

Korszerű nukleáris energiatermelés – Fúzió 1.

Magfizikai alapok, plazma alapok, MHD,
energiamérleg, anyagmérleg

Pokol Gergő



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BME NTI

Korszerű nukleáris energiatermelés

2019. szeptember 11.

Energiatermelés kötési energiából

Példa: 1 GW-os erőmű anyagszükséglete

Napi energiatermelés: $\approx 8 \cdot 10^{13}$ J/nap

- **Az atomhéj energiája**

Felszabaduló energia: ≈ 0.1 eV/atom $\approx 10^{-20}$ J/atom

Energiasűrűség: $\approx 10^7$ J/kg

Napi anyagszükséglet: $\approx 10^6$ kg/nap

- **Az atommag energiája**

Felszabaduló energia: ≈ 1 MeV/atom $\approx 10^{-13}$ J/atom

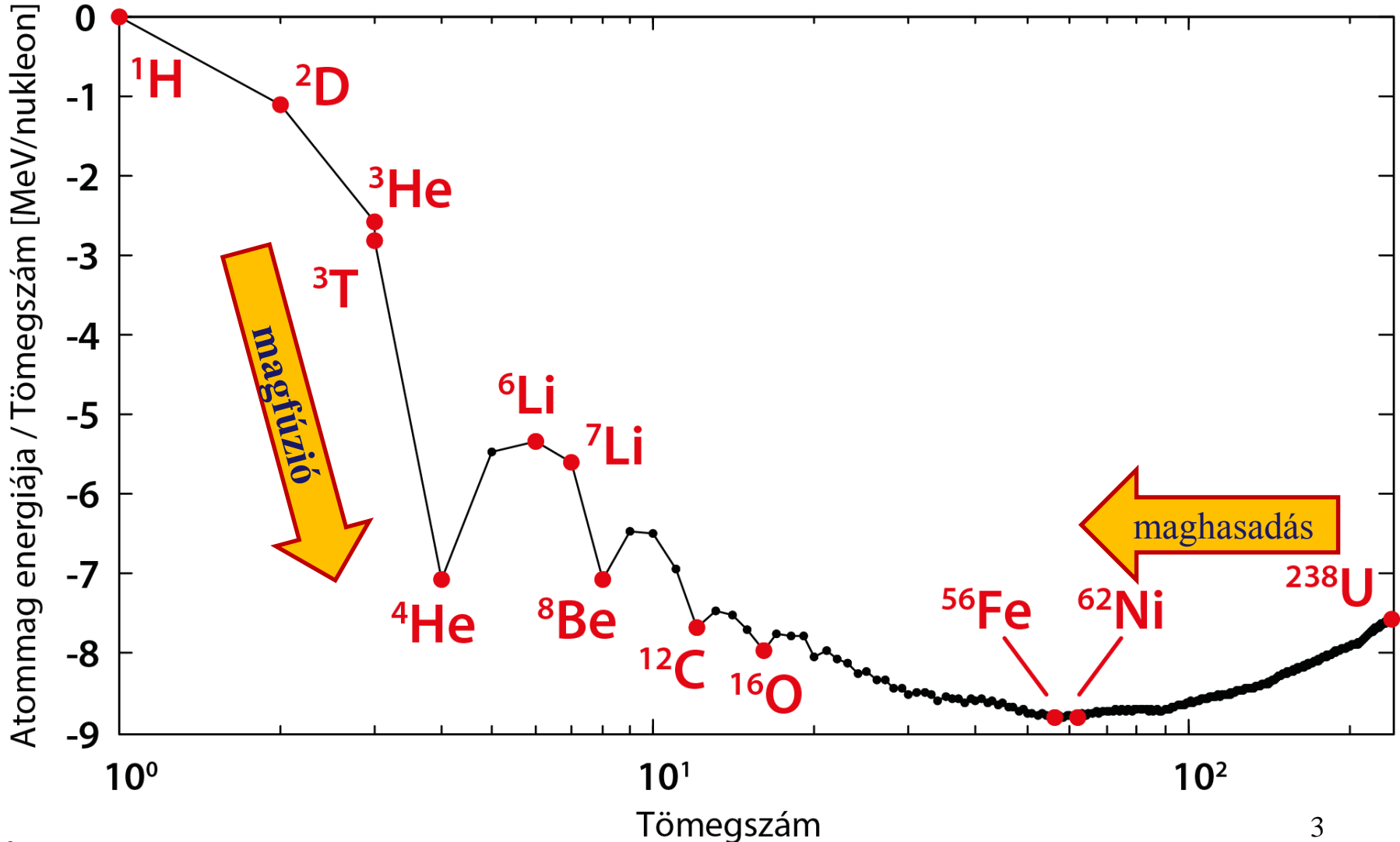
Energiasűrűség: $\approx 10^{14}$ J/kg

Napi anyagszükséglet: $\approx 10^{-1}$ kg/nap

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx 1.16 \cdot 10^4 \text{ K}$$

