

10. előadás

TARTALOMJEGYZÉK

- Atommaghasadás
- Energiaviszonyok
- Hasadási gát és szisztematikája különböző rendszámú és tömegszámú atommagok esetén
- Neutron befogását követő maghasadás
- Spontán maghasadás

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

1/24

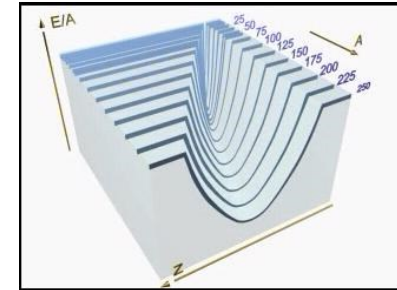
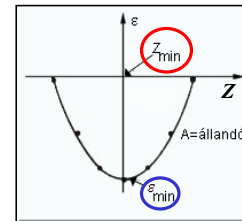
Mag- és neutronfizika 9. előadás

Emlékeztető: Atommagok kötési energiája (Weizsäcker)

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

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

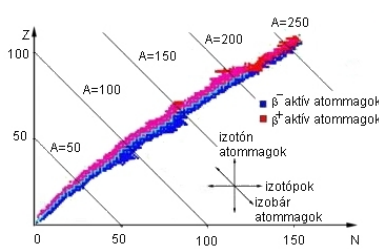
Az A = konstans metszetek parabolák!



Reaktorfizika szakmérnököknek

2/24

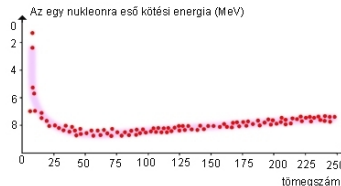
Atommagok „energiavölgye”: $\varepsilon(N, Z)$



Z_{min} helye az (N, Z) „térképen” a kék és lila tartomány határán van

Ennek segítségével értettük meg a radioaktív bomlásokat!

Az egy nukleonra eső kötési energia a tömegszám függvényében



ε_{min} a tömegszám (A) függvényében

Ennek segítségével lehet megérteni az atomenergia felszabadítását!

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

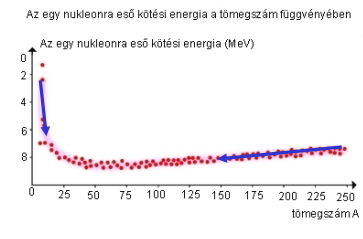
3/24

Az atomenergia felszabadításának két útja:

Fúzió (angolul: **fusion**)
(kis magokból nagyobbak)

Maghasadás (angolul: **fission**)
(nagy magokból kisebbek)

Például
 $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n$
($Q = 17,6 \text{ MeV}$)



Fúziósnál:

- nagy energianyereség/nukleon (~ 2 ... 5 MeV/nukleon)
- kevés nukleon (~ 2 ... 5),
Összességében ~ 2 – 18 MeV

Maghasadásnál:

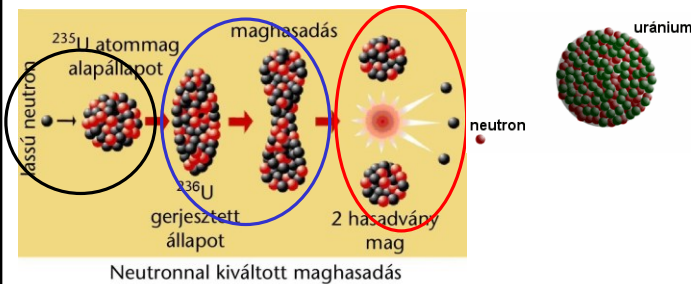
- kis energianyereség/nukleon (~ 0,85 MeV/nukleon)
- sok nukleon (~ 235),
Összességében ~ 200 MeV

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

4/24

A maghasadás folyamata

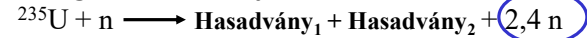


- 1) Az atommag gerjesztett állapotba jut (pl. neutron elnyelésekor)
- 2) Alakja deformálódik, befűződik
- 3) Két részre hasad, közben néhány neutron is kilép

Egyes nagyon nehéz atommagok **spontán is elhasadnak**, nincs szükség gerjesztésre. Ilyenkor az 1) lépés elmaradhat.

