

FÚZIÓS NYÁRI ISKOLA A CASTOR TOKAMAKNÁL

Anda Gábor, Bencze Attila, Dunai Dániel, Gál Kinga
KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézet
Berta Miklós, Pokol Gergő
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Az egyetemi oktatás és kutatás mindennapi nehézségei közepette egy ígéretes kezdeményezésről számolunk be. A KFKI RMKI Plazmafizikai Főosztály kutatói az egyetemi előadásokat kiegészítő szabályozott fúziós kísérleti nyári iskolát szerveztek. A magyarországi fúziós kutatás lényegében az MT-1 tokamak 1979. június 12-i felavatásával vette kezdetét. A magyar fúziós programot 1998-ban súlyos csapás érte, amikor anyagi okok miatt leállították az MT-1M (MT-1 módosított változata) kísérletet. A kialakult nehéz helyzetből az EURATOM-hoz való csatlakozás jelentette a kiutat. Ekkor megalakult a MEFSZ (Magyar EURATOM Fúziós Szövetség) lehetővé téve, hogy a magyar kutatók bekapcsolódjanak a nagy költségvetésű európai kísérletekbe. A magyar szervezet tagjai a hazai fúziós kutatások jelentős fejlesztését tűzték ki célul. A célt egyetemi hallgatók és friss diplomások kutatásba való bevonásával igyekeztek elérni, így a KFKI-ban dolgozó csoport körül egy magyar fúziós iskola körvonalai rajzolódni kezdtek. Ebben a folyamatban mindenképpen központi helyet foglal el a fúziós plazmafizika mint tantárgy megjelenése a BME (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem) mérnökfizikus-képzésében, melyet az ELTE is akkreditált. 2003-ban először a tantárgyat sikeresen elvégző hallgatók egy egyhetes nyári iskolában alkalmazhatták elméleti ismereteiket a gyakorlatban is. A képzést 2004-ben 10 napra bővítették.

A SUMTRAIC (*International SUMmer TRAIning Course on Experimental Plasma Physics*) nyári iskolát – magyar berendezés híján – Prága városában a CASTOR (*Czech Academy of Sciences TORus*) tokamagnál szervezték meg magyar–cseh együttműködésben. A CASTOR sok tekintetben hasonlít a leszerelt budapesti tokamakhoz. Tulajdonoságai a plazmafizikai laboratóriumi gyakorlat lebonyolításához optimálisak, mivel kicsi, könnyen áttekinthető és flexibilis. A nyári iskola szervezését nagymértékben megkönnyítette, hogy a fúziós plazmafizika területén dolgozó magyar és cseh fizikusok hagyományosan jó kapcsolatokat ápolnak. A gyakorlatokon elvégzendő mérési feladatokat is együtt dolgozták ki figyelembe véve az időbeli és eszközbeli lehetőségeket, illetve a korábbi tapasztalatokat. A nyári iskola egyik fő célja a nemzetközi együttműködésben végzett kutatómunkára való felkészítés, a kísérleti munka minden fázisának kipróbálása. Ennek szellemében a nyári iskola hivatalos nyelve az angol volt. A mérési feladatok leírása, az elméleti emlékeztető és a berendezés mérőeszközeinek bemutatása is angolul készült el. A modern kísérleti fizika nélkülözhetetlen eszköze a számítástechnika. A mért adatok kiértékelése a diákok által önállóan fejlesztett programokkal történt. A fúziós közösségben általánosan használt programozási nyelv az IDL (*Interactive Data Language*), ezért ennek elsajátítása is fontos részét képezte a kurzusnak.

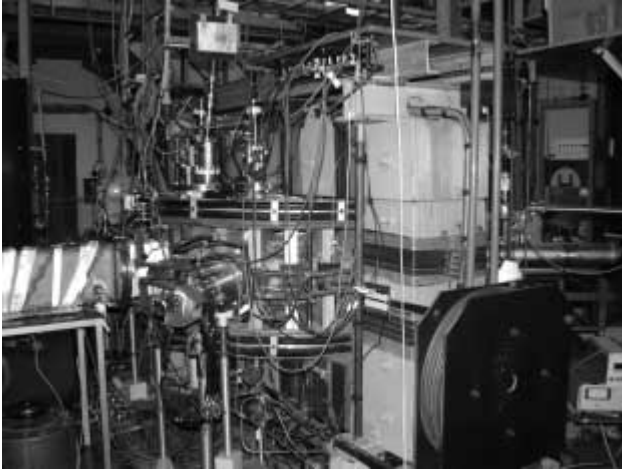
Így a kiértékeléshez szükséges szoftverfejlesztés folyamatát, annak minden nehézségével együtt, meg kellett ismerni. Míg 2003-ban csak magyar hallgatók vettek részt a képzésen, 2004-re nemzetközivé bővült (2 magyar, 2 szlovák, 1 cseh, 1 bolgár, 1 észt, 1 belga és 2 egyiptomi hallgatóval, 3–3 magyar és cseh oktatóval).

