Maghasadás

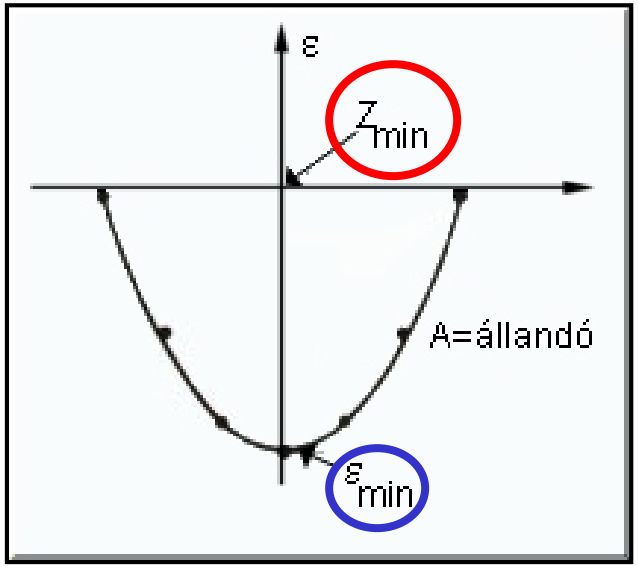
Emlékeztető: **Atommagok kötési energiája (Weizsäcker)**

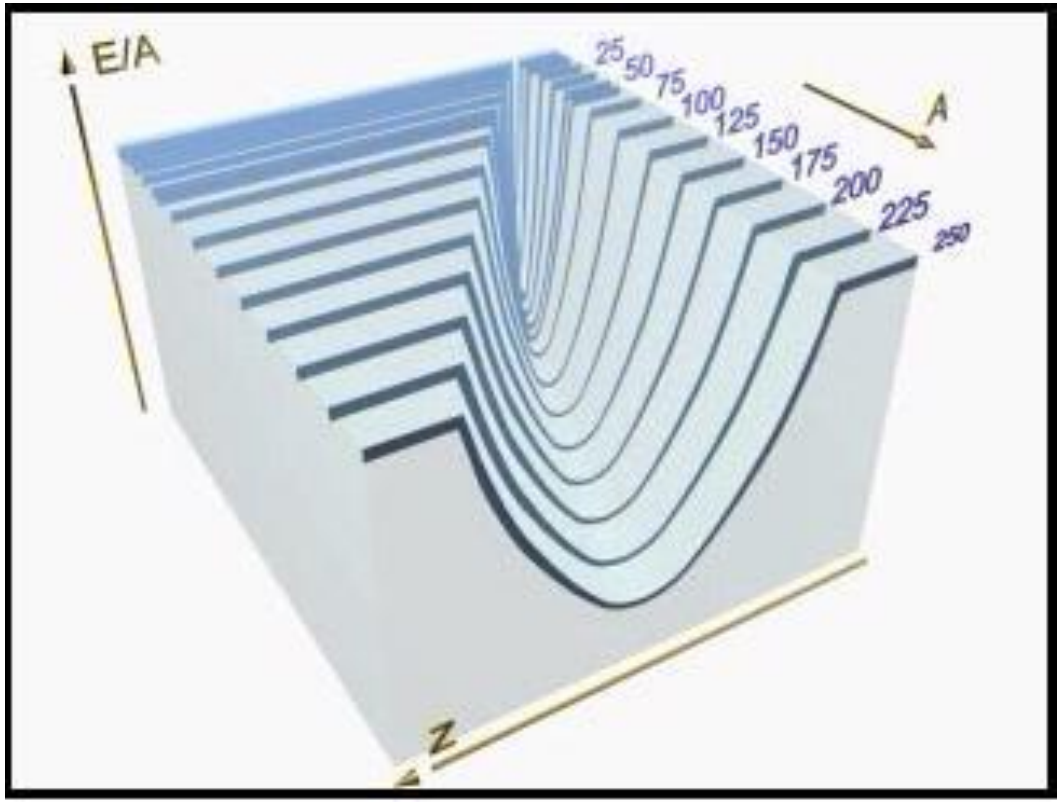
$$B = b_V A - b_F \cdot A^{2/3} - b_C \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} - b_A \cdot \frac{(N-Z)^2}{A} + b_P \cdot \delta \cdot A^{4/3}$$

