



Energiatudományi Kutatóközpont
Fúziós Plazmafizika Laboratórium



Hideg poroltó a földi nap tűzének elfújására

Zoletnik Sándor
Laborvezető





Fogyóban a földgáz, kevés az energia...

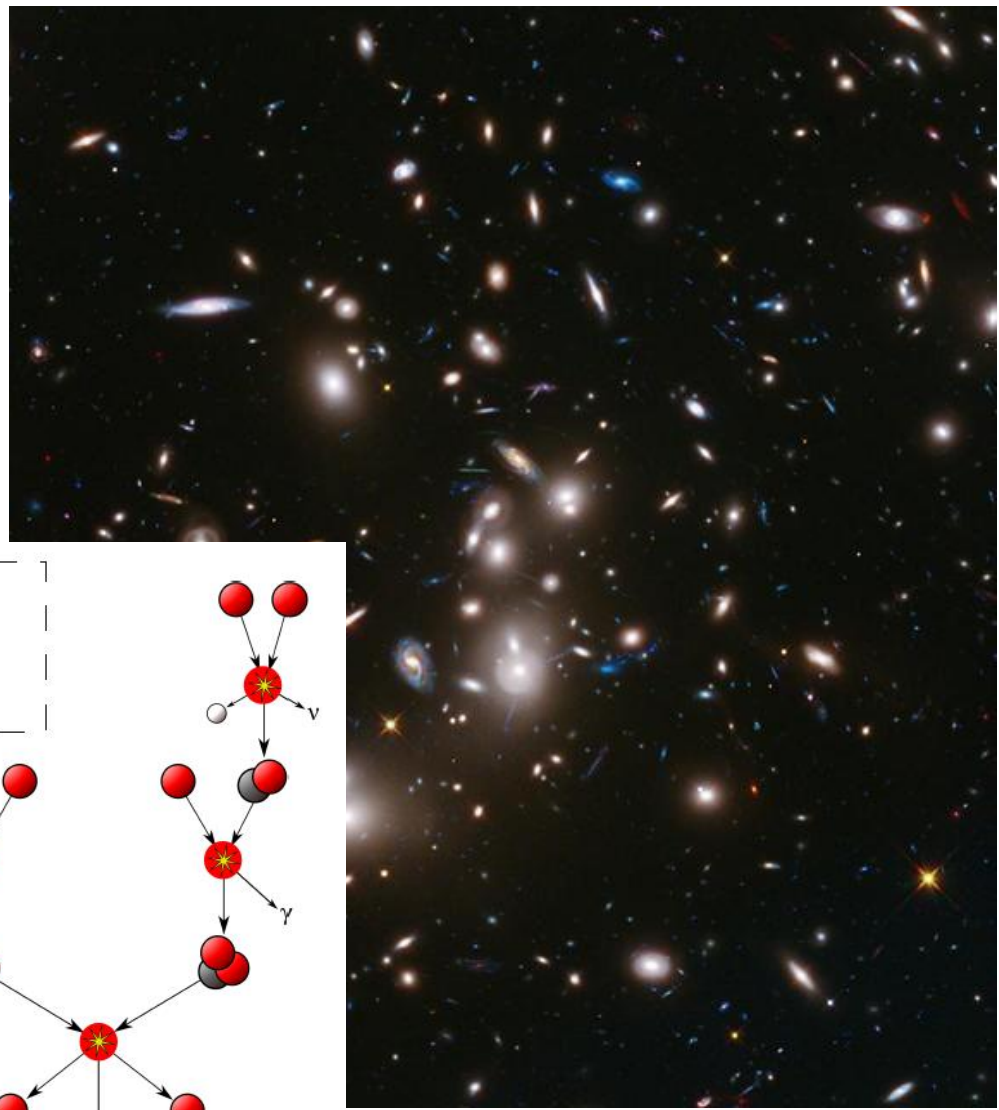
A csillagok évmilliárdok óta világítanak

Honnan van ez energiájuk?

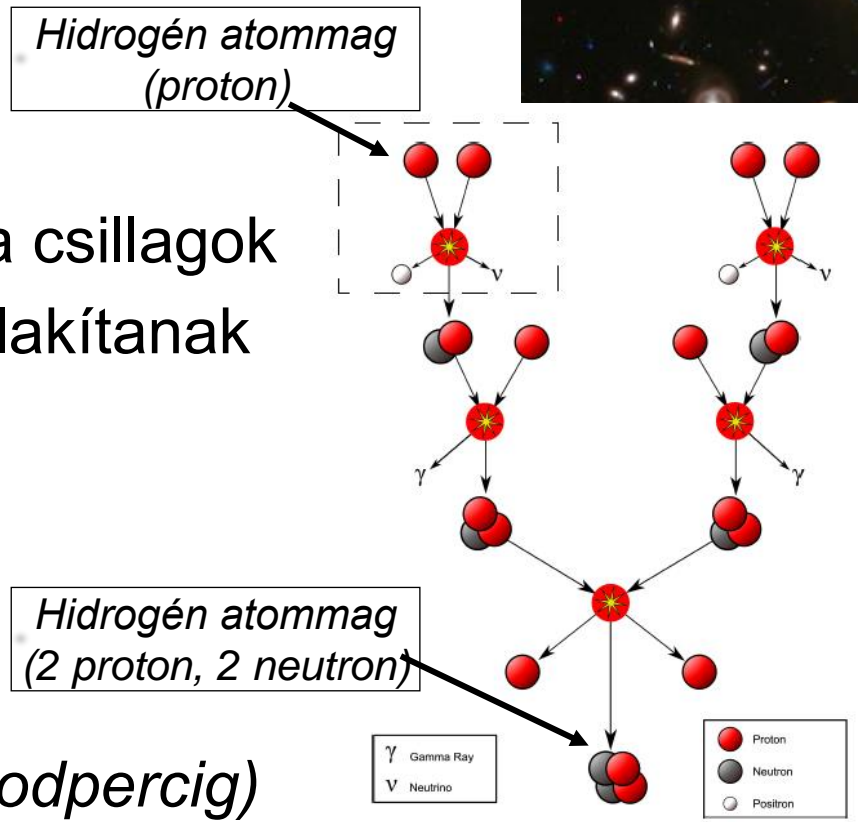
Már több mint 50 éve ismert, hogy a csillagok leginkább hidrogén atommagokat alakítanak hélium atommagokká.

→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>)





Az atommagoknak elektromos töltése van

→ taszítják egymást

→ a reakcióhoz gyors ütközések kellene

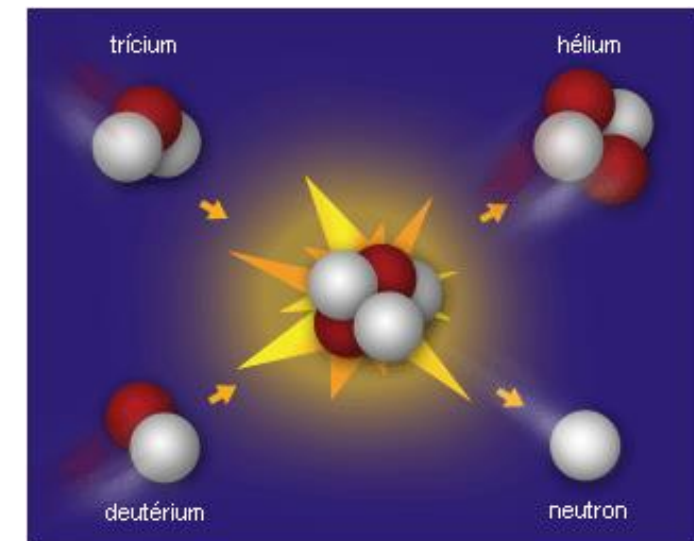
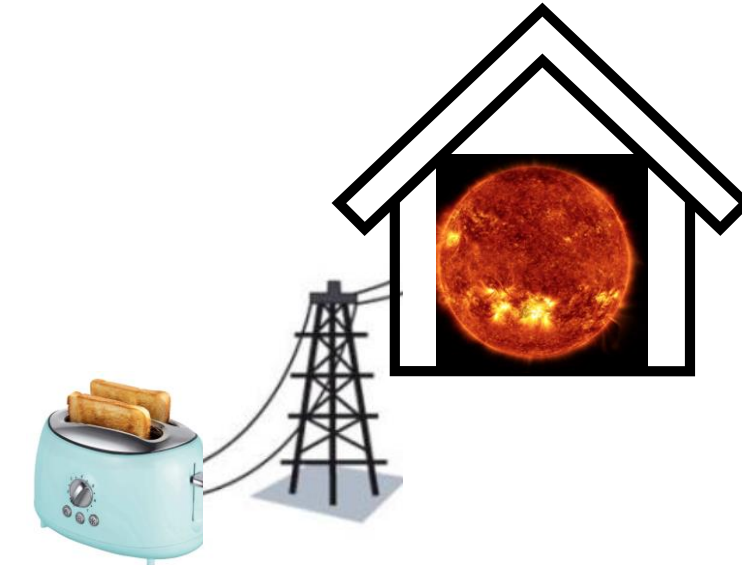
- Gyorsító
- Magas hőmérséklet