Magenergia felszabadítása

Egy nukleonra eső kötési energia

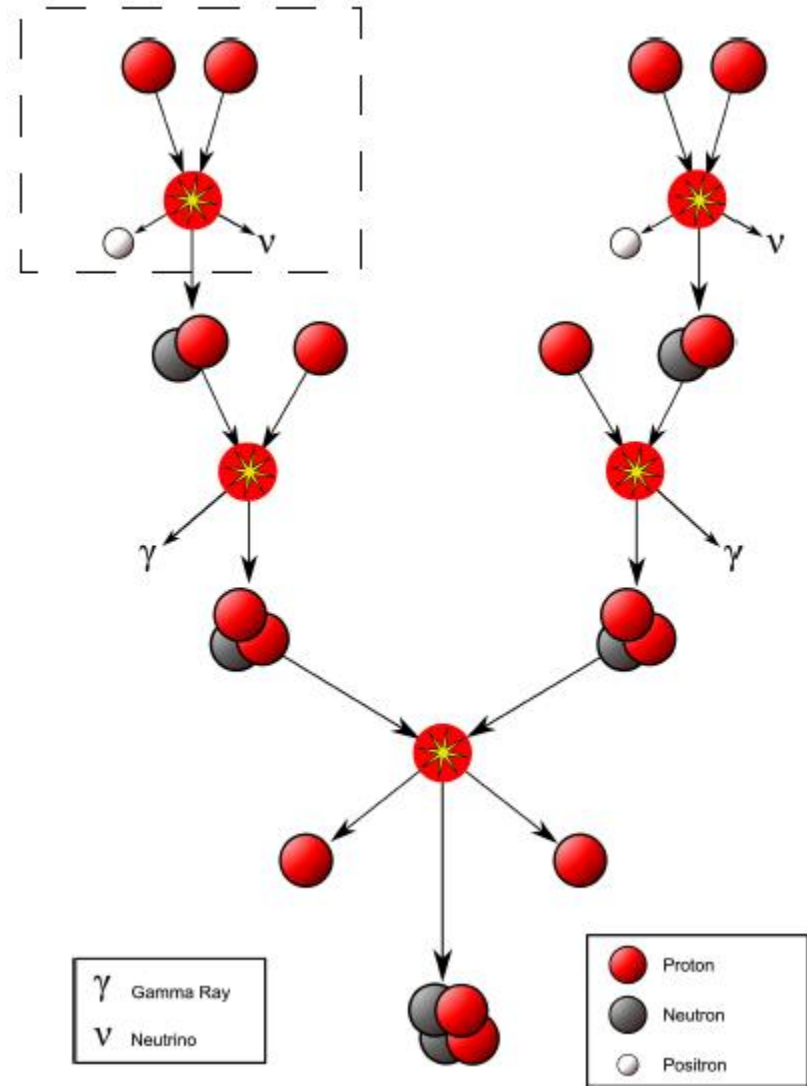


A Nap energiatermelése

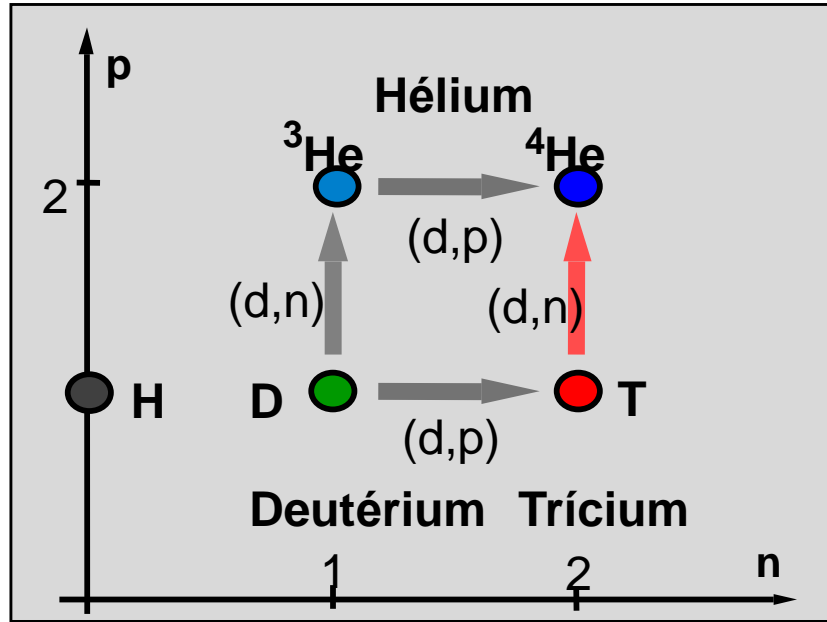
Több fajta reakció: p-p láncok, CNO ciklus.

Mindig van benne $p \rightarrow n$ átalakulás, ami **NAGYON** ritka.

