

Mag- és neutronfizika

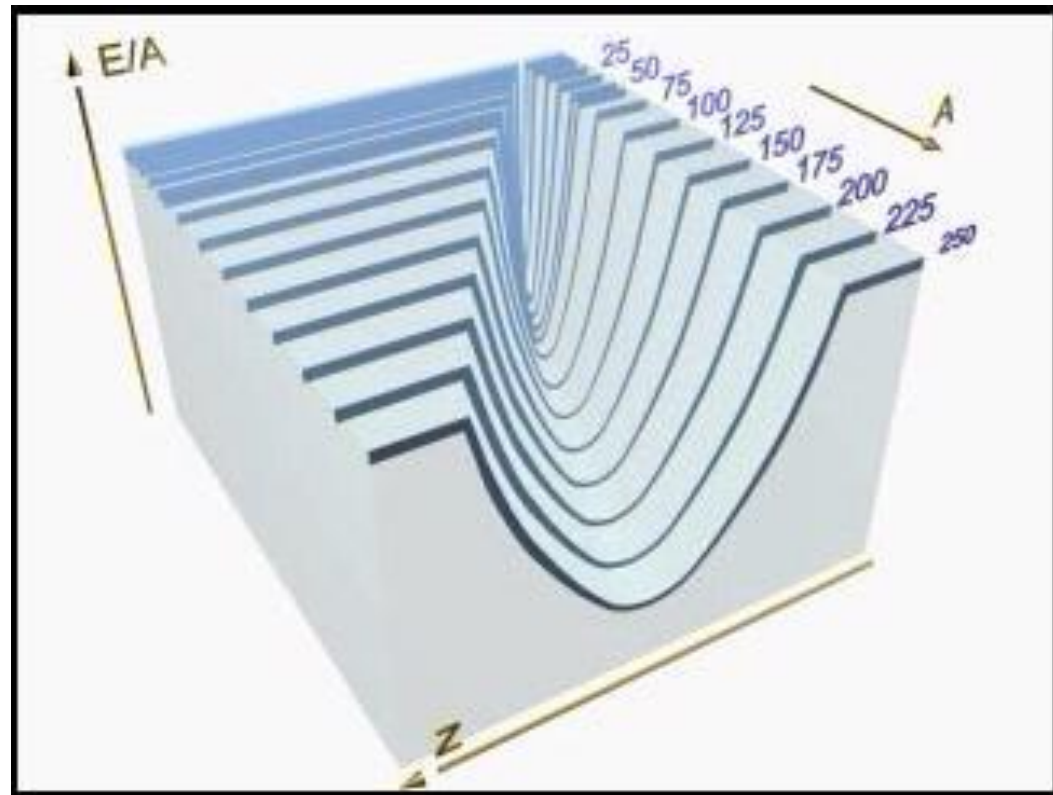
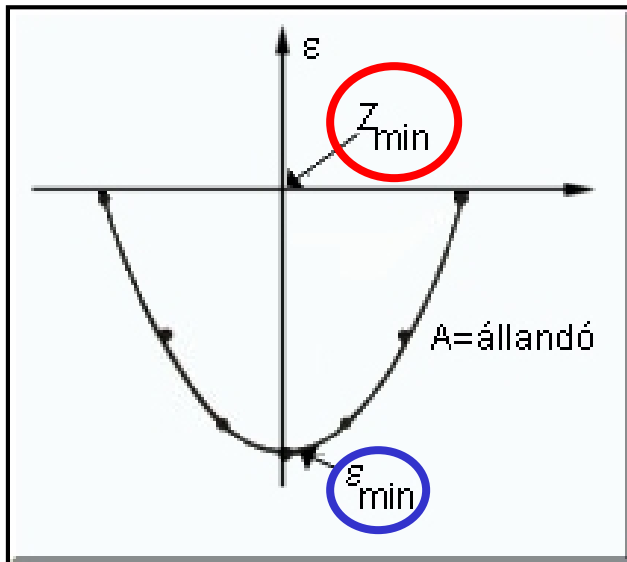
Emlékeztető: Atommagok kötési energiája (Weizsäcker)

