

8. előadás TARTALOMJEGYZÉK

Magreakció-mechanizmusok

- Áttekintés, potenciálszórás
- **Direkt** atommag-reakciók és sajátosságai
 - Knock-out, pick-up, stripping reakciók
- **Közbenső mag** kialakulásán keresztül történő atommag-reakció (compound-mag) és sajátosságai
 - Rezonanciák kialakulásának magyarázata
 - Lehetséges energiaviszonyok
- **Speciális** hatáskeresztmetszet-típusok:
 - $1/v$, rezonanciák,
 - küszöbreakciók hatáskeresztmetszete

Az atomenergia felszabadítása

- Maghasadás
- Hasadványok tömegeloszlása
- A maghasadás energiamérlege

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

1

Magreakció mechanizmusok

Potenciálszórás

Direkt magreakciók

Összetett mag
(„közbenső mag”, compound-mag)
képződésével járó magreakciók

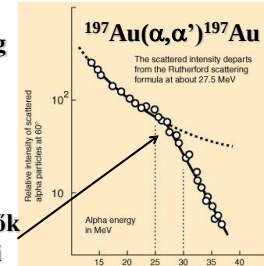
Ezek tulajdonképpen „szélsőséges” modellek.

1. Potenciálszórás

A bombázó részecske itt csak az atommag által keltett (nukleáris) potenciálon szóródik, a mag belső szerkezetével nem lép kölcsönhatásba, összetétel-változás, nukleoncsere stb. nincs.

Általában kis bombázó energián valósul meg.

Már a magerők hatását is érzi



2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

2

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

$$v = \sqrt{\frac{3,2 \cdot 10^{-12}}{1,67 \cdot 10^{-27}}} = 4,4 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Egy atommag mérete } R \sim 10^{-14} \text{ m,}$$

a protonok „kölcsönhatási ideje” az atommaggal tehát:

$$t = \frac{2R}{v} \approx 8,8 \cdot 10^{-21} \text{ s} \sim 10^{-20} \text{ s} \quad \text{Ez a direkt reakciók idejének nagyságrendje.}$$

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”).

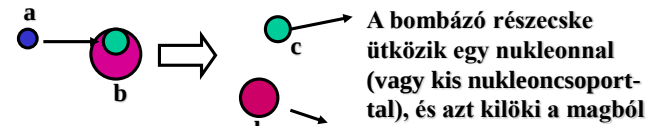
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

3

Direkt magreakciók fontosabb típusai

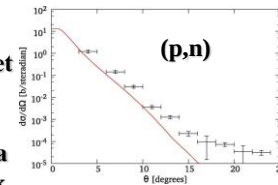
a) Knock-out reakció (kilökés)



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

Jellegetességek:

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

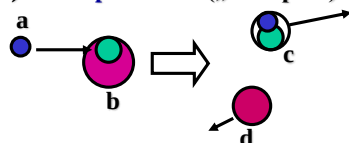


2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

4

b) Pick-up reakció („felcsípés”)

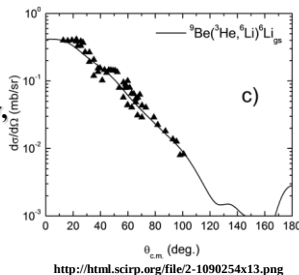


A bombázó részecske felcsíp egy nukleont (vagy kis nukleoncsoportot), és azzal egyesülve lép ki a magból

Jellemző reakciók: nagy energiájú bombázó részecskék, (n,d), (p,d), (d,⁶Li), (³He,⁶Li), (α,⁶Li) 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 lendülete nagyobb, mint a belépőé.

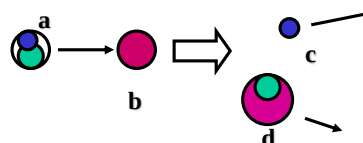


2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

5

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), (t, p), (⁶Li, d), (⁶Li, 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 a lendülete kisebb.
- a visszalökött mag kb. akkora **lendületet** kap, amekkorát az átvett részecskecsoport képviselt a reakció előtt.

