

Mechwart nap, 2019

Fúzió: a "tisztá" energia



UNIVERSITY of
DEBRECEN



Dr. Kardos Ádám
Debreceni Egyetem, Fizika Intézet

Energia

Energia termeléshez energiaforrásra van szükség.

Amikor az energia előállítódik azt valamilyen energiahordozó továbbítja.

De mi is az az energia?

Az energia elvont fogalom. Legkorábban a mechanikában fordult elő: rugalmas ütközésben megmaradó mennyiség!

Az energiaforrás függvényében többféle formában is előállhat:

- Hőerőmű \implies kémiai energia (kémiai folyamat) \implies hőenergia
- Naperőmű \implies kémiai energia (potenciálkülönbség) \implies elektromos energia
- Atomerőmű \implies mag energia (maghasadás) \implies hőenergia
- Fúziós erőmű \implies mag energia (magok fúziója) \implies hőenergia

Az Energiahordozó

Hőerőműben kémiai kötések bomlanak fel és újak keletkeznek

⇒ a többlet energia mint elektromágneses sugárzás áll elő

(infrafény). Ugyanazért meleg a tűz és az infra lámpa is

⇒ Az energia mint elektromágneses sugárzás áll rendelkezésre

Naperőműben az elektronok elvándorolnak a napfény hatására

⇒ potenciálkülönbség jön létre

⇒ Az energia mint elektromágneses sugárzás áll rendelkezésre

Atom és fúziós erőműben magátalakulások miatt a magok, protonok és neutronok tesznek szert mozgási energiára

⇒ Az energia mint mozgási energia áll rendelkezésre

A Kötesi Energia

Egy mag tömege mindig kisebb, mint az őt felépítő protonok és neutronok tömegének összege

Ok: a mag energetikailag stabilabb, mint az őt felépítő elemek külön-külön!

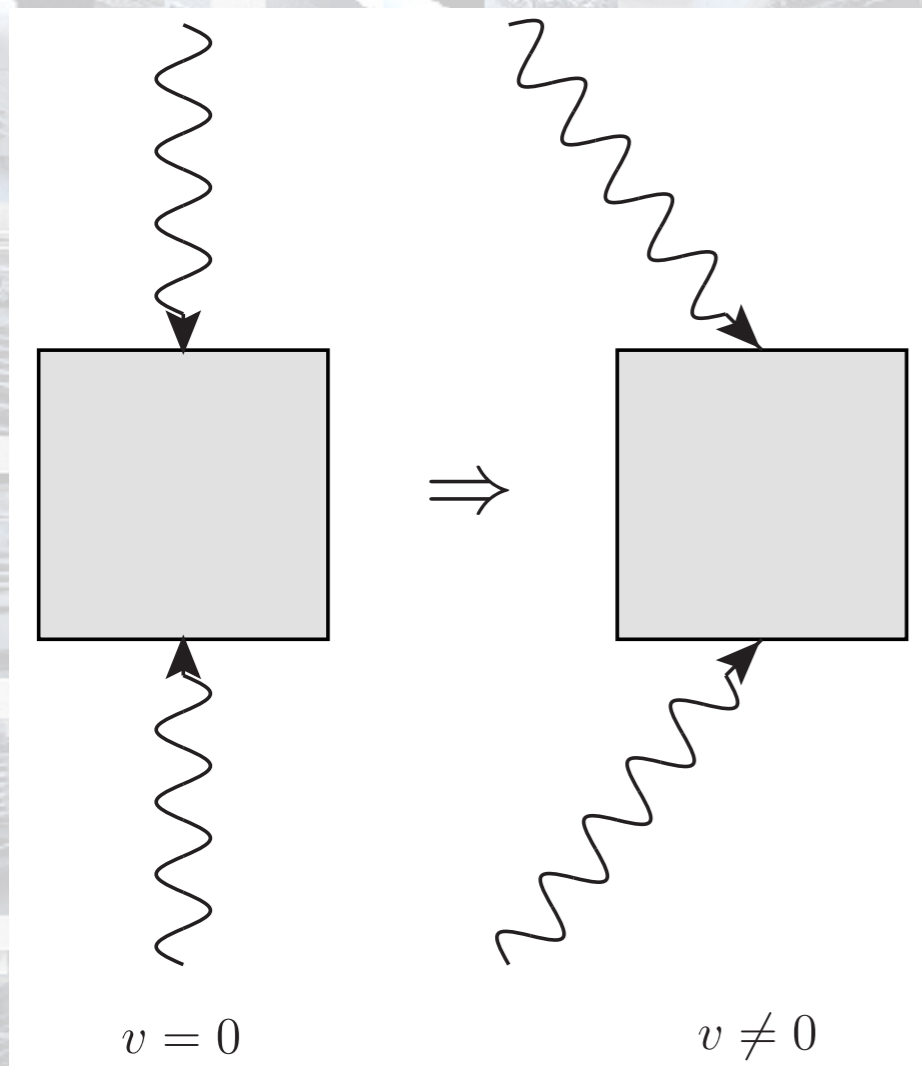
A különbség köteési energia formájában felszabadul:

$$E_k = \Delta m \cdot c^2$$

Ez Einstein híres $E=mc^2$ képlete

Eredetileg arra lett kitalálva, hogy az egymástól v sebességben különböző rendszerekben ugyanazt a tárgyat, amit elektromágneses sugárzás fűt le lehessen írni.

$$E=m \cdot c^2$$



A fényszecskek nemcsak energiával, de lendülettel is rendelkeznek:

Egy test mozgásának leírása nem függhet attól, hogy melyik inerciarendszerben történik!

A $v=0$ rendszerben a test csak melegszik, de a $v \neq 0$ rendszerben a fényszecskek teljes lendülete nem nulla, de a test mégsem gyorsulhat!

$$E_{\text{foton}} = h \cdot \nu$$

$$\Delta m = 2 \frac{h \cdot \nu}{c^2}$$

Ha a test tömege nő melegedés közben, hiába kap lendületet nem tud gyorsulni.

