

Korszerű nukleáris energiatermelés – Fúzió 2.

A fúziós berendezések típusai, részegységek

Pokol Gergő



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BME NTI

Korszerű nukleáris energiatermelés

2019. szeptember 18.

1. Telefon elővesz
2. WiFi jelszó: wigner2008, vagy mobilnet
3. Böngészőbe: Kahoot.it
4. Kód: kivetítőn
5. Név: Neptun kód !!!



6. Értékelés:

- Az összes kérdésre hibátlan megoldás → **+1 pont**
- Többiek között az elért ponttal arányos eséllyel **2 x +1 pont sorsolás**

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 α -részecskékre.
- Nem túl jó összetartás a lelassult α -részecskékre.
- Óriási felületi és térfogati hőterhelések kezelése.
- ...

Mágneses összetartás

Forró, híg plazmában a részecskék szabad úthossza nagy (gyakorlatilag ütközésmentes rendszerről van szó).
Tekintsük szabad, töltött részecskék mozgását!

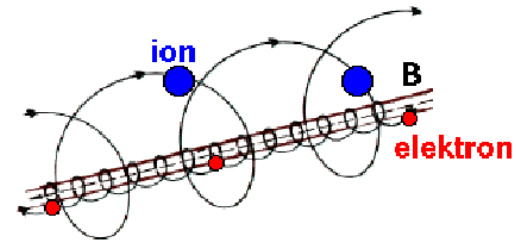
A Lorentz erővel a mozgásegyenlet: $m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$

Ha $E=0$: $\mathbf{v}_{\perp} = v_{\perp} (\mathbf{e}_x \sin(\omega_c t) \pm \mathbf{e}_y \cos(\omega_c t))$

A körmozgás frekvenciája: $\omega_c = \frac{qB}{m}$ sugara: $r_L = \frac{m|\mathbf{v}_{\perp}|}{qB}$

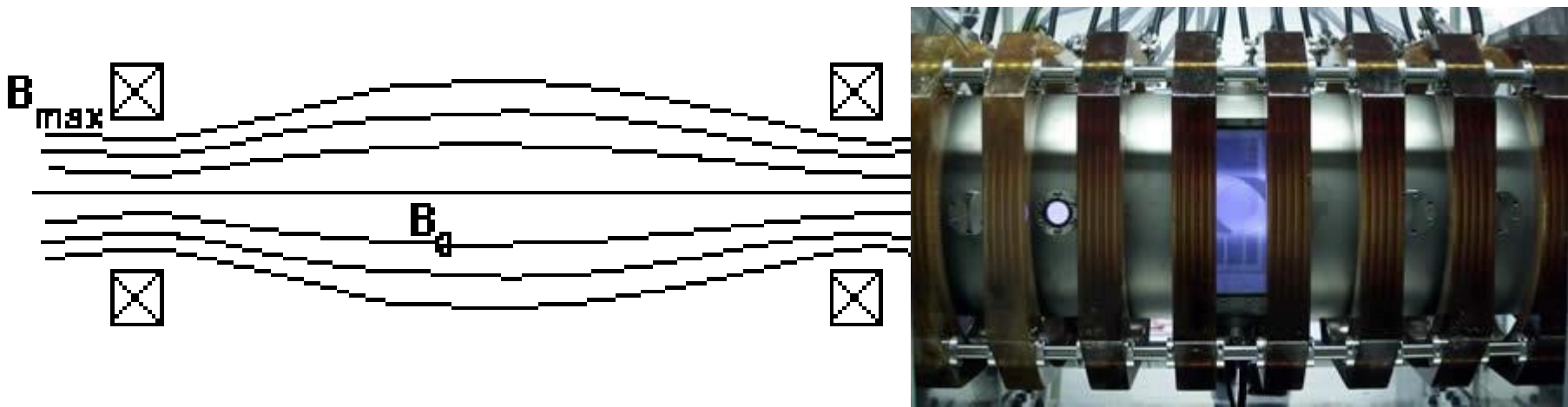
Ez a **ciklotron/Larmor frekvencia**.

Adott mágneses térnél csak a részecskére jellemző.
A forgásirány a töltés előjelétől függ: az ionok és az elektronok ellentétes csavarodású spirál pályán mozognak az erővonal körül.



Mágneses összetartás, lineáris geometria

Ha grad B párhuzamos **B**-vel, úgynevezett **mágneses palackot** kapunk, amiben a részecskék az összesűrűsödő erővonalak tartományáról visszaverődnek (a részecskék mágneses momentuma adiabatikusan megmarad).



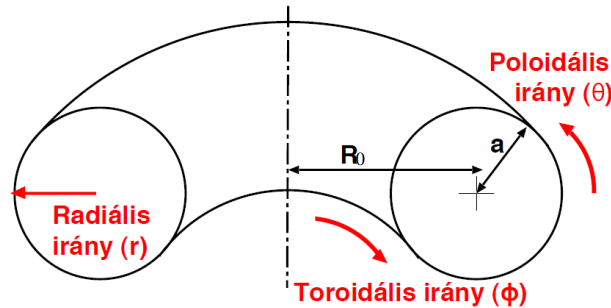
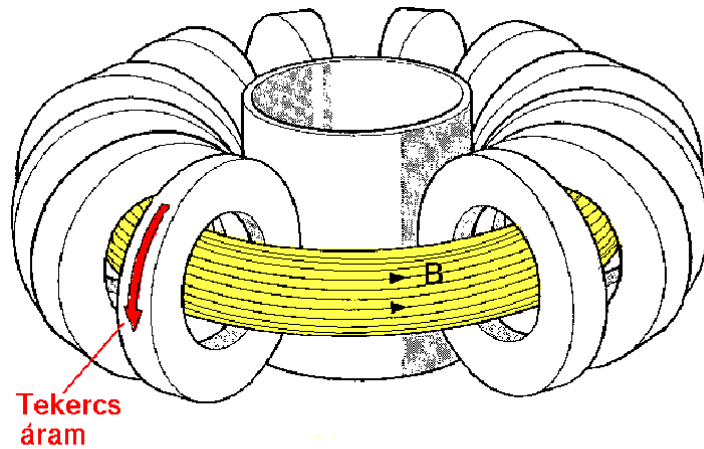
A közel mágneses térrel párhuzamosan mozgó részecskékre nincs hatással

→ **veszteségek a végeken+ stabilitási problémák.**

<https://deep.reak.bme.hu:8080/home/pub/13/>

Mágneses összetartás, toroidális geometria

A lineáris berendezést tórusz alakúra alakítva a végeffektusok elkerülhetők. Ekkor egy tórusz alakú plazmagyűrűt kapunk.



R_0 : nagy sugár

a : kis sugár

$A = R_0/a$: sugárarány

Driftek

Térben lassan változó elektromos és mágneses tér esetén válasszuk szét a sebességet időben gyorsan és lassan változó komponensekre!

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_L + \mathbf{v}_d, \quad \frac{d\mathbf{v}_L}{dt} \gg \frac{d\mathbf{v}_d}{dt}$$

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_E + \mathbf{v}_{\nabla B} + \mathbf{v}_c$$

ExB drift

gradB drift

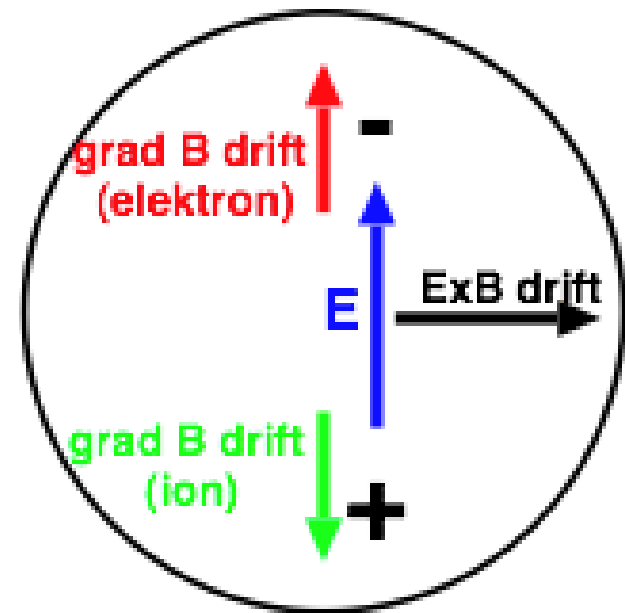
görbületi drift

Töltésfüggetlen, az egész plazmát a két térre merőlegesen elmozdítja.

Töltésfüggő → töltésszétválást okoz
→ elektromos teret kelt.

Tokamakban azonos irányú és nagyságrendű, mint a gradB drift.

