

# *Fúziós plazmák sugárzása*

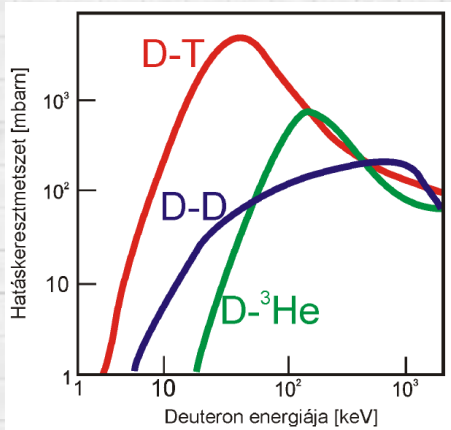
(habilitációs előadás)

Veres Gábor

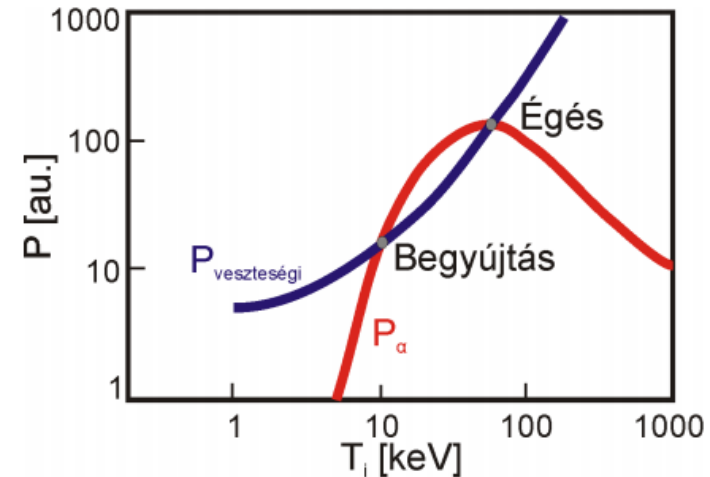
Wigner Fizikai Kutatóközpont

Plazmafizikai osztály

# A Lawson-kritérium



$$n\tau_E = \frac{Q}{1 + \frac{Q}{5}} \cdot \frac{6k_B T}{C(T)}$$



$P_{veszteség}$



$P_{sugárzási} + P_{egyéb}$



Jellemzően  $P_{sugárzási}$  arányos a plazma térfogatával,  
 $P_{egyéb}$  pedig a plazma felszínével.

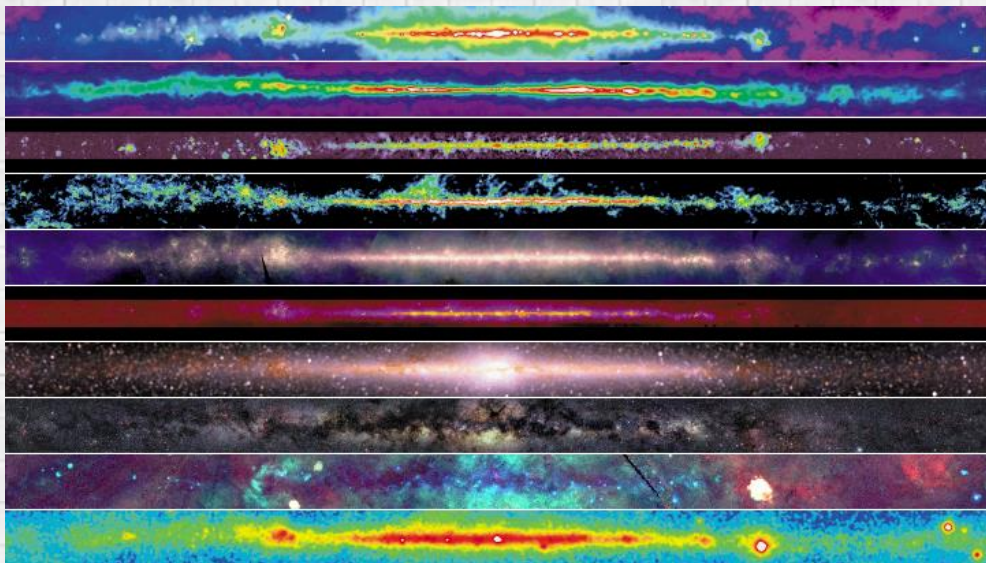
Ha  $P_{\alpha\text{-fűtés}} = P_{veszteség}$  (azaz,  $Q=1$ , „Gyűjtás” pont az ábrán),  
 akkor  $n\tau_E > 1,5 \cdot 10^{20} \text{m}^{-3} \text{sec}$   
 $T=25 \text{keV-nél}$   
 ( $1 \text{eV} \approx 11600 \text{K}$ )

# Miért jó ismerni a sugárzást?

$P_{\text{sugárzási}}$

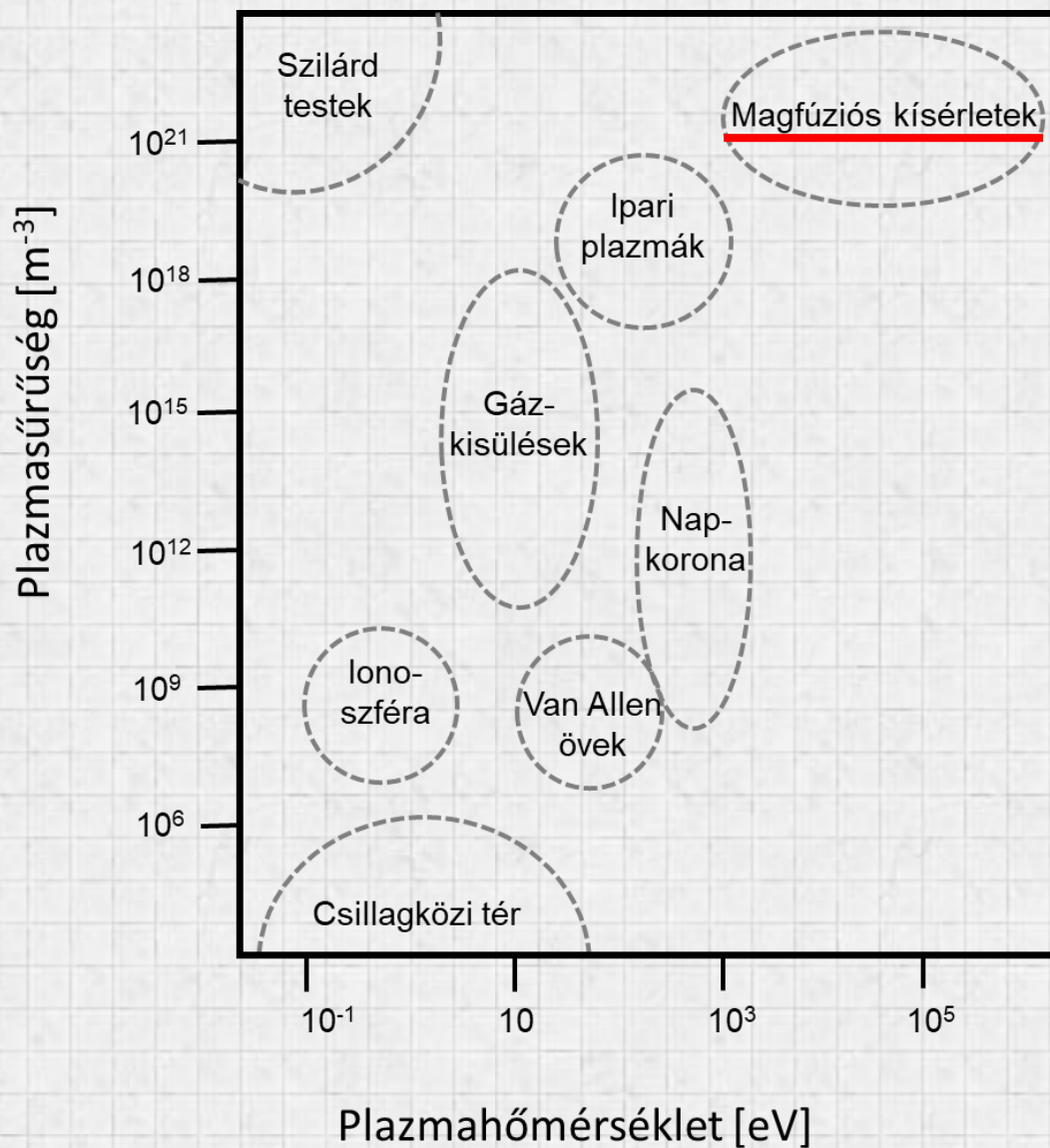


- Veszteségi teljesítmény
- Hőmérséklet
- Részecskesűrűség
- Kémiai összetétel
- Optikai sűrűség
- ...



