



A MAGYAR
TUDOMÁNY
ÜNNEPE

MTA

HUN
REN



A magfúzió ígérete

Zoletnik Sándor

Laboratóriumvezető

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

Fúziós Plazmafizika Laboratórium

A csillagok energiája

Fogyóban a földgáz, kevés az energia...

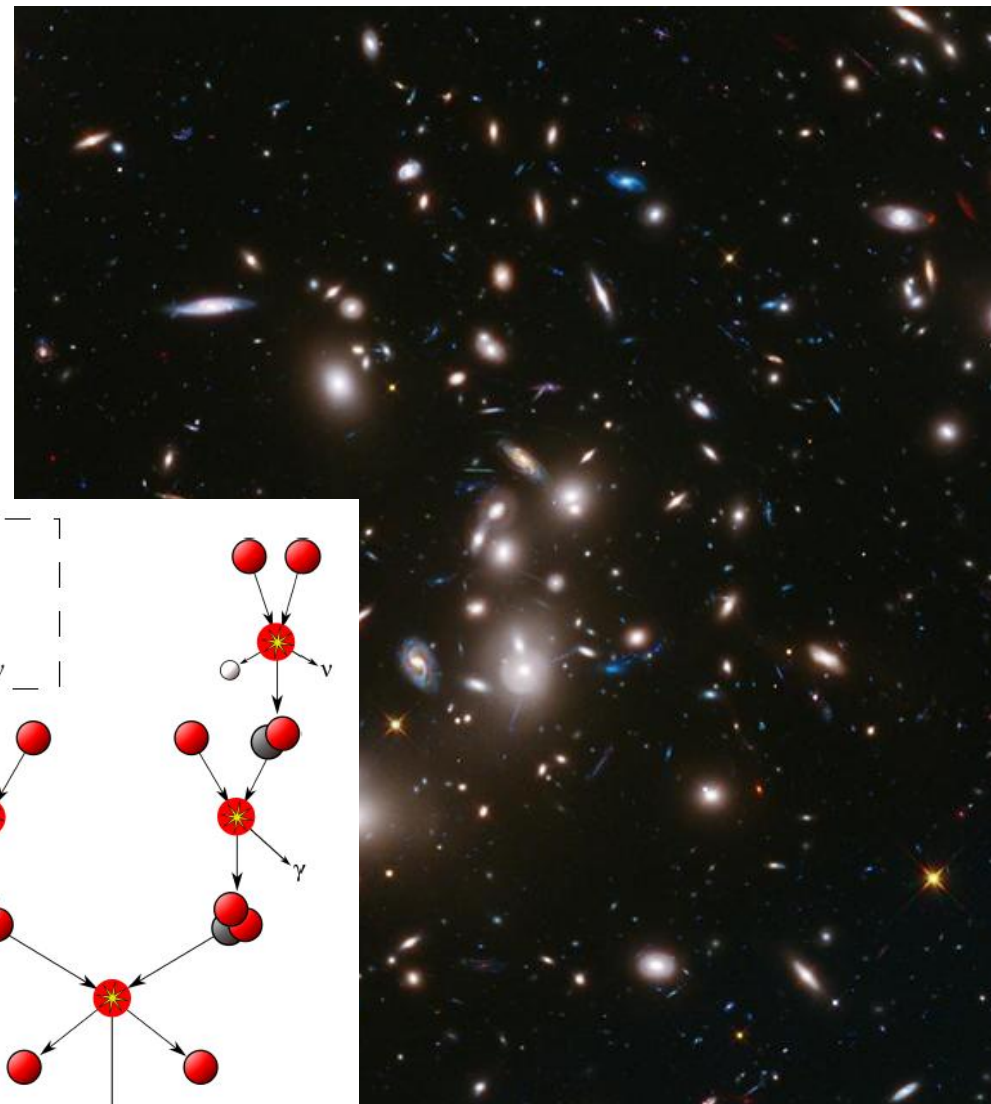
A csillagok évmilliárdok óta világítanak

Honnan van ez energiájuk?

Már több mint 50 éve ismert, hogy a csillagok leginkább hidrogén atommagokat alakítanak hélium atommagokká.

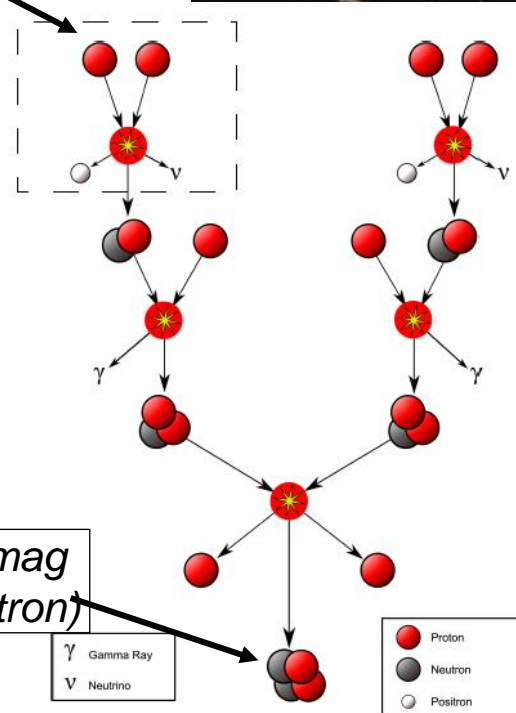
→magfúzió

*1 g hidrogénből 10^{11} J energia
(Egy nagy villamos erőmű 100 másodpercig)*



Hubble űrteleszkóp kép
(<https://picryl.com/media/hubble-frontier-field-abell-2744-f22663>)

Hidrogén atommag
(proton)



Hidrogén atommag
(2 proton, 2 neutron)

γ Gamma Ray
ν Neutrino

Lehet-e földi csillag-erőműveket építeni?