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

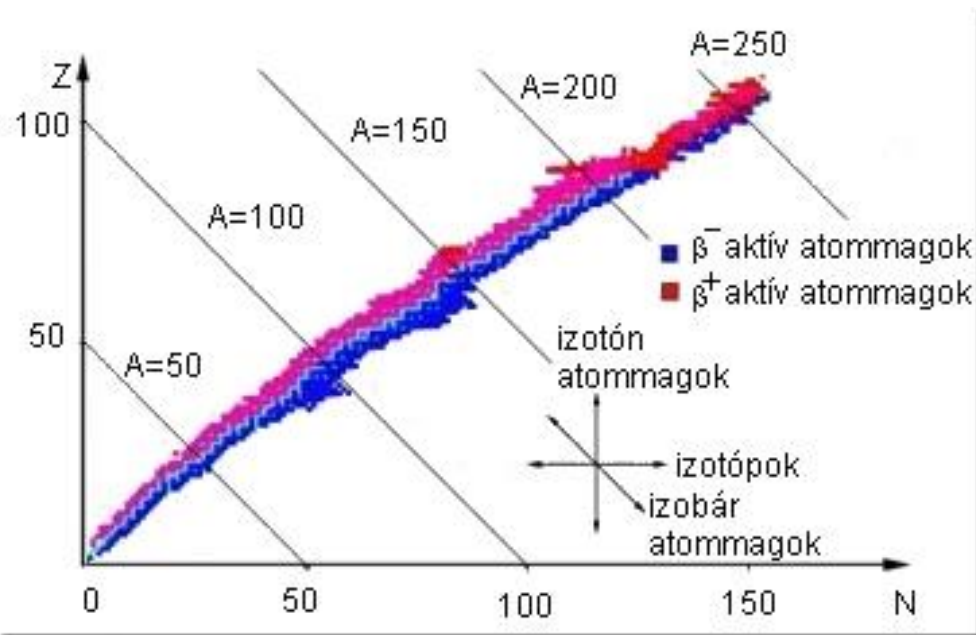
$$\varepsilon = \frac{E}{A} = -\frac{B}{A}$$

(egy nukleonra eső átlagos kötési energia)

Az $A =$ konstans metszetek parabolák!



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



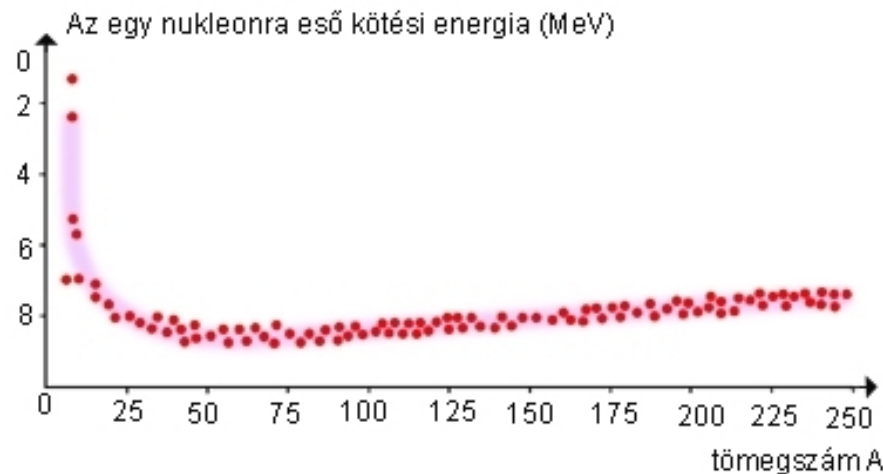
Z_{min} helye az (N, Z) „térképen”

Ennek segítségével értettük meg a radioaktív bomlásokat!

ε_{min} a tömegszám (A) függvényében

Ennek segítségével lehet megérteni az atomenergia felszabadítását!

Az egy nukleonra eső kötési energia a tömegszám függvényében

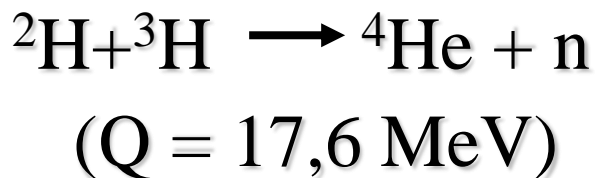


Az atomenergia felszabadításának két útja:

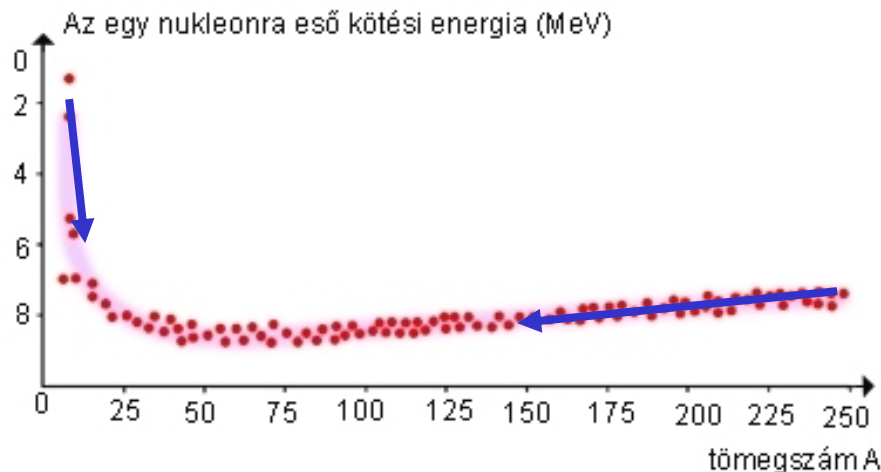
Fúzió (angolul: **fusion**)
(kis magokból
nagyobbak)

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

Például



Az egy nukleonra eső kötési energia a tömegszám függvényében



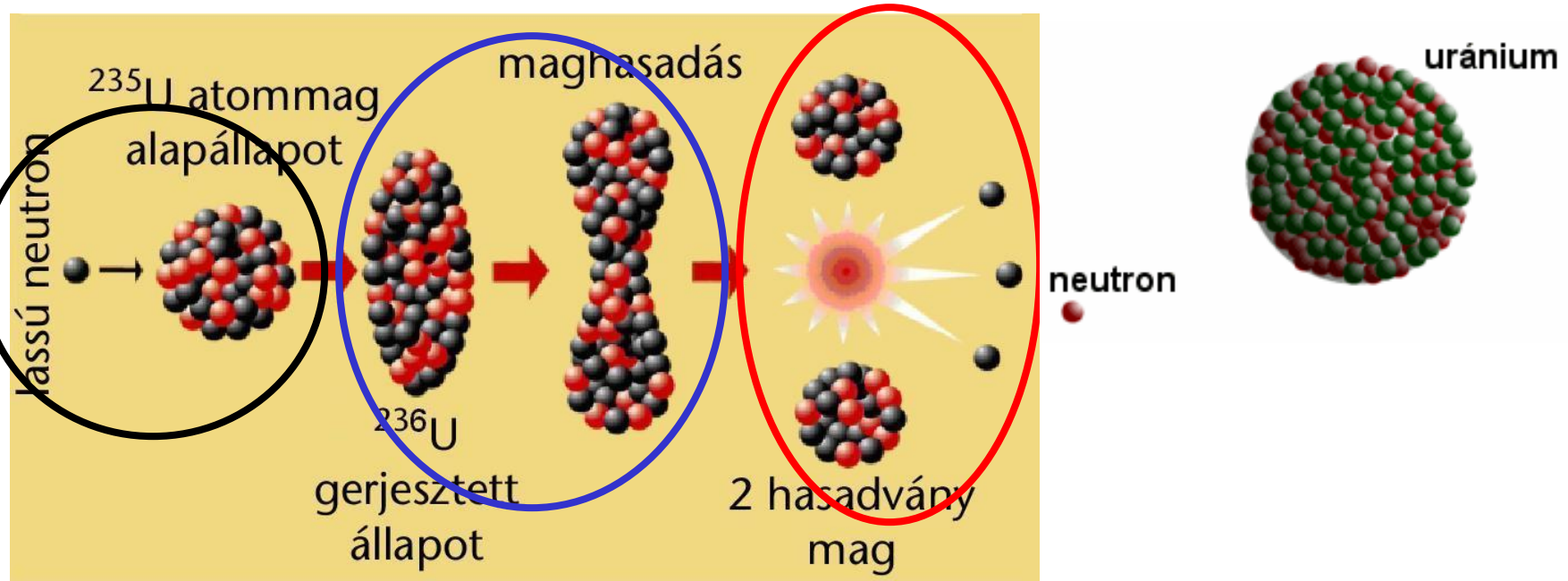
Fúziónál:

- nagy energianyereség/nukleon
($\sim 2 \dots 5 \text{ MeV/nukleon}$)
- kevés nukleon ($\sim 2 \dots 5$),
Összességében $\sim 2 - 18 \text{ MeV}$

Maghasadásnál:

- kis energianyereség/nukleon
($\sim 0,85 \text{ MeV/nukleon}$)
- sok nukleon (~ 235),
Összességében $\sim 200 \text{ MeV}$

A maghasadás folyamata



Neutronnal kiváltott maghasadás

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.

