

# Bevezetés a fúziós plazmafizikába 1.

Energiatermelés, fúziós reaktor felépítése,  
Lawson-kritérium, plazma alapok

Dr. Zoletnik Sándor,  
Dr. Pokol Gergő



MTA Wigner FK



BME NTI

---

*Bevezetés a fúziós plazmafizikába*

2019. szeptember 10.

## Tárgykövetelmények

**Kód:** BMETE80MF19 , BMETE80AF36

**Követelmény:**2/0/0/V/2-3;

**Félév:** 2018/19/1

**Nyelv:** magyar;

**Tárgyfelelős:** Dr. Pokol Gergő

**Jelenléti követelmények:** *Az előadások 70%-án a részvétel kötelező.* A részvételi követelmények teljesítése katalógussal ellenőrizve lesz. A jegyzetelés erősen ajánlott, mert *az írott jegyzet nem tartalmazza a teljes anyagot!*

**Számonkérések:** *Minden előadáshoz kapcsolódóan egyszerű házi feladatok* kerülnek kiírásra, melyek beadása opcionális. Kijavításukra a következő óra elején kerül sor. Az osztályzat hagyományos jellegű (tételhúzásos) *szóbeli vizsga adja az órai munka és házi feladatok figyelembe vételével.*

**Konzultáció:** Bármikor konzultáció kérhető egy e-mailen megbeszélte időpontban (alapértelmezésben kedd 17:45-18:15).

## Tárgykövetelmények

**Kód:** BMETE80ME02

**Követelmény:**2/0/0/F/2;

**Félév:** 2018/19/1

**Nyelv:** magyar;

**Tárgyfelelős:** Dr. Pokol Gergő

**Jelenléti követelmények:** *Az előadások 70%-án a részvétel kötelező.* A részvételi követelmények teljesítése katalógussal ellenőrizve lesz. A jegyzetelés erősen ajánlott, mert *az írott jegyzet nem tartalmazza a teljes anyagot!*

**Számonkérések:** *Minden előadáshoz kapcsolódóan egyszerű házi feladatok* kerülnek kiírásra, melyek beadása erősen ajánlott, a végső jegybe 20% extra pont erejéig beszámítanak. Kijavításukra a következő óra elején kerül sor. *Utolsó héten írásbeli dolgozat.*

**Konzultáció:** Bármikor konzultáció kérhető egy e-mailen megbeszélte időpontban (alapértelmezésben kedd 17:45-18:15).

## Tematika, időbeosztás

Dátum	Előadó	Cím
Szeptember 10	Pokol	Energiatermelés, fúziós reaktor felépítése, Lawson-kritérium, plazma alapok.
Szeptember 17	Pokol	Töltött részecskék ütközésmentes mozgása mágneses térben.
Szeptember 24	Pokol	Mágneses összetartás: konfigurációk.
Október 1	Veres	Termodinamikai egyensúly, ionizációs és sugárzási folyamatok plazmában.
Október 8	Pokol	Bevezetés mágnesezett plazmák elméleti leírásába: kinetikus elmélet, MHD.
Október 15	Pokol	Részecskék ütközése plazmában: ellenállás, transzport.
Október 22	Földes ?	Mikrorobbantásos fúzió.
Október 29	Pokol	Mágnesesen összetartott plazma egyensúlya, instabilitások.
November 5	Zoletnik	Laboratóriumi kísérletek: plazma előállítás, fűtés, plazma-fal kapcsolat.
November 12		BME TDK Konferencia
November 19	Zoletnik	Fúziós diagnosztika.
November 26	Zoletnik	Aktuális eredmények mágneses összetartású berendezéseknél.
December 3	Zoletnik	Fúziós Útiterv
December 10	Pokol	ZH / feladatok-ismétlés-konzultáció

# Energiatermelés

## Miből lehet energiát termelni?

1. A Napról a Földre érkező energia megcsapolásával.
2. Kötési energiából.

## 1. Napenergia hasznosítás

A napenergia hasznosítása napelemekkel **óriási területet igényel**, ezért leginkább kiegészítő energiaforrásként használható.

A szél-, víz-, hullámenergia szintén napenergia hasznosítása, de területileg koncentráltabb lehet. Viszont mindegyik formában **területileg és időben nagyon egyenetlen az eloszlása**.

*A témáról bővebben a Fenntartható fejlődés és atomenergia tárgy keretein belül*

# Energiatermelés kötési energiából

*Példa: 1 GW-os erőmű anyagszükséglete*

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

- **Az atomhég energiája**

*Felszabaduló energia:  $\approx 0.1$  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:  $\approx 1$  MeV/atom  $\approx 10^{-13}$  J/atom*