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 D-T fúziós reakció

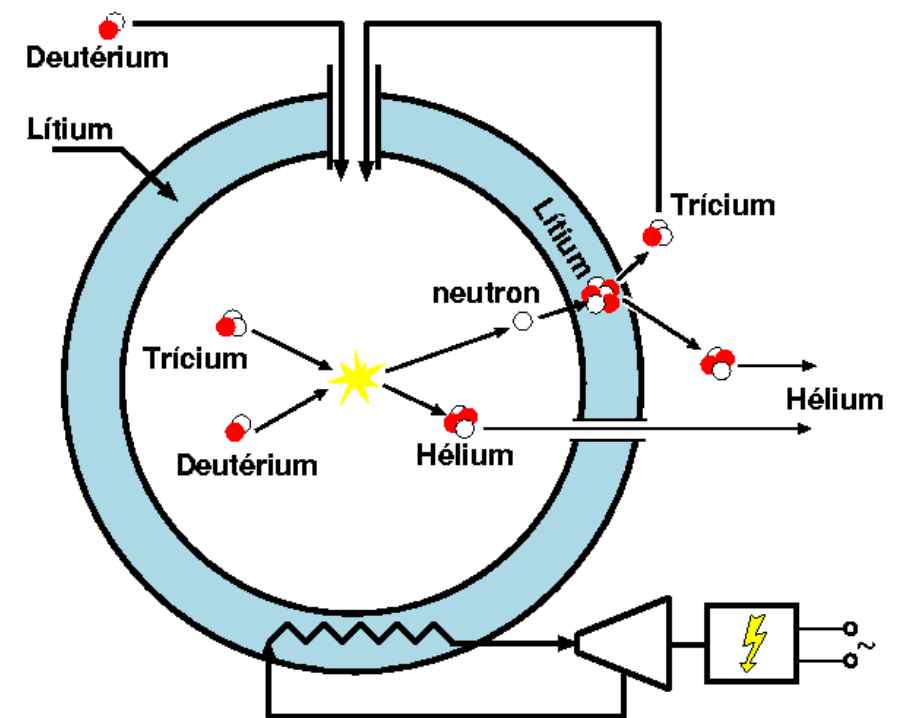
Egy 1 GW-os erőműhöz évente néhány 100 kg üzemanyag kellene csak

- 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



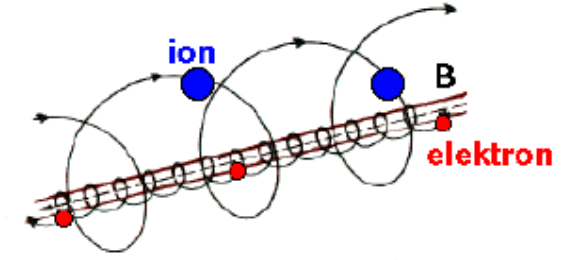


A fúzióhoz szükséges energiák sokkal nagyobbak, mint az elektronok kötési energiája az atommagokon

- az elektronok leszakadnak az atommagokról
- töltött részecskék keveréke (elektron, atommag, plazma)

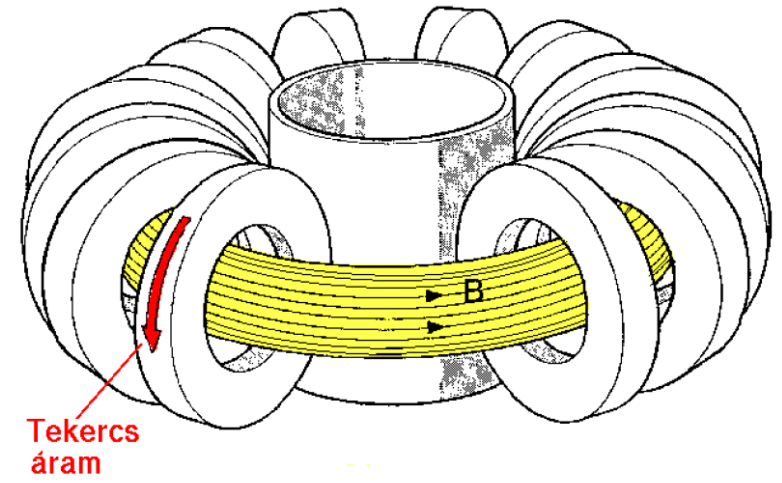
A töltött részecskék spirális (Larmor) pályán mozognak

- Mágneses térre merőlegesen megvan az összetartás
- Mágneses tér mentén szabad mozgás



Nem szabad elvarratlan mágneses erővonalakat hagyni

→ körfutó erővonalak, tórusz



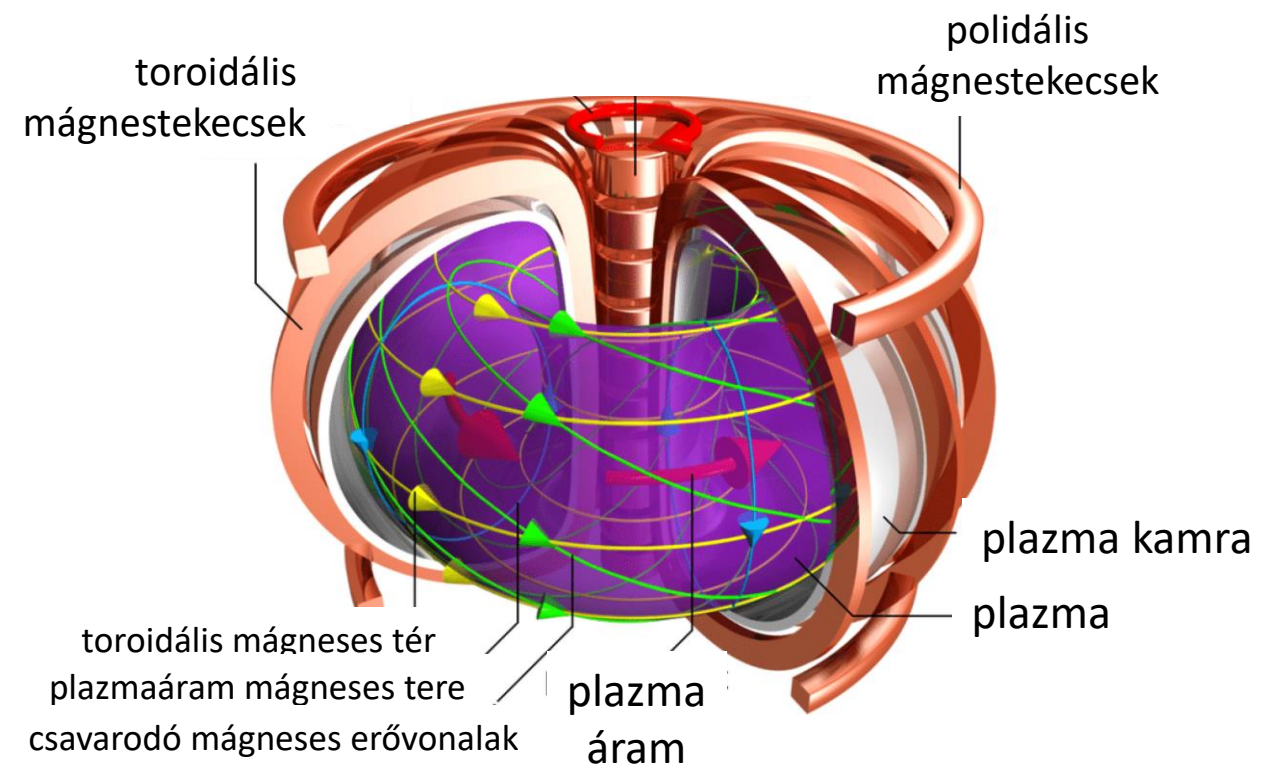


A görbült mágneses tér miatt lassan vándorolnak a részecskék a mágneses térre merőlegesen is