A nyári iskolák diákjait három mérőcsoportba osztották, minden csoportot egy cseh és egy magyar kutató segítette. Az iskola lezárásaként minden csoportnak angol nyelvű beszámolót kellett tartania az elvégzett mérésekről, amelyet rövid diszkusszió követett. Írásunkban ezeket a méréseket ismertetjük, és néhány példán keresztül bemutatjuk az eredményeket.

A nyári iskola létrejöttének bemutatása után essék néhány szó a fúzióról és a CASTOR berendezésről. Fúziónak nevezzük azt a magfizikai folyamatot, melynek során könnyű atommagok (általában a hidrogén izotópjai) egyesülnek nehezebb magokká (ld. *Zoletnik Sándor* cikket ebben a számban). A tokamak jelenleg a legfejlettebb olyan berendezés, amelyben magas hőmérsékletű (10^8 K) plazmát lehet létrehozni fúziós kísérletek céljára. A CASTOR tokamak TM-1MH néven a szovjet–csehszlovák tudományos együttműködés keretében 1977-ben került Prágába, a CASTOR nevet az 1983–84-es átépítés után kapta. Ez kis méretű berendezésnek számít, jellemző adatait a *táblázat* tartalmazza.

A CASTOR és a hozzá hasonló kisméretű tokamak berendezések célja nem a fúzió megvalósítása, hanem a mágnesesen összetartott plazmában fellépő jelenségek vizsgálata. A kis tokamakok létjogosultságát az adja, hogy az alapvető fizikai folyamatok közül sok független a létrehozott plazma méretétől. Legfőbb előnyük, hogy a diagnosztikai eszközök, valamint a kísérletek körülményei rugalmasan változtathatók, ami nagyban elősegíti az oktatási célú felhasználásukat. Ezzel szemben például a ma működő legnagyobb tokamak, a JET (*Joint European Torus*) kísérleteinek paramétereit már hónapokkal korábban rögzítik.

<i>táblázat</i>	
A CASTOR tokamak jellemző adatai	
Nagy sugár	$R = 0,4$ m
Kis sugár	$A = 0,085$ vagy $0,060$ m
Toroidális mágneses mező	$B_t < 1,5$ T
Plazmaáram	$I < 25$ kA
Kisülés ideje	$t < 50$ ms
Plazmasűrűség	$n_e = 0,2-3,0 \cdot 10^{19}$ m ⁻³
Elektron-hőmérséklet	$T_e < 200$ eV
Ionhőmérséklet	$T_i < 100$ eV



1. ábra. A CASTOR tokamak Prágában. Jól látható a tóruszt körülölelő vasmag. A vákuumkamra falához különböző diagnosztikai eszközök csatlakoznak.

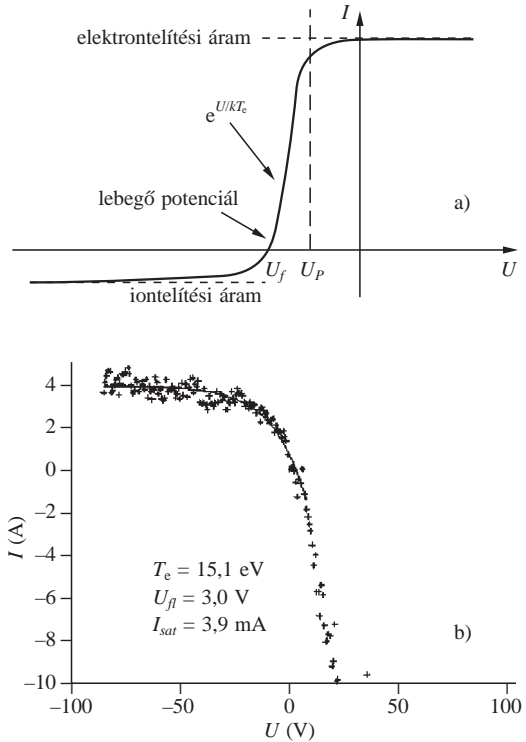
A SUMTRAIC nyári iskola folyamán a méréseket különböző plazmaparaméterek mellett végeztük. A mérési feladatokat három fő csoportra lehet osztani: plazmaparaméterek meghatározása Langmuir-szondákkal, plazmafluktuációk vizsgálata és spektroszkópiai mérések.

Langmuir-szondával végzett mérések

A fúzióhoz szükséges nagyon magas hőmérsékletű plazma fizikai tulajdonságait nehéz pontosan megmérni, a mérések speciális eszközöket igényelnek, ezért csak különböző technikák együttes alkalmazásával kaphatunk átfogó képet a plazma aktuális állapotáról. A tokamak diagnosztikai rendszerének széleskörűen alkalmazott, fontos eleme a Langmuir-szonda.

A Langmuir-szonda felépítése rendkívül egyszerű: egy kicsi fémcsúcs egy szigetelt tartóban. A plazmában lévő szonda csúcsa és a vákuumkamra fala közé kapcsolt feszültséggel az elektronokat vagy az ionokat gyűjtjük. Az elektródra kapcsolt feszültség függvényében ábrázolva az azon átfolyó áramot kapjuk a jellemző karakterisztikát. A plazma számos fontos jellemzője meghatározható a karakterisztika méréséből, ilyen a lebegő potenciál, az elektronsűrűség és az elektron-hőmérséklet. Ezeknek mennyiségeknek az ismeretéből információkat szerezhetünk komplexebb folyamatokról is, úgymint a részecskék diffúziója vagy a plazmaturbulencia. Ez utóbbi a plazmaparaméterek fluktuációiban nyilvánul meg.