A Kötési Energia 2

A tömeg különbség:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - \frac{A}{Z}M$$

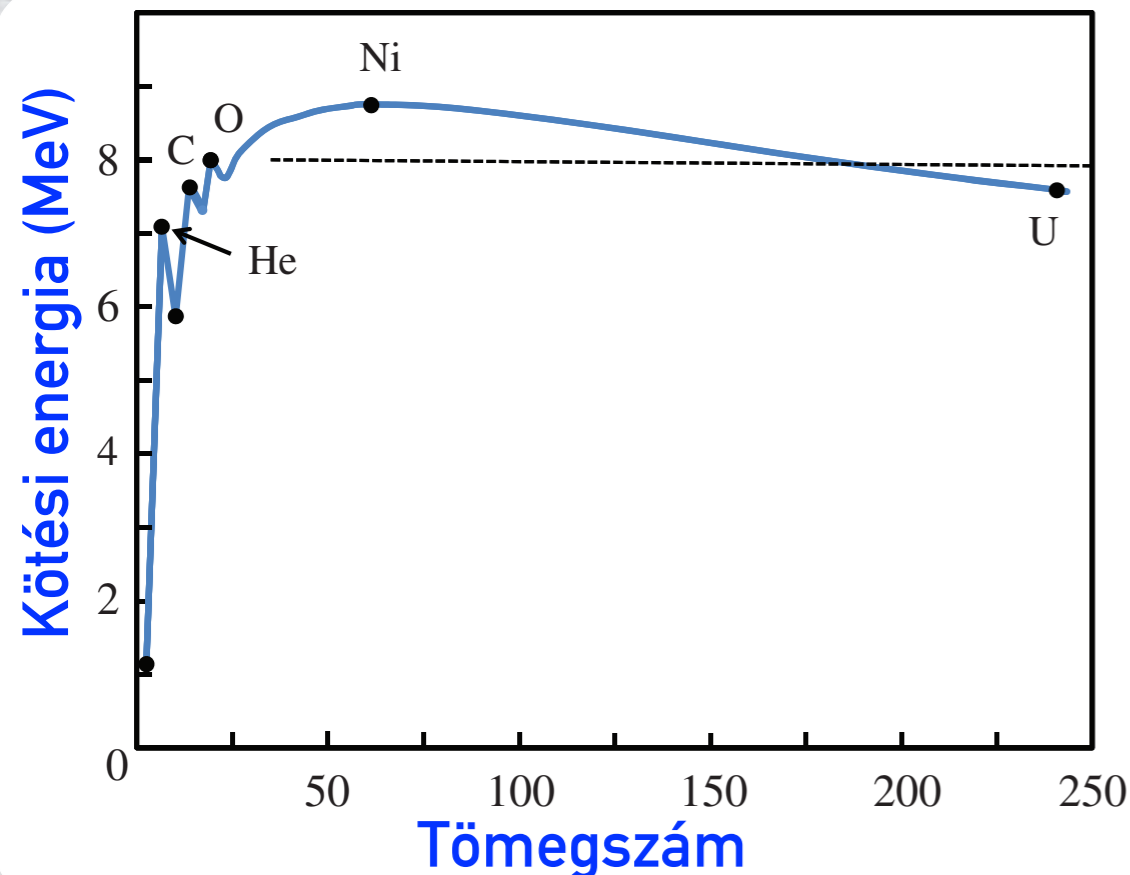
A felszabaduló energia:

$$\Delta E = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - \frac{A}{Z}M c^2$$

Ez lényegében a kötési energia is:

$$E_k = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - \frac{A}{Z}M c^2$$

Ez minden különböző atom és tömegszámú magra más és más, minél nagyobb annal stabilabb a mag:



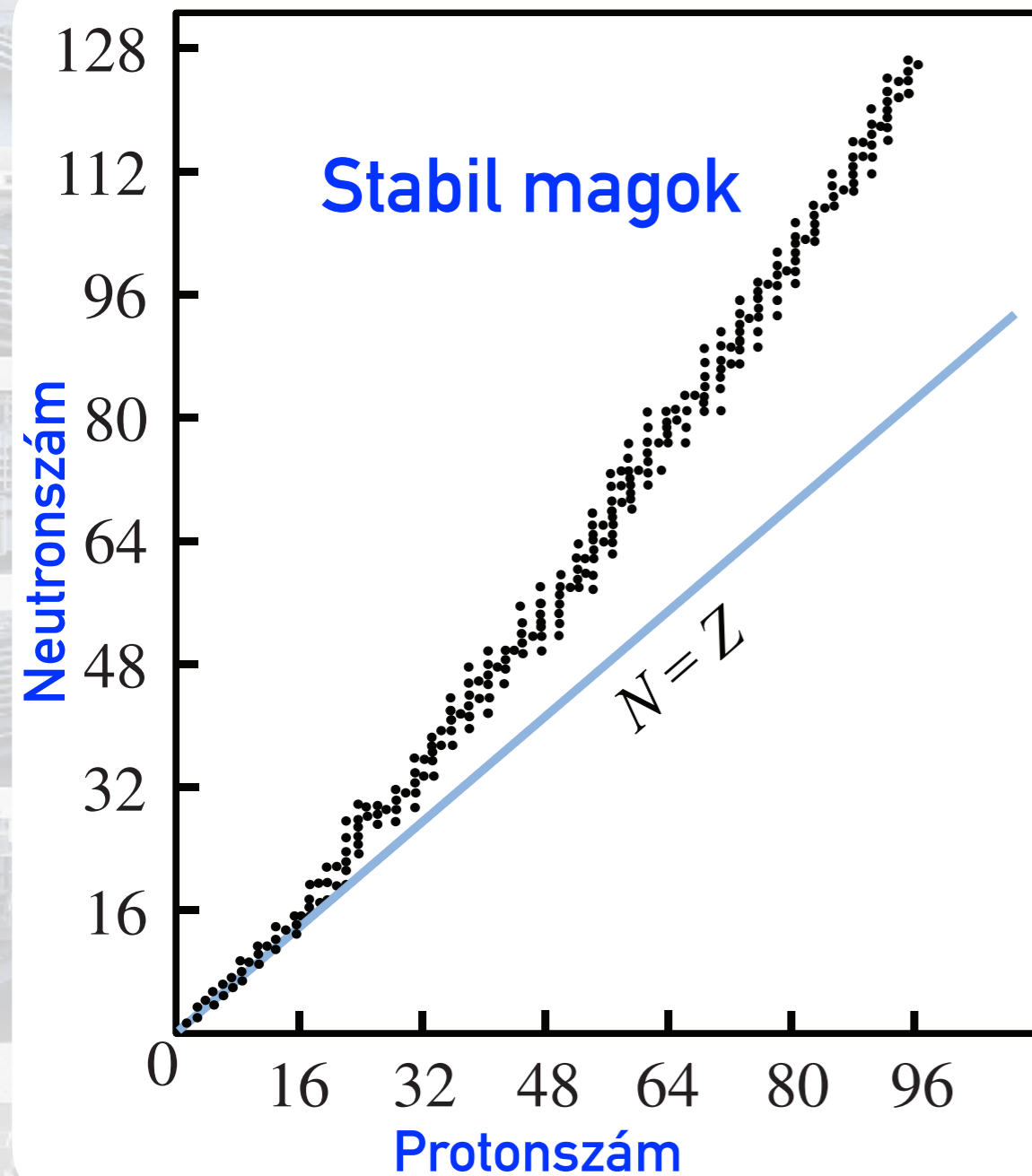
⇒ A nikkeltől balra ⇒ Fúzió

⇒ maghasadás vagy fúzió aszerint következik(het) be, hogy hol vagyunk a görbén:

Nikkeltől balra ⇒ Fúzió

Nikkeltől jobbra ⇒ Maghasadás és sugárzás

Nehéz Magok



Ez nem azt jelenti, hogy a Nikkelnél nehezebb magok mind elbomlanak!

Vannak stabil magok is!

Ezeknél a részecskekibocsátás nem eredményez számottevő növekedést a kötési energiában.

Maghasadás tipikusan akkor következik be ha a mag számottevő energiát kap ütközésekből pl. neutron bombázás

A befogás erős deformációt okoz ez tudja eredményezni a hasadást.

Maghasadás

Egy gyakorlati példa:



- A felszabaduló energia ~200 MeV
- Ez mint mozgási energia áll elő, ill. a hasadványok gerjesztett állapotban keletkeznek
- Ez a nukleáris energiatermelés alapja
- Paks: 4 darab VVER440 (kb. 500 MW blokkonként)

Fúzió:

Pont a fordított történet, pl.:

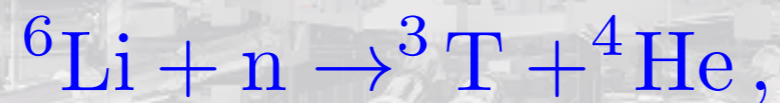


Közben felszabadul 17.6 MeV energia is!

Mi kell hozzá?

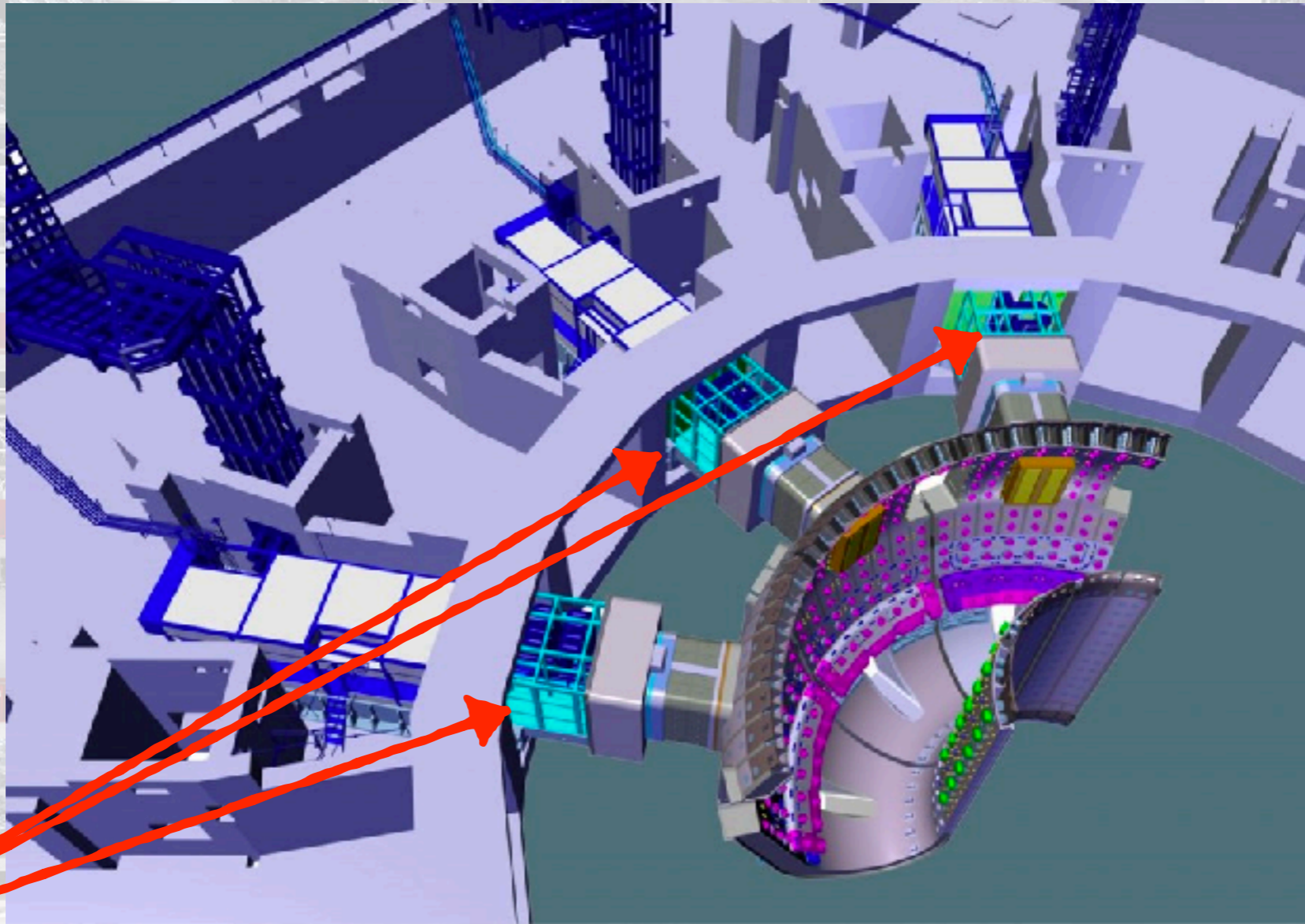
- Deutérium (${}^2\text{D}$): nehézvíz, tengervíz minden literje 30 mg-ot tartalmaz
- Trícium (${}^3\text{T}$): bomlik kb. 12 év felezési idővel, ezt csinálni kell

Viszont legalább könnyű elkészíteni:



Ez a terv egy fúziós reaktornál is: maga a reaktor gyártja saját maga számára a tríciumot

Fúzió:



Lítiumot tartalmazó kísérleti trícium tenyésztő nyalábok a készülő ITER-ben

Mi Kell a Fúzióhoz?