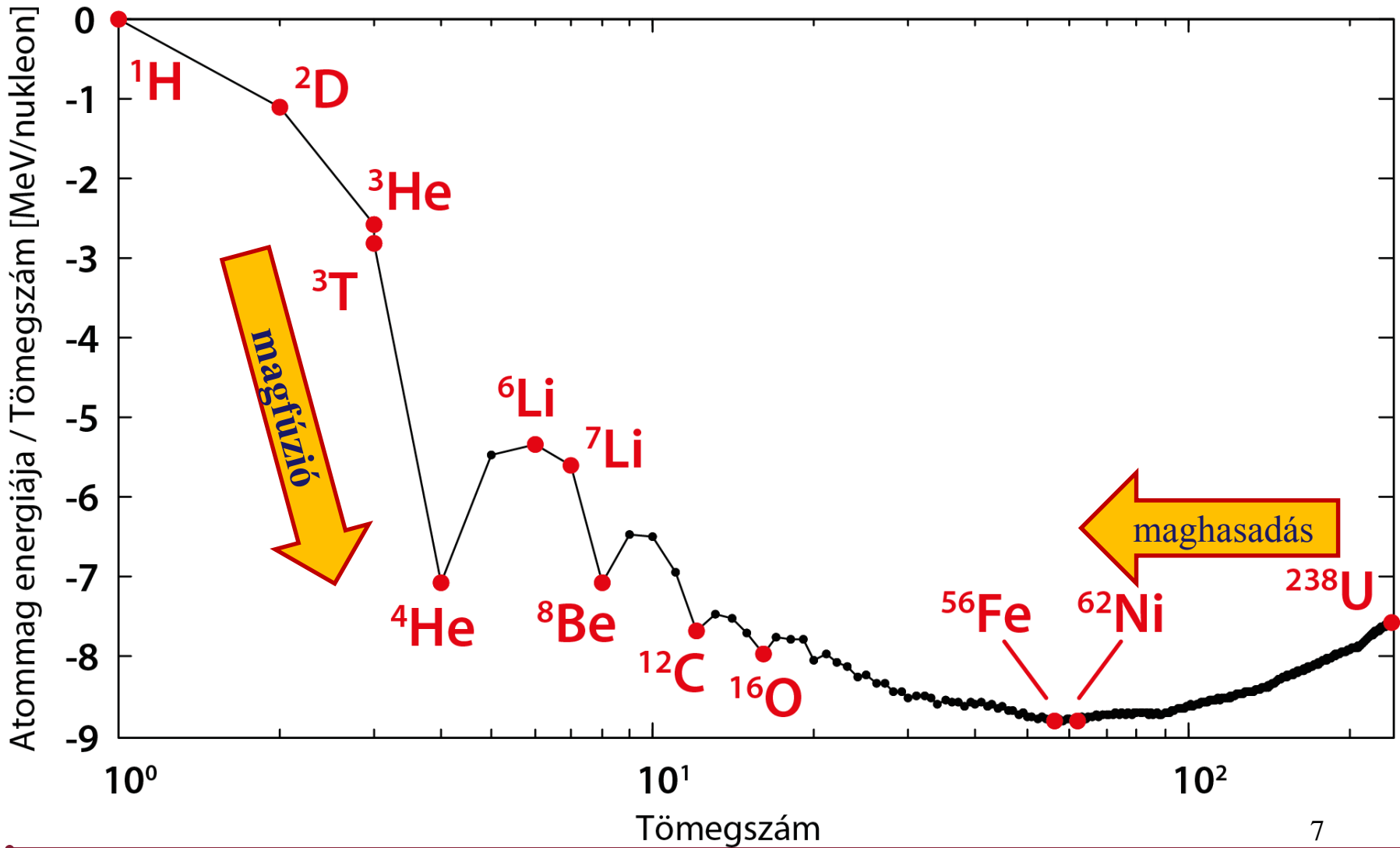
*Energiasűrűség:  $\approx 10^{14}$  J/kg*

**Napi anyagszükséglet:  $\approx 10^1$  kg/nap**

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

# Magenergia felszabadítása

## Egy nukleonra eső kötési energia



# Fúzió – hasadás legfontosabb különbségek

## Hasadás (Fission)

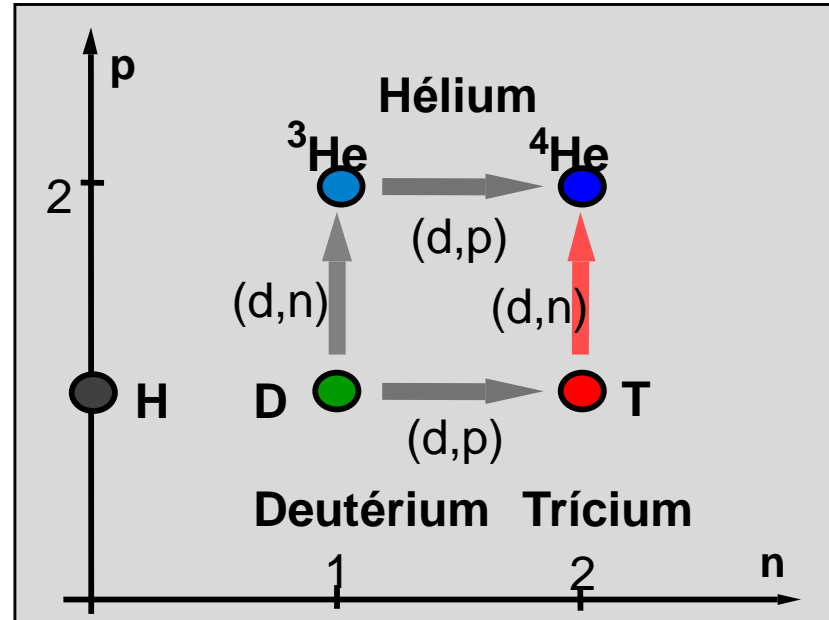
1. *Spontán reakció is van.*
2. *Nem igényel kezdeti befektetett energiát.*
3. *Láncreakció: a reakciótermékek további reakciókat keltenek.*