5/24

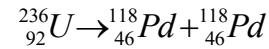
A maghasadás reakciójának felírása:



A hasadványok összetételét (Z,A) nem lehet pontosabban megadni, mert a maghasadás ilyen szempontból is véletlenszerű !! (Emiatt nem egész szám a kibocsátott neutronok **átlagos** száma)

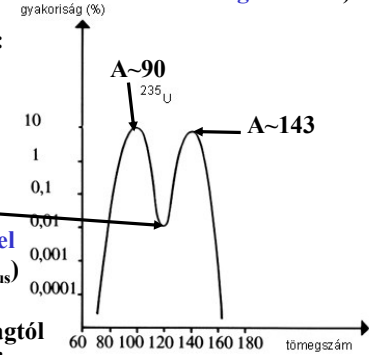
A hasadványok tömegeloszlása:

Szimmetrikus hasadás lenne:



Az ábra szerint A~120 körüli hasadvány keletkezése

~1000-szer kevésbé valószínű
A hasadás nagy valószínűséggel aszimmetrikus ! ($^{235}\text{U} + n_{\text{termikus}}$)



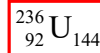
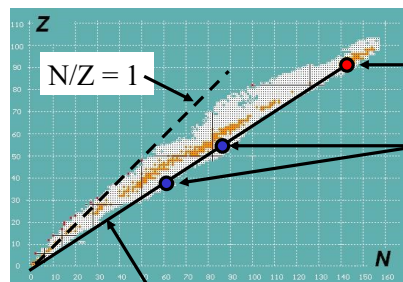
Az eloszlás függ a hasadó anyagtól és a neutronok energiájától is !

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

6/24

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
szükségszerű ($\bar{\nu} \sim 2,4$)

7/24

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

8/24

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

Próbáljuk meg kiszámítani, hogy milyen „távol” van egymástól a két hasadvány, amikor 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:

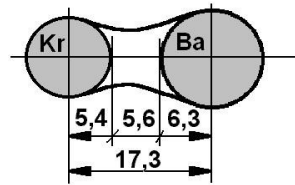
$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 Z_2 e^2}{d} = 168 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \quad \text{Itt } Z_1=36 \text{ (Kr)}, Z_2=56 \text{ (Ba)}$$

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:



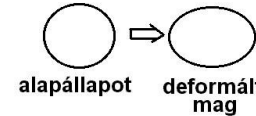
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

9/24

Hasadási gát

A maghasadás az atommag kis deformációjával **kezdődik**. (deformációs paraméter: ε)



Mennyi energia kell ehhez?

Az energiaváltozást a Weizsäcker-képlet alapján vizsgáljuk:

$$B = [b_F \cdot A^{2/3} - b_C \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}}]$$

Deformáció során

- térfogat = állandó,
- aszimmetria, párosság = állandónak vesszük

• felület $\rightarrow$ nő $b_F A^{2/3} \Rightarrow b_F A^{2/3} (1 + a_F \cdot \varepsilon)$

• Coulomb-energia $\rightarrow$ csökken $b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} \Rightarrow b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} (1 - a_C \cdot \varepsilon)$
(protonok messzebb kerülnek)

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

10/24

Pontos számítások szerint az arányossági tényezők:

$$a_F \sim 0,025 \text{ és } a_C \sim 0,012.$$

Az energia megváltozása tehát:

$$\Delta E = \left(0,025 \cdot b_F \cdot A^{2/3} - 0,012 \cdot b_C \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right) \cdot \varepsilon$$