Fúzióban magok egyesülnek

A magok mind pozitív töltésűek \implies taszítják egymást, ezt le kell tudni győzni

A taszítás legyőzéséhez elegendő mozgási energiával kell a magoknak rendelkeznie

\implies nagy hőmérséklet szükséges (~200 millió Kelvin)

A gyakorlatban ennél kissé kisebb hőmérséklet is elég, mivel:

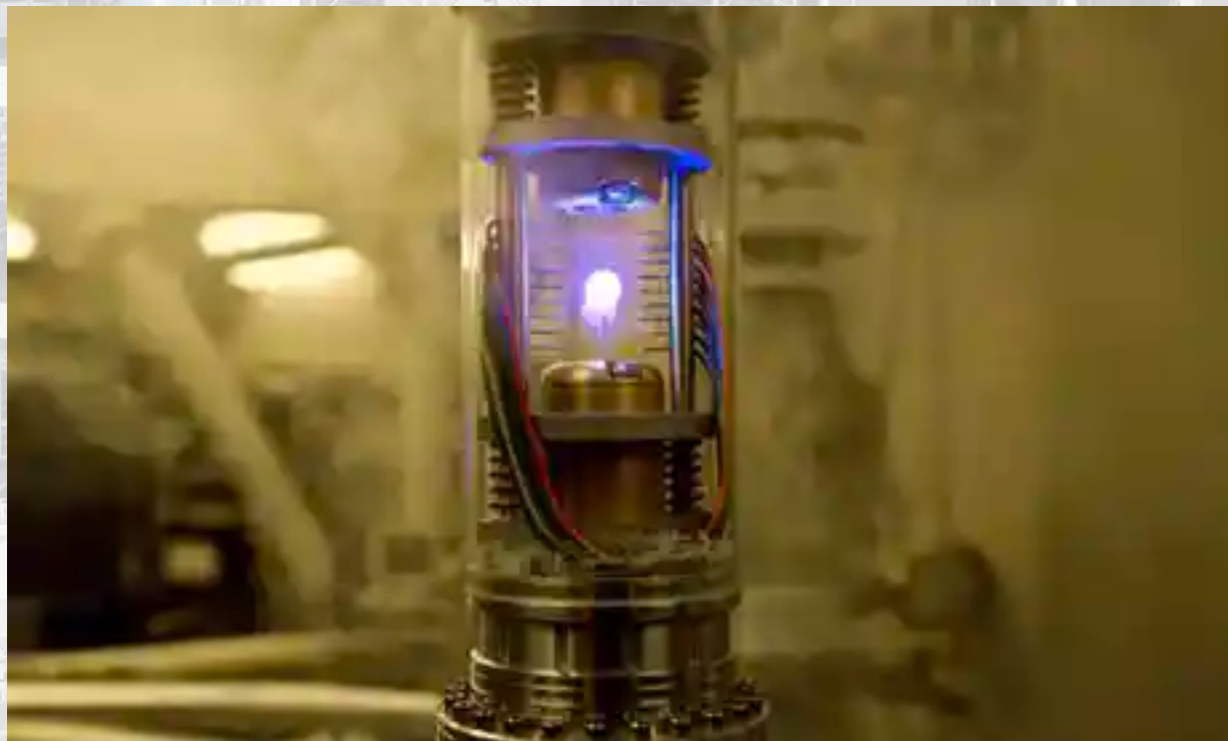
- A plazmában az ionok Boltzmann eloszlást követnek (van nagyobb sebességű ion is, mint az átlag sebesség)
- Kvantummechanikai okok miatt még ekkor is összeolvadhatnak a magok (alagút effektus)

Mi Kell a Fúzióhoz?

Hol lehet fuziót csinálni?

Ezen a hőmérsékleten az anyagok már plazma állapotban vannak: atommagok és elektronok nem alkotnak rendszert

Valamibe ezt be kell zárni!



Nincs olyan anyag, ami ezt kibírná
⇒ bezárni csak mágneses térrel lehet

Mi Kell a Fúzióhoz?

Mennyi ideig kell bezárni a plazmát hogy energiát termeljen?

A fúzió során keletkező neutronok semlegesek \implies nem hat rájuk a mágneses tér \implies csak a megmaradó ^4He magok fűtik tovább a plazmát

A kezdeti plazmát a keletkező fúziós terméknek tovább kell fűtenie, hogy fenntartható állapot alakulhasson ki

Minél nagyobb a plazma sűrűsége, annál kisebb ideig kell együtt tartani, hogy fenntartható legyen a fúzió (Lawson feltétel)

Egy fúziós reaktor hatékonyságát a Q faktoral fejezhetjük ki (Q-szor több energia keletkezik, mint amennyi a fűtéshez fel lett használva)

Mi Kell a Fúzióhoz?

Milyen mágneses tér kell a bezáráshoz?

