

Bevezetés a fúziós energiatermelés alapjaiba

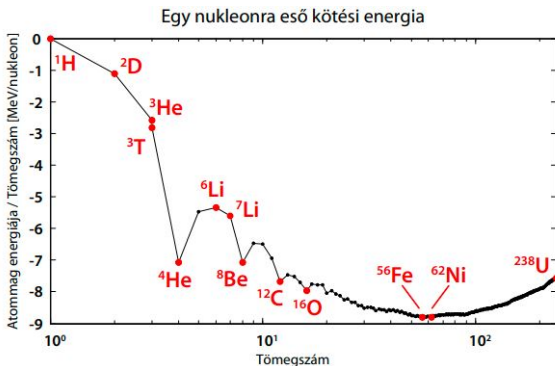
Fischer Ádám

2020.11.12.

- Fenntartható energiatermelés
 - fosszilizsek: véges készlet ($\sim 40\text{-}50$ év), klímaváltozás
 - megújuló: egyenetlen termelés, nagy helyigény, földrajzi adottságok
 - nukleáris
 - fisszó: véges készlet (~ 200 év), radioaktív hulladék (100 000 éves tárolási idő kétségeket vet fel)
 - fúzió: van radiaktív melléktermék, de mennyisége és felezési ideje lényegesen rövidebb (néhány 100 évig kell tárolni) + reakció alapanyag szinte kifogyhatatlan \rightarrow érdemes ezzel foglalkozni

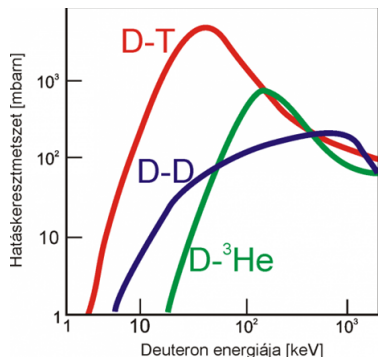
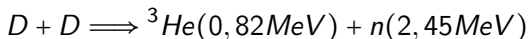
Energia felszabadulása

- Fosszilizsek: kémia kötések eV nagyságrend
- Nukleáris: kötési energia MeV nagyságrend



Reakcióban résztvevő atommagok egy nukleonra jutó kötési energiája kisebb, mint a termék atommagra → különbséget hasznosítjuk

Néhány lehetséges reakció



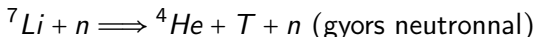
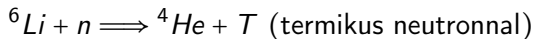
- le kell küzdeni a Coulomb-taszítást
- $D + T$ reakció a legkönnyebb \rightarrow reakcióráta hőmérsékletfüggő, legalacsonyabb hőmérsékleten (~ 10 keV) van egy maximuma

- gyorsítók: rugalmas ütközés sokkal valószínűbb, mint a fúzió (optimális energián is!) \implies energiatermelésre nem alkalmas
- megoldás: termikus közeg kell!
 - részecskék energiája Maxwell-eloszlást követ
 - egy részecskére átlagosan $\frac{3}{2}k_B T$ (= 10 keV)

$$T = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{J}]}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right]} \approx 10^8 [\text{K}]$$

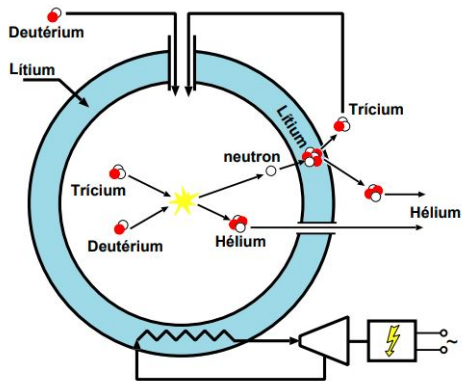
- Nap magja csak 10^7 K
- Hogyan tároljuk? \rightarrow töltött részecskék, mágneses összetartás (később)

- 1 GW teljesítményű reaktor számára napi 1 kg deutérium és trícium már elég lenne
- D: tengervíz minden 6000. molekulájában → gyakorlatilag kifogyhatatlan
- T: 12 év felezési idő, természetben kevés → elő kell állítani