Az atommagoknak elektromos töltése van

→ taszítják egymást

→ a reakcióhoz gyors ütközések kellene

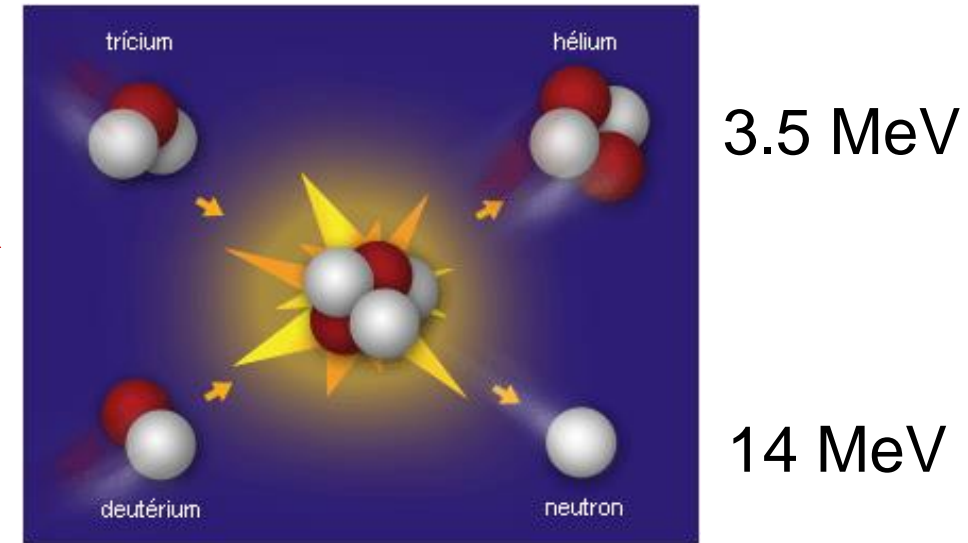
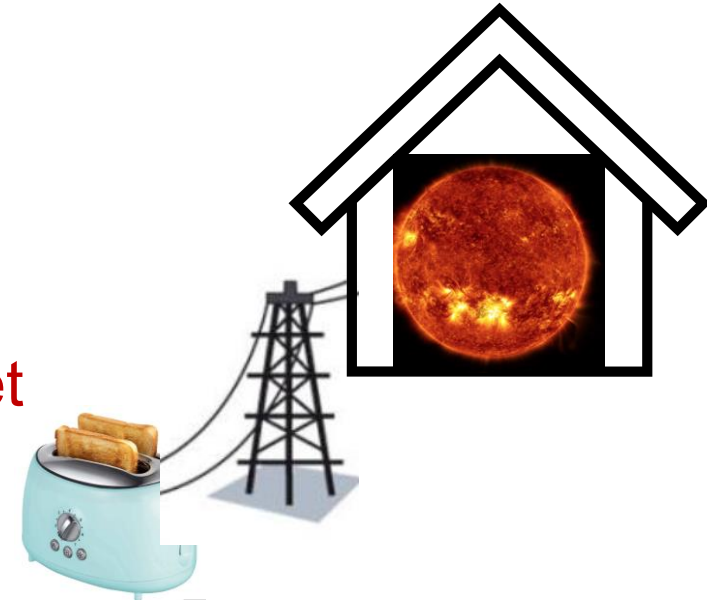
- Gyorsító → fúziós reakciók nagyon ritkák
- Állandó gyors részecsemozgás kell: **magas hőmérséklet**

A Nap középpontjában 10 millió K a hőmérséklet de csak kevesebb mint 1 W/m^3 teljesítményt termel

→ **a Nap módszere alkalmatlan földi felhasználásra**

De vannak más hasonló reakciók, a legalkalmasabb a hidrogén két nehéz izotópja között: deutérium-trícium

Ehhez sajnos 100 millió Kelvin hőmérséklet kell



A fizikus fúziós erőműve

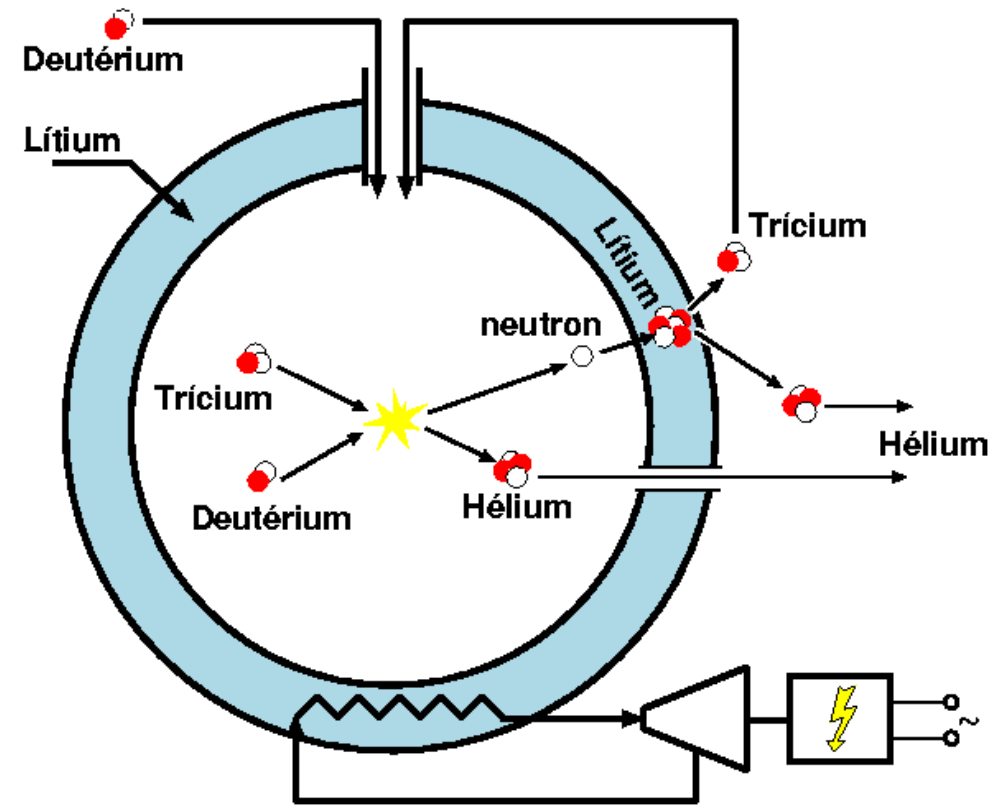
Egy 1 GW-os erőműhöz évente néhány 100 kg üzemanyag kellene csak

- A keletkező hélium nem radioaktív, nem mérgező
- Egyszerre csak néhány gramm üzemanyag van jelen → nem lehetséges megszaladás, baleset
- Deutérium van a természetben korlátlanul (1:6000 D-H arány)