Határozott ideig meg kell tartania a plazmát

Kicsi legyen a plazma elvesztése miatti energia veszteség

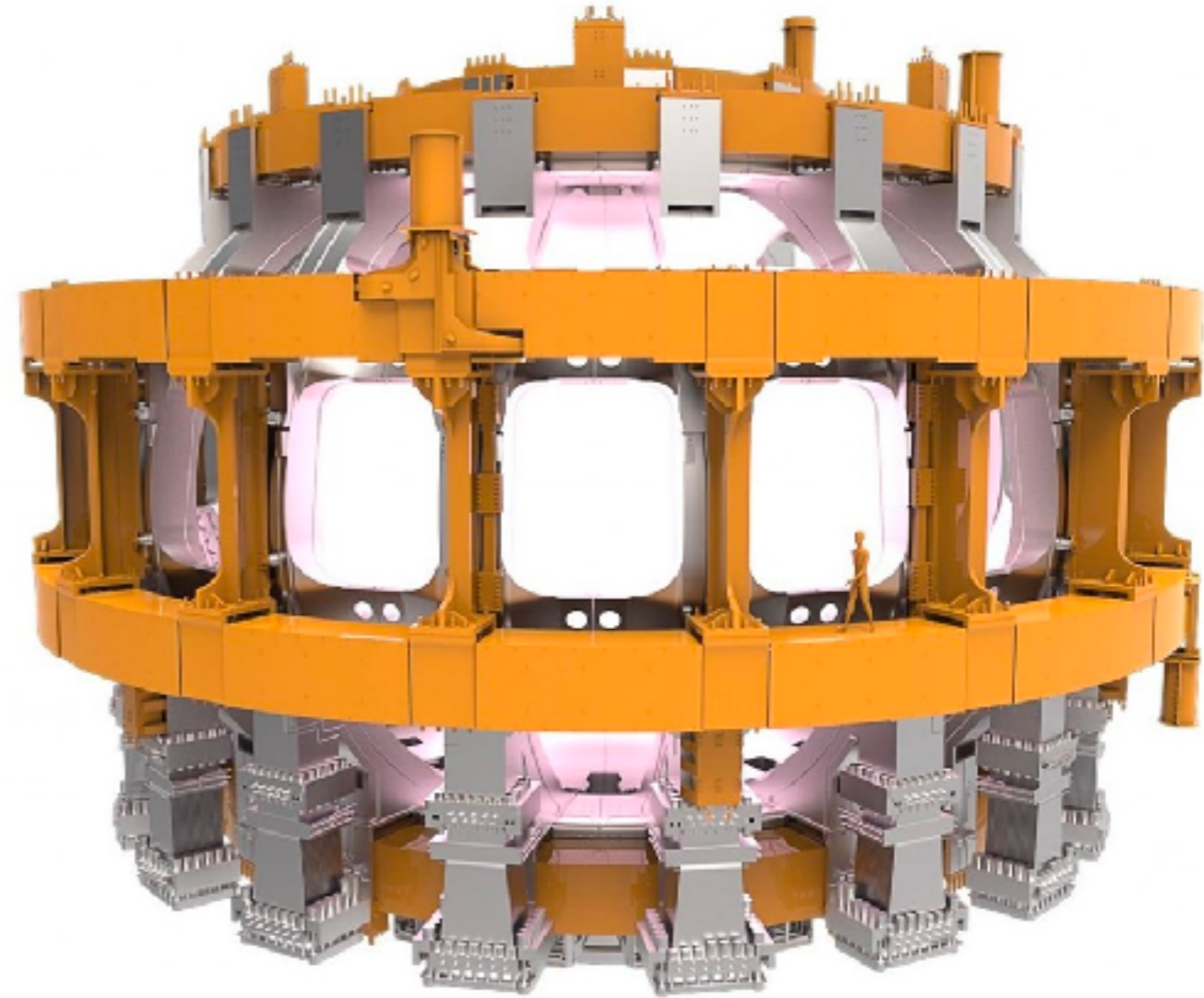
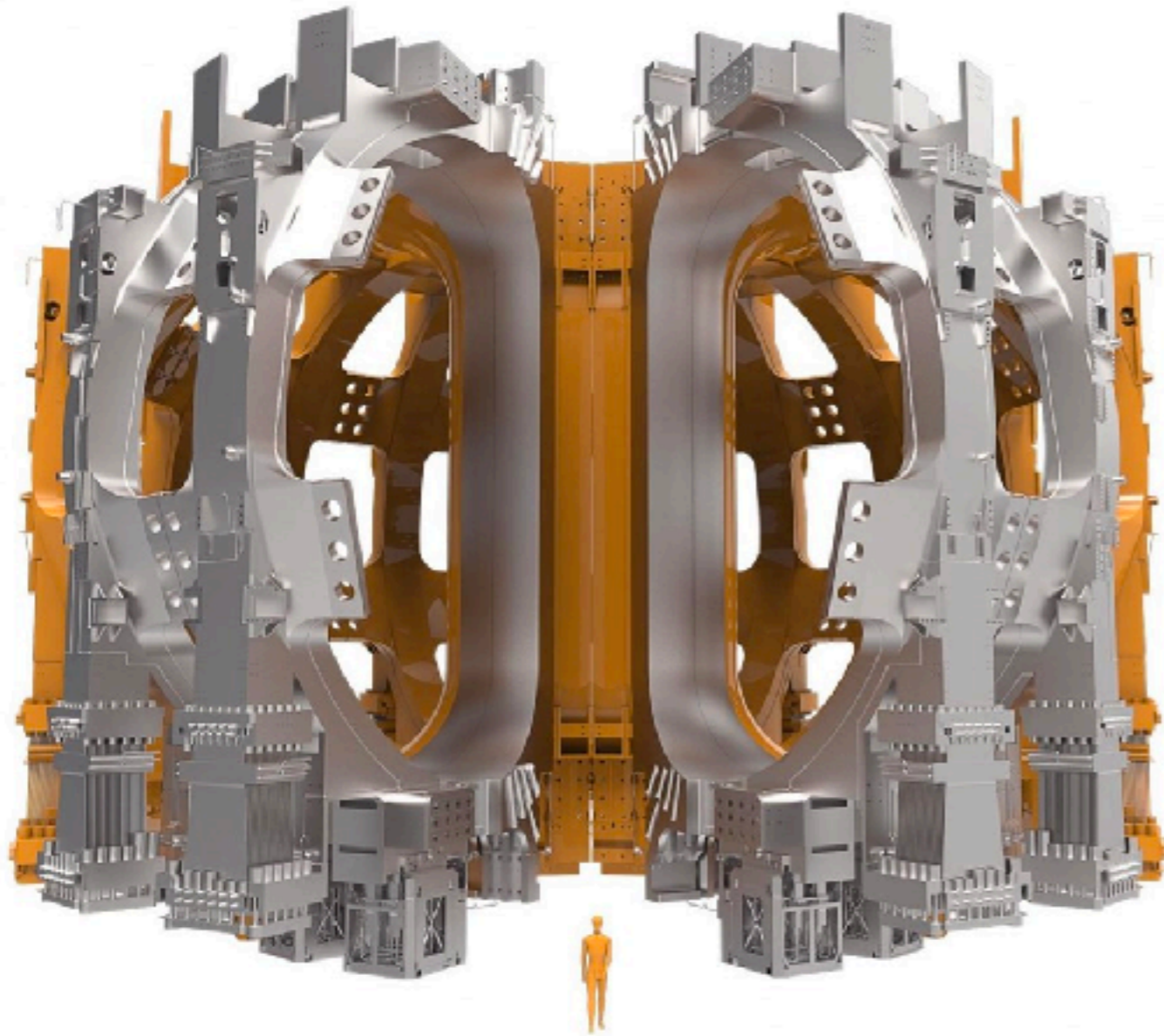
Nem lehet nagyon bonyolult mivel nagy méretek mellett nem lehet kivitelezni

