





s work has been carried out within the framework of the AOfusion Consortium and has received funding from the atom research and training programme 2014-2018 under grant eement No 633053. The views and opinions expressed herein on necessarily reflect those of the European Commission.

# Plazmadiagnosztikák – Mik a földi csillagok teleszkópjai?

Dunai Dániel MTA Wigner FK Nyalábemissziós Spektroszkópia Kutatócsoport





A plazma különböző paramétereinek mérésére szolgáló eljárásokat plazmadiagnosztikának nevezzük.

## Céljai:

- Vezérlés
- Berendezés védelme
- Fizikai megértés

# Mit kell mérni?

- Plazma hely, alak (valós-idejű 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





- Az extrém kürölmények nem csak a mérendő mennyiségekre terjednek ki, hanem a működési környezetre is:
- vákuum
- magas hőmérséklet (10-100 millió C)
- Mágneses tér (1-10 Tesla)
- elektromágneses zajok, földhurkok széles frekvencia tartományban (Hz, kHz, MHz, GHz)
- •sugárzási háttér (alfa, atom, neutron, gamma, UV, hő)
- távműködtetetés
- •Nehéz hozzáférés –

nagyobb berendezéseknél egyre nehezebk

→A laborban jól működő "finom" mérések nagy része alkalmatlan.

Modellezés kell a mérések mögé

UCSD Reciprocating Probe for NSTX







- A diagnosztikák egy ipari jellegű környezetben vannak:
- Szigorú mérnöki tervezés, integráció, minőségbiztosítás (CAD rendszerek)
- Berendezésenként változó informatikai és mérnöki környezet (A teljes berendezés 3D-s terve meg van az utolsó csavarig elméletileg, persze ez gyakran nem egészen van így)
- Tesztelés, dokumentáció
- Mérés követhetősége, naplózás, adatbázis

D. Dunai

Összefoglalva: szisztematikus munka

A terv es a megvalósítás 2 év múlva











**EURO***fusion* 





A tokamak plazma az anyag elég speciális állapota: •B: 1-5 T

- •n ~ 10<sup>20</sup> m<sup>-3</sup> (10<sup>-5</sup> atmoszférikus légköri sűrűség)
- •T: 100 eV-10 keV de Te  $\neq$  Ti
- •Elektron szabad úthossz: 10-100 m
- •Elektron Larmor sugár: 50-100 mikron
- •lon Larmor sugár: 1-5 mm
- •Mágneses térben tárolt energia: 20-100 x plazma energia
  - ~ 1 MJ/m3 (= 1 személyautó 100 km/h sebességgel)

•A mágneses erővonalak tórusz felületekbe rendeződnek:

→mágneses felületek

•"biztonsági tényező" (q): toroidális/poloidális körülfutás q = 1/  $\iota$ 

•A részecskék a felületek mentén szinte szabadon

mozognak  $\rightarrow$  paraméterek állandóak a felületeken

 $\rightarrow$  a részecske- és hőtranszport egydimenziós

-Széles időskála (Sec – nanosec (GHz hullámok )) -A sűrűség és hőmérséklet tartomány (4 nagyságrend<mark>)</mark>





#### Hogy néz ki valójában?









#### MAST plazma – 0.6 sec nagysebességű kamerával

	Plazma paraméter	
	Áram	1,3 MA
	Mag hőmérsékle	23,000,000°C t
	Kisülés hossz	~ 1s
	Plazma térfogat	8m <sup>3</sup>
Same and the second second	Plazma sűrűség	10 <sup>20</sup> részecske/m <sup>3</sup>
	Átmérő	~ 3m

Speciális nagy sebességű, nagy felbontású kamera 10 micro sec / frame.





A plazma szélén a befelé haladó atomok sugároznak: jól mérhető a Balmer alfa (n 3->2) vonal (656.3 nm). Az atomok ionizációs ideje és sugárzási intenzitása:  $\tau_i = \frac{1}{\langle \sigma_i v \rangle n_e}$   $I = \langle \sigma_e v \rangle n_e$ .

Egy atom által az ionizáció előtt kisugárzott fotonok száma:  $N = I\tau_i = \frac{\langle \sigma_e v \rangle}{\langle \sigma_i v \rangle}$ Ez a plazma szélen n=10<sup>19</sup>, T=10eV ~1/15

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\_alpha mérőcsatornák monitorozzák a plazma és a fal kölcsönhatását.