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

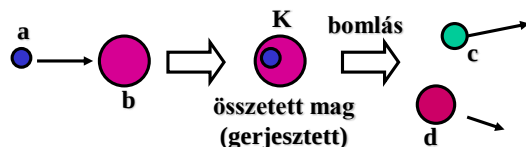
6

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”



2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

7

Sajátosságai:

- A reakció ideje sokkal hosszabb, mint a direkt reakcióké ($t > 10^{-16}$ s). (De még mindig rövid ahhoz, hogy mérhető legyen)
- 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 (**izotróp szögeloszlás** CM rendszerben)
 - A bomlás módját egyedül az összetett mag állapota határozza meg (független attól a módtól, ahogyan az összetett mag létrejött). **Elágazási arányok**

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

8

d) A reakció hatáskeresztmetszete két tényező szorzatára bontható

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

$a + b \rightarrow K \rightarrow c + d$

Itt σ_K az összetett mag képződésének hatáskeresztmetszete

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

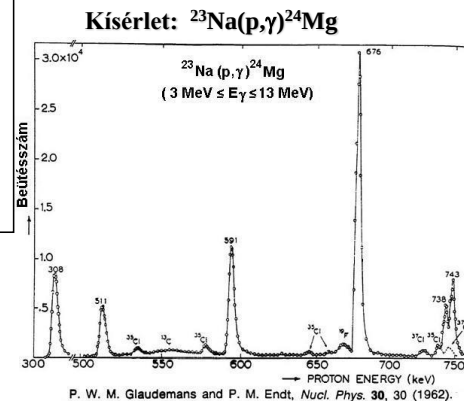
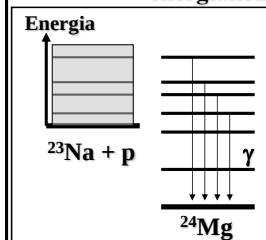
Az **elágazási arány** azt mutatja meg, hogy az összes lehetséges bomlási módból hányad részben bomlik a gerjesztett állapot a $c + d$ részecskékre.

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

9

1. Példa A közbenső mag létrejötté csak meghatározott energiákon lehetséges → rezonanciák



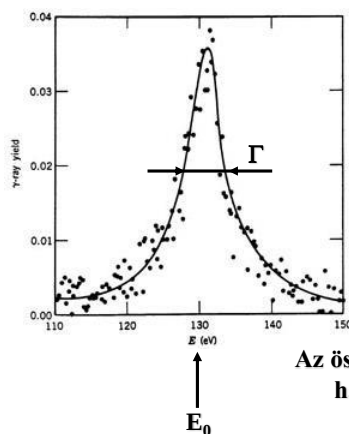
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

10

A különálló rezonanciák alakja

Breit-Wigner formula:



$$\sigma(E) \sim \frac{\left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2}{(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2}$$

„hely” „szélesség”

A rezonancia szélessége és az állapot τ élettartama összefügg:

$$\Gamma \cdot \tau \approx \frac{h}{2\pi}$$

Illetve a T felezési idővel:

$$\Gamma \cdot T \approx \frac{h}{2\pi} \cdot \ln 2$$

Itt h a Planck-állandó

Az összefüggés oka: Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés (kvantummechanika)

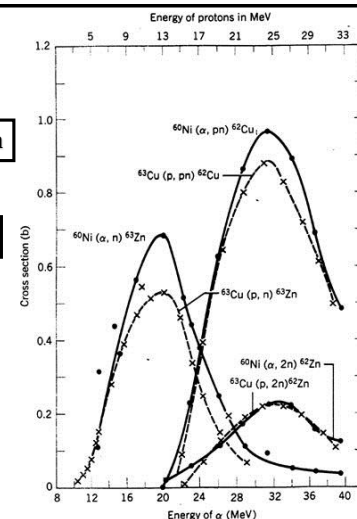
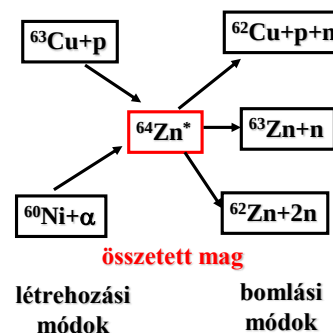
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