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

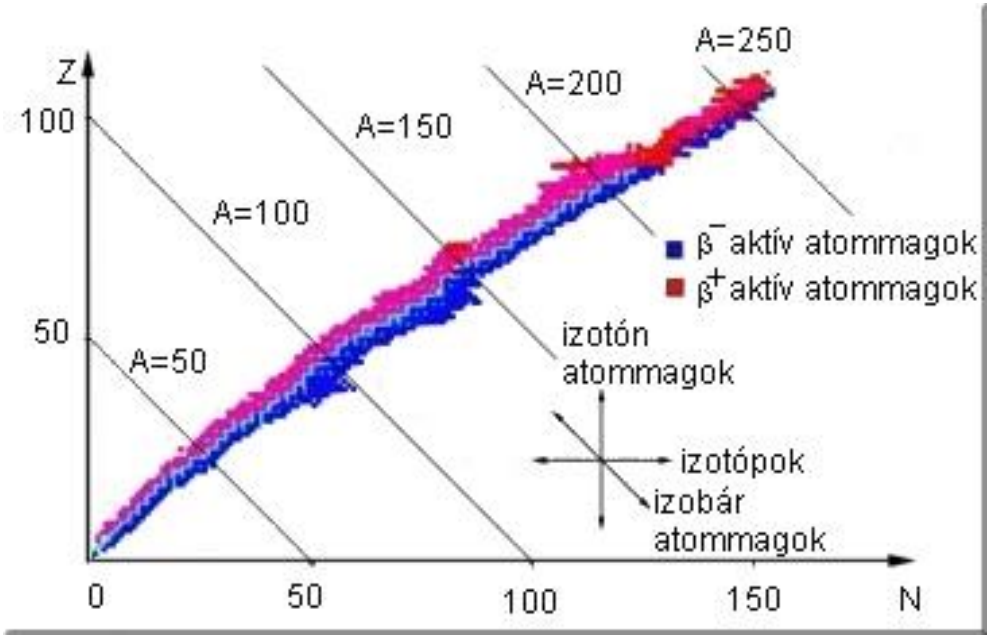
(egy nukleonra eső átlagos kötési energia)

Az *A* = konstans metszetek parabolák!





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

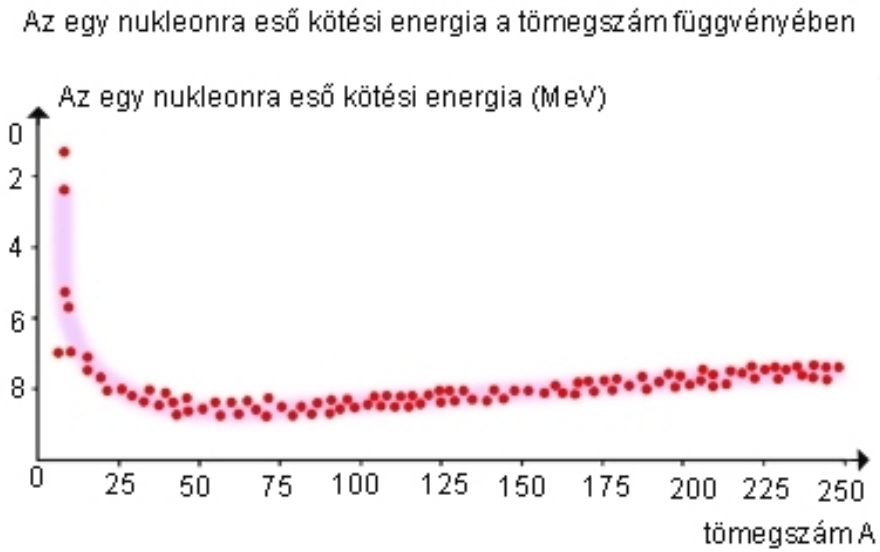


Z_{min} helye az (N,Z) „térképen”

Ennek segítségével értettük meg a radioaktív bomlásokat!

ε_{min} a tömegszám (A) függvényében

Ennek segítségével lehet megérteni az atomenergia felszabadítását !



Az atomenergia felszabadításának két útja:

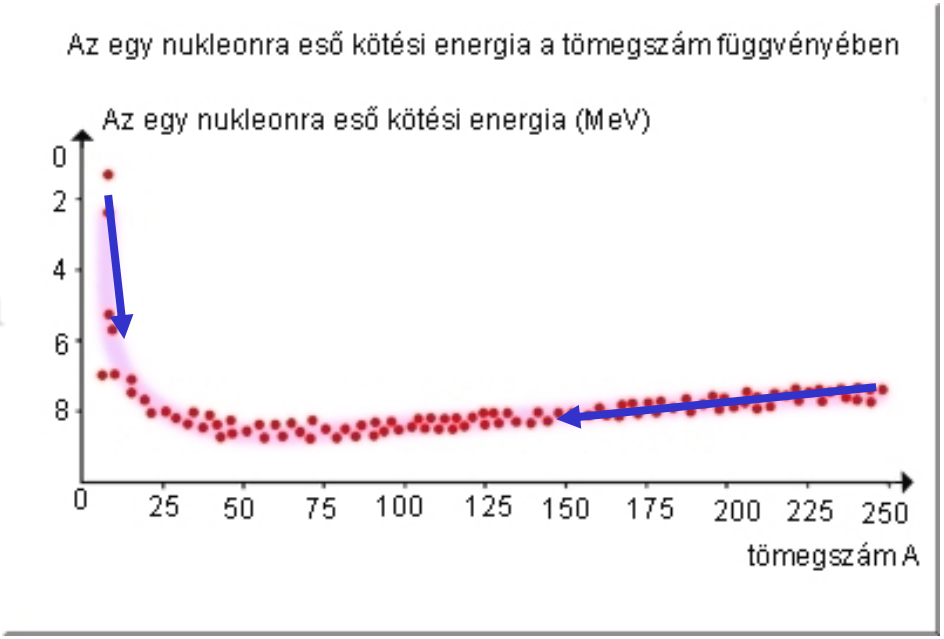
<u>Fúzió</u> (angolul: fusion)
(kis magokból nagyobbak)

<u>Maghasadás</u> (angolul: fission)
(nagy magokból kisebbek)

Például

$^{2}H + ^{3}H \longrightarrow ^{4}He + n$

(Q = 17,6 MeV)



Fúziónál:

- **nagy energianyereség/nukleon (~ 2 … 5 MeV/nukleon)**
- **kevés nukleon (~ 2 ... 5),**

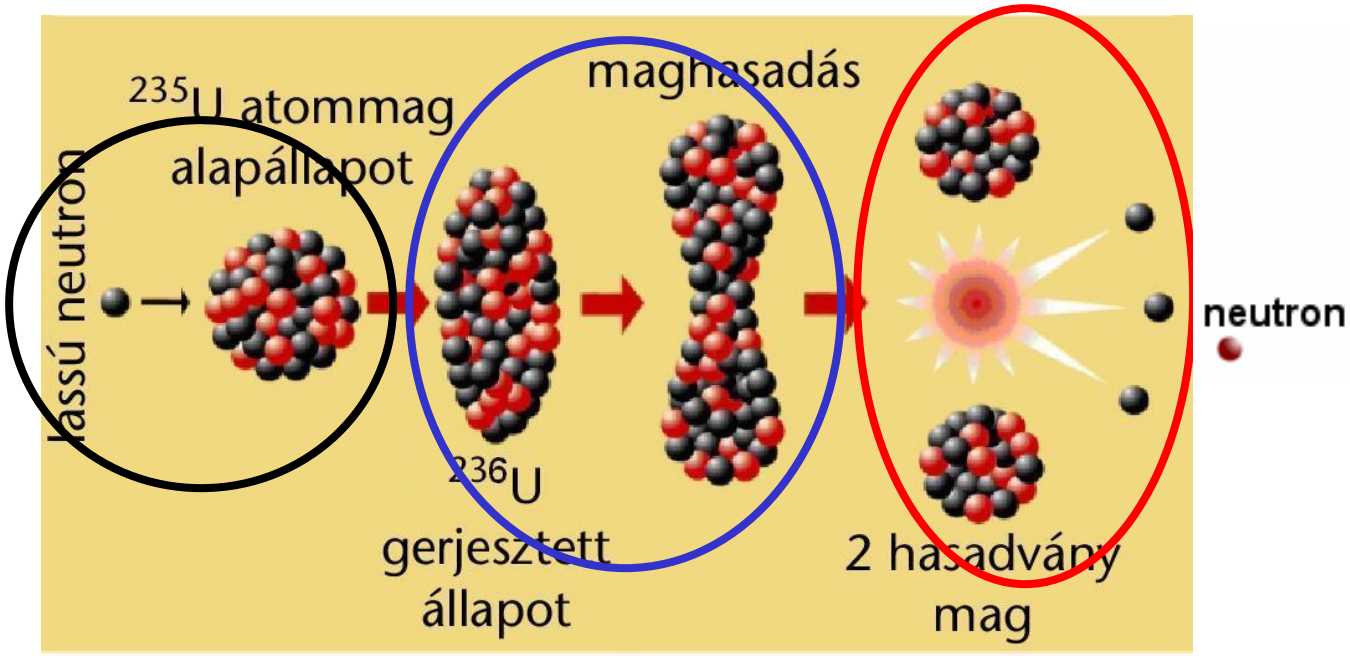
Összességében ~ 2 – 18 MeV

Maghasadásnál:

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

Összességében ~ 200 MeV

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:

$^{235}U + n \longrightarrow$ **Hasadvány$_1$ + Hasadvány$_2$ +** 2,4 n

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)

<u>A hasadványok tömegeloszlása</u>:

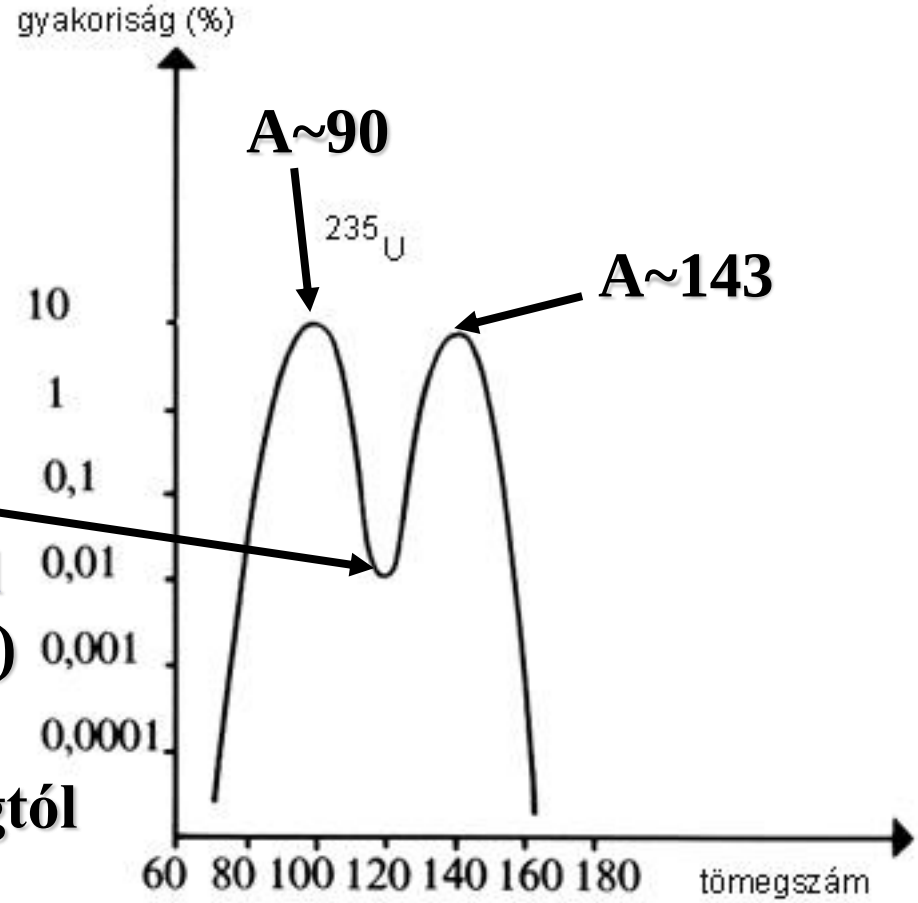
Szimmetrikus hasadás lenne:

$$^{236}_{92}U \rightarrow ^{118}_{46}Pd + ^{118}_{46}Pd$$

Az ábra szerint A~120 körüli hasadvány keletkezése ~1000-szer kevésbé valószínű

A hasadás nagy valószínűséggel aszimmetrikus ! **($^{235}U + n_{termikus}$)**

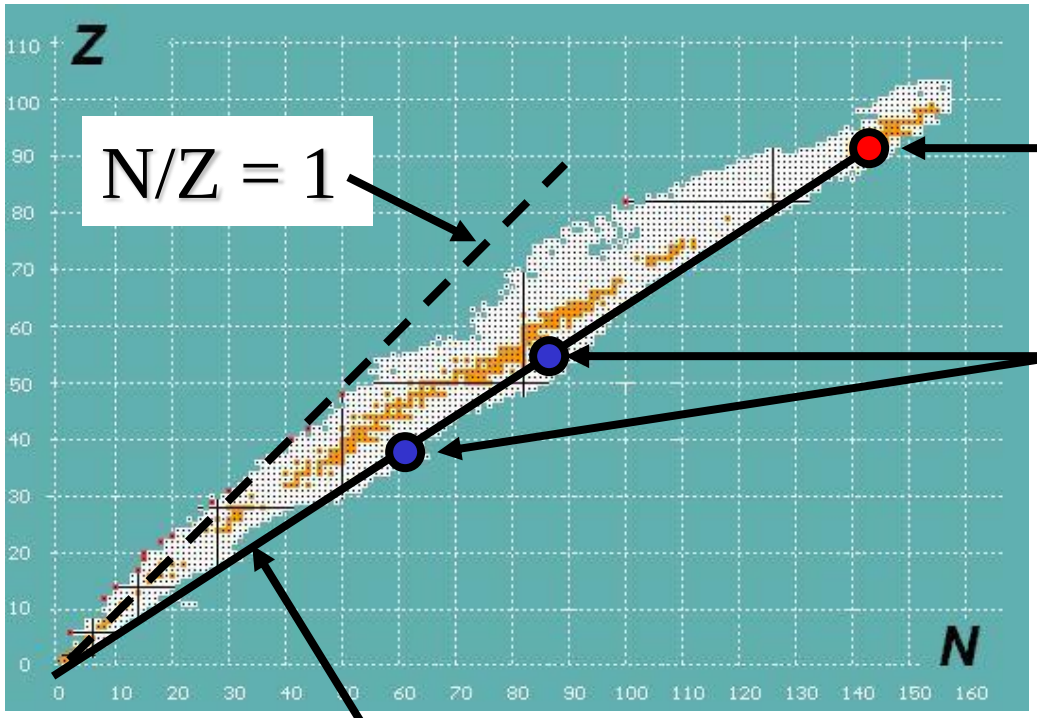
Az eloszlás függ a hasadó anyagtól és a neutronok energiájától is !



Maghasadás az (N,Z) „térképen”

$^{236}_{92}U_{144}$

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



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

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

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}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 antineutrinók által elvitt energia	10 MeV (4,9 %)
ÖSSZESEN	205 MeV (100%)

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

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.

<u>Megoldás:</u>

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

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{Z_1 Z_2 e^2}{d} = 168\cdot 1{,}6\cdot 10^{-13}\ \mathrm{J}$$

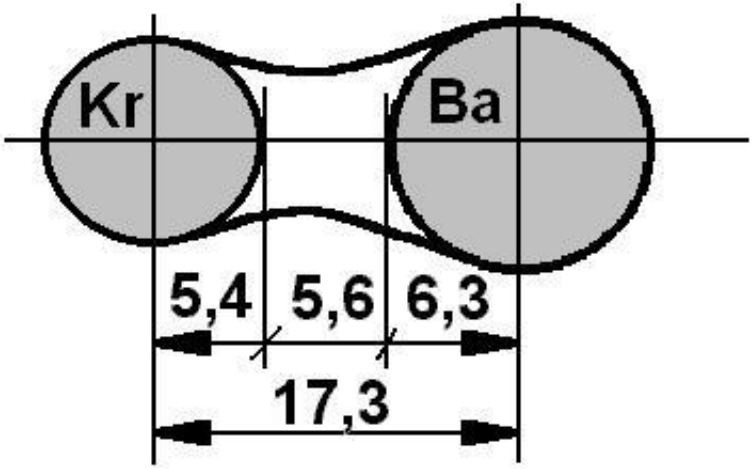
Itt Z_1=36 (Kr), Z_2=56 (Ba)

Ebből kapjuk: $d \sim 17{,}3$ fm

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

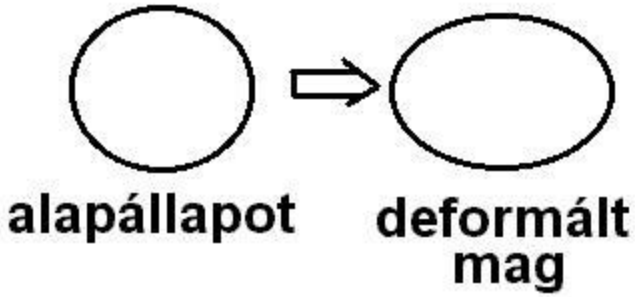
$R_{Kr} = 5{,}4$ fm, $R_{Ba} = 6{,}3$ fm

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 → nő $\quad b_F A^{2/3} \Rightarrow b_F A^{2/3}(1 + a_F \cdot \varepsilon)$
- Coulomb-energia → csökken $\quad b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} \Rightarrow b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}}(1 - a_C \cdot \varepsilon)$

  (protonok messzebb kerülnek)

Pontos számítások szerint az arányossági tényezők:

$a_F \sim 0{,}025$ **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!**

$$\left(0{,}025 \cdot b_F \cdot A^{2/3} - 0{,}012 \cdot b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right) < 0$$ **-ból:**

$$\boxed{\frac{Z^2}{A} \geq \frac{0{,}025 \cdot b_F}{0{,}012 \cdot b_C} \approx 54}$$