Ez az ideális energiaforrás

De vannak gondok

- Trícium nincs használható mennyiségben → termelés lítiumból
- A 100 millió K hőmérsékletű anyag fenntartása
Közeg ionizált (atommagok-elektronok)
→ mágneses terekkel lehetne egybentartani



Inerciális fúzió: mikrorobbantások

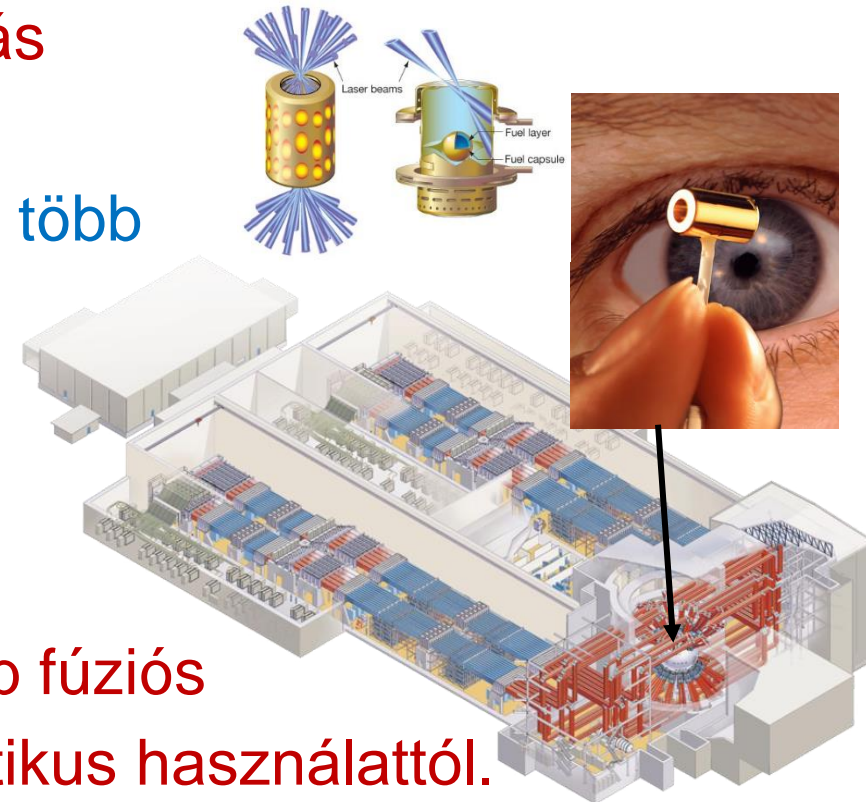
Készítünk egy kicsi fagyasztott deutérium-trícium golyót és fűtsük fel:

- Hangsebességgel tágul r/c_s idő alatt \rightarrow inerciális (tehetetlenségi) fúzió
- Nem lehet túl nagy, mert akkor az épületet is viszi
- Ha kicsi akkor nagyon sűrűnek kell lenni, hogy elég sok reakció legyen
 \rightarrow 1000x szilárd sűrűség kell \rightarrow lézeres összenyomás

Az amerikai NIF berendezésben sikerült egy robbantásból több energiát kinyerni mint amennyi a lézerekben volt

- 192 lézernyaláb, 300x több energia mint a lézerfényben
- DT kapszula arany üregben, 1 mérés pár havonta
- Reaktorhoz másodpercenként 10 robbantás kellene

Az inerciális fúziós elképzelés bizonyította, hogy lehet több fúziós energiát kinyerni egy közegből, de nagyon távol áll a praktikus használattól.



Mágneses plazmaösszetartás

A fúzióhoz szükséges energiák sokkal nagyobbak, mint az elektronok kötési energiája az atommagokon

→ az elektronok leszakadnak az atommagokról

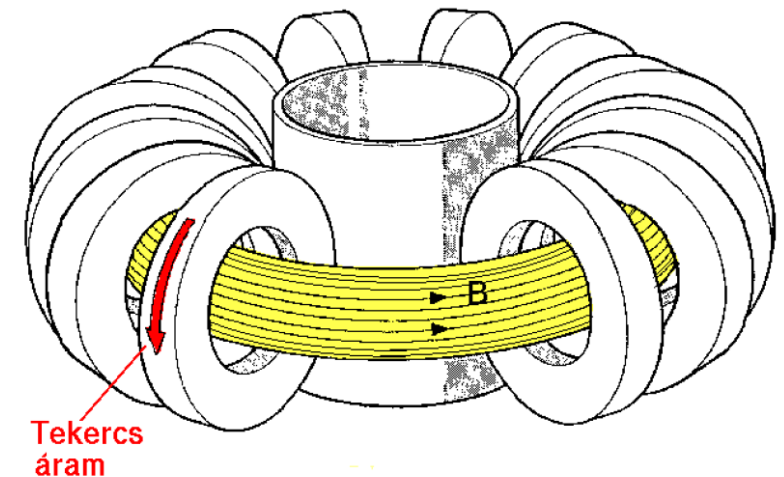
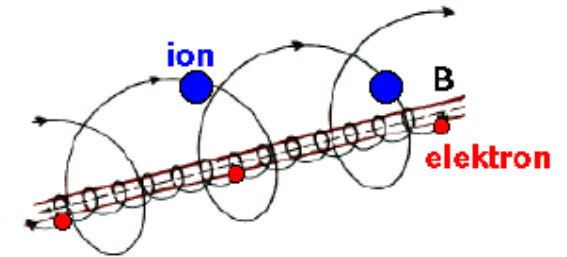
→ töltött részecskék keveréke (elektron, atommag) → plazma

A töltött részecskék spirális (Larmor) pályán mozognak

- Mágneses térre merőlegesen megvan az összetartás
Erősebb mágneses tér → job összetartás
- Mágneses tér mentén szabad mozgás

Nem szabad elvarratlan mágneses erővonalakat hagyni

→ körbefutó erővonalak, tórusz



Mágneses fúziós berendezések

A görbült mágneses tér miatt lassan vándorolnak a részecskék a mágneses térre merőlegesen is (le és fel)