11

2. Példa:

A bomlási mód független a keletkezéstől

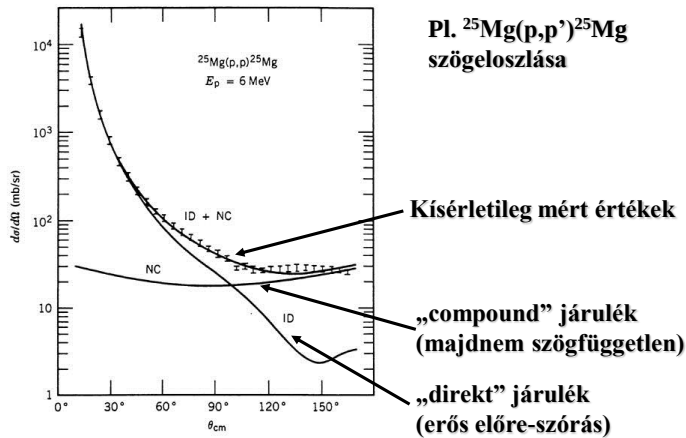


2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

12

Vannak esetek, amikor a „direkt” és „compound” reakció-mechanizmus egyszerre, keverten jelentkezik.

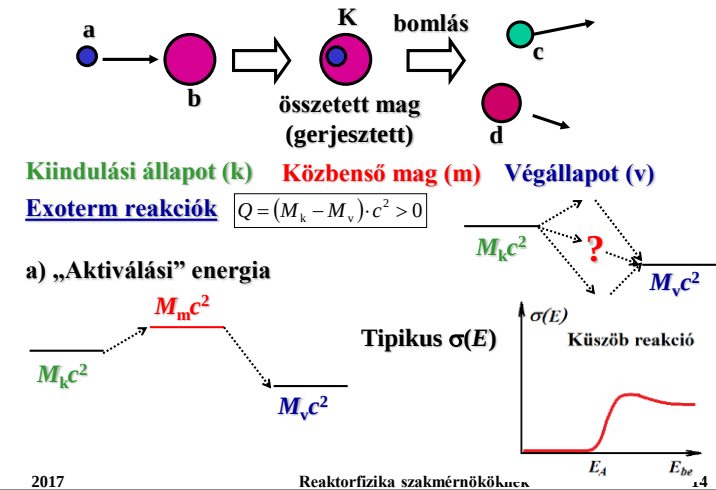


2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

13

Energiaviszonyok közbenső mag kialakulásával járó reakcióknál

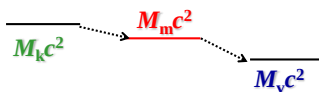


2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

14

b) „Megengedett” reakció



Nincs küszöbenergia, a reakció már egymás mellett „álló” atommagok esetén is végbemegy. (Pl. neutron befogási reakciók)

Tudjuk, hogy a mikrofizikai folyamatok valószínűségi jellegűek. Legyen az időegységre eső reakció valószínűsége λ . Ekkor dt idő alatt a reakció bekövetkezésének valószínűsége λdt . (Minél tovább vannak egymás mellett, annál valószínűbb, hogy bekövetkezik.) Az egymás közelében tartózkodás ideje: $t \approx \frac{2R}{v}$

Tehát a bekövetkezés valószínűsége:

$$\sigma \sim \lambda \cdot dt = \lambda \cdot \frac{2R}{v} = \frac{\text{konst.}}{v} \quad \text{Másképpen: } \sigma(E) = \frac{\text{konst.}}{\sqrt{E}}$$

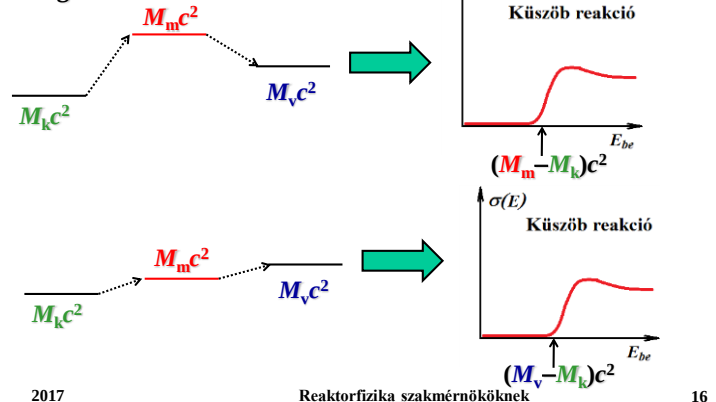
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

15

Endoterm reakciók $Q = (M_k - M_v) \cdot c^2 < 0$

Ezek mindig küszöbreakciók, de a küszöböt a nagyobb energia határozza meg.