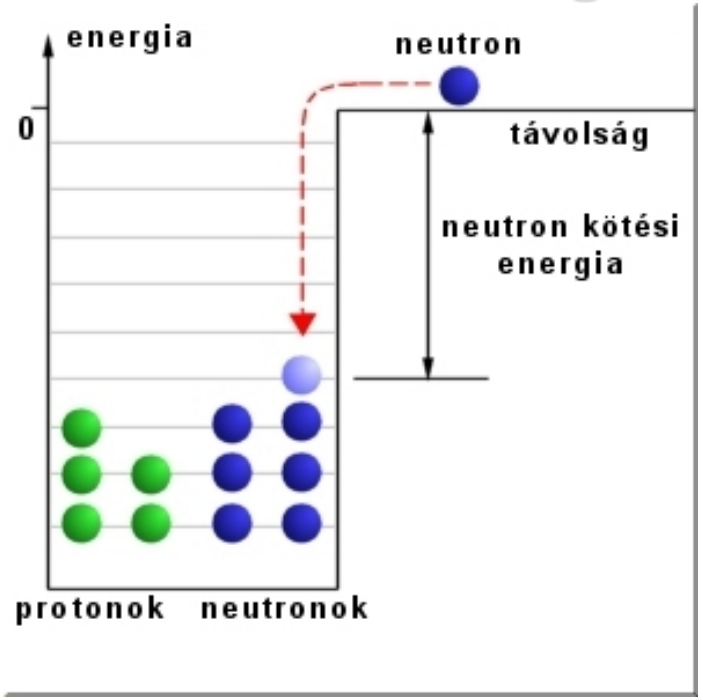
(mivel $b_F = 2{,}85 \cdot 10^{-12}$ **J,** $b_C = 0{,}11 \cdot 10^{-12}$ **J)**

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)**

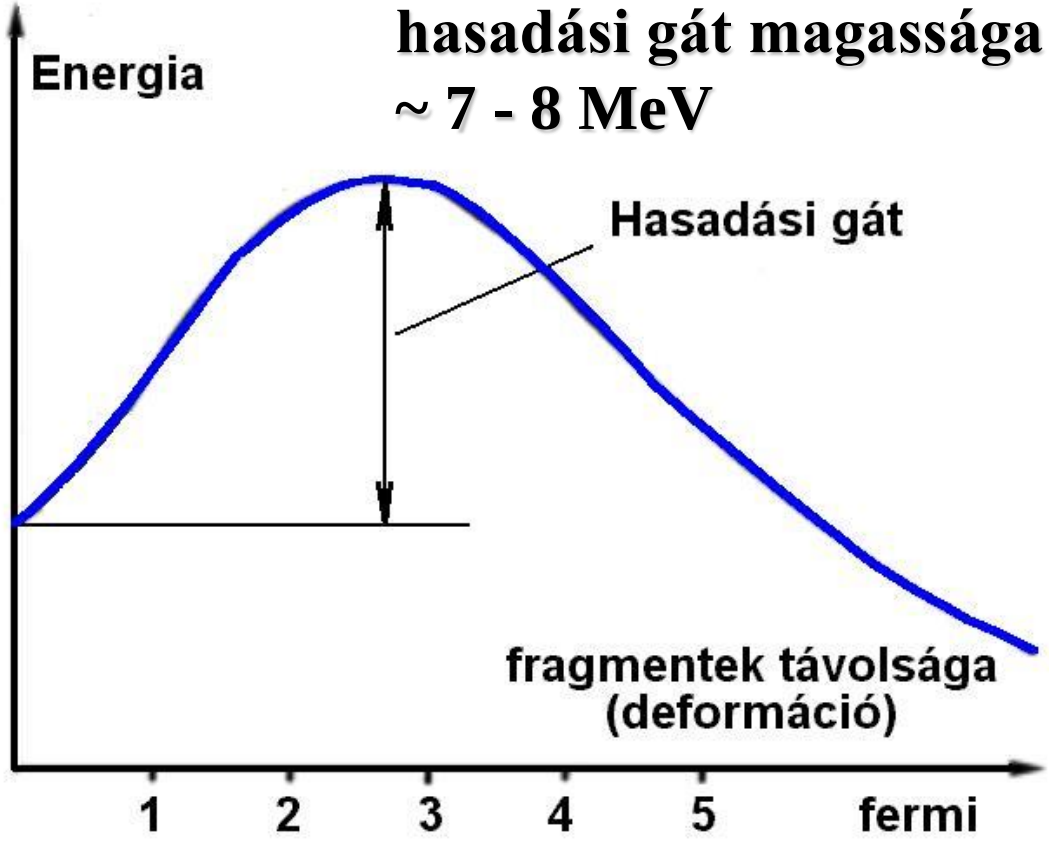
A Periódusos Rendszernek a maghasadás miatt van vége!!!