- A spektroszkópiai mérések fontos információt adnak a plazma Szennyezőiről: fontos mérés minden berendezésen
- Divertor or SOL spektroszkópia: látható fényben, alacsonyan ionizált ionok.
  grating=60 minam=1

Különböző vonalak megjelenése problémára utal: Nitrogén: levegő beömlés Oxigén: levegő vagy hűtővíz szivárgás Fémek: valamit olvaszt a plazma







 •VUV spektroszkópia: A plazma belsejében csak magasan ionizált ionok A vonalak tipikusan a röntgen és VUV tartományban vannak(1-100 nm)





O EUROfusion

Relatív oxigién ion sűrűség







total (Fe)

f-f + f-b

otal (H)

f-f (H)

Fe Radiation Spectrum

T\_ ≑ 2 keV

n = 10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup>

= 10<sup>12</sup> cm

 $10^{-3}$ 

10-4

10-5

- 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.

A plazma a röntgen sugárzására átlásztó: a sugárzás intenzitás eloszlása a plazma alakjára utal:

Kontinuum sugárzás egy vonalaktól mentes (infra) tartományban: Z<sub>eff</sub>

D. Dunai





# Thomson szórás



Plazma

Thomson szórás: szabad elektronok szórják az elektromágneses hullámokat: Intenzitás → sűrűség Spektrum → Hőmérséklet (Doppler eltolódásból kiszélesedés) (e-sebesség: 10<sup>7</sup> m/s)

A szórási hatáskeresztmetszet nagyon kicsi: csak impulzus lézerrel lehetséges: 1-10 J, néhány ns, 1 GW!!! - 10-20 Hz



**I(**λ)





Lokális mérés a lézer és az optika keresztezéséből. Optikai elemekről szóródó fény kritikus Detektálás néhány csatornán különböző szűrőkkel (polikromátor)



D. Dunai | MAFIHE Fúziós Plazmafizika Téli Iskola | Budapest, 2017. 02. 12. | Fólia 15





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

- Ha ω> ω<sub>p</sub>, akkor a fázissebesség kb. lineárisan függ a sűrűségtől.
- Fázissebesség
  - → törésmutató
    - $\rightarrow$  interferometrikus mérés  $\rightarrow$  line density:
- A referencia nyalábhoz képesti fázis mérhető: Alacsony frekvencia (100 GHz, mikrohullám) → nagy effektus, 2π-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:
- $\rightarrow$  two color interferometer







Top view

- Praktikus megvalósíásban mindenféle séma létezik:
- Többhúros vertikális:
- · alkalmas plazma pozício vezérlésre is
- Horizontális (pld. CO2 lézerrel)
- Retroreflektoros

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





Mirnov szonda

O EUROfusion

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

1a

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

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



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

Alapvető korlát:

- kétdimenziós mérésből nem lehet a 3D perturbációt mérni
- → perturbáció radiális helyzete általában nem mérhető

D. Dunai







### Ohmikus fűtés (kevés a fúzióhoz) Semleges részecske (NBI)





### Töltés Kicserélődés diagnosztika:

- . Szennyező szén ionok elektront kapnak a nyaláb atomoktól
- . Gerjesztett állapotban repülnek tovább
- . Doppler eltolódás sebesség és ion hőmérséklet

#### Motional Stark Effect:

- . A plazmába haladó fűtő D nyaláb egy vxB elektromos teret érez $_{n=3 \rightarrow 2 \text{ Balmer H}_{\alpha}}$  spectrum
- · A vonalak Stark felhasadást szenvednek
- A Stark komponensek intenzitásaránya és polarizáltsága függ a vxB és a megfigyelés irányától







Diagnosztikák tömkelege



Fotosabb diagnosztikák és fizikai elv

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

Elektron hőmérséklet – elektron ciklotron sugárzás

Ion hőmérséklet – CXRS

- SOL sűrűsség és potenciál szondák
- Plazmaáram rogowski tekercs
- Mágneses tér irány Motional Stark Effect
- Sűrűség fluktuációk és profil mikrohullámú reflektometria
- Gyors részecske populáció FILD, szcintillátor alapú diagnosztika
- Plazma-fal kölcsönhatás Infravörös kamerák

Modellezés kell a mérések mögé – Nem lehet legtöbbször "leolvasni" az eredményt, hanem ki kell bányászni a mért adatból. Legtöbbször több másik diagnosztikának az eredményre is támaszkodva





#### 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:

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

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 algoritmusokokon keresztül készítik fel a rendszert.





#### 1998-ban jegelték a tokamak kutatásokat.







Egy diagnosztika építése vagy használata sokszor a belépő a fúziós kutatásokba

- Diagnosztika építés hosszú folyamat.
- Kritikus erőforrás a "port", hozzáférés a plazmához.
- Megfelelő programok kellenek a méréshez, mérés közben nincs idő gondolkozr

Sok fúziós kutatócsoport specializálódik néhány diagnosztikai technikára.

Magyarország is ilyen.