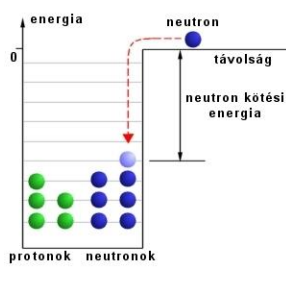
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

16

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 $\longrightarrow$ akármilyen kis energiájú neutron is létrehozhatja

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

Ez az ún. $1/v$ hatáskeresztmetszet $\sigma \sim t = \frac{2R}{v}$ $\leftarrow$ mag sugara
 $\leftarrow$ neutron sebessége

Kérdés: milyen lesz ez $\log \sigma - \log E_n$ ábrán?

2017

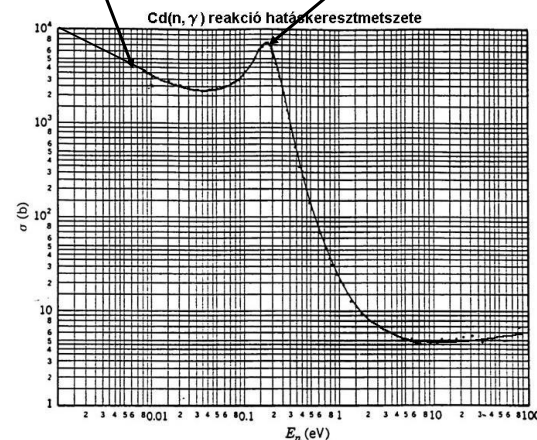
Reaktorfizika szakmérnököknek

17

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

$1/v$ tartomány

rezonancia

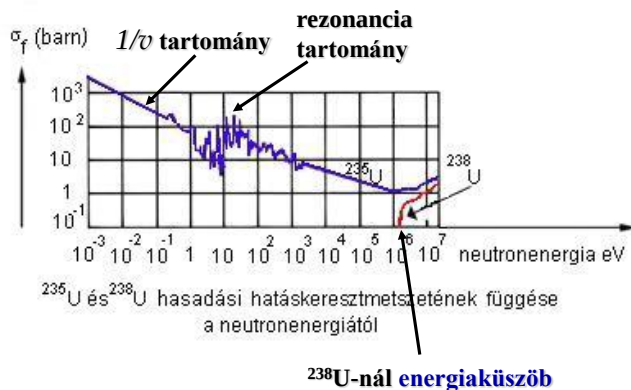


Fontos
n-elyelő és
árnyékoló
anyag!!

18

2. Példa

Úrán-izotópok hasadási hatáskeresztmetszete



2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

19

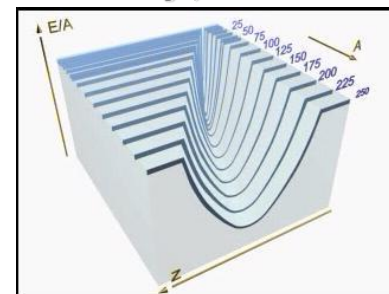
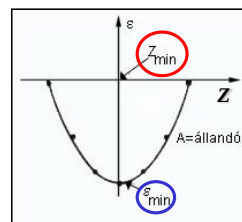
Az atomenergia felszabadítása

Emlékeztető: Atommagok kötési energiája (Weizsäcker)

$$B = b_V A - b_S A^{2/3} - b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - b_A \frac{(N-Z)^2}{A} + b_P \delta \cdot A^{-3/4}$$

$$\varepsilon = \frac{E}{A} = -\frac{B}{A} \quad \begin{array}{l} \text{(egy nukleon átlagos energiája)} \\ \text{(energia} = - \text{kötési energia)} \end{array}$$

