

Transzport folyamatok mágnesezett plazmákban

Pokol Gergő



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BME NTI

MAFIHE 2017 Fúziós Plazmafizika Téli Iskola

2017. február 11.

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

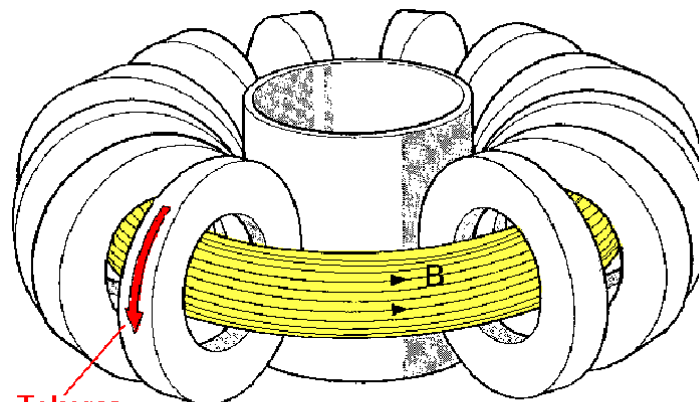
A körmozgás frekvenciája: $\omega_c = \frac{qB}{m}$ sugara: $r_L = \frac{m|\mathbf{v}_{\perp}|}{qB}$

Ez a **ciklotron/Larmor-frekvencia**.

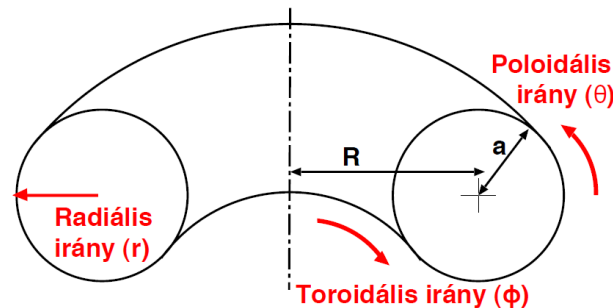
Adott mágneses térnél csak a részecskére jellemző.
A forgásirány a töltés előjelétől függ: az ionok és az elektronok ellentétes csavarodású spirál pályán mozognak az erővonal körül.

Mágneses összetartás, toroidális geometria

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

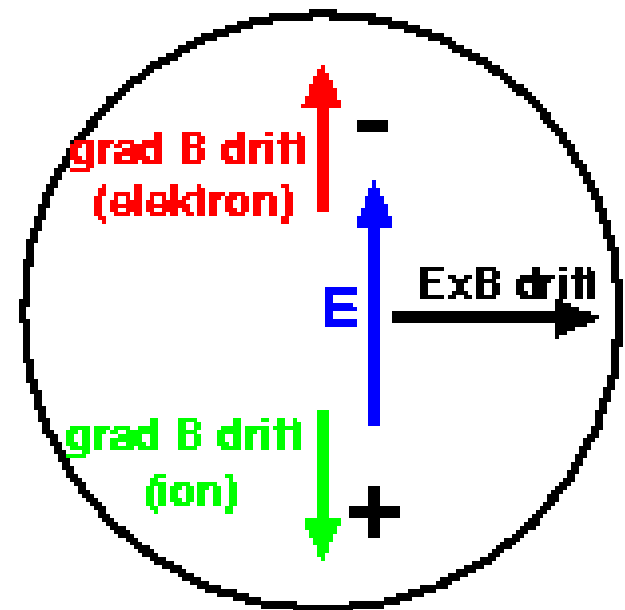


Tekercs
áram



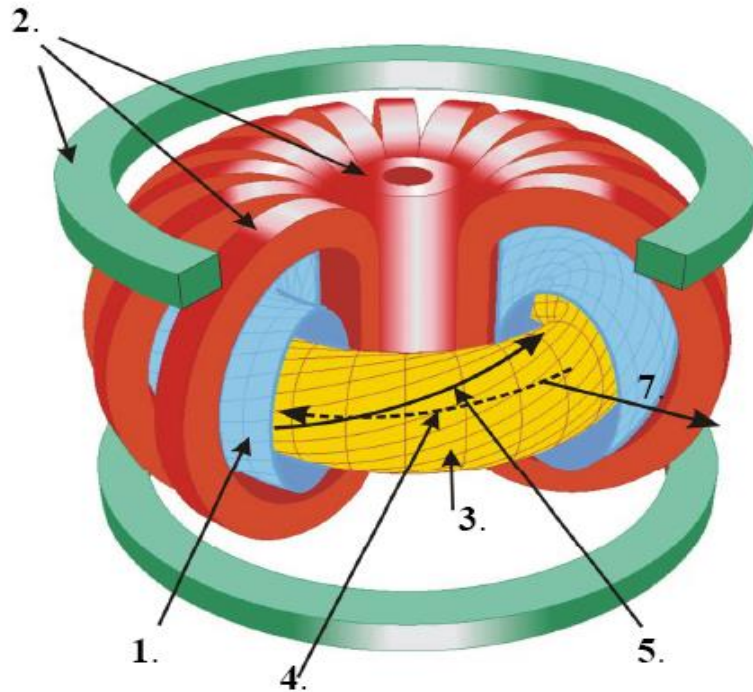
A **tér görbülete miatt** az elektronok és az ionok fel- ill. lefelé driftelnek. A **töltésszétválás** létrehoz egy **függőleges elektromos teret**. Az $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift az egész plazmát kifelé mozgatja a mágneses téren keresztül.

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



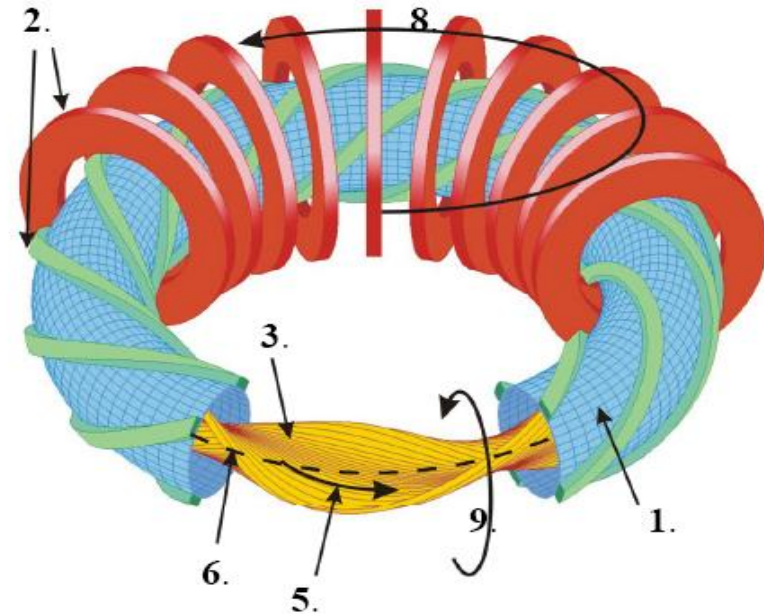
- **Sztellarátorok** (külső tekercsekkel)
- **Tokamakok** (plazmaárammal)

