

ták, hogy a több száz méter vastag, ~6 km² kiterjedésű másodlagos kőzet kiválóan alkalmas nukleáris tárolóhely létesítésére [14]. A legkedvezőtlenebb – nedvesített – anyagmintákon ¹²⁵I- és más izotópokkal végzett szorpció és diffúziós vizsgálatok 10⁻¹⁰ m/s diffúziósebességet mutattak, ami 10–100 m / 1000 év migrációs sebességet jelent [15]. Ez azt jelenti, hogy ha mindenféle műszaki gát nélkül, egyenesen az agyagba helyeznénk el a nukleáris hulladékot, akkor ezer év alatt kevesebb mint 100 méterre távolodna csak el a helyétől, tehát biztosan nem érné el a talajvíz szintjét.

A nukleáris hulladékok határfelületek közötti kicserélődési mechanizmusának nyomjelzés-technikai módszerekkel történő vizsgálatát a szerző a *Radiotracer Studies of Interfaces*, 3 című könyv 10.2 fejezetében tekintette át [16]. A feldolgozatlan, a kémiai reprocesszálást követő és a kiégett fűtőelemek kezelése (transzmutáció) utáni nukleáris hulladékok elhelyezése és hosszú idejű tárolása során felmerülő kérdések irodalmi tapasztalataira helyeztünk hangsúlyt.

Következtetések

Nemzetközi rendezvények elemzése alapján az alábbi területekre különös figyelmet és jelentős kapacitást kell fordítani tudományos és fejlesztési kísérletekben, valamint az eredmények ipari léptékű megvalósításában:

- Az elválasztási (particionálási) és transzmutációs folyamatok olyan irányú továbbfejlesztése, hogy megte-remtődhessen az összes aktinida (U, Np, Pu, Am és Cm) visszanyerése és újrafeldolgozása a hasadási termék és radiotoxikus anyagtartalom oly mértékéig, hogy a visszamaradó véghulladék radioaktivitása már pár száz év alatt drasztikusan lecsökkenjen.

- Nukleáris mérések a transzmutációs eljárásokban szereplő magreakciók hatáskeresztmetszetének minél pontosabb megismerésére.

- A mély geológiai formációkban történő elhelyezéskor a hosszú idejű tárolás során fellépő felületi kémiai reakciók által kialakuló anyagáramlás követése, kiegészítve a környezetvédelmi problémák megoldására irányuló vizsgálatakkal. A nukleáris hulladék tárolási körülményeinek tökéletesítése, és a feldolgozás újabb lehetőségeinek keresése.

Irodalom

1. J. HIRLING, O. PAVLIK: *Infra-Red-Heated Evaporator System for Concentration of Radioactive Effluents* – Proc. Symp. on Management of Low- and Intermediate Level Radioactive Wastes, Aix-en-Provence, IAEA, 773, 1970
2. VERES Á.: *Nukleáris létesítményekben keletkező kis és közepes aktivitású, radioaktív hulladékok feldolgozásának és elhelyezésének problémái* – Energia és Atomtechnika 18 (1974) 366
3. FEHÉR L., FÉNYES GY., TORDAI GY.: *Radioaktív hulladékfeldolgozó és -tároló létesítése* – Izotóptechnika 17 (1974) 177
4. V.D. KAZARITSKY et al. – Nucl. Instr. Meth. In PR, A414 (1998) 21
5. T. TAKIZUKA: *Status of Nuclear Transmutation Study* – JAERI-Conf. 99.003, 150, 1999
6. T. SEKINE, K. YOSHIHARA, L. LAKOSI, Á. VERES: *Integral Cross Section of the ⁹⁹Tc(γ,γ^{99m}Tc) Reaction in the 15–30 MeV Energy Region* – Appl. Radiat. Isot. 42 (1991) 149
7. VERES Á., LAKOSI L., SÁFÁR L.: *Nukleáris hulladékok átalakítása fűkezési sugárzással* – Fizikai Szemle, 50 (2000) 399–402
8. T. BELGYA, G.L. MOLNÁR, ZS. RÉVAY, J.L. WEIL: *Determination of thermal neutron capture cross sections using cold neutron beams* – 10th Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. Techn., Sept. 26 – Oct. 1, 2004, Santa Fe, New Mexico, AIP, 2005, in print
9. G.L. MOLNÁR, T. BELGYA, Z. RÉVAY et al. – J. Radioanal. Nucl. Chem. 2005, in print
10. T. BELGYA – in RIPL-2 Handbook, (ed. M. Hermann) IAEA, 13, 2004
11. International Atomic Energy Agency: *Treatment and Storage of High-Level Radioactive Wastes* – Proc. Symp. Vienna, IAEA, 1963
12. Proc. 5th Workshop on Radionuclide Retention in Geological Media, (Oskarshamn, Sweden 7–9 May 2001) OECD, 2002
13. B. GRAMBOW, A. LOIDA, E. SMAILOS: *Long-term stability of spent nuclear fuel waste packages in Gorleben salt repository environments* – Nucl. Technology 121 (1998) 174
14. P. ORMAI, F. FRIGYESI, I. BENKOVICS, G. ÉRDY-KRAUSZ, L. KOVÁCS, GY. BÁRDOSY: *Hungarian Approach for the Final Disposal of High Radioactive Waste* – Chapter 12, in Geological Problems in Radioactive Waste Isolation (ed. P. Whitespoon) 113, 1998
15. K. LÁZÁR: *Study of migration of radionuclides in claystone considered as a prospective media for nuclear waste disposal* – IAEA-TECDOC-1177 (2000) 57
16. Á. VERES: *Environmental problems* – Chapter 10.2, in Radiotracer Studies of Interfaces 3 (ed. G. Horányi) Elsevier 359–404, 2004

