

# Tömegdefektus

Jelölje  $M(A, Z)$  az  $A$  tömegszámú és  $Z$  rendszámú atommag tömegét.

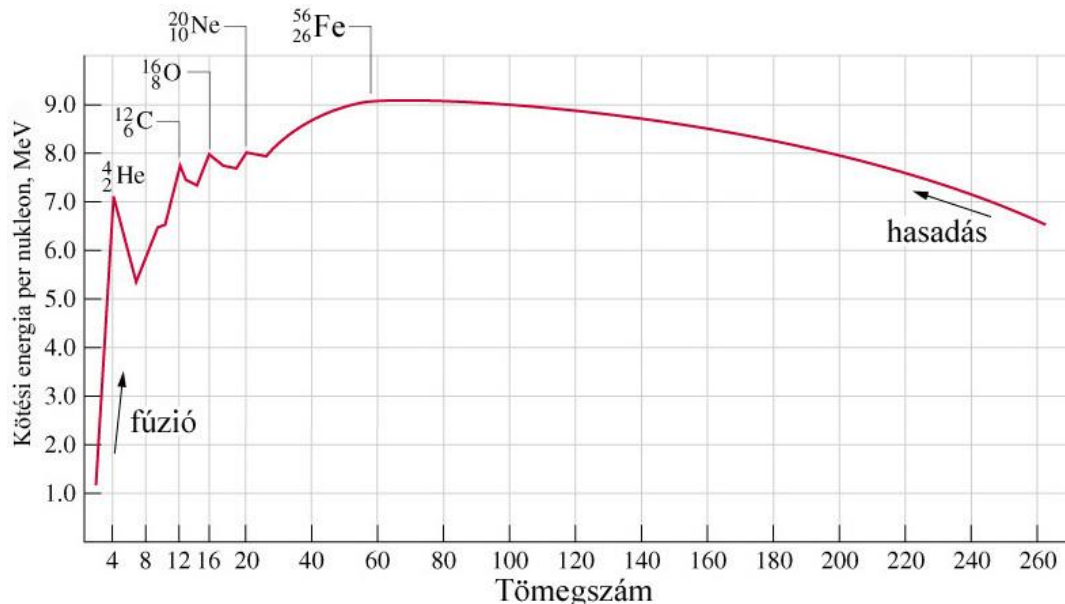
Tömegspektrométerrel megmérve azt kapjuk, hogy az atommag tömege  $\Delta m$ -el kisebb mint az alkotórészek (protonok és neutronok) tömege:

$$\Delta m = M(A, Z) - Zm_p - (A - Z)m_n < 0$$

Ez a **tömegdefektus** az Einstein-féle tömeg-energia ekvivalencia alapján kiszámolva éppen a **kötési energiát** adja meg (szabad alkotórészek  $\sim 0$  energiája negatív lett, mert kötött állapotba kerültek). Tehát a kötési energia adja meg mekkora energia befektetésével tudnánk újra alkotórészeire bontani az atommagot (vagy bármely kötött rendszert).

$$E_K = -\Delta mc^2$$

Az egy nukleonra jutó kötési energia meghatározható a tömegeket megmérve:  $\varepsilon = E_K/A$



Ha egy folyamat során  $\varepsilon$  csökken akkor energia szabadul fel.

pl. kis magok fúziója  
vagy nagy magok hasadása

$\varepsilon$  vasra a legnagyobb.

# Atommag folyadékcsépp modellje

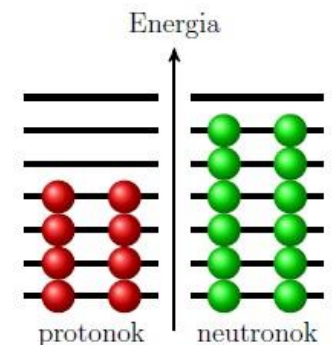
Atommag: elektromosan töltött folyadékcsépp

A modell alapja a hasonlóság:

- molekulák helyett nukleonok
  - vonzóerő hatótávolsága néhány molekula helyett néhány nukleon
  - kölcsönhatás minden részecskére vonzó, rövid távon taszítóvá válik (Pauli elv).
- Térfogati hatás: A nukleonra ható erő csak néhány szomszédtól ered. Tehát a kötési energia arányos  $A$ -val vagyis a térfogattal. Hozzájárulás:  $C_1 A$ .
  - Felületi hatás: a felületi nukleonoknak kevesebb a szomszédjuk, ezért csökkentik a kötési energiát számukkal arányos módon, vagyis a felülettel arányosan:  $-C_2 A^{2/3}$ .
  - Coulomb taszító hatás: a protonok taszítják egymást, a negatív energia hozzájárulás arányos a proton párok számával  $Z(Z - 1)/2$  és fordítottan arányos a mag sugarával. Tehát a hozzájárulás:  $-C_3 Z(Z - 1)/A^{1/3}$ .
  - Szimmetria hatás: nagy különbség  $N$  és  $Z$  között csökkenti a kötési energiát. Pauli elv miatt  $N - Z$  neutronnak  $(N - Z)$ -vel arányos többlet energiája van. Hozzájárulás:  $-C_4 (N - Z)^2/A$ .

Fél-empirikus kötési energia formula:

$$E_K = C_1 A - C_2 A^{2/3} - C_3 \frac{Z(Z - 1)}{A^{1/3}} - C_4 \frac{(N - Z)^2}{A}$$

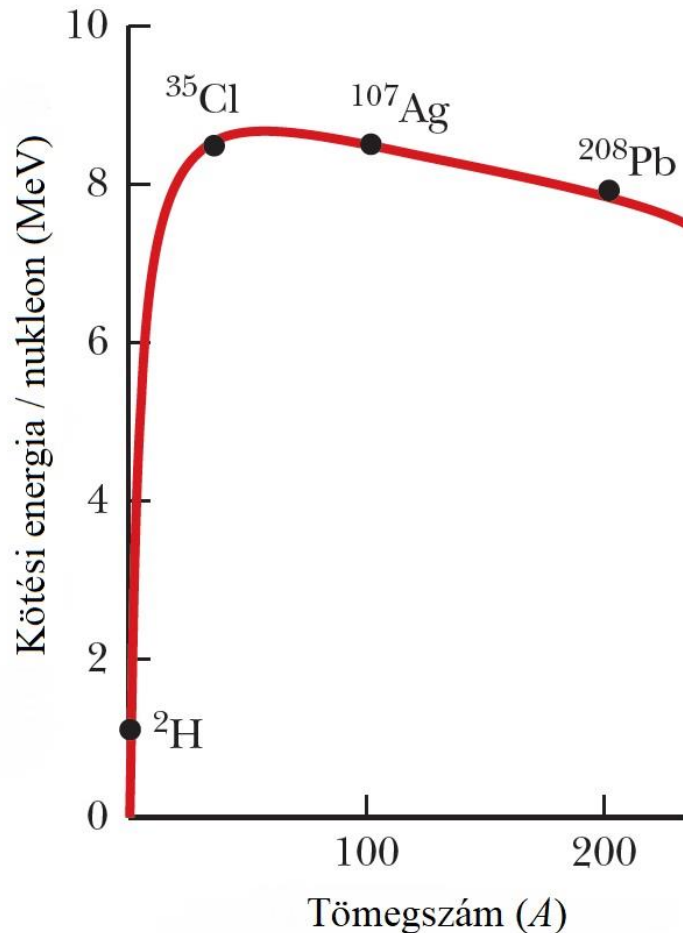


### Példa:

A fél-empirikus kötési energia formula 4db paramétere a kötési energiák kísérleti méréséből meghatározható. Amennyiben  $A \geq 15$  ezek az alábbiak adódtak:

$$C_1 = 15,7 \text{ MeV}, C_2 = 17,8 \text{ MeV}, C_3 = 0,71 \text{ MeV}, C_4 = 23,6 \text{ MeV}.$$

Számolja ki a tagok járulékát és a kötési energiát a  ${}_{30}^{64}\text{Zn}$  esetében!