A szükséges hőmérséklet csak ~ 1 keV, de csak napnyi anyagmennyiség esetén működik, a teljesítménysűrűség ~ 0.2 mW/kg (emberi test: 1.3 W/kg).



Fúziós magreakciók



A szóbajövő magfizikai folyamatok jól ismertek **gyorsító**s kísérletekből:



Lehet-e gyorsítóval energiát termelni?

A reakciók küszöbenergiája $E_0 \approx 10\text{-}100\text{ keV}$. Gyorsítsuk föl az egyik magot erre az energiára és lőjük bele a másikba!

A magok σ_s hatáskeresztmetszettel szóródnak a másik mag Coulomb terében és $\sigma_f \approx 10^{-5} \sigma_s$ hatáskeresztmetszettel fuzionálnak. Amennyiben a magok fuzionálnak, $E_f \approx 10^3 E_0$ energia szabadul föl. Az energiamérleg másodpercenként N mag gyorsítása esetén:

$$P_{ki} = \frac{dN}{dt} E_0 + \frac{\sigma_f}{\sigma_s + \sigma_f} \frac{dN}{dt} E_f = P_{be} \left(1 + \frac{\sigma_f}{\sigma_s + \sigma_f} \frac{E_f}{E_0} \right) \approx 1.01 P_{be}$$

Gyorsítóval nem lehet energiatermelő reaktort építeni!

Ha a céltárgy termikus egyensúlyba kerül a nyalábbal, akkor az ütközések során az átlagos energiacsere nulla.

Fúziós energiát termelni csak termikus közegben lehet!

A reakciók hatáskeresztmetszete termikus közegben

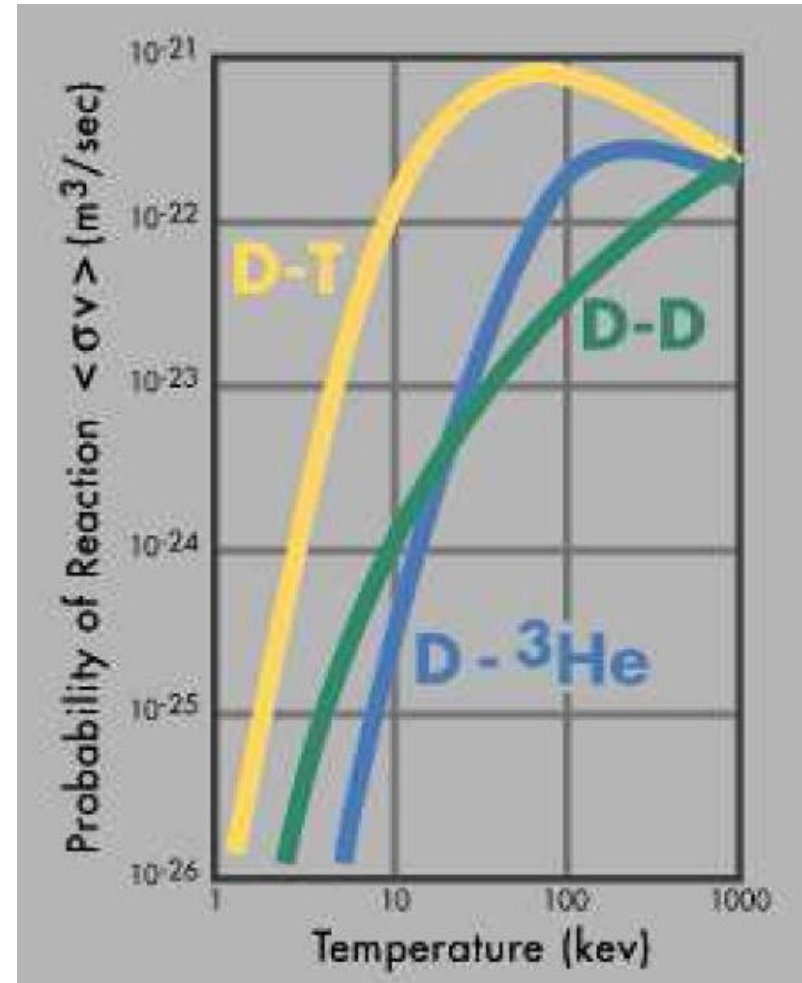
A reakció valószínűségét termikus közegben a rátaegyüttható jellemzi:

$$\langle \sigma v \rangle = \int \sigma(v) v f_M(T, v) dv$$

ahol σ a hatáskeresztmetszet és v a sebesség. Egy részecske n sűrűségű közegben másodpercenként átlagosan

$\langle \sigma v \rangle n$ reakciót szenved el.

