (radiánban) = (ív a kör területén) /  $R$

Maximális szög =  $(2\pi R) / R = 2\pi$

Térszög = (felület a gömb felszínén) /  $R^2$

Maximális térszög =  $(4\pi R^2) / R^2 = 4\pi$

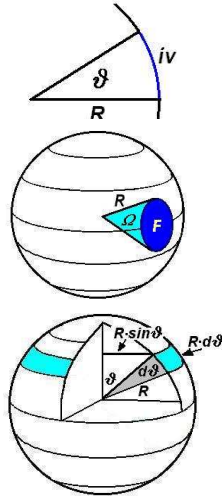
Térszög mértékegysége: szteradián

$(\vartheta, \vartheta + d\vartheta)$  közötti térszög:

Felület =  $2\pi \cdot (R \sin \vartheta) \cdot (R \cdot d\vartheta)$

Térszög:

$d\Omega = 2\pi \cdot \frac{(R \sin \vartheta) \cdot (R \cdot d\vartheta)}{R^2} = 2\pi \cdot \sin \vartheta \cdot d\vartheta$



3/23

A  $(\vartheta, \vartheta + d\vartheta)$  közötti sáv térszöge tehát:  $d\Omega = 2\pi \cdot \sin \vartheta \cdot d\vartheta$  (hengerszimmetrikus esetben)

Differenciális hatáskeresztmetszet: valamilyen paraméter szerint „szétbontott” hatáskeresztmetszet

A **térszög** szerint szétbontott:  $\frac{d\sigma}{d\Omega} = f(\vartheta)$  — A szórási szögtől függ

Természetesen az összes szögre integrálva

$\int_0^\pi \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot 2\pi \cdot \sin \vartheta \cdot d\vartheta = \sigma$  — visszkapjuk a teljes hatáskeresztmetszetet

Időnként nem a térszög szerint, hanem a **szög** szerint bontjuk szét:

$\frac{d\sigma}{d\vartheta} = 2\pi \cdot \sin \vartheta \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega}$  , mint az könnyen belátható.

4/23

**Két példa:**

**1. példa: Rutherford-szórás szögfüggése (elméletileg levezethető, pontoszerű nehéz szórócentrumon való Coulomb-szórásra)**

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \overset{\text{rendsám}}{(Ze)^2 \cdot (2e)^2} \cdot \frac{1}{16 \cdot E_{\text{kinetikus}}^2} \cdot \frac{1}{\left(\sin \frac{\vartheta}{2}\right)^4} \leftarrow \text{szögfüggés}$$

$\alpha$ -részecske mozgási energiája

Rutherford, Geiger és Marsden kiterjedt kísérletsorozatban igazolták a szögfüggést, a rendszámfüggést, és a mozgási energiától való függést is.

**Ez bizonyítja, hogy a Rutherford-szórás Coulomb-szórás!**

Érdekesség:  $\int_0^\pi \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot 2\pi \cdot \sin \vartheta \cdot d\vartheta = \infty$  **Belátni: házi feladat!**

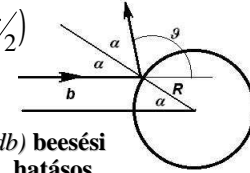
Ez amiatt van, mert a Coulomb-kölcsönhatás hatótávolsága végtelen (az erővonalak a végtelenbe nyúlnak). A teljes „hatásos” keresztmetszet tehát végtelen nagy lesz.

5/23

**2. példa: „Kemény gömbön” történő szórás szögfüggése**

Az ábra alapján:  $\vartheta = \pi - 2\alpha$  ( $\alpha \leq \pi/2$ )  
tehát  $d\vartheta = -2 \cdot d\alpha$

A „beesési paraméter”:  $b = R \cdot \sin \alpha$   
tehát  $db = R \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha$



A  $(\vartheta, \vartheta + d\vartheta)$  szögintervallumhoz  $(b, b - db)$  beesési paraméter intervallum tartozik. Ezért a „hatásos keresztmetszet”, amely ilyen szögintervallumba történő szóráshoz vezet:  $d\sigma = -2\pi \cdot b \cdot db$  (mivel  $db < 0$ )

Ide behelyettesítve az előzőeket:

$$d\sigma = -2\pi \cdot (R \cdot \sin \alpha) \cdot (R \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha) = -\pi \cdot R^2 \cdot \sin 2\alpha \cdot d\alpha$$

Térjünk át  $\alpha$ -ról  $\vartheta$ -ra:  $d\sigma = \frac{\pi \cdot R^2}{2} \sin(\pi - \vartheta) \cdot d\vartheta$

Ebből kapjuk:  $\frac{d\sigma}{d\vartheta} = \frac{\pi \cdot R^2}{2} \cdot \sin \vartheta$  **Illetve:**  $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{R^2}{4}$

Vegyük észre, hogy  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  jellemző a kölcsönhatásra!!