# Független részecske modell / Héjmodell

A folyadékcsepp modell a kötési energia változását viszonylag jól írja le.

Néhány részletet viszont nem vesz figyelembe: stabilitási szabályok és perdület.

- legtöbb stabil atommag esetében az  $A$  páros. Valamint csak 8 stabil mag van, ahol  $N$  és  $Z$  páratlan.
- mágikus számok  $N$  és  $Z$  esetében (2, 8, 20, 28, 50, 82), ahol a kötési energia kiugró.

## Héjmodell:

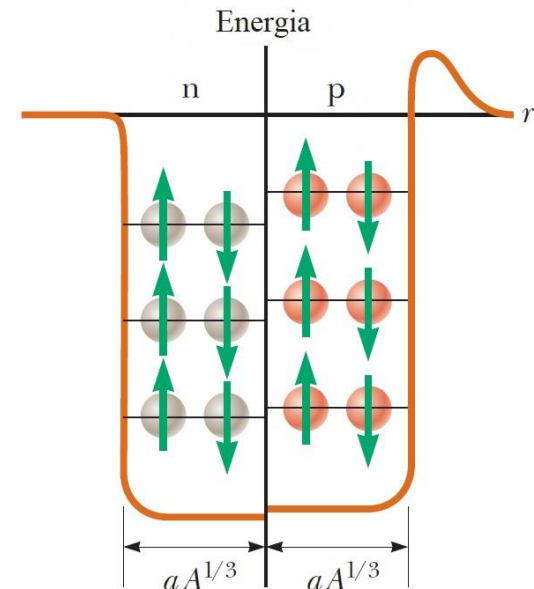
- Mindegyik nukleon egy külön héjban foglal helyet, kvantált energiaszintekkel.
- A protonok és neutronok ellentétes spinű párokba rendeződnek. Ha  $N$  vagy  $Z$  páratlan, akkor az csökkenti a kötési energiát.
- A protonok energiaszintjei magasabbak a Coulomb taszítás miatt.
- Nukleáris spin-pálya kölcsönhatás, amely magyarázatot ad a mágikus számokra.

Párenergia:

$$E_K = C_5 \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{ha } N \text{ és } Z \text{ páros-páros} \\ 0 & \text{ha páros-páratlan} \\ -1 & \text{ha páratlan-páratlan} \end{cases}$$

$$C_5 = 9,31 \text{ MeV}$$



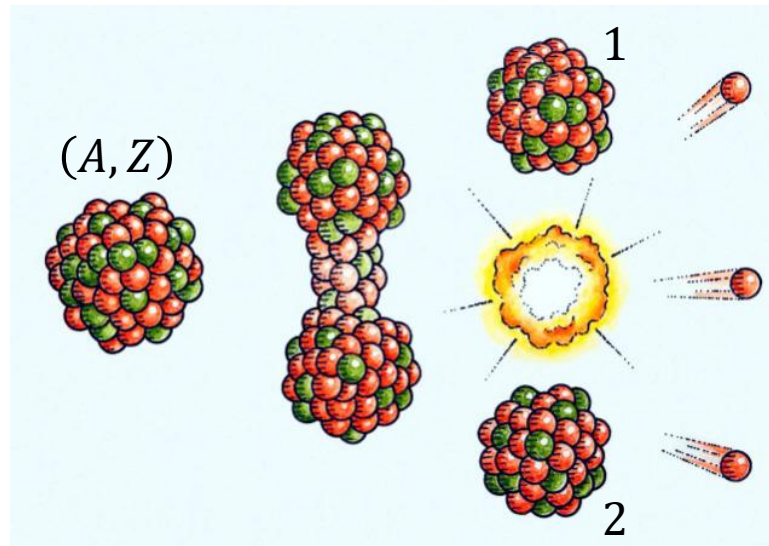
# Maghasadás

Nehéz atommagok (pl. tórium, urán, transzuránok) két közepes méretű atommagra hasadhatnak szét.