TRANSPORT-RELEVÁNS FLUKTUÁCIÓK MÉRÉSE A WENDELSTEIN 7-AS FÚZIÓS BERENDEZÉSEN

Pokol Gergő, Pór Gábor
BME Nukleáris Technika Tanszék
Zoletnik Sándor
KFKI-RMKI Plazmafizikai Főosztály

Anomális transzportjelenségeket vizsgáltunk a Wendelstein 7-AS sztellarátoron az 1/3 plazmaszéli rotációs transzformációérték környezetében mért jó és rossz összetartású állapotok közötti átmenetben. Ebben az átmenetben a mágneses térszerkezet kismértékű változására

a plazma energiaösszetartási ideje kétszeresére változik. A jó és rossz összetartású kísérletsorozatokról származó, különböző fluktuációs diagnosztikák jelei közül a Mirnov-szondákból, a LOTUS kollektív lézerszórás kísérletből és a lítiumnyaláb-emissziós spektroszkópiából (Li-BES) származó információk közötti korrelációt vizsgáltuk. Az adatok feldolgozását a hagyományos korrelációs módszerek mellett folytonos idő-frekvencia transzformációk és

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

korrelációs technikák ötvözésével végeztük. Bemutatunk jó és rossz összetartású eseteket, és az eredmények alapján egy empirikus anomális transzportmodellt építünk fel.

Bevezetés

A fúziós plazmafizikán belül kulcsfontosságú az anomális transzportfolyamatok vizsgálata. A Wendelstein 7-AS sztellarátoron az $1/3$ plazmaszéli rotációs transzformáció érték közelében mért jó és rossz összetartású állapotok közötti átmenet [1] jól mutatja az anomális transzportjelenségek rotációs transzformációra való érzékenységét. A plazmaszéli rotációs transzformáció (τ_a) kismértékű változására a plazma az energia-összetartási idő kétszeresre növekedésével reagál. Jó az összetartás, ha $\tau_a = 0,344$, míg $\tau_a = 0,362$ esetében már rossz összetartást kapunk. Ebben a cikkben ezt az átmenetet tanulmányozzuk a MIR-1 poloidális Mirnov-szondákból kialakított gyűrű által detektált mágneses fluktuáció jeleinek feldolgozásával, valamint azzal, hogy kapcsolatot keresünk más transzportreleváns diagnosztikák jeleivel.

A Mirnov-szondajelemben látható felvillanásokat a tranziens magneto-hidrodinamikai (MHD) módusokkal hozták kapcsolatba. Régebbi feldolgozások során [2] azt találták, hogy ezek a tranziens MHD-módusok radiálisan lokalizáltak, és valószínűleg poloidális struktúrájuk van [3].

Korábbi megfigyelések során a következő, valószínűleg transzportjelenségekkel összefüggő tranziens jelenségeket találták a diagnosztikai jelekben:

- Felvillanások a Mirnov-szondák által mért poloidális mágneses tér fluktuációkban a 10–100 kHz frekvenciatartományban 100 μ s körüli karakterisztikus időtartammal [3, 4].

- Moduláció a LOTUS kollektív lézerszórással [5] mért milliméter nagyságrendű sűrűségfluktuáció amplitúdójában. Ezen modulációk karakterisztikus autokorrelációs ideje is 100 μ s körüli [6].

- Centiméter nagyságrendű lapulások az elektron-ciklotronemissziós spektroszkópiával mért hőmérséklet-profilban. A kapcsolódó hőmérséklet-moduláció autokorrelációs ideje szintén 100 μ s nagyságrendű.

- Tranziensek a lítiumnyaláb-emissziós spektroszkópia (Li-BES) által mért sűrűségprofilban. A karakterisztikus időskála szintén a pár 100 μ s-os tartományban van.