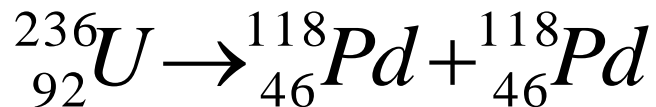
A maghasadás reakciójának felírása:



**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:

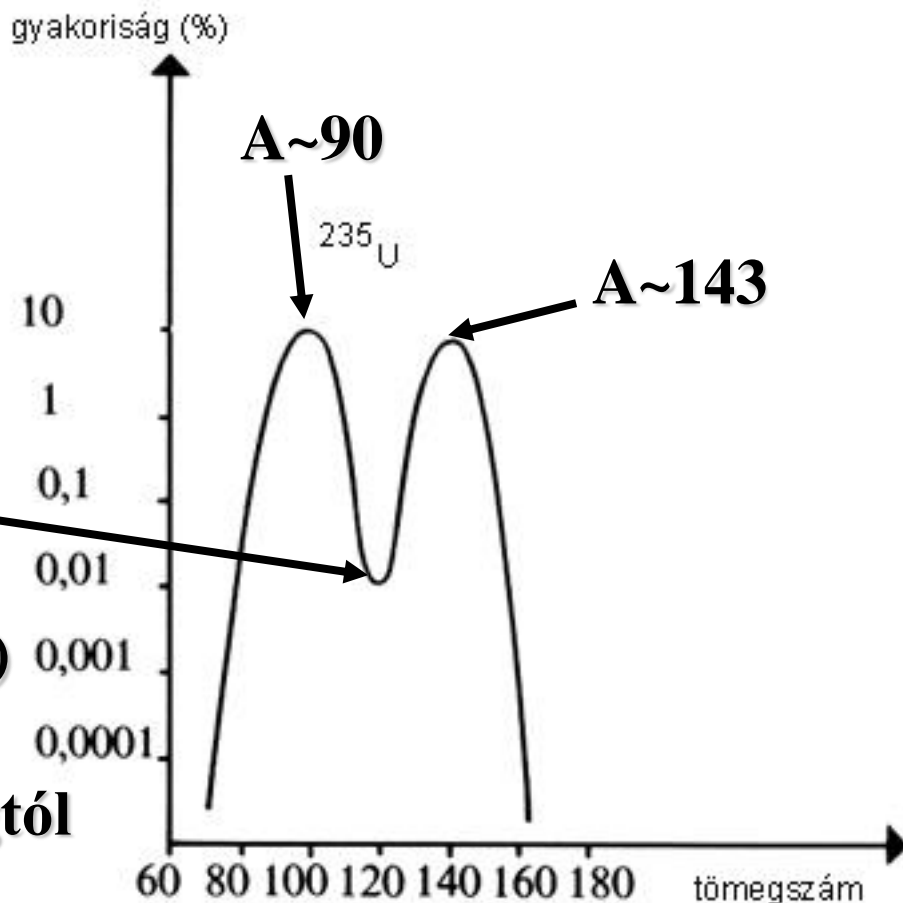


Az ábra szerint A~120 körüli hasadvány keletkezése

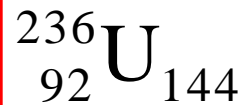
~1000-szer kevésbé valószínű

A hasadás nagy valószínűséggel aszimmetrikus ! ($^{235}\text{U} + \text{n}_{\text{termikus}}$)