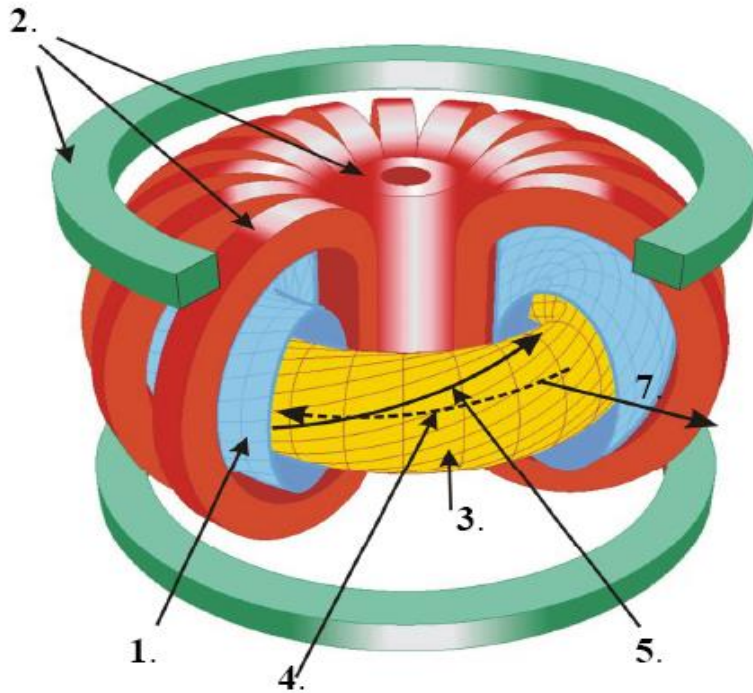
A **tér görbülete miatt** az elektronok és az ionok fel- ill. lefelé driftelnek. A **töltésszétválás létrehoz egy függőleges elektromos teret**. Az **$E \times B$** drift az egész plazmát kifelé mozgatja a mágneses téren keresztül.



A drift hatása kiküszöbölhető, ha a **mágneses erővonalakat helikálisan megtekerjük**.

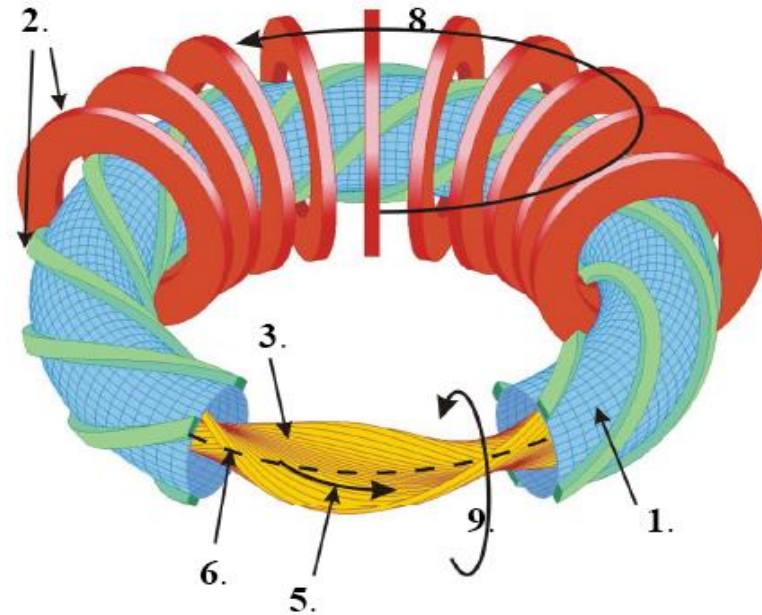
- **Sztellarátorok** (külső tekercsekkel)
- **Tokamakok** (plazmaárammal)

Tokamak



Toroidális plazmaáram

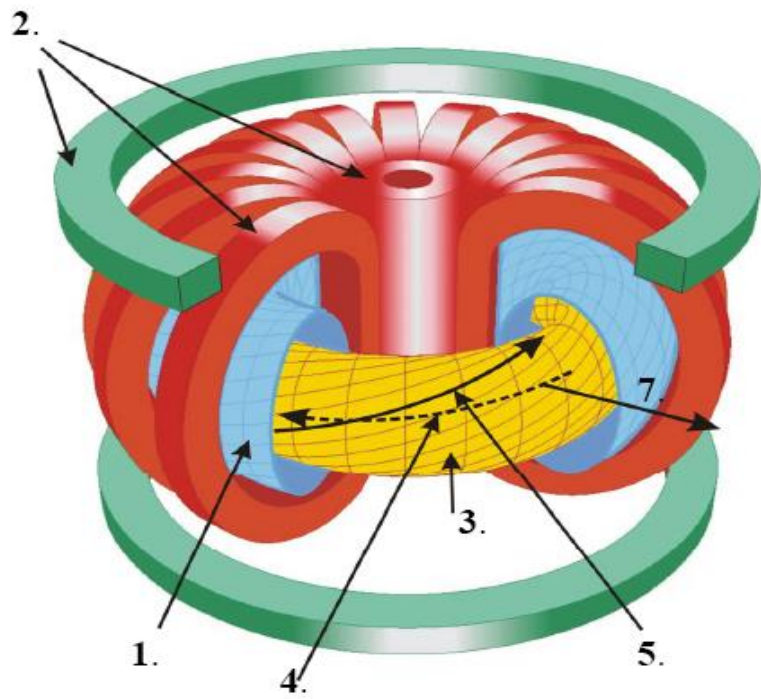
Sztellarátor



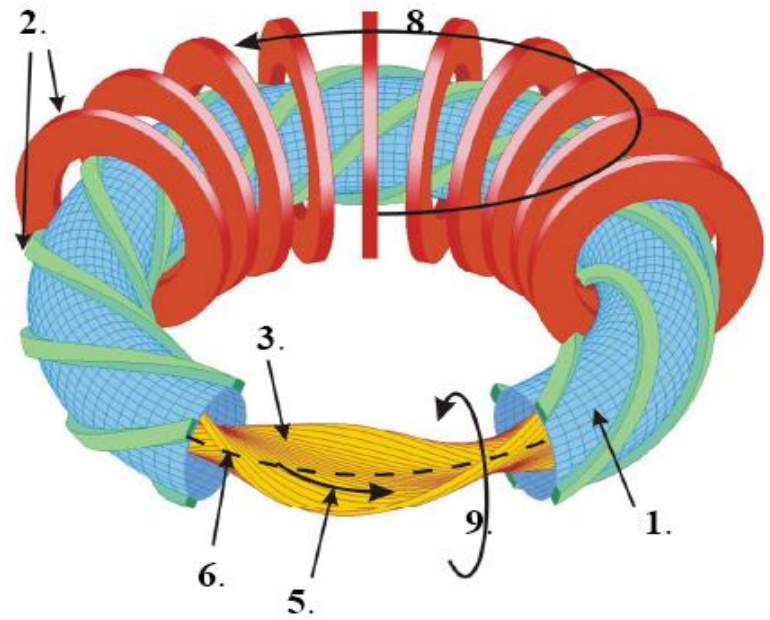
Helikális tekercek

- (1) vákuumkamra, (2) mágneses tekercek, (3) plazma,
 (4) plazmaáram, (5) mágneses erővonal, (6) mágneses tengely,
 (7) radiális irány, (8) toroidális irány, (9) poloidális irány

Tokamak



Sztellarátor

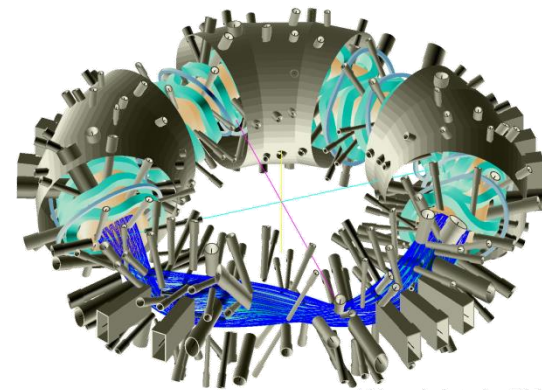
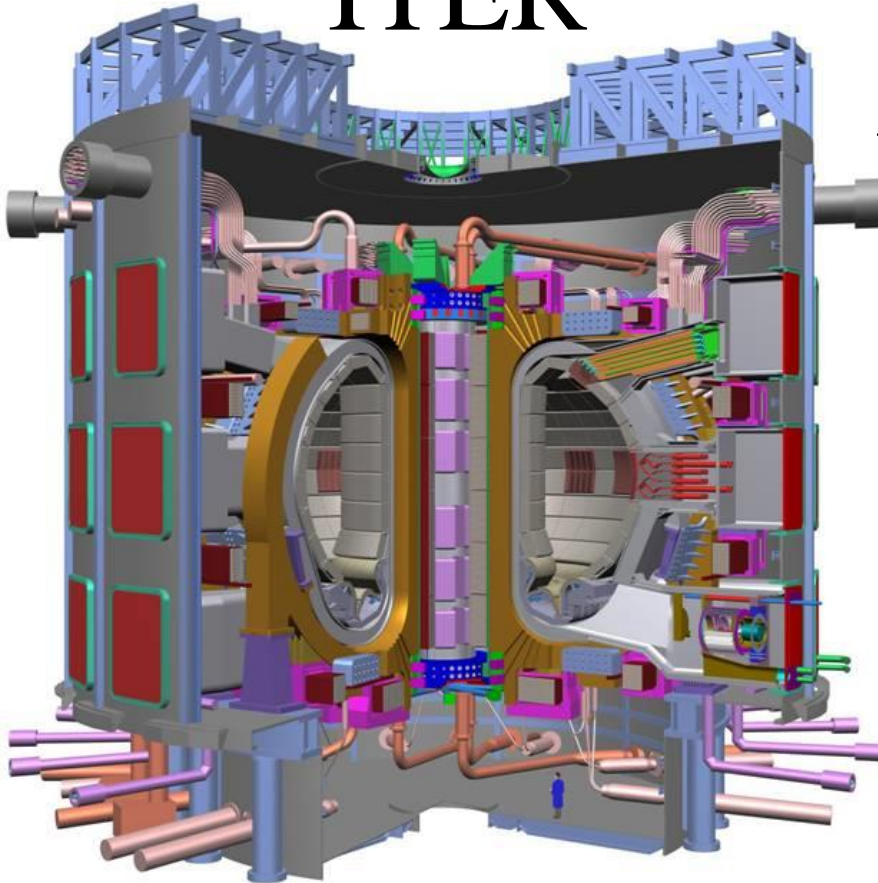