Ha $\Delta E < 0$, akkor akármilyen kis ε deformáció energianyereséges, a mag **spontán elhasad!**

$$\left(0,025 \cdot b_F \cdot A^{2/3} - 0,012 \cdot b_C \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right) < 0 \text{ -ből: } \frac{Z^2}{A} \geq \frac{0,025 \cdot b_F}{0,012 \cdot b_C} \approx 54$$

$$(\text{mivel } b_F = 2,85 \cdot 10^{-12} \text{ J}, b_C = 0,11 \cdot 10^{-12} \text{ J})$$

A nagy atommagoknál $Z/A \sim 0,39$, ezért $Z > 136$ esetén nincs a maghasadásnak „aktiválási energiája”. (Valójában már $Z \sim 110$ környékén olyan kicsi az aktiválási energia, hogy az atommagok alagúteffektussal igen gyorsan, spontán elhasadnak)

A Periódusos Rendszernek a maghasadás miatt van vége!!!

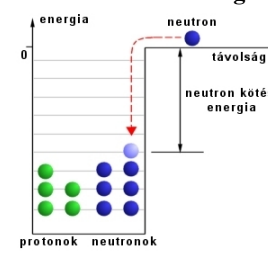
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

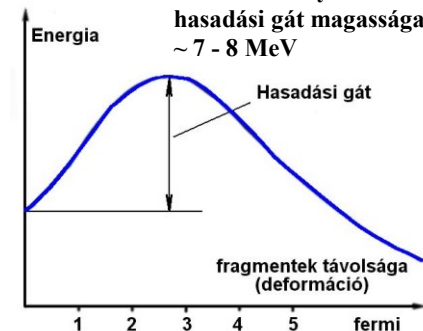
11/24

$Z < 136$ esetén tehát kis deformációkhoz energia befektetése szükséges ($\Delta E > 0$) $\rightarrow$ **hasadási gát**

Hogyan képes lassú (kis energiájú) neutron elhasítani a ^{235}U magot?



Az urán környékén a hasadási gát magassága $\sim 7 - 8 \text{ MeV}$



A neutron **kötési energiája** fedezi a hasadás aktiválási energiáját!

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

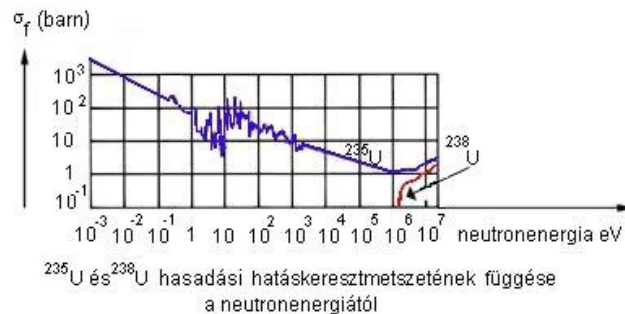
12/24

$^{235}\text{U} + \text{n}$ –ből páros-páros mag lesz (^{236}U) $\longrightarrow$ nagyobb Q

$$^{238}\text{U} + \text{n} \text{ --ból páratlan-páros mag lesz } (^{239}\text{U}) \longrightarrow \text{kisebb } Q$$

Emiatt $^{235}\text{U} + \text{n}$ kis energiájú neutronnal is elhasad,

$^{238}\text{U} + \text{n}$ -nál **küszöbenergia** van ($\sim 0,8 \text{ MeV}$)



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

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

13/24
13

Hasadási neutronok

Láttuk: stabil magokhoz képest túl sok a neutron a maghasadás után $\longrightarrow$ szükségszerű neutronok kibocsátása

A kibocsátott neutronok száma nem állandó, egy várható érték körül ingadozik. Gauss-eloszlással jól közelíthető.