A szonda nagy előnye egyszerűsége mellett, hogy megfelelő elektronikát alkalmazva akár mikroszekundumos időfelbontás is elérhető, ami lehetővé teszi a fluktuációméréseket is. Az előnyök mellett azonban meg kell említeni ennek a diagnosztikának a korlátait. A Langmuir-szondákat fizikai tulajdonságaik miatt elsősorban a plazma szélénél végzett mérésre használhatjuk. Csak a kisebb berendezésekben van reményünk a plazma mélyebb rétegeinek viselkedését nyomon követni anélkül, hogy a méréssel a plazmában lejátszódó folyamatokat jelentősen megzavarnánk. Ha nagyobb méretű plazmában szeretnénk elhelyezni egy megfelelően kis zavart

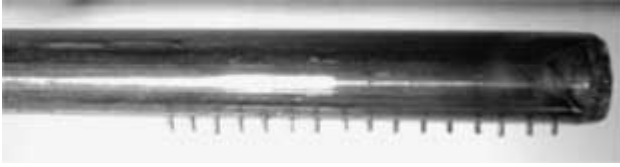


2. ábra. A Langmuir-szonda a) elméleti és b) mért karakterisztikája. A szondára kapcsolt feszültség függvényében mértük a rajta átfolyó áramot. A mérésben az iontelítési és az exponenciális szakaszt vizsgáltuk.

okozó, ámde elég messze benyúló szondát, akkor a szondán megjelenő hőterhelés elviselésének fizikai korlátjába ütközünk.

Vizsgáljuk meg a szonda karakterisztikáját! A 2. ábrán látható viselkedést kvalitatíve könnyen magyarázhatjuk az alábbiak alapján: a plazmában az elektron- és ionhőmérséklet különböző lehet, de ebben a mérésben azt feltételezzük, hogy a két hőmérséklet közel van egymáshoz. Ez azt eredményezi, hogy az ionok sebessége (az ismert tömegarány miatt) sokkal kisebb az elektronokénál. Amennyiben az elektródára nem kapcsolunk feszültséget, a mért áram főleg az elektronok becsapódásából származik. Nézzük először azt az esetet, amikor a szondán nem folyik áram! A szonda a becsapódó elektronok hatására negatív töltésűvé válik. A kialakuló negatív potenciál eltéríti az elektronokat, és közel állandó töltés alakul ki. Ez a feszültség a plazma potenciálját jellemzi, és lebegő potenciálnak nevezzük. Mivel csak a szonda vége nincs szigetelve, ezért az így kapott érték a plazma lokális jellemzője. Most vizsgáljuk ezt az elrendezést feszültség és áram jelenlétében! Három lényegesen különböző szakasza van a karakterisztikának.

Iontelítési szakasz: Ha a plazmapotenciálnál lényegesen negatívabb potenciálra kapcsoljuk az elektródát, akkor az elektronokat taszítani fogja, és csak ionok becsapódásából származik áram. A szonda kis mérete és az ionok lassúbb mozgása miatt közel állandó számú ion csapódik a fémcsúcsba. Ezt a diagramon a feszültségtől független áram formájában látjuk. Mivel a plazma jó közelítéssel semleges, ezért a mérhető iontelítési (szaturációs) áram az elektronsűrűséggel és az elektron-hőmérséklet gyökével lesz arányos.



3. ábra. A CASTOR tokamak Langmuir-szondasorának képe. Az egész szondasoron csak a fémtüskék (szondák) hegye nem szigetelt. A fent látható 16 tüskén felváltva mérünk iontelítési áramot, illetve lebegő potenciált.

$$I_{si} = n_e \sqrt{T_e}.$$

Ez akkor igaz, ha az elektron Larmor-sugara¹ kisebb, illetve az ion Larmor-sugara nagyobb, mint a szonda mérete.

Elektronelítési szakasz: Ha a szondára elegendően nagy pozitív potenciált kapcsolunk, akkor túl nagy áram indul, hiszen gyorsan magához vonzza a környezetében lévő szabad elektronokat. A szonda általában nem tudja elviselni az elektronelítési áramot, ezért ebben a tartományban nem működtejtük.