- + Szimmetrikus 2D geometria
- + Érettebb technológia
- Alapvetően impulzus üzem
- Áram okozta instabilitások

- + Folytonos üzem
- + Nincsenek áram okozta instab.
- Komplex 3D geometria
- Kísérleti technológia

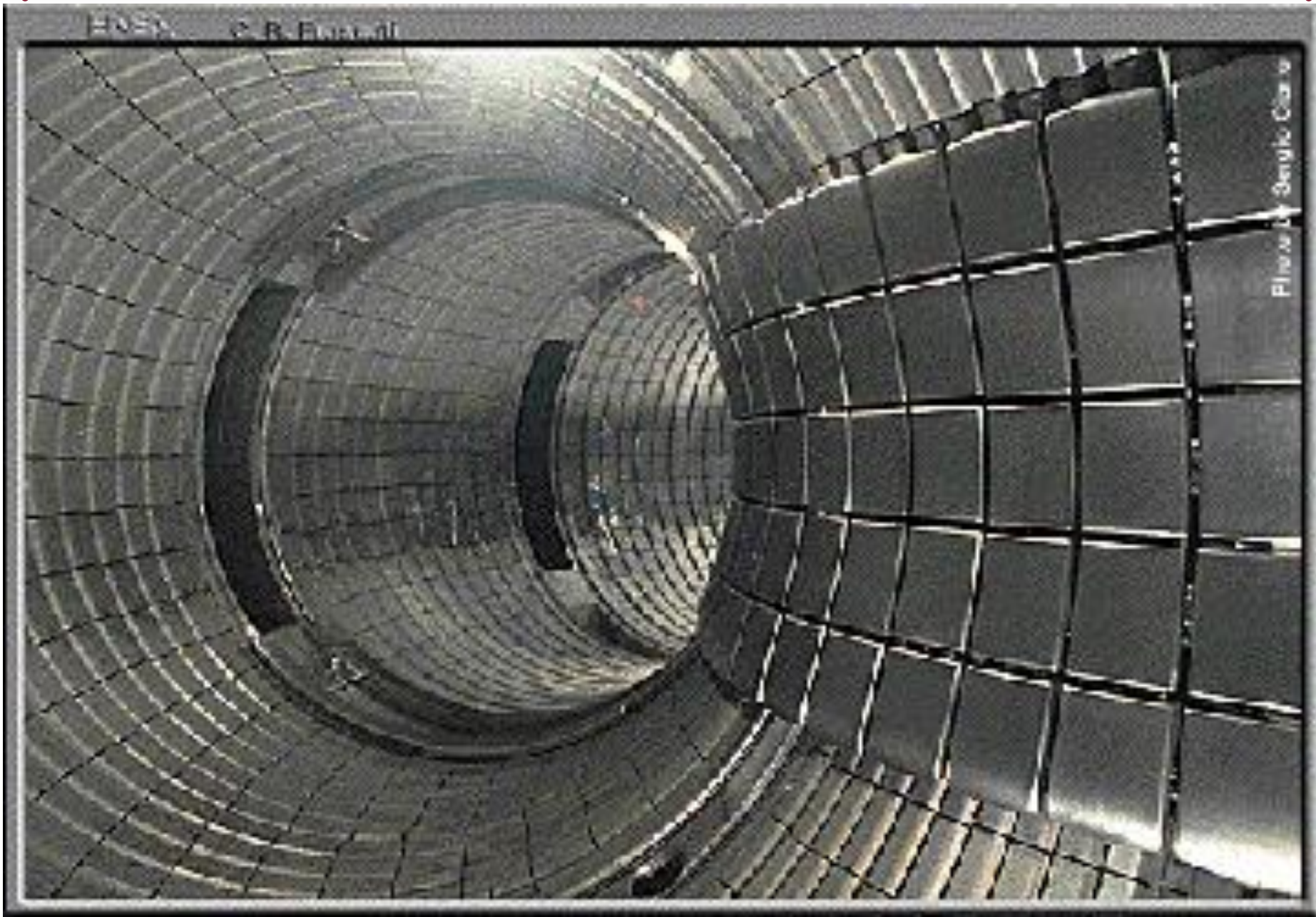
ITER

Wendelstein 7-X