- 1 n → 1 T, tehát kell egy neutron sokszorozó is (pl. Pb, Be), mivel nincs 100%-os tríciumtermelő hatások

Egy reaktor elvi működése

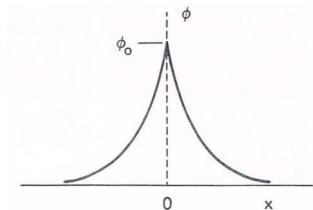


- trícium termelésben részt nem vevő neutronok a reaktor többi szerkezeti elemeiben adják le energiájukat, komoly roncsolás
- a köpenyt várhatóan néhány évente cserélni kell majd
- biztonsági kérdések

- e^- kötési energiája (~ 10 eV) \ll részecske mozgási energiája (10 keV)
 \implies elektronok leszakadnak
- az ütközések kellően gyakoriak
 \implies atommagok nem tudják újra felvenni őket
- pontatlan definíció: szabad ionok + elektronok = plazma
- érdekesség: látható anyag 99%-a plazma állapotban (csillagok, csillagközi gáz, napszél ...)

- Debye-árnyékolás: λ_D hosszánál nagyobb skálán elektrosztatikusan semleges

$$\phi = \phi_0 \exp(-|x|/\lambda_D)$$



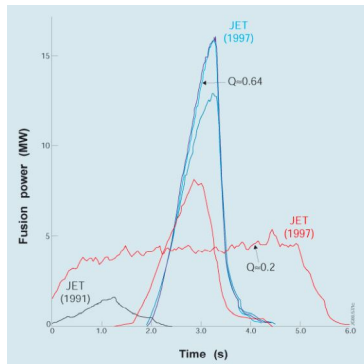
- kvázi semleges: a rendszer teljes töltése nagy skálán nulla $\lambda_D \ll L$
- kollektív rendszer: Debye-gömbön belül sok részecske van
$$N_D = \frac{4\pi\lambda_D^3}{3} n \gg 1$$
- semleges részecskével az ütközések ritkák $\omega_p \tau_c \gg 1$ (igazából ez az újdonság)

Energia sokszorozási tényező

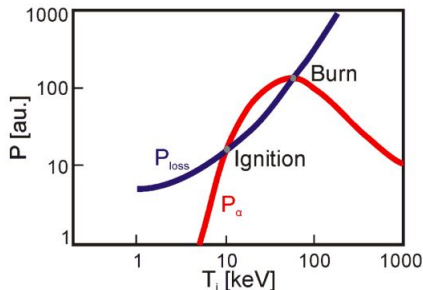
- reakció jellemezhető energia sokszorozási tényezővel

$$Q = \frac{P_f}{P_{heating}}$$

- „break even” $Q = 1$, nincs jelentősége



- felszabadult energia $\sim 20\%$ -át α részecskék viszik el
- ezeket a reakciós térben tartva: α fűtés, elérhető $P_\alpha > P_\nu$
- külső fűtés már nem kell, $Q = \infty$ (begyújtás)



- begyújtást követően az égési pontig emelkedik a hőmérséklet
- ha folyamatos a $D - T$ utánpótlás, lelassult α részecskéket kiszívjuk \implies folyamatos önfenntartó üzem

- Csupán a kellően magas hőmérséklet elég a fúzióhoz?
NEM

$$P_v < P_f$$

$$\tau = \frac{W}{P_v}$$

$$P_v = \frac{W}{\tau} = \frac{V \frac{3}{2} n k T}{\tau} < P_f = V \left(\frac{n}{2} \right)^2 C(T)$$