Ez lehet spontán folyamat, illetve történhet külső behatásra (pl. egy neutron elnyelése).

Eredmény: hasadványok + néhány neutron + energia felszabadulása

Hasadás feltétele:  $E_K(A_1, Z_1) + E_K(A_2, Z_2) - E_K(A, Z) > 0$



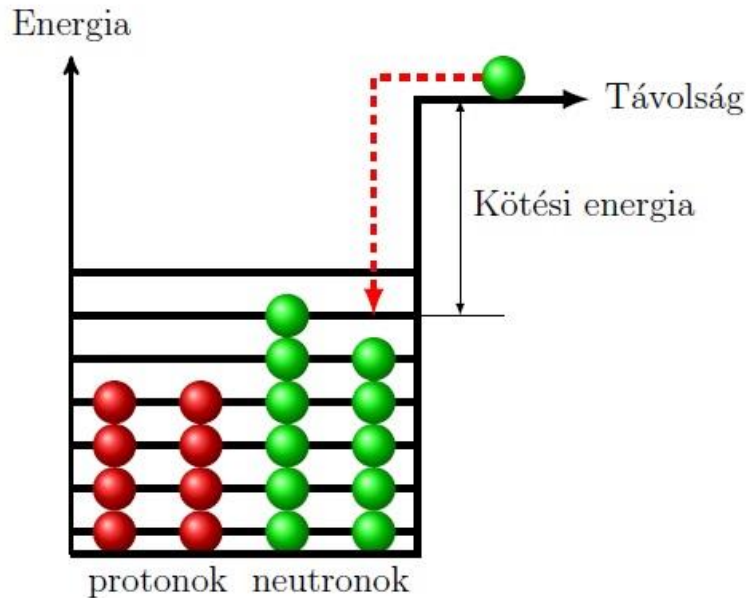
Hasadási gát: Attól, hogy a két hasadvány energetikailag kedvezőbb, nem fog minden nagy mag (pl. urán) széthasadni. Ennek oka a felülettel arányos energia tag, mely meggátolja a hasadáshoz szükséges felületnövekedést.

# Neutronnal előidézett hasadás

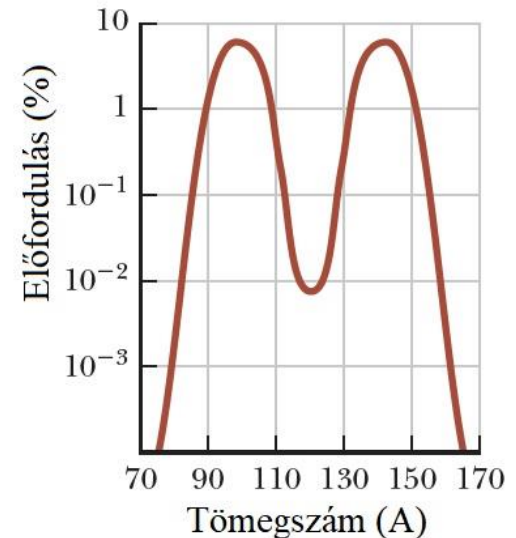
Termikus neutron befogásakor a neutron felszabaduló kötési energiája elegendő lehet a hasadási gát leküzdéséhez.

$^{235}_{92}\text{U}$ : páratlan-páros  $\rightarrow$  páros-páros **IGEN**

$^{238}_{92}\text{U}$ : páros-páros  $\rightarrow$  páratlan-páros **NEM**



Két hasadvány főként  
 $A \approx 95$  és  $A \approx 140$



Hasadásonként kb. 0,9 MeV energia szabadul fel nukleononként, tehát minden mag bomlásakor kb. **200 MeV**.

Hasadványoktól függően **2 vagy 3 gyors neutron** keletkezik (átlagban 2,5).