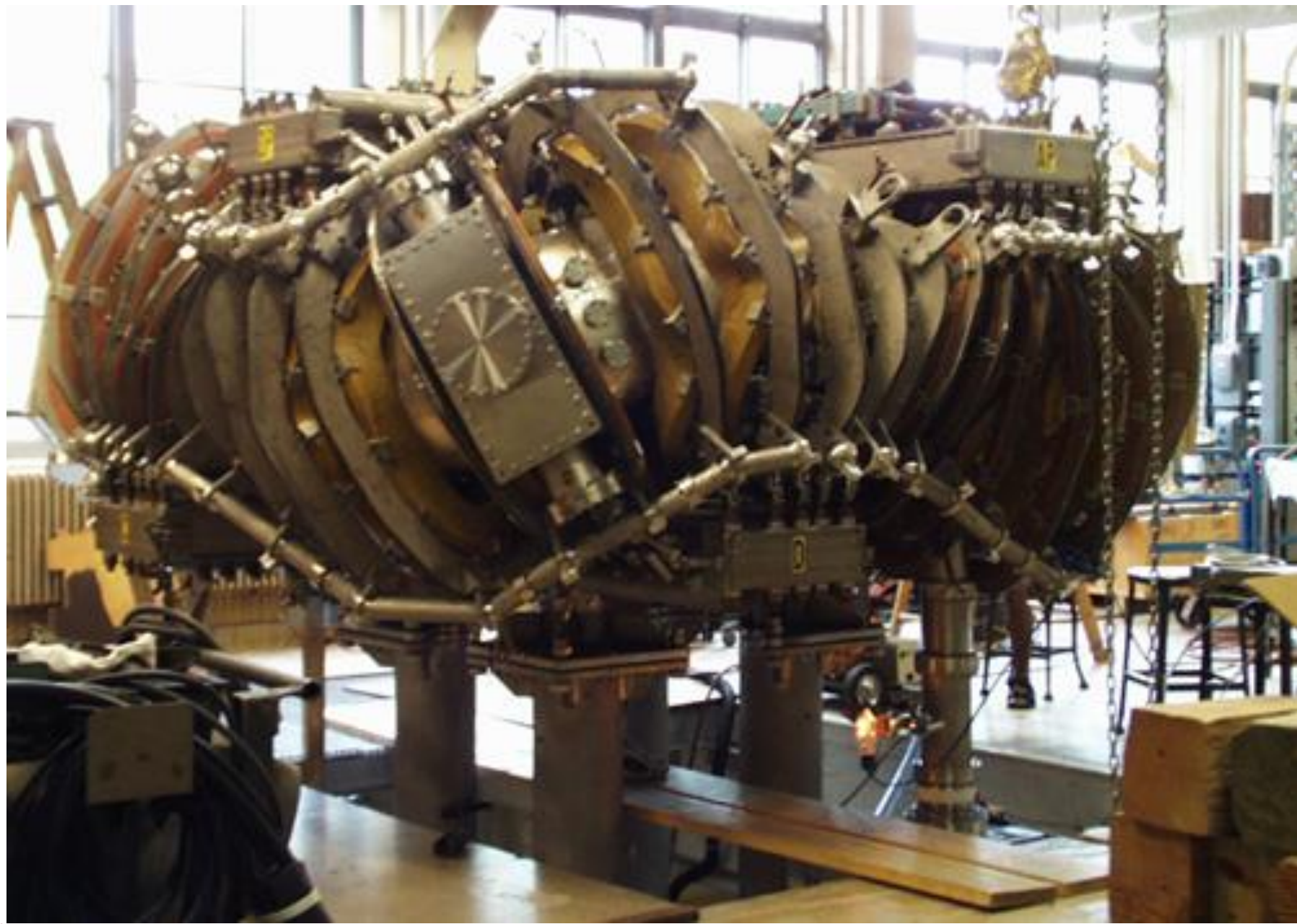


Wendelstein 7X

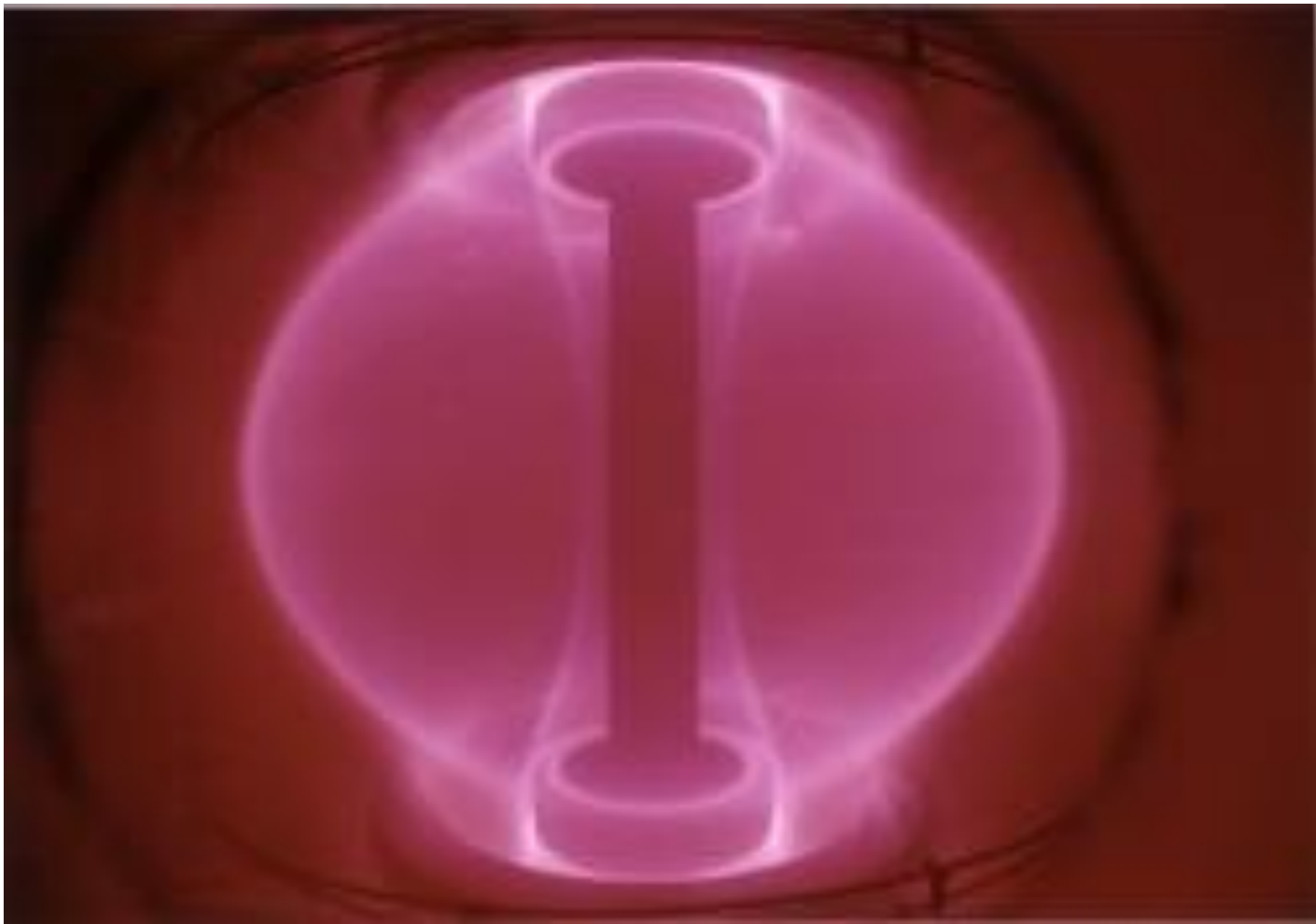
A jelenleg épülő legnagyobb tokamak (Cadarache) és sztellarátor (Greifswald).



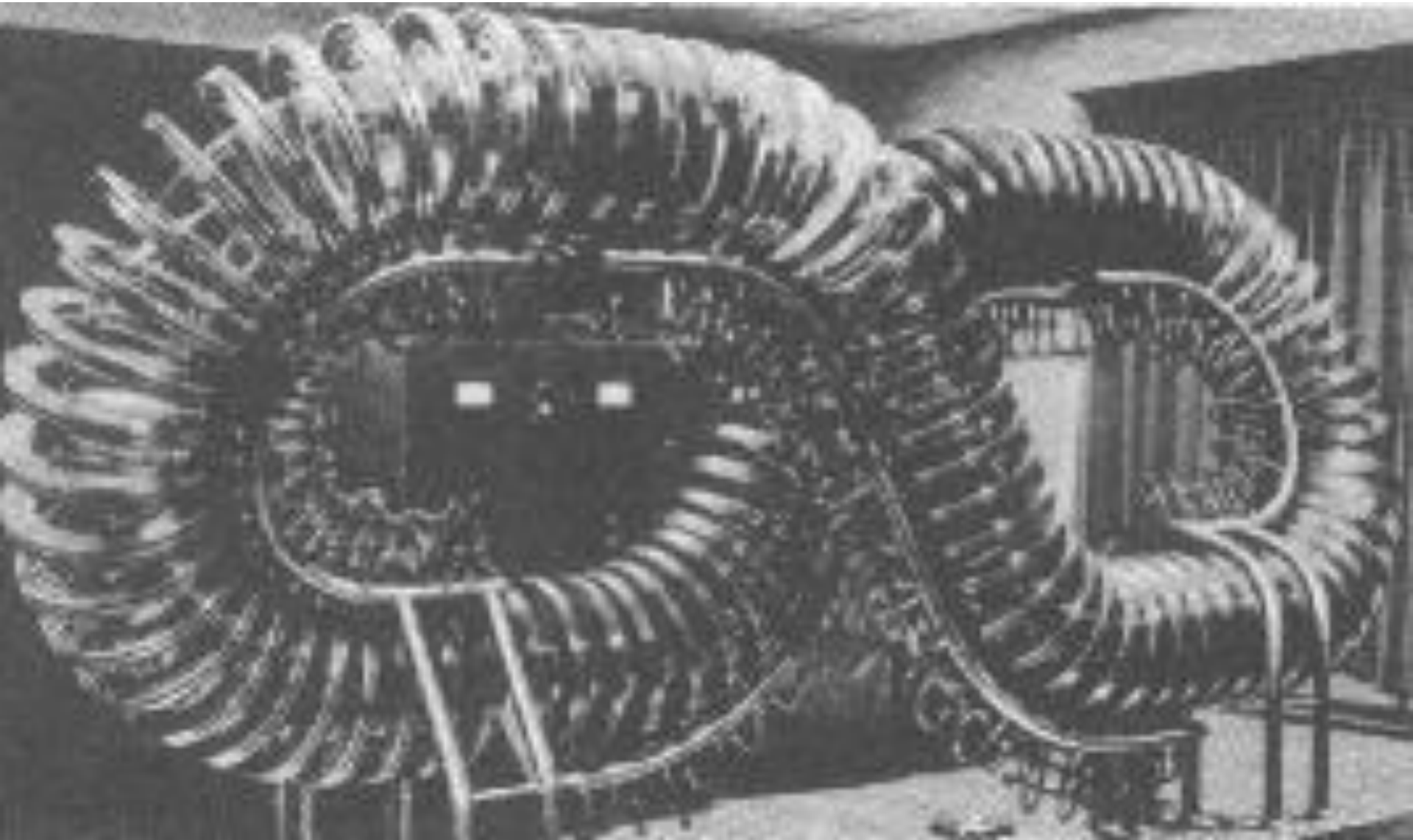
Korszerű nukleáris energiatermelés, 2019. szeptember 18.