$C(T)$: termikus sebességre kiátlagolt reakcióráta $\sim T^2$

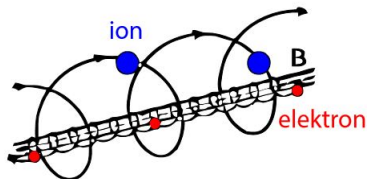
$$n\tau > \frac{6kT}{C(T)}$$

optimális hőmérsékleten ($T = 25$ keV): $n\tau > 10^{20} \text{sm}^{-3}$

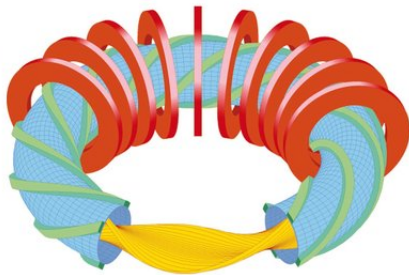
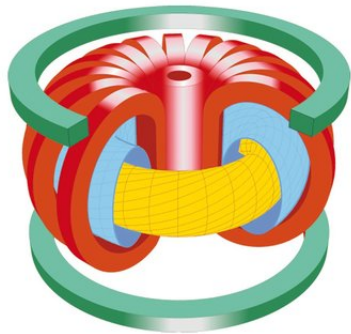
ha a hőmérsékletet nem rögzítjük: $n\tau T > 3 \cdot 10^{21} \frac{\text{keV}\cdot\text{s}}{\text{m}^3}$

Fúziós plazma összetartás

- Belső összetartás:
→ a plazma nagyon gyorsan tágul, a Lawson-kritérium rövid ideig teljesül, hidrogénbomba
- Mágneses összetartás:
→ plazma (töltött részecskék) mágnesesen összetartva, τ hosszú

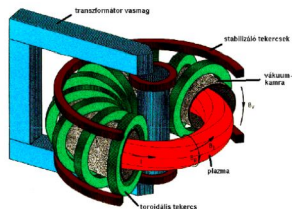
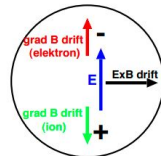
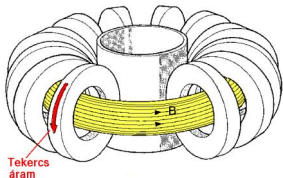


Tokamak vs stellarator



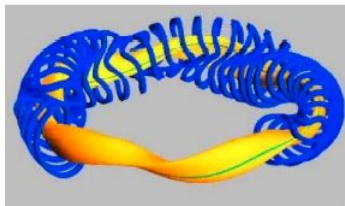
Tokamak

- inhomogén mágneses tér \rightarrow \mathbf{E} tér
- $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift (mozgásegyenletekből)

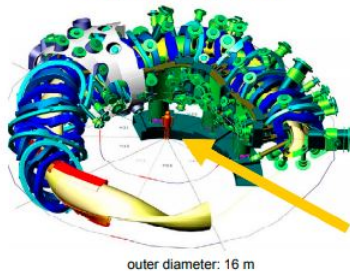


- csak induktív üzem lehetséges!

Physicists' dream



Engineers' nightmare



Tokamak

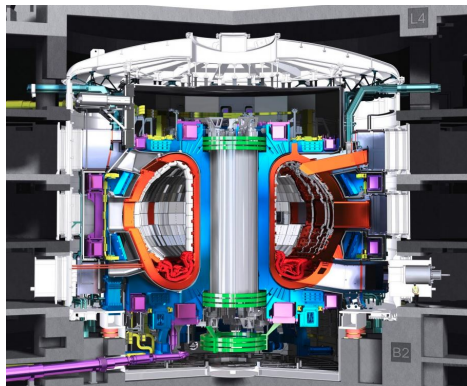
- - impulzus üzem
- - plazmaáram → diszrupciók, instabilitások
- + egyszerű geometria
- + fejlettebb technológia

Stellarator

- - bonyolult geometria, technológia elmaradottabb
- + folytonos üzem
- + nincs induktívan hajtott plazmaáram → stabil plazma

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) céljai

- ITER (2025, 2035):
 - nemzetközi együttműködés
 - kontrollált égés
 - $Q > 10$, 300-500 s-ig (D+T plazma)
 - $Q > 5$ néhány óráig
 - trícium köpeny teszt
 - szükséges technológiák megvalósíthatóságának demonstrálása
 - jövőbeli reaktor koncepció tesztelése



- [1] Pokol Gergő, Bevezetés a fúziós plazmafizikába
- [2] Francis F. Chan, Introduction to plasma physics and controlled fusion
- [3] BME, Fusion devices (Pokol Gergő, Veres Gábor) órai jegyzet

Köszönöm a figyelmet!