Példa:

Lassú neutron befogásának hatására az  ${}^{235}_{92}\text{U}$  atommag  ${}^{91}_{36}\text{Kr}$  és  ${}^{142}_{56}\text{Ba}$  magokra hasad ketté. Becsülje meg a felszabaduló energia nagyságát!

$$E_K = C_1 A - C_2 A^{2/3} - C_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - C_4 \frac{(N-Z)^2}{A} + C_5 \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{ha } N \text{ és } Z \text{ páros-páros} \\ 0 & \text{ha páros-páratlan} \\ -1 & \text{ha páratlan-páratlan} \end{cases}$$

$$C_1 = 15,7 \text{ MeV}, C_2 = 17,8 \text{ MeV}, C_3 = 0,71 \text{ MeV}, C_4 = 23,6 \text{ MeV}, C_5 = 9,31 \text{ MeV}$$



# Atomerőmű

Amennyiben a gyors neutronok lelassulnak és befogódnak (átlagban  $\geq 1$ )  $\rightarrow$  **láncreakció**.

Kontrollálatlan: atombomba

*Kritikus tömeg: ha az urántömb mérete elegendően nagy, akkor a neutronok abban lelassulnak és befogódnak.*

Kontrollált: **atomerőmű**

*Első önfenntartó láncreakció 1942 Chicago Fermi és Szilárd természetes uránérc cellákat grafit téglákkal (moderátor) választották el.*

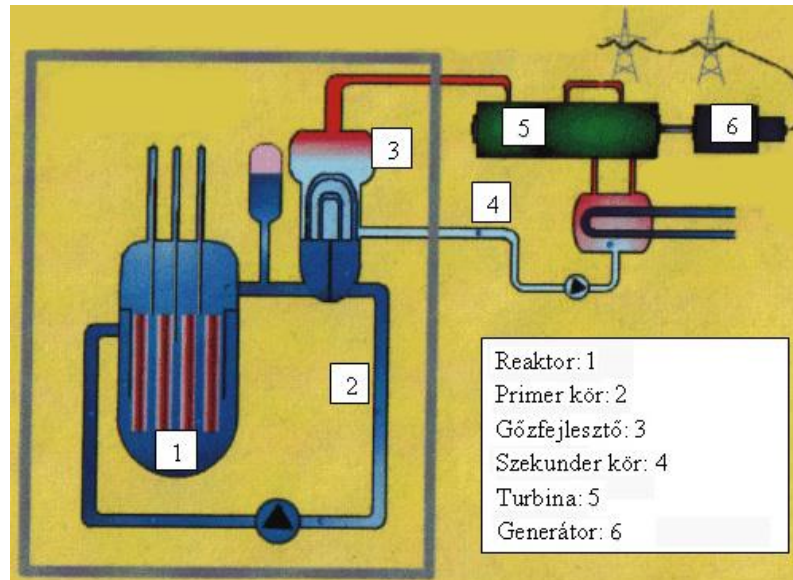
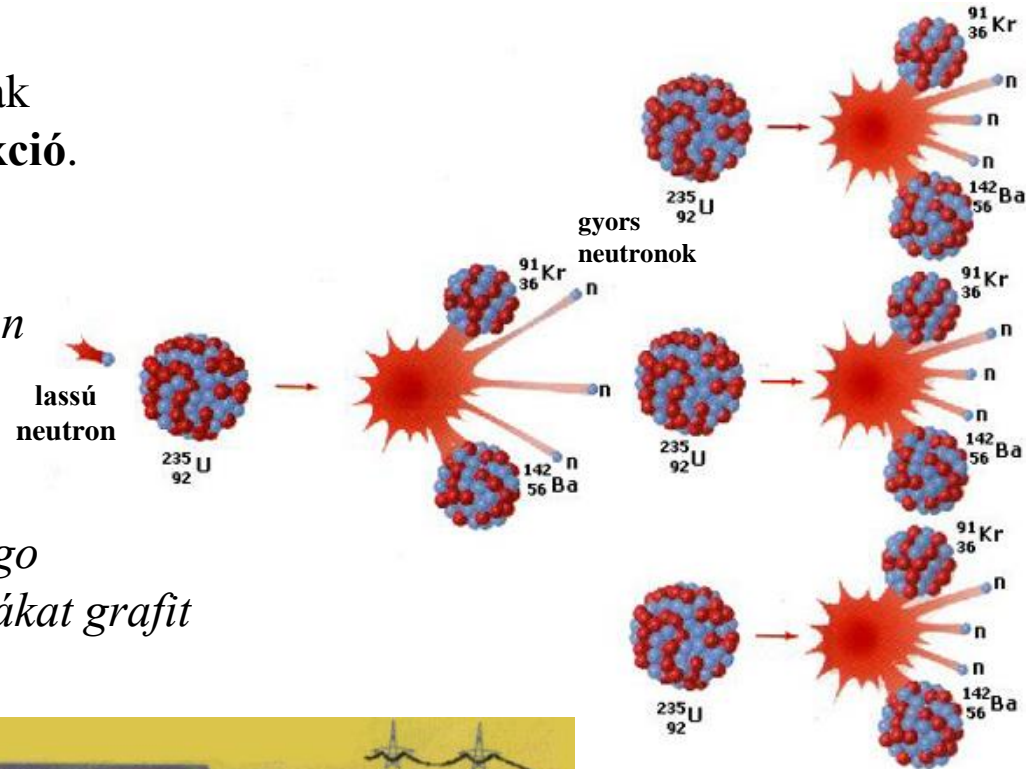
Sokszorosítási