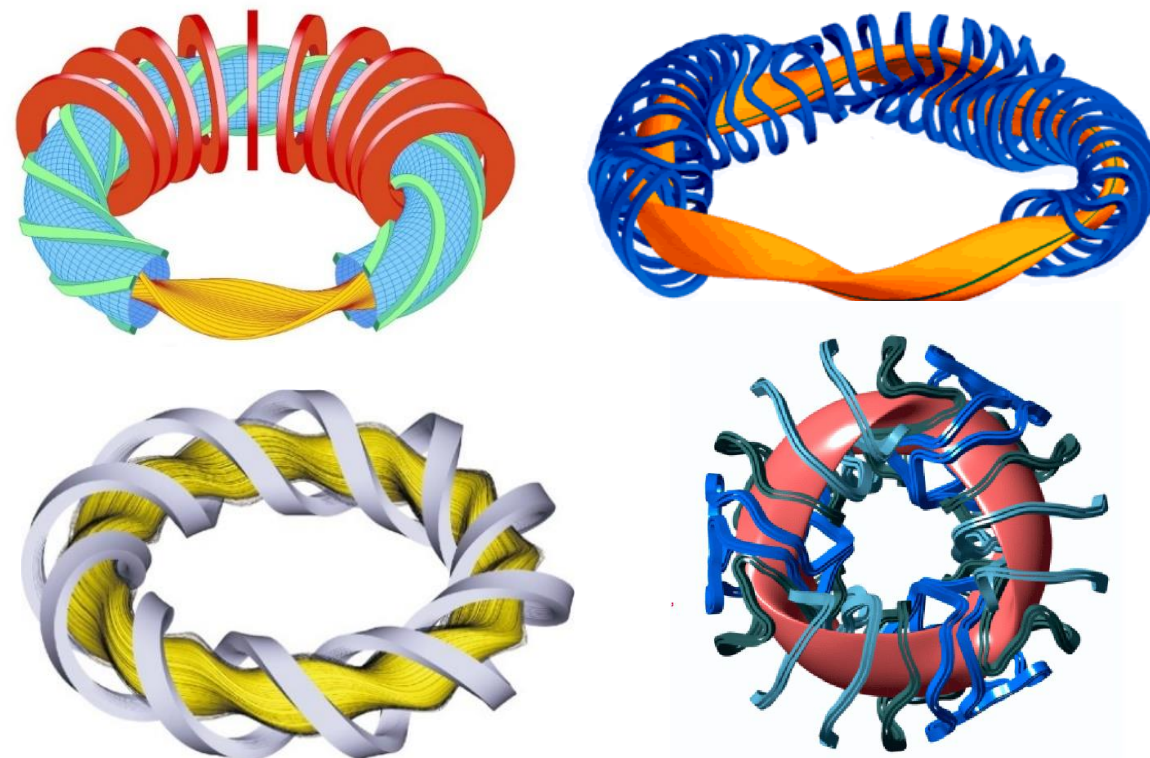
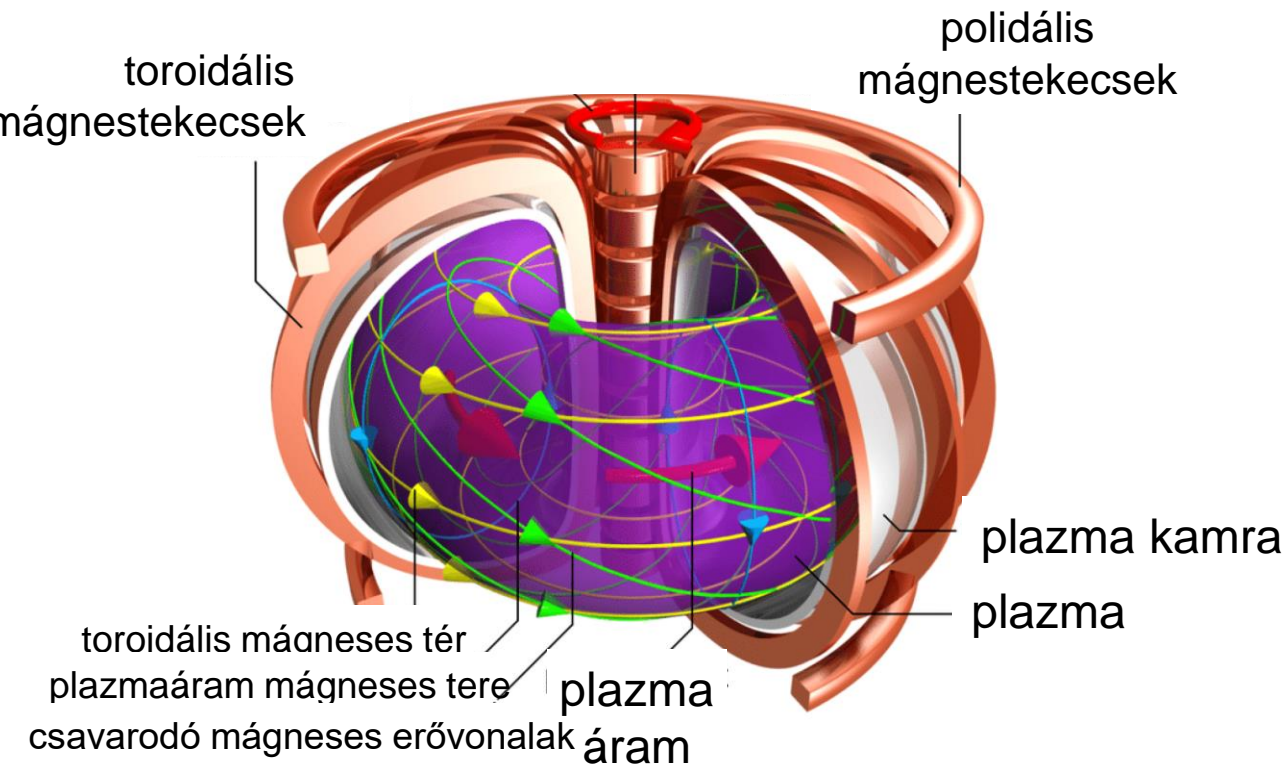
→ a mágneses erővonalakat fel kell tekerni a tóruszban ez összekeveri a sodródást