→ a mágneses erővonalakat fel kell tekerni a tóruszban

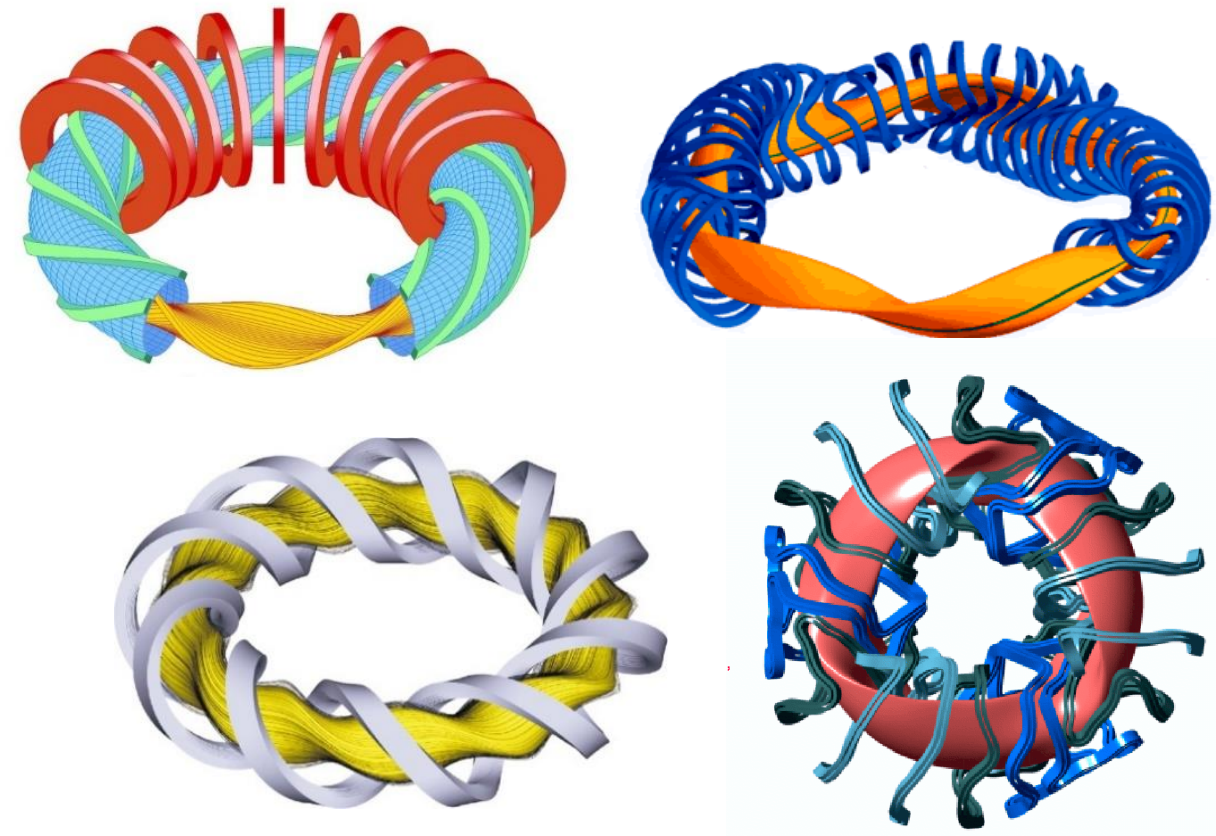
Tokamak

Mágneses tér tekerés plazmaárammal



Sztellarátor

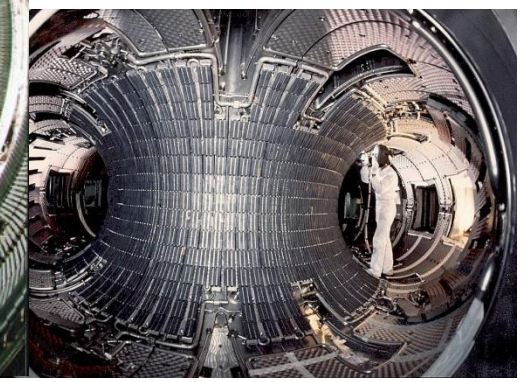
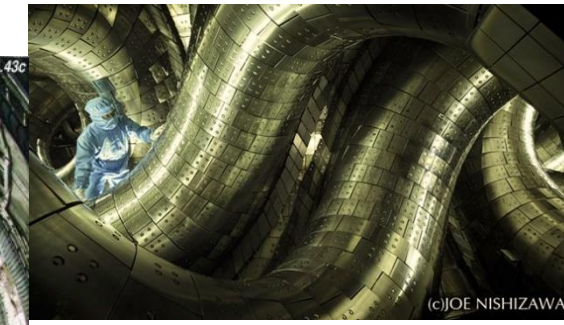
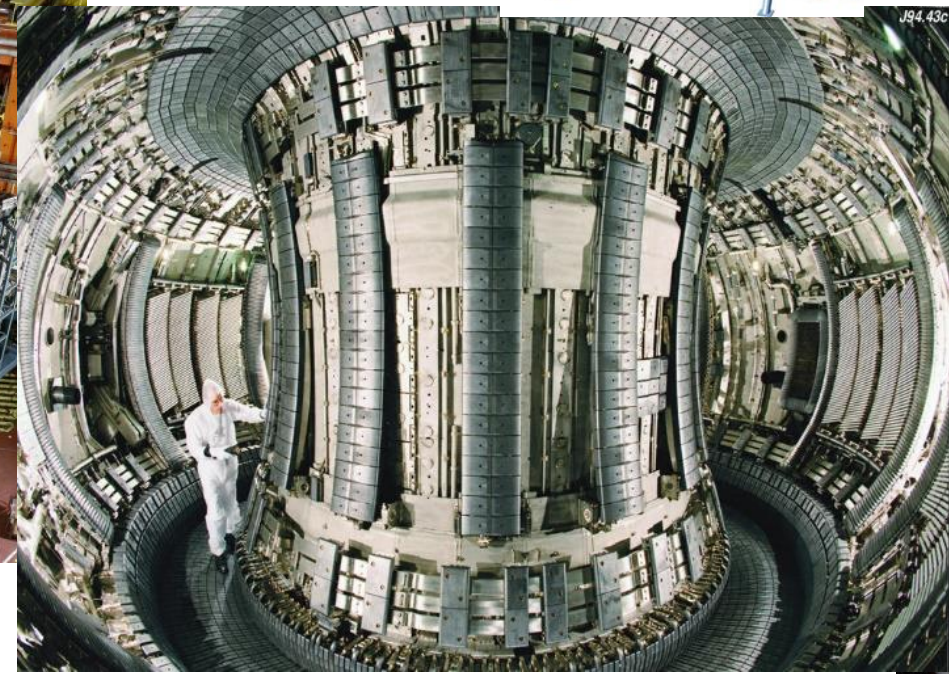
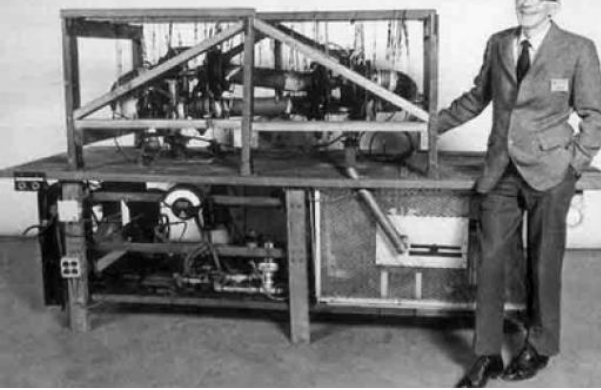
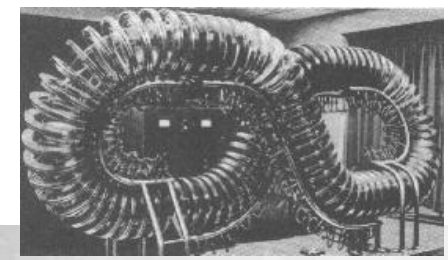
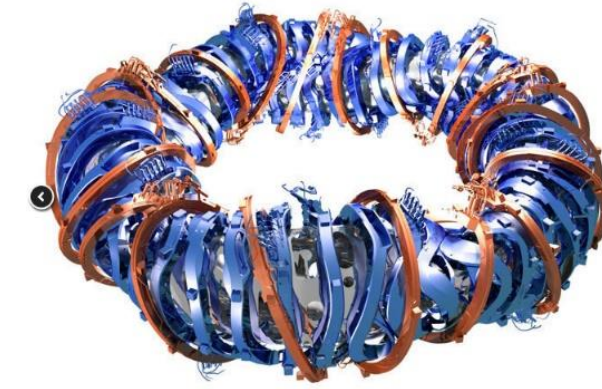
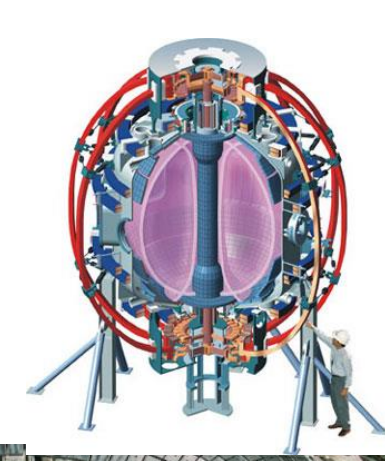
Mágneses tér tekerés geometriával





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

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

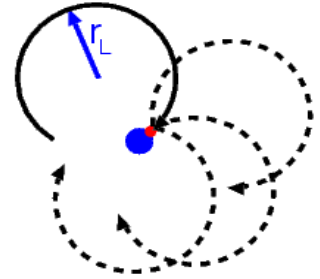




Az egyes részecskék Larmor mozgása csak az fizika egy része

Ha sok részecske van:

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

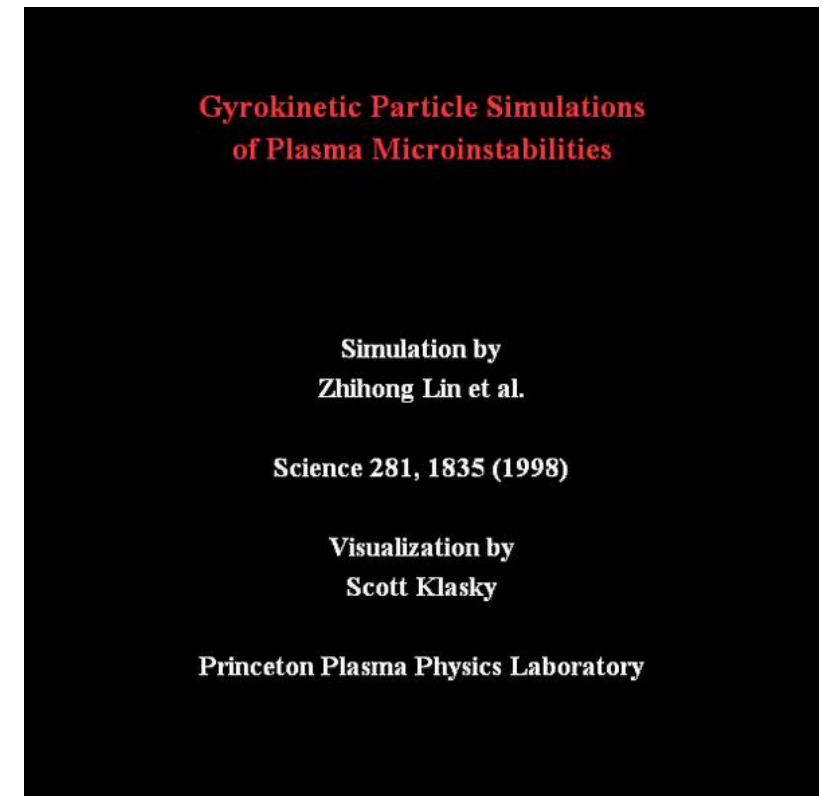


Bár makroszkópiusan a plazma fenntartható,
kis hullámok állandóan keverik azt és transzportálják
a részecskéket és az energiát

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





A tokamak berendezések viszonylag egyszerűek, így a leginkább fejlődtek

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

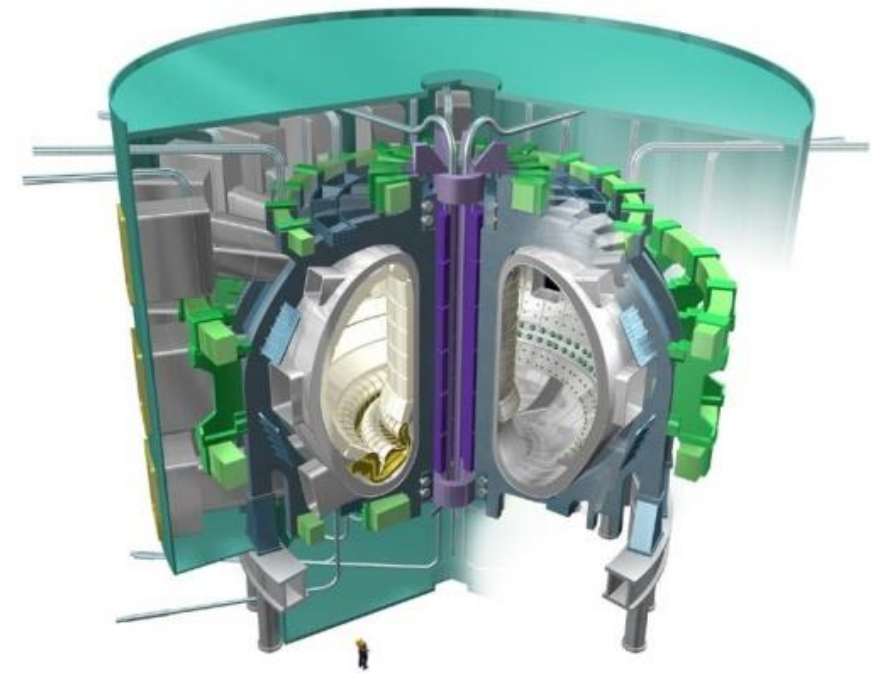
- Erőmű körülmények demonstrálása
- Trícium termelés
- Fizikai és technológiai kísérlet

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

... 2006 ITER megállapodás:

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

... mennyibe kerül, ki mit ad....