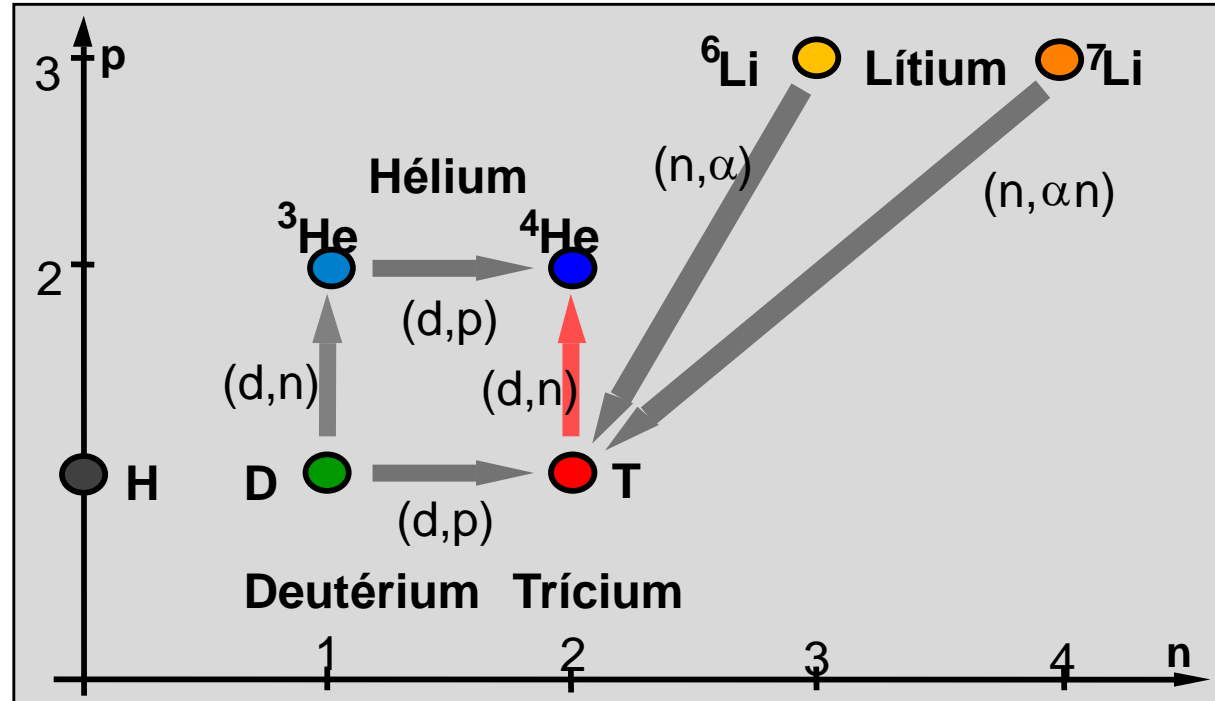
Legkönnyebben a D-T reakciót lehet megvalósítani!



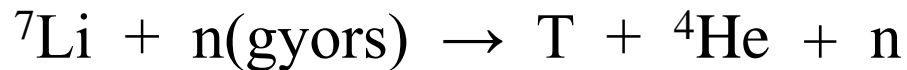
D-T reakció kiinduló anyagai

Minden 6000-edik hidrogén mag **deutérium**, vízből nagy mennyiségben kinyerhető.

A **trícium** radioaktív, csak nyomnyi mennyiségben fordul elő.



A tríciumot tenyészteni kell lítiumból!



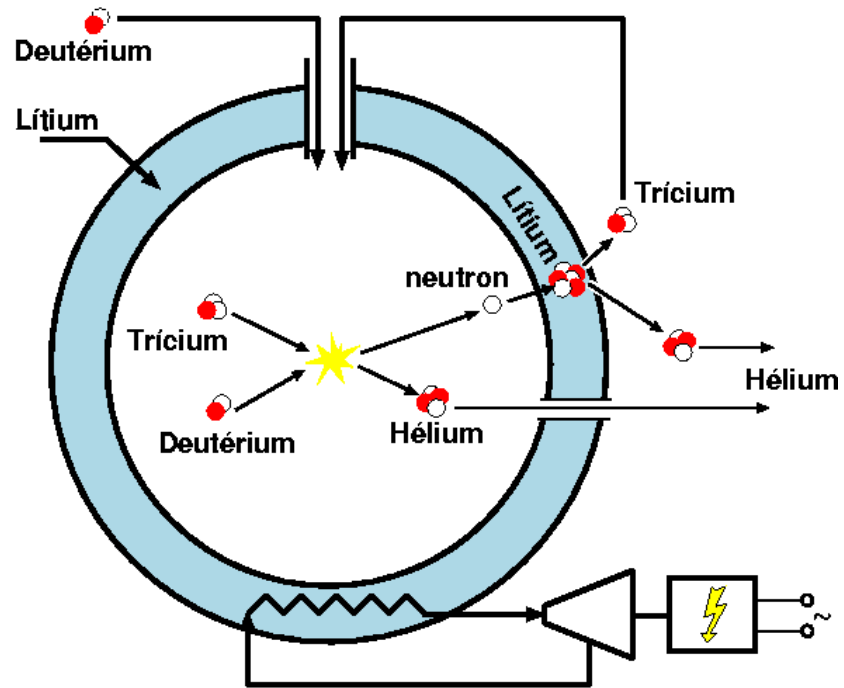
Trícium szaporító köpeny

A tríciumot a reaktor körüli köpenyben lehet előállítani lítiumból. Ez a trícium szaporító köpeny (Tritium Breeding Blanket, TBM).