Tokamak



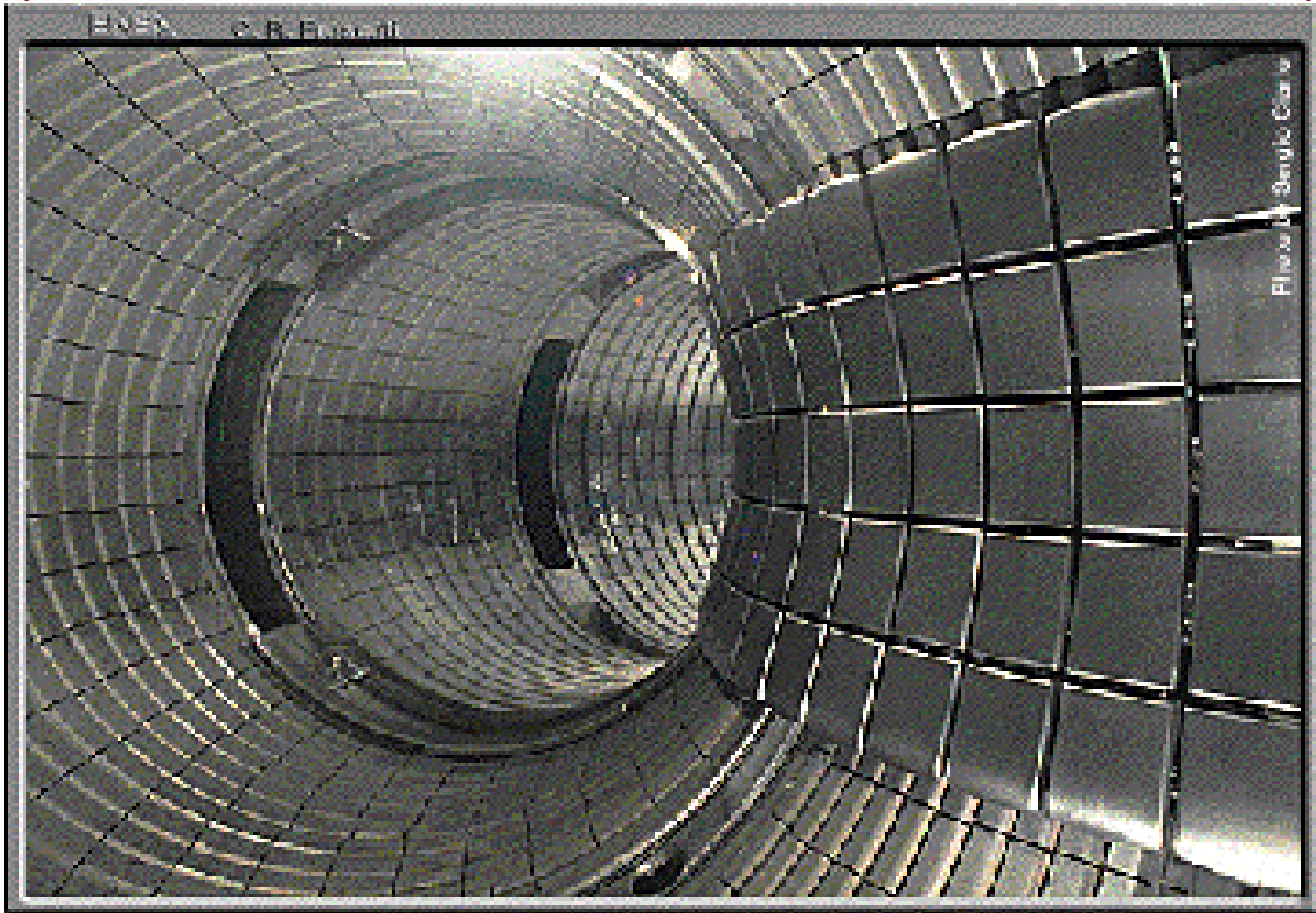
Toroidális plazmaáram

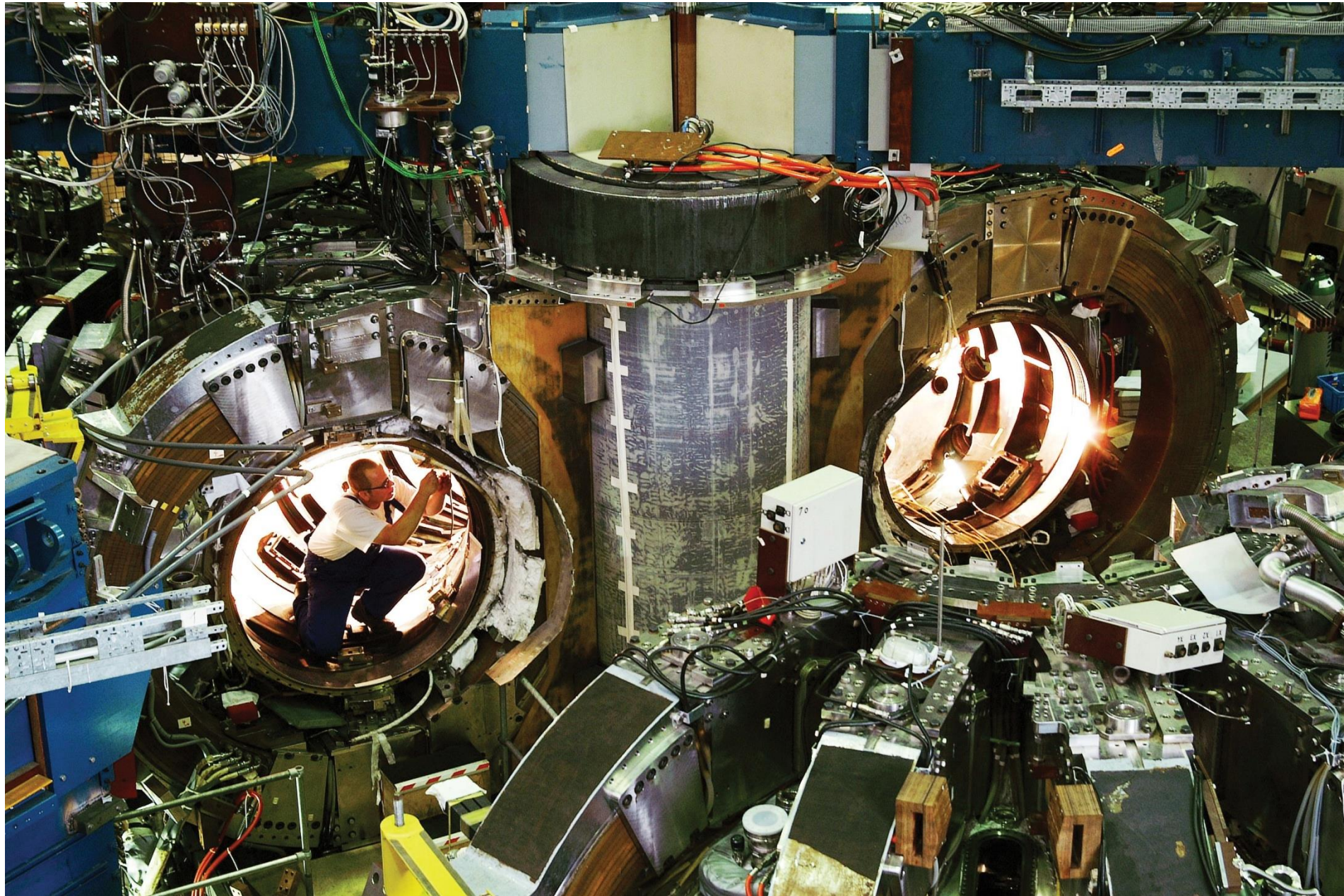
Sztellarátor

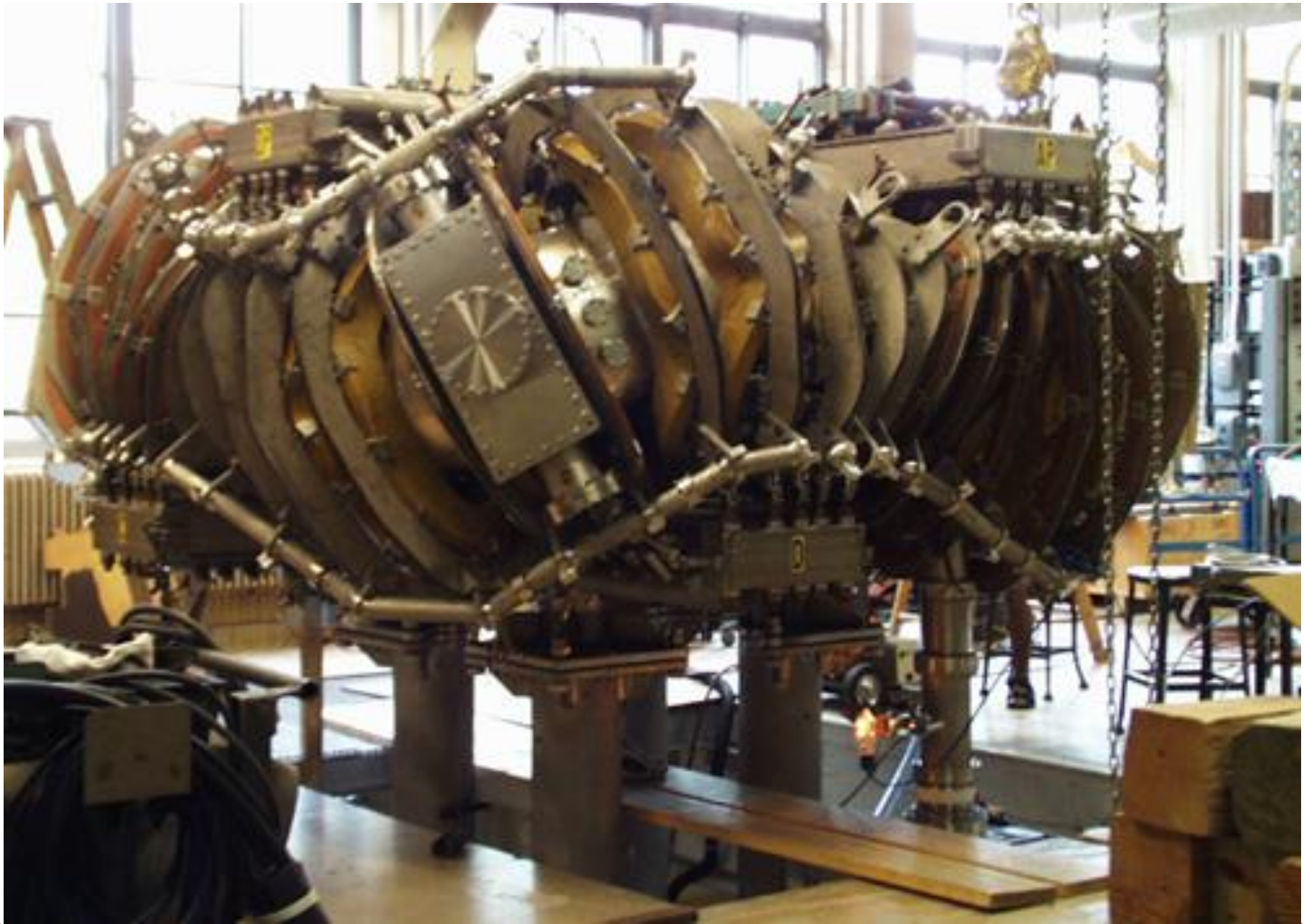


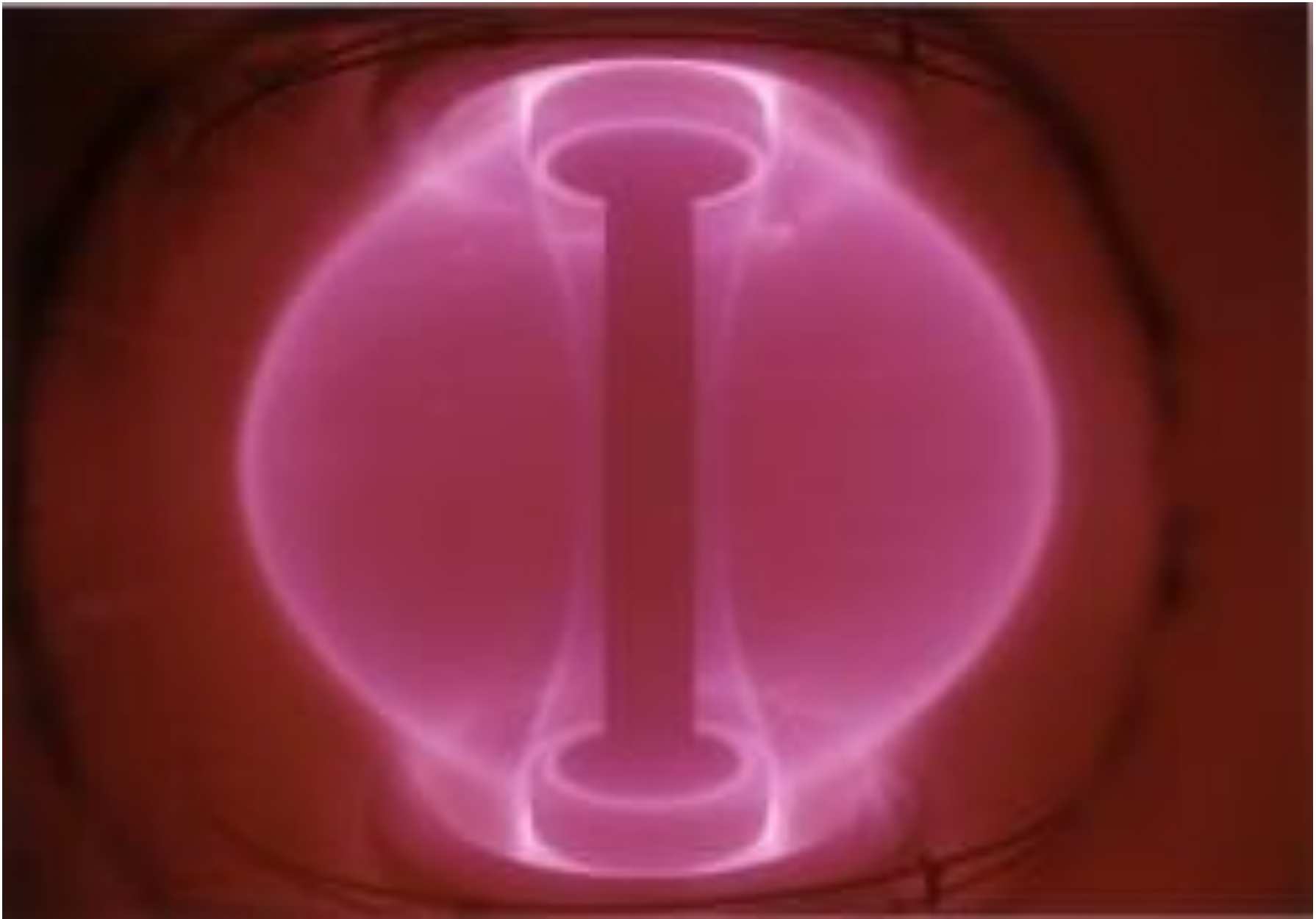
Helikális tekercsek