tényező ( $k = n'/n$ ).

$n'$ : újabb hasadást idéző

$n$ : hasadások száma

Ha  $k$  egy alatti, de ahhoz közeli értéken van tartva akkor szabályozott módon energia termelhető.



moderátor anyagok:

- grafit
- nehézvíz
- közönséges víz

gyors neutronok lelassítása a hasadás érdekében.



Példa:

Egy atomreaktorban a sokszorosítási tényező  $k = 1,00025$ , és az egyes hasadási sorozatok (generációk)  $0,12$  ms időnként követik egymást. Kezdetben a reaktor teljesítménye  $10$  MW. Hányszorosára növekszik a reaktor teljesítménye  $1,5$  s alatt?

# Fúzió

Kisebb magok fúziójakor is energia szabadul fel, pl. a Napban ill. a hidrogén bombában hidrogénből hélium keletkezik.

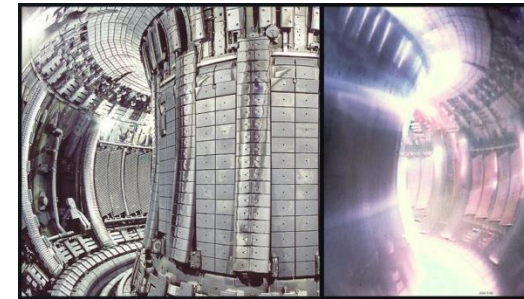
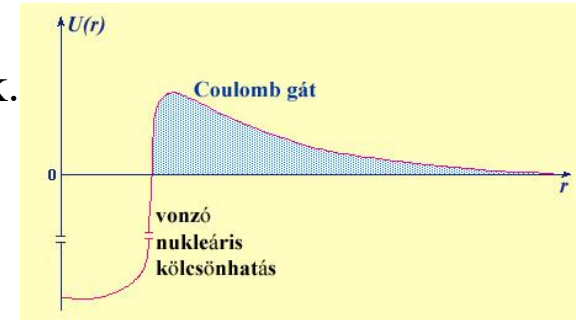
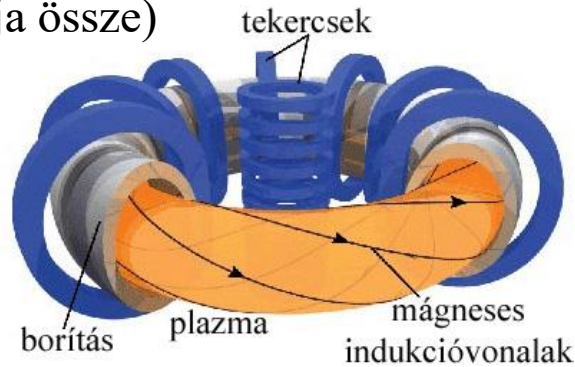
Probléma: a Coulomb-gát miatt több tízmillió fok hőmérséklet szükséges ahhoz, hogy a magok közötti fúzió létrejöhessen.