A trícium radioaktív (β -bomló), és vízként bejuthat az élő szervezetbe, ezért egy zárt ciklusú fúziós erőműben a trícium mennyiségét minimalizálni kell!

A fúziós reakcióban nem keletkeznek radioaktív izotópok!

Az erős neutronsugárzás miatt a reaktor szerkezeti anyaga felaktiválódik, de ez speciális anyagválasztással minimalizálható.

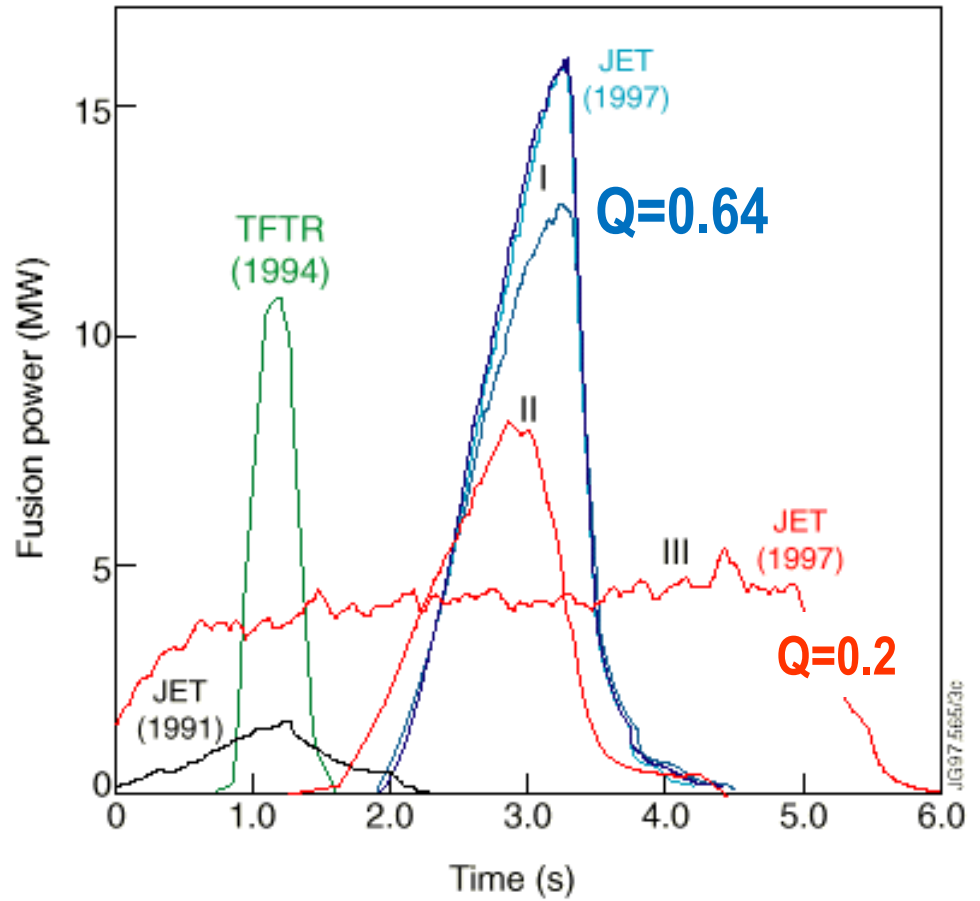


Fúziós reaktor energiamérlege

A fúziós reaktor energiasokszorozását a Q tényezővel szokás jellemezni:

$$Q = \frac{P_f}{P_h}$$

ahol P_h a külső plazmafűtés teljesítménye, P_f a felszabaduló fúziós teljesítmény.