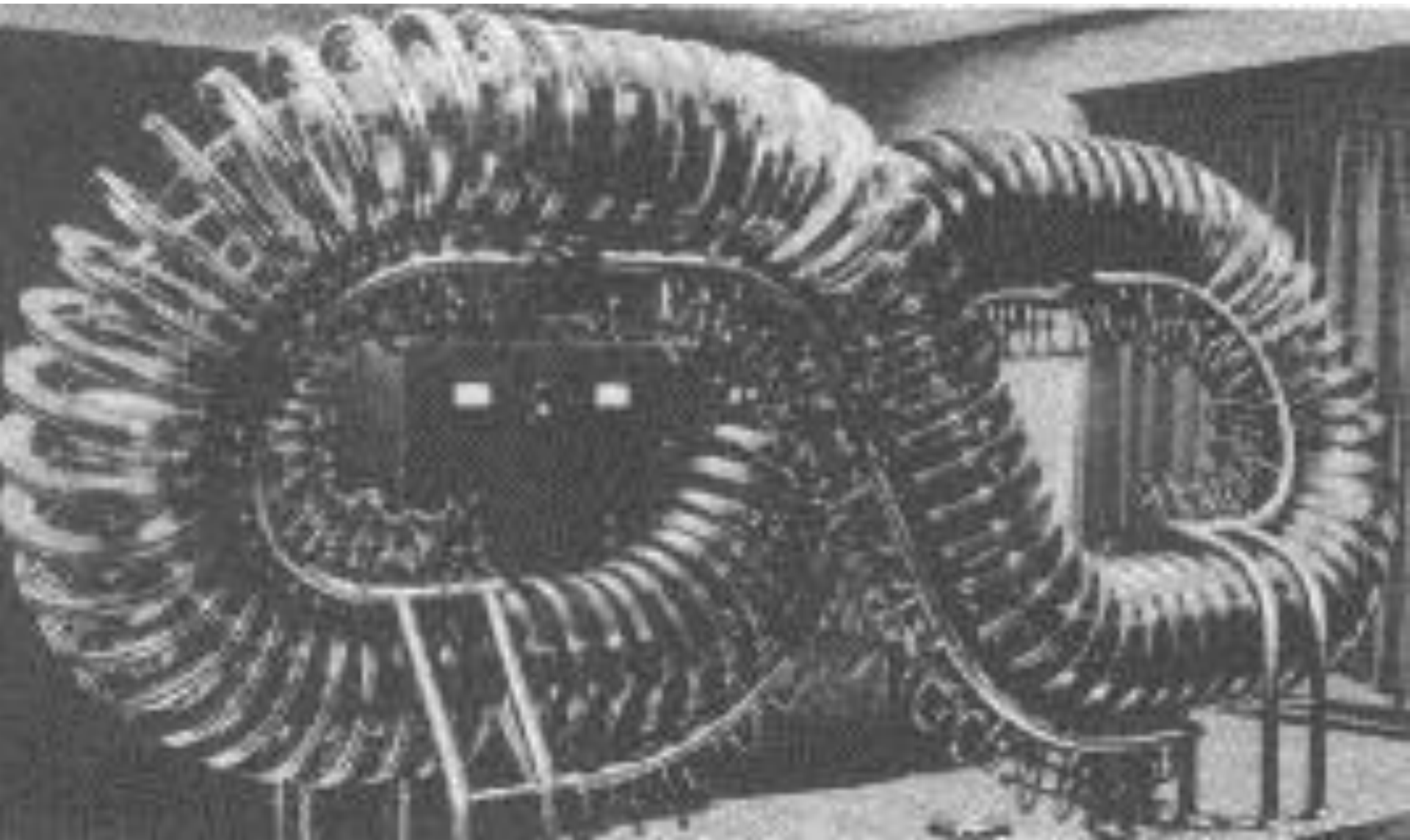
- (1) vákuumkamra, (2) mágneses tekercsek, (3) plazma,
 (4) plazmaáram, (5) mágneses erővonal, (6) mágneses tengely,
 (7) radiális irány, (8) toroidális irány, (9) poloidális irány