Toroidális tekercsek

5.3 T mágneses tér, 1000 m³ 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

Vízűtős blokkok a vákuum-
kamra védelmére

Biológiai védelem

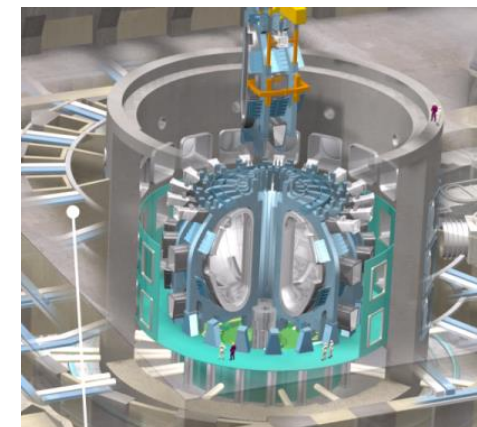
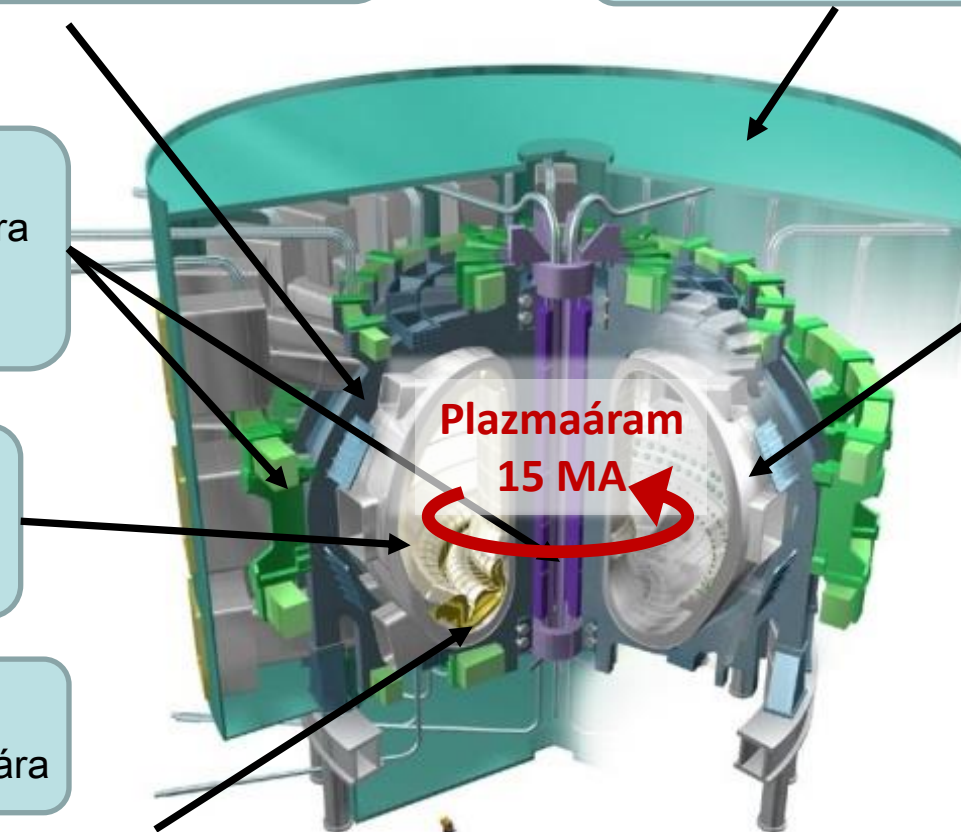
A tokamak egy beton burokban
fog állni

Divertor

A plazma szélének elszívására

Ember

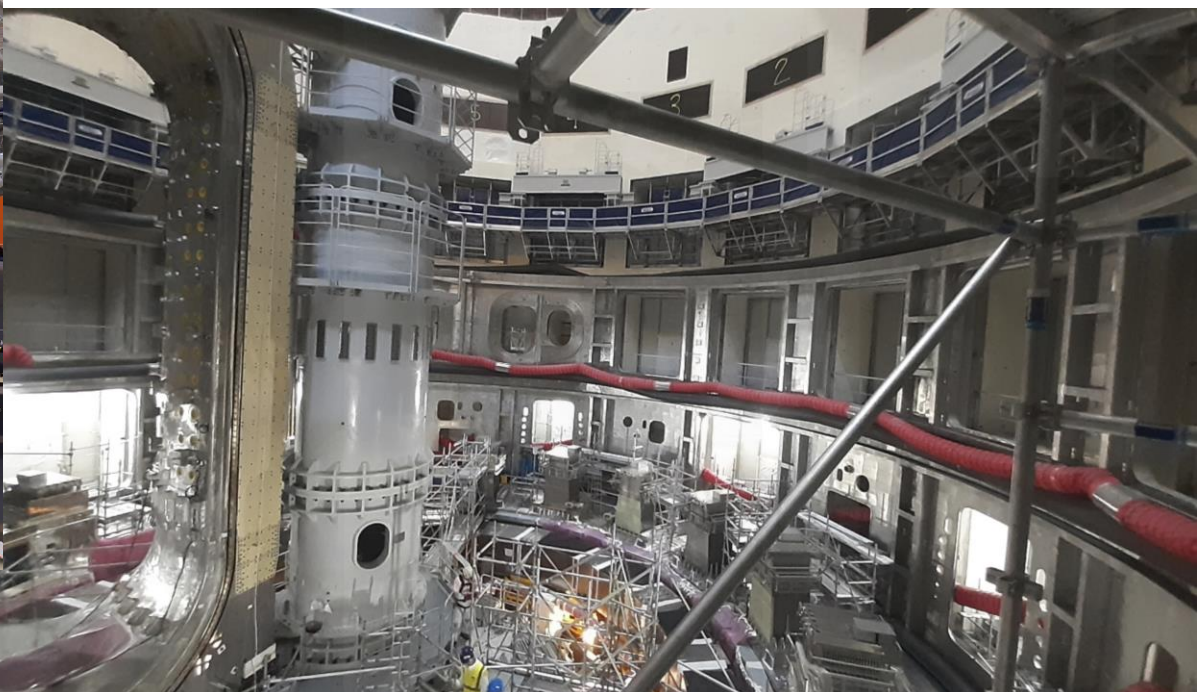
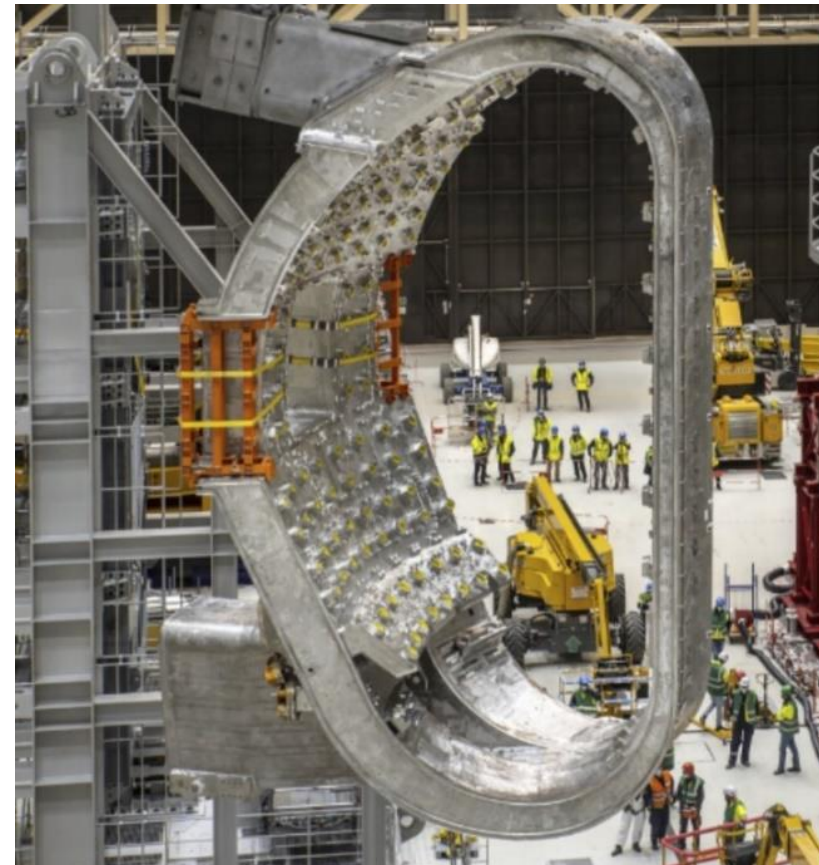
Nem állhat itt a DT működés alatt

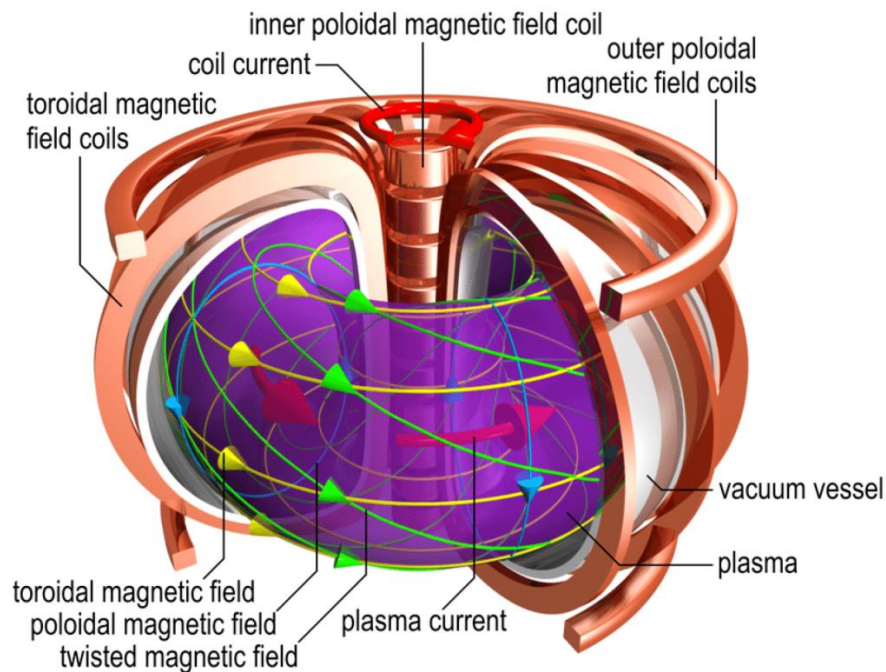




Látszik a fény az alagút végén:

- Szupravezető tekercsek nagyrészt kész vannak
- Első kész tórusz szegmens beemelve
- Hegesztési kérdések még kritikusak





Tokamakban a plazmaáram szükséges az összetartáshoz.