Az összes említett perturbáció időskálája 100 μ s nagyságrendű, de az nem egyértelmű, hogy ezek a jelenségek vajon egyetlen okra vezethetők-e vissza, vagy pedig függetlenek egymástól. Néhány megelőző elemzés már utalt arra, hogy kapcsolat van a jelenségek között; például korrelációt találtak a milliméter skálájú sűrűségfluktuációk amplitúdója és a Mirnov-szondajelek időfüggő varianciája között [6]. E tapasztalatok alapján a jelenségek magyarázatára *munkahipotézist* állítottunk fel. Eszerint egy transzportesemény részecskéket és energiát juttat egyik mágneses felületről a másikra, ily módon gyors profilváltozást okoz. A kapott profil eltér az MHD-egyensúlytól, amire a plazma MHD-hullámokkal válaszol. Ezek mágneses komponensét figyeljük meg a Mirnov-szondajelemben, sűrűségkomponensét pedig a Li-BES-mérésekben a

plazma szélénél. Az elektron-ciklotron emissziós spektroszkópiai mérések felfedték, hogy ezek a gyors profilváltozások véletlenszerű helyeken jelennek meg, így különböző MHD-módusokat kelthetnek. Ebben a modellben a tranziens MHD-hullám nem oka a transzportfolyamatnak, csak egy mellékhatása annak.

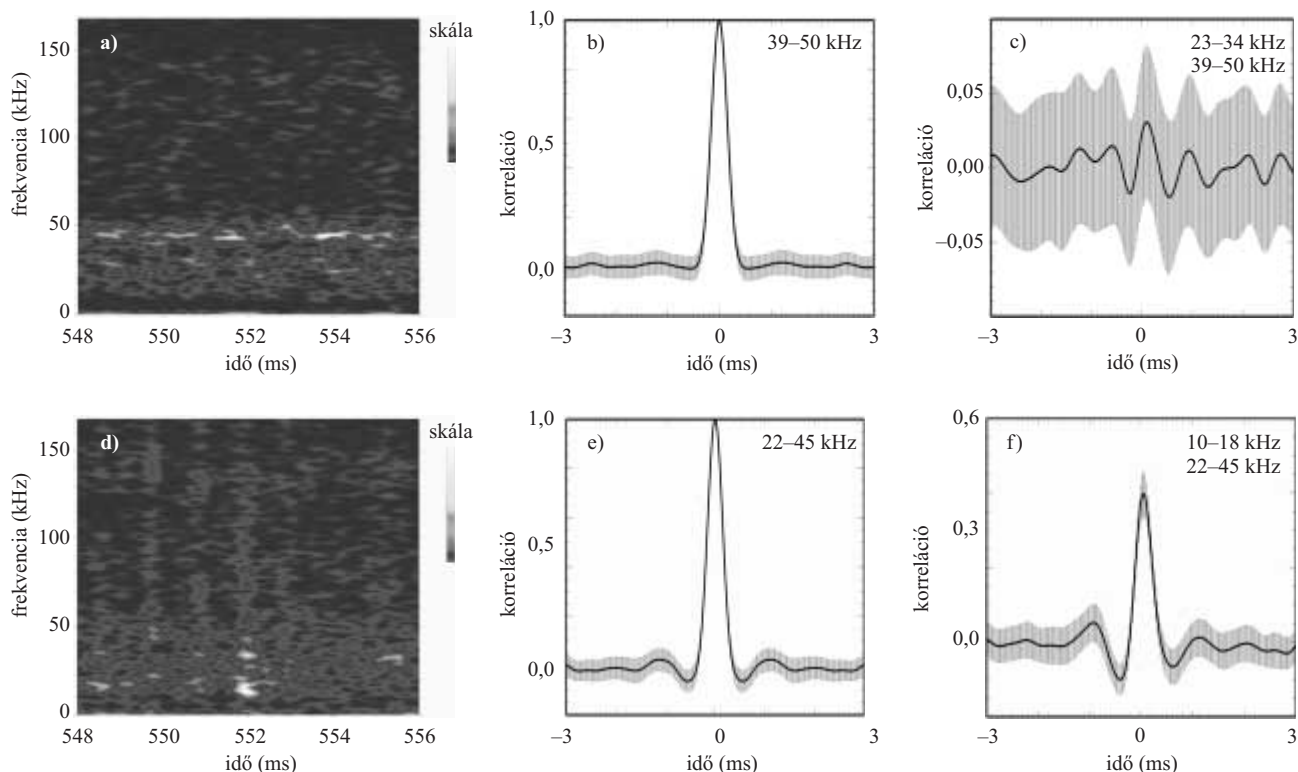
A hipotézis alátámasztására a különböző mért mennyiségek időbeli korrelációját kell megvizsgálni. Bár adja magát, hogy egyszerűen egy korrelációs feldolgozást végezzünk a különböző diagnosztikák jeleire, mélyebben végiggondolva láthatjuk, hogy különböző okoknál fogva ez nem lenne célravezető. Először is a Mirnov-szonda felvillanásai periodikusak, míg a profilváltozások nem azok. Egy kis remegés a Mirnov-szonda jeleinek fázisában teljesen eltüntetheti a korrelációt. Ilyen fázisremegést okozhat például a gerjesztő transzportesemény változó poloidális helye. Abból is nehézség adódik, ha a tranziens profillapulások különböző inverziós sugárral történnek. Ennek eredményeképpen az MHD-felvillanások változva lesznek pozitívan és negatívan korreláltak a lokális sűrűség- és energiaváltozásokkal. Ez szintén eltünteti a korrelációt.