**A várható érték
függ a neutron ener-
giájától, és a hasadó
magtól is.**

Félérték-szélesség:

~ 2,5 —
(nem függ a magtól)

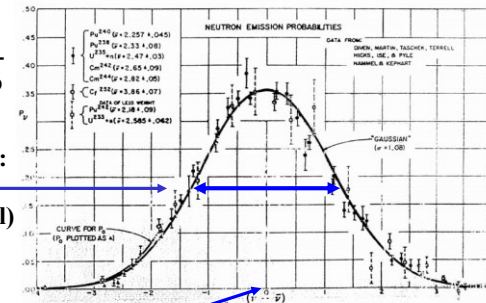


Figure 13.7 Distribution of fission neutrons. Even though the average number of neutrons $\bar{\nu}$ changes with the fissioning nucleus, the distribution about the average is independent of the original nucleus. From J. Terrell, in *Physics and Chemistry of Fission*, Vol. 2 (Vienna: IAEA, 1965), p. 3.

Várható érték: $\nu = 2,43$ ($^{235}\text{U} + n_{\text{th}}$ hasadásnál)

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

14/24
14

Neutronok időbeli megjelenése

(a maghasadás pillanatához viszonyítva)

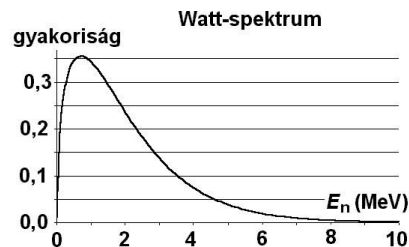
a) Prompt (azonnali) neutronok

A neutronok legnagyobb része a maghasadás „pillanatában” kilép. Ezek a prompt (azonnali) neutronok ($t < 10^{-16}$ s).

Átlagenergiájuk $\sim 2 \text{ MeV}$

Energia-eloszlás: „Watt-spektrum”

$$N(E_n) \sim 0,484 \cdot e^{-E_n/E_0} \cdot \sinh \sqrt{2 \frac{E_n}{E_0}}$$

 $(E_0 = 1 \text{ MeV})$

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

15/24
15

b) Késő („delayed”) neutronok

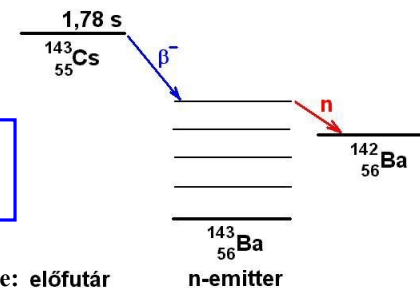
Láttuk: stabil magokhoz képest túl sok a neutron a maghasadás után $\longrightarrow$ nagy neutronszámú hasadványok jönnek létre

Ezek mind β^{-} -bomlók.

Néhány esetben előfordul, hogy a β^- - bomlás után olyan mag jön létre, amely neutronbomló $\longrightarrow$ késő neutron

Egy lehetséges példa:

(A neutron 1,78 s felezési idővel lép ki!)



**Sok ilyen bomlás van,
különböző felezési idők,
különböző hozamok**

Figyeljünk az elnevezésekre: előfutár

n-emitter

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

16/24
16

A késő neutronokat 6 csoportra bontják (felezési idő szerint)

	$E_n(\text{MeV})$	$T_i(\text{s})$	$\beta_i(\%)$	Tipikus előfutárok
1	0,25	56	0,020	^{87}Br , ^{142}Cs
2	0,56	23	0,143	^{88}Br , ^{137}I
3	0,43	6,2	0,128	^{89}Br , ^{138}I
4	0,62	2,3	0,255	^{94}Kr , ^{139}I , ^{143}Cs
5	0,42	0,6	0,074	^{140}I , ^{145}Cs
6	0,51	0,2	0,030	^{87}As , ^{143}Xe

Összesen: $\beta = 0,65 \%$

Késő neutron hányad:

$$\beta = \frac{(\text{késő n})}{(\text{összes n})} \sim \frac{(\text{késő n})}{(\text{prompt n})}$$

A késő neutronok időbeli megjelenése a hasadás után:

$$N(t) = \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{t}{T_i}}$$

Szerepük nagyon fontos a láncreakció szabályozásában!!

2017

$i=1$

Reaktorfizika szakmérnököknek

$\frac{17}{17}^{24}$