## Fúzió (Fusion)

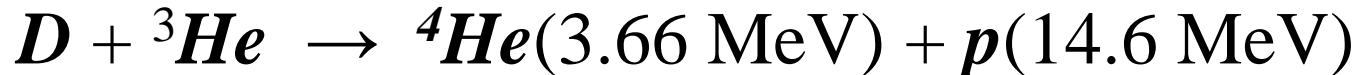
1. *Nincs spontán reakció.*
2. *Jelentős kezdeti energiabefektetés kell.*
3. *Nincs láncreakció: a reakciótermékek nem vesznek részt a reakcióban*



# Fúziós magreakciók



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



## Lehet-e gyorsítóval energiát termelni?

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

A magok  $\sigma_s$  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  $\sigma$  a hatáskeresztmetszet és  $v$  a sebesség. Egy részecske  $n$  sűrűségű közegben másodpercenként átlagosan

$$\langle \sigma v \rangle n$$

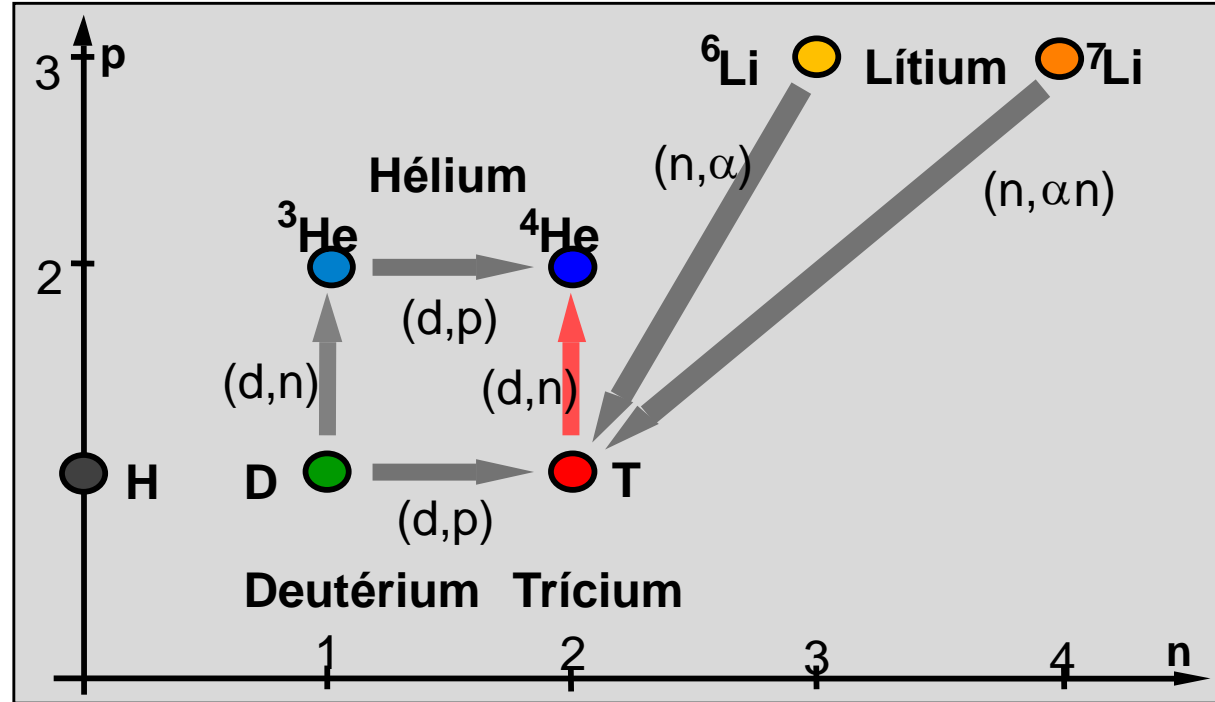
reakciót szenved el.