Nyalábemissziós spektroszkópia:

TEXTOR, ASDEX Upgrade, MAST, JET, COMPASS, KSTAR, EAST, (W7-X) Video diagnosztika: ASDEX Upgrade, JET, W7-X, JT60-SA, (ITER)







- Kisméretű (mm-cm) hullámok instabilak lesznek
- Nemlineáris kölcsönhatásokkal áramlásokat építenek
- Az áramlások visszahatnak a turbulenciára →önszabályozó rendszer
- Állapotátmenetek lehetségesek



Fizikai cél: A fent vázolt rendszer és időbeli változásainak vizsgálata

Diagnosztikai cél: Plazmaparaméterek fluktuációinak és áramlások mérése

- cm-es térbeli felbontás
- µs-es idő felbontás
- kétdimenziós felbontás
- lokális információ

D. Dunai | MAFIHE Fúziós Plazmafizika Téli Iskola | Budapest, 2017. 02. 12. | Fólia 25

- ionokat gyorsítunk (20-130 keV)
- semlegesítés után a plazmába lőjük
- a nyaláb atomja plazma részecskékkel való ütközések által gerjesztődnek
- a gerjesztett atom karakterisztikus hullámhosszúságú foton kibocsátásával bomlik.
- a fény mennyiség arányos a lokális plazma sűrűséggel
- nagy frekvenciás méréssel a sűrűség gyors változásai is követhetőek (MHz)
- $10^7 10^{11}$  foton/mp  $\rightarrow 10 10000$  foton/mintavétel
- 2 alaptípus
  - Diagnosztikai nyaláb NyES
  - Fűtőnyaláb NyES

#### Mintha zseplámpával a padláson lévő port néznénk









NyES dagnostikáink:

- JET (Culham, UK) diagnosztikai lítium nyaláb megfigyelő rendszer, ionforrás
- MAST (Culham, UK) fűtőnyaláb NyES építés, üzemeltetés (Budapesten készült, és itt is teszteltük a teljes rendszert)
- COMPASS (Prága,Cz) diagnosztika lítium nyaláb építés, saját tovább fejlesztett design – 120 keV nyaláb energia
- ASDEX Upgrade (Garching, D) diagnosztikai lítium nyaláb megfigyelő rendszerének felújítása, gyártása, detektorok installálása
- KSTAR (Daejong, Korea) fűtőnyaláb NyES 2011, teljes diagnosztikai lítiumnyaláb-diagnosztika 2013
- EAST (Hefei, Kína) teljes diagnosztikai lítiumnyaláb diagnosztika 2014
- W7-X (Greifswald, 2017) teljes lítiumnyaláb-diagnosztika

Minden európai NyES kísérletben jelentős szerepünk van, többségében meghatározó





**MAST NyES** 







# MAST H-L átmenet

EUROfusion



Daniel Dunai, OXFORD PLASMA THEORY GROUP- PLASMA SEMINAR, 15.04.2016



MAST – ELM prekurzor hullám









#### Látható tartományú áttekintő videódiagnosztika

- a 10 csatornás rendszer majdnem a teljes falat lefedi (térbeli felbontás 5-10 mm)
- azon kevés diagnosztikák egyike, amelyek az első plazmakísérleteket láthatják
- távlati cél #1: biztonság káros plazma-fal kölcsönhatás valós idejű érzékelése
- távlati cél #2: fizika valós idejű plazma alak felismerés, aszimmetriák, tomo



#### Első alkalmazás: mágneses felületek mérése

#### **Event Detection Intelligent CAMera**

- a W7-X áttekintő videódiagnosztika alapját képezi
- 12 bit CMOS szenzor: 1280x1024 @ 440 fps, 32x32 @ 100.000 fps
- non-destructive readout (NDR)  $\rightarrow$  képkiolvasás az expozíció megzavarása nélkül
- moduláris felépítés: kamerafej + vezérlőegység (IPCL)



**EURO***fusion* 

# **Alkalmazás :** 3D turbulens struktúrák vizsgálata

#### Szélplazma filamentumok:

- W7-X: optimalizált mágneses tér: ideális turbulens transzport vizsgálatára
- Filamentumok a plazma szélén: turbulencia 3D-ben
- Jól detektálható gyors kamerákkal, akár 1 Mframe/s





Ha kamera sebességet 50 kHz-re növeljük:

- Erővonalak mentén elnyúlt struktúrák, u.n. filamentumok
- Poloidálisan forognak
- Élettartamuk néhány 100 µs





#### TDK/BSc/MSc/PhD témák:

Szélplazma instabilitások vizsgálata L-H átmenet vizsgálata ELM dinamika SOL réteg fizika Sztellarátor szélplazma

Adat kiértékelés Diagnosztika fejlesztés Diagnosztika modellezés Mérések Európában és Ázsiában





# További információ:

www.magfuzio.hu www.iter.org www.euro-fusion.org fusionforenergy.europa.eu/ <u>www.facebook.com/magfuzio/</u>

*Érdekel a téma?* <u>dunai.daniel@wigner.mta.hu</u>

# Köszönöm a figyelmet!