A Tejút különböző hullámhosszúságú szűrőkön keresztül nézve

# Fúziós? Plazma?



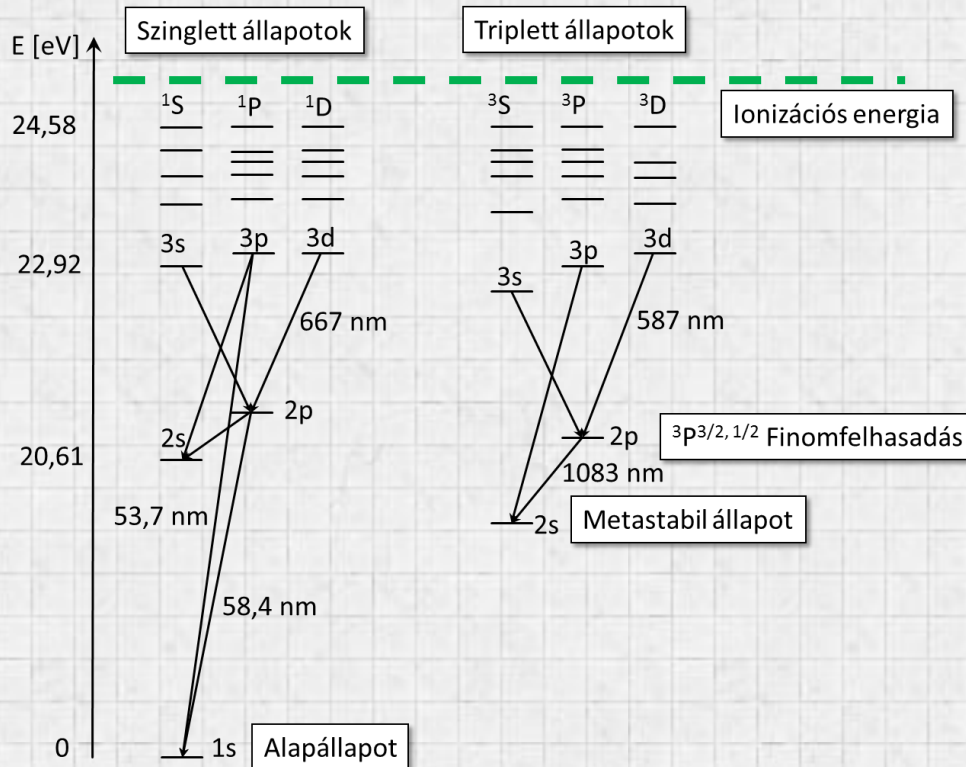
- A plazma optikailag ritka – a reabszorpció kicsi/elhanyagolható
- A fekete test modell nem érvényes – részletes atomfizikai számításokra van szükség



# Sugárzási veszteségek fajtái

Elemi elektronátmenet típusok:

- kötött-kötött (vonalas sugárzás)
- kötött-szabad
- szabad-szabad (fékezési sugárzás)
- szabad-kötött (rekombinációs sugárzás)



Elemi folyamatok:

- ionizáció-rekombináció



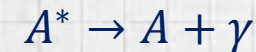
- gerjesztés-legerjesztés



- töltéscsere



- spontán emisszió



- fékezési sugárzás

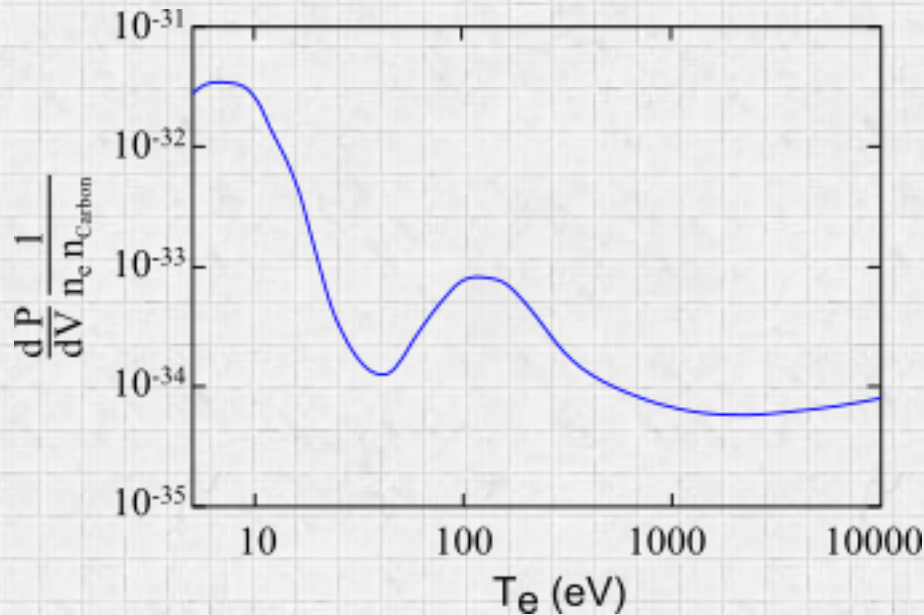


Néhány keV alatt inkább a vonalas sugárzás, afölött a fékezési sugárzás dominál.

$$P_{\text{fékezési}} \sim Z^2 n_e n_i T_e^{1/2}$$

$Z$  - effektív rendszám

$n_i$  - ionsűrűség



A fajlagos veszteségi teljesítmény hőmérséklet függése szén szennyezőre

# Miért kell mérni a sugárzást?

Állandósult állapotban a betáplált teljesítmény  $P_{betáplált} = P_{veszteség}$  egyenlő a veszteségi teljesítménnyel.

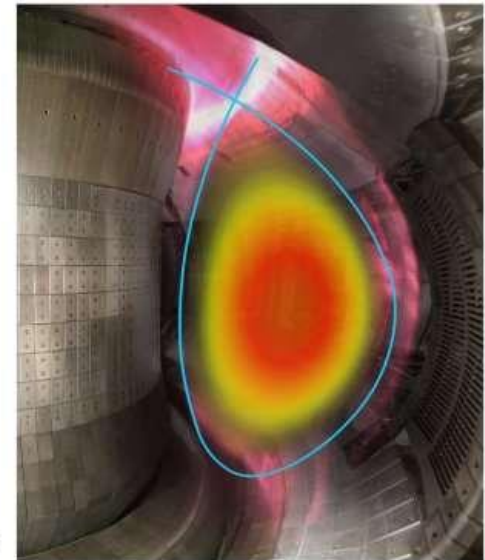
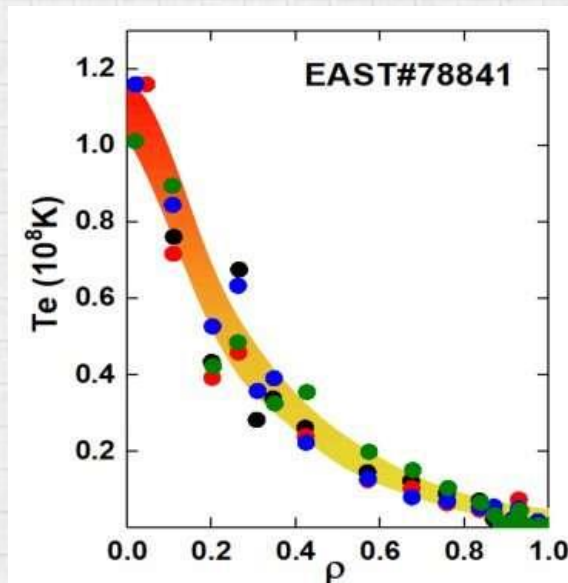


A sugárzási teljesítmény és/vagy a színekép tér- és időbeli változása mindent elárul a plazma „egészségi” állapotáról.

$$P_{sugárzási} + P_{egyéb}$$

- Mennyire homogén a plazma?
- Milyen a hőmérséklet-eloszlás?
- Milyen a sűrűség-eloszlás?
- ...