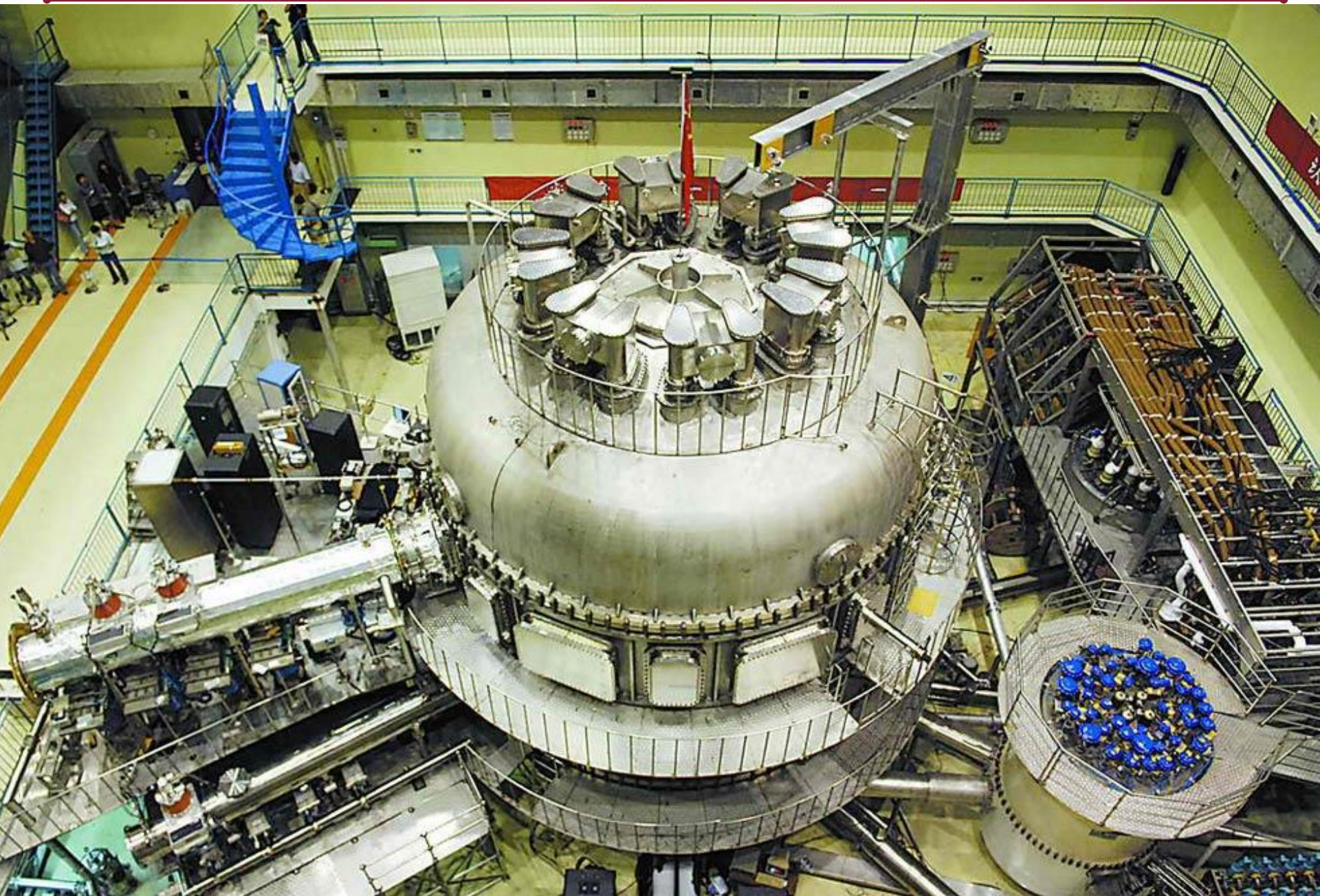


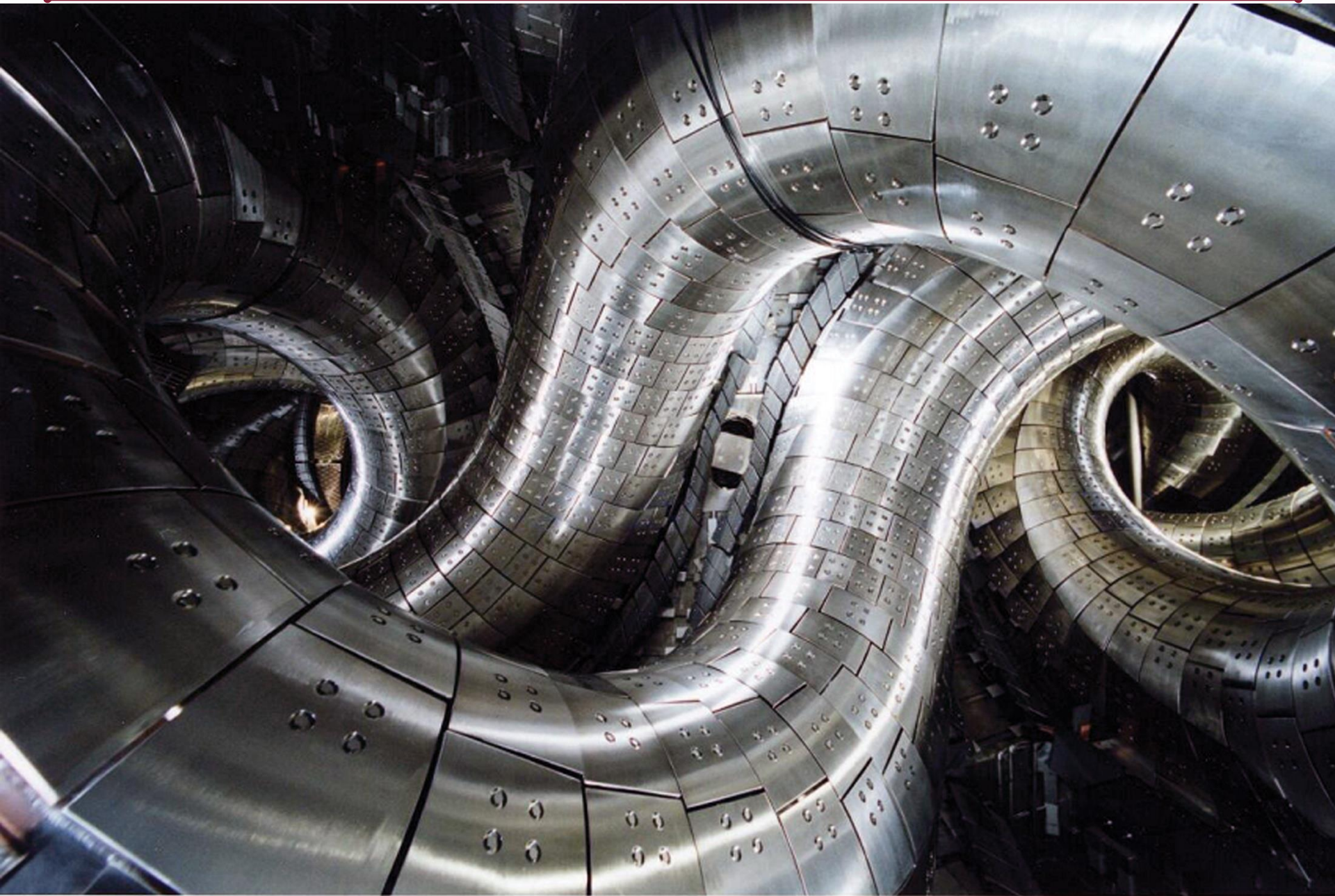




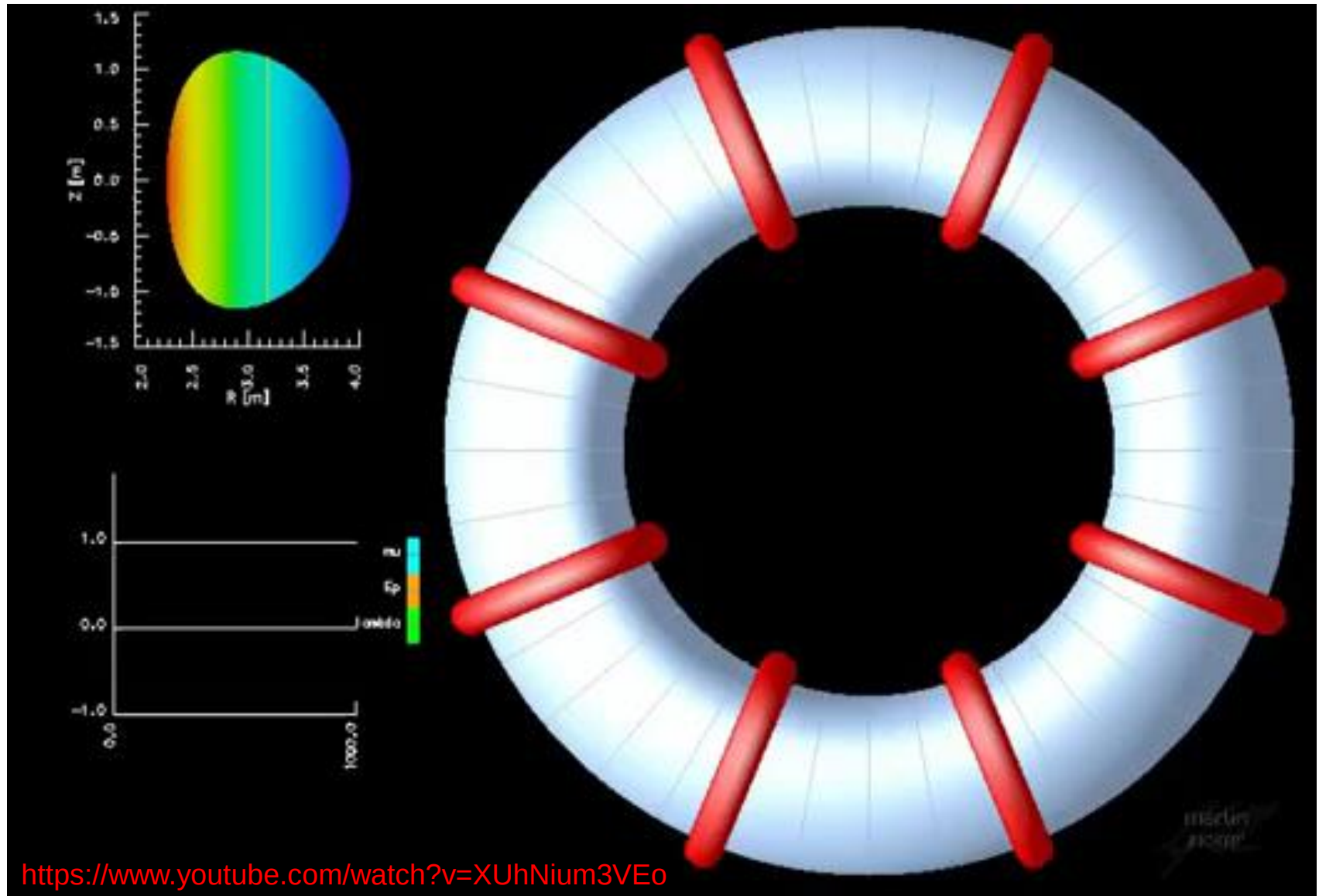






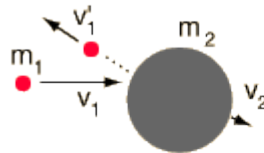


Tökéletes ütközésmentes összetartás



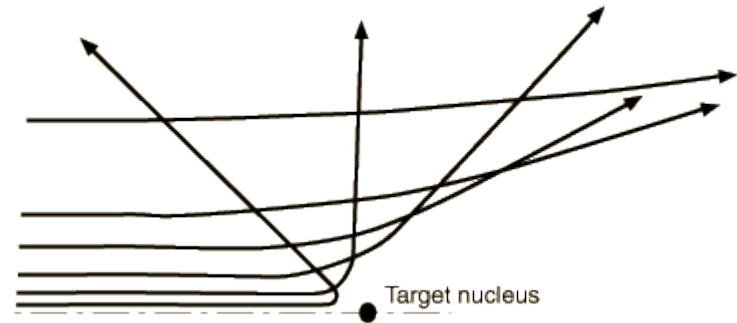
Vezetőképesség – ellenállás

Coulomb-ütközések árnyékolt töltéseken:

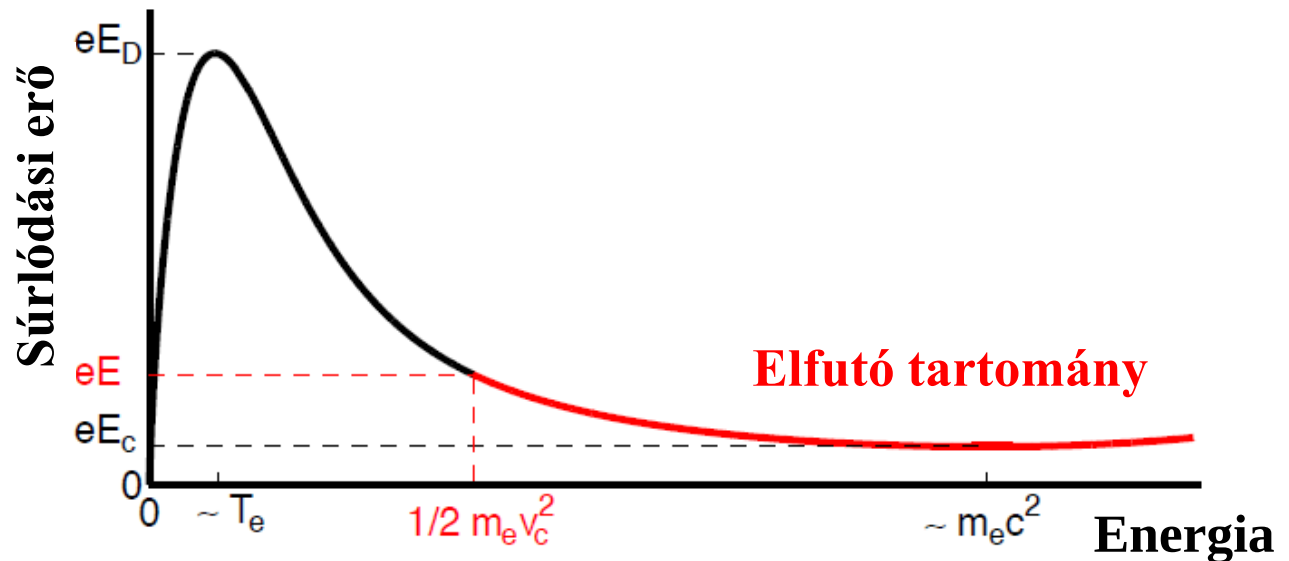


Fajlagos ellenállás (Ohmikus fűtés):

$$\eta \approx 5.2 \cdot 10^{-5} \frac{Z_i \ln \Lambda}{T_e^{3/2} [\text{eV}]} [\Omega \text{m}]$$



Elfutó elektronok:



Elfutó elektronok diszrupcióban



T+: -15.052 ms

Img#: -31 Cam: Phantom v.7 AcqRes: 800 x 600 Rate: 2000 Exp: 495 μ s EDR: 0 μ s First: -293 Last: 1596 Durat: 0.945 s

Range data:

Description:

Elfutó elektronok diszrupcióban



T+: +403.948 ms

Img#: 807 Cam: Phantom v.7 AcqRes: 800 x 600 Rate: 2000 Exp: 495 μ s EDR: 0 μ s First: -293 Last: 1596 Durat: 0.945 s

Range data:

Description:

Klasszikus transzport

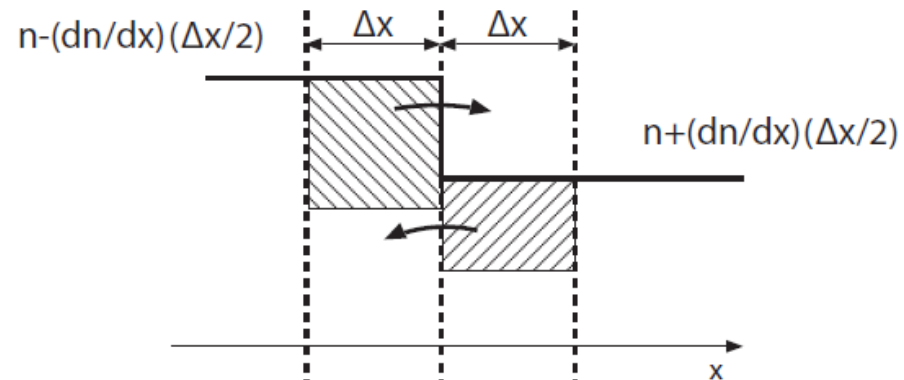
Diffúzió állandó: $D = \frac{\Delta x^2 \nu_c}{2}$

Klasszikus transzport
(homogén mágneses térben):

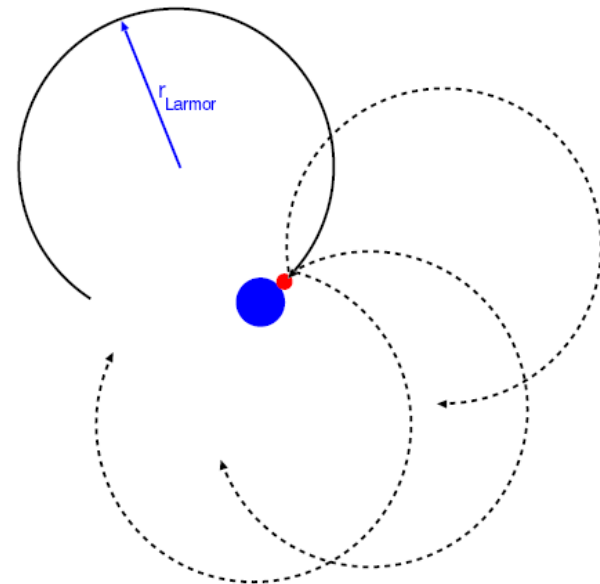
$$D_{\parallel} = \frac{1}{2} \left(\frac{v}{\nu_c} \right)^2 \nu_c \sim T^{5/2}$$