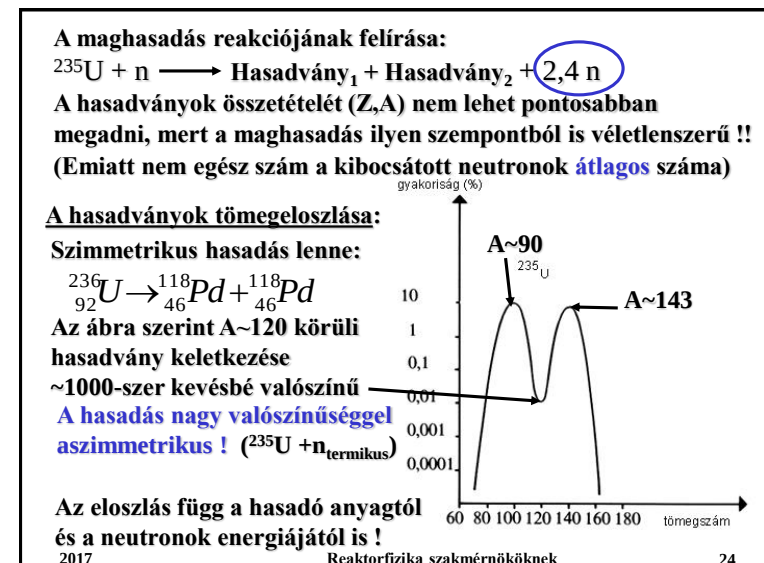
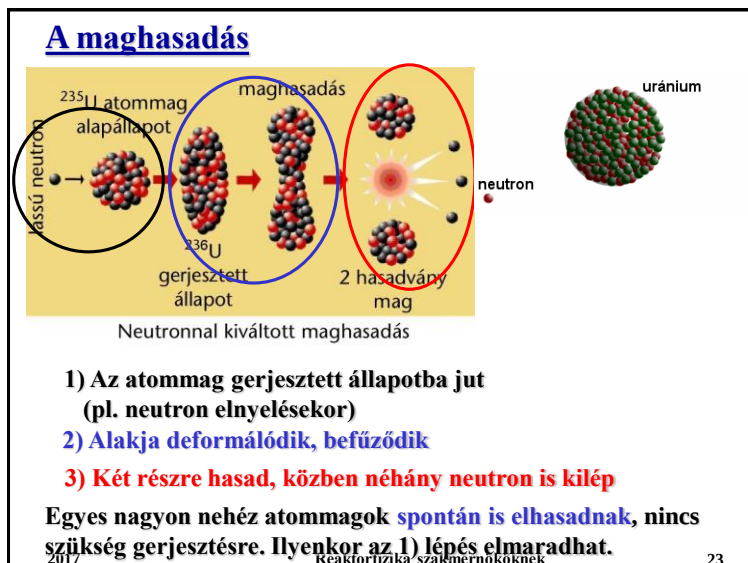
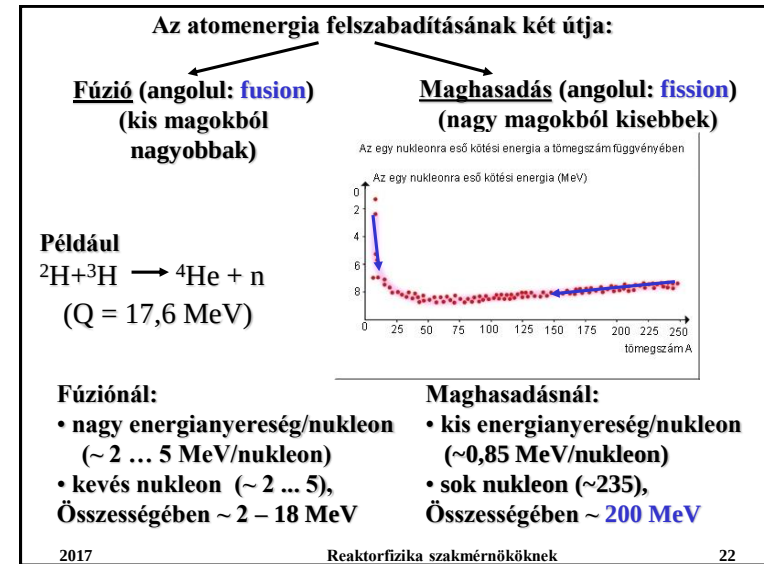
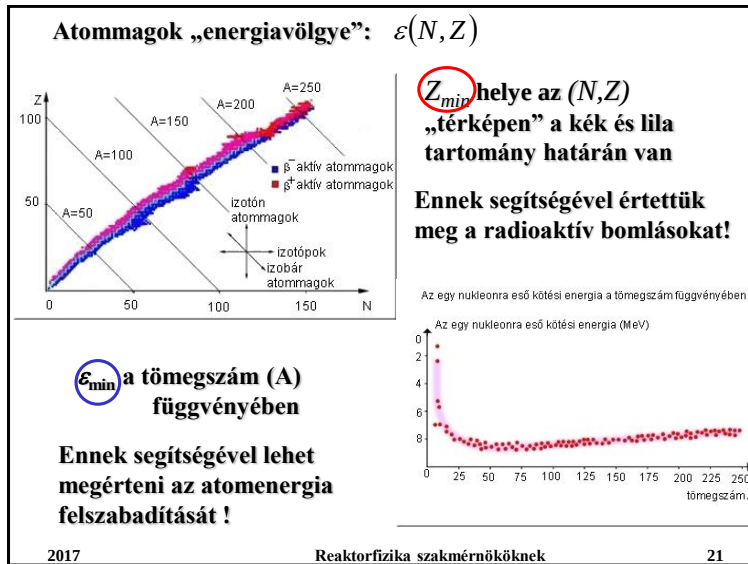
Az $A = \text{konstans}$ metszetek parabolák!