Önszabályzó rendszer:

Plazmaáram (ITER: 15 MA)

→ mágneses konfiguráció

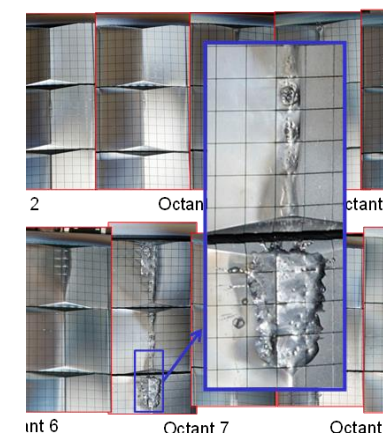
→ plazma összetartása

→ hőmérsékleteloszlás



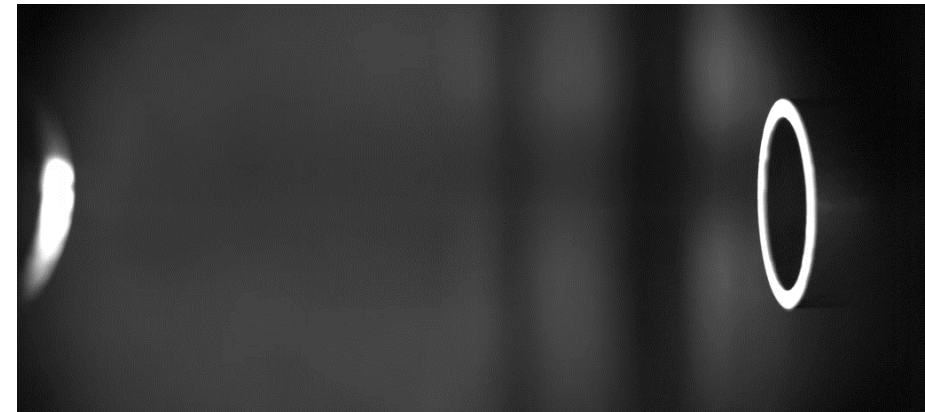
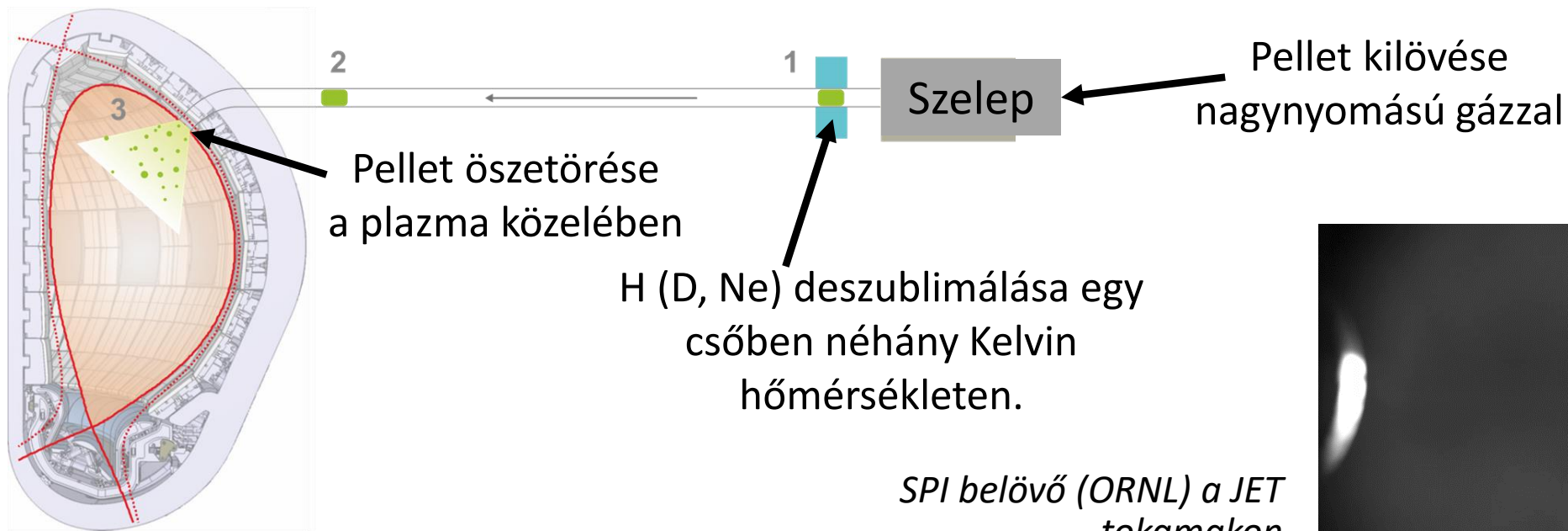
A diszrupció a plazmaáram instabilitása: a mágneses összetartás hirtelen összeomlik.

- Plazma energiája 1/1000 másodperc alatt elvész
- A plazmaáram mágneses terének energiáját nehéz kivonni: önindukció, elfutó elektronok, MA elektronnyaláb
- A hirtelen hőterhelés károsíthatja a berendezést



A diszrupció észlelésekor a plazmát le kell fújni sok anyaggal:

- Gáz formában nem elég effektív
- Nagy fagyasztott gáz pellet átmegy a plazmán
- **Tört pellet belövés (Shattered Pellet Injection, SPI): „kriogén poroltó”**



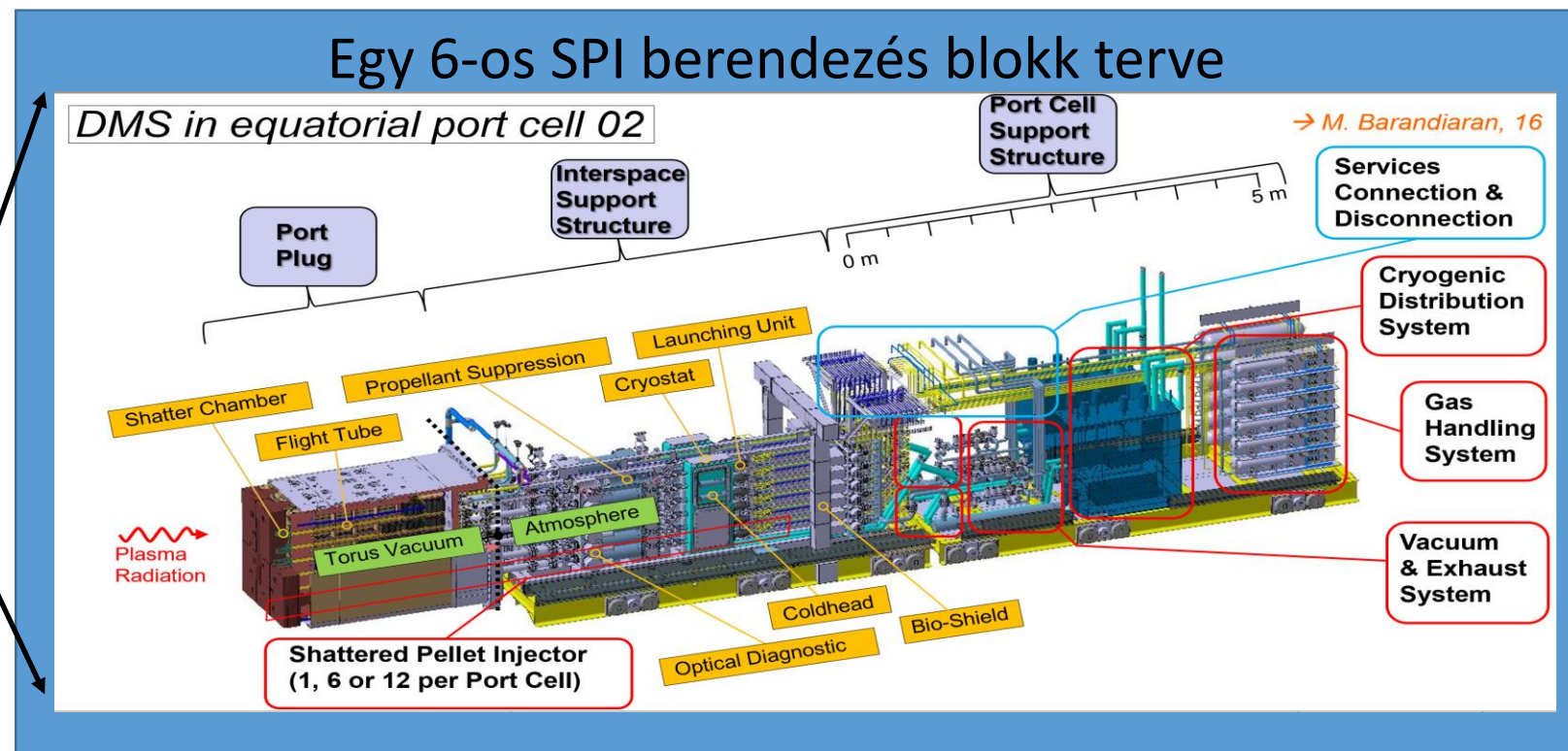
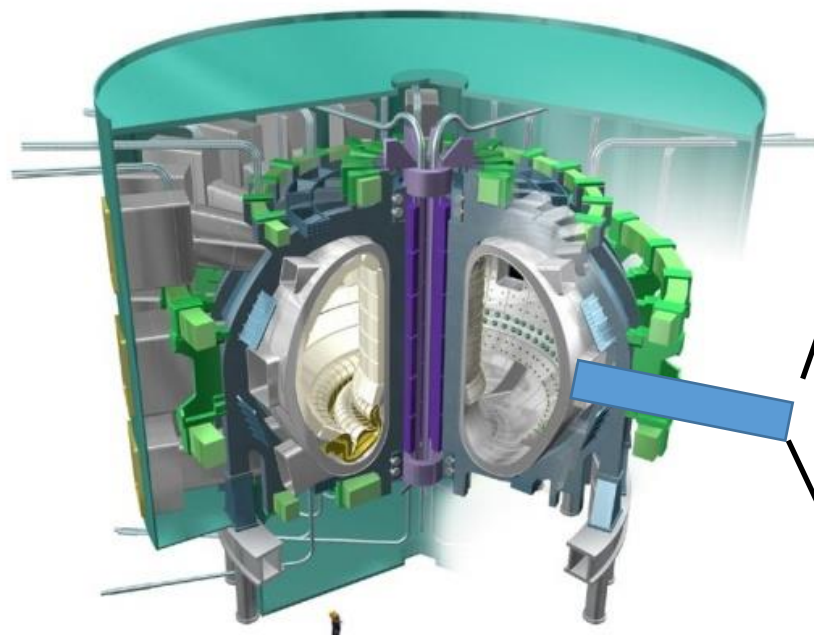