Exponenciális szakasz: A két telítési áram közötti karakterisztika szakaszt egy exponenciális görbe köti össze. Az exponens segítségével az elektron-hőmérsékletet határozhatjuk meg, az alábbi arányosság szerint:

$$I \sim \exp\left(\frac{U}{k T_e}\right).$$

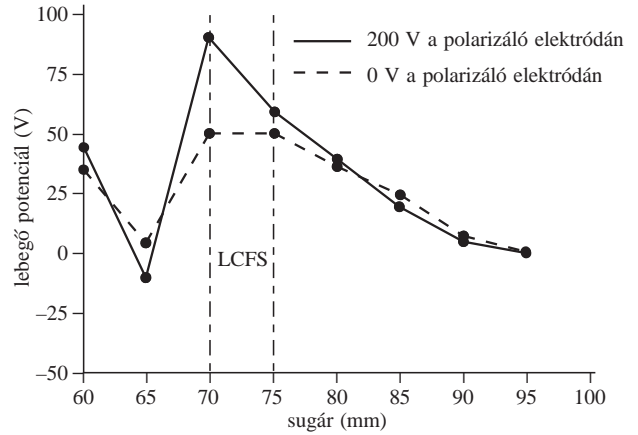
Langmuir-szondák a CASTOR tokamakon

A Langmuir-szondákat a valós mérésekben általában csoportosan alkalmazzák. A nagyobb berendezéseken a plazmát határoló limitereken² a plazma szélének paramétereit mérik velük. A CASTOR-on, a tórusz kis mérete ($R = 40$ cm, $r = 8,5$ cm) miatt, a szondákkal belső plazmarétegek tulajdonságait is mérhetjük. Ez úgy valósítható meg, hogy a szondákat sorban helyezzük el egy vékony szigetelő rúdon, és a rudat a vákuumcső falára merőlegesen, sugárirányba állítjuk, ahogy ezt a 3. ábrán láthatjuk.

Egy valóságos szonda 10 mm hosszú és 0,6 mm átmérőjű. A mérőeszköz 16 szondát tartalmaz. Mint fentebb láttuk, a szondán iontelítési szakaszban mért áram az elektronsűrűség és elektron-hőmérséklet függvénye, míg az exponenciális szakaszban működő szondával az elektron-hőmérsékletet mérhetjük. Ha két szomszédos szondát a fenti két különböző szakaszban üzemeltetünk, akkor a két szondából a helyi sűrűség és hőmérséklet kiszámítható. Feltételezve, hogy két szomszédos szonda között a plazmaparaméterek közel állandóak. E mérési elv alapján a szondasorral a plazma radiális sűrűség- és hőmérsékletprofilját mérhetjük meg. A szondákkal való mérés egyik feladata ezeknek a profiloknak a meghatározása különböző kísérleti körülmények között.

¹ Mágneses térben mozgó töltött részecskékre ható Lorentz-erő körpályára kényszeríti a részecskéket, ennek a körpályának a sugarát Larmor-sugárnak nevezzük.

² A plazma szélét korlátozó berendezés.



4. ábra. A plazma lebegő potenciálja a kissugár függvényében különböző, a polarizáló elektródára kapcsolt feszültségek esetén. Az elektromos tér radiális eloszlásának megváltoztatása az elektródára kapcsolt feszültséggel lehetséges, amint azt a fenti ábrán láthatjuk.

Profilmérési eredményeink

Az első mérési sorozattal a plazmaparaméterek időbeli stabilitását ellenőriztük. A kísérletek közben a tokamak beállításait nem változtattuk, így vizsgáltuk a plazma állapotának reprodukálhatóságát. A második mérési sorozat során a plazmában hajtott áram értékét változtattuk, annak hatását vizsgálva a Langmuir-szonda jelein. Megállapítottuk, hogy az áram értékének növelésével a plazma potenciálja csökken. A következő mérések során a plazma sűrűségét változtattuk. A Langmuir-szondákkal kimutattuk a plazma sűrűségének változását, más független mérésekkel jó egyezésben.

A CASTOR tokamak egyik kísérleti eszköze egy a plazmába benyúló, polarizáló elektróda (*biasing* elektróda), amelyre feszültséget kapcsolva az elektromos tér változtatható a plazmában. Ennek hatására a LCFS-nél³ olyan töltésáramlás alakul ki, amely a plazmapotenciál gradiensét megnöveli. A plazmakisülés időtartamának csupán a második felében kapcsoltunk feszültséget erre a polarizáló elektródára, így mindkét állapotot megfigyelhettük ugyanazon kisülés során. A polarizáló elektródára kapcsolt feszültség változtatásával megmérhettük, hogyan változik a potenciál a LCFS-en kívül és belül.

Jól látható, hogy a magplazma és a széplazma határán a potenciál drámaian megváltozik. A polarizáló feszültség növelésével növekszik a radiális elektromos tér az LCFS-nél (polarizálás nélkül kb. 6 kV/m). Ennek azért van jelentősége, mert megváltoztatja a plazma áramlását, amely hatással van a transzportfolyamatokra is.

A Langmuir-szondák – egyszerűségük ellenére – széles körű, jól használható információt nyújtanak a plazmáról, a jó időfelbontás alkalmassá teszi ezeket a szondákat az eddig nem teljesen megértett plazmaturbulencia vizsgálatára is.

³ A tokamakok mágneses geometriája topológiailag egymásba ágyazott, zárt tóruszokkal közelíthető, melyeket mágneses erővonalak hálózhatnak be. Ezeket a tóruszokat mágneses felületeknek nevezzük. Az LCFS (*Last Closed Flux Surface*) a legkülső zárt mágneses felület a tokamakban.