**Legkönnyebben a D-T reakciót lehet megvalósítani!**

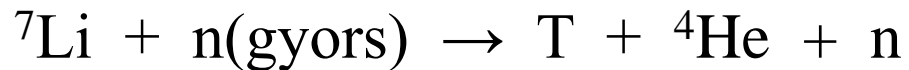
## D-T reakció kiinduló anyagai

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

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



**A tríciumot tenyészteni kell lítiumból!**

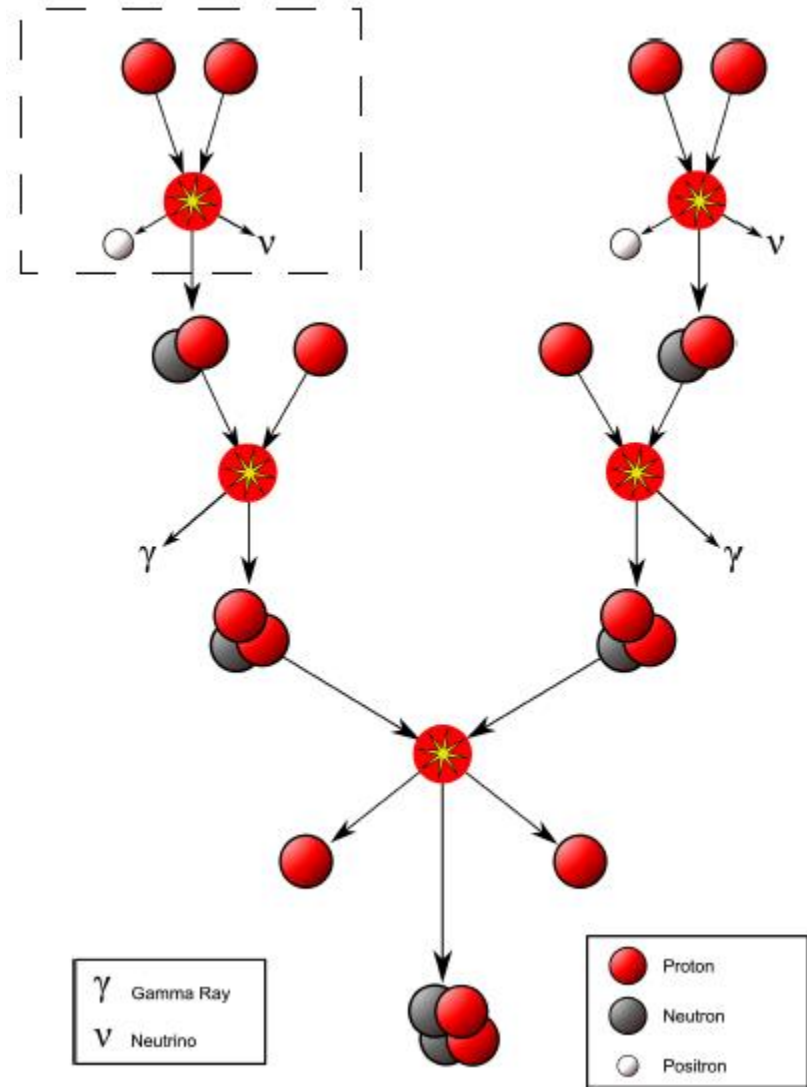


# A Nap energiatermelése

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

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

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

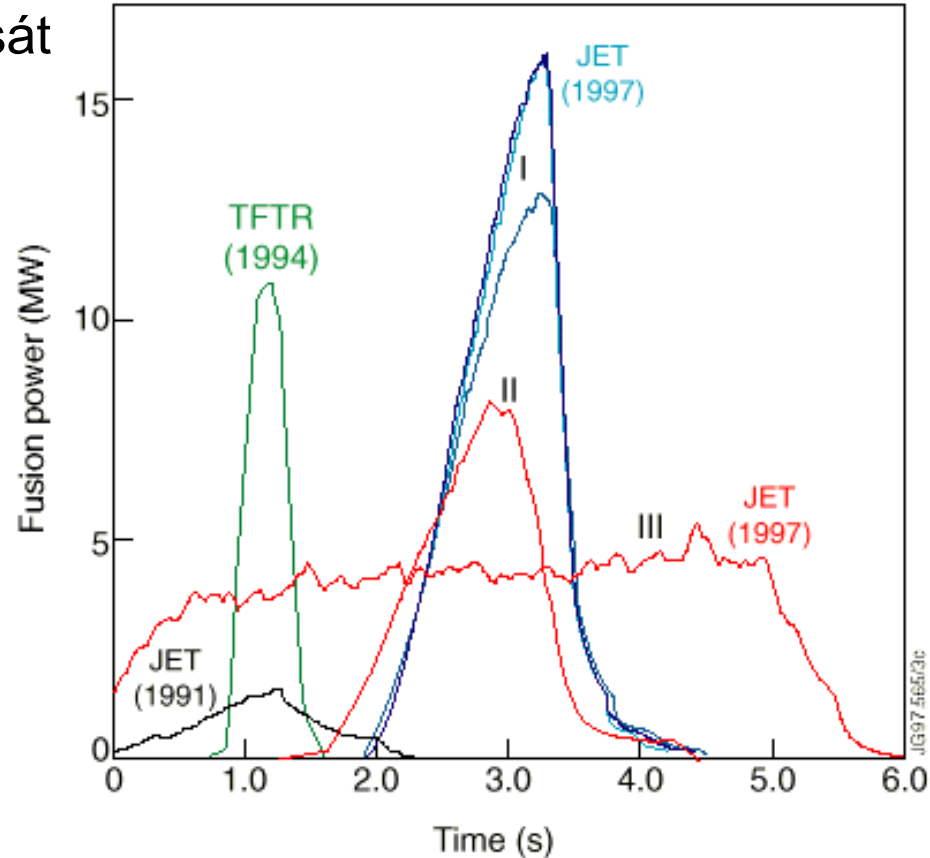


# Fúziós reaktor energiamérlege

A fúziós reaktor energiaszorzását a  $Q$  tényezővel szokás jellemezni:

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

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

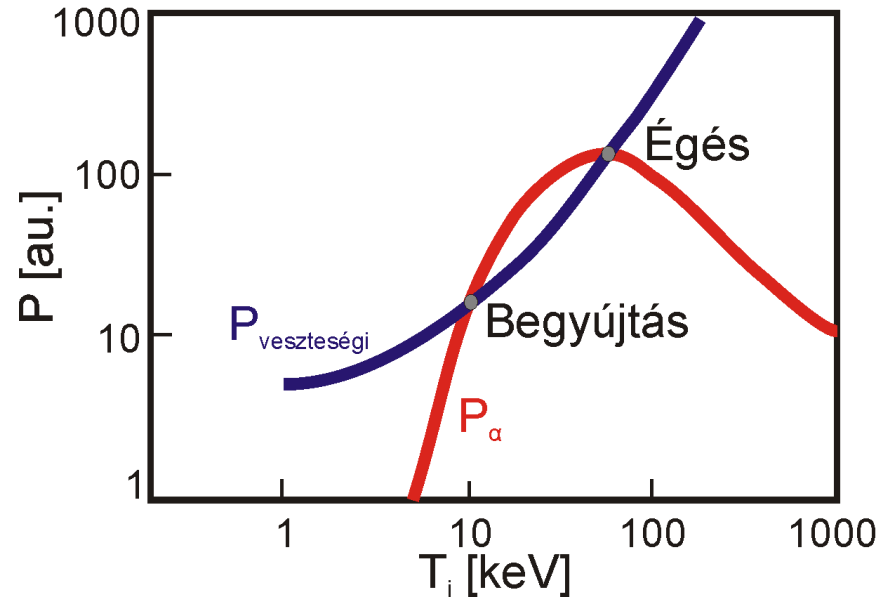


A  $Q=1$  pontot „**break even**”-nek nevezzük. A reaktor üzemeltetése szempontjából ennek nincs jelentősége.

## Fúziós plazma energiamérlege

A fúziós reakcióban felszabaduló energia jelentős részét (~20%) az  $\alpha$ -részecskék viszik el. Ha ezeket a plazma többi töltött részecskéjével együtt össze tudjuk tartani, akkor az  **$\alpha$ -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. Az **égési pontban** a plazma stabil állapotban marad, amíg a gázösszetételt és más körülményeket fenn tudjuk tartani.

## A begyűjtás feltétele

Az 50-50 százalékos,  $n$  sűrűségű,  $V$  térfogatú,  $T$  hőmérsékletű D-T keverékben felszabaduló fúziós teljesítmény arányos az  **$\alpha$ -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:**

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



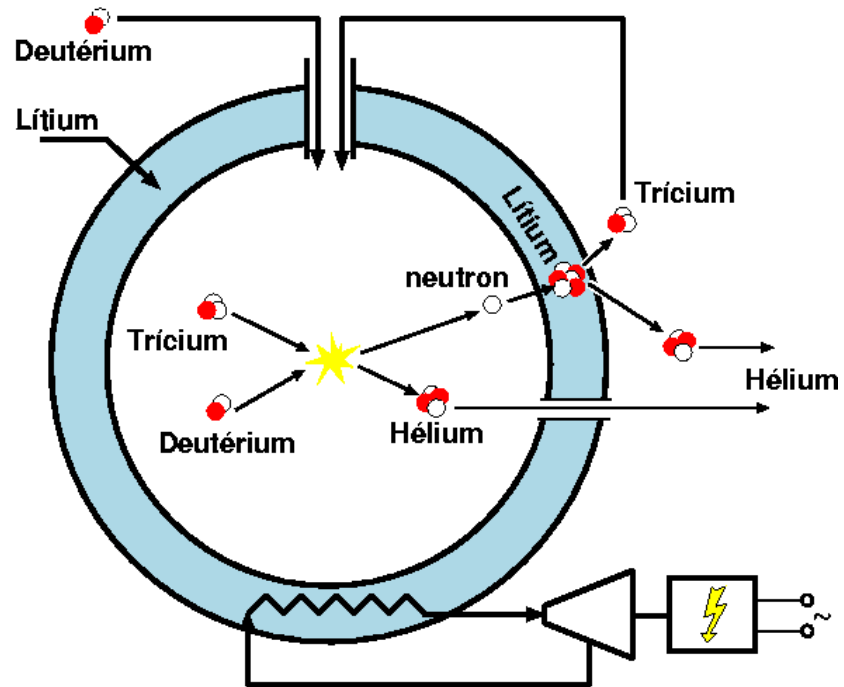
## Trícium szaporító köpeny

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

A trícium radioaktív ( $\beta$ -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!