Az ITER plazma energiatarloma több mint 10-szerese bármely korábbi berendezésnek

→ A diszrupció az ITERben jelentős károkat és éves leállást okozhat

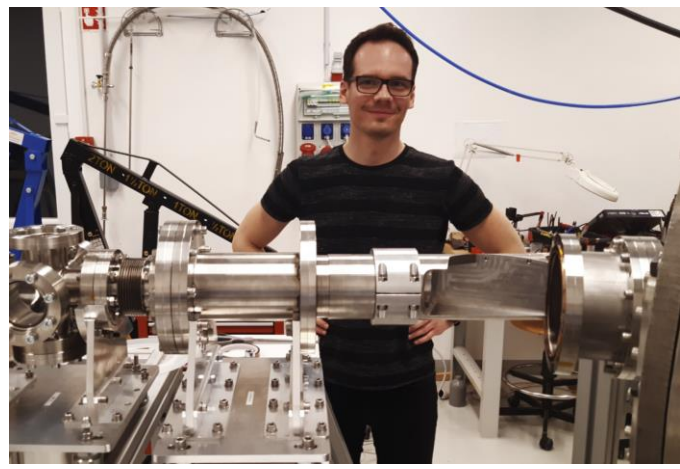
- 27 „kriogén poroltót” terveznek az ITER-re
- Nagyon bonyolult technológia, csak részben ismert
- Ha baj van néhány század másodperc alatt abszolút megbízhatóan működni kell

DE: ilyen méretben a technológia még sehol sem működött.

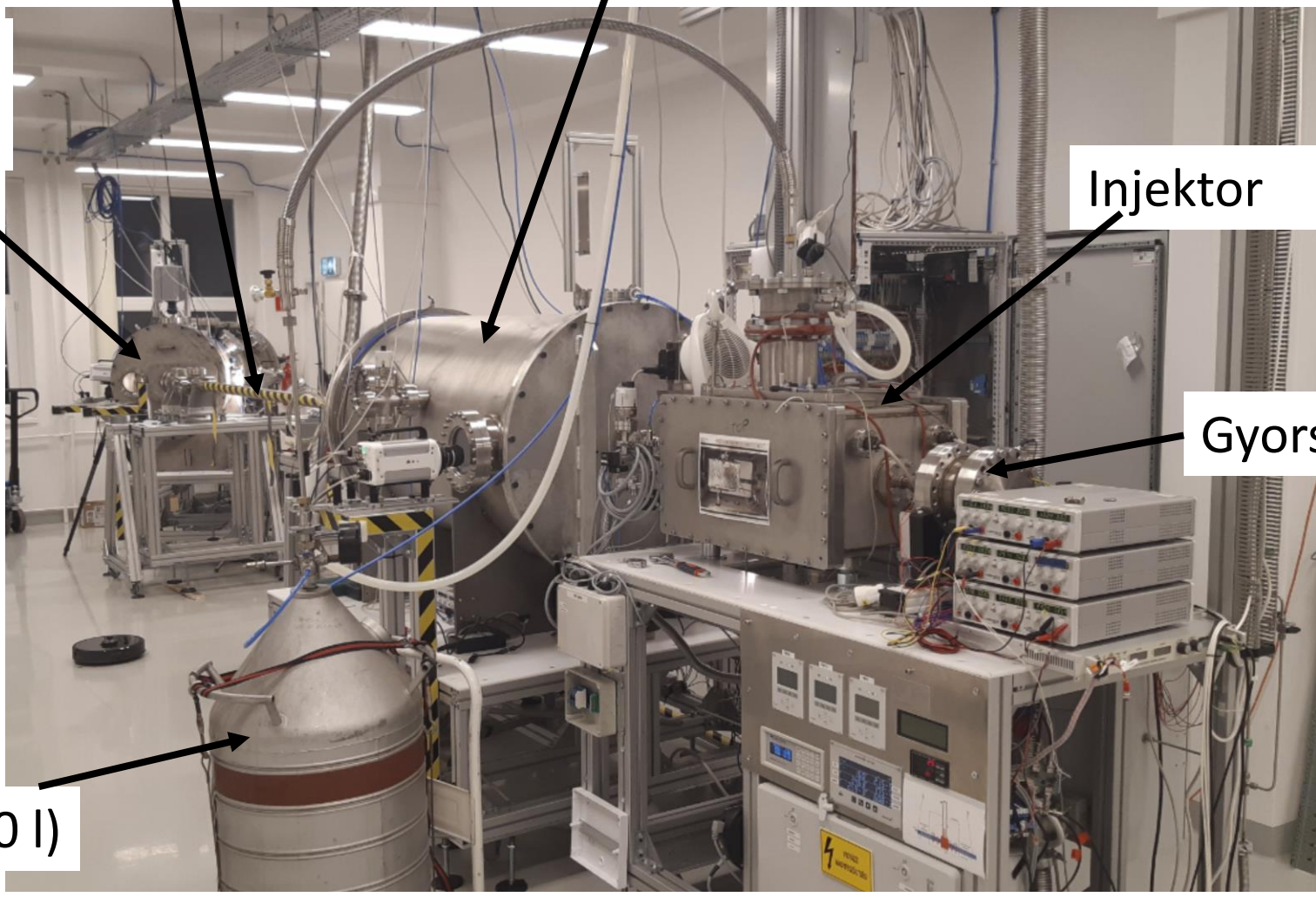




Az ITER az Energiatudományi Kutatóközpontot bizta meg az SPI technológia fejlesztésével



Törőfej és
diagnosztika kamra



Repülési cső (~4m)

Gáz tárolási tartály

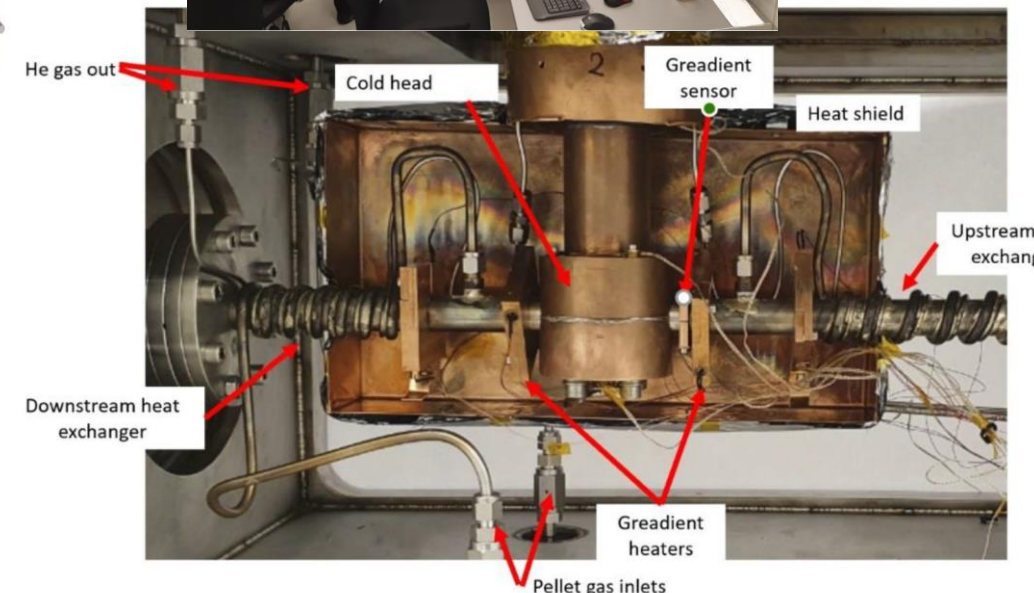
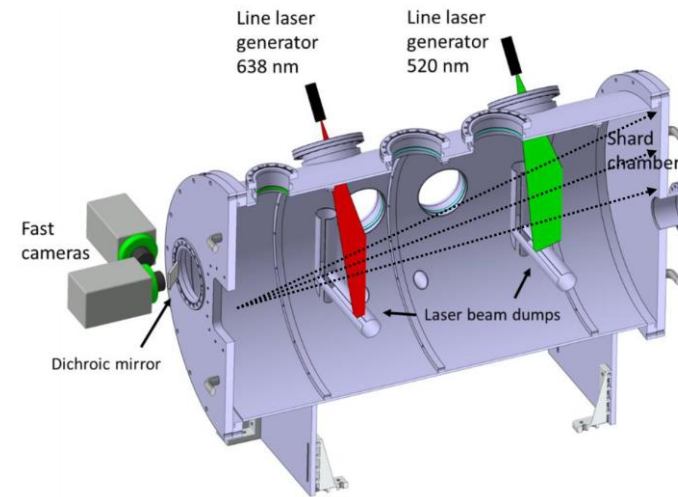
Injektor