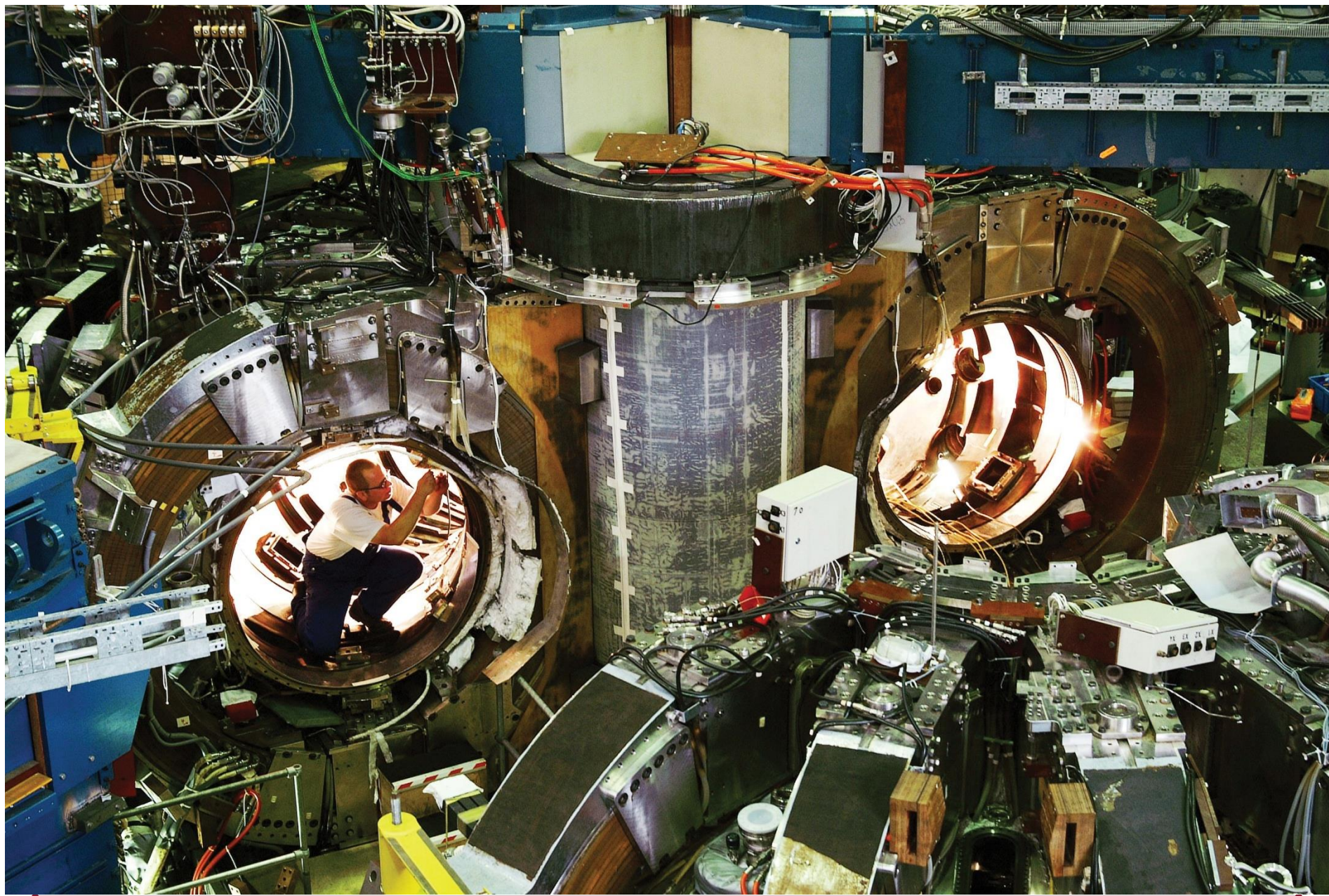


Korszerű nukleáris energiatermelés, 2019. szeptember 18.

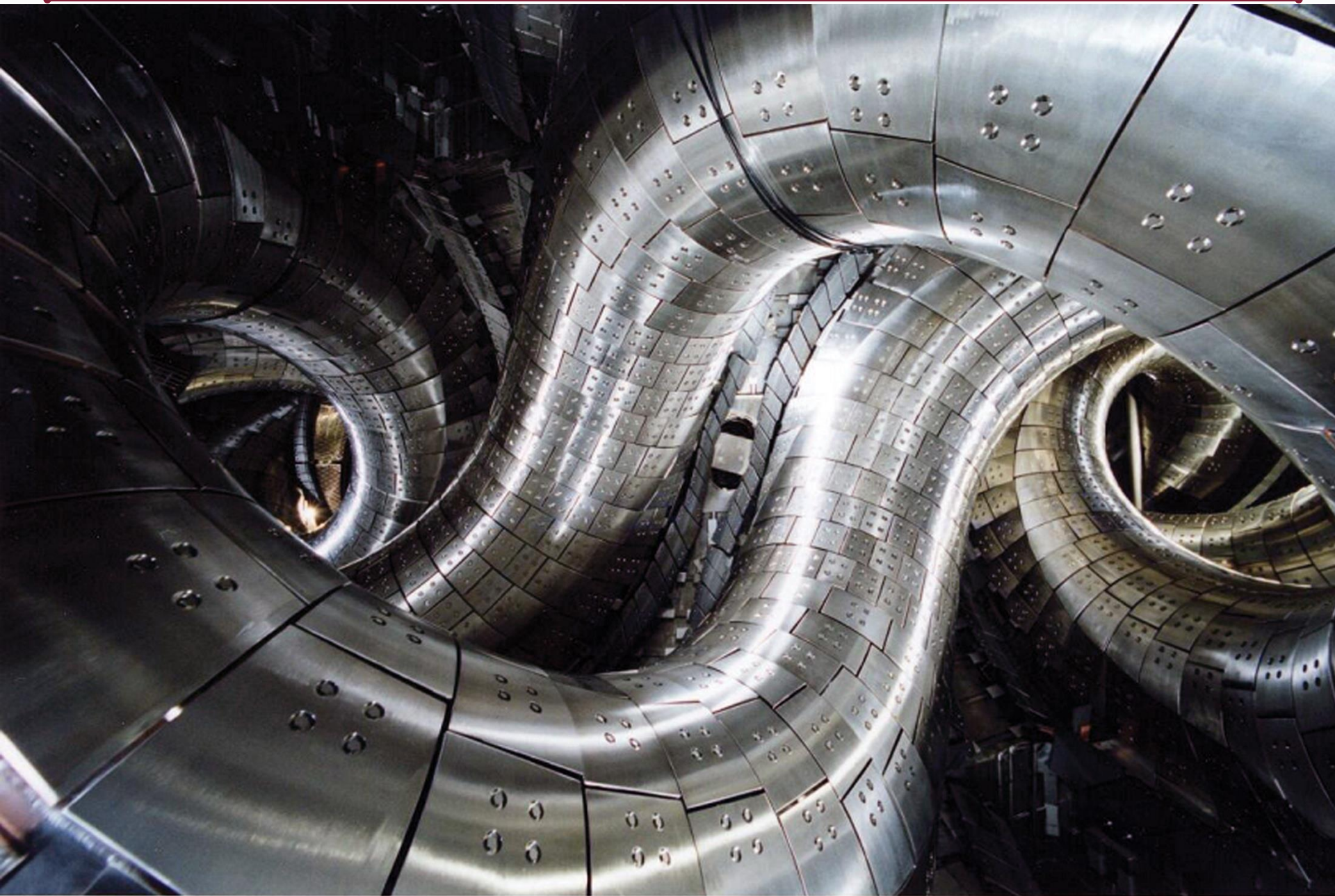


Korszerű nukleáris energiatermelés, 2019. szeptember 18.



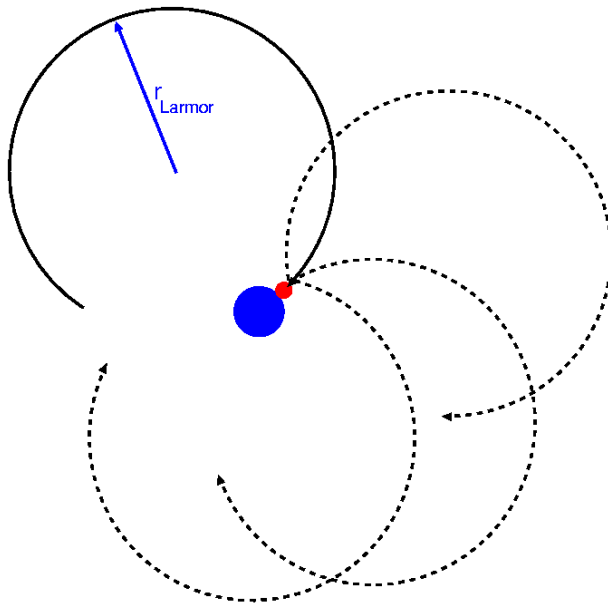


Korszerű nukleáris energiatermelés, 2019. szeptember 18.



Transzport mágnesesen összetartott fúziós plazmákban (véges összetartás)

Bár a részecskék közötti ütközések ritkák (a szabad úthossz 10-100 m), mégsem elhanyagolhatók.



- **Klasszikus transzport.** Diffúziós folyamat, a lépés nagysága a Larmor sugár.
- **Neoklasszikus transzport** = klasszikus transzport+toroidális geometria
- **Anomális** transzport – mikroturbulencia