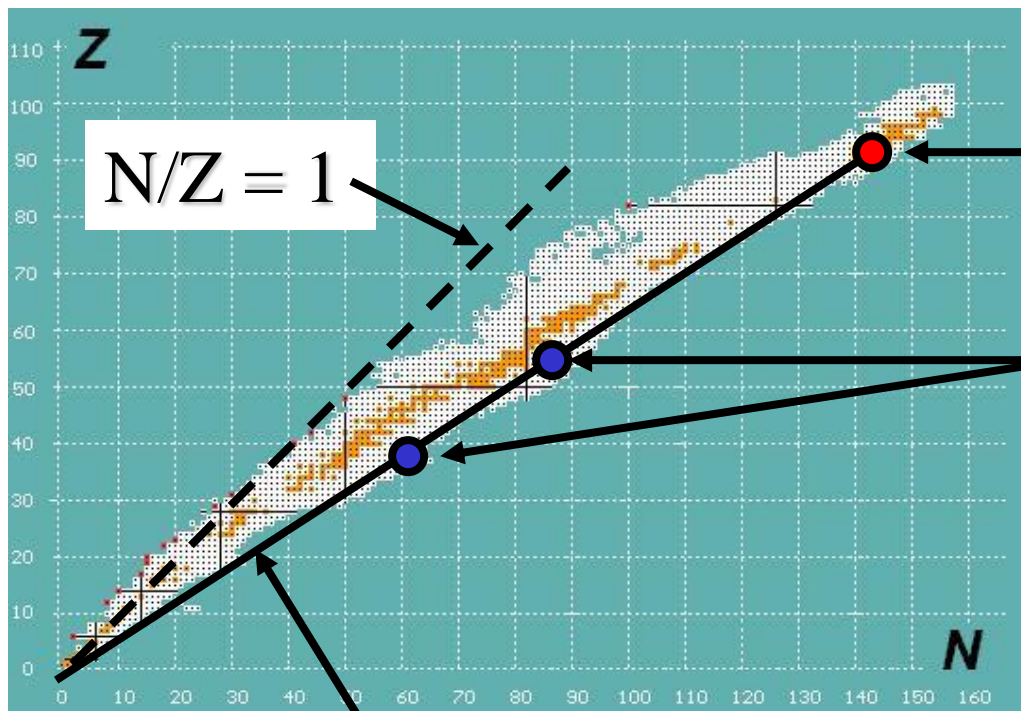
Az eloszlás függ a hasadó anyagtól és a neutronok energiájától is !



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

Megértettük tehát, hogy maghasadáskor

- **szükségszerű** neutronok kibocsátása
- **erősen radioaktív termékek** jönnek létre

A maghasadás energia-mérlege ($^{235}\text{U} + n$)

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

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:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 Z_2 e^2}{d} = 168 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Itt $Z_1=36$ (Kr), $Z_2=56$ (Ba)

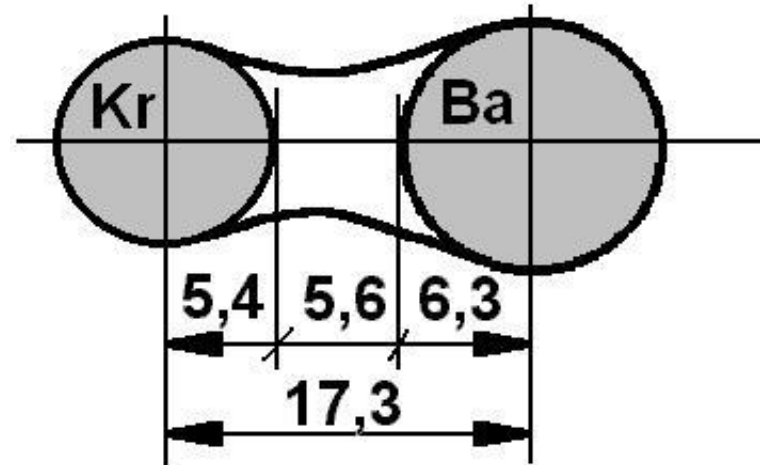
Ebből kapjuk: $d \sim 17,3$ fm

A két mag sugara felhasználásával:

$$R = r_0 \sqrt[3]{A}$$

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

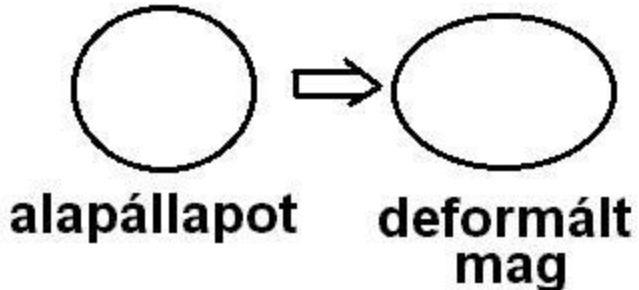
A „szétszakadás” geometriája tehát:



Hasadási gát

A maghasadás az atommag kis deformációjával **kezdődik**.

(deformációs paraméter: ε)



Mennyi energia kell ehhez?