Gyors szelep

He Dewar (40l, vag 100 l)



- 5 K-re hűtött acél kilövőcső (kriogén összeállítás: VTMT, Debrecen)
- Computer vezérlésű gázrendszer (H-Ion Kft.)
- Saját fejlesztésű kilövő szelep (150 bar, 20 mm, 1.5 ms nyitás)
- Automatikus pellet gyártás
- Pellet fagyasztás és törés, kamera diagnosztikák, lézerfüggöny



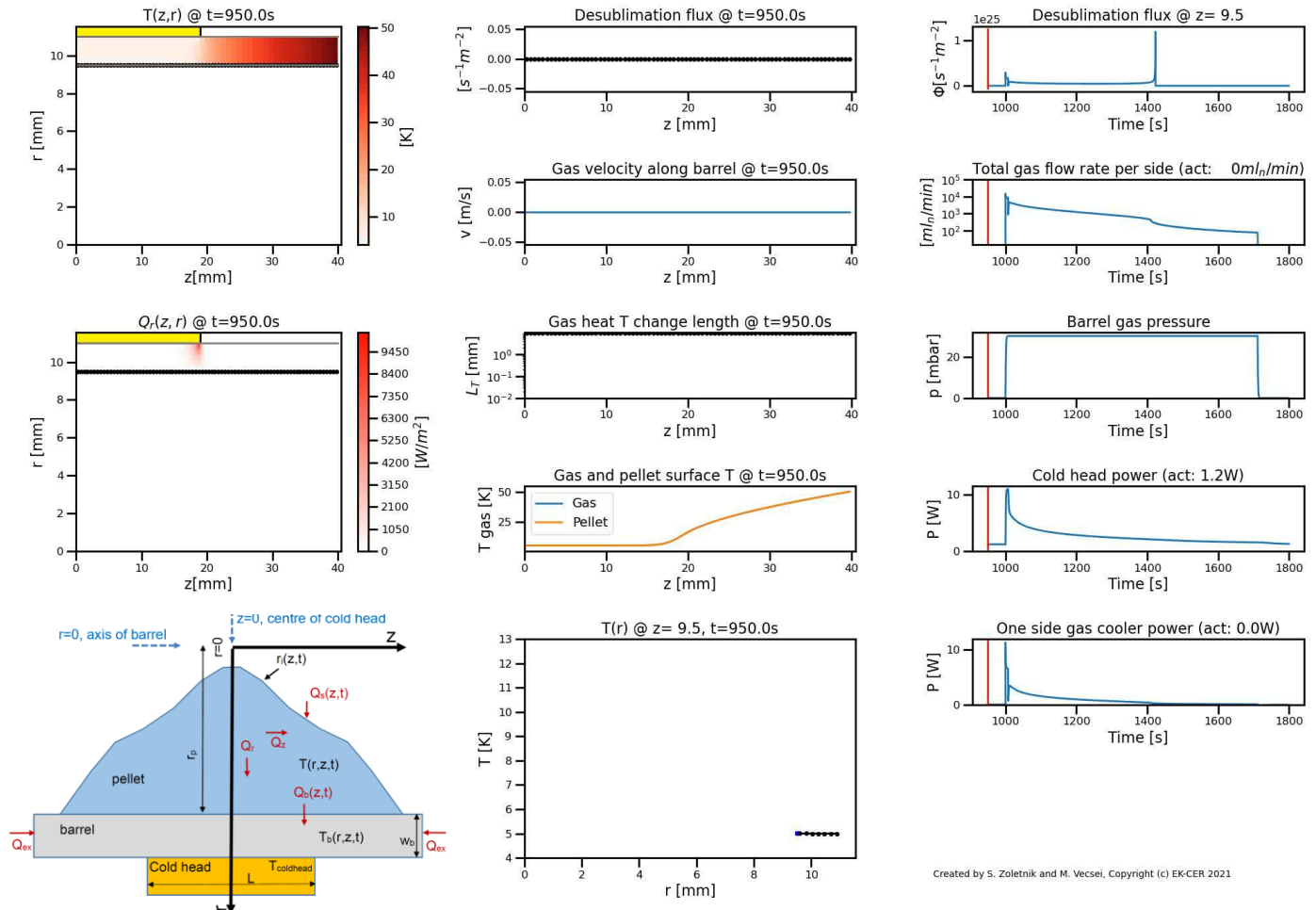


Az eredetileg technológia fejlesztésnek indult projekt izgalmas fizikai problémákat adott:

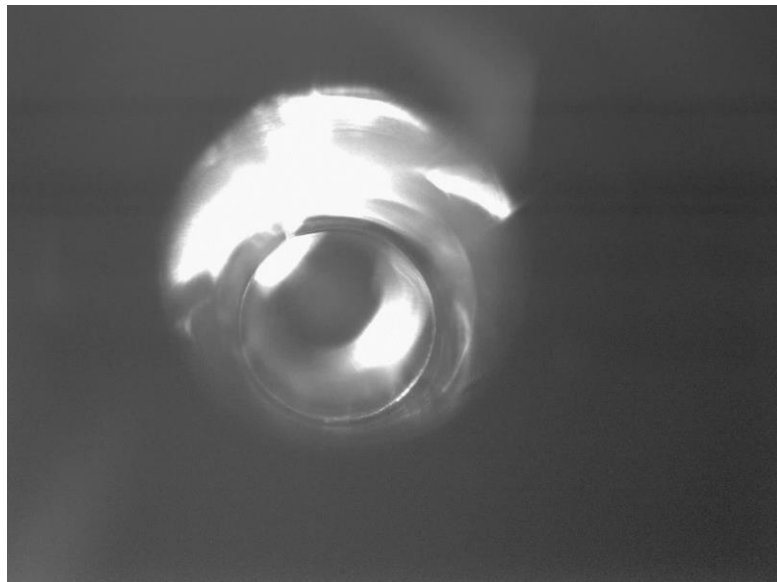
- Gáz kriogén deszublímáció: fázisátmenet, hőtranszport, hidrogén hóképződés,

- Pellet gyorsítás, gázáramlás
- Pellet törés
- ...

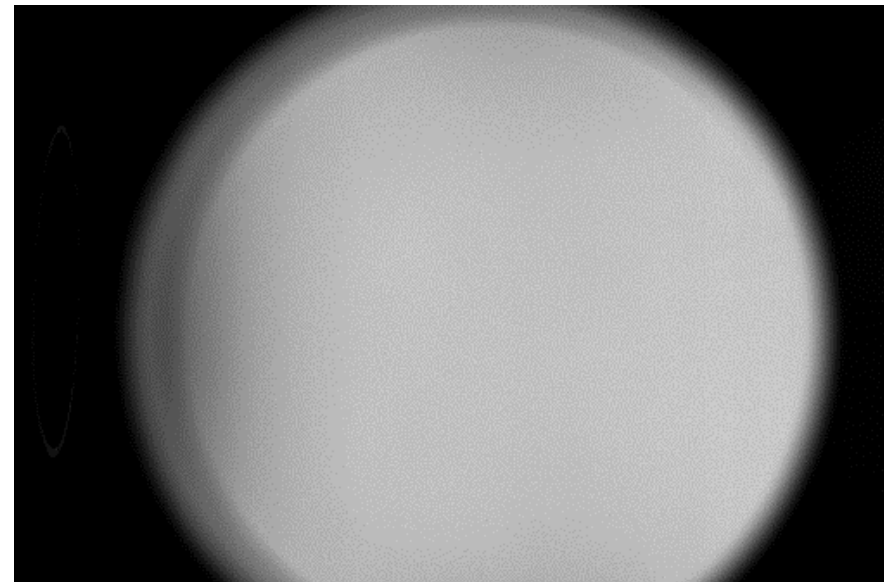
$r_p = 9.50\text{mm}$ $w_{\text{barrel}} = 1.5\text{mm}$, pellet material:Hydrogen, barrel: SS304, $\langle T_{\text{coldhead}} \rangle_t = 5.0\text{K}$, $\langle T_{\text{gas}} \rangle_t = 30\text{K}$



Created by S. Zoletnik and M. Vecsei, Copyright (c) EK-CER 2021



Pellet deszublimáció direkt video megfigyelése



*28.5 mm átmérőjű hidrogén pellet kilövés után
(~500 m/s)*



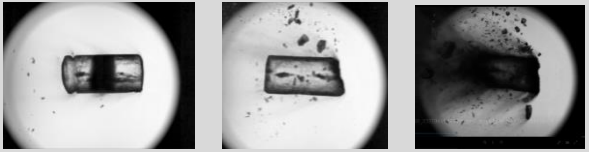
28.5 mm átmérőjű neon pellet összetörése



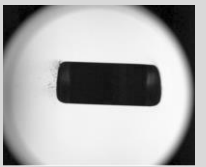
2021 december óta először a világon demonstráltuk az összes ITER által tervezett pelletet

19 mm diameter pellets

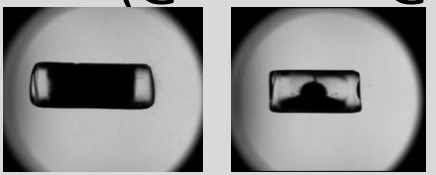
- Hydrogen (various recipes, @5,8,10K)



- Deuterium (@5K)

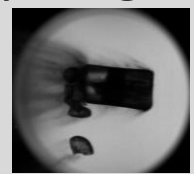


- Neon (@5K and @12 K)

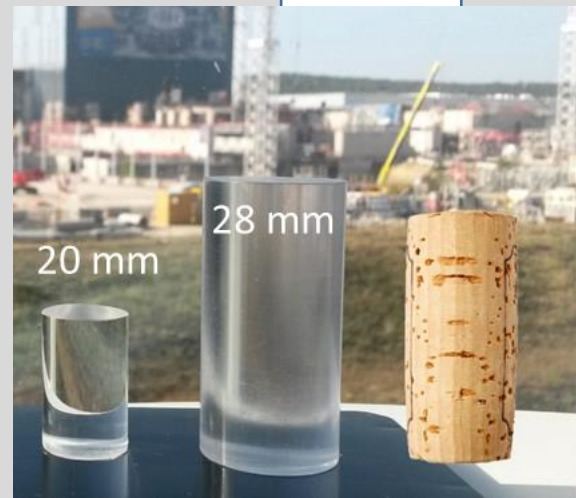
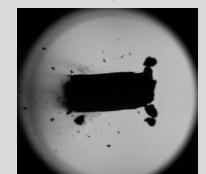


- Neon-Hydrogen mixture (@5K)

99% H
1% Ne

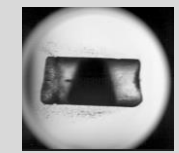


50% H,
50% Ne

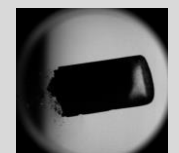


28.5 mm diameter pellets

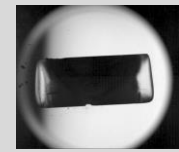
- Hydrogen (@5K)



- Deuterium (@5K)



- Neon (@5K)



A kriogén poroltó az ITER kulcstechnológiája, a nagyon hideg és nagyon meleg találkozása.