Tokamak

Sztellarátor

Mágneses tér tekerés plazmaárammal

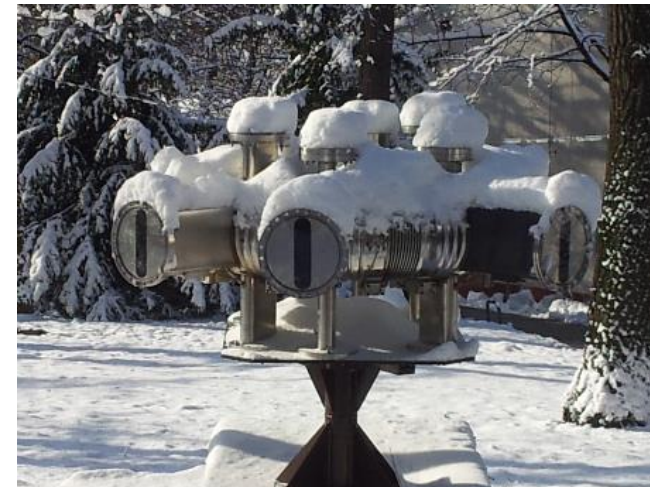
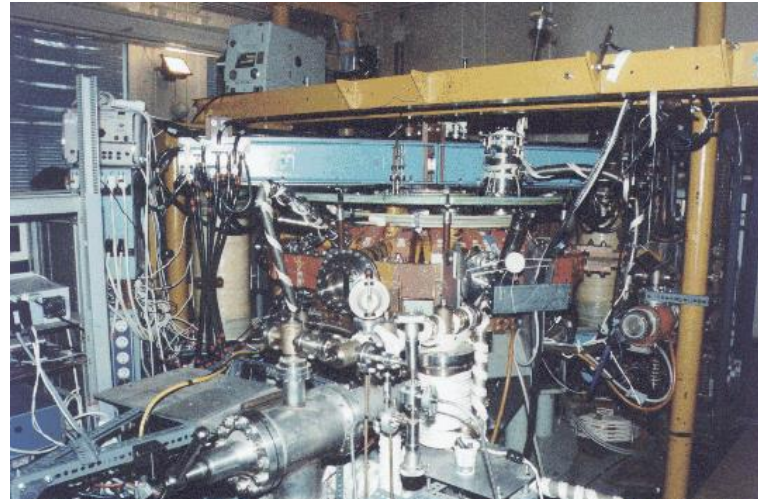
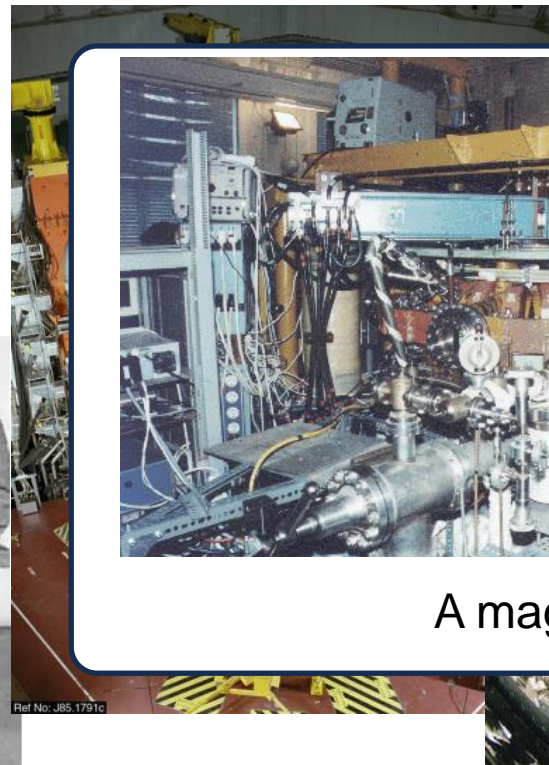
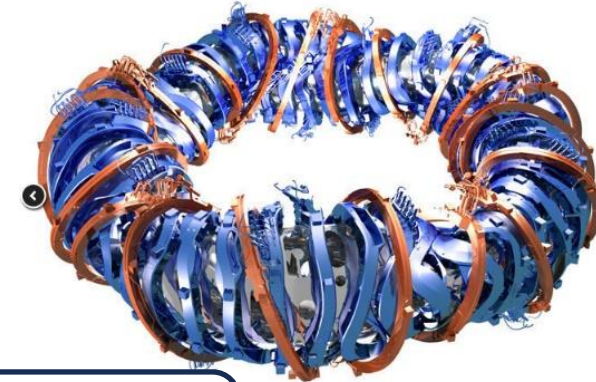
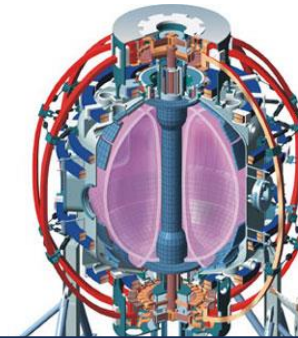
Mágneses tér tekerés geometriával



Mágneses fúziós kísérletek

Az 1950-es évek óta épülnek különböző mágneses (és nem mágneses) fúziós kísérleti berendezések:

- Plazma összetartás, fűtés, szabályzás kísérletek
- Általában néhány másodperces működés
- Fúziós körülmények elérhetők



A magyar MT-1M tokamak 1998-ban és ma

Ref No: J85.1791c

Mit tudnak már a mágneses fúziós berendezések?

Hőmérséklet

A szükséges 100 millió K hőmérséklet rutinszerűen elérhető

Fűtés mikrohullámokkal, rádióhullámokkal, atomnyalábokkal

Sűrűség

A szükséges sűrűség (1/100000 léghőköri) fenntartható: gázbefűtés, fagyasztott hidrogén belövés