Kevésbé legyen érzékeny instabilitásokra (tökéletes mágneses tér nem létezik zajok, mechanikai kialakítás, stb. miatt)

Az eddigi legjobb megoldás a TOKAMAK elrendezés:

Toroidal'naya Kamera s Magnitnymi Katushkami — Toroidal Chamber with Magnetic Coils;

Mi Kell a Fúzióhoz?



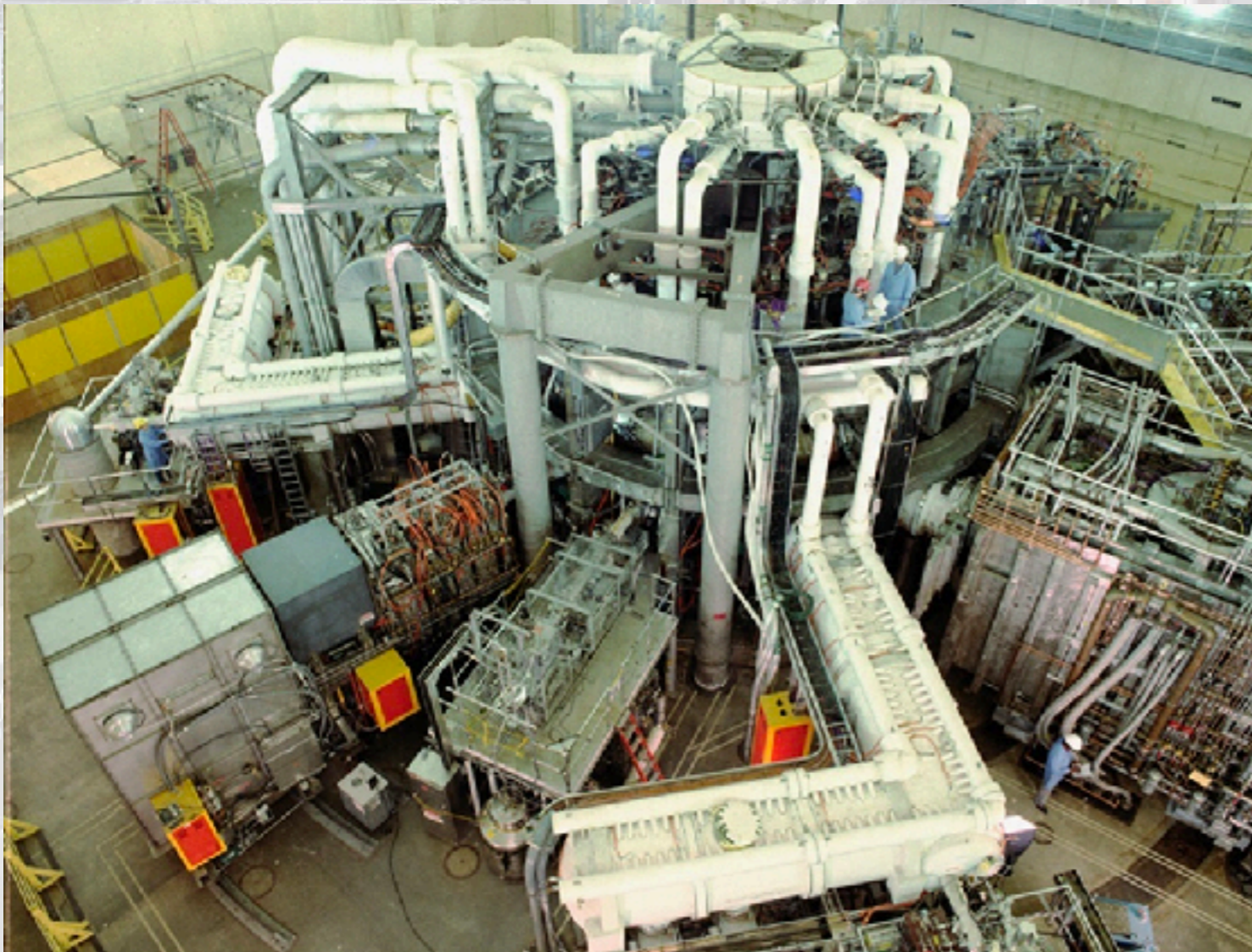
A feladat bonyolult: meg kell tartani stabilan a plazmát és lehetőség legyen azt fűteni is!

Közben szilárdnak is kell maradnia: kb. 2-szer akkora erők mint egy űrsikló fellövésénél!

Fúziós Reaktorok

A hidegháború volt az aranykor: az első atombomba, atomreaktor, hidrogénbomba után a következő logikus lépés lett volna...