A teljes hatáskeresztmetszetre pedig (kiintegrálva):  $\sigma = \pi \cdot R^2$

**Hatáskeresztmetszetek energiafüggése**

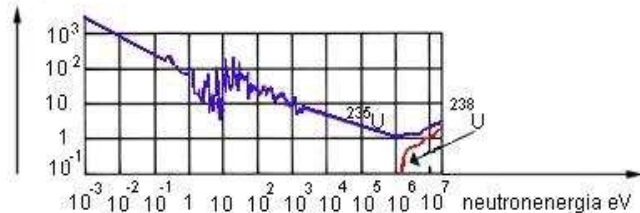
Hatáskeresztmetszet:

$$\sigma(E) = \frac{R}{N \cdot \phi(E)}$$

A fluxusban különböző energiájú részecskék lehetnek!

Különböző energiájú neutronok különböző valószínűséggel okoznak reakciót, a hatáskeresztmetszet is tehát energiafüggő lesz.

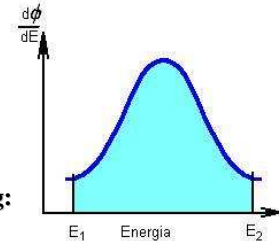
$\sigma_f$  (barn)



$^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  hasadási hatáskeresztmetszetének függése a neutronenergiától

7/23

Példa: Tegyük fel, hogy a fluxus az ábra szerint változik! Mekkora lesz a  $^{235}\text{U}(n,f)$  reakciónak a sebessége, ha a neutron energiája az  $(E_1, E_2)$  intervallumba esik?



$R = N \cdot \phi \cdot \sigma$  alapján  $dE$  energiatartományra eső reakciósebesség:

$$dR = N \cdot \frac{d\phi}{dE} \cdot \sigma(E) \cdot dE$$

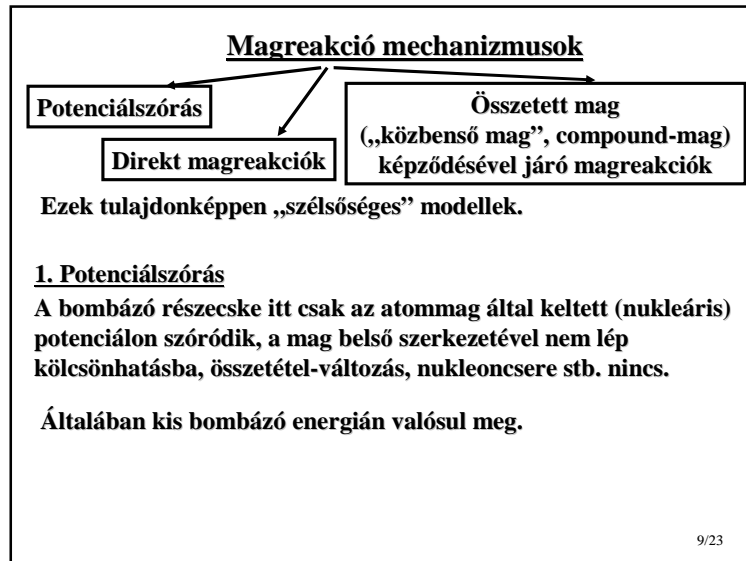
A kérdésre a választ tehát egy integrál adja meg:

$$R(E_1, E_2) = N \cdot \int_{E_1}^{E_2} \frac{d\phi}{dE} \cdot \sigma_f(E) \cdot dE$$

Ide az előző ábrán látott hatáskeresztmetszetet kell beírni

Ennek a dimenziója:  $1/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{eV})$

8/23



**2. Direkt magreakciók**

A bombázó részecske gyorsan, egy lépésben hat kölcsön az atommaggal, ill. annak valamely részével.

Mit jelent az, hogy „gyorsan”? Mihez képest?