DIII-D Shot 121717

GYRO Simulation
Cray XIE, 256 MSPs

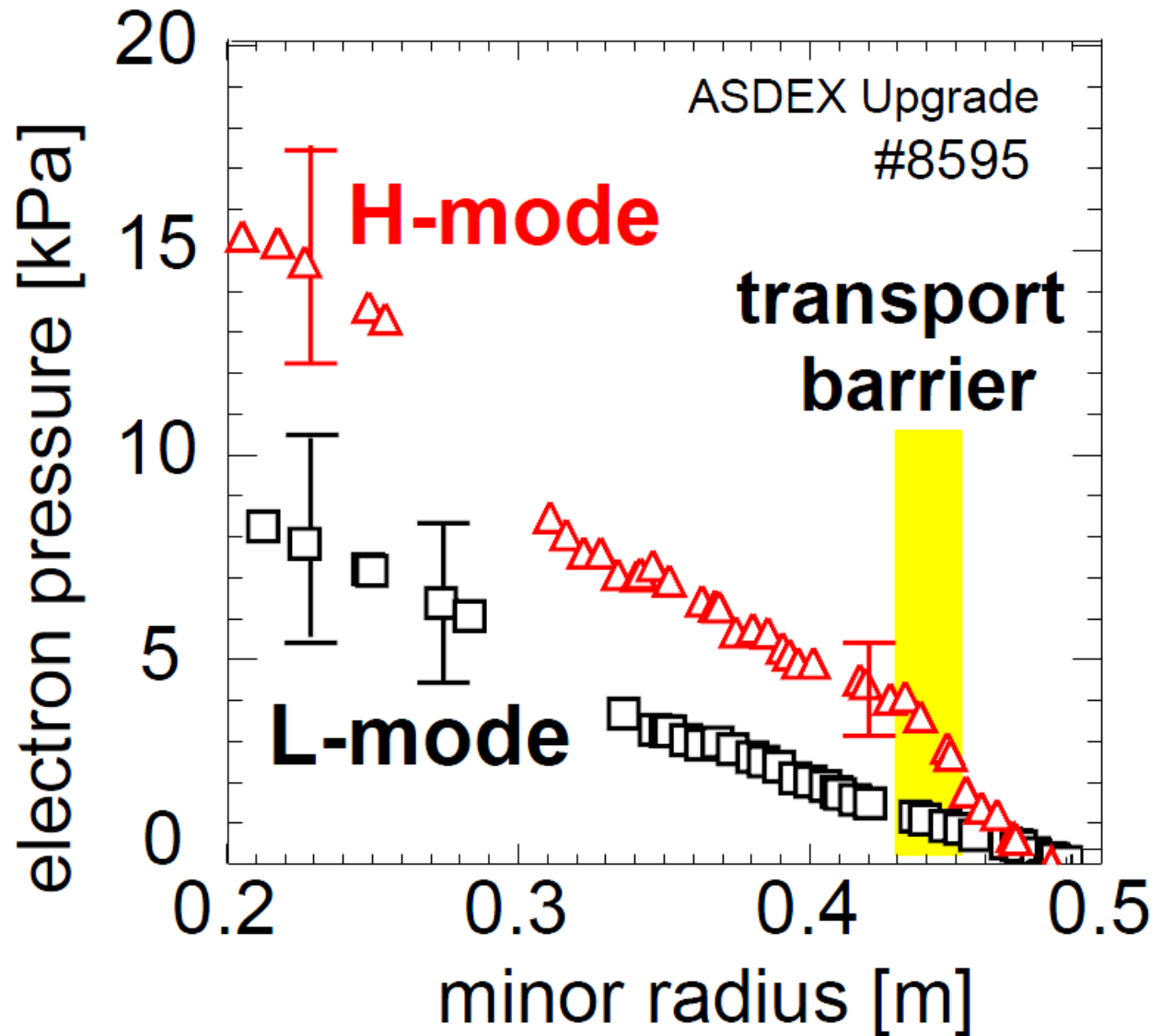
<https://fusion.gat.com/theory/Gyro>

L-mód H-mód

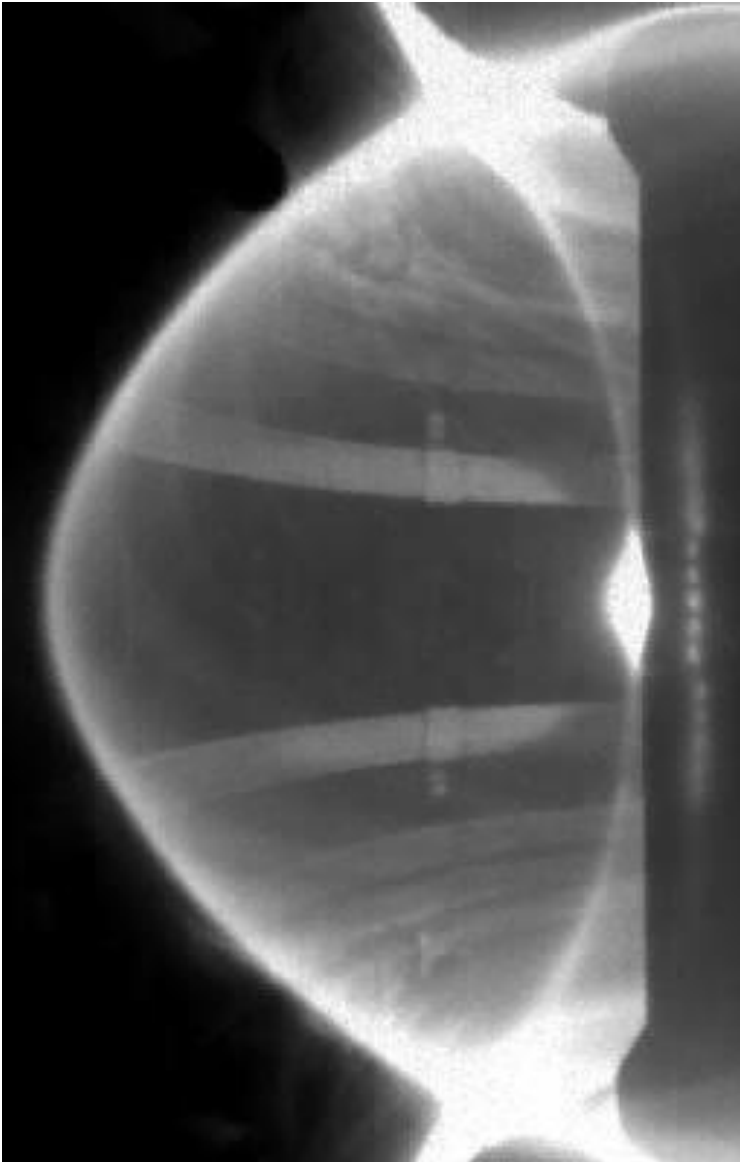
H-mód: high confinement mode

Feltételek:

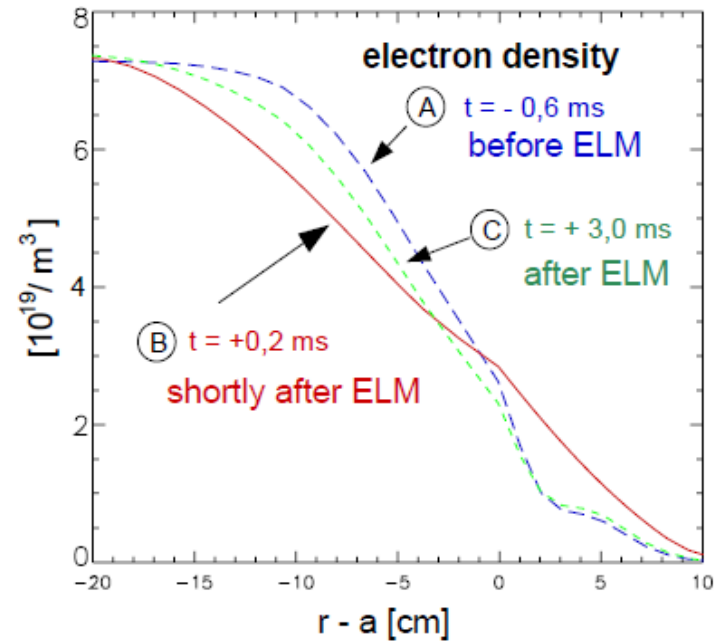
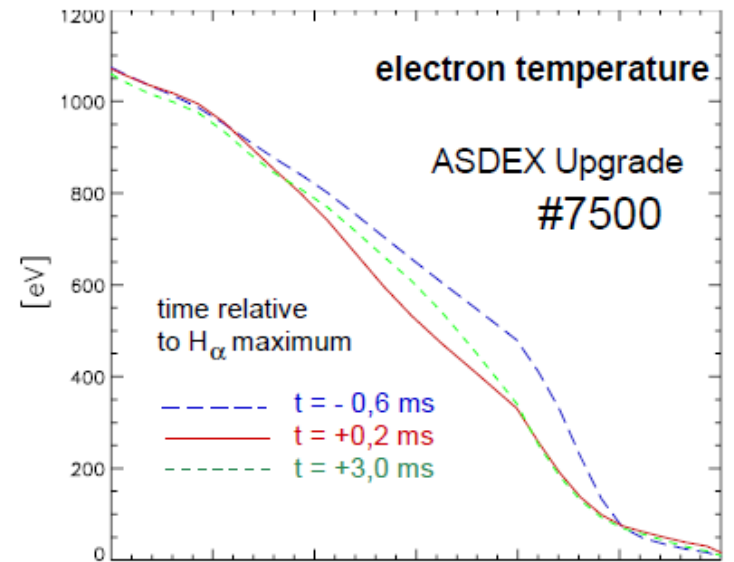
- Jó fal
- Megfelelő sűrűség
- Nagy fűtési teljesítmény
- ...



ELM-ek



[video](#)



1. Telefon elővesz
2. WiFi jelszó: wigner2008, vagy mobilnet
3. Böngészőbe: Kahoot.it
4. Kód: kivetítőn
5. Név: Neptun kód !!!