Szinte minden anomália instabilitáshoz vezet



# Mérési módszerek

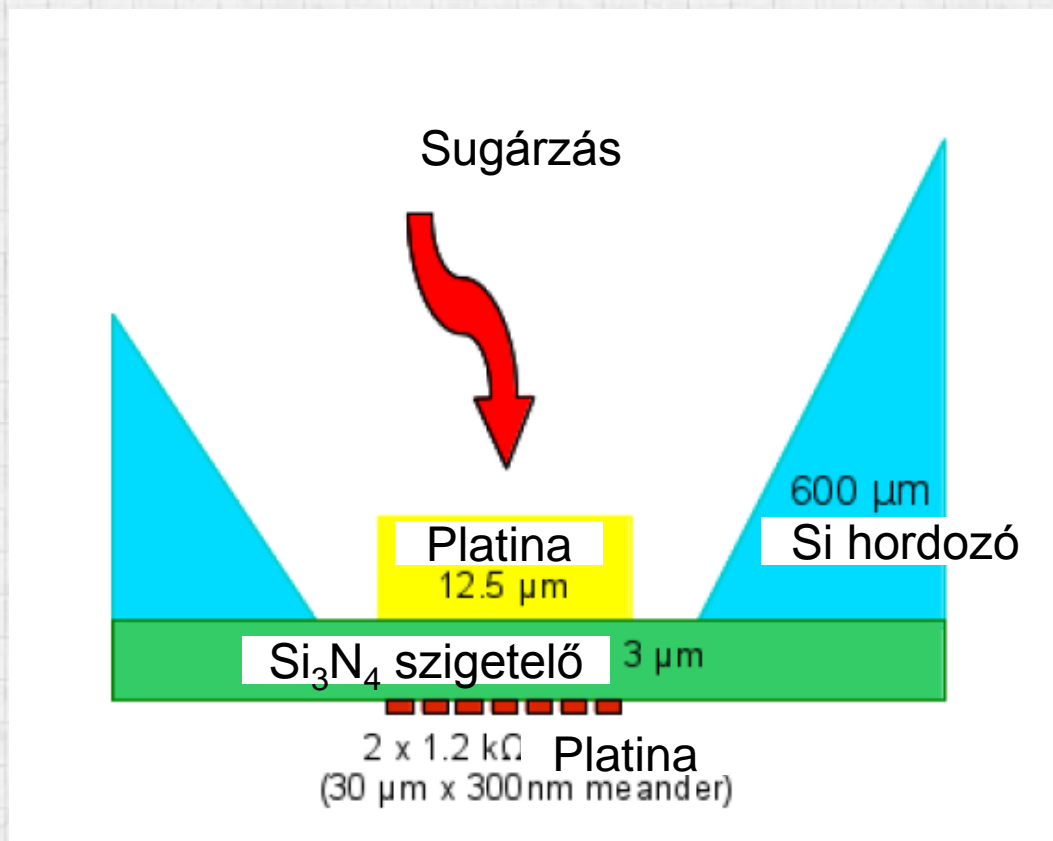
- Mérhetünk spektrálisan felbontott teljesítményt, vagy
  - Egy adott spektrális tartományon integrálva
- 
- Fúziós plazmák esetében  $\Lambda_{max}$  a lágy röntgen tartományba esik
- 
- 1) Hő → Áram átalakítás közvetett módon: fólia- és dióda bolométerek;
  - 2) Hő → Áram átalakítás közvetlenül: piroelektromos detektorok
  - 3) Hő → Elmozdulás (alakváltozás)
  - 4) *Közvetlen foton-számlálás (pl. fotoelektron sokszorozó, fotodióda)*
  - 5) *Kalorimetria*



# Mérési módszerek

- Mérhetünk spektrálisan felbontott teljesítményt, vagy
  - Egy adott spektrális tartományon integrálva
- 
- Fúziós plazmák esetében  $\Lambda_{max}$  a lágy röntgen tartományba esik
- 
- 1) Hő → Áram átalakítás közvetett módon: **fólia-** és dióda **bolométerek**
  - 2) Hő → Áram átalakítás közvetlenül: piroelektromos detektorok
  - 3) Hő → Elmozdulás (alakváltozás)
  - 4) *Közvetlen foton-számlálás (pl. fotoelektron sokszorozó, fotodióda)*
  - 5) *Kalorimetria*

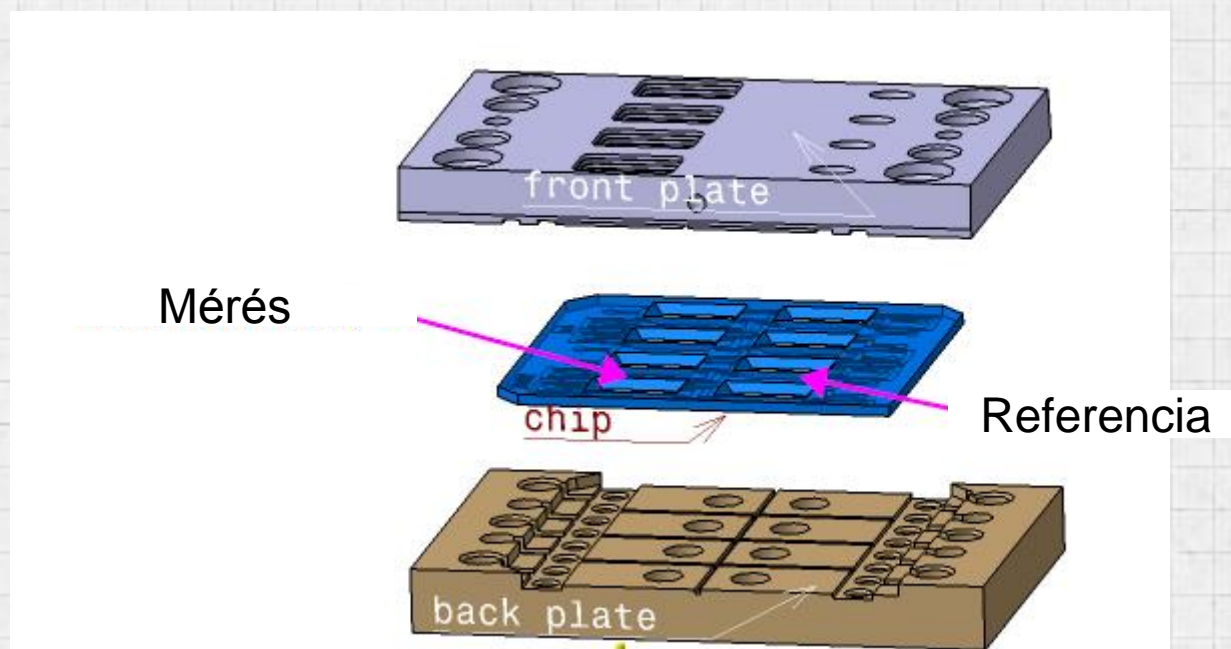
# Fólia bolométerek



A plazma sugárzása hőmérséklet változást eredményez az abszorbensben és a szenzorban, aminek következtében ez utóbbinak megváltozik az elektromos ellenállása.

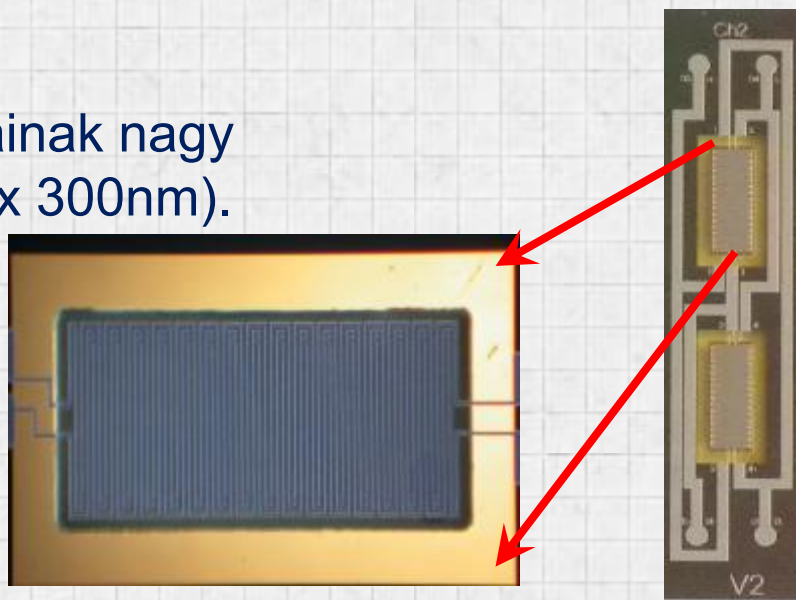
# Fólia bolométerek

Egy mérési csatorna két szenzorból áll: az egyik a referencia (vak) érték mérésére szolgál.

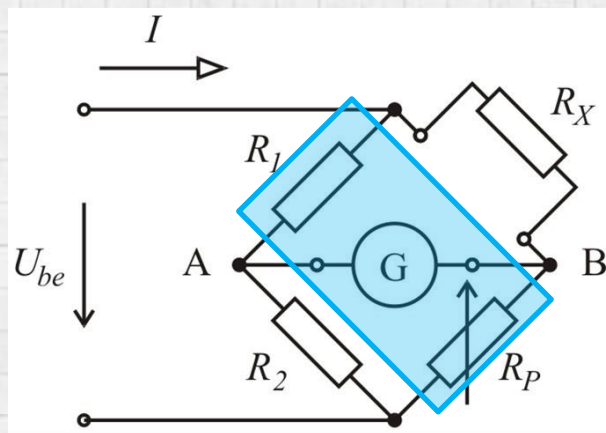


# Fólia bolométerek

A szenzorok (meanderek) ellenállásainak nagy pontossággal egyezniük kell ( $30\ \mu\text{m} \times 300\text{nm}$ ).

