

# Fúziós diagnosztika

Zoletnik Sándor

MTA Wigner FK

*[zoletnik.sandor@wigner.mta.hu](mailto:zoletnik.sandor@wigner.mta.hu)*



# Mi a plazmadiagnosztika?

A plazma különböző paramétereinek mérésére szolgáló eljárásokat plazmadiagnosztikának nevezzük.

## Céljai:

- Vezérlés
- Berendezés védelme
- Fizikai megértés

## Mit kell mérni?

- Plazma hely, alak (real-time már ma is)
- Sűrűség, izotóp összetétel, szennyezők
- Hőmérséklet (e-i külön)
- Áram(eloszlás)
- Instabilitások
- ....

## Ipari technológiák:

Az extrém körülmények miatt standard ipari technológiák általában ritkán használatosak

# A környezet

Az extrém körülmények nem csak a mérendő mennyiségekre terjednek ki, hanem a működési környezetre is:

- vákuum
- magas hőmérséklet
- elektromágneses zajok, földhurkok
- távműködtetés
- sugárzási háttér

→ A laborban jól működő „finom” mérések nagy része alkalmatlan.

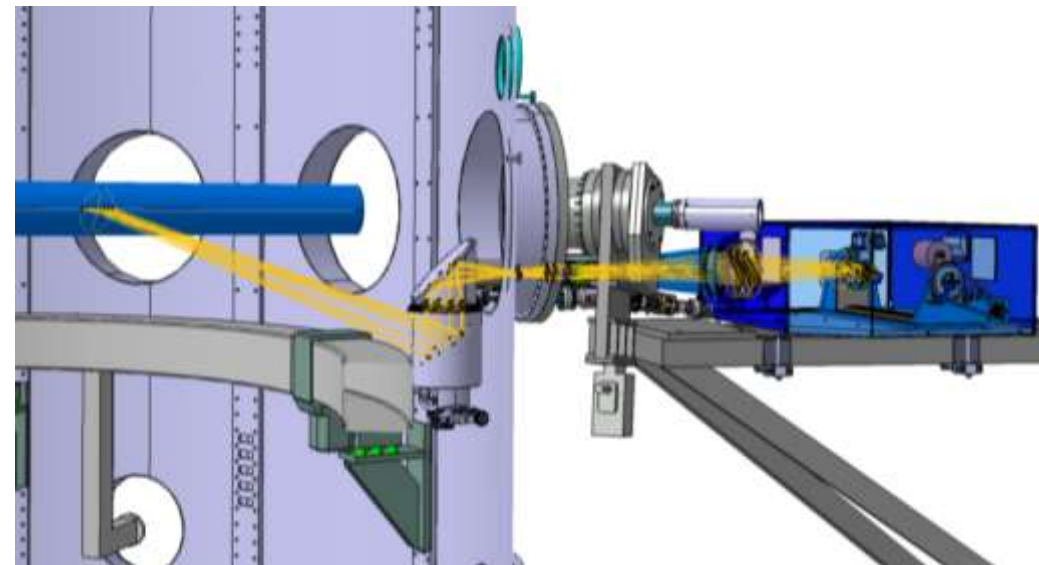
A berendezések egy ipari jellegű környezetben vannak:

- Szigorú mérnöki tervezés, integráció, minőségbiztosítás
- Berendezésenként változó informatikai és mérnöki környezet
- Tesztelés, dokumentáció
- Mérés követhetősége, naplózás, adatbázis

Összefoglalva: szisztematikus munka



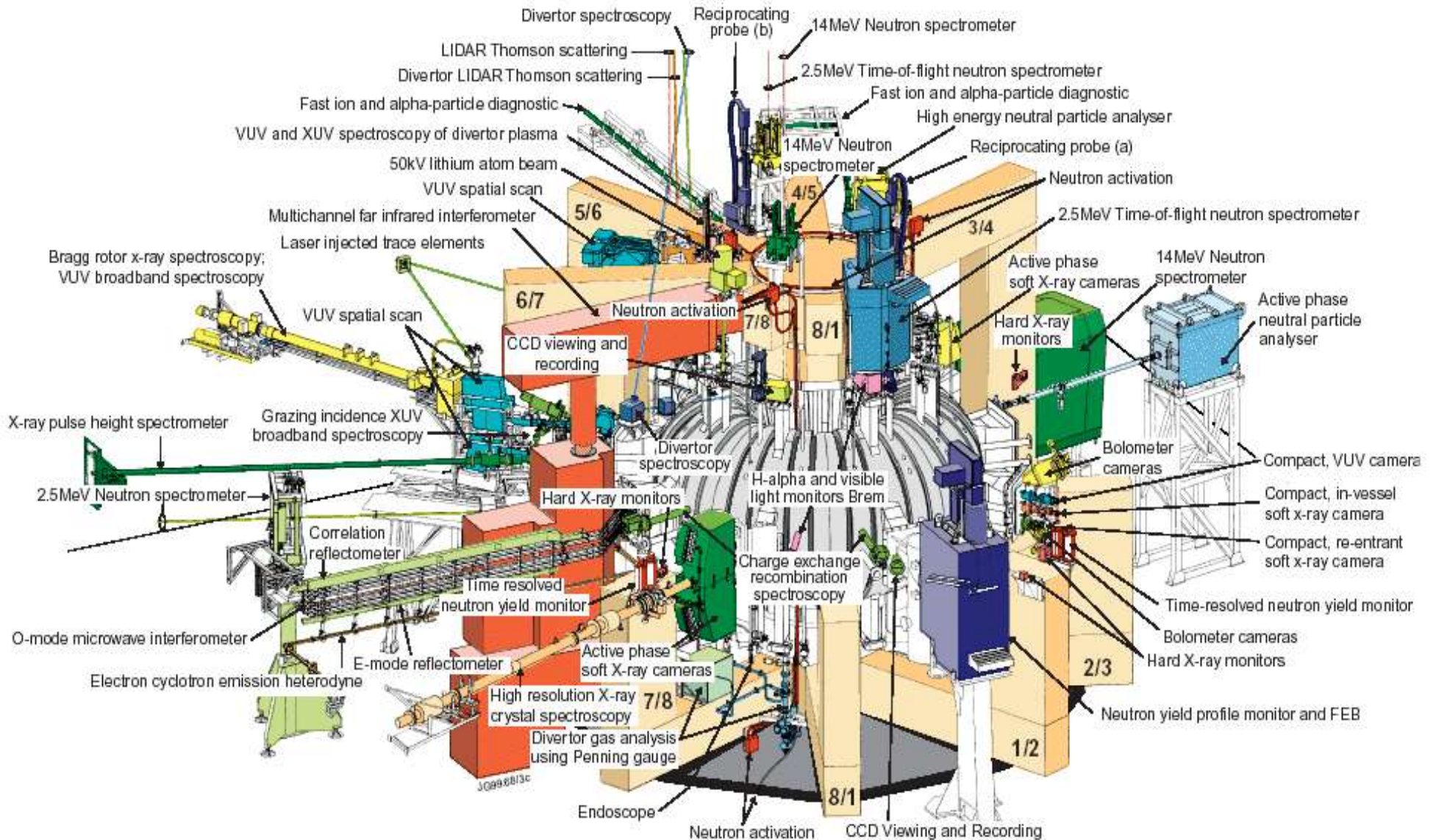
*A terv és a  
megvalósítás  
2 év múlva*



# Diagnosztika rendszer

Egy fúziós kísérleten általában 20–50 diagnosztika van különféle fizikai elvek alapján.

*The diagnostic system of the JET tokamak*



# Mágneses diagnosztikák

A mágneses tér befagy jól vezető plazmába:

→ a plazma mozgása változtatja a mágneses teret

→ Mágneses tér mérésből plazma alakja, mozgása látható a plazmán kívül is

Mágneses tereket általában indukciósan mérnek: tekercsek, hurkok:

- egyszerű, nagyfrekvenciás, robusztus, sugárálló

- viszont csak változást mér

- léteznek Hall szondák is, de ezeket nagyon ritkán használják

$$U = \frac{d\Phi}{dt}$$

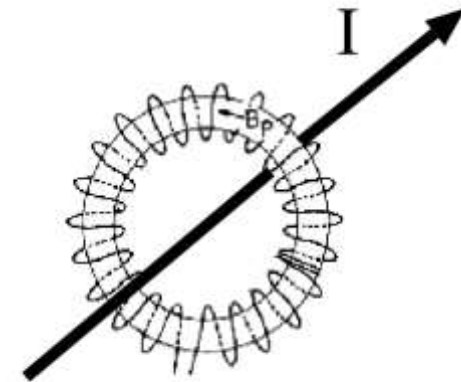
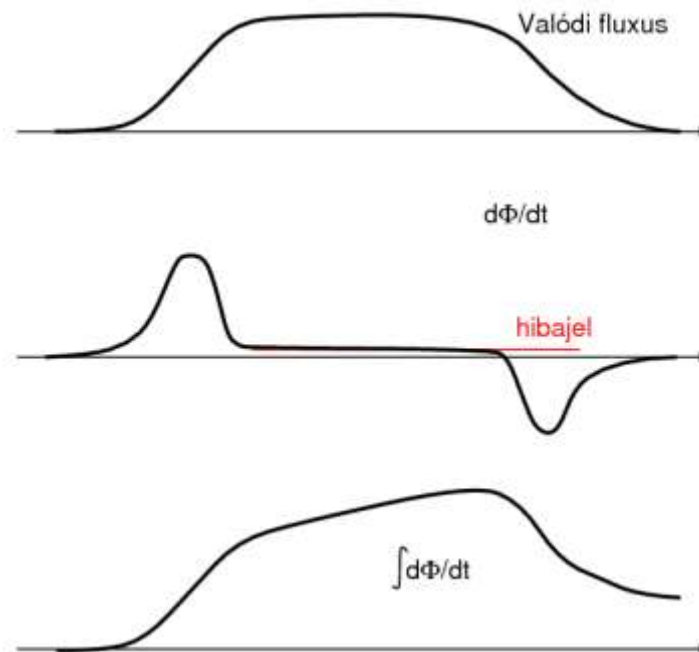
Rogowski tekercs:

Áram mérésre: Plazmaáram, tekercsek árama

Időbeli integrál a teljes áram:

érzékeny elektromos offsetre, és más hibajelekre

Pár másodpercig, max 100 s-ig alkalmazható



$$\oint B dl = \mu_0 I$$

$$U \approx \frac{d}{dt} \oint B dl$$

# Mirnov szonda

A Mirnov szonda egy kis tekercs, amely a márnéses tér egy komponensét méri:  
Általában csoportokban alkalmazzák mágneses perturbációk mérésére

$$\tilde{B}_p(t) = \sin \left[ m \left( \Theta + \frac{v_\Theta t}{r} \right) + n \left( \phi + \frac{v_\phi t}{R} \right) \right]$$

Egy-egy szonda jele egyszerre több különböző jelenséget mutat: Szétválasztás frekvenciában (spektrogram)

Jól elhelyezett szondákon a jelek fázisából  $m$ ,  $n$  és a mozgás meghatározható:

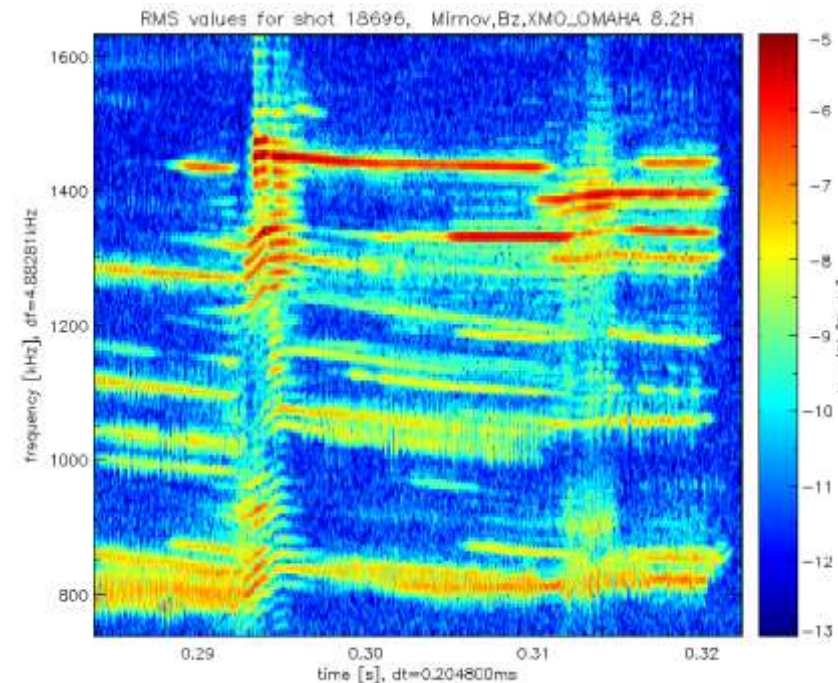
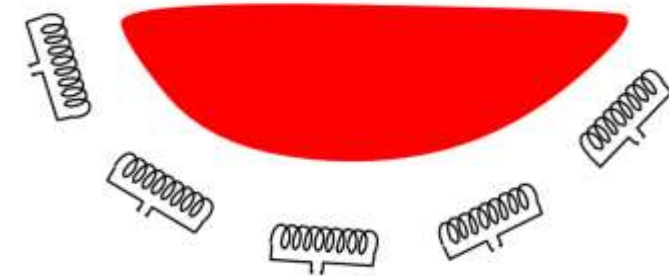
- Nyquist frekvencia:  
     $m$  esetén legalább  $2m$  szonda
- Tipikusan 10–100 szonda elszórva

Alapvető korlát:

kétdimenziós mérésekből nem lehet a  
3D perturbációt mérni

→ perturbáció radiális helyzete általában nem mérhető

Sok Mirnov szonda → Rogowski-szerű tekercs



# Mágneses hurkok

Különböző hurkokkal a mágneses tér különböző integráljai kaphatók meg  
Legfontosabb tokamakon a plazma pozíció és alak mérésére: áramcsatorna pozíciója

## Nyeregtekercs (saddle coil):

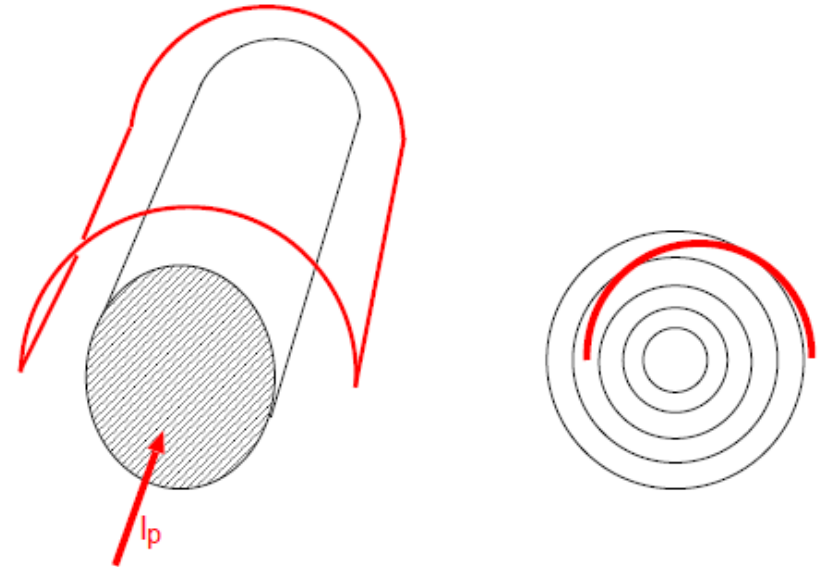
kör keresztmetszetű plazmára a vízszintes (függőleges) elmozdulás arányos a jellel (állandó áram esetén)

→ ez a legalapvetőbb pozíciószabályzás alapja

## Szegmentált nyeregtekercsek:

csíkokra szabdalva, általános alakú plazmánál az alakra kapunk adatot

→ leginkább a plazma széléről, mert radiális információ nincs

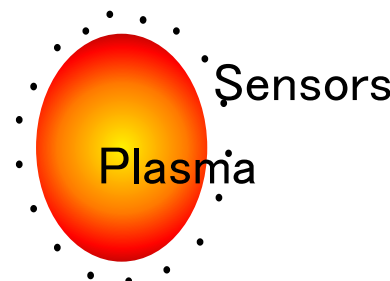


Fontos a hurkok kompenzálása, a zavarjelek kiszűrése.

## Egyensúly visszaállítás:

Feltéve, hogy a plazma nyomáseloszlása ismert a külső mágneses mérésekből kiszámítja a plazma alakot (egyensúly megoldó, EFIT kód)

Alapvető korlát, hogy a mágneses mérések egydimenziósak, a plazma pedig kétdimenziós



# Diamágneses hurok, hurok feszültség

Egyensúlyban:

$$\nabla p = \mathbf{J}_p \times \mathbf{B}_t + \mathbf{J}_t \times \mathbf{B}_p$$

Az első tag a diamágneses járulék, a második a Pinch effektus.

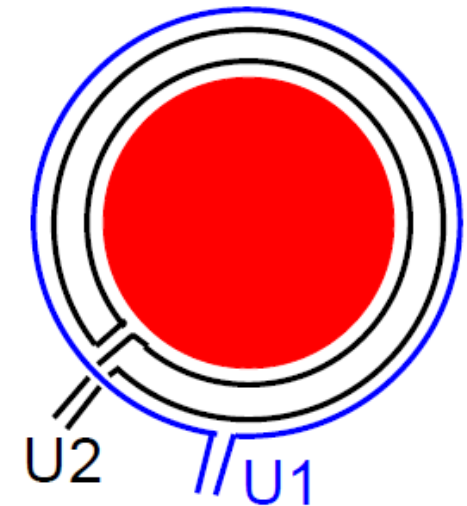
$J_p$  a toroidális fluxus csökkenését okozza: diamágneses effektus

A diamágneses fluxusváltozás mérhető egy hurokkal:

$$U_{\text{dia}} = U_1 - c * U_2$$

(c vákuum mérésből meghatározható)

Az effektus kicsi ( $\sim 10^{-4}$ ) és a zavarok nagyok, ezért a jelet kompenzálni kell

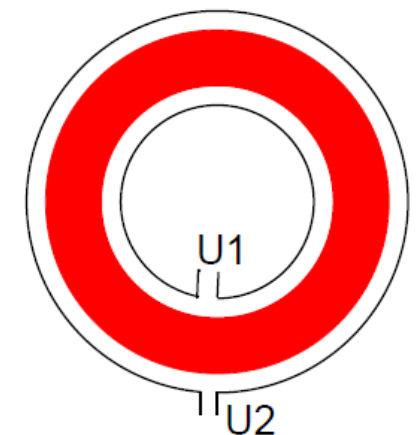


A diamágneses jel és a toroidális áram ismeretében (Rogowski tekercs) a plazma teljes energiatartalma kiszámítható.

Hurok feszültség:

A tórusz mentén elhelyezett hurok a plazmaáramot hajtó elektromos tér körintegrálja  $\rightarrow$  hurok feszültség (nem kell időben integrálni!)

Poloidális tekercsek áramváltozása jelet hagy benne:  $\rightarrow$  kompenzálni kell





## Egyszerű paraméterbecslések

Állandó áram és poloidális terek esetén az Ohmikus fűtési teljesítmény:

$$P_{OH} = I_p U_{loop}$$

A diamágneses energiatartalomból Ohmikus plazmára:

$$\tau_E = \frac{W_{dia}}{P_{OH}}$$

A vezetőképesség:  $\sigma \propto Z_{eff}^{-1} T_e^{3/2}$   $\langle \sigma \rangle = \frac{U_{loop}}{I_p}$

Ha  $Z_{eff}$ -re felteszünk valamit egy első közelítés kapható az elektronthőmérsékletre ( $T_e$ )  
(*csak nagyságrendileg jó*)

# (Elektron)sűrűség

A plazma kvázineutrális, elég az elektronsűrűséget mérni:

Ha  $\omega > \omega_p$ , akkor elektromágneses hullámok terjednek a plazmában:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2, \quad v_f = \omega/k = \frac{c}{\sqrt{1 - \omega_p^2/\omega^2}} > c.$$

Ha  $\omega > \omega_p$ , akkor a fázissebesség

kb. lineárisan függ a sűrűségtől.

Fázissebesség

→ törésmutató

→ interferometrikus mérés → line density:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}}$$

A referencia nyalábhoz képesti fázis mérhető:

Alacsony frekvencia (100 GHz, mikrohullám)

→ nagy effektus,  $2\pi$ -re bizonytalan fázis

Optikai frekvencia (CO<sub>2</sub> lézer, 10.6 mikron)

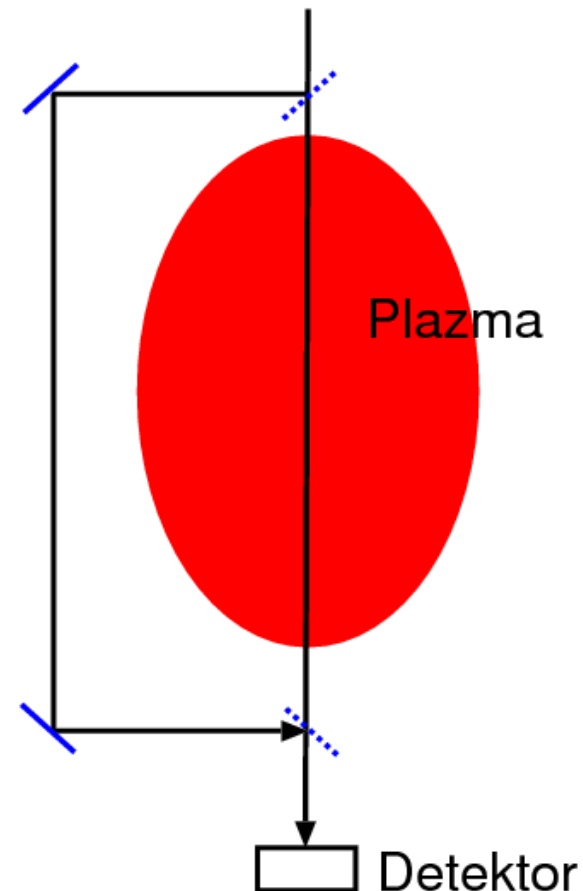
→ kis effektus

Far Infrared Laser (FIR, 100 mikron):

jó kompromisszum, nehéz technika

Probléma a rezgéskompenzáció:

→ two color interferometer



# Praktikus sémák

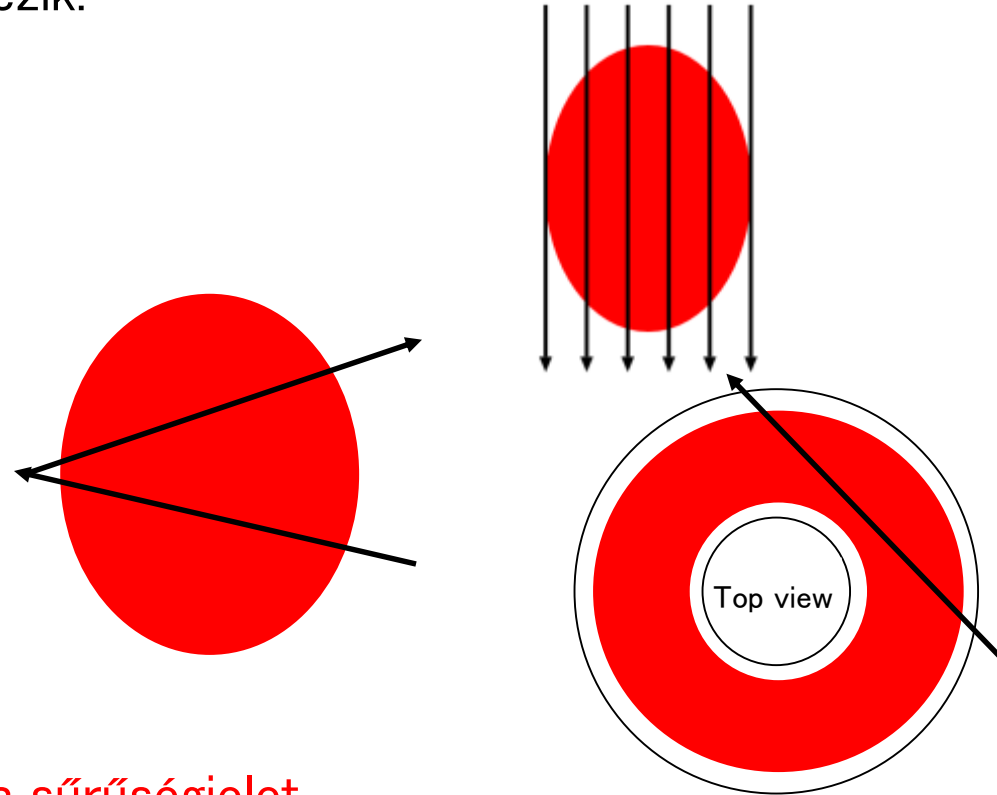
Praktikus megvalósításban mindenféle séma létezik:

Többhúros vertikális:

· alkalmas plazma pozíció vezérlésre is

Horizontális (pld. CO2 lézerrel)

Retroreflektoros



FIR vagy mikrohullámú interferométerek adják a sűrűségjelet, erre szabályozzák a plazma sűrűségét.