Bomba: hasadásos atombomba felhevíti

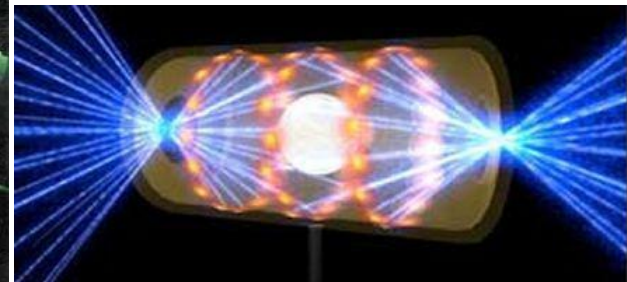
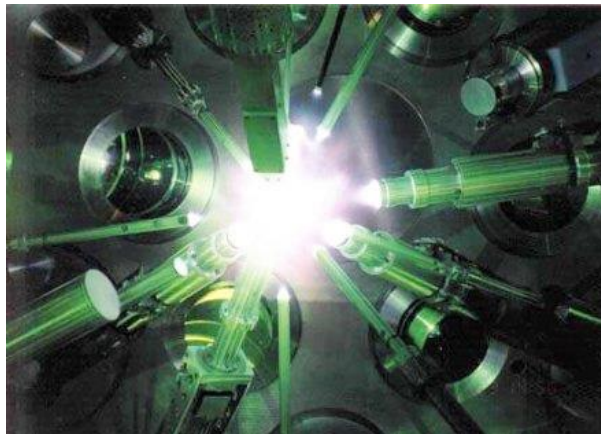
Erőmű: forró plazma együtt tartása eddig nem megoldott

Két típus:

1. Tokamak (mágneses palack tartja össze)



2. lézeres fúzió  
(pici cseppben a hidrogént a ráfókuszált lézerek begyűjtják)

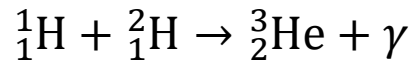
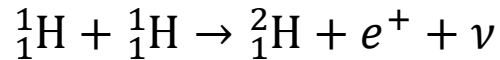


# Energiatermelés a Napban

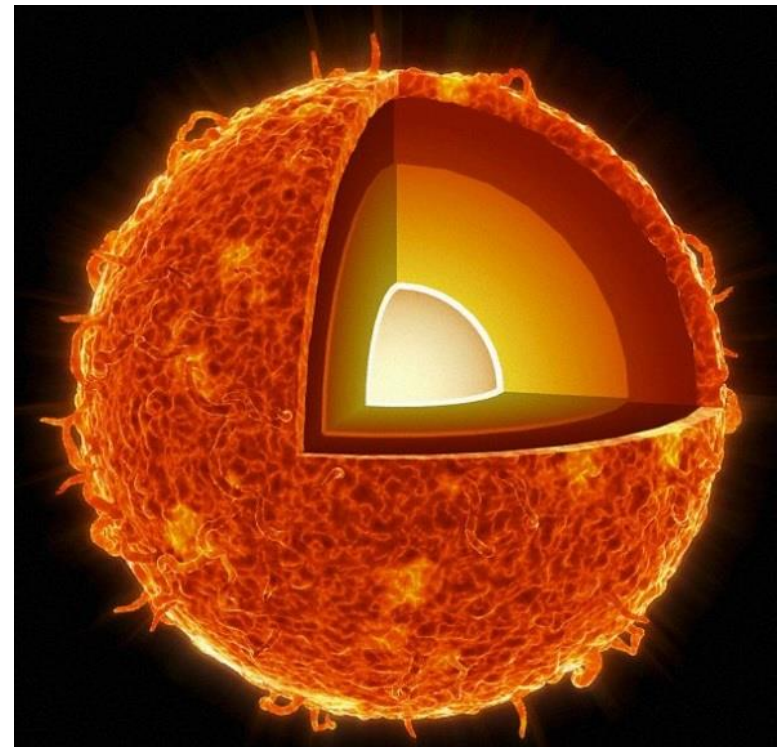
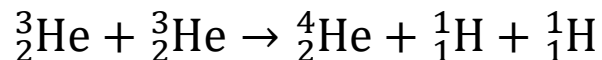
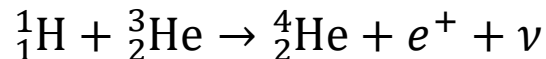
A Nap magjában a hőmérséklet kb. 15 millió K.