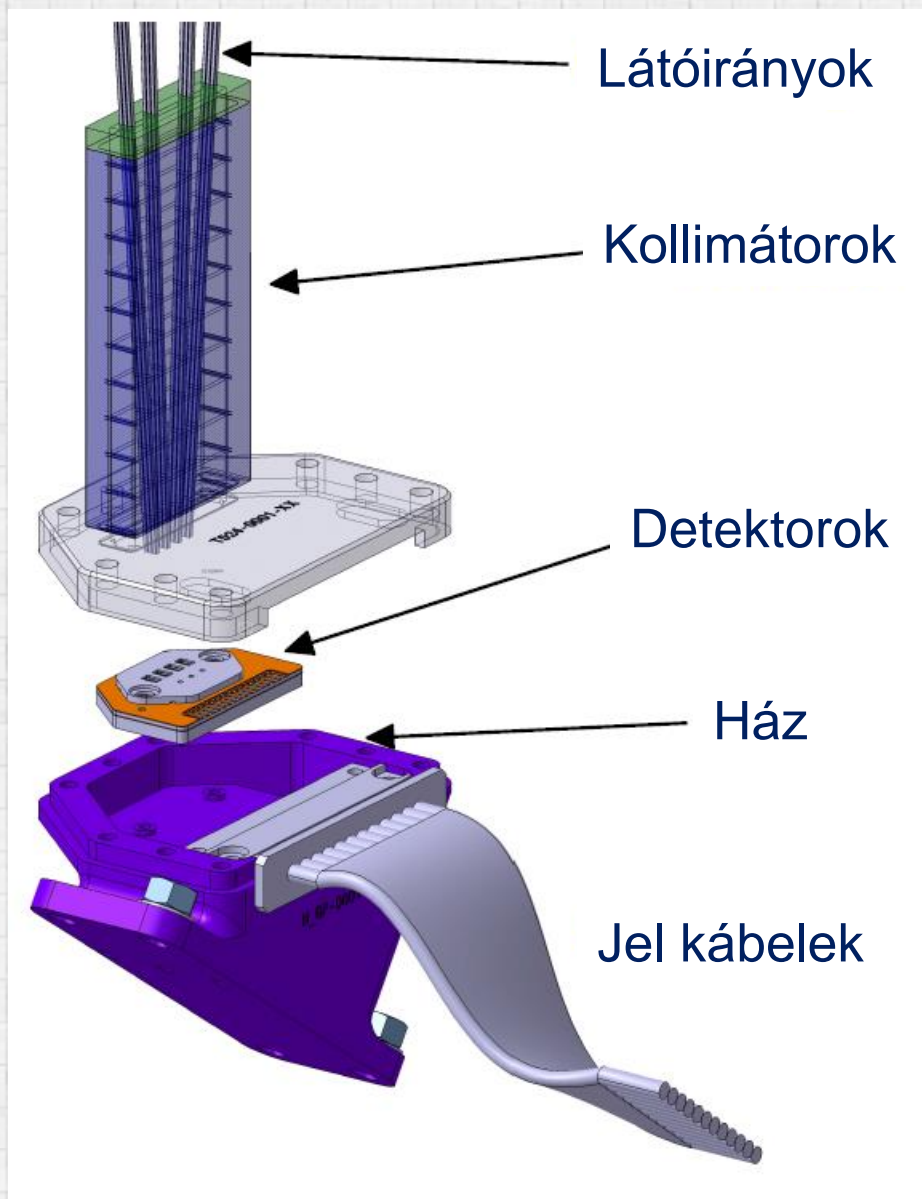


Az ellenállás mérése Wheatstone-híddal történik.





# Fólia bolométerek

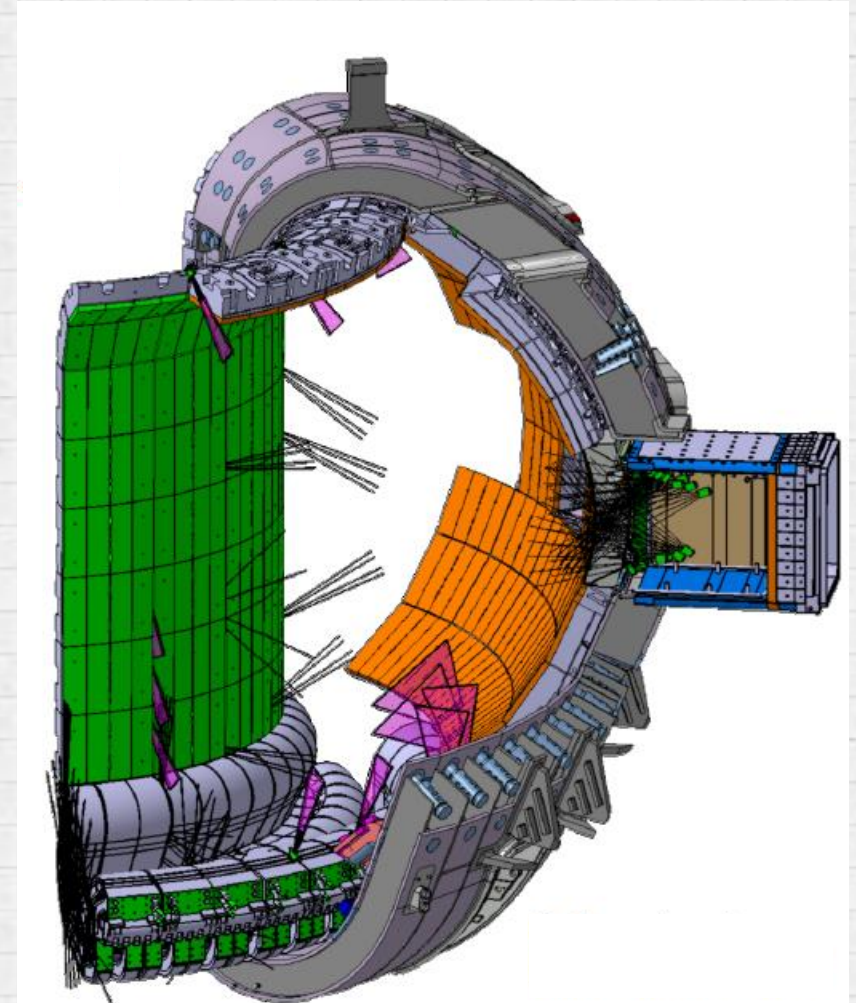
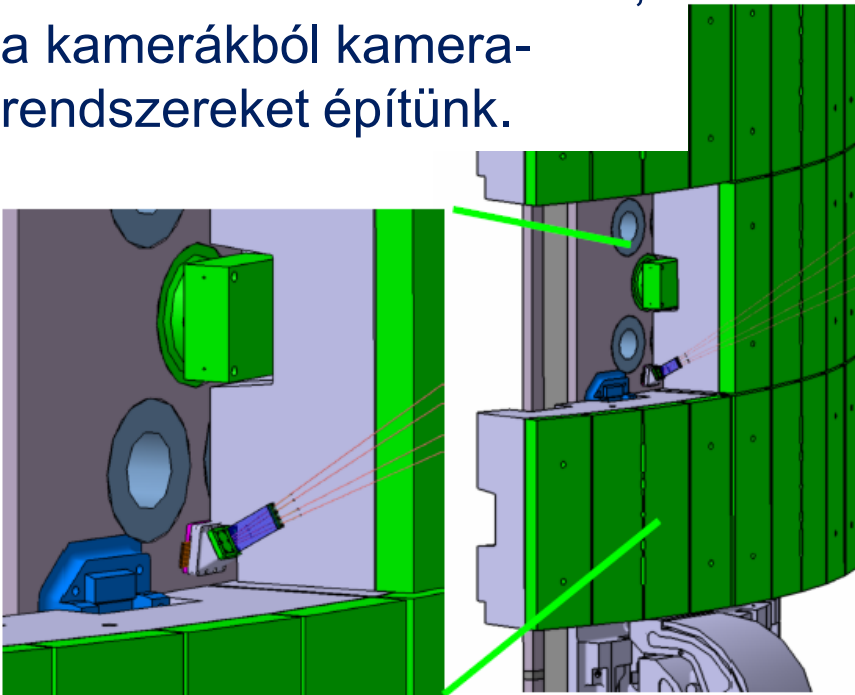