# Thomson szórás

Thomson szórás: szabad elektronok szórják az elektromágneses hullámokat:

Intenzitás  $\rightarrow$  sűrűség

Spektrum  $\rightarrow$  Hőmérséklet (Doppler) ( $e^-$ -sebesség:  $10^7$  m/s)

A szórási hatáskeresztmetszet nagyon kicsi:

csak impulzus lézerrel lehetséges:

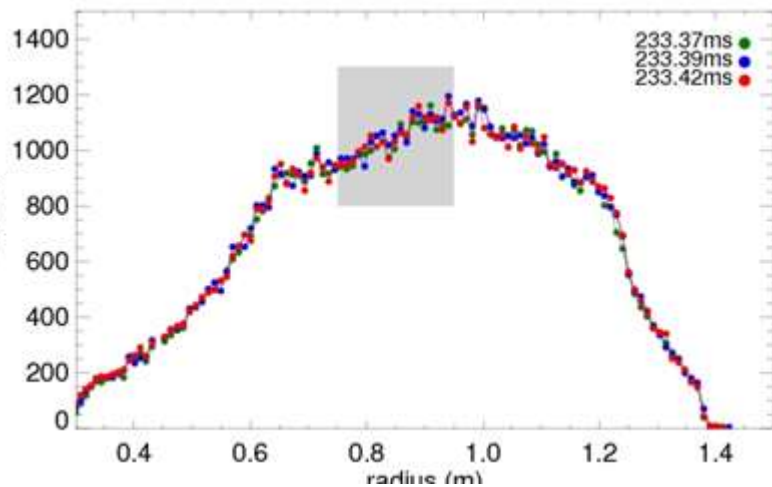
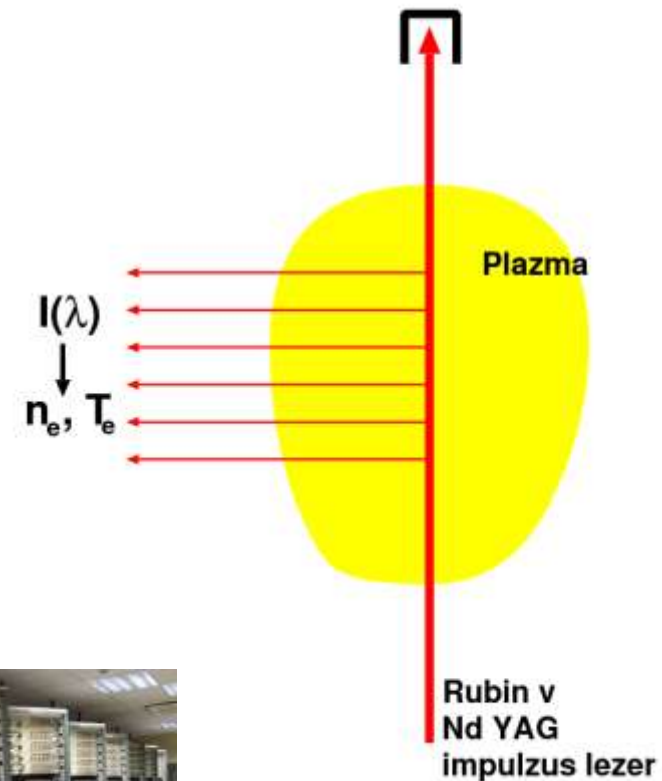
1–10 J, néhány ns, 1 GW!!! – 10–20 Hz

Lokális mérés a lézer és az optika keresztezéséből.

Optikai elemekről szóródó fény kritikus

Detektálás néhány csatornán különböző szűrőkkel

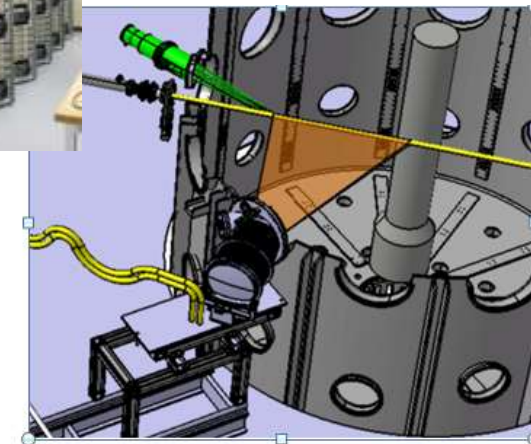
(polikromátor)



Aperture stop  
290mm



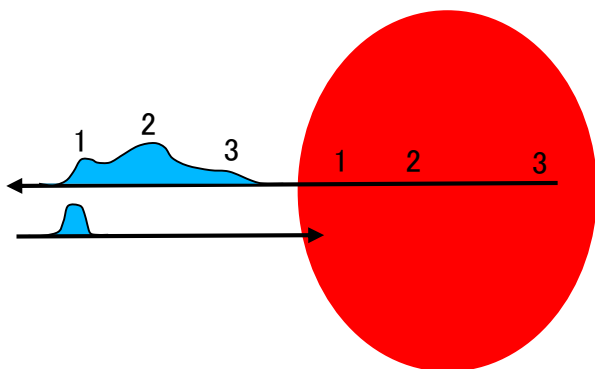
Weight of  
lenses 79kg



# Variáció Thomson szórásra: LIDAR

A tipikus TS lézer impulzus 10 ns hosszú: 3 m fénycsík.

Ha 100 ps-re vennék akkor az impulzus csak 3 cm hosszú: → LIDAR



A lézer mentén visszaszórt fotonokat méri:

Csak egy port kell

Időben méri a spektrumot: idő – hely

→ 100 ps időfelbontás kell

Csak 1 polikromátor kell

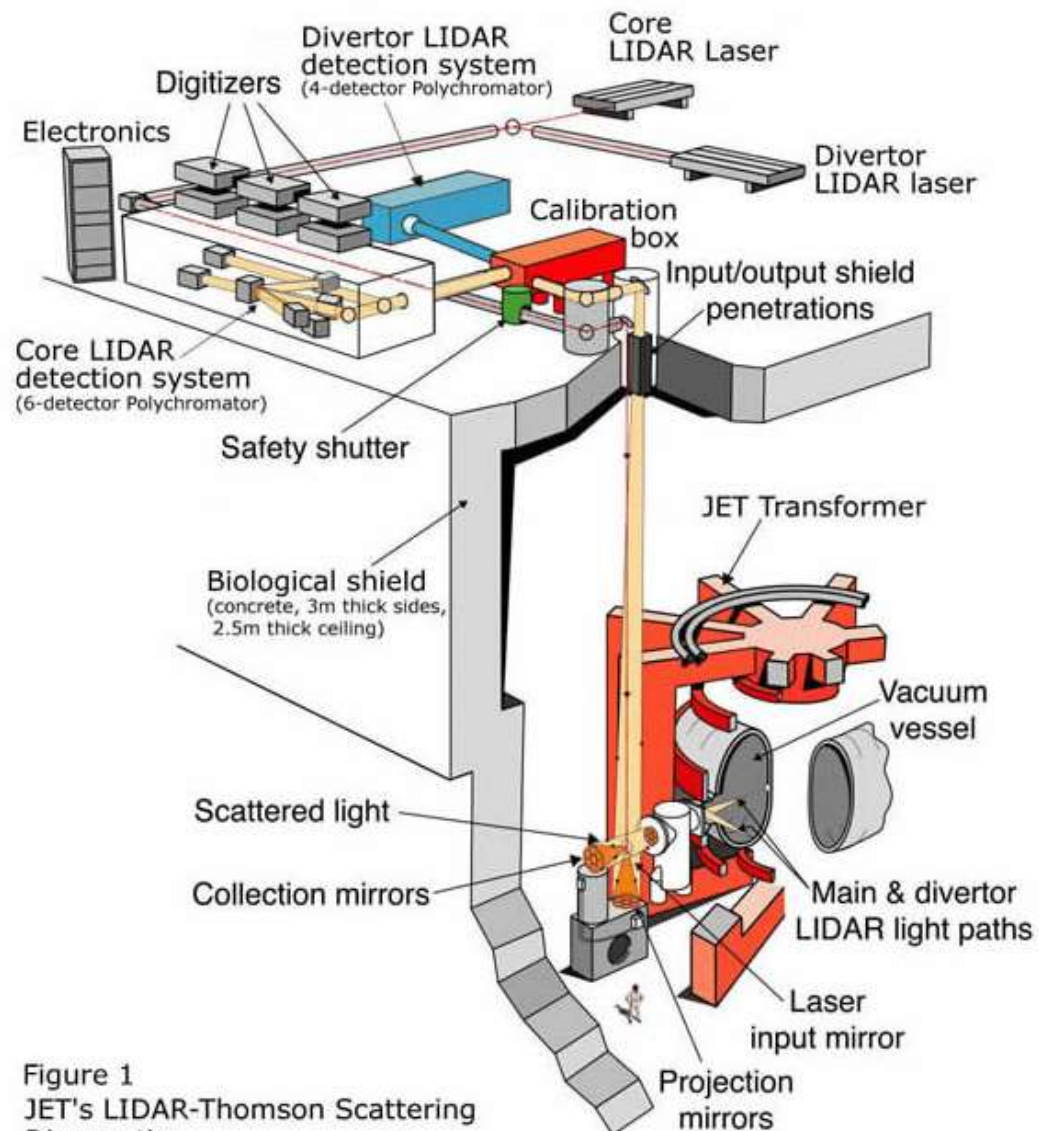


Figure 1  
JET's LIDAR-Thomson Scattering  
Diagnostic

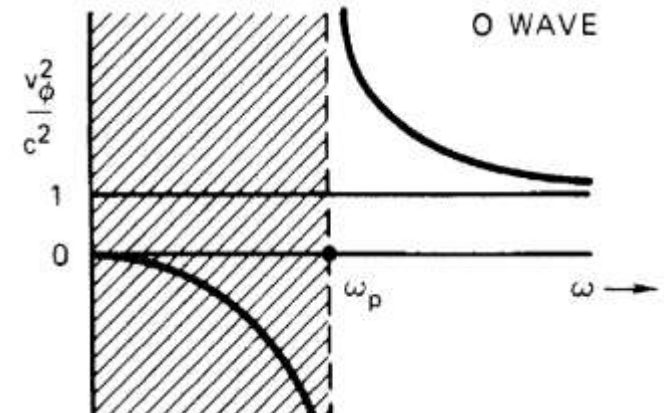
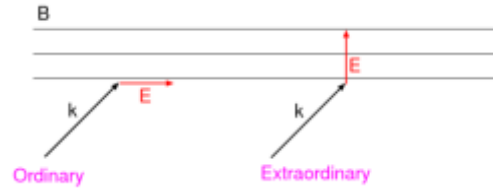
# Reflektometria

Elektromágneses hullám terjedése csak magas frekvencián lehetséges.