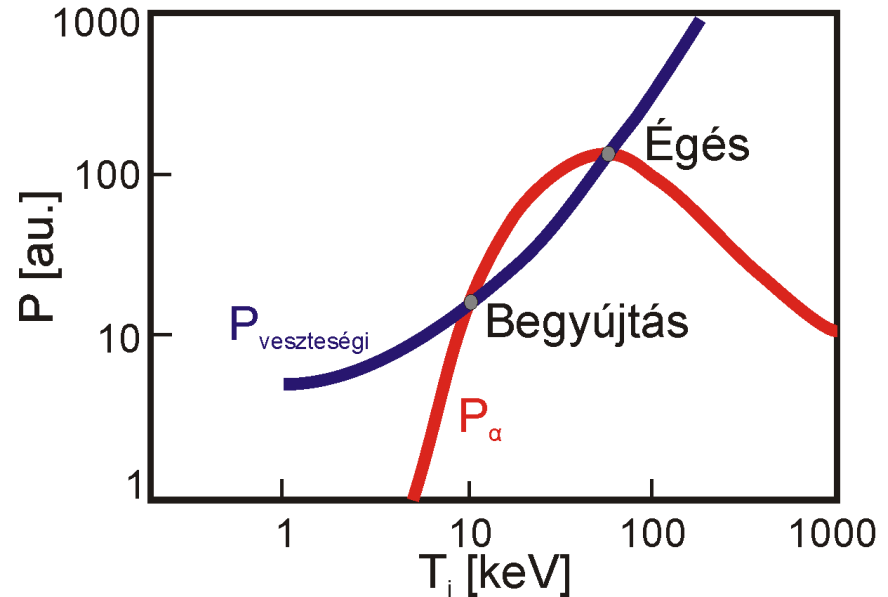


A $Q=1$ pontot „**break even**”-nek nevezzük. A reaktor üzemeltetése szempontjából ennek nincs jelentősége.

Fúziós plazma energiamérlege

A fúziós reakcióban felszabaduló energia jelentős részét (~20%) az α -részecskék viszik el. Ha ezeket a plazma többi töltött részecskéjével együtt össze tudjuk tartani, akkor az **α -részecske fűtés** meghaladhatja a veszteségeket.

Mivel ekkor nem kell külső plazmafűtés, ezért $Q = \infty$.



Amikor ez bekövetkezik, akkor a plazma **begyújt** (ignition). A hőmérséklet megemelkedik, de a folyamat nem tud megszabadni: az **égési pontban** a plazma stabil állapotban marad, amíg a gázösszetételt és más körülményeket fenn tudjuk tartani.

A begyűjtés feltétele

Az 50-50 százalékos, n sűrűségű, V térfogatú, T hőmérsékletű D-T keverékben felszabaduló fúziós teljesítmény arányos az **α -fűtés teljesítményével:**

$$P_{\alpha} = V \left(\frac{n}{2} \right)^2 C(T)$$

A plazma **veszteségi teljesítményét** az **energiaösszetartási idő** jellemzi

$$P_{loss} = \frac{V \frac{3}{2} nkT}{\tau_E}$$

Ha $P_{\alpha} > P_{loss}$, akkor $n\tau_E \geq \frac{6kT}{C(T)}$

Optimális hőmérsékleten ez a **Lawson kritérium:**

$$n\tau_E \geq 10^{20} \text{ sm}^{-3} \quad T_i = 25 \text{ keV}$$

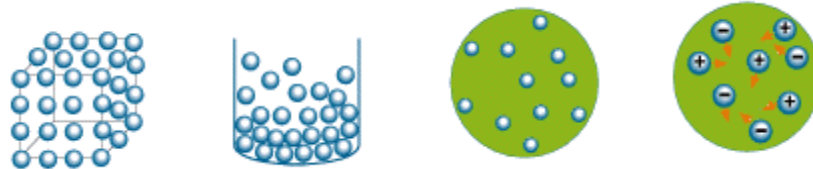
Az optimális hőmérséklet körül **fúziós hármasszorzat:**

$$n\tau_E T_i \geq 10^{21} \text{ keVsm}^{-3}$$

Mi az a plazma?

Ha egy gáz részecskéinek átlagos kinetikus energiája (esetükben ~ 10 keV) nagyobb, mint az alkotó elemekben lévő elektronok kötési energiája (H: 13.6 eV), az elektronok (teljesen vagy részben) leszakadnak az atommagokról.

Elektronok és **ionok** (és esetleg semleges részecskék) keveréke jön létre, ez a **plazma**.



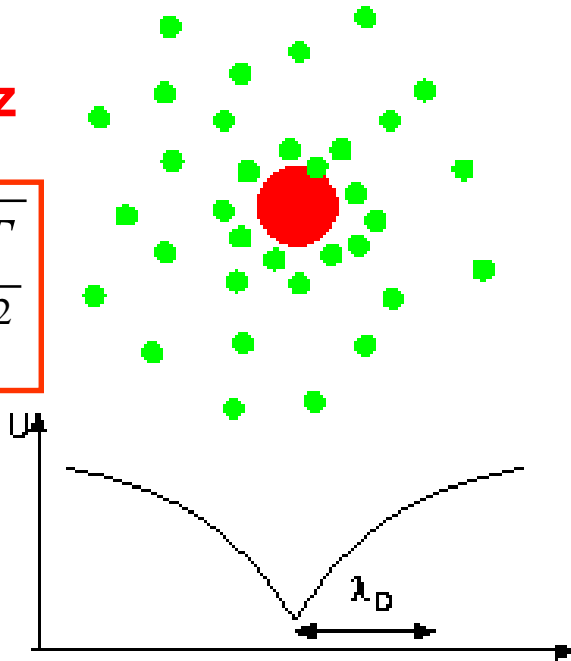
Az Univerzumban a látható anyag legnagyobb része plazma halmazállapotban van, és számos földi alkalmazás is van.