Példa: legyen a bombázó nyaláb 10 MeV energiájú protonnyaláb

Azaz  $\frac{1}{2}mv^2 = 10 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ J}$  Ebből

$$v = \sqrt{\frac{3,2 \cdot 10^{-12}}{1,67 \cdot 10^{-27}}} = 4,4 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Egy atommag mérete  $R \sim 10^{-14} \text{ m}$ ,

a protonok „kölcsönhatási ideje” az atommaggal tehát:

$$t = \frac{2R}{v} \approx 8,8 \cdot 10^{-21} \text{ s} \sim 10^{-20} \text{ s}$$

**Ez a direkt reakciók idejének nagyságrendje.**

A direkt magreakciók során a bombázó részecske általában csak a mag egy-két nukleonjával lép kölcsönhatásba. A mag többi része tétlenül „nézi” csak az eseményeket („spectator”).

10/23

**Direkt magreakciók fontosabb típusai**

a) Knock-out reakció (kilökés)

A bombázó részecske ütközik egy nukleonnal (vagy kis nukleonsoporttal), és azt kilöki a magból

Jellemző reakciók: nagy energiájú bombázó részecskék, (n,n'), (n,p), (p,n), (p,p'), (α,n), (α,p) stb.

Jellegzetességek:

- a meglökött részecske „előre” lép ki, azaz a differenciális hatáskeresztmetszet kis szögeknél nagy, nagy szögeknél kicsiny, „előre szórás”
- a teljes **impulzus** jelentős részét kapja a kilökött részecske, a maradék mag csak kicsit lökődik meg.

11/23

b) Pick-up reakció („felcsípés”)

A bombázó részecske felcsíp egy nukleont (vagy kis nukleonsoportot), és azzal egyesülve lép ki a magból

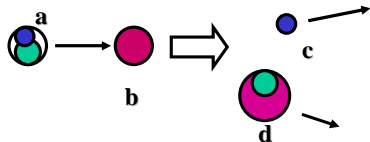
Jellemző reakciók: nagy energiájú bombázó részecskék, (n,d), (p,d), (d,<sup>6</sup>Li), (α,<sup>6</sup>Li) stb.

Jellegzetességek:

- a részecskecsoport „előre” lép ki (előre-szórás), azaz a differenciális hatáskeresztmetszet kis szögeknél nagy, nagy szögeknél kicsiny.
- a kilépő részecske sebessége ~ bejövő részecske sebessége, emiatt a kilépő részecske impulzusa nagyobb, mint a belépőé. A maradék mag csak kicsit visszafelé „lökődik meg”.

12/23

c) Stripping reakció („levetkőztetés”)



Az összetett bombázó részecskéből leszakad egy nukleon (vagy kis nukleoncsoport) az atommagon történő áthaladása közben, és csak a maradék lép ki a magból

Jellemző reakciók: nagy energiájú bombázó részecskék, (d, n), (d, p), (<sup>6</sup>Li, d), (<sup>6</sup>Li, α) stb.

Jellegzetességek:

- a maradék részecske „előre” lép ki, azaz a differenciális hatáskeresztmetszet kis szögeknél nagy, nagy szögeknél kicsiny (előre szórás).
- a kilépő részecske **sebessége** kb. akkora, mint a bombázó részecske sebessége volt, ezért az impulzusa kisebb.
- a visszalökött mag kb. akkora **impulzust** kap, amekkorát az átvett részecskecsoport képviselt a reakció előtt.

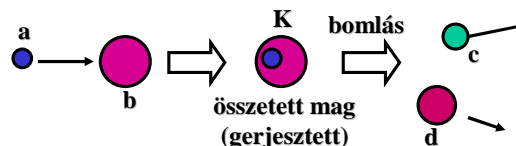
13/23

3. „Összetett mag” (compound-mag) képződésével járó magreakciók

A folyamat két, egymást követő lépésben megy végbe:

a) A bombázó részecske **beépül** az atommagba, új mag keletkezik: ez az összetett (vagy közbenső) mag. A lépés reakcióenergiája az összetett magon belül valamennyi részecskére eloszlik – „termalizálódik”. Az összetett mag **gerjesztett állapotban** keletkezik.

b) Az összetett mag a gerjesztett állapotából **elbomlik** valamelyik bomlási „csatornába”



14/23

Sajátosságai:

- A reakció ideje sokkal hosszabb, mint a direkt reakcióké ( $t > 10^{-16}$  s).
- Az összetett mag **létrejöttét** az szabja meg, hogy van-e az adott energiának megfelelő gerjesztett állapot a magban. „Rezonanciák” fellépte!
- Az energia eloszlása miatt „hőmérsékleti egyensúly” áll be (termalizáció). Emiatt az összetett mag már nem „emlékszik” arra, hogy hogyan keletkezett. Ennek több következménye van:
  - A bomláskor kilépő részecskék irányeloszlása független a bejövő részecskék irányától (**izotrop szögeloszlás** CM rendszerben)
  - A bomlás módját egyedül az összetett mag állapota határozza meg (független attól a módtól, ahogyan az összetett mag létrejött). **Elágazási arányok**