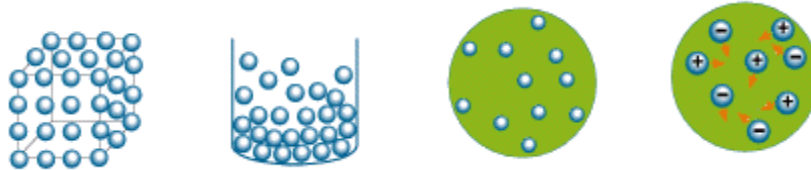
Az erős neutronsugárzás miatt a reaktor **szerkezeti anyaga is felaktiválódik**, de ez speciális anyagválasztással minimalizálható.



# Mi az a plazma?

Ha egy gáz részecskéinek átlagos kinetikus energiája (esetükben  $\sim 10$  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) keveréke jön létre, ez a **plazma**.



Az Univerzumban a látható anyag legnagyobb része plazma halmazállapotban van: csillagok, napszél, intersztelláris gáz

Földi példák: villám, fénycsövek, ...

## A plazma tulajdonságai: Ionizációfok

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

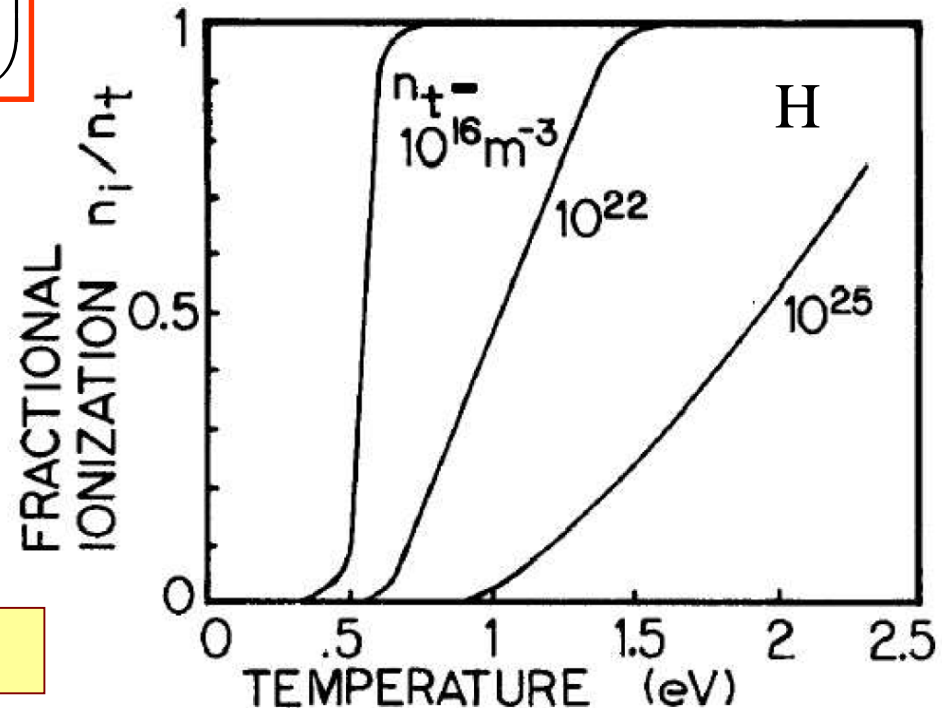
**Saha-egyenlet** (hidrogénre):

$$\frac{n_i}{n_a} = \left( \frac{m_e k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{n_i} \exp\left( -\frac{E_i}{k_B T} \right)$$

Szobahőmérsékleten  
levegőben:

$$\frac{n_i}{n_t} = 10^{-122} \quad (n_t = n_a + n_i)$$

Ez termikus egyensúly esetén igaz!

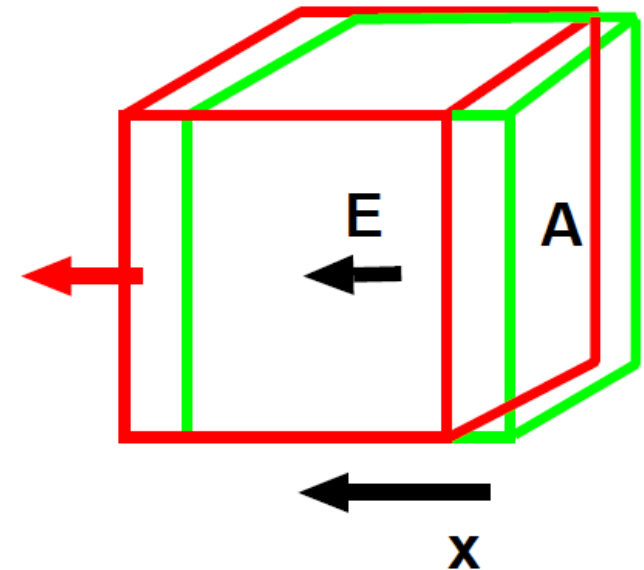


## A plazma tulajdonságai: Plazmarezgés

A plazmarészecskék elektromosan töltöttek  $\rightarrow$  erős elektromágneses kölcsönhatás van köztük. Ha az elektron- és ionsűrűség különbözik, erős elektromos terek lépnek fel!