O hullámra hullámra  $\omega > \omega_p$ ,

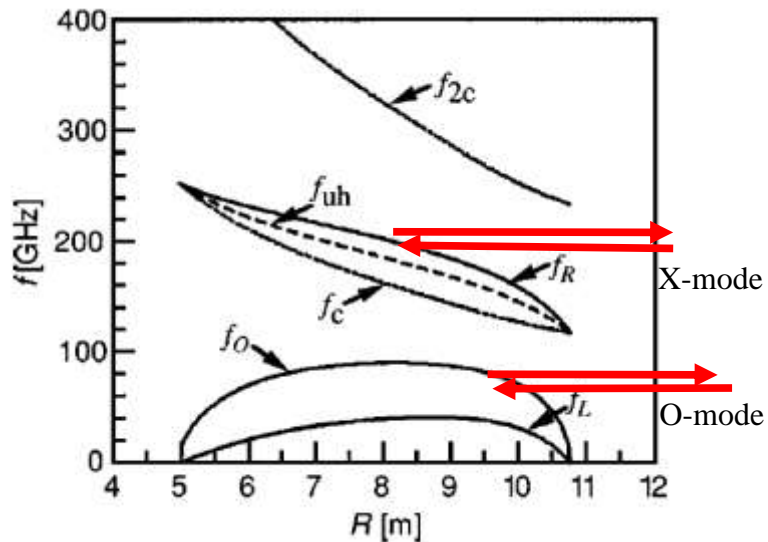
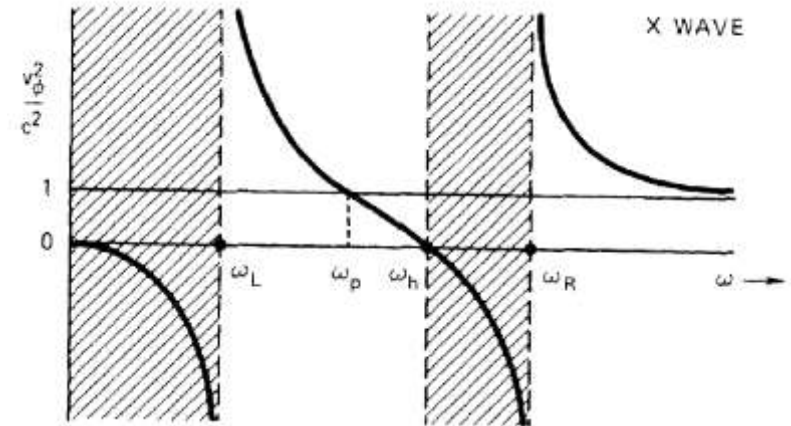
X hullámra a right-hand cutoff a határ

$$\omega_p = \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}$$



Adott frekvenciájú hullám befelé haladva elérheti az  $\omega = \omega_p$  felületet és innen visszaverődik.

A visszaverődés idejét mérve a felület távolsága meghatározható



# Elektron-ciklotron emisszió (ECE)

Az elektronok ciklotron frekvencián sugároznak:

$$\omega_{CE} = \frac{eB}{m_e}$$

Toroidális geometria miatt  $B \sim 1/R$

A frekvencia térbeli koordinátává konvertálható  $I(f) \rightarrow I(R)$

$$I \sim T_e n_e$$

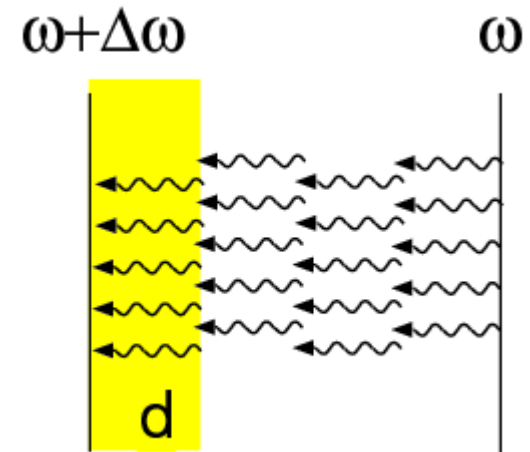
A kibocsátott hullám  $d$  rétegben elnyelődik és újra emittálódik

→ csak egy  $d$  vastagságú réteg sugároz

$$\rightarrow d \sim 1/n_e \rightarrow I \sim T_e$$

**A ciklotron sugárzás spektruma a hőmérséklettel arányos, ha:**

- A  $d$  optikai mélység elég nagy (plazma szélén nem teljesül)
- A ciklotronfrekvencia a plazmafrekvencia fölött van



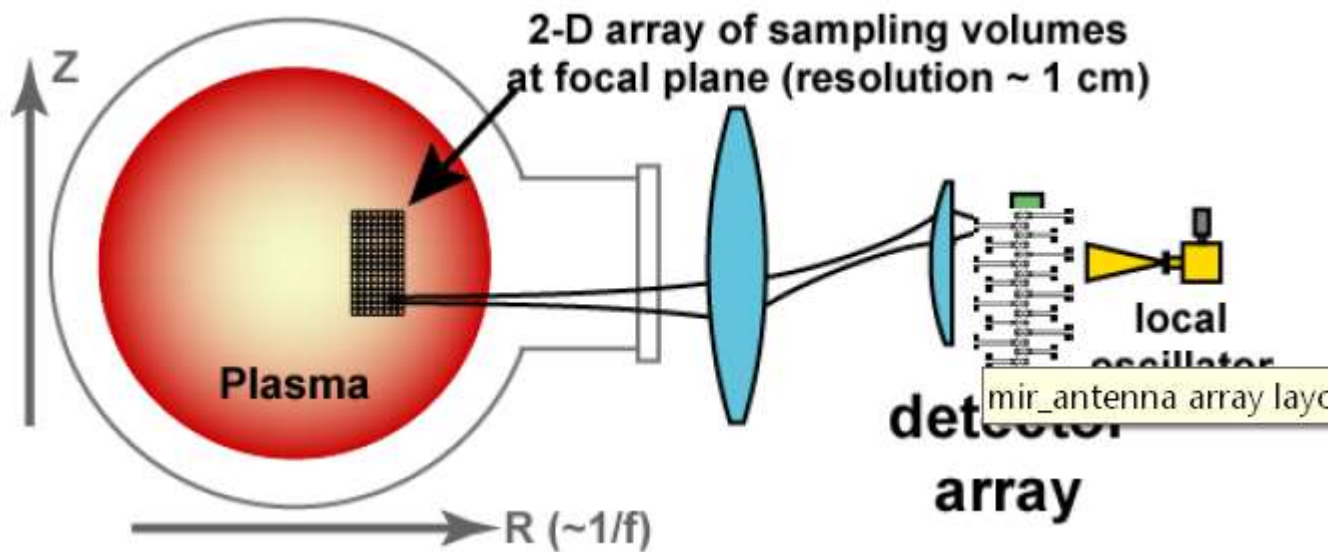
Egy normál tokamak plazma belső tartományában teljesül, de pld. nem teljesül kompakt tokamakban mert kicsit a tér.

A ciklotron frekvencia 50–100 GHz → mm-es mikrohullám → tölcserantennák

Vevők: Michelson interferométer, superheterodyn vevő, több fix vagy változó frekvencia.

# Imaging ECE

Az ECE megvalósítása mikrohullám optikai módszerrel.



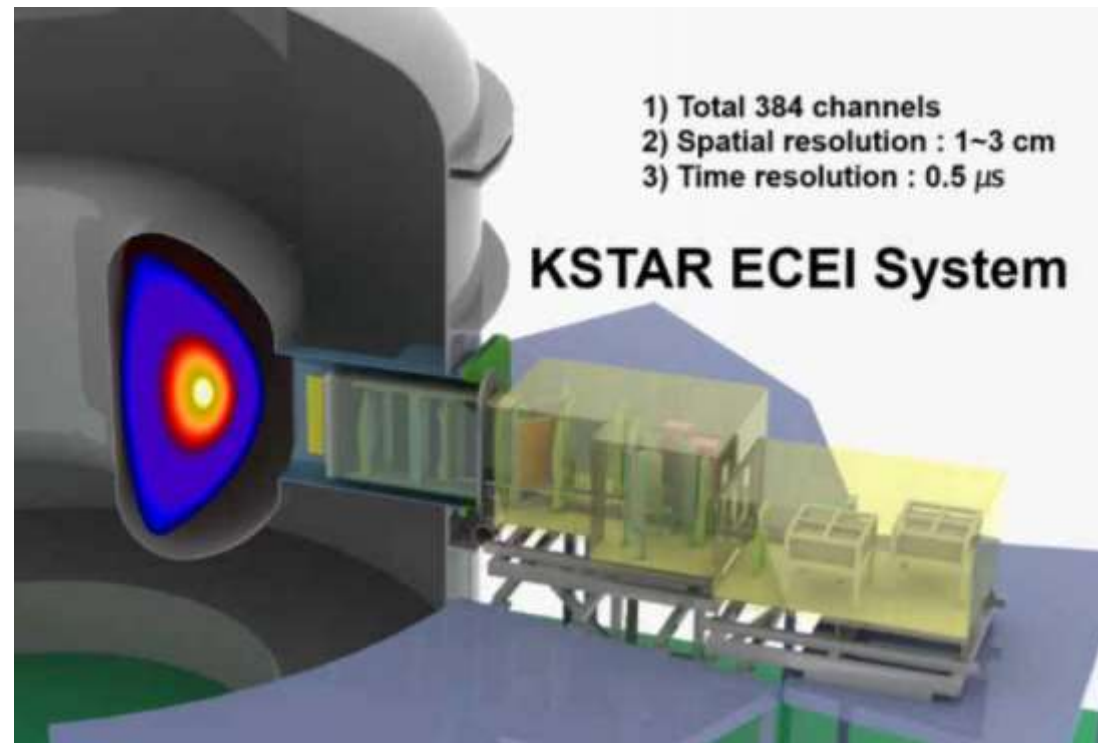
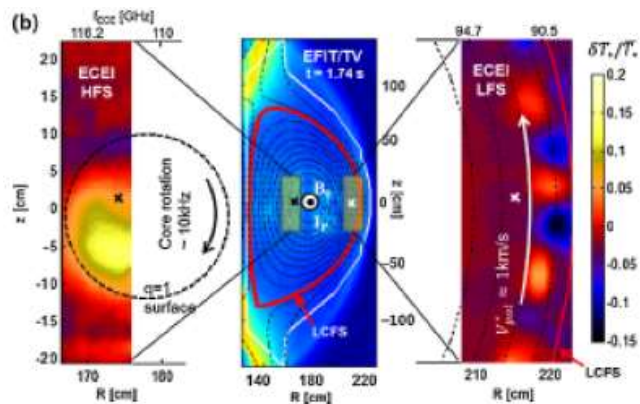
## 2D poloidális-radiális felbontás

Poloidális felbontás:

leképezés

Radiális felbontás:

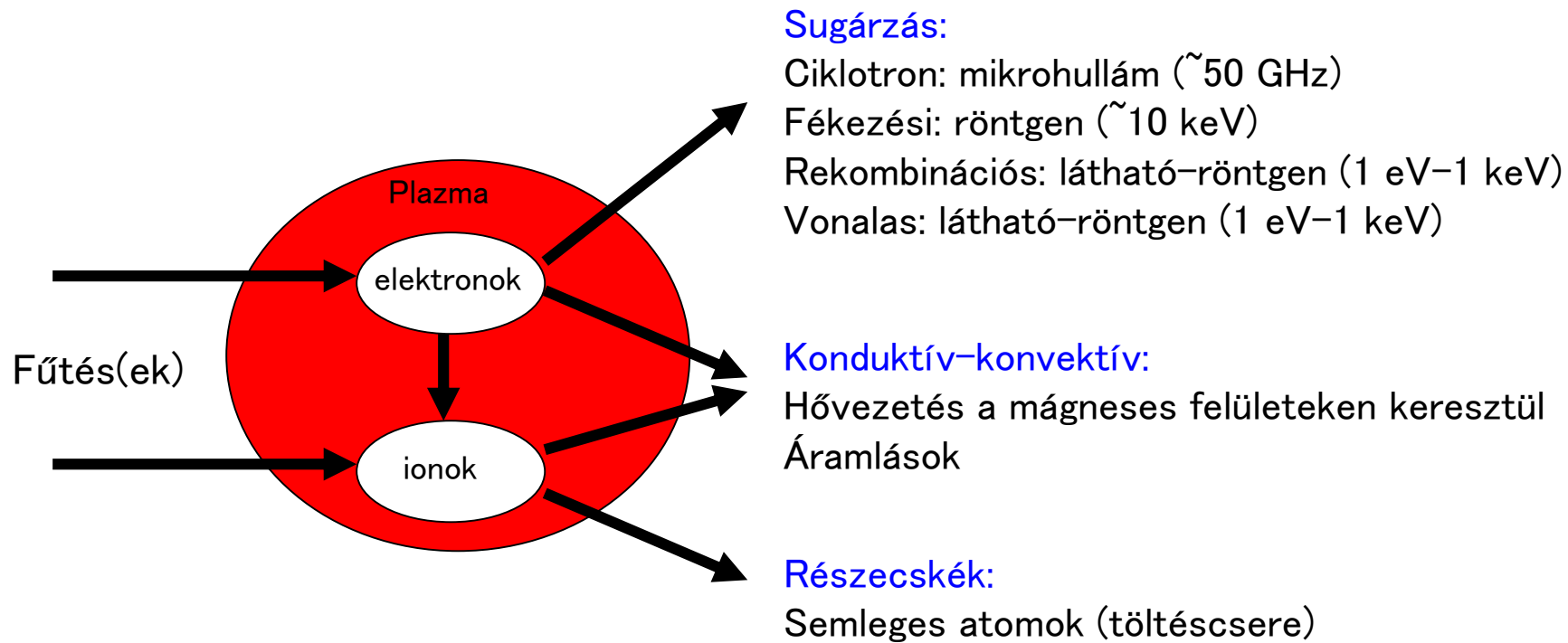
minden vevő mögött egy sor diszkrét frekvencia





# Ion hőmérséklet mérés

Az ionok hőmérséklete lényegesen különböző lehet az elektronokétól:



Fúziós reakciók szempontjából az ion hőmérséklet a mérvadó, tehát mérni kell

# Ion hőmérséklet mérés

## Semleges részecskeanalizátor:

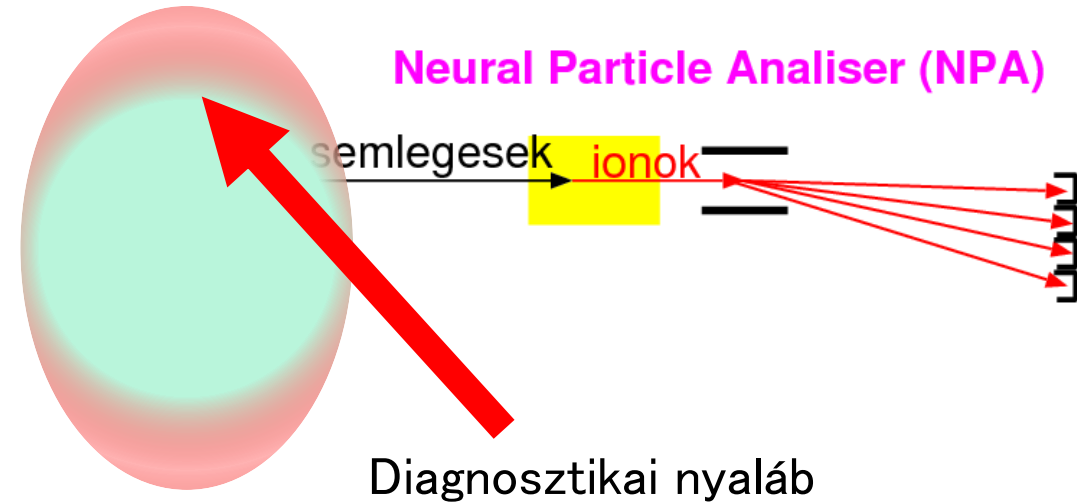
Az ionok többszörös töltéscsere folyamattal tudnak semlegessé válni és kijutni a plazmából. A kirepülő semleges részecskék energiaeoszlása kapcsolatban van (de nem azonos) az ionok energiaeoszlásával.

**Passzív:** spontán keletkező semlegesek

→ nem lokalizált mérés

**Aktív:** CX egy diagnosztikai nyalábon:

lokalizálja a forrást (nyaláb moduláció)



## Charge Exchange Resonance Spectroscopy (CXRS v. CES)

A hidrogén ionok teljesen ionizáltak, nem lehet spektroszkópiát űzni velük.

Viszont a plazmában levő szennyezők kb. termikus egyensúlyban vannak.

Tipikus szennyezők: C, B, ...

Vonal szélesség mérhető spektroszkópiával (néhány Å)

**Passzív:** kevés spontán szennyező, nagy háttér

**Aktív:** diagnosztikai vagy fűtő nyalábon: mint az aktív NPAnál

**Spektroszkópia egyben a szennyező koncentrációt is szolgáltatja.**

# Spektroszkópia

A spektroszkópai mérések fontos információt adnak a plazma Szennyezőiről: fontos mérés minden berendezésen

- Divertor or SOL spektroszkópia: látható fényben, alacsonyan ionizált ionok.
- VUV spektroszkópia:
  - A plazma belsejében csak magasan ionizált ionok vannak
  - A vonalak tipikusan a röntgen és VUV tartományban vannak(1–100 nm)

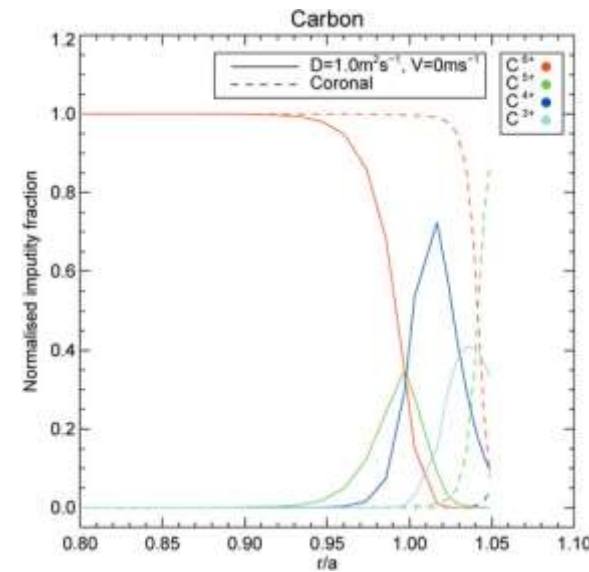
Különböző vonalak megjelenése problémára utal:

Pld.:

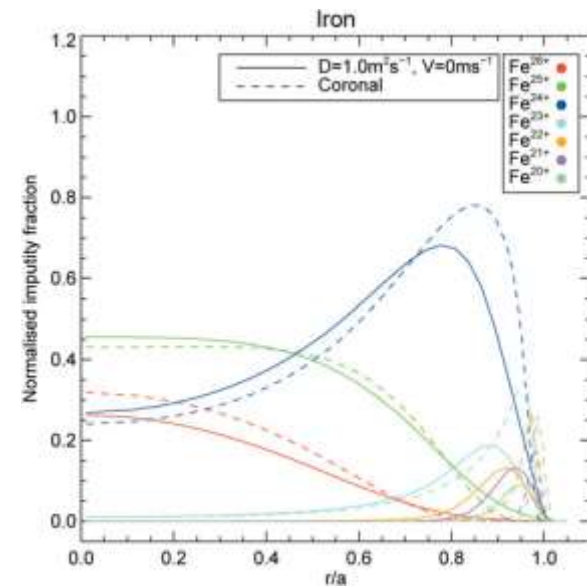
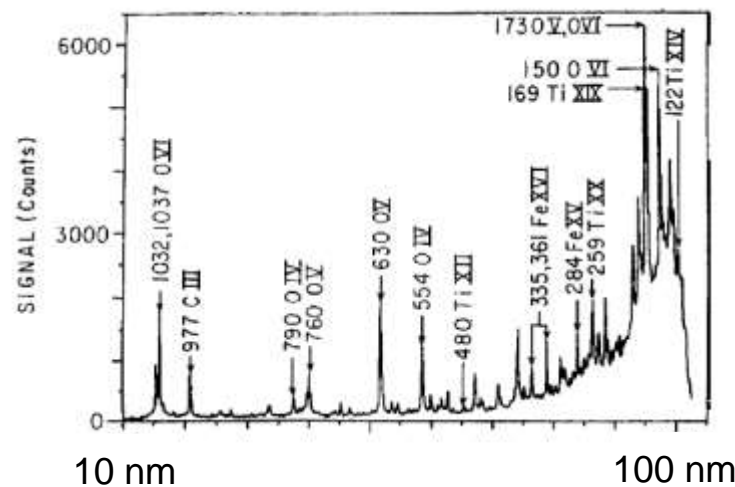
Nitrogén: levegő beömlés

Oxigén: levegő vagy hűtővíz szivárgás

Fémek: valamit olvaszt a plazma



Szénm és vas ionok radiális eloszlása a JET-ben



Egy spektrum a PDX tokamakból

# Röntgen mérések

A plazma elektronok tipikus hőmérséklete a keV tartományban van

→ sugárzás dominánsan röntgen tartományban

3 komponens:

- Fékezési sugárzás (Bremsstrahlung)
- Rekombinációs sugárzás
- Vonalas sugárzás

Mindkét kontinuum spektrumra  $P(E) \propto e^{-E/kT_e}$

→ meredekség az elektronhőmérséklet.

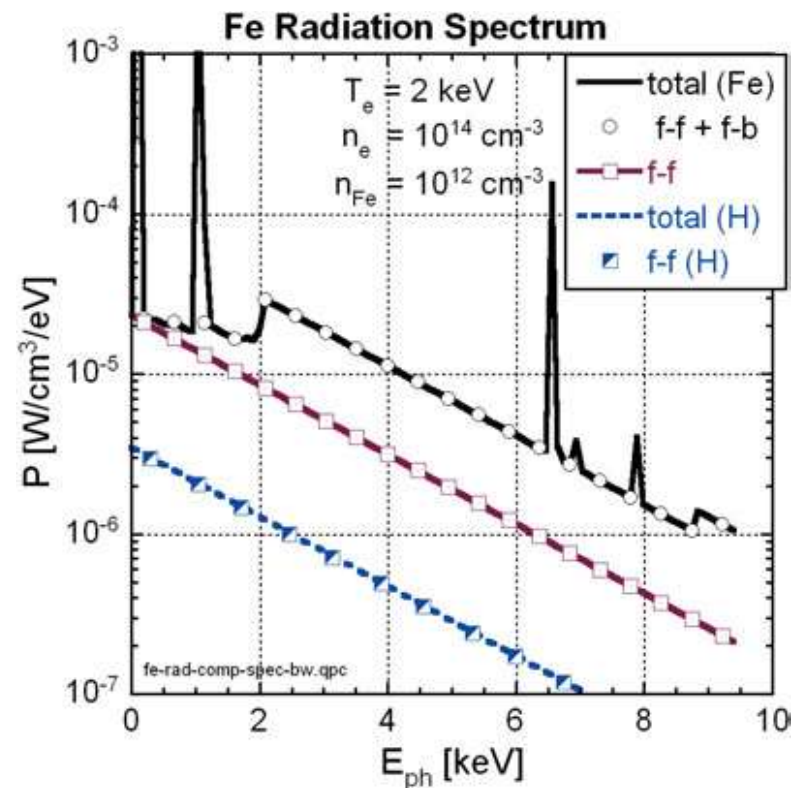
DE: vonalintegrál, vonalak...

**Mérési módszerek:**

- Foton számlálás (Si detektor, másodperc mérési idő)
- Szűrő fólia módszer: több különböző vastagságú fóliával szűrjük a spektrumot és több jelet mérünk: ha vonalak nem jelentősek akkor kiszámítható a spektrum meredeksége.