## Kihívások:

- Jel-zaj viszony
- Csatornák közötti áthallás
- Mechanikai pontosság, stabilitás
- Sugárzás terhelés

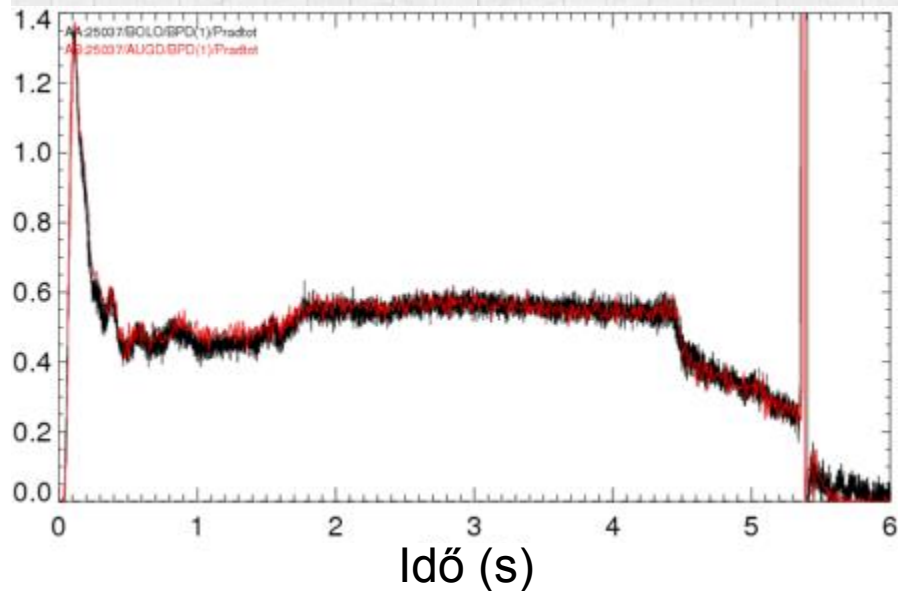
# Fólia bolométerek

A detektorokból kamerákat,  
a kamerákból kamera-  
rendszereket építünk.



# A mérés

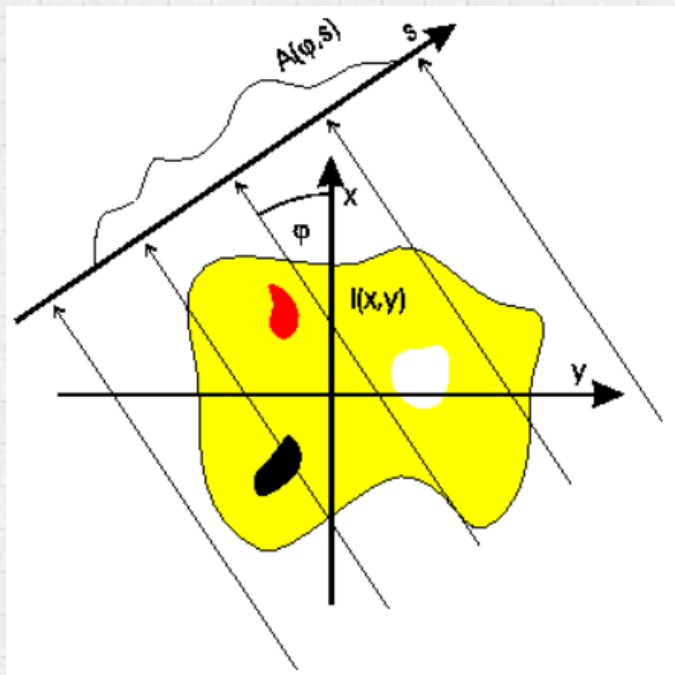
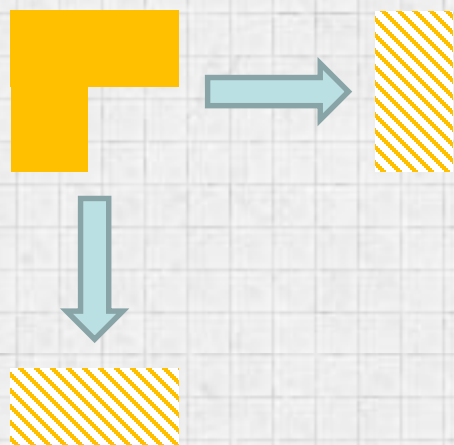
Sugárzási teljesítmény (MW)



100-500 mérési görbe az idő függvényében.

Mit lehet ezzel kezdeni?

# A tomografikus eljárás



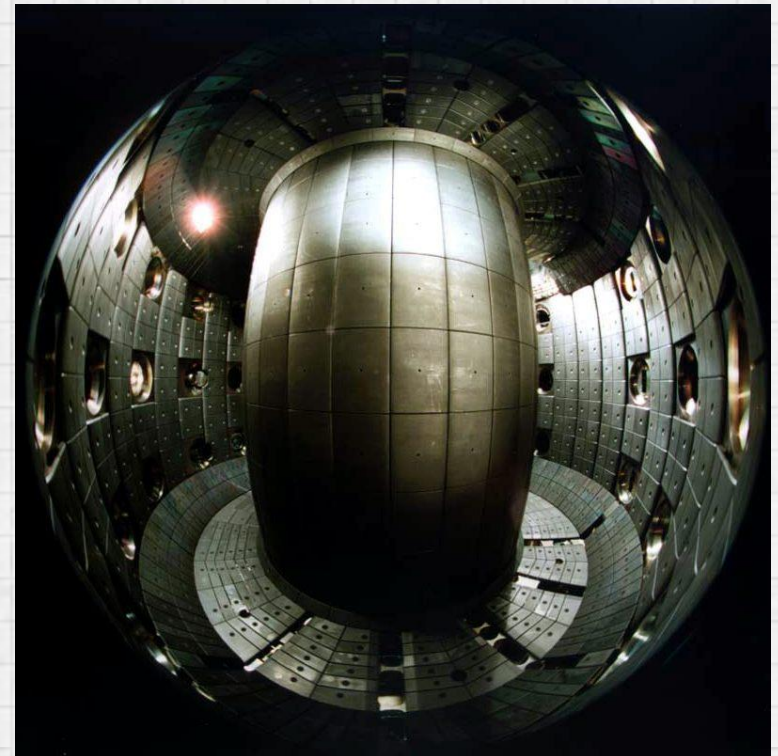
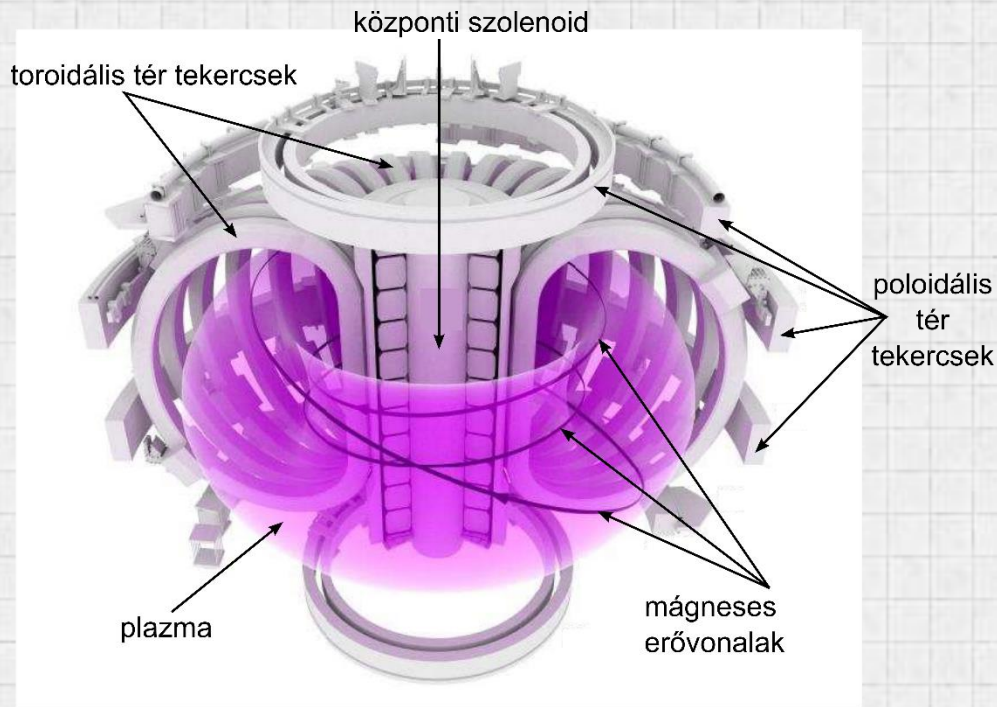
Adott  $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  és  $F_k = \int_{L_k} f \, ds, k \in N$

Ekkor  $F_k$ -k ismeretében mit tudhatunk  $f$ -ről?