15/23

d) A reakció hatáskeresztmetszete két tényező szorzatára bontható

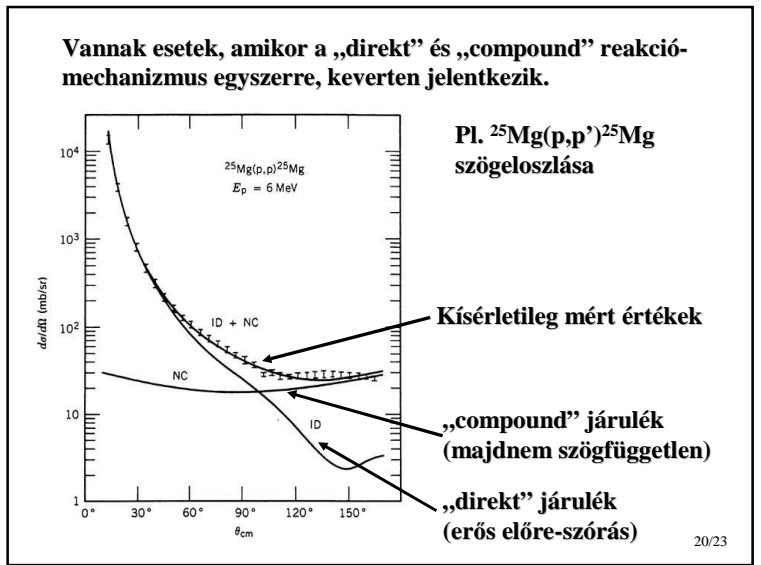
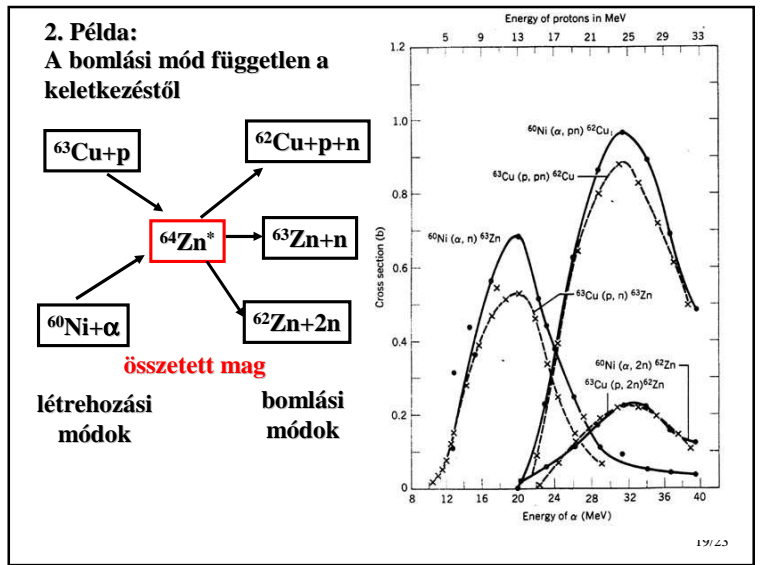
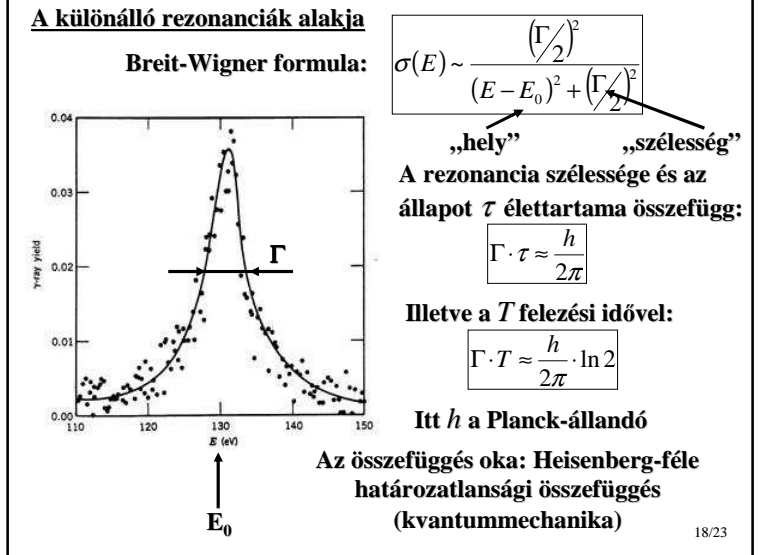
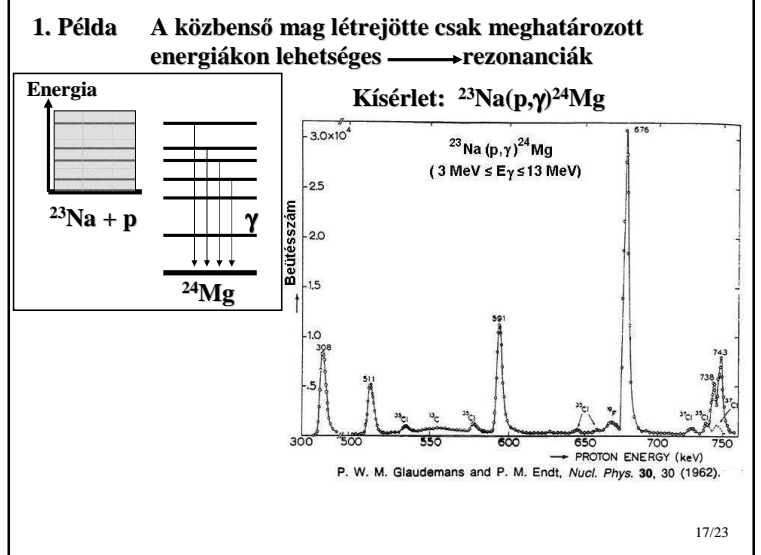
$$\sigma = \sigma_K \cdot \left( \frac{\Gamma_{cd}}{\Gamma_t} \right)$$