Plazmafluktuációk

A kísérleti plazmafizikában közismert tény, hogy a plazmában jelen lévő mikroturbulencia – az anomális transzporton⁴ keresztül – meghatározza a plazma energia- és részecske-összetartását. Az utóbbi évek jelentős fejlődést hoztak a realisztikus modellek kidolgozásában és ezek számítógépes szimulációjában. Mindazonáltal a kísérleti eredmények nehezen összehasonlíthatók az elméletekkel, mivel a kísérletekben nem áll rendelkezésünkre egyszerre megfelelő tér- és időfelbontás. A nyári iskola során a plazmaturbulenciát az egyik legegyszerűbb diagnosztikai módszerrel vizsgáltuk, amely az előző fejezetben megismert Langmuir-szondák által detektált fluktuációk analízisén alapul. A plazmafluktuációk időskálája a 10 mikroszekundumos nagyságrendbe esik, ezért a mintavételezés frekvenciájának a MHz-es tartományban kell lennie.

A mérés során két mennyiséget vizsgáltunk, az iontelési áram valamint a lebegő potenciál fluktuációit. A fluktuációk jellemzésére a fluktuációs amplitúdón kívül az auto-, illetve a keresztkorrelációs függvényeket használtuk. A korrelációs függvény két statisztikus mennyiség (amely lehet azonos is – ebben az esetben autokorrelációs függvényről beszélünk) lineáris összefüggőségét jellemzi, melynek definíciója folytonos jelek esetén:

$$C_{ij}(\tau) = \frac{\int S_i(t) S_j(t+\tau) dt}{\sqrt{\int S_i^2(t) S_j^2(t+\tau) dt}},$$

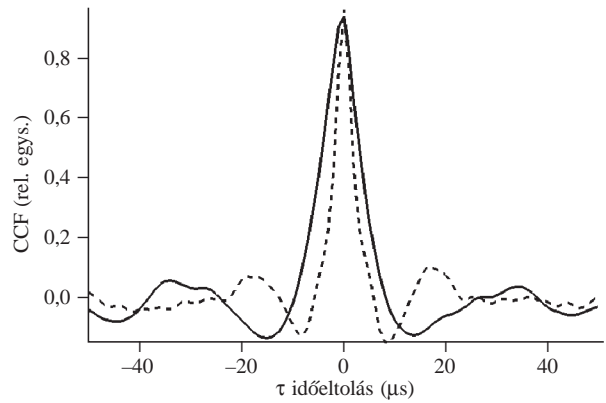
ahol S_i az i -edik csatorna időjele.

Az autokorrelációs függvény féltértékszélessége a turbulens struktúrák élettartamáról ad információt. Két, térben különálló csatorna között kiszámítva a korrelációs függvényt, következtethetünk a struktúrák áramlási sebességének arra a komponensére, amelyet a két csatorna térbeli elhelyezkedése határoz meg.

Az 5. ábrán a CASTOR tokamakban mért sűrűségfluktuációk keresztkorrelációs ($i \neq j$) függvénye látható két, egymástól körülbelül 2 cm-re levő szonda között. A pontozott vonal azt az esetet mutatja, amikor a polarizáló elektródára feszültséget kapcsolunk. Jól látható a keresztkorrelációs függvény elkeskenyedése. Ez annak következménye, hogy a nagyobb radiális elektromos térben a plazma turbulens struktúrái gyorsabban mozognak és rövidebb idő alatt haladnak át a mérési ponton.

Spektroszkópia

A plazma sugárzása három alapvető komponensből tevődik össze: fékezési sugárzás, rekombinációs sugárzás és vonalas sugárzás. A fékezési sugárzás úgy jön létre, hogy a plazmában mozgó szabad elektronok szóródnak az ionok elektromos terén. Intenzitása arányos a plazma hőmérsék-



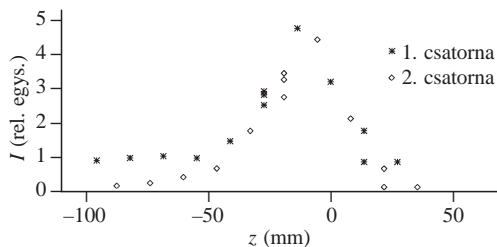
5. ábra. Tipikus keresztkorrelációs függvény (CCF) a CASTOR tokamak szélén

letének gyökével, a plazma sűrűségének és a plazmában előforduló ionok rendszámának négyzetével. A fúziós plazmák fékezési sugárzása nagyrészt a röntgentartományba esik, spektrális eloszlása $\exp(-E/kt)$. A rekombinációs sugárzás akkor jön létre, amikor egy szabad elektron kötött pályára fogódik be. Spektrális eloszlása a kötési energia felett megegyezik a fékezési sugárzásával. Különösen sok információt hordoz a plazmáról a vonalas sugárzás, amely egy gerjesztett elektron spontán legerjesztődésével jön létre. A különböző elemekhez tartozó vonalak intenzitásából következtetni lehet a plazma összetételére, a vonal szélessége a hőmérsékletre jellemző (Doppler-kiszélesedés), a vonal felhasadása és eltolódása a mágneses és elektromos terek erősségéről (Stark-, Zeeman-effektus) és az ionok lokális sebességéről (Doppler-eltolódás) hordoz információt.