6. Értékelés:

- Az összes kérdésre hibátlan megoldás → **+1 pont**
- Többiek között az elért ponttal arányos eséllyel **2 x +1 pont sorsolás**

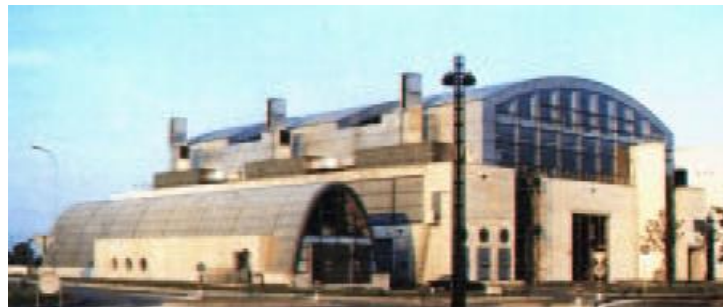
Energiaellátás

Igénybevétel:

- Rövid kisülések, rendszerek gyors kapcsolása → tranziens terhelés
- Nagy felvett teljesítmény: akár 800 MW

Megoldások:

- Áramellátás hálózatról
- Kondenzátortelepek
- Nagy lendkerekes generátorok
- Moduláris lendkerekes generátor rendszer

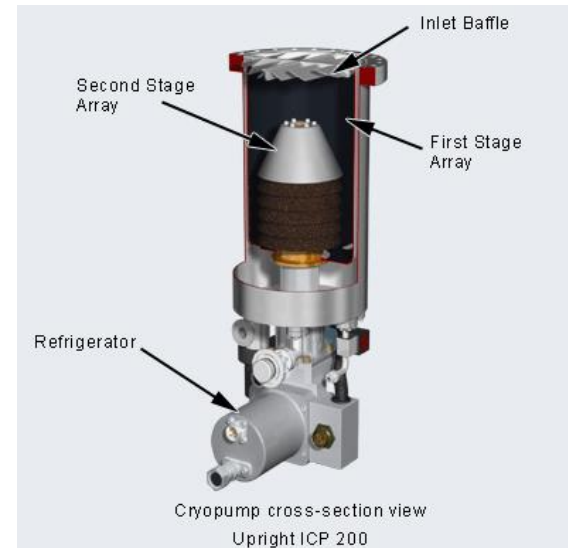


Vákuum

Vákuum 10⁻⁴ torr (1 torr = 133 Pa) alatt

→ kétlépcsős vákuumrendszer:

elővákuum szivattyú + turbomolekulár vagy kriopumpa, (esetleg iongetter)



Vákuumkamra:

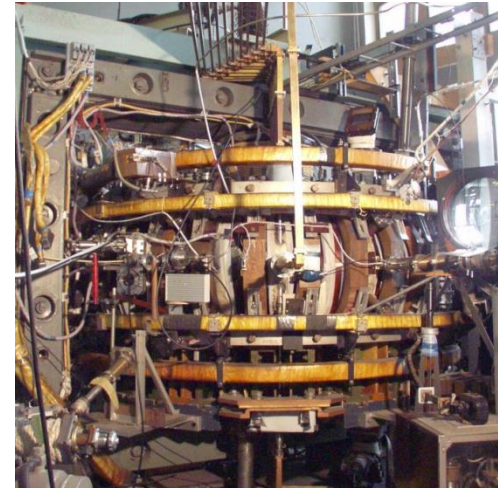
erős (EM-terhelések, nyomástartó) és vékony (mágneses tér) külső kriosztátban elővákuum → kisebb nyomás a vákuumkamrán kifűthető

Elektromágnesek

Erős mágneses térhez ($\sim 5 \text{ T}$) erős áram kell a toroidális tekercsekben ($\sim 10 \text{ MA}$).

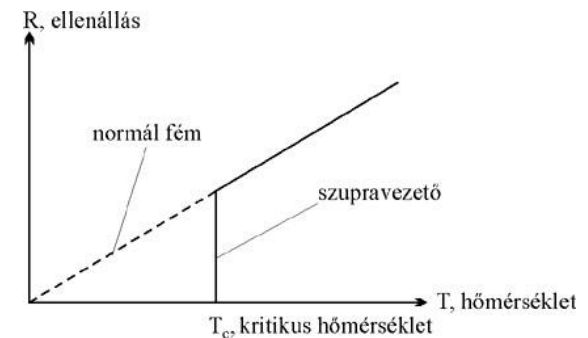
Réz tekercsek:

- $\sim 100 \text{ MW}$ teljesítmény
- hőtehetetlenség „hűti”
- hosszabb üzem esetén vízűtés



Szupravezető tekercsek:

- magashőmérsékletű szupravezetők
nem bírják a mágneses teret
- folyékony He hűtés
- a mágneses tér marad a lövések között
- a fluxusváltozás sebessége véges!



Ionizáció

Egyenfeszültségű ionizáció:

- tokamakokban működik
- elég sok fluxust fogyaszt a transzformátor primer tekercsén



Mikrohullámú ionizáció (microwave breakdown):

- sztellarátorokban mindig
- tokamakokban is gyakran
- általában elektron-ciklotron rezonancia fűtéssel (ECRH)

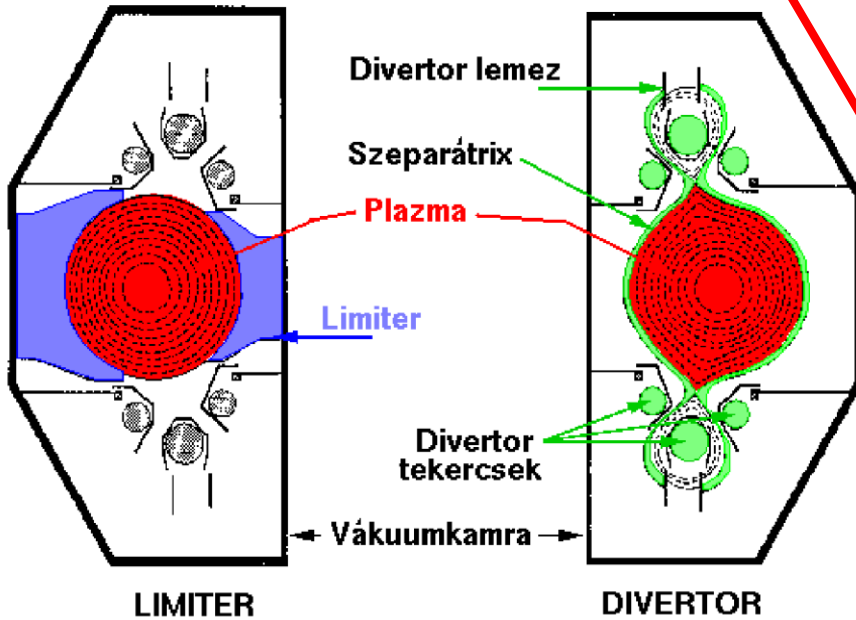
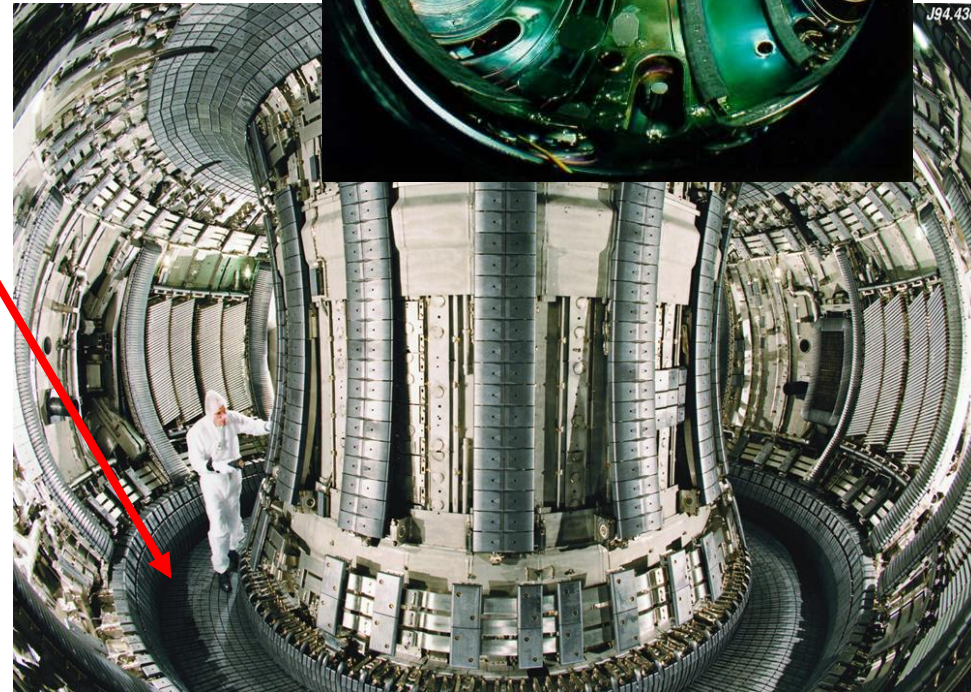
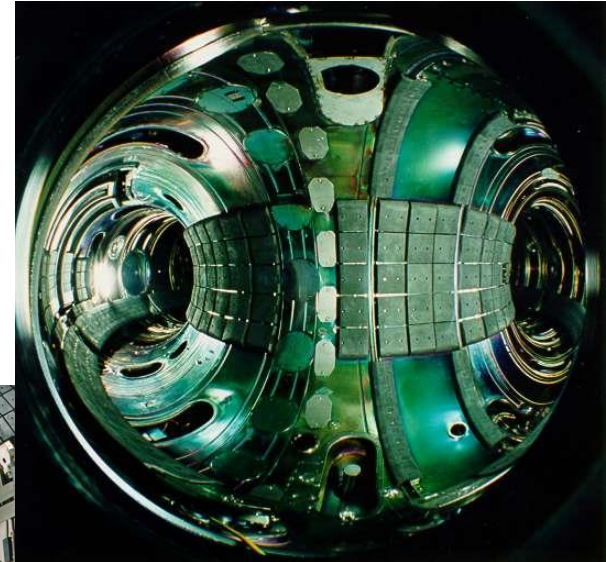


Plazmahatároló elemek

A plazma szélére kijutó részecskék bombázzák a falat amelynek anyaga szennyezi a plazmát.