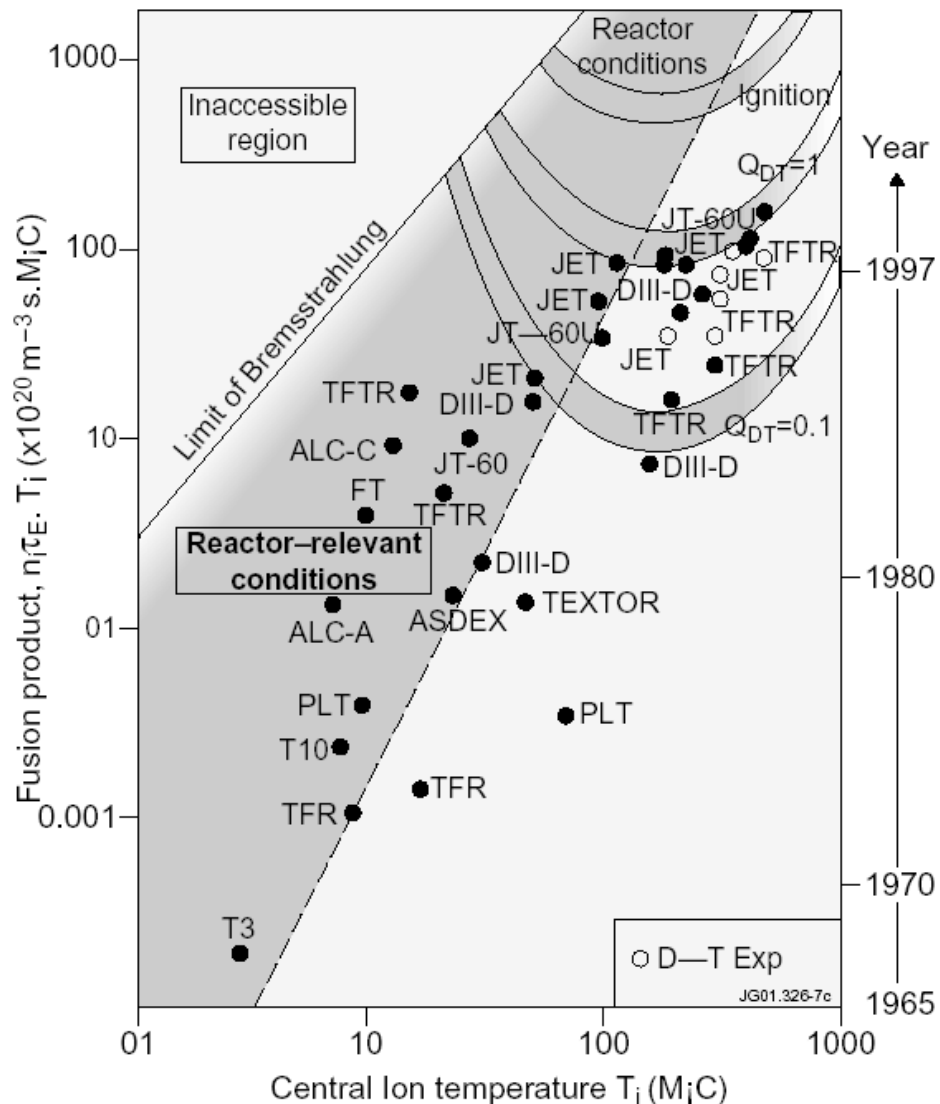
Mágneses tér

A berendezések egy része szupravezető mágnessel működik → állandó mágneses tér

Mérés és szabályzás

A speciális fúziós diagnosztikai eljárások működnek

A plazmaállapot szabályozható

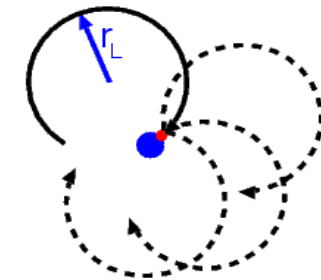


Miért nincs még erőmű?

Az egyes részecskék Larmor mozgása csak az fizika egy része

Ha sok részecske van:

- Ütközések, Larmor pálya közepe ugrik
- Részecse áramlások mágneses és elektromos tereket keltenek
- Különböző instabilitások, hullámok
(a fizikus játszóttere)

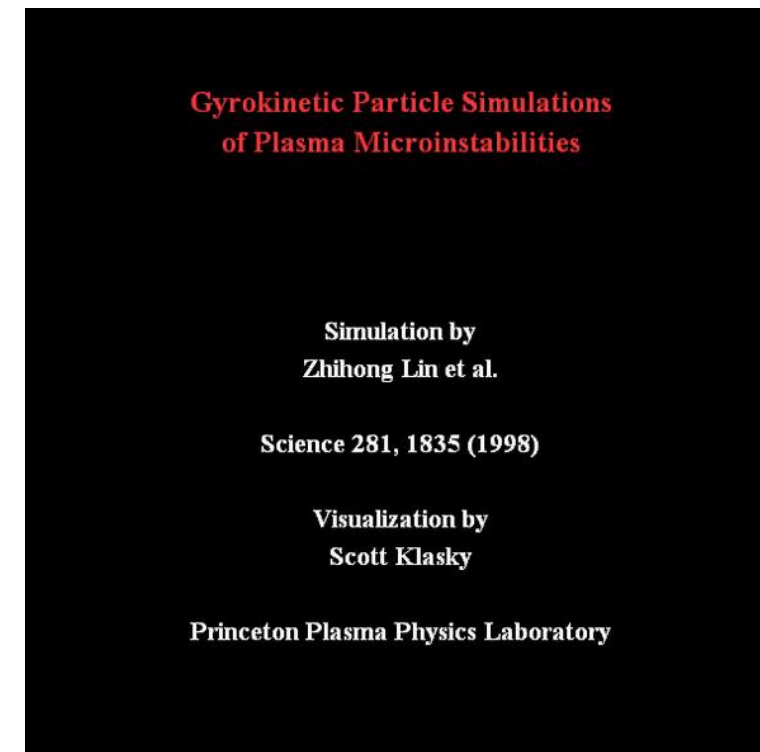


Bár makroszkópiusan a plazma fenntartható,
kis hullámok állandóan keverik azt és transzportálják
a részecskéket és az energiát