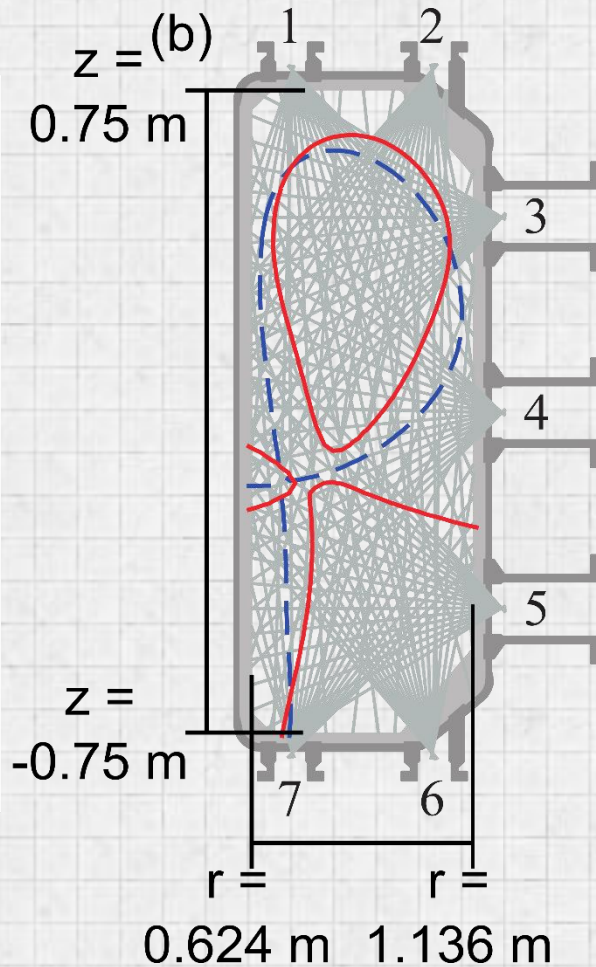
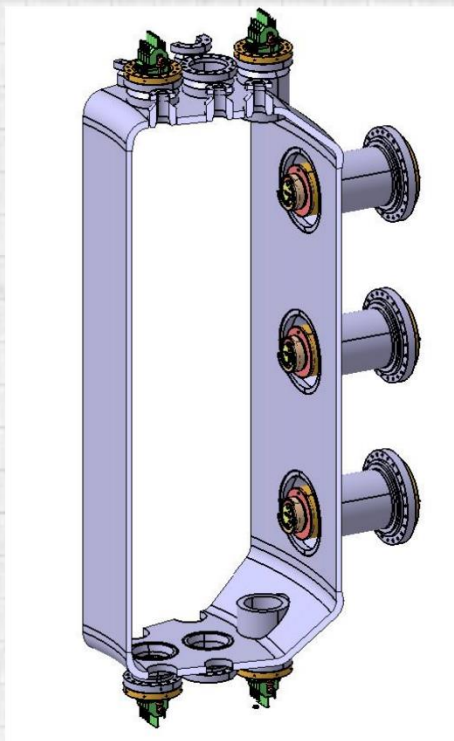
# Egy példa: a TCV tokamak

A Tokamak á Configuration Variable-n (= TCV) a svájci Szövetségi Lausanne-i Műszaki Egyetem (École Polytechnique Fédéral de Lausanne = EPFL) Plazmafizikai Központjában (Swiss Plasma Center = SPC) található tokamak.

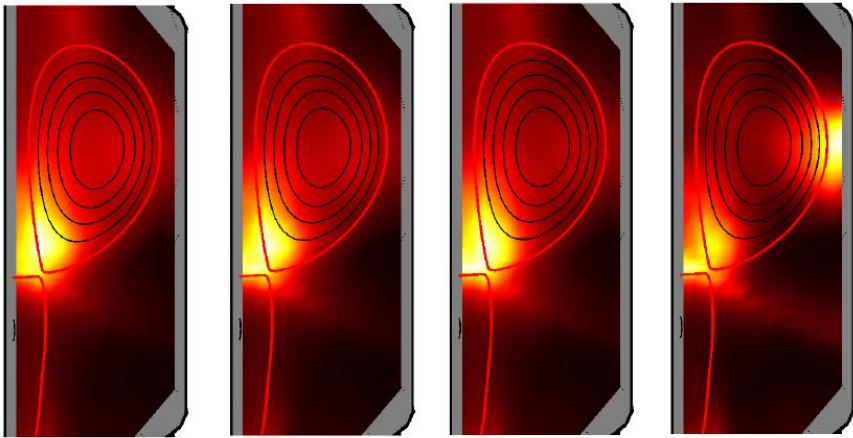


# Egy példa: a TCV tokamak

(a)

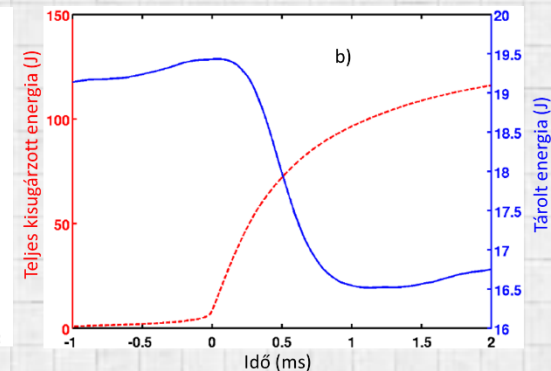
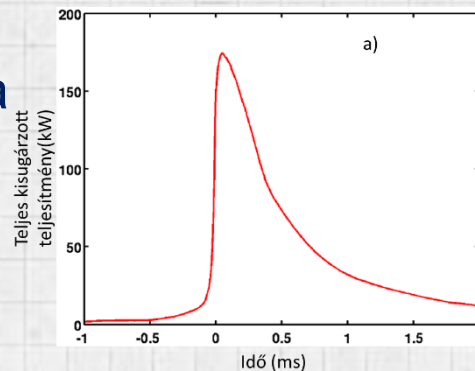


# Egy példa: a TCV tokamak



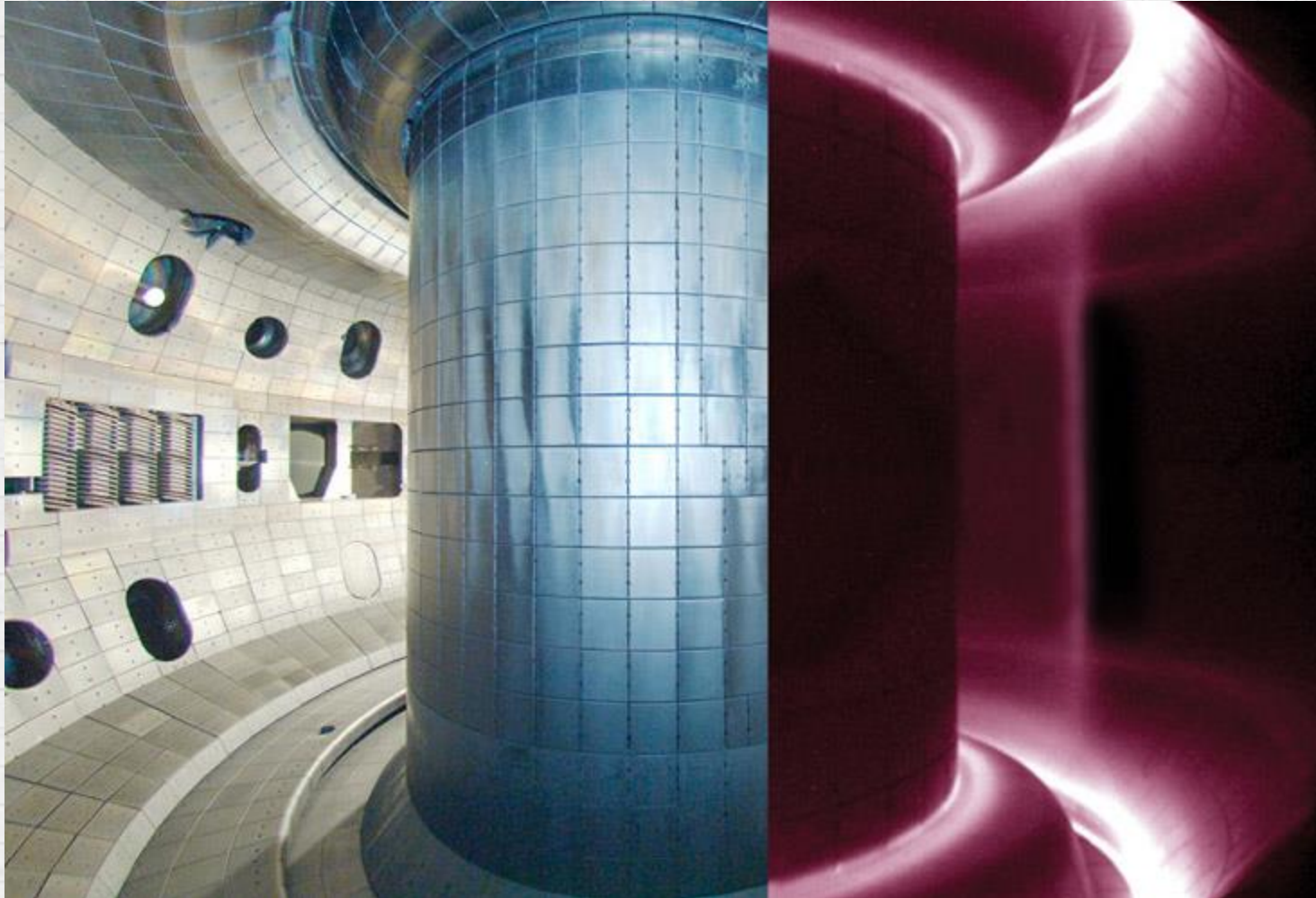
A sugárzási teljesítmény térbeli eloszlásának változása négy időpontban a #33563 kisülés ELM eseménye alatt. (Az ELM-ek periodikus plazmaszéli instabilitások)