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

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



Az urán környékén a hasadási gát magassága ~ 7 - 8 MeV



A neutron kötési energiája fedezi a hasadás aktiválási energiáját!

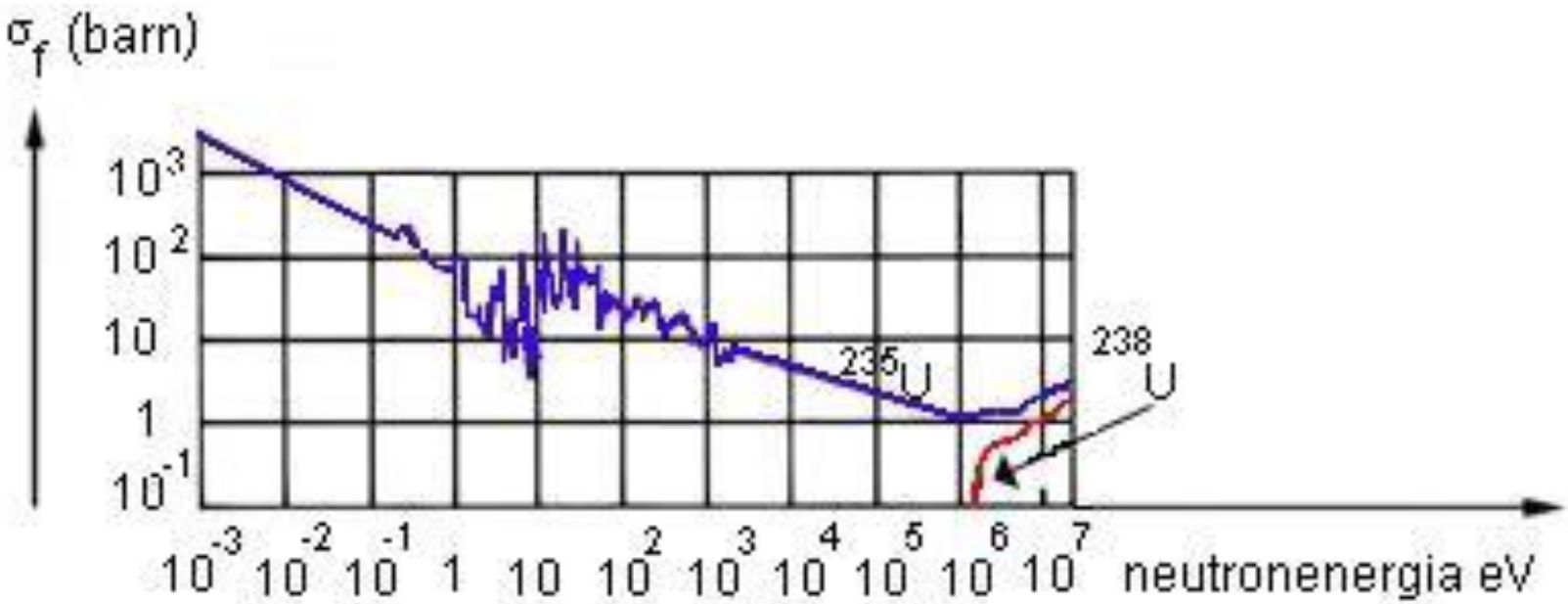
Párenergia fontossága:

$^{235}U + n$ **–ból páros-páros mag lesz (^{236}U) ⟶ nagyobb Q**

$^{238}U + n$ **–ból páratlan-páros mag lesz (^{239}U) ⟶ kisebb Q**

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

$^{238}U + n$ **–nál küszöbenergia van (~0,8 MeV)**



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

Hasadási neutronok

Láttuk: stabil magokhoz képest túl sok a neutron a maghasadás után ⟶ szükségszerű neutronok kibocsátása

A kibocsátott neutronok száma nem állandó, egy várható érték körül ingadozik. Gauss-eloszlás, félérték-szélessége ~2,5

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

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

Prompt (azonnali) neutronok

A neutronok legnagyobb része a maghasadás „pillanatában” kilép.