Tegyük fel, hogy egy adott térfogatban az elektronok elmozdulnak adott  $x$  távolságra az ionoktól. Első közelítésben az ionok mozdulatlanoknak tekinthetők.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad \frac{E}{x} = \frac{en_e}{\epsilon_0}, \quad E = \frac{en_e}{\epsilon_0} x$$



## A plazma tulajdonságai: Plazmarezgés

Az elektronokra a kitéréssel arányos visszatérítő erő hat:

$$F = eE = \frac{n_e e^2}{\epsilon_0} x = kx$$

Ez harmonikus rezgőmozgást okoz  $\omega_p$  körfrekvenciával.  
(**Plazmafrekvencia**)

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{k}{m_e}} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

Ez nem egy hullám, hanem egy sajátfrekvenciával történő rezgőmozgás. Fúziós plazmákban  $\omega_p \approx 100 \text{ GHz}$ .

A plazmafrekvencia alatti frekvenciájú elektromágneses hullámok nem terjednek nemmágnesezett plazmában.

## A plazma tulajdonságai: Debye-árnyékolás

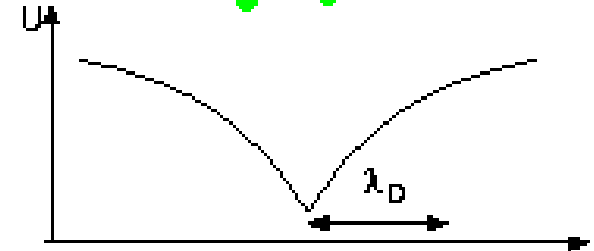
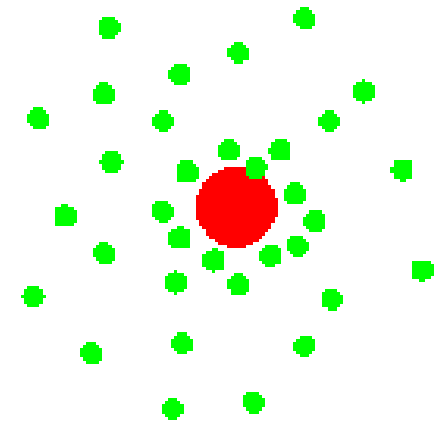
Tegyük egy egységnyi töltésű próbatöltést a plazmába! Ekkor a plazma elektronjai és ionjai úgy fognak mozogni (az elektronok gyorsabban), hogy a kialakuló erőtér a próbatöltés terét leárnyékolja.

1D Poisson-egyenlet (1D):

$$\epsilon_0 \frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} = -e(n_i - n_e(x))$$

Boltzmann-eloszlás (1D):

$$n_e(x) = n_{e\infty} \exp\left(\frac{e\phi(x)}{k_B T}\right) \approx n_{e\infty} \left[ 1 + \frac{e\phi(x)}{k_B T} + \dots \right]$$



# A plazma tulajdonságai: Debye-árnyékolás

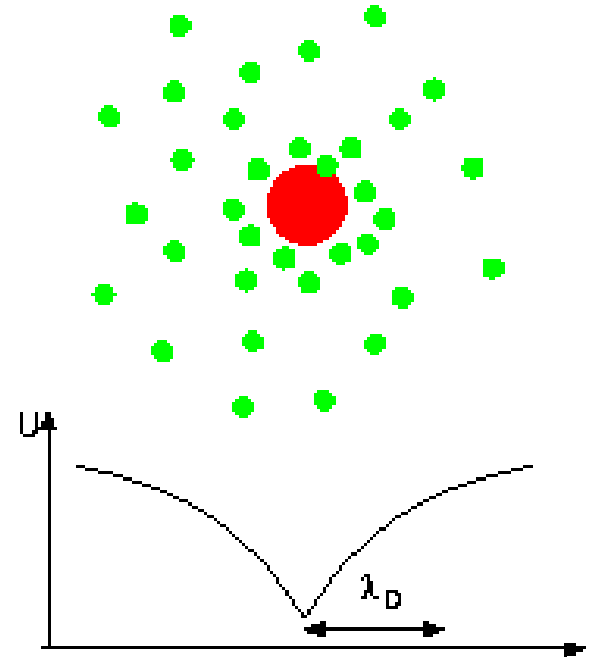
Tegyünk egy egységnyi töltésű próbatöltést a plazmába! Ekkor a plazma elektronjai és ionjai úgy fognak mozogni, hogy a kialakuló erőter a próbatöltés terét leárnyékolja.

$$1\text{ D: } \phi(x) = \phi_0 \exp(-|x| / \lambda_D)$$

$$3\text{ D: } \phi(r) = \phi_0(r) \exp(-r / \lambda_D) \quad \phi_0(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{r}$$

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

**Debye-hossz**



A Debye hossznál nagyobb skálákon a plazma elektrosztatikusan semleges.