A TOKAMAK dizájn sikeressége gyorsan elterjesztette: a Szovjetunió mellett az USA-ban, Angliában és Japánban is készültek

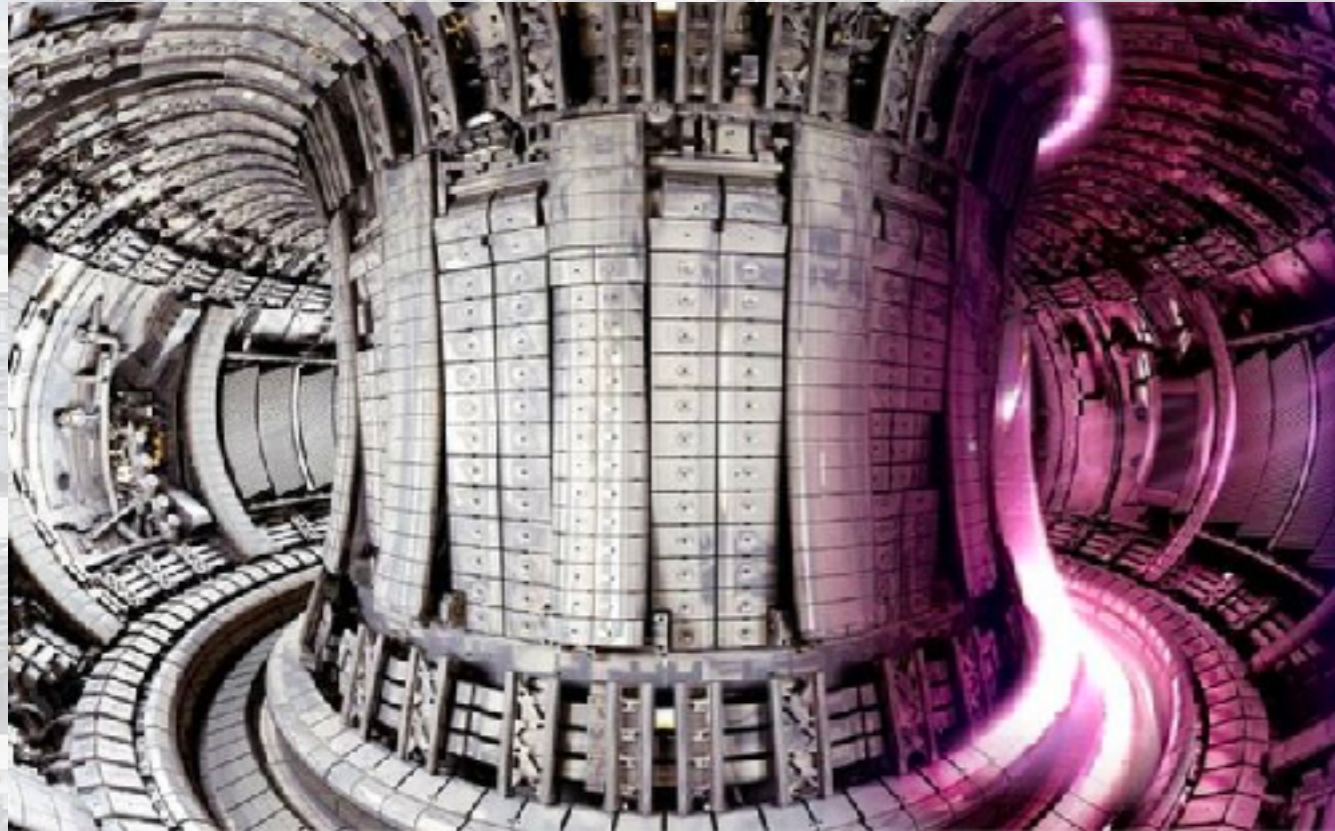


Legjelentősebb a TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) Princeton-ban (NJ), a Princeton Plasma Physics Laboratoryban

Legjobb Q érték: 0,2

Fúziós Reaktorok

Európában a JET (Joint European Torus), Anglia



Legjobb Q érték: 0.67 (az ITER-nél 10-et terveznek!)

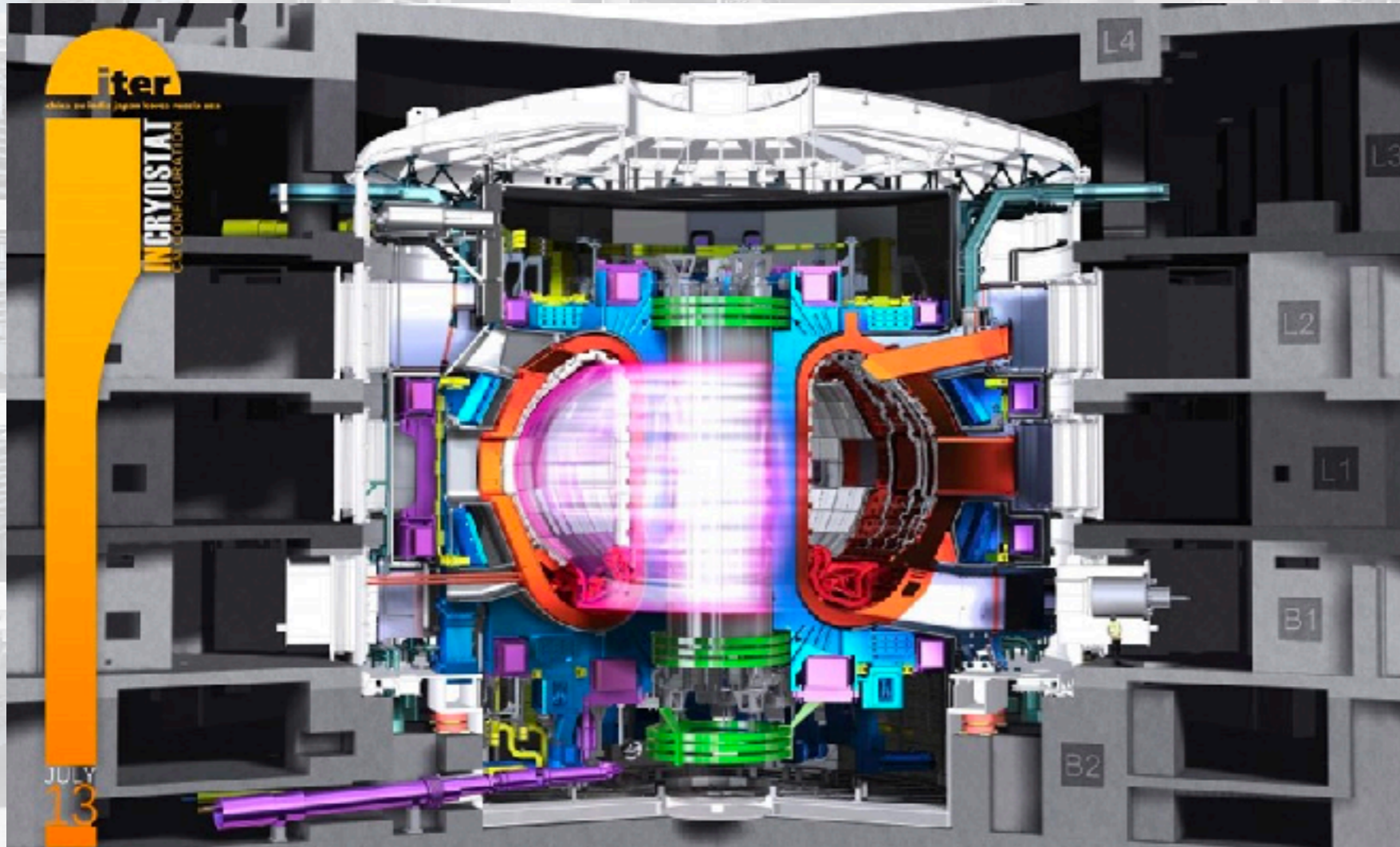
16MW fúziós teljesítmény 24 MW befektetése mellett