A CASTOR tokamakban a látható fény tartományában három helyen lehet mérést végezni fotoelektron-sokszorozó segítségével. A mérőberendezés egy látóvonal mentén integrált sugárzást detektál. Ebben a típusú mérőeszközben a plazma sugárzásából mindig csak egy jellegzetes spektrális vonalat szűrünk ki egy interferencia szűrő segítségével. Két helyen mértük a 656,3 nm-es hidrogén (H_α) vonalat, és egy helyen a 464,7 nm-es szén (C III) vonalat. A mérés előnye a jó időbeli felbontás: 0,1 ms. A H_α vonal intenzitása a látóvonal mentén a semleges atomok beáramlásával, míg a C III vonal intenzitása a szén plazmába történő beporlasztásának sebességével arányos. Úgy találtuk, hogy a nagyobb sűrűségű plazmák erősebben sugároznak mind a H_α , mind a C III vonalon. Ennek valószínűleg az az oka, hogy a nagyobb sűrűségű plazma jobban porlasztja a plazmát határoló polarizáló elektródát.

A plazma fékezési sugárzását a lágyröntgen-tartományban egy látóvonal mentén két félvezető detektorral (SBD) detektáljuk. A detektorok előtt a sugárzást különböző vastagságú alumíniumfóliákkal szűrjük. Az Al-fólia egy kritikus hullámhossz fölött elnyeli a sugárzást. Az átmenet a teljes áteresztésből a teljes elnyelésig folytonos, így a vastagabb fólia kicsit más spektrumot nyel el. A két detektor jelének arányából megbecsülhetjük a látóvonal mentén vett átlagos elektron-hőmérsékletet a mérésnek megfelelő 0,1 ms-os időfelbontással. Ismert radiális profilt feltételezve ebből már kiszámíthatjuk a maximális elektron-hőmérsékletet. Úgy találtuk, hogy a kisü-

⁴ A tokamakokban megfigyelték, hogy a részecske- és energiátanszport felülmúlja a Coulomb-ütközéseket és a mágneses geometriát figyelembe vevő elméleti számítások eredményeit. Az ettől eltérő transzportot anomálisnak nevezik.

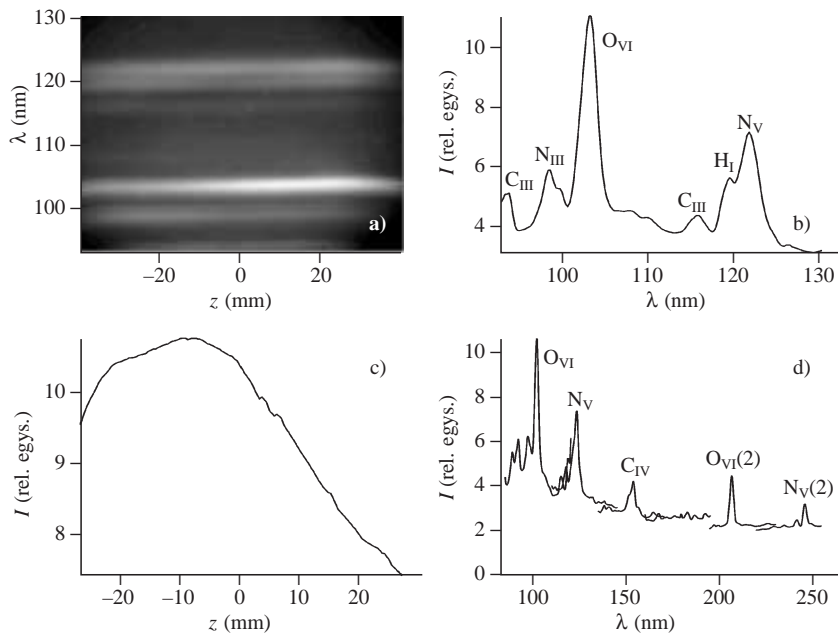


6. ábra. Az XUV monokromátorral mért CV-vonal látóvonal mentén integrált intenzitásának 13, azonos paraméterű lövésből rekonstruált kváziradiális profilja, ahol z a látóvonal magassága a vákuumkamra közepéhez képest és I a detektált intenzitás relatív egységben.

és egy középső stacionárius tartományában a fenti módszerrel becsült átlagos elektron-hőmérséklet megegyezik a plazma vezetőképességéből becsült értékkel.

Az előbbieken leírt két, abszorbens fóliát használó módszerben a szennyező ionok által kibocsátott vonalas sugárzást elhanyagoltuk. A vonalas sugárzás mérésével lehet a hidrogénplazmában található kis mennyiségű magasabb rendszámú szennyezők terjedését vizsgálni. Az egyik legfontosabb szennyező a szén, amit a plazma a vele érintkező grafitfelületekről porlaszt le. Ennek egyik vonalát (C V) méri az XUV monokromátor. A detektálandó vonal az ultralágyröntgen-tartományban található (4,03 nm). Az eszköz érdekessége, hogy a spektrális szűrést és az optikai fókuszálást egyetlen eszközzel, egy szférikus, többrétegű tükörrel (MLM) valósítjuk meg. A detektor egy CsI-bevonattal ellátott mikrocsatornás lapka (MCP), ami egy kétdimenziós felbontást biztosító szekunderelektron-sokszorozó multianód kollektorral. Ez az elrendezés lehetővé teszi nagy intenzitású pontosságú detektálását, így a berendezés képes 0,1 ms-os időbeli felbontással is mérni. Az XUV monokromátorok egy kisüléson belül kicsi a térbeli felbontása, a multianód kollektor 8 csatornája közül 3 használható radiális profil mérésére. (A többi csatornát spektrális csúcs profil mérésére használják.) Ezek 3 egy-