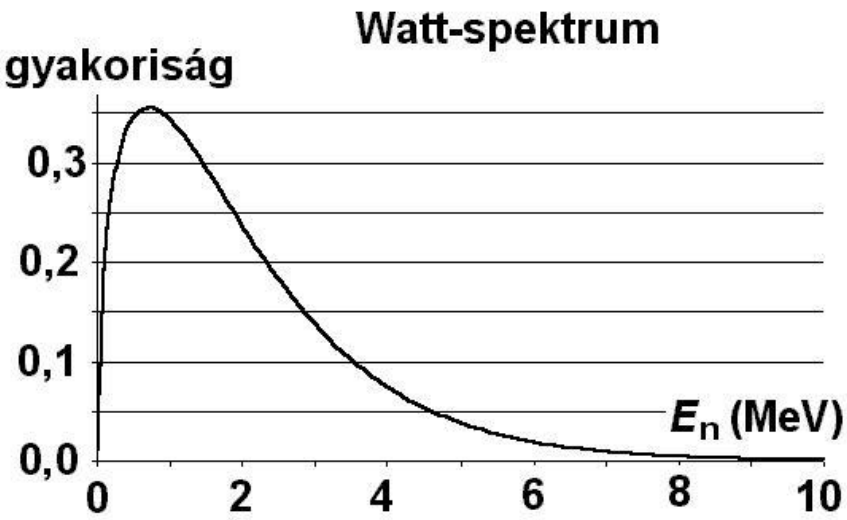
Ezek a prompt (azonnali) neutronok ($t < 10^{-16}$ s).

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 MeV)



Késő („delayed”) neutronok

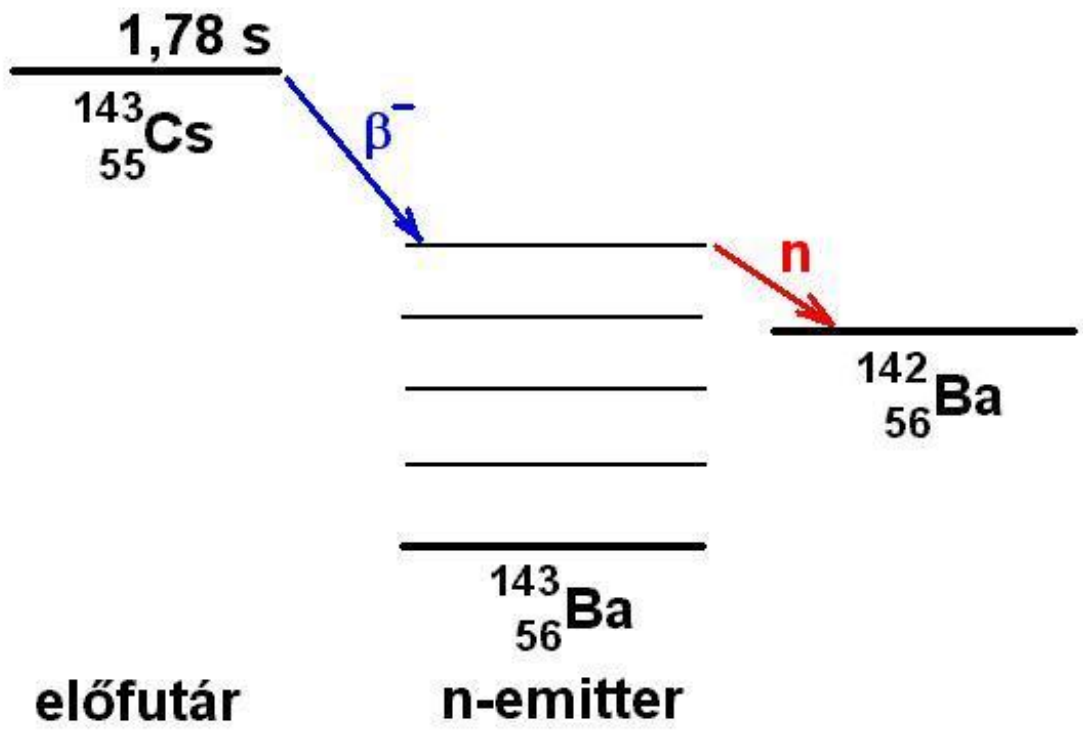
Láttuk: stabil magokhoz képest túl sok a neutron a maghasadás után ⟶ nagy neutronszámú hasadványok jönnek létre

Ezek mind β^--bomlók.

Néhány esetben előfordul, hogy a β^-- bomlás után olyan mag jön létre, amely neutronbomló ⟶ 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(MeV)	T_i(s)	β_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: $\beta =$ (késő n)/(késő+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!!