Jelenleg is működik az ITER-nél használandó technológiák első számú tesztüzeme

Az elektromágnesek rézhuzallal vannak tekerve, vízzel hűtve és kb. 1000 MW teljesítményre van szükség az üzemeléshez

Fúziós Reaktorok

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor),
Franciaországban



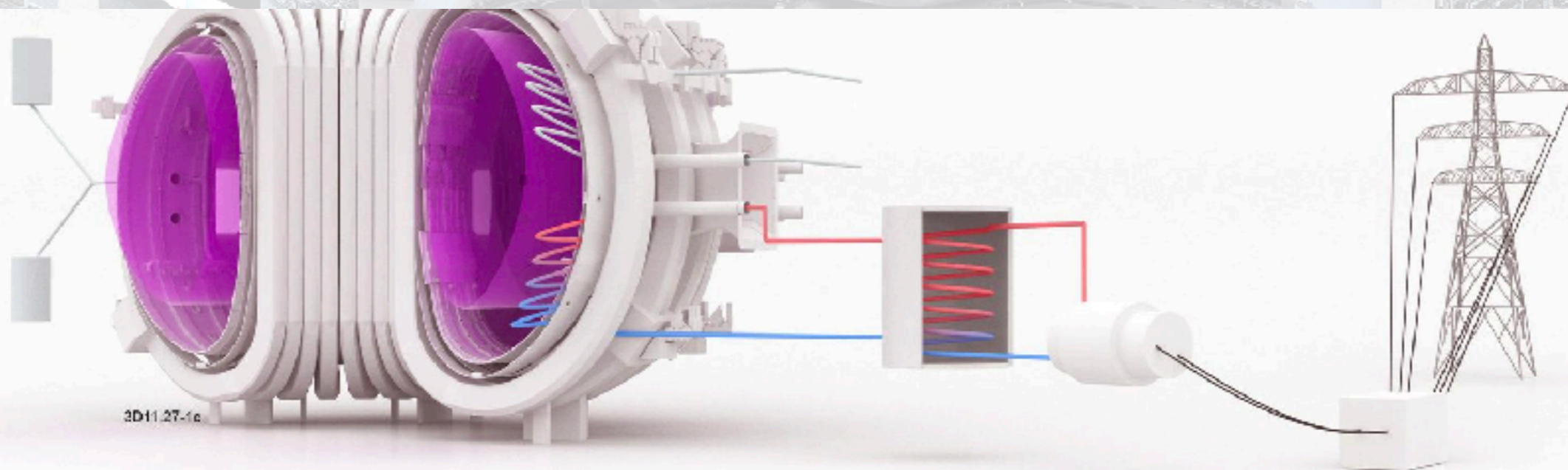
A cél: $Q = 10$
500MW fúziós telj.
50 MW fűtésiből

Alacsony fűtési teljesítmény szupravezető mágnesek használata miatt
Ez csak egy főpróba lenne a DEMO-hoz
Első plazma 2025 decemberében várható

ITER Célok

- Elérni a $Q=10$ -et (10-szer több fúziós energia, mint ami fűtéshez kell)
- Több percig fenntartani fúziót D-T folyamatban
- Lehet-e tényleg tríciumot tenyészteni fúziós reaktorban?
- A konstrukció tényleg alkalmas stabil fúzió elérésére vagy sem?
- A keletkező gyors neutronok felaktiválják a reaktor belső tereit, milyen hatása van ennek a berendezésekre, mennyi radioaktív szemét keletkezik?
- Az ITER csak egy főpróba a DEMO-hoz: DEMO = DEMOnstration Power Station ($Q = 25$) (az eddigi legnagyobb Q 0.6 körüli volt...)

DEMO



3D11.27-1c

Kísérlet

Fúziós Telj.

Fűtési Telj.

Q

JET

18MW

24MW

0.67

ITER

500MW

50MW

10

DEMO

2000MW

80MW

25

Összefoglaló:

- A fúzió a hasadás ellentettje, magok egyesülnek, energia szabadul fel
- Eddig még nem sikerült fenntartható fúziót előidézni ($Q > 1$)
- Az ITER egyesíti az eddigi jó elképzeléseket és már szupravezető mágneseket használ (kisebb üzemeltetési energia)
- Az első plazmát 2025-ben akarják benne előállítani, ekkor még biztos nem lesz fúzió
- A keletkező gyors neutronok felaktiválják a reaktort, nem világos, mennyire és hogy ez hosszútávon hogyan kezelhető
- A szupravezető mágnesek a legfontosabb új technológia, de ezzel a CERN-nek is meggyűlt a baja...

ITER = Az út (the way) latinul

Bernard Moitessier

THE LONG WAY





Köszönöm a figyelmet!