A plazma tulajdonságai

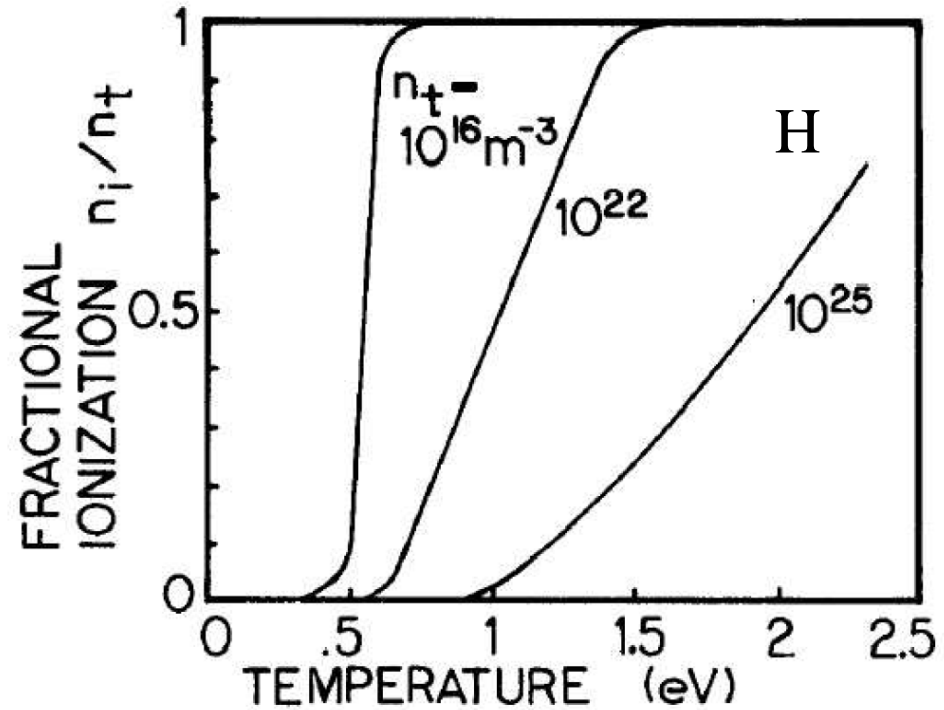
Árnyékolás: Tegyük egy próbatöltést a plazmába! Ekkor a plazma elektronjai és ionjai úgy fognak mozogni, hogy a kialakuló erőter a próbatöltés terét leárnyékolja.

Debye-hossz

$$\lambda_{De} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{n_{e\infty} e^2}}$$



Ionizációfok: A plazma elektronok, ionok és semleges atomok keveréke. Sohasem 100%-ban ionizált, lehet erősen vagy gyengén ionizált.



A plazma definíciója

- **kvázisemleges** (az elektronok és ionok össztöltése lokálisan megegyezik)

$$\lambda_D \ll L$$

- **kollektív** (a Debye-térfogaton belül sok részecske van)

$$N_D = \frac{4\pi}{3} \lambda_D^3 n \gg 1$$

- **ionizált** (nem túl sok a semlegesekkel való ütközés)

A plazma komponenseinek sűrűségét az elektromos terek összekapcsolják, de a komponensek sebessége és hőmérséklete különböző lehet!

A plazma elméleti leírása

- **Kinetikus elmélet:** A plazmarészecskék statisztikai eloszlására írjuk fel a Boltzmann-egyenleteket. A különböző részecskepopulációkra felírt egyenletek között az ütközések és az elektromos és mágneses tér forrásegyenletei adják a csatolást.
- **Többfolyadék elmélet:** Ha az eloszlásfüggvények közelítik az egyensúlyi Maxwell-eloszlást, az egyes részecskepopulációk egymásba ágyazott folyadékokként írhatók le: kontinuitás egyenlet, Navier-Stokes-egyenlet, állapotegyenlet. A csatolást a súrlódás, hőcsere és az elektromos és mágneses tér forrásegyenletei adják.
- **Magnetohidrodinamika (MHD):** Ha a folyadékok egyensúlyban vannak, egyetlen vezető, semleges folyadékként is leírható a plazma.

MHD egyenletek

Tömeg kontinuitás-egyenlet:

$$\frac{d\rho_m}{dt} + \rho_m \nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

Impulzus-egyenlet:

$$\rho_m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \nabla p$$

Adiabatikus állapotegyenlet:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{p}{\rho_m^\gamma} \right) = 0$$

Ohm-törvény:

$$\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{j}$$

$\eta=0$: ideális MHD

Amper-törvény:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

Faraday-törvény:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Mit kell tudni egy fúziós erőműnek?

- Megfelelően magas ion hőmérsékletet: $T_i \approx 25 \text{ keV}$
- Jó hőszigetelés és/vagy nagy sűrűség: $n\tau_E \geq 10^{20} \text{ sm}^{-3}$
- Jó összetartás a keletkező α -részecskékre.
- Nem túl jó összetartás a lelassult α -részecskékre.
- Óriási felületi és térfogati hőterhelések kezelése.
- ...