## A plazma szűkebb definíciója

- **kvázineutrális** (az elektronok és ionok össztöltése lokálisan (első közelítésben) 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** (a plazmarezgés egy periódusa alatt átlagosan nem ütközik semleges atommal)

$$\omega_p \tau \gg 1$$

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



## 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  $\alpha$ -részecskékre.
- Nem túl jó összetartás a lelassult  $\alpha$ -részecskékre.
- ...

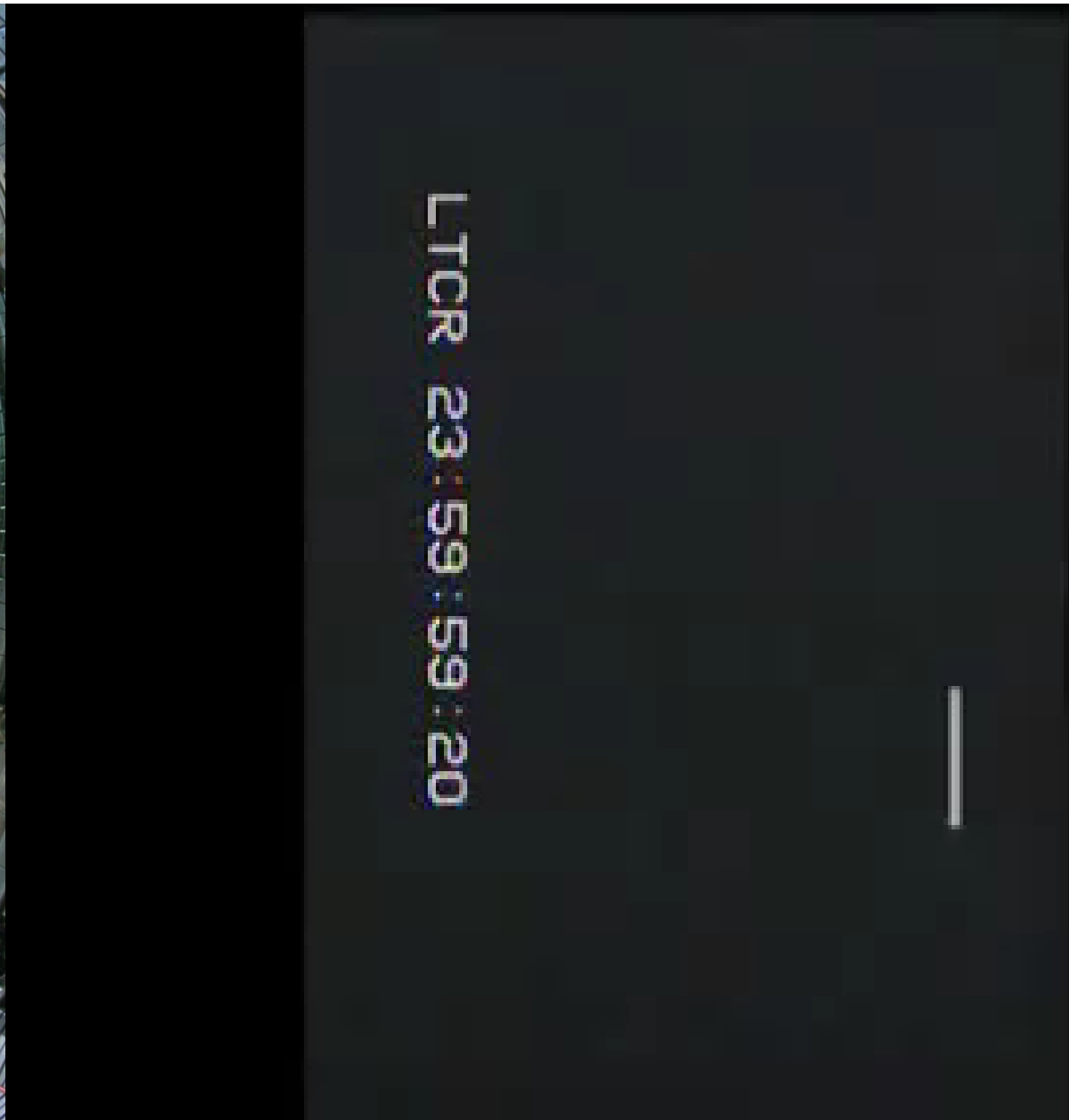
## Fúziós plazma összetartása

A Lawson kritérium két lehetséges, szélsőséges esetet kínál:

- **Tehetlenségi összetartás (Inertial confinement, ICF)**. A plazma szabadon tágul, a Lawson kritérium teljesüléséhez egy kritikus sűrűséget kell elérni, rövid ideig.

- **Mágneses összetartás (Magnetic confinement)**. A plazmát mágneses térrel tartjuk össze. A sűrűséget az alkalmazott mágneses tér szabja meg, az energiatermeléshez egy kritikus energiaösszetartási időt kell elérni alacsony sűrűség mellett.





Az előadás és a házi feladatok elérhetők:

<https://oktatok.reak.bme.hu/tantargyak/bevezetes-a-fuzios-plazmafizikaba/>