Az energiaváltozást a Weizsäcker-képlet alapján vizsgáljuk:

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

Deformáció során

- térfogat = állandó,
- aszimmetria, párosság = állandónak vesszük
- **felület** \longrightarrow **nő** $b_F A^{2/3} \Rightarrow b_F A^{2/3} (1 + a_F \cdot \varepsilon)$
- **Coulomb-energia** \longrightarrow **csökken**
(protonok messzebb kerülnek) $b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} \Rightarrow b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} (1 - a_C \cdot \varepsilon)$

Pontos számítások szerint az arányossági tényezők:

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

Az energia megváltozása tehát:

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

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

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

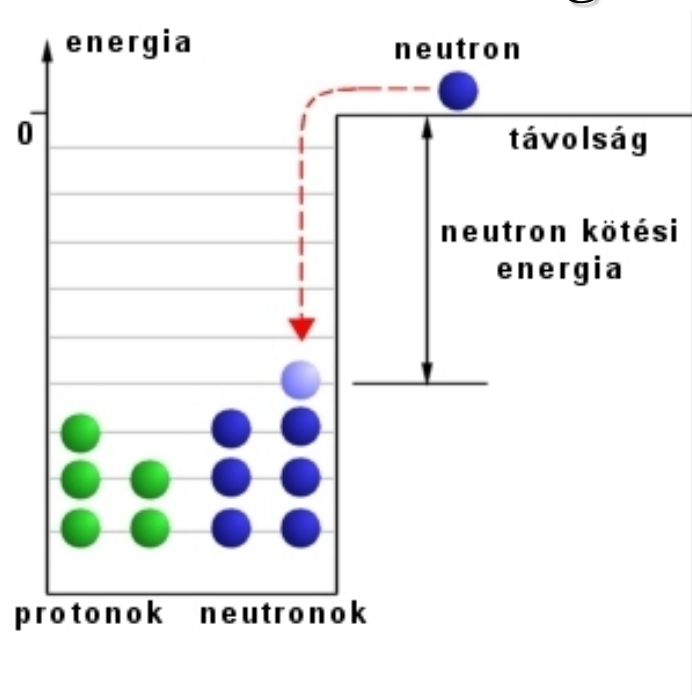
(mivel $b_F=2,85 \cdot 10^{-12} \text{ J}$, $b_C=0,11 \cdot 10^{-12} \text{ J}$)

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)

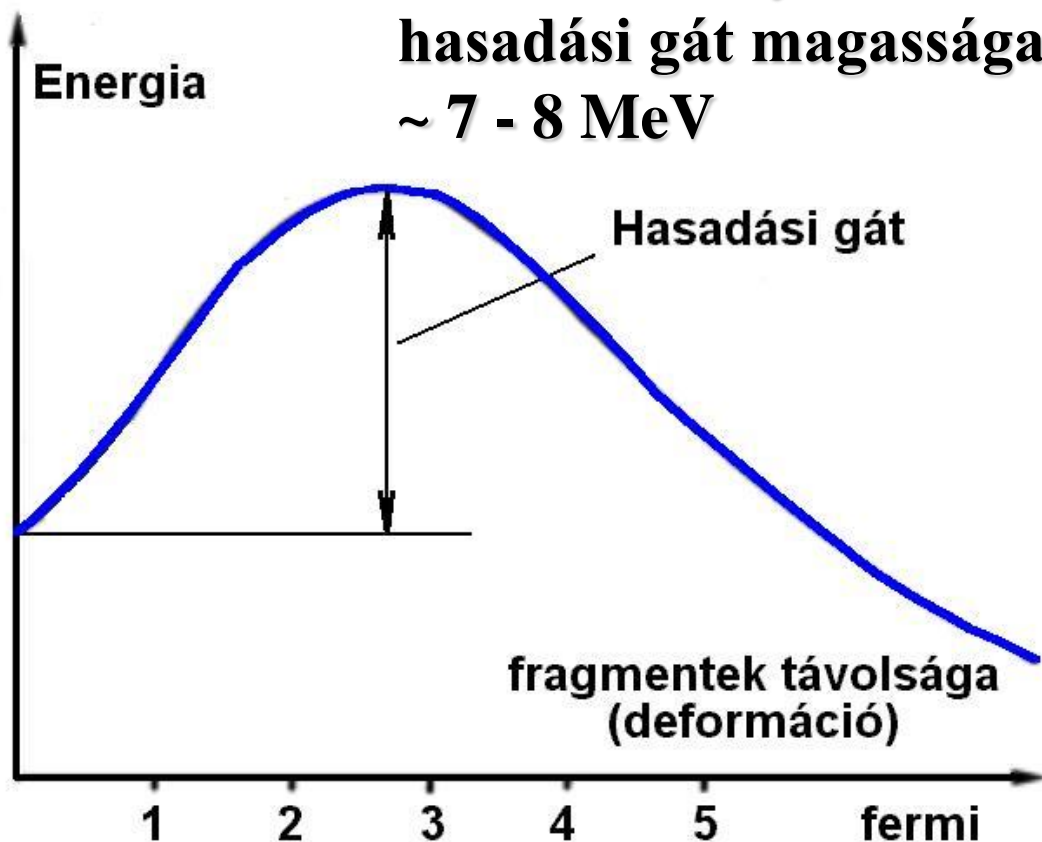
A Periódusos Rendszernek a maghasadás miatt van vége!!!