A transzport veszteség felületen keresztül zajlik: $\sim R^2$

A fúziós energiatermelés térfogati: $\sim R^3$

R növelése javítja a helyzetet → big (tokamak) is beautiful



Fizika és technológia kéz a kézben

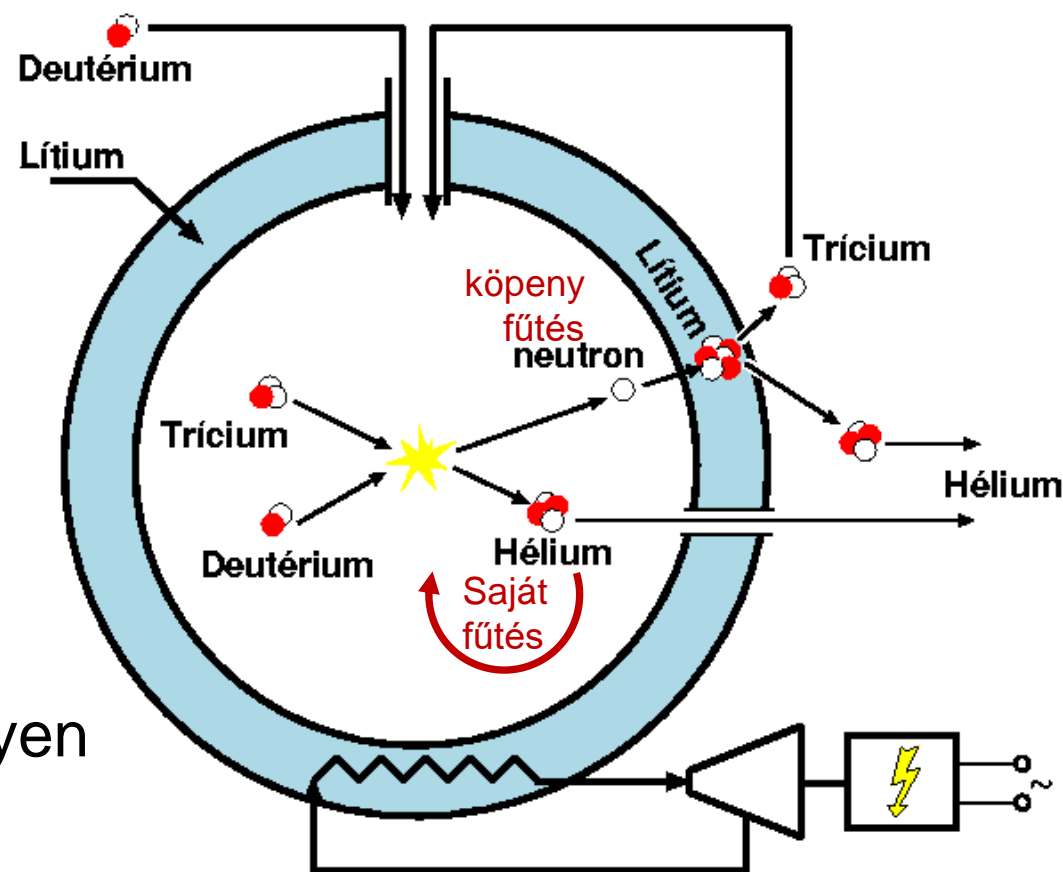
Egy fúziós erőműben a plazma saját fűtése lesz a meghatározó.

A mai mágneses fúziós berendezésekben elhanyagolható a saját fűtés

→ A saját fűtés hatását nem tudjuk tanulmányozni

Kell egy (vagy több) berendezés ami:

- Elég nagy, hogy az energiavesztesége kicsi legyen
- Deutérium-trícium keverékkel működik
- Tartalmaz minden fontos reaktor technológiát



A következő lépés a tokamak vonalon: ITER

A tokamak berendezések *viszonylag* egyszerűek, így leginkább azok fejlődtek

1985-ben felmerült, hogy legyen egy nagy közös USA-Szovjet-EU-Japán tokamak:

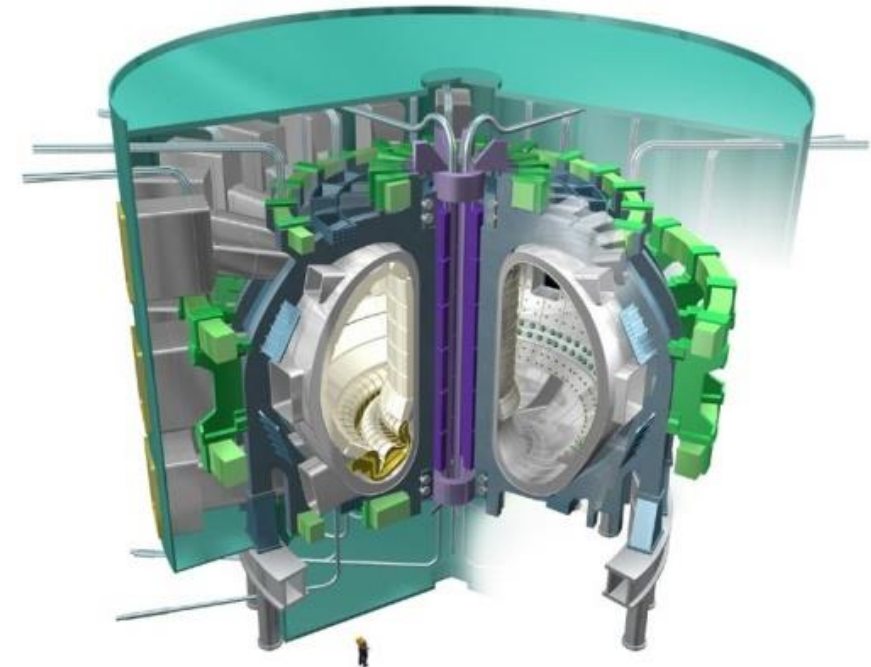
- Erőmű körülmények demonstrálása
- Trícium termelés
- Fizikai és technológiai kísérlet

...Hosszas alkudozás, van pénz, nincs pénz...

... 2006 ITER megállapodás:

EU, USA, RU, JP, CN, KO, IN

... mennyibe kerül, ki mit ad....