A lassú haladás és óriási költségek és az elmúlt évek pénzbősége egy magán fúziós ipari boom-ot hozott:

- Összesen ~10 milliárd USD befektetői pénz ígéret + nemzeti támogatások
- >10 komolyabb vállalkozás, vad ígéreték
- Régi koncepciók megint előjönnek, a problémák elfelejtődtek

De:

- Néhány nagyon érdekes új irány és technológia
- A befektetők azzal is elégedettek, ha valamilyen technológia fejlődik ennek kapcsán

Cég név	Séma	Reakció	Ország	Webcím
General fusion	pulsed MCF	DT	Canada/UK	https://generalfusion.com/
Tokamak Energy	MCF, compact tokamak	DT	UK	https://www.tokamakenergy.co.uk/
Zap Energy	Z-pinch	DT	USA	https://www.zapenergyinc.com/
Commonwealth fusion	MCF, tokamak	DT	USA	https://cfs.energy/
TAE Technologies	MCF, RFC	p-B or DT	USA	https://tae.com/
STEP	MCF, compact tokamak	DT	UK	https://step.ukaea.uk/
First Light Fusion	IFE		UK	https://firstlightfusion.com/
Renessaince fusion	MCF, Stellarator	DT	Germany	https://stellarator.energy/
Marvel Fusion	IFE	p-B	Germany	https://marvelfusion.com/
HB11 Energy	IFE	p-B	Australia	https://hb11.energy/
Focused energy	IFE	DT	USA	https://focused-energy.world/
TypeoneEnergy	MCF, Stellarator	DT	USA	https://www.typeoneenergy.com/

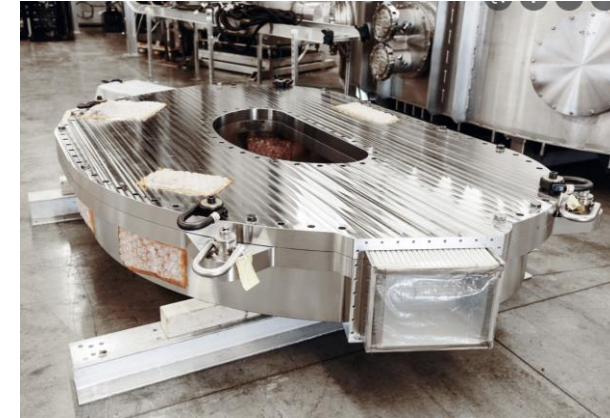


Hagyományos tokamak, ultra erős mágneses térrel: SPARC (kísérlet), ARC (reaktor)

Az ötlet:

Ugyanazt a fúziós teljesítményt erősebb mágneses tér esetén kisebb méretben lehet elérni

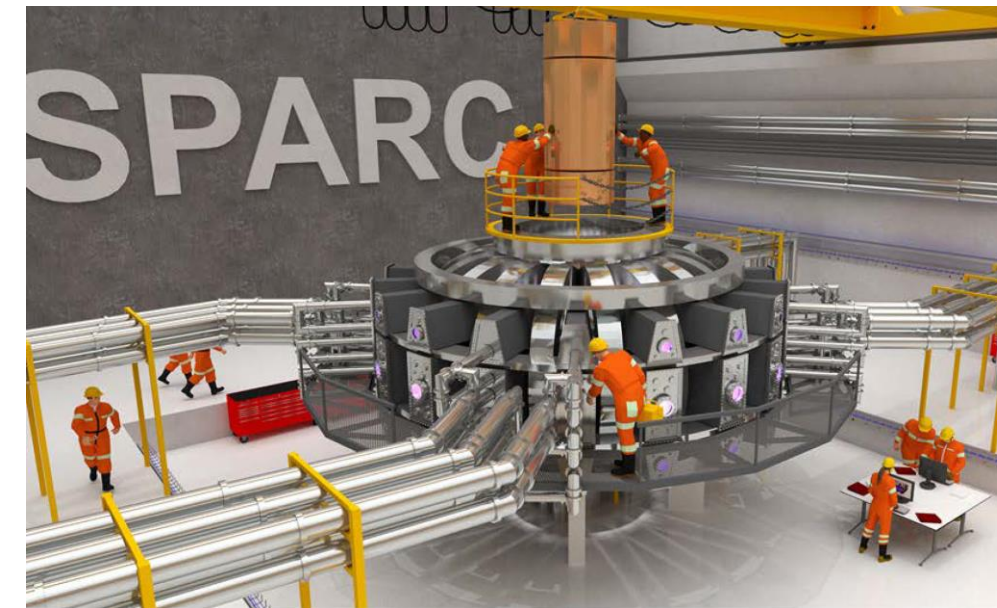
- Hagományos Nb alapú szupravezetőkkel $B=5-6$ T (ITER)
- Magas hőmérsékletű szupravezetővel legalább 2x nagyobb tér
- Az elmúlt 20 évben kialakult az ipari technológia a magashőmérsékletű szupravezetőkhoz



SPARC tekercs demo

SPARC:

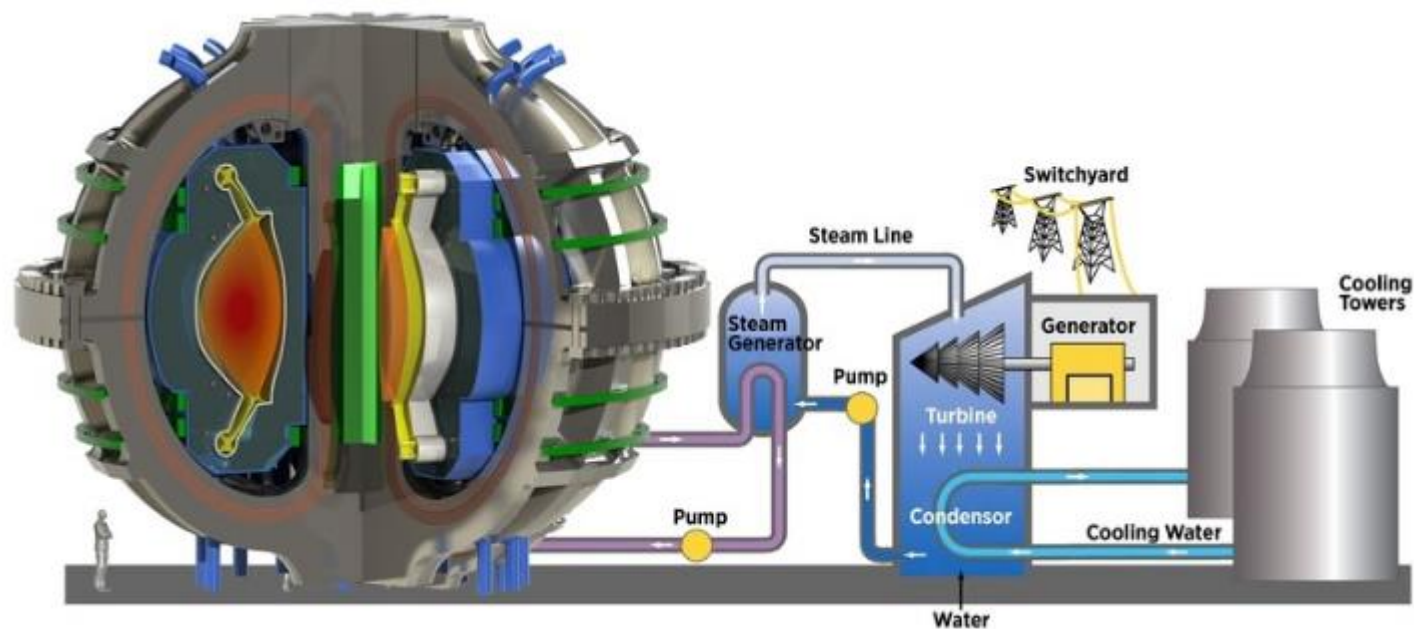
- $R=1.8$ m, $B=12$ T, 140 MW tervezett fúziós teljesítmény
- Hagományos tokamak, impulzus üzem
- Nem reaktor, de DT demonstráció





STEP: egy kompakt tokamak alapú erőmű

- Konceptió az eddigi kísérletek alapján
- Fizika valószínűleg működik, de sok technológiai kérdés
- Első működés 2040-es években, helyszín kiválasztva
- SPI technológia fontos





- A fúziós kutatások az innovatív fizikus-mérnök megoldások ötvözetét igénylik
- Az ITER kísérlet 5-6 év múlva elindul:
 - EK kritikus biztonságvédelmi rendszert fejleszt, a meglévő berendezéseken folytatott kutatás mellett.
- Magán fúziós fejlesztések rohama jön a következő évtizedben
- Jobb fizikai megértés és technológiák új irányokat is nyitnak
- A technológia fejlesztés a technikai tudást is fejleszti
→ befektetők lehetőséget látnak benne
- Előbb-utóbb lesz fúziós erőmű, ehhez várjuk a diákokat