7. ábra. A VUV képalkotó spektrométer adatainak kiértékelése. a) a CCD-kamera képe, b) a spektrum $z = 0$ mm-nél, c) a vonalprofil $\lambda = 103$ nm-nél, d) a teljes spektrum.



mástól ~ 10 mm-re futó $\sim 0,1$ mm széles sugárban, a látóvonal mentén integrált sugárzást detektálnak. A kisülések között az egész eszközt meg lehet dönteni egy kézi emelő segítségével, így egy állandó körülmények között végrehajtott mérési sorozattal fel lehet venni egy kváziradiális eloszlást. A 6. ábrán látható profilt két csatorna felhasználásával mértük. Ezen jól kirajzolódik a plazma alakja, és egyértelműen látszik, hogy a plazma a tokamakban a vákuumkamra alja felé tolódott el ~ 10 mm-rel. (Ezt a hibát más méréssel is észlelték, és a 2004-es SUMTRAIC alatt már aktív plazmapozíció-vezérléssel kiküszöbölték.)

A VUV képalkotó Seya-Namioka-spektrométer talán a legtöbb lehetőséget magában hordozó spektrometriai mérőeszköz a CASTOR tokamakban. A spektrális felbontást és az optikai leképezést – az XUV monokromátorhoz hasonlóan – egyetlen eszköz, egy szférikus optikai rács biztosítja. A jeldetektálást megelőző erősítést úgy oldották meg, hogy az UV-fényt először elektronokká alakítják egy CsI-rétegen, majd a jelet egy mikrocsatornás lapka (MCP) segítségével erősítik. A megsokszorozott elektronokat tovább gyorsítják, és azok egy szcintillátorba csapódva jelenítik meg a felerősített képet. Ezt a képet egy 195×156 pixeles CCD-kamerával detektálják. Egy ilyen kép látható a 7. ábra bal felső sarkában. A függőleges tengelyen a hullámhossz, míg a vízszintes tengelyen a látóvonal magassága látható a vákuumkamra közepéhez képest. Ha kiválasztunk egy függőleges metszetet, kirajzolhatjuk az adott látóvonal mentén felintegrált spektrumot (7. ábra jobb felső kép). Ha egy vízszintes metszetet rajzolunk ki, az adott vonal radiális profilját kapjuk (7. ábra bal alsó kép). Egy felvétel ~ 70 mm térbeli és ~ 35 nm hullámhossztartományt fog át, ám mindkét tartomány állítható a kisülések között, és azonos paraméterű lövésekben végzett mérésekkel felvehetőek kváziprofilok és kvázispektrumok. A 7. ábra jobb alsó sarkában is egy ilyen „összeollózott” spektrumot látunk, ezen már megjelen-

lennek a másodrendű vonalak. Az általunk végzett mérések a kisülések közepén egy 5 ms tartamú expozícióval készültek, de lehetséges volna egy lövés alatt több felvételt is készíteni, így az eszköz – bár erősen korlátozott felbontással – alkalmas időbeli változások követésére is. A rendelkezésre álló rövid idő miatt a spektrumokon csak a csúcsok azonosításáig jutottunk el. Egy alapos kvantitatív kiértékeléssel arra vonatkozóan is le lehetne vonni következtetéseket, hogy az egyes szennyezőelemek koncentrációja hogyan függ a plazma sűrűségétől, hőmérsékletétől és egyéb paramétereitől, mindezt térben is felbontva.

A bal felső ábra a CCD-kamera képe, ahol z a látóvonal magassága a vákuumkamra közepéhez képest, és λ a hullámhossz. A jobb felső ábra spektrum, avagy a kamera képének függőleges metszete, ahol I a detektált intenzitás relatív egységben. A bal alsó ábra a

103 nm-es vonal radiális profilja, míg a jobb alsó ábra 6 azonos paraméterű lövésből összerakott spektrum.

Kitekintés

Személyes tapasztalataink alapján állíthatjuk, hogy a későbbi kutatói munkában óriási segítséget nyújtó és máshol meg nem szerezhető tapasztalatokkal gazdagodtunk. Gondoljunk például arra az egyetemi képzésben nehezen megszerezhető tapasztalatra, melyet a nemzetközi csapatban való együttműködés, kommunikáció és az abban való eredményes munka jelent. A kezdeményezés életképességét mi sem bizonyítja jobban, minthogy a 2004-ben megrendezett nyári iskola nemzetközivé bővült.

Az itt képzett kutatók talán a jövő fúziós erőműveinek nélkülözhetetlen szakemberei lesznek. A beszámoló írásának idejekor az ITER (*International Thermonuclear Reactor*), a jövő fúziós erőműveinek előfutára, építésének helyszíne még kérdéses, amely döntés megszületése feltétlenül szükséges a fúziós kutatások további fejlődéséhez.