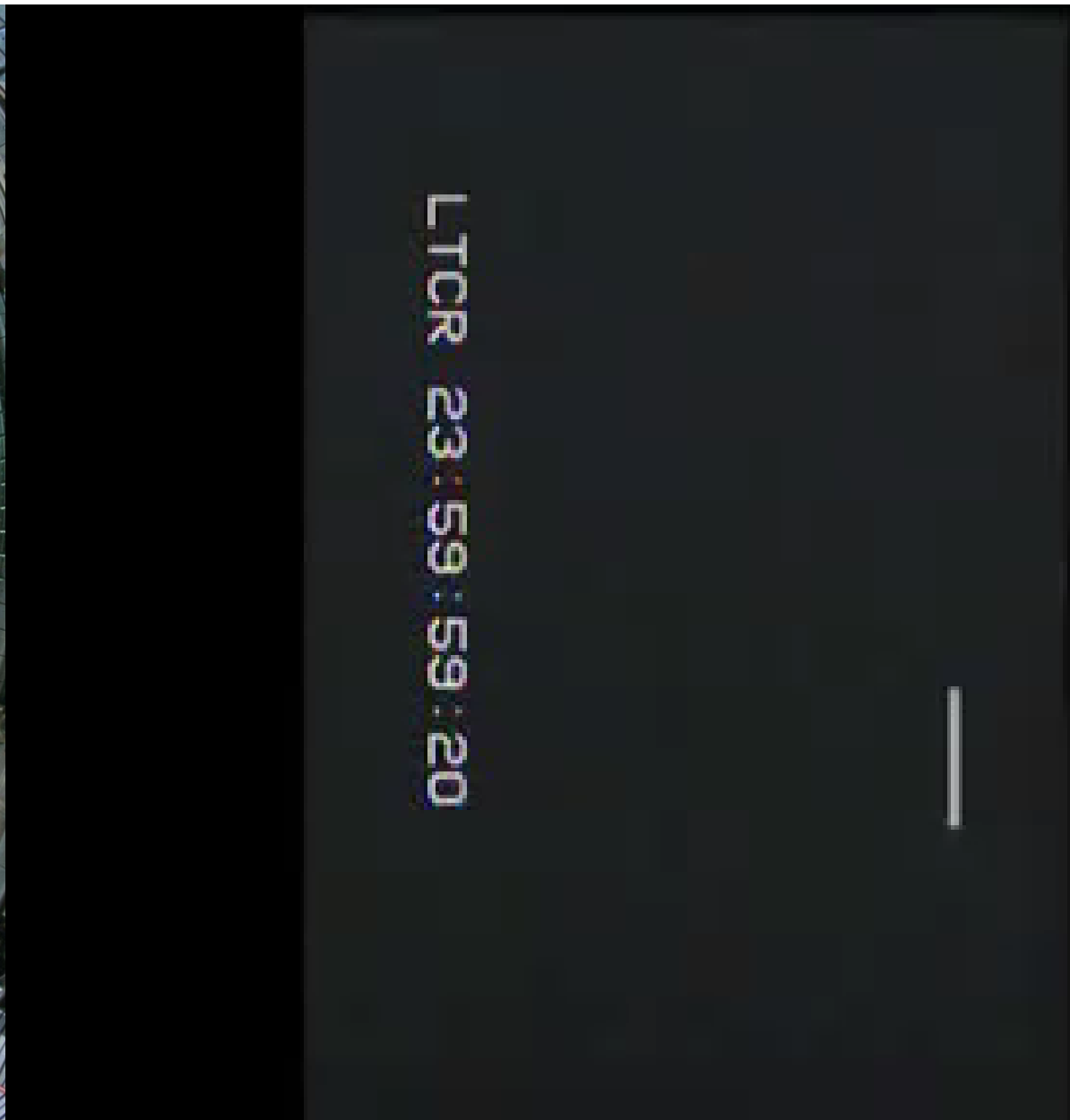
Fúziós plazma összetartása

A Lawson-kritérium két lehetséges, szélsőséges esetet kínál:

$$n \tau_E \geq 10^{20} \text{ sm}^{-3}$$

- **Tehetlenségi összetartás (Inertial confinement, ICF).** A plazma szabadon tágul, a Lawson-kritérium teljesüléséhez egy kritikus sűrűséget kell elérni, rövid ideig.
- **Mágneses összetartás (Magnetic confinement, MCF).** A plazmát mágneses térrel tartjuk össze. A maximális sűrűséget az alkalmazott mágneses tér szabja meg, az energiatermeléshez egy kritikus energiaösszetartási időt kell elérni alacsony sűrűség mellett.

ICF - NIF



Következő előadás: 2019. szeptember 18.

Veres Gábor: Sugárzások fúziós plazmákban

8:30-tól a **K mf. 81-ben (késni nem illene)**

9:30-tól R215-ben