A röntgen spektrum mérés alapvető a plazmas szennyezők méréséhez (vonalak).

Kontinuum sugárzás egy vonalaktól mentes (infra) tartományban:  $Z_{\text{eff}}$



# Lágy röntgen tomográfia

A plazma a röntgen sugárzására átlásztó: a sugárzás intenzitáseloszlása a plazma alakjára utal:

$$P \propto Z_{eff} n_e^2 \sqrt{T_e}$$

Röntgen tartományban nem lehet fényerős  
leképezést csinálni  $\rightarrow$  camera obscura

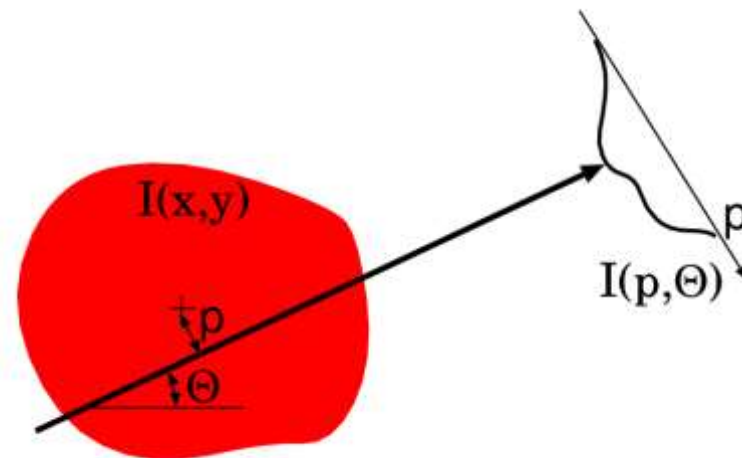
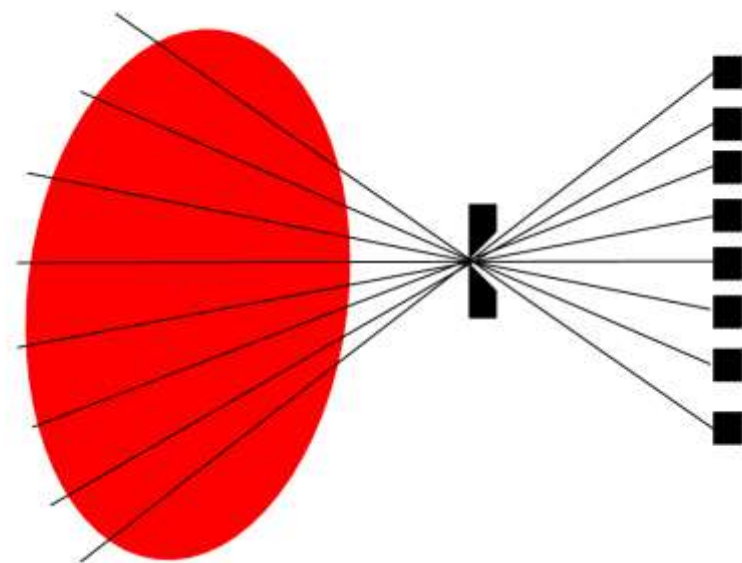
Egyes detektorokon mért intenzitás vonalintegrál:

Radon transzformáció:

$$I(x,y) \rightarrow I(p, \Theta)$$

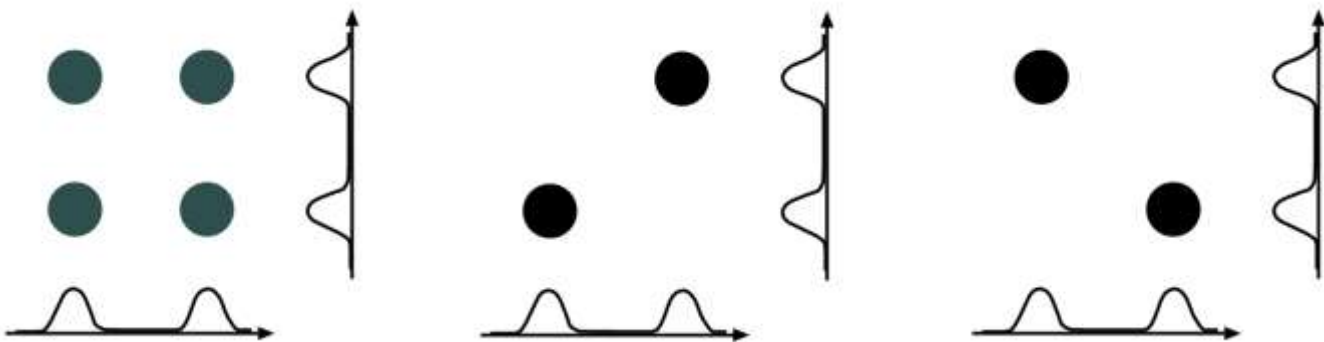
Elvileg invertálható lenne  $I(x,y)$ -ra ha a teljes  $I(p, \Theta)$  ismert lenne.

Ábel inverzió:  $I(r)$  számítása  $I(p)$ -ből, ha tengelyszimmetrikus az eloszlás



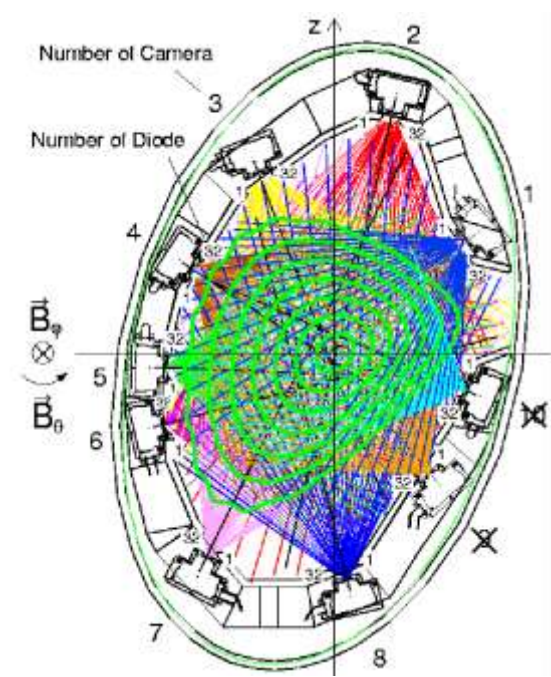
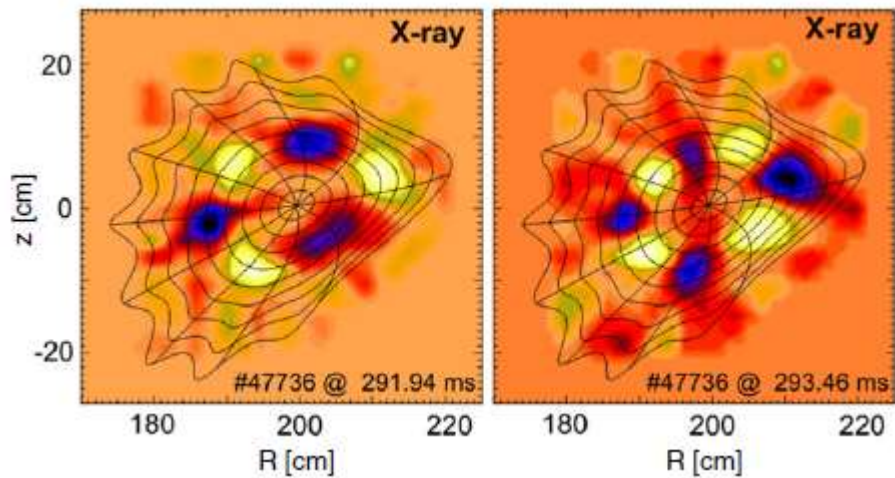
# Röntgen tomográfia

Olyan eljárások nyűjteménye, ahol integrális mennyiségekből akarjuk a 2 v. 3 dimenziós eloszlást kiszámítani. A megoldás nem mindig egyértelmű:



Általában Nyquist-szerű feltételt figyelembe kell venni: 2-od rendű szögeloszláshoz legalább 3 irányból kell mérni.

Kerek tokamak plazmákra 2 kamera sokszor elég volt, de bonyolultabb plazmára (sztellarátor, perturbációk) már sok kamera kell.



# Bolométer tomográfia

A plazma teljes sugárzásának térbeli eloszlása az energiamérleg fontos része.

Bolométer: teljes sugárzást mérő detektor.

**AXUV:** Szilícium detektor nagyon vékony felületi elektródával

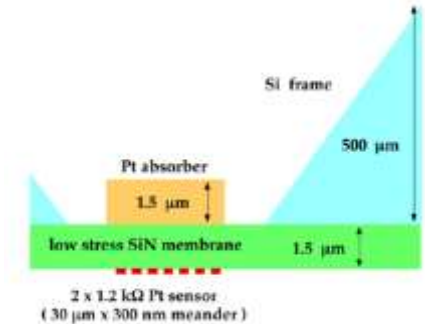
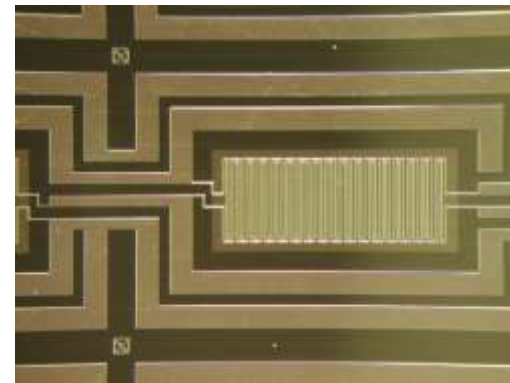
Nagyjából egyenletes energiaérzékenység, kompakt méret

Sérülékeny, neutron sugárzás elpusztítja

**Fólia bolométer:**

Vékony abszorber fólia hőmérsékletét egy Au vagy Pt meander méri:

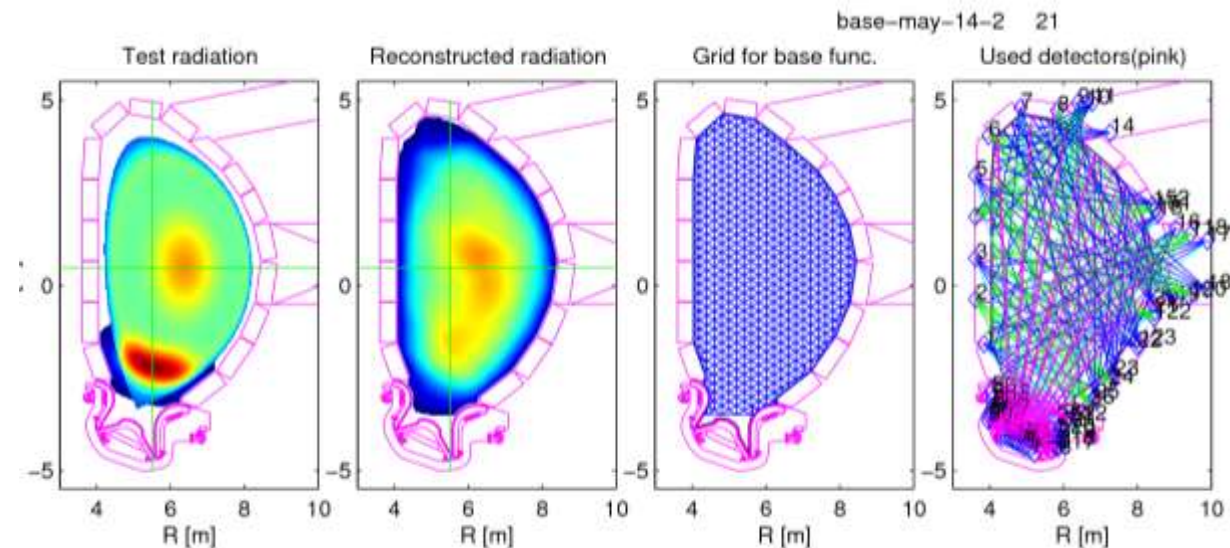
- Kis jel, híd kapcsolás referenciával
- Hosszú időállandó (ms)