$$D_{\perp} = \frac{1}{2} (r_L)^2 \nu_c \sim T^{-1/2}$$

Automatikusan ambipoláris: $D_{\perp e} = D_{\perp i}$



Véletlen bolyongás → diffúzió

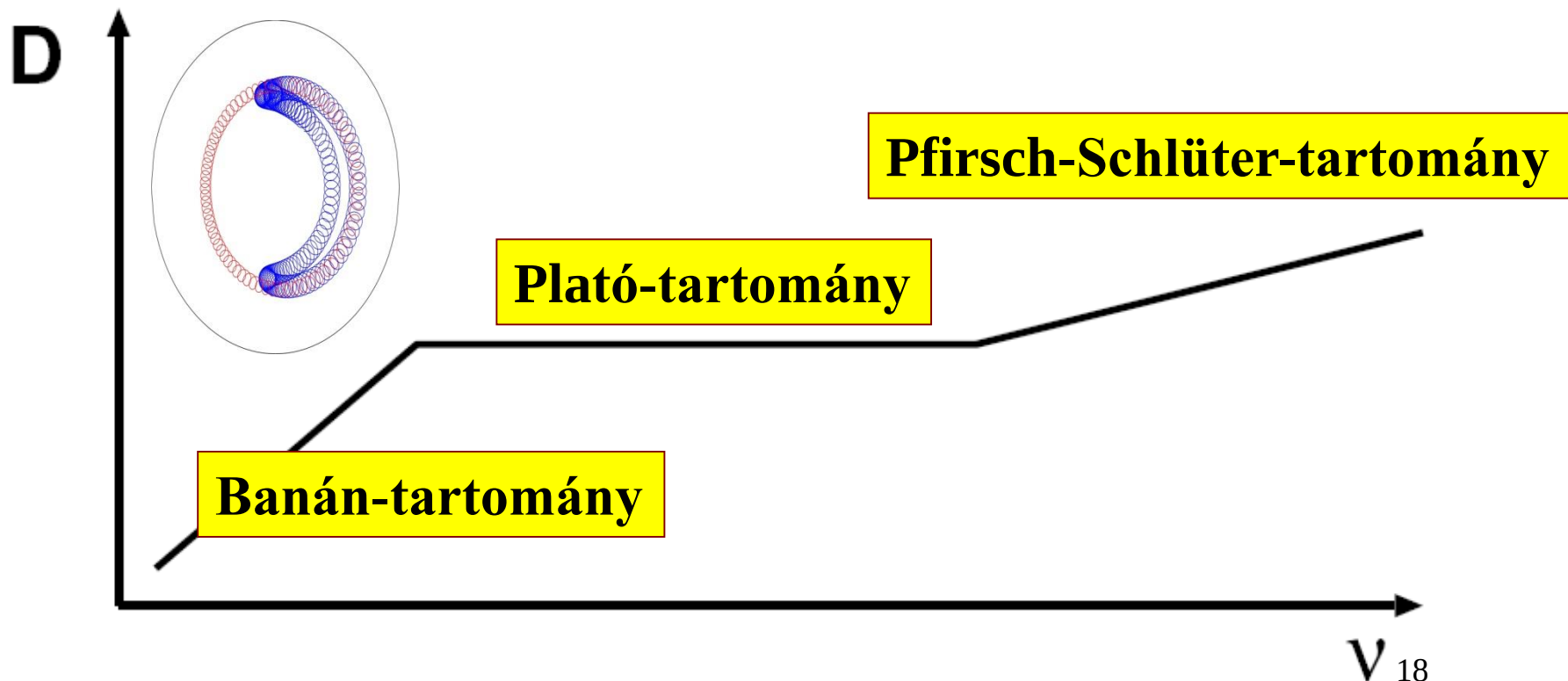


Neoklasszikus transzport

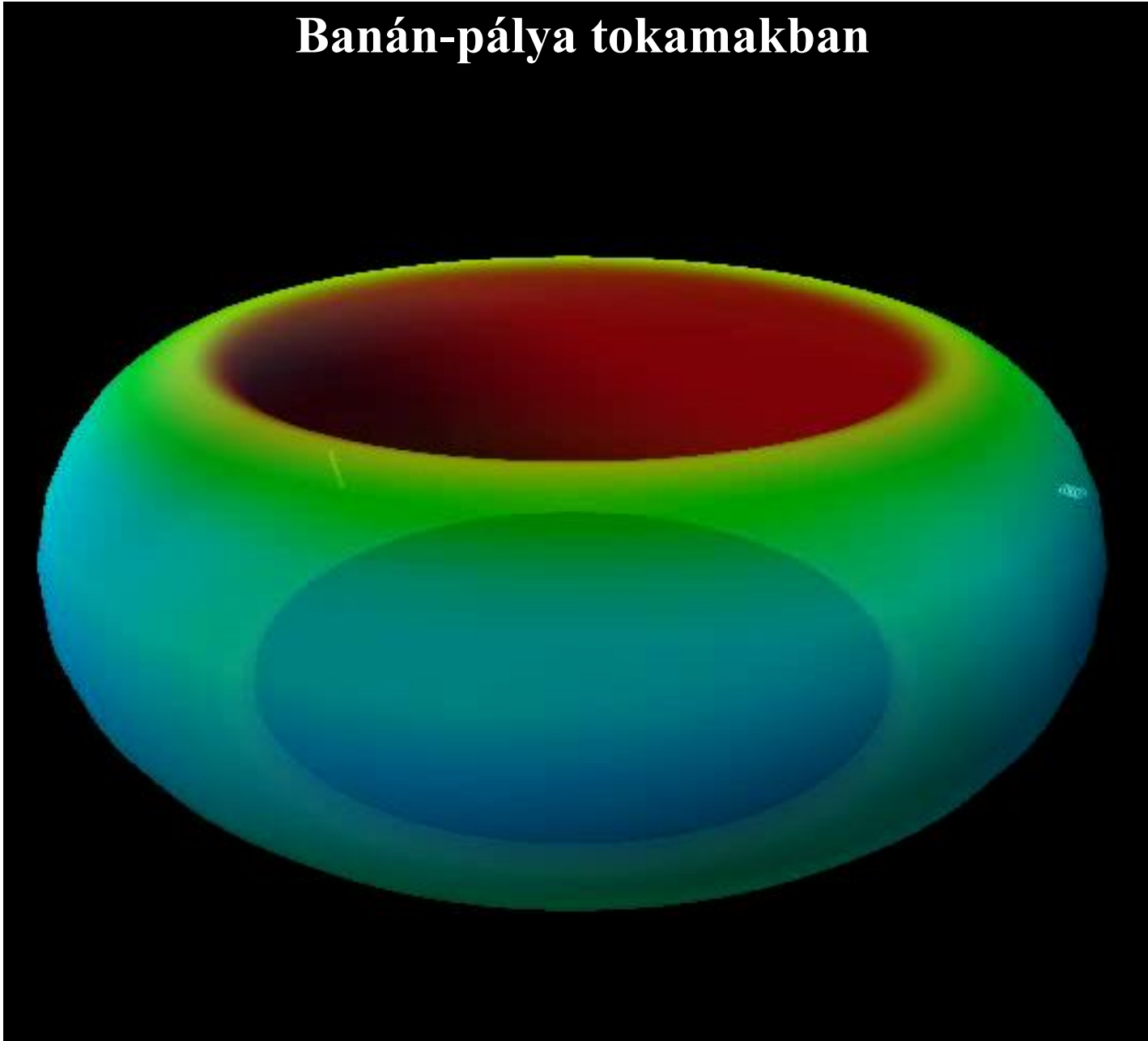
Ütközéses transzport inhomogén mágneses térben a driftek figyelembe vételével.

Nagyobb radiális lépéshossz $\rightarrow$ Nagyobb diffúzió állandók

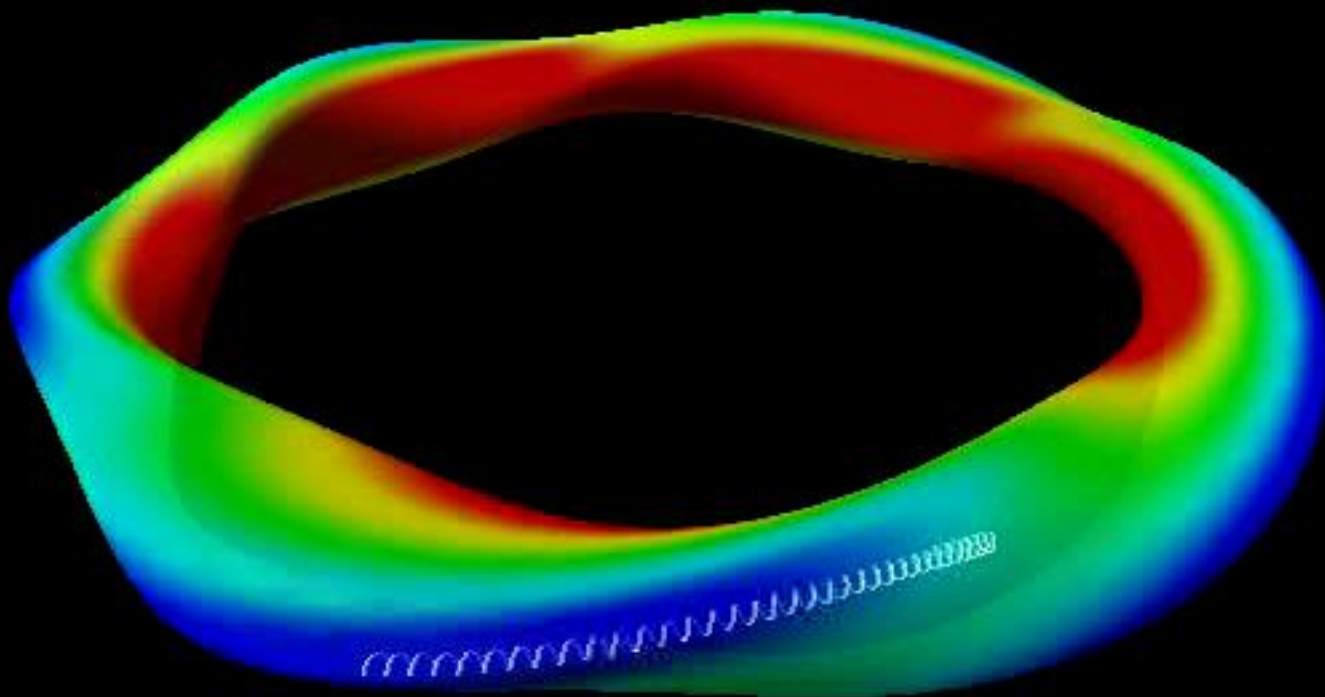
Banán-pálya $\rightarrow$ bootstrap áram $j_{BS} \approx \frac{dp}{dr}$