- (a) A teljes kisugárzott teljesítmény időbeli változása az ELM alatt
- (b) Az ELM által kisugárzott energia és a plazma tárolt energia változása.



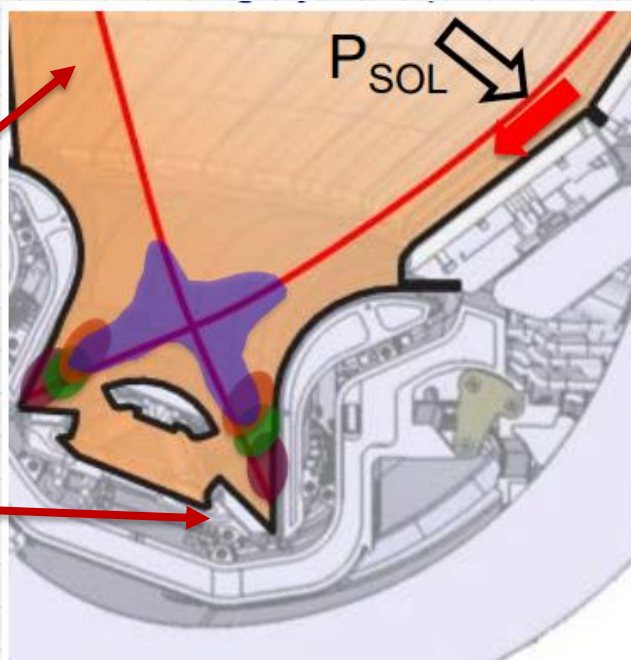
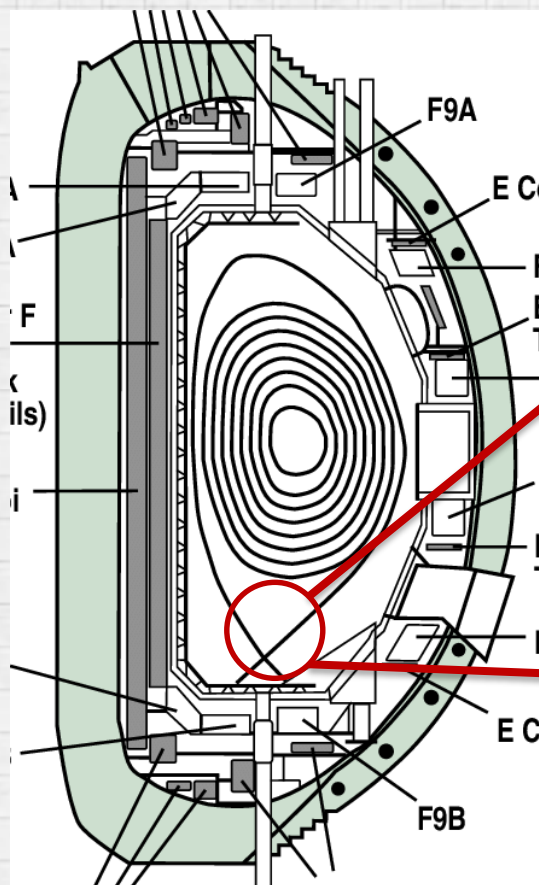


# Egy másik példa: a DIII-D tokamak





# Egy másik példa: a DIII-D tokamak



Hővezetési zóna

Sugárzási zóna

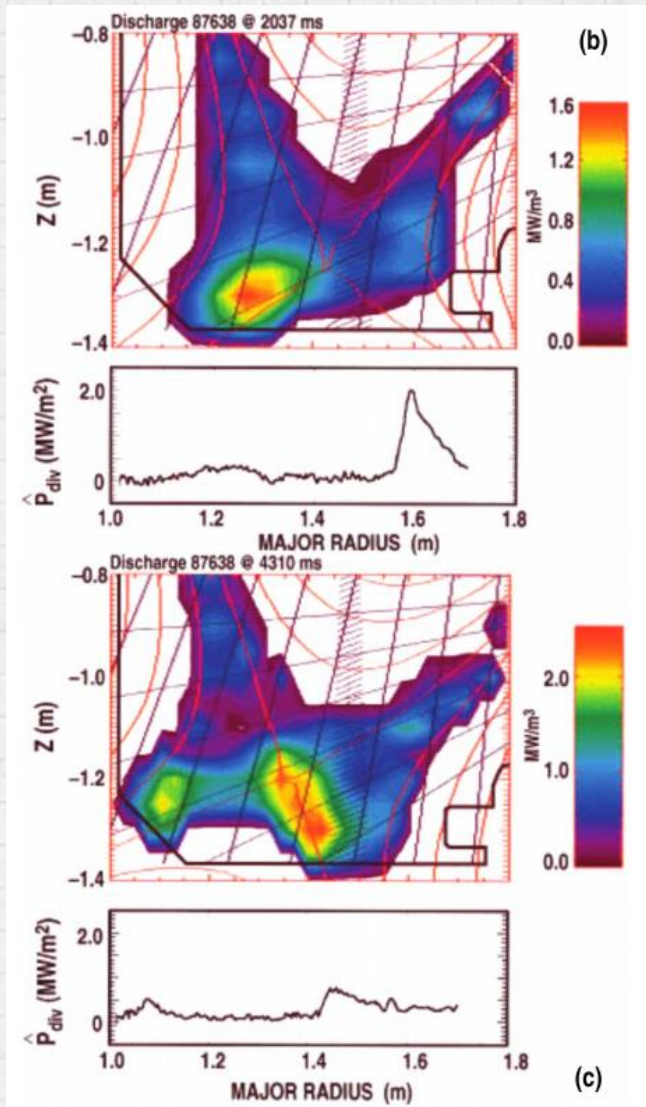
Ionizációs zóna  
( $T_e > 5$  eV)

Semleges zóna

Rekombinációs zóna  
( $T_e < 1$  eV)

A divertor lábak „lecsatolása” nélkülözhetetlen a divertort érő hőfluxus korlátozásához.