A detektor elrendezést gondosan optimalizálni kell a várt sugárzéseloszláshoz

és a tomográfias módszerhez:

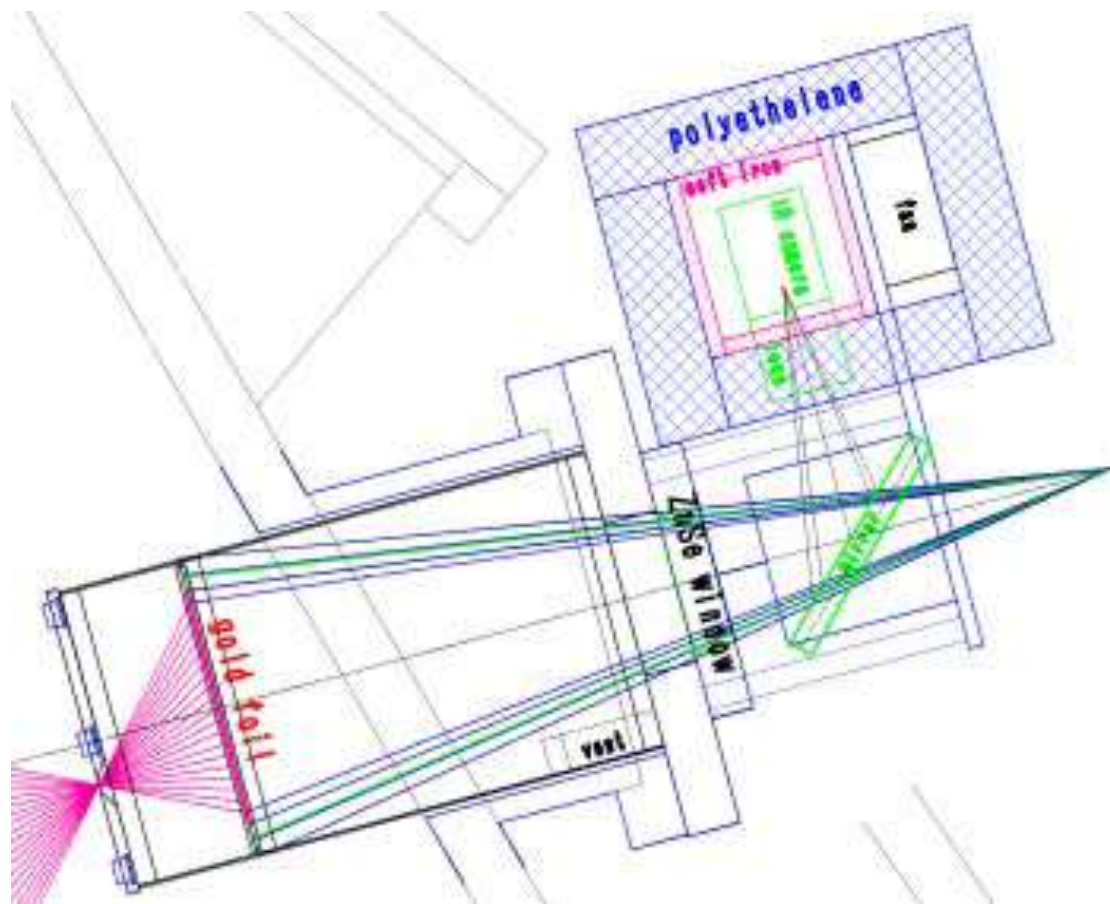
Regularizáció: az ekvivalens megoldások közül valamilyen alaponű válogatunk: pld. símaság



# Imaging bolometry

Egy vékony Au fóliára esik a sugárzás egy lyukon keresztül. A fólia melegedését egy infrakamera méri:

- Kétdimenziós kép, ha korrekcióba vesszük a fólián belüli hőtranszportot
- Igen érzékeny fólia
- Új, de nagyon érdekes technika





# Hidrogén Balmer alfa, videokamerák

A plazma szélén a befelé haladó atomok sugároznak:  
jól mérhető a Balmer alfa vonal (656.3 nm).

Az atomok ionizációs ideje és sugárzási intenzitása:

$$\tau_i = \frac{1}{\langle \sigma_i v \rangle n_e} \quad I = \langle \sigma_e v \rangle n_e.$$

Egy atom által az ionizáció előtt kisugárzott fotonok száma:

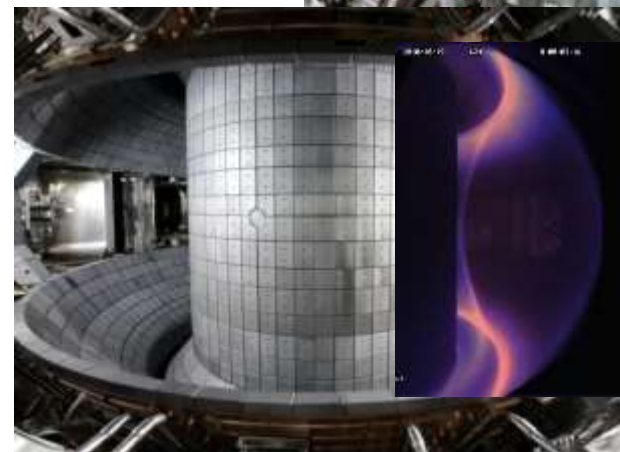
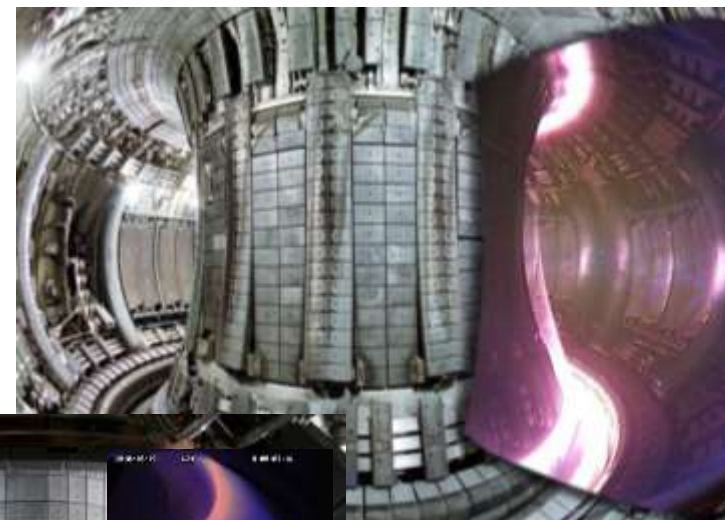
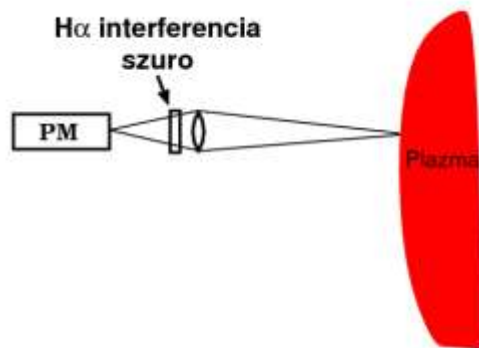
$$N = I \tau_i = \frac{\langle \sigma_e v \rangle}{\langle \sigma_i v \rangle}$$

A Balmer alfa sugárzás tehát csak a semleges beáramlástól függ:

- Plazma-fal kölcsönhatás erőssége
- Semlegesek csak cm-re jutnak: kirajzolja a plazma szélét

Egy vagy több videokamera minden berendezés tartozéka a legfontosabb kvalitatív információ a plazmáról.

Dedikált H<sub>α</sub> mérőcsatornák monitorozzák a plazma és a fal kölcsönhatását.



# A plazma szélének mérése

A plazma szélébe lehet még szondákat dugni.

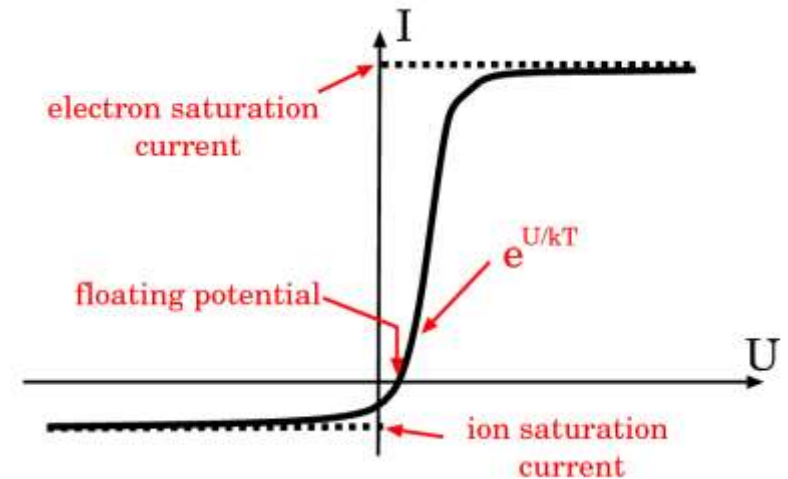
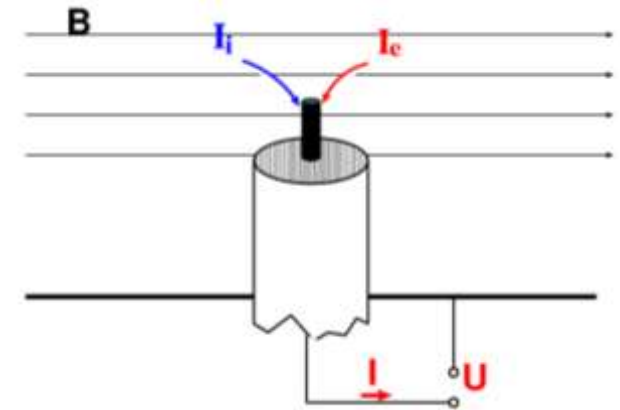
Legtipikusabb a Langmuir szonda: kis fémtű szigetelőben.

A szonda karakterisztika  $I(U)$  függvény

hordozza az információt:

- Feszültség pásztázással le lehet tapogatni
- Elektron telítési áram áram általában leolvastja a szondát
- Ion telítési áram  $I_{\text{sat}} \sim n_e \sqrt{T_e}$
- kis feszültségen  $I \sim \exp(U/kT)$

Ma leginkább a divertorban használnak szondákat vagy ugró mechanizmussal: reciprocating probe néhány cm-t előreugrik a plazmába  $\sim 100$  ms-re.