Kontrollált plazma-fal kölcsönhatás:
divertor

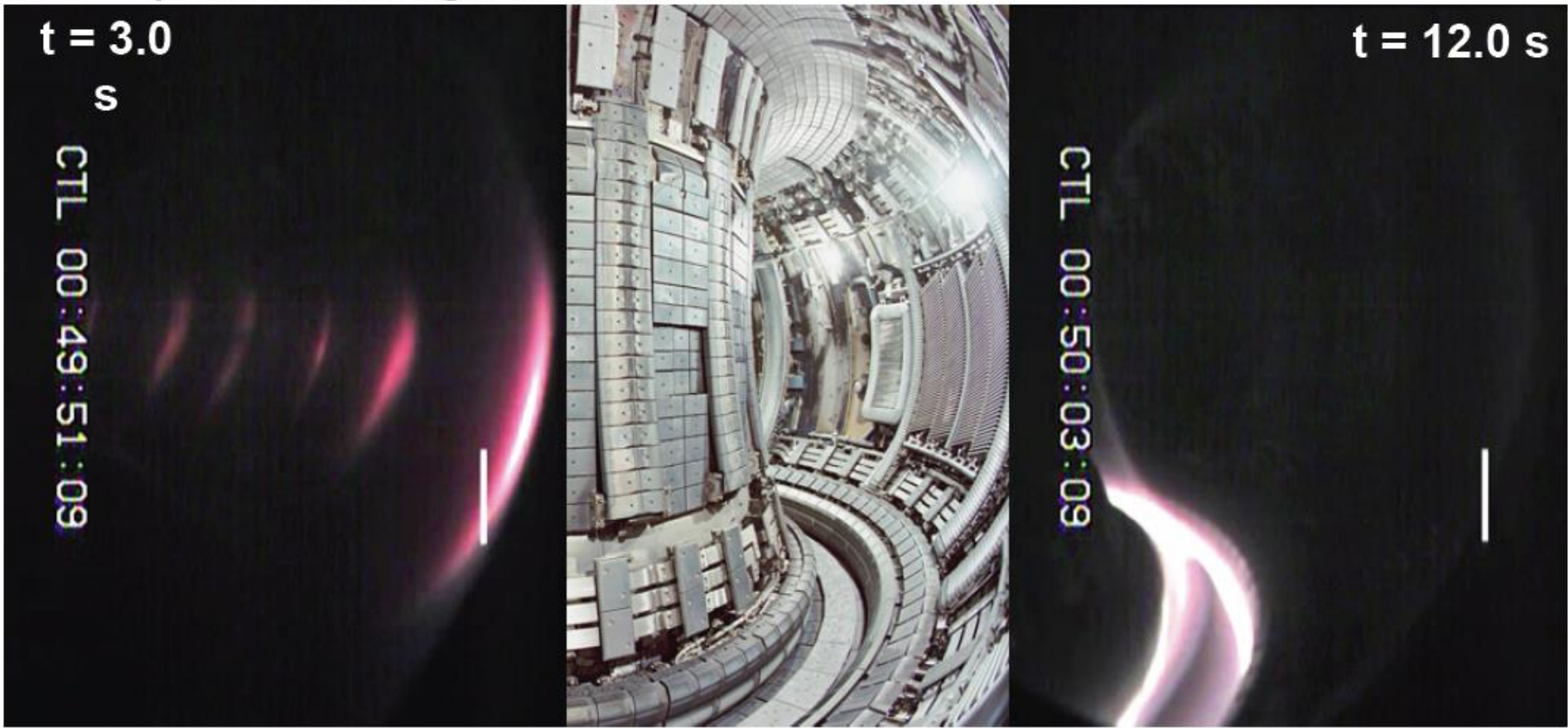
Tipikus hőterhelés $1-100 \text{ MW/m}^2$



Limiter és divertor

A kisülés elején limiteres plazma (JET)

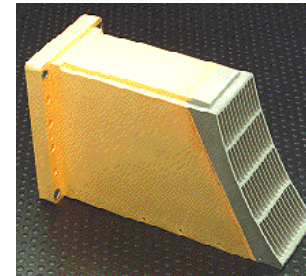
#62218: plasma visible light emission



Fúziós technológiák: fűtés, áramhajtás

Áram (tokamak):

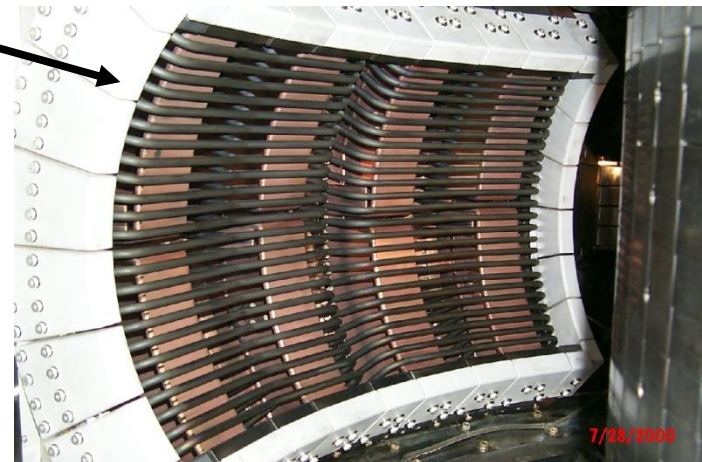
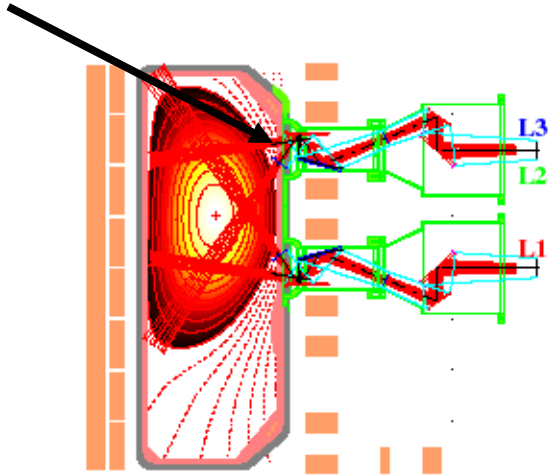
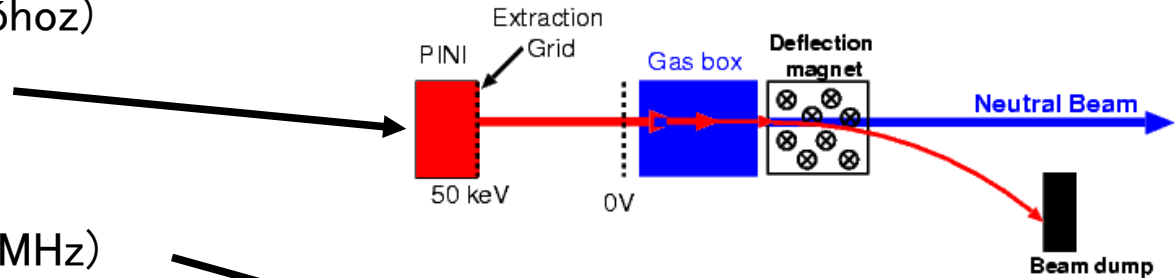
- ◆ Induktív áramgerjesztés (csak impulzus <10 sec)
- ◆ Mikrohullámú áramhajtás (1 GHz–100 GHz, 1MW)



*Mikrohullámú
(alsó hibrid)
antenna*

Fűtés:

- ◆ Ohmikus fűtés (kevés a fúzióhoz)
- ◆ Semleges részecske (NBI)
- ◆ Ion-ciklotron frekvencia (30 MHz)
- ◆ Elektron-ciklotron frekvencia (100GHz)



Teljesítmények:

0.5–10 MW/blokk
< 40 MW/berendezés

Anyagutánpótlás:

gázbeeresztés, NBI
pelletek

1. Telefon elővesz
2. WiFi jelszó: wigner2008, vagy mobilnet
3. Böngészőbe: Kahoot.it
4. Kód: kivetítőn
5. Név: Neptun kód !!!



6. Értékelés:
 - Az összes kérdésre hibátlan megoldás → **+1 pont**
 - Többiek között az elért ponttal arányos eséllyel **2 x +1 pont sorsolás**