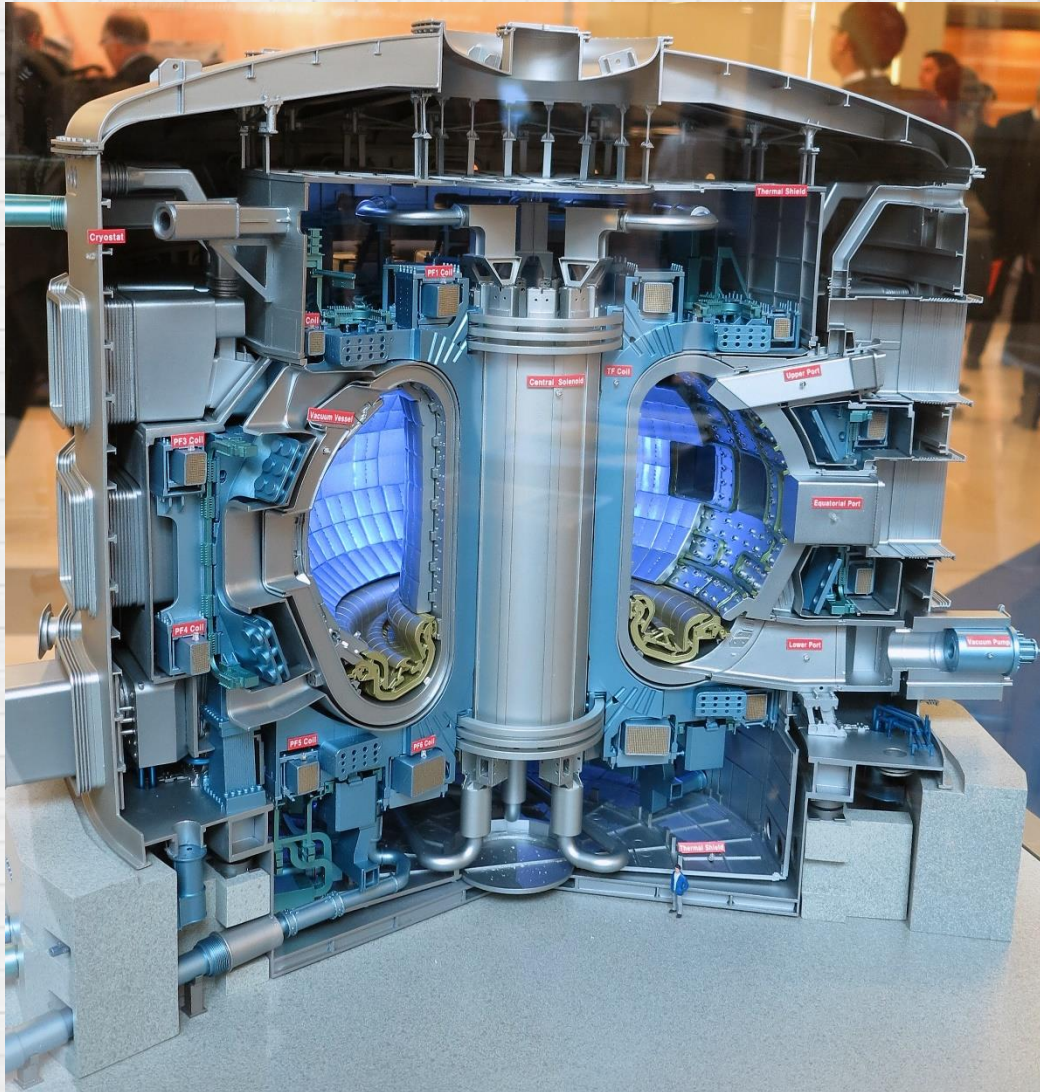
# Egy másik példa: a DIII-D tokamak



- 1) Semleges gáz célzott belövését követően
- 2) A rekombinációs zóna az X-pont felé mozdul
- 3) Intenzíven sugárzó tartomány („párna”) alakul ki
- 4) Leesik a divertor lemezeket érő hőfluxus

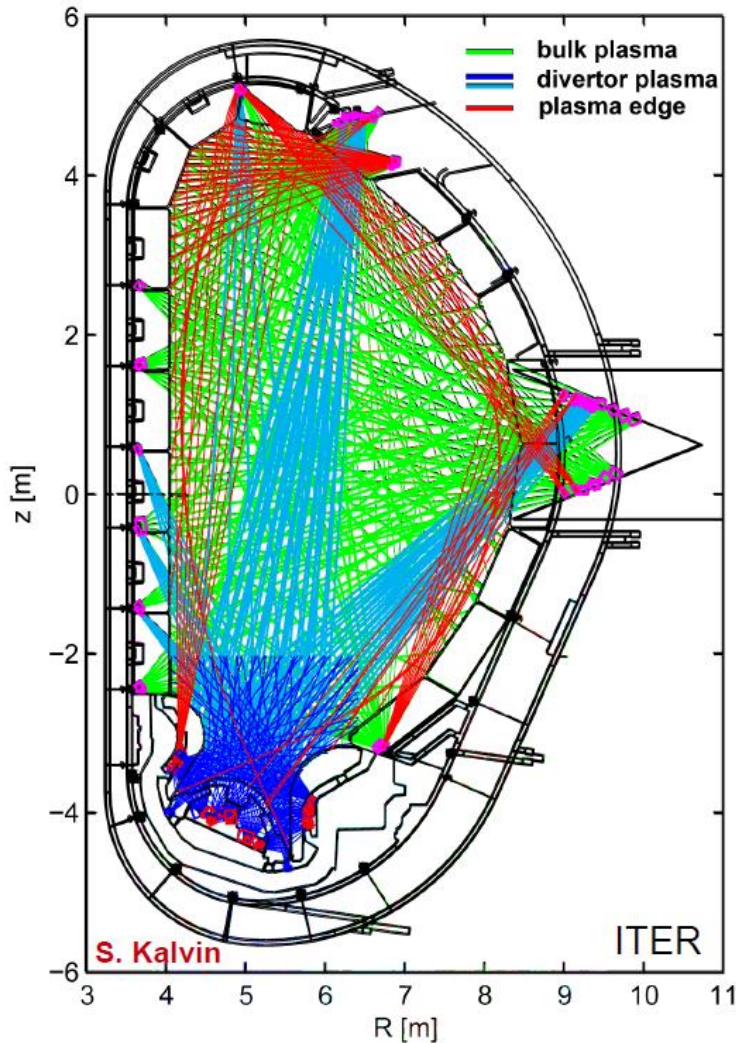


# Another example: ITER



<b>Planned fusion power</b>	<b>500 MW</b>
<b>Plasma major radius</b>	6.2 m
<b>Plasma minor radius</b>	2.0 m
<b>Plasma current</b>	15 MA
<b>Plasma volume</b>	837 m <sup>3</sup>
<b>Average plasma density</b>	10 <sup>20</sup> particles·m <sup>-3</sup>
<b>Peak plasma temperature</b>	20 keV
<b>Toroidal magnetic field</b>	5.2 T
<b>Total cost</b>	Over €20Bn

# Another example: ITER

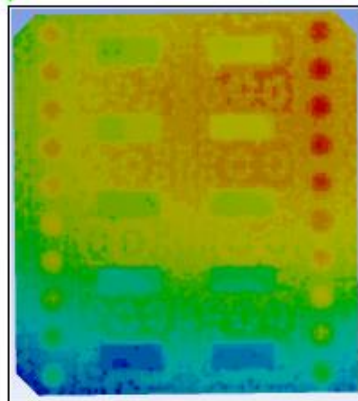
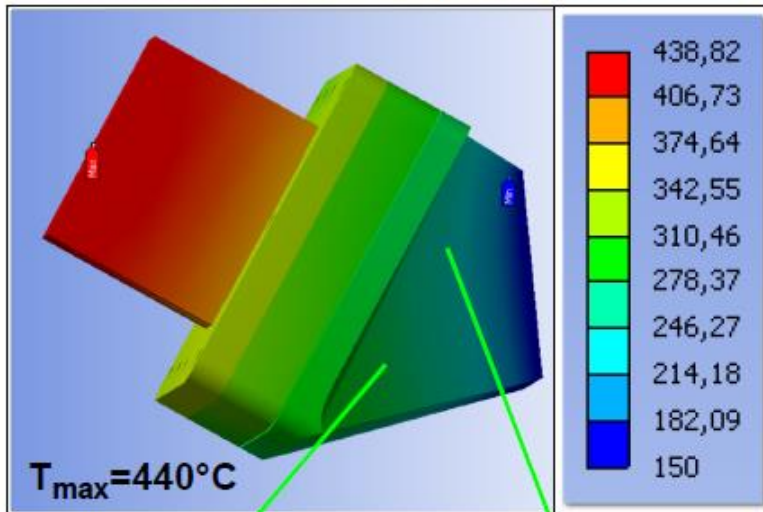


- 1) Nearly 500 lines-of-sight (LOS)
- 2) Required high temporal and spatial resolution
- 3) Real time tomography for the calculation of the total plasma radiative power



# Another example: ITER

Thermal load for bolometer in divertor



$T\sim 350^{\circ}\text{C}; \Delta T=7^{\circ}\text{C}$

- 1) Large gamma, neutron and mechanical loads
- 2) Lifetime (20y) operability with no service
- 3) Radiation hard electronics

# Summary

- The plasma radiation and the associated radiative power is an important loss channel for fusion plasmas.

# Summary

- The plasma radiation and the associated radiative power is an important loss channel for fusion plasmas.
- Spacio-temporal resolution is a must in most cases

# Summary

- The plasma radiation and the associated radiative power is an important loss channel for fusion plasmas
- Spacio-temporal resolution is a must in most cases
- Radiation level may limit or enhance plasma performance





**Thank you!**