# Néhány tipikus szonda elrendezés

Dupla lebegő potenciál szonda az elektromos tér mérésére:

**Poloidális elrendezés:**

$U_1 - U_2$  a poloidális elektromos teret méri, ha  $T_e$  állandó

$$\rightarrow E_p \times B_t = v_r \quad (\text{radiális áramlás})$$

**Radiális elrendezés:**

$U_1 - U_2$  a radiális elektromos teret méri, ha  $T_e$  állandó

$$\rightarrow E_r \times B_t = v_p \quad (\text{poloidális áramlás})$$

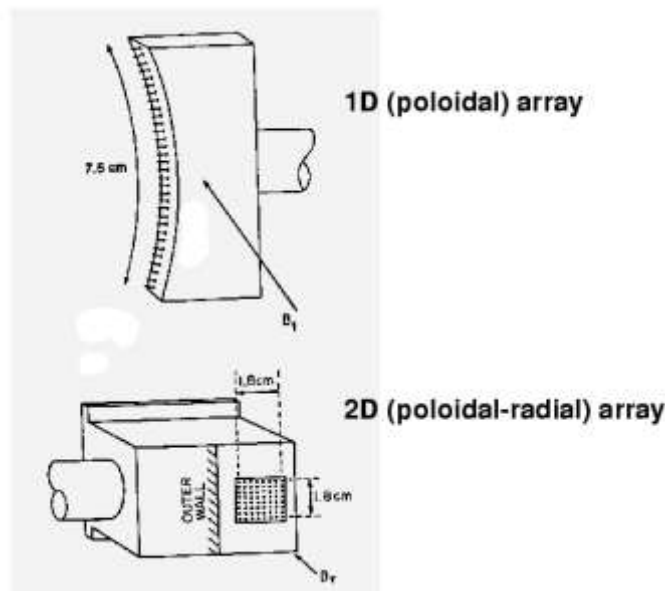
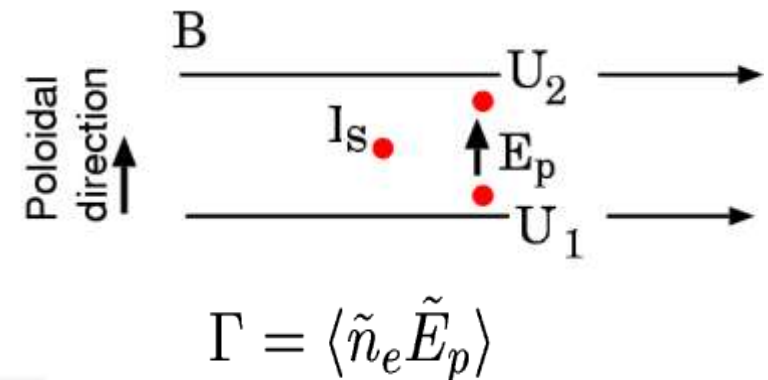
**Tripla szonda:**

2 poloidális lebegő szonda a radiális sebesség mérésére

1 ion telítési szonda  $n_e$  mérésére (ha  $T_e$  állandó)

$\rightarrow$  Measures convective particle flux

Rake szonda radiális vagy poloidális fésű

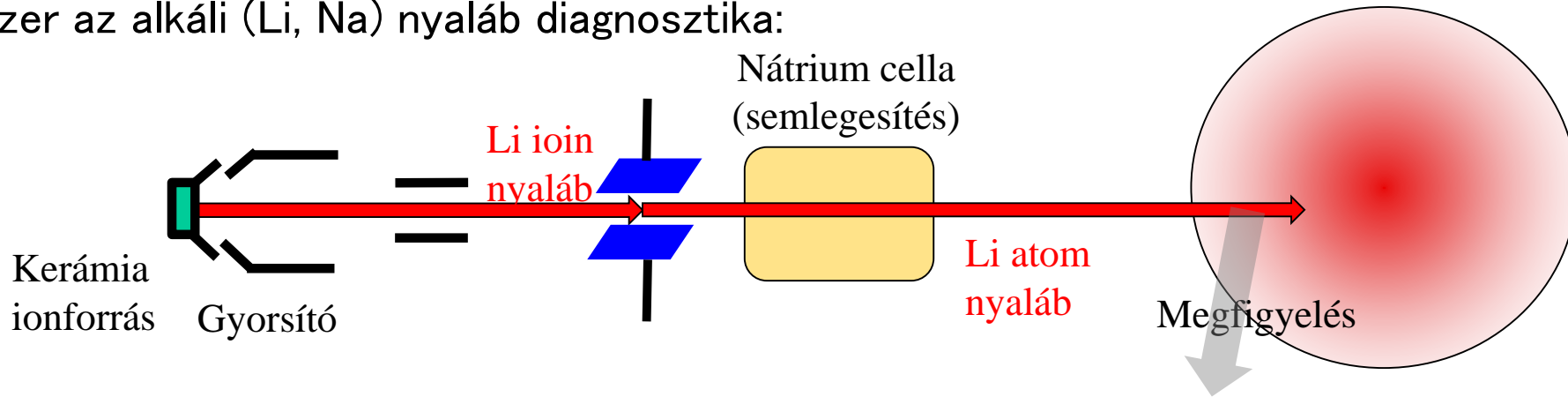


# Alkáli nyaláb

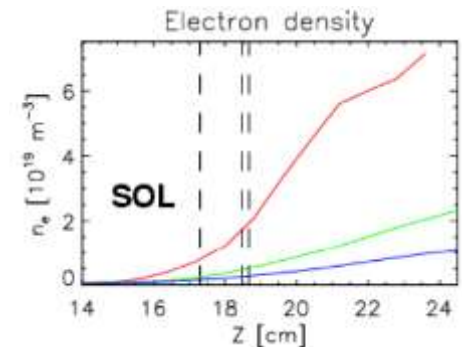
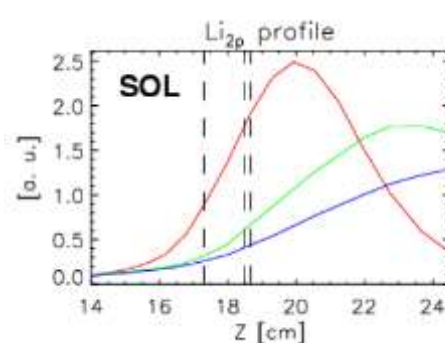
A plazma szélén a profilok nehezen mérhetők:

- Thomson kicsi jelet ad és időben ritkán mér
- ECE optikai mélység nem elég

Igen jó módszer az alkáli (Li, Na) nyaláb diagnosztika:



- 30–80 keV atomnyaláb, néhány mA áram
- Nem fűt, nem perturbál
- A Li atomok 670.8 nm-es vonala és a Na 589 nm vonala erősen világít, kb. arányos az elektronsűrűséggel
- Szélső 5–10 cm-t tudja mérni, beljebb ionizálódik a nyaláb
- Fényemisszióból sűrűség számítható
- Más mérések is lehetségesek: CX, Bp, ...

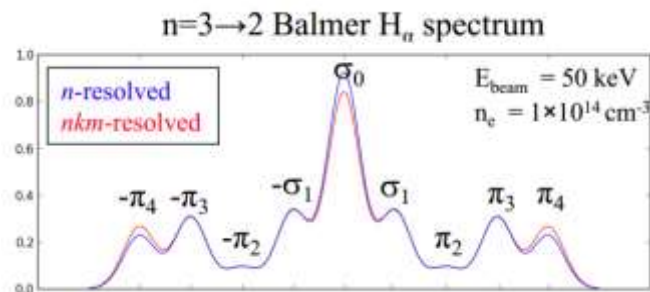


# Árameloszlás mérése: MSE

Az árameloszlás mérése az egyik legnehezebb feladat:  
a mágneses tér irányát kellene mérni a plazma belsejében.

Motional Stark Effect:

- A plazmába haladó fűtő D nyaláb egy  $v \times B$  elektromos teret érez
- A vonalak Stark felhasadáást szenvednek
- A Stark komponensek intenzitásaránya és polarizáltsága függ a  $v \times B$  és a megfigyelés irányától



A szokásos megoldásban polarizációt mérnek a nyaláb fényen:

- Gyenge jel, kis szögeket kell mérni
- Általában csak egy korlátot ad a plazmaegyensúly számításokhoz

# Nukleáris mérések

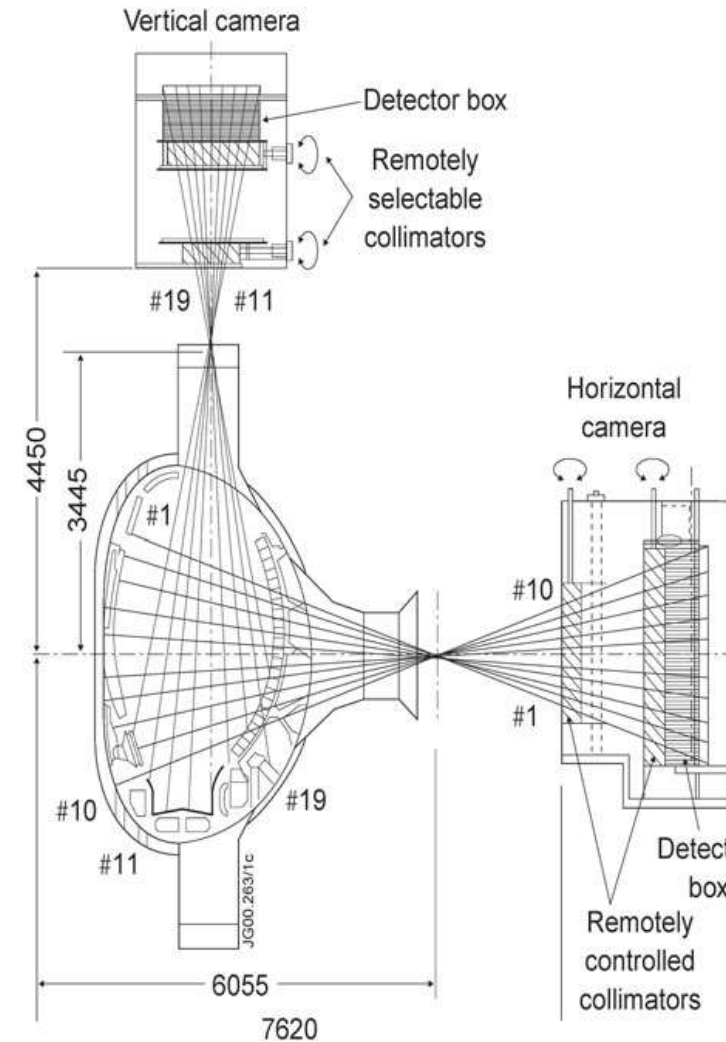
A nagyteljesítményű plazmákban a nukleáris reakciókat mérni kell:

DD neutronok: 2.5 MeV (mai berendezésekben domináns)

DT neutronok: 14 MeV (ma csak JET-ben)

Neutronok szóródnak a szerkezeteken, camera obscura elrendezések lehetségesek de nagyon nagyok és nehézkesek.

*Neutron kamerák a JET-en*



**Gamma-ray diagnosztika:** a plazmában levő gyors ionok (p, D, alfa, Be, ...)

különböző magreakciókat váltanak ki. Némelyik gerjesztett magot eredményez és egy nagyenergiás gamma fotonnal bomlik. Gyors protonok mérésére szinte ez az egyetlen lehetőség

# Turbulencia diagnosztikák

A mérések egy speciális csoportja a plazmában fellépő turbulencia mérését célozza:

- 0.1–10% változás
- Széles spektrum több 100 kHz-ig
- 1–2 cm korrelációs hossz az erővonalakra merőlegesen
- Statisztikus jelenség, csak hosszú időadatok átlaga értékelhető:  
spektrumok, korrelációs függvények, bikoherencia, stb.
- Sok térbeli pont, sok adat (Gbyte/lövés)

# Számítógépes adatgyűjtés, feldolgozás

Egyes paraméterekre azonnal szükség van a plazma vezérléséhez:

Mágneses jelek, sűrűség

Ezeket analóg elektronikák szolgáltatják

A többi jelet általában mérés után dolgozzák fel: lövés (shot) = mérés

Egy lövés ma már sok Gbyte adatot jelent

Vannak speciális tokamak adatbázisok, pld. MDSplus:

- Hierarchikus felépítés
- Feldolgozott jelek hozzáadhatók mérés után
- Automatikus feldolgozások a mérés után: egyensúly, profilok

Fontos szempont az együttműködés

Egyre fontosabbak lesznek a real-time diagnosztikák:

RT tomográfia (pld. bolométer), FPGA vagy RT Linux megoldások

RT EFIT: egyensúly számolása élő időben

RT falvédelem: infravörös kamerák mérik a divertor vagy fal elemek hőmérsékletét:

korlát elérésekor azonnali beavatkozás

Neural network:

több diagnosztika jeleinek összekombinálásával egy jelenség előrejelzése

Nics függvénykapcsolat, tanuló algoritmusokon keresztül készítik fel a rendszert.



# Hogyan dolgozunk?

Egy diagnosztika építése vagy használata sokszor a belépő a fúziós kutatásokba

- Diagnosztika építés hosszú folyamat.
- Kritikus erőforrás a „port”, hozzáférés a plazmához.
- Megfelelő programok kellene a méréshez, mérés közben nincs idő gondolkodni

Sok fúziós kutatócsoport specializálódik néhány diagnosztikai technikára.

Magyarország is ilyen.

Nyalábemissziós spektroszkópia:

(TEXTOR), ASDEX Upgrade, MAST, JET, COMPASS, KSTAR, EAST, W7-X, (ITER)

Video diagnosztika: ASDEX Upgrade, JET, W7-X