A magas hőmérséklet mellett az ott lévő plazma sűrűsége és nyomása is óriási, amelyet a gravitációs vonzás tesz lehetővé.

Az itt zajló fúziós folyamatot nevezik **proton-proton ciklusnak**:



A második folyamatot hidrogén-hélium vagy hélium-hélium fúzió követi:



# Energiatermelés fúziós erőműben

A proton-proton ciklus fúziós reaktorban nem alkalmazható, mert a Nap magjában uralkodó nyomás és sűrűség nem reprodukálható.

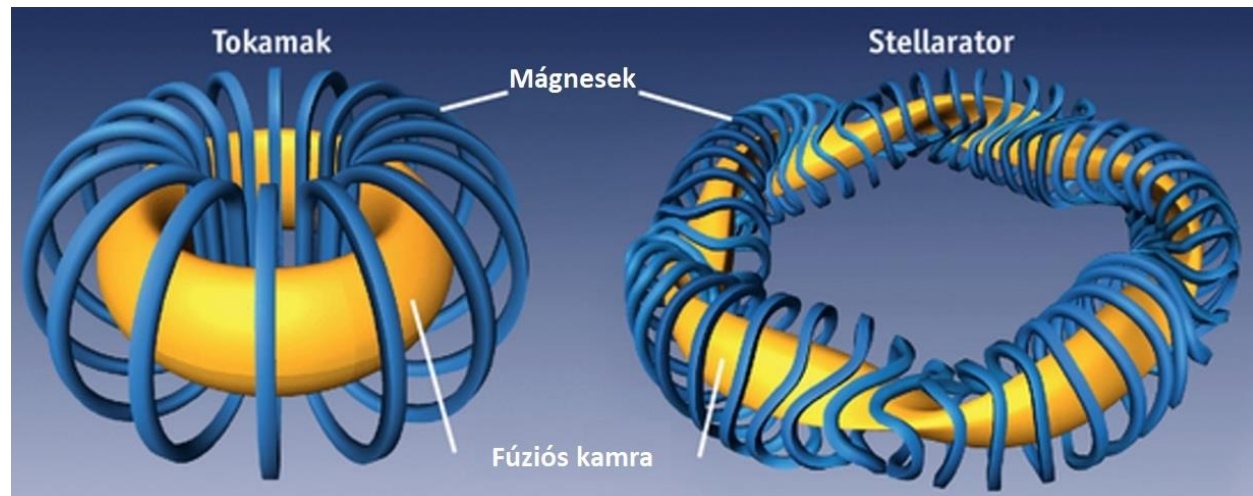
Az alábbi folyamatok lehetségesek:



A **deutérium** szinte korlátlan mennyiségben van jelen a természetben, a vízből könnyen kinyerhető.

A trícium azonban radioaktív, kevés van belőle, mesterségesen kell létrehozni.

Felezési ideje 12,3 év.



### Példa:

Ahhoz, hogy a magerő le tudja győzni a Coulomb taszítást két deutérium mag között, azoknak kb.  $10^{-14}$  m távolságra meg kell közelíteniük egymást.

(a) Mekkora a taszítóerő potenciáljátja ebben a távolságban MeV egyégekben?

(b) Mekkora hőmérsékleten van a deutériumnak akkora kinetikus energiája, hogy ennyire közel tudjon kerülni? (Boltzmann konstans:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K)