$Z < 136$ esetén tehát kis deformációkhoz energia befektetése szükséges ($\Delta E > 0$) \longrightarrow **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!

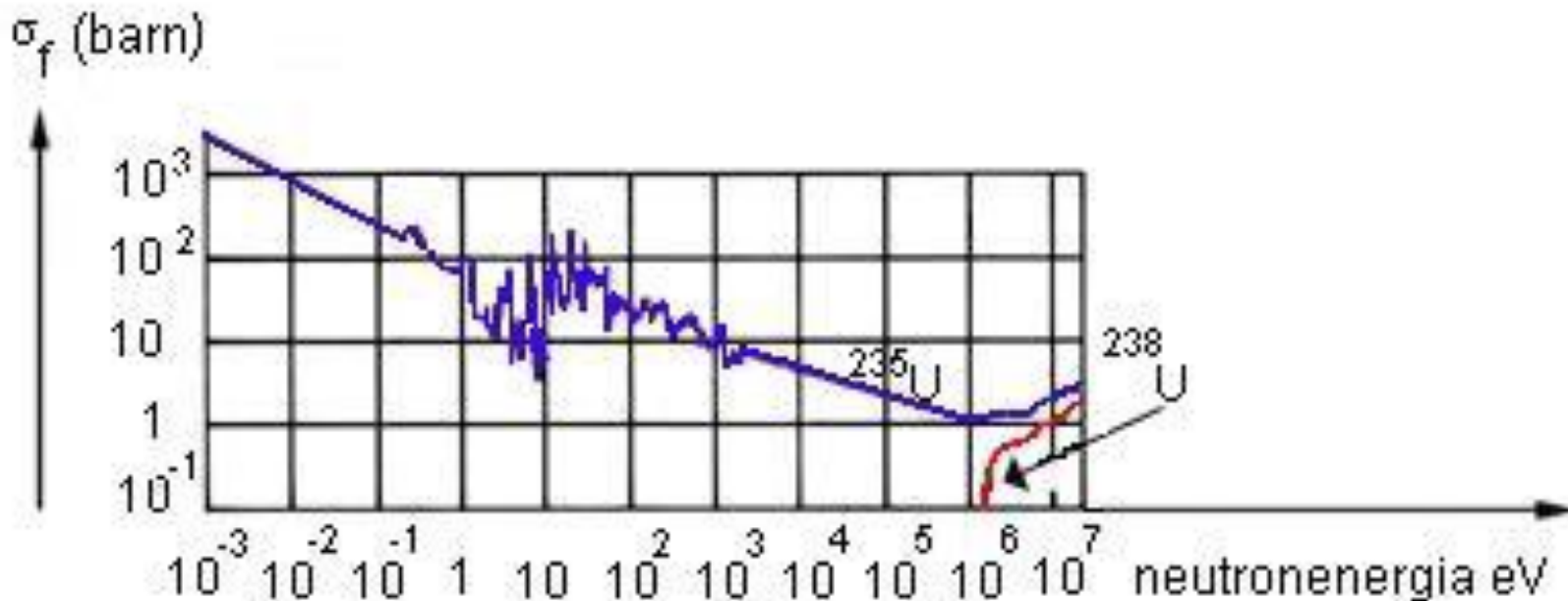
Párenergia fontossága:

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

$^{238}\text{U} + \text{n}$ –ből páratlan-páros mag lesz (^{239}U) \longrightarrow 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

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-eloszlás, félérték-szélessége $\sim 2,5$

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

Ez utóbbi függ a neutron energiájától, és a hasadó magtól is.