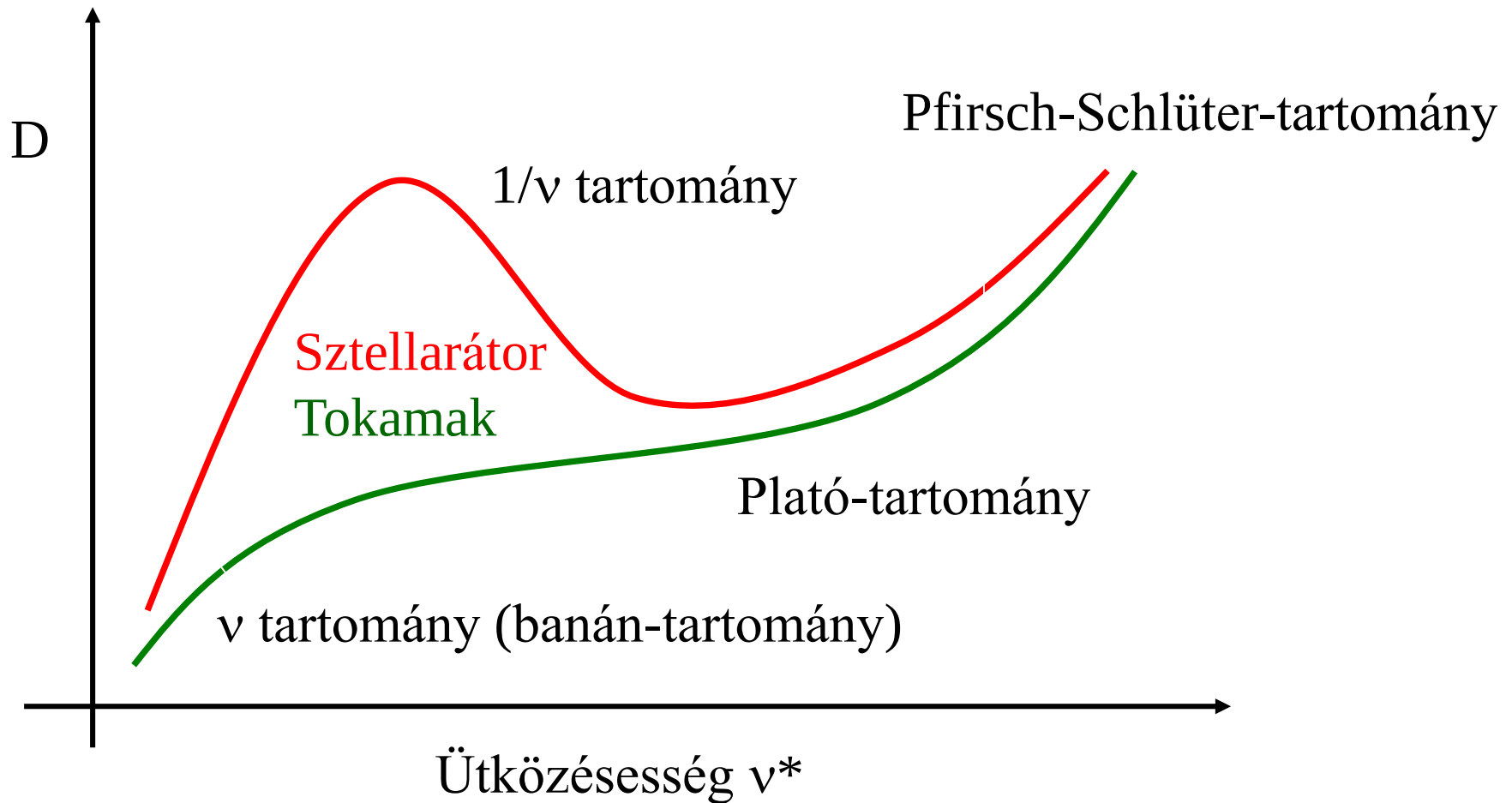
Banán-pálya tokamakban



Befogott részecske pálya sztellarátorban



Neoklasszikus transzport sztellarátorban



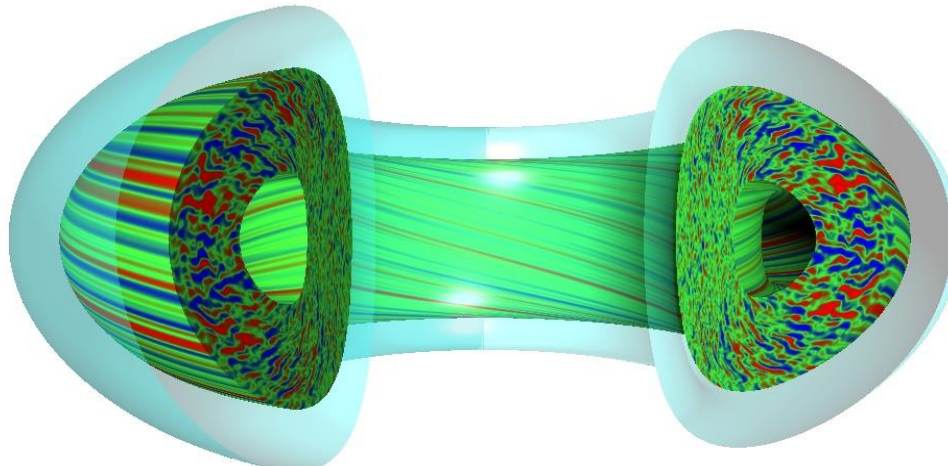
Anomális transzport

Neoklasszikus diffúzió:
$$D_{\perp} \sim \frac{T^{-1/2} n}{B^2}$$

Bohm-diffúzió (empirikus):
$$D_B = \frac{1}{16} \frac{kT}{eB}$$

Nincs egyszerű formula, nem diffúzív a transzport!

Mikro-turbulencia: kisméretű örvények nemlineáris kölcsönhatása
→ intermittens, nemlokális, önszervező transzport.