Irodalom

<http://www.rmki.kfki.hu/plasma/castor/>
<http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/>
<http://www.magfuzio.hu/>
<http://www.rmki.kfki.hu/plasma/>
<http://www.rmki.kfki.hu/~zoletnik/>
<http://server.ipp.cas.cz/~vwei/>

MEGEMLÉKEZÉSEK

EGYETEMI TANÁRI KINEVEZÉS 1935-BEN

Hartmann Ervin
MTA SZFKI

Gyulai Zoltánt 1935-ben nevezték ki egyetemi tanárnak a debreceni egyetemre. A kinevezés nem ment simán. *Medveczky László*, Gyulai akkori hallgatója így ír erről [1]: „A hallgatók között általánosan ismert volt a pletyka, hogy a *Wodetzky* távozásával megüresedett professzori helyre több pályázat futott be. A pályázók közül az akkori szokás szerint az egyetem rangsorolta három személyt terjesztett fel a minisztériumba. A fáma szerint a felterjesztettek között nem szerepelt Gyulai. ... Nincs semmi bizonyítékom arra, hogy ennek a hallgatóság között elterjedt hírnek volt-e valami alapja.” *Tarján Imre* akadémikus, aki Gyulainál Debrecenben doktorált, visszaemlékezéseiben [2] ezt írta: „*Gyulai* 1935-ig működött Szegeden. Ekkor ürrült meg a debreceni katedra, amelyet megpályázott. Többen pályáztak, de a sikert *Gyulai* könyvelhette el. *Gyulai Pohl* [Robert *Wichard Pohl* göttingeni professzort] is tájékoztatta pályázatáról, aki azután véleményét *Gyulai* munkásságáról a kultuszminiszternek is megírta egy levélben. A miniszter végső döntésében nyilván szerepe volt *Pohl* véleményének is.” *Boros János* [3], Gyulainak egy másik debreceni doktorandusza, úgy tudta, hogy Gyulai feleségének (*Grätz Mártának*) egyik rokona volt a pártfogó. Hogyan látta maga Gyulai az akkori helyzetet? Visszaemlékezéseiben [4] a következőket írja:

„Eközben megürrült a *Debreceni Egyetemen* a *Kísérleti Fizikai Tanszék*, mert *Wodetzky Józsefet* – aki csillagász volt – kinevezték *Pestre* a csillagdához. ... Ekkor én megpályáztam a tanszéket. Érdekes, hogy akkor pillanatnyilag úgy nézett ki, hogy ha ezt nem kapom meg, belátható időn belül nem lesz tanszékre kilátásom. Valójában úgy alakult, hogy pár év múlva több lehetőség volt, mert *Pécsen* megbalt *Robrer* [László] és *Pesten* megbalt *Tangl* [Károly].

Az élet folyton változik, és soha sem lehet kiszámítani mi lesz. – Én megindítottam az előkészületeket. A pályázatra 7–8 jelentkező akadt. Komoly ellenfél volt Schmid Rezső, aki Pogány [Béla] mellett a Spektroszkópiai Intézetben dolgozott. Kiváló spektroszkópus. Másik ellenfél Császár Elemér, aki elméleti fizikából volt magántanár Pesten. Császár szerette volna, ha őt megbírnák Debrecenbe, de mikor ez nem sikerült, nem is adta be a pályázatát. – Az én pártfogóm Tangl volt, Ortway [Rudolf] és Pogány Béla, aki már a Műegyetemen volt. Az ilyen pályázatoknál mindenki megmozgat mindent. Én sebová sem mentem, hanem Tanglra bíztam mindent, vagyis én kizárólag a tudományos eredményeimre támaszkodtam. Úgy sejtem, hogy Ortway írt Pohlnek, hogy valami formában adjon véleményt. A dolog vége az volt, hogy amikor aktuális volt, Tangl, Ortway és Pogány személyesen felmentek a miniszterhez, és ott leadták véleményüket. Erre fel a kinevezésem meg is történt 1935 nyarán, talán augusztus hónapban.

Mikor a pályázat ment, én még Szegeden ballottam, hogy Ravasz [László, református püspök] azt mondta, hogy ha Széll Kálmán csak harmadik helyen is jelölést kap, ő feljogosítva érzi magát a Kormányznál minden tekintélyét latba vetni. Ilyen bizonytalan volt az én kinevezésem. Az én erősségem az volt, hogy a tanszék Kísérleti Fizikai Tanszék volt, viszont Széll Kálmán elméleti fizikus volt. Sőt régebben, mikor végzett, neki fel volt ajánlva a tanársegédi állás, de azt ő nem fogadta el, hanem elment a Bethlen családhoz öt évre nevelőnek. ... Az 5 év után kinevezték a kolozsvári kollégiumba tanárnak. ... Széll Kálmán egyénileg igen kellemes, udvarias és elegáns ember volt. Tehát igen jó benyomást gyakorolt környezetére. Ez volt a háttere annak, hogy az én pályázatom esetében neki református oldalról erős pártfogói voltak.