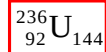
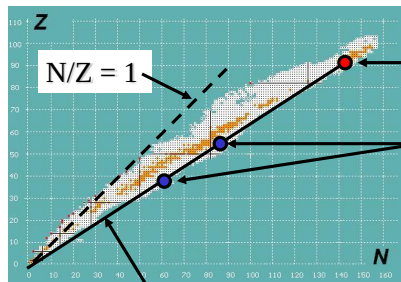
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

20



Maghasadás az (N,Z) „térképen”



$$N/Z = 144/92 = 1,56$$

Innen indul ($N/Z \sim 1,56$)
(stabil mag)

Ide jutunk, ha marad az
 $N/Z \sim 1,56$
(aszimmetrikus hasadás)

$$N/Z = 1,56$$

Stabilhoz képest
NEUTRONGAZDAG
magok

Erősen radioaktív (β^- bomló)
hasadási termékek

Neutronkibocsátás
szükségzerű ($\bar{\nu} \sim 2,4$)

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

25

A maghasadás energiamérlege ${}^{235}\text{U}(n,f)$

A teljes energia többféle folyamat, ill. sugárzás során kerül kibocsátásra. Ez befolyásolja a hőtermelés helyét és idejét

A hasadási termékek kinetikus energiája	168 MeV (82,0 %)
Hasadási termékek β^--részecskéi által elvitt...	8 MeV (3,9 %)
Hasadási neutronok által elvitt energia	5 MeV (2,4 %)
Prompt γ-kvantumok által elvitt energia	7 MeV (3,4 %)
Hasadási termékek γ-sugárzása által elvitt...	7 MeV (3,4 %)
Hasadási termékek β-bomlásakor kibocsátott antineutrínók által elvitt energia	10 MeV (4,9 %)

ÖSSZESEN

205 MeV (100%)

- Rövid hatótáv (üzemanyagban, vagy annak közelében)
- Közepes (hűtőközeg, reaktortartály, biol. védelem)
- Igen hosszú hatótáv (eltávozik)
- Időben azonnali (prompt)

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

26 26

Példa: tegyük fel, hogy az ${}^{236}\text{U}$ atommag a következőképpen hasad: ${}^{236}\text{U} \longrightarrow {}^{90}\text{Kr} + {}^{143}\text{Ba} + 3n$

Próbáljuk meg kiszámítani, hogy milyen „távol” van egymástól a két hasadvány, amikortól már csak Coulomb-erők hatnak. Tegyük fel, hogy az összes mozgási energiájuk 168 MeV.

Megoldás:

A „szétszakadás” pillanatában csak Coulomb potenciális energiájuk van, ez alakul mozgási energiává:

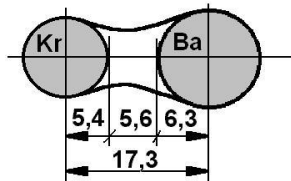
$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 Z_2 e^2}{d} = 168 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \quad \text{Itt } Z_1=36 \text{ (Kr)}, Z_2=56 \text{ (Ba)}$$

Ebből kapjuk: $d \sim 17,3 \text{ fm}$

A két mag sugara $R = r_0 \sqrt[3]{A}$
felhasználásával:

$$R_{\text{Kr}} = 5,4 \text{ fm}, R_{\text{Ba}} = 6,3 \text{ fm}$$

A „szétszakadás” geometriája tehát:



2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

27