Itt  $\sigma_K$  az összetett mag képződésének hatáskeresztmetszete

$$\left( \frac{\Gamma_{cd}}{\Gamma_t} \right) \text{ az „elágazási arány”}$$

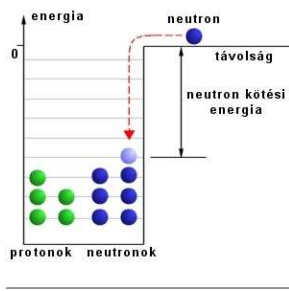
Az **elágazási arány** azt mutatja meg, hogy az összes lehetséges bomlási módból hányad részben bomlik a gerjesztett állapot a c + d részecskékre.

16/23



### Speciális neutronos reakciók hatáskeresztmetszete

#### 1) Kis energiájú neutronok befogása



Általában exoterm folyamat, mert befogáskor a neutron kötési energiája felszabadul.

A neutron semleges, ezért aktiválási energia sincs → akármilyen kis energiájú neutron is létrehozhatja

A bekövetkezés valószínűsége arányos azzal az idővel, amit a neutron a mag közelében eltölt

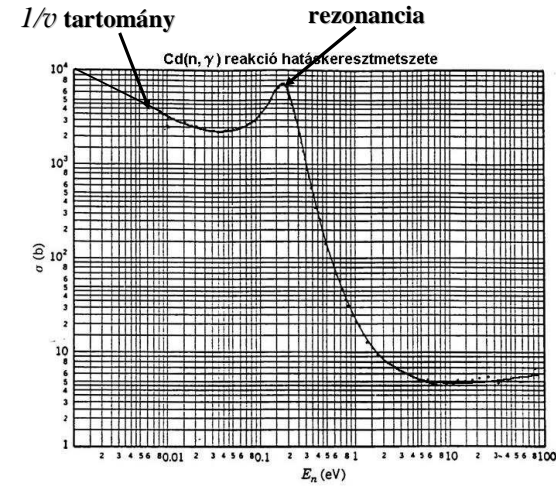
$$\sigma \sim t = \frac{2R}{v}$$

← mag sugara  
← neutron sebessége

Ez az ún.  $1/v$  hatáskeresztmetszet

21/23

### Pl. a kadmium neutronbefogási hatáskeresztmetszete $\sigma_{n,\gamma}$



Fontos n-elnyelő és árnyékoló anyag!!

22/23

### 2. Példa

#### Urán-izotópok hasadási hatáskeresztmetszete



$^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  hasadási hatáskeresztmetszetének függése a neutronenergiától

$^{238}\text{U}$ -nál energiaküszöb

23/23