Prompt (azonnali) neutronok

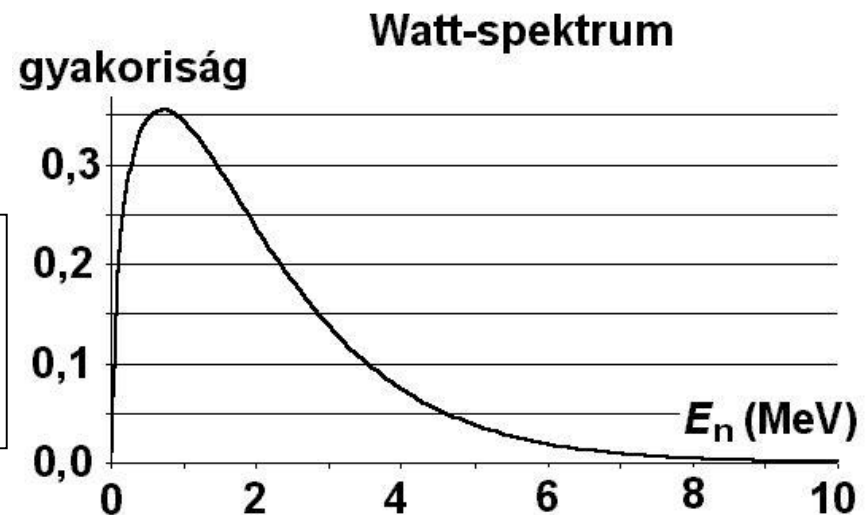
A neutronok legnagyobb része a maghasadás „pillanatában” kilép. Ezek a prompt (azonnali) neutronok ($t < 10^{-16}$ s).

Átlagenergiájuk ~ 2 MeV

Energia-eloszlás: „Watt-spektrum”

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

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



Késő („delayed”) neutronok

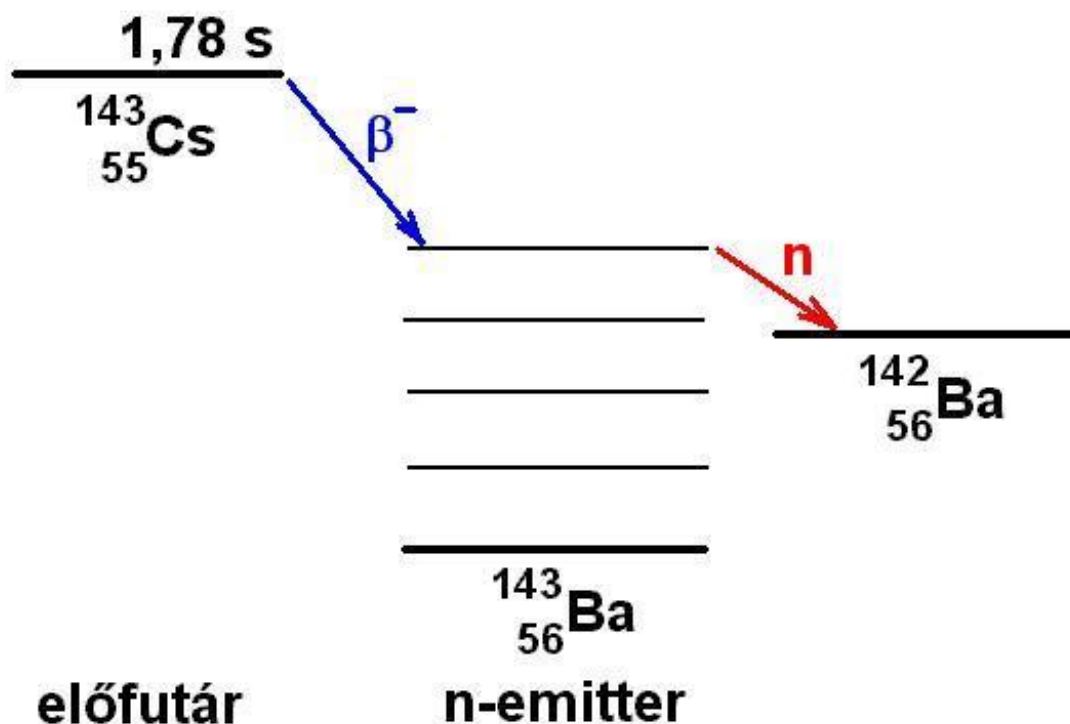
Láttuk: stabil magokhoz képest **túl sok a neutron** a maghasadás után \longrightarrow **nagy neutronszámú** hasadványok jönnek létre
Ezek mind β^- -bomlók.

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



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:

$$\beta = (\text{késő n})/(\text{prompt n})$$

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!!