Plazma turbulencia

DIII-D Shot 121717

GYRO Simulation

Cray X1E, 256 MSPs

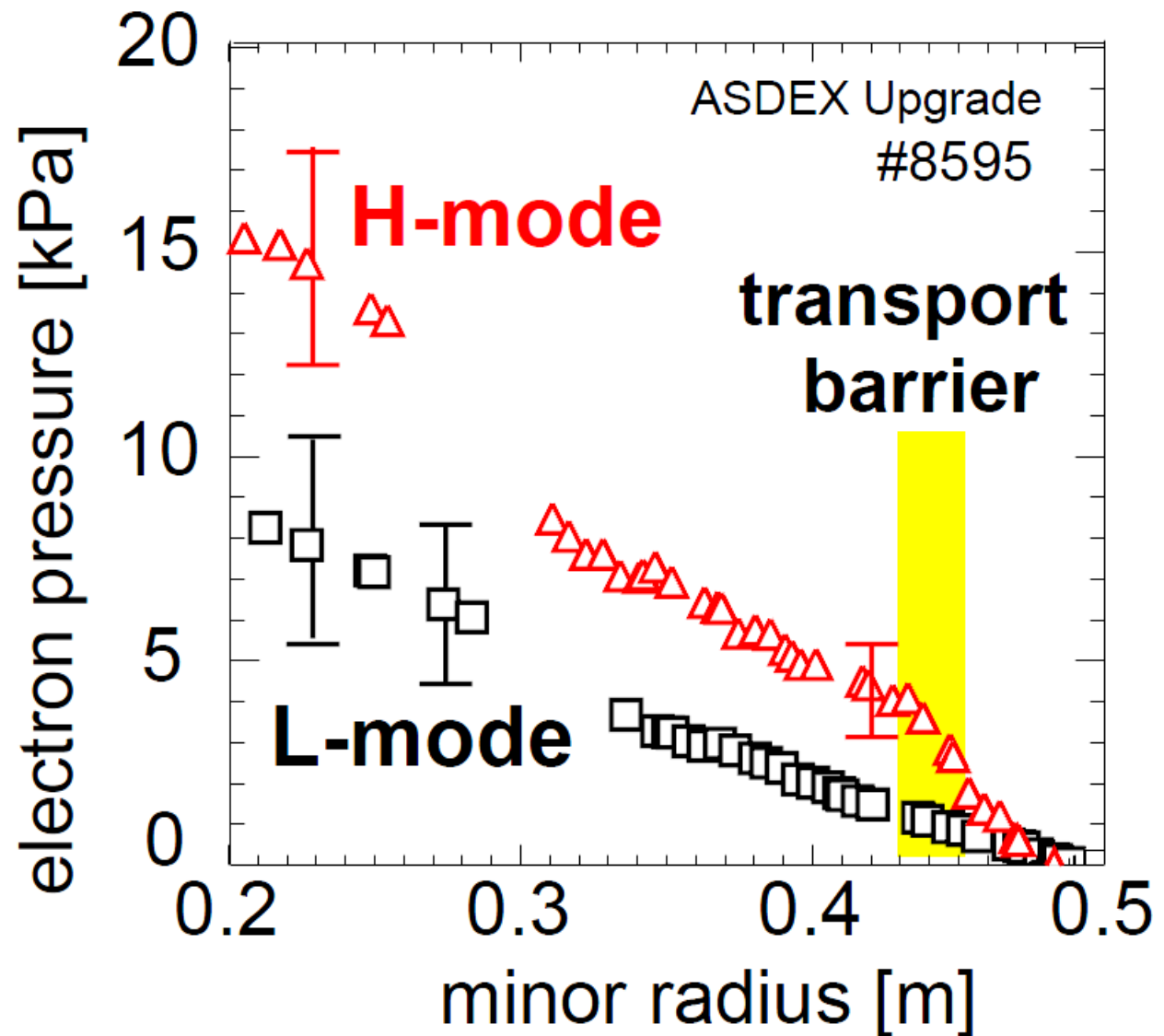
<https://fusion.gat.com/theory/Gyro>

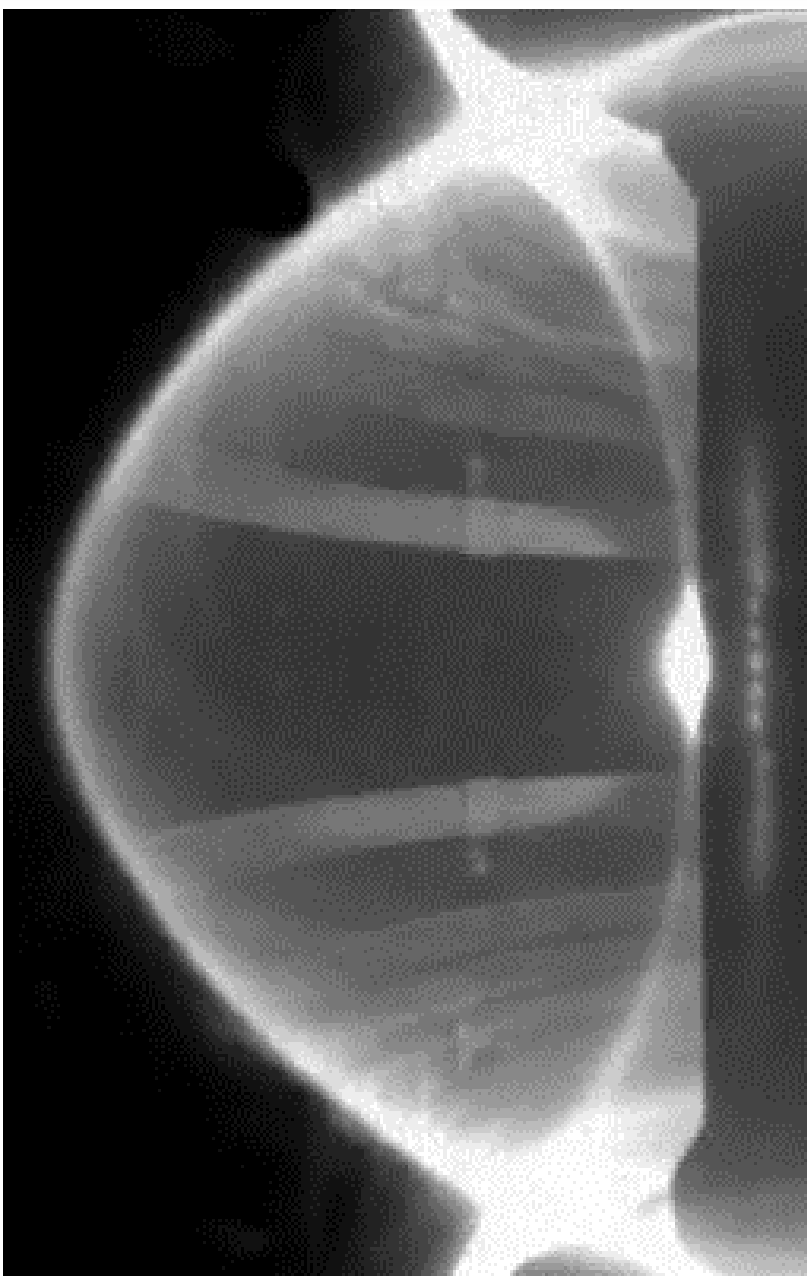
L-mód H-mód

H-mód: high confinement mode

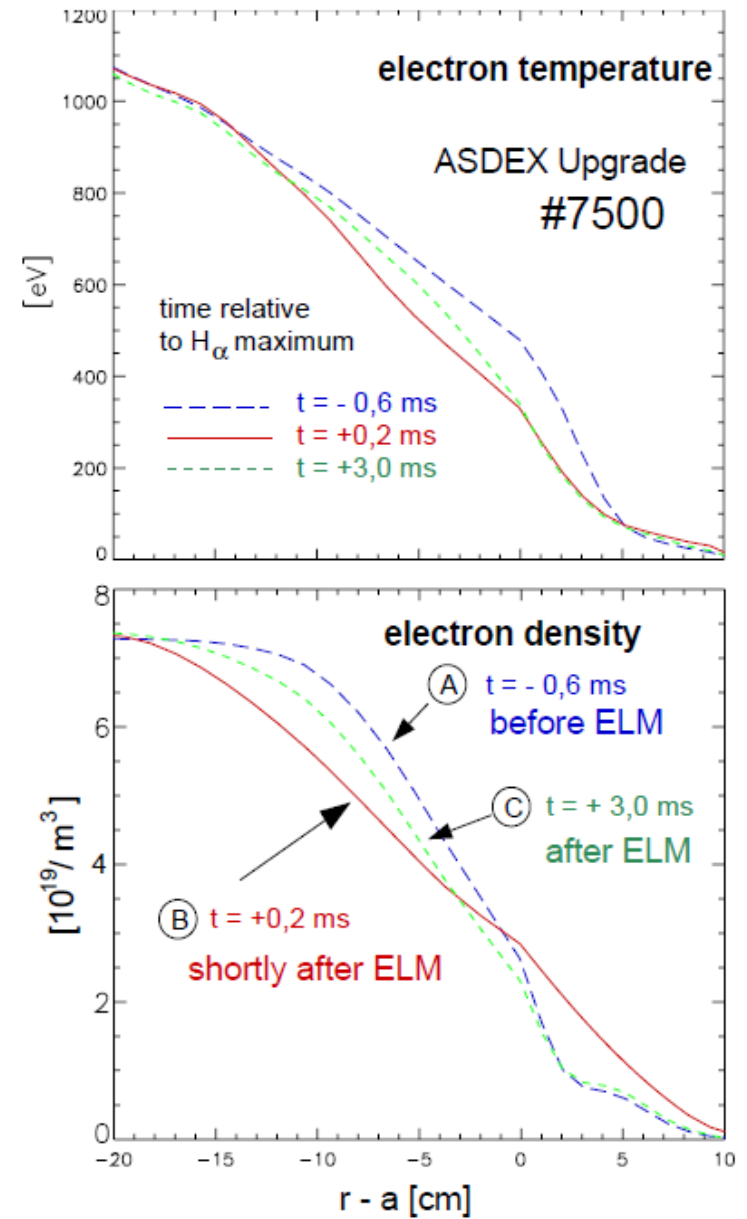
Feltételek:

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





ELM-ek

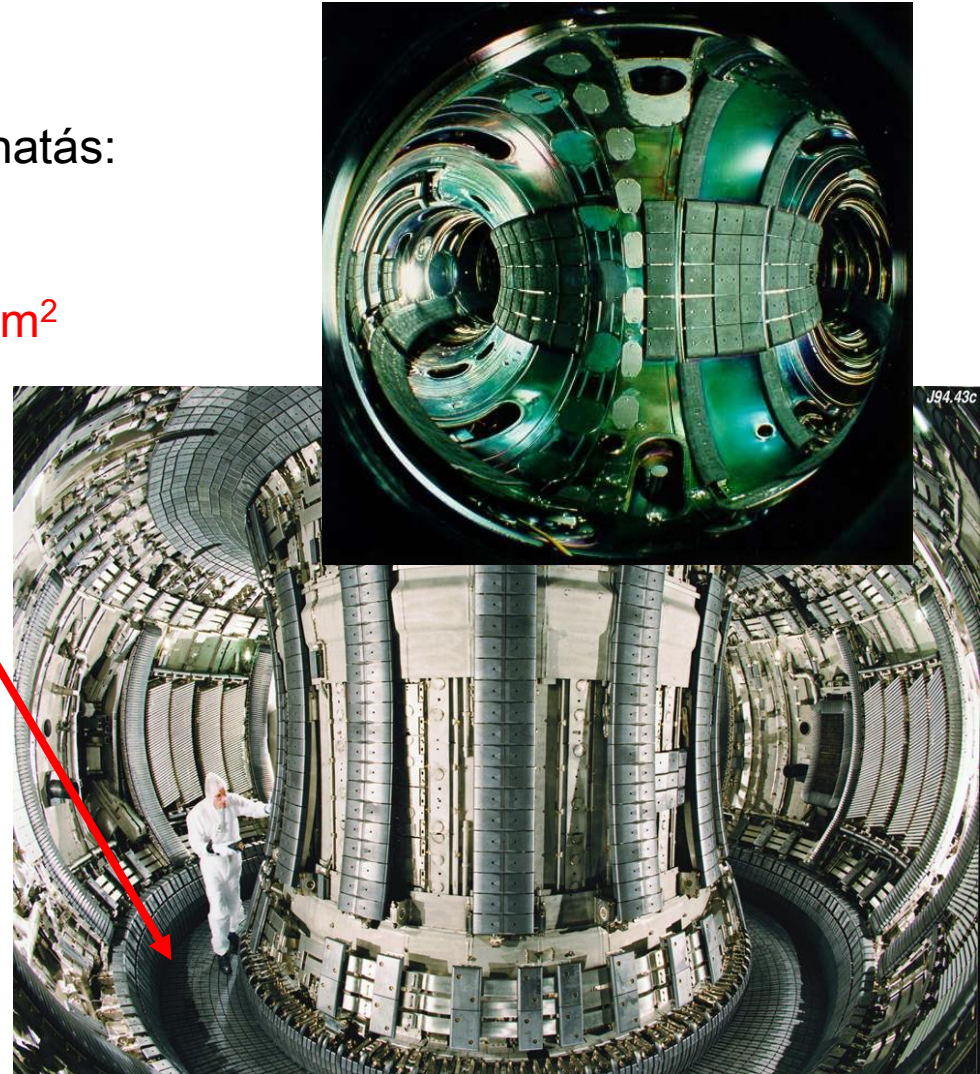
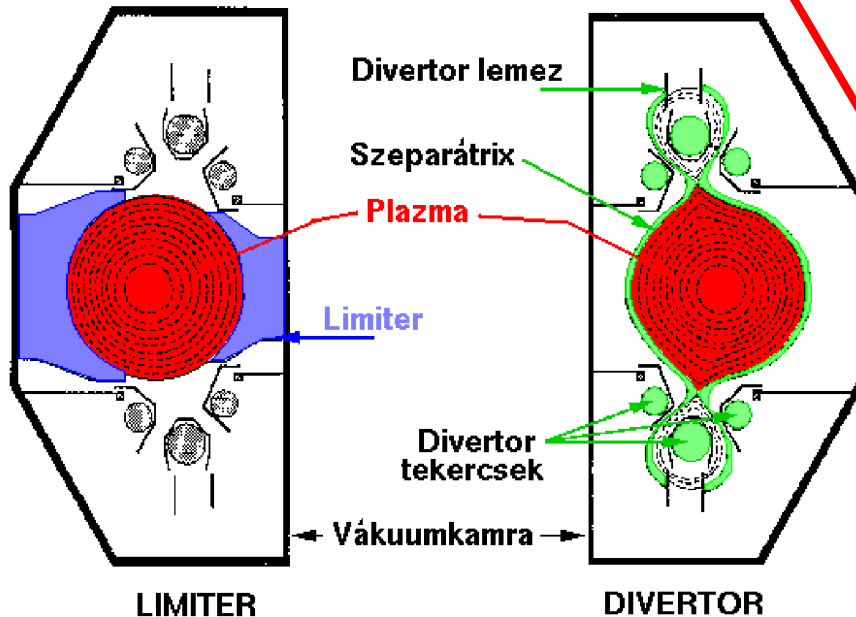


Plazmahatároló elemek

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