ITER

Toroidális tekercsek

5.3 T mágneses tér, 1000 m⁻³ térfogatban
4 10¹⁰ J energia (Paksi erőmű 20 másodpercig)

Kriosztát

Kb. 25 m átmérőjű, a tekercsek 5K -en tartására

Poloidális tekercsek

A plazma alak szabályzására
és a 15 MA plazmaáram
keltésére

Vákuumkamra

1000 m³ térfogat

Köpeny elemek

Vízhűtésű blokkok a vákuum-
kamra védelmére

Biológiai védelem

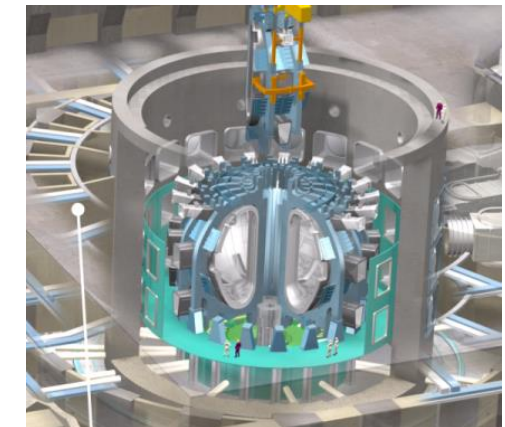
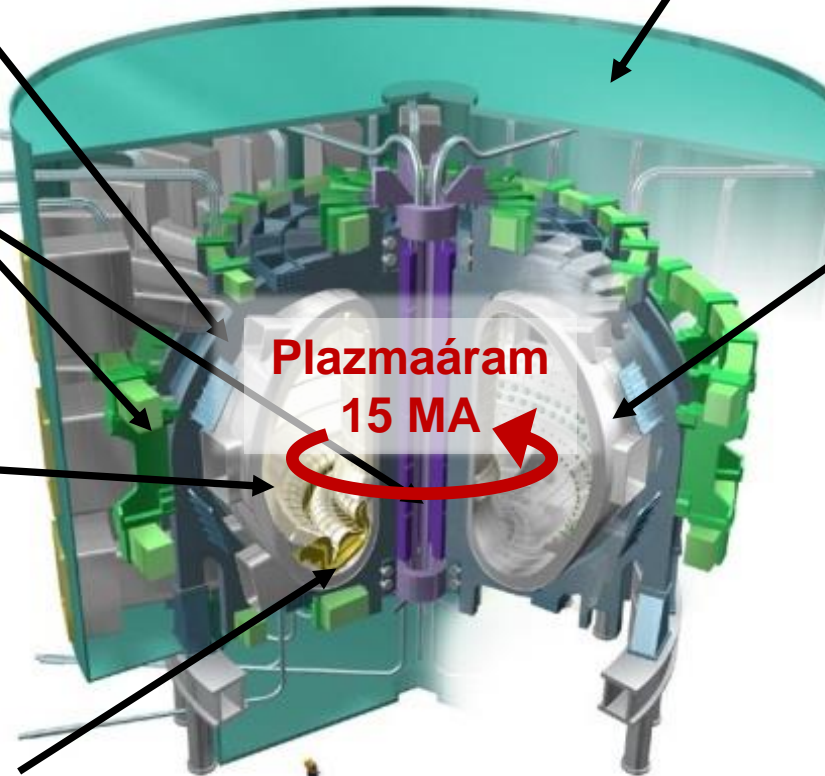
A tokamak egy beton burokban
fog állni

Divertor

A plazma szélének elszívására

Ember

Nem állhat itt a DT működés alatt



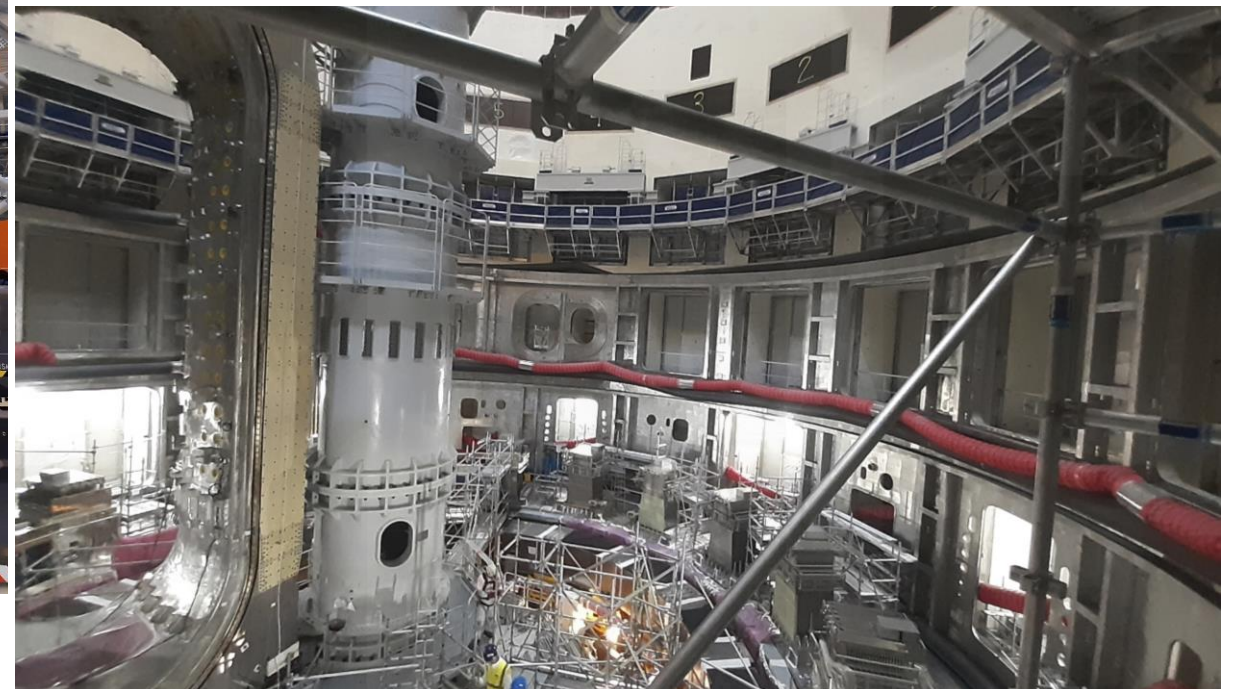
ITER építés

Látszik a fény az alagút végén:

- Szupravezető tekercsek kész vannak
- Berendezés szerelése folyik

De:

- Számos váratlan probléma
- Első plazma: 2034



Az ITER és utána

Az ITER nem fog villamosenergiát termelni. Célja:

- A fúziós fizika megértése, a pozitív energiamérleg demonstrálása
- A trícium termelő technológiák fejlesztése
- Nem önfenntartó trícium termelés

Az ITER után kell egy demonstrációs erőmű:

- Villamos áram termelés demonstrálása
- Önfenntartó trícium termelés
- Folytonos üzem

Mikor lehet demonstrációs erőművet építeni?

- ITER után → biztos fizikai és technológiai alapok, de nagyon sok idő múlva (>2050)
- Alternatív megoldások: nagy kockázat, gyorsabb haladás (sok ötlet)

A fúziós kutatások következő 20 éve meghatározó lesz