A fenti megfontolásokból látszik, hogy új numerikus módszereket kell kifejleszteni és alkalmazni. A cikk első felében a különböző frekvenciájú mágneses térfluktuációk korrelációs vizsgálatára kifejlesztett új módszert ismertetjük. Következő lépésként az MHD-felvillanások és a sűrűségprofil-változások közötti korrelációs feldolgozást mutatjuk be.

Korreláció a Mirnov-szondajelek sávteljesítményei között

Sztocasztikus jelek feldolgozásának hagyományos módja a spektrumösszetevők becslése, például a jel teljesítménysűrűség-függvényének becslése többnyire valamilyen gyors Fourier-transzformáció (*Fast Fourier Transformation*) alapú technikával. Míg a hagyományos Fourier-transzformáció végtelen hosszúságú Fourier-komponensekre bontja a jelet, addig a folytonos lineáris idő-frekvencia transzformációk, mint a rövid idejű Fourier-transzformáció vagy a folytonos *wavelet*-transzformáció, a jelet lokalizált idő-frekvencia atomokra, waveletekre bontja [7]. Ez nem egyszerű technika, mert a felbontás sikere a megfelelő idő-frekvencia atomok kiválasztásán múlik. A rövid idejű Fourier-transzformáció egyenletes idő-frekvencia felbontása jobban illett a Mirnov-szondajelekre, így ezt a transzformációt használtuk a folytonos *wavelet*-transzformáció helyett.

Első lépésként Gábor-atomokat használva – amelyeket Morlet-waveletnek is hívnak – kiszámoltuk a Mirnov-szondajelek spektrogramját (a rövid idejű Fourier-transzformációból számolt idő-frekvencia teljesítménysűrűség-eloszlást). Ezzel a technikával az *1.a* és *1.d ábrán* láthatóhoz hasonló kétdimenziós idő-frekvencia teljesítménysűrűség-eloszláshoz jutottunk, ami a jel spektrális összetételének időbeli változásaként fogható fel. Az *1.a ábrán* egy jó összetartású plazmakisülés, más néven lövés (52123 sz.), az *1.d ábrán* egy rossz összetartású lövés (52153 sz.) spektrogramjának részletét látjuk. Mindkét esetben leg-



1. ábra. a) és d): spektrogramrészletek fölül a jó és alul rossz összetartású esetben. b) és e): sávteljesítmény autokorrelációs függvények egy-egy kiválasztott frekvenciasávra hasonlóan a jó és a rossz összetartású esetben. c) és f): sávteljesítmény keresztkorrelációs függvények két-két kiválasztott frekvenciasáv között a jó és a rossz összetartású esetben.

alább két jól elkülönülő frekvenciasáv látható, ahol a jel energiája koncentrálódik, ám a frekvenciasávokban a jel nem folytonos, tüskékből és felvillanásokból áll. Az a tény, hogy a Mirnov-szondák jelteljesítménye frekvenciasávokba koncentrálódik, nem új felfedezés. Korábban is állították [8], hogy a változó poloidális plazmában – forgás, és az eltérő módusszámok miatt – a különböző sugáron keletkező módusok különböző frekvenciával jelennek meg. A további feldolgozáshoz frekvenciasávokat választottunk ki a teljes hosszúságú jelek spektrogramjaiból. A sávteljesítményeket a spektrogramok frekvenciasávokon belüli, frekvenciában történő felintegrálásával nyertük.

A [6] tanulmány, amely a milliméter skálájú sűrűség-turbulencia amplitúdójának időbeli változásaival foglalkozik, összefüggést talált a turbulenciában megfigyelt 100 μ s időtartam körüli kitörések és a poloidális mágneses tér perturbációi között. Ezért magától értetődő volt arra gondolni, hogy a sávkorlátozott teljesítmény változásai akkor csatolódnak össze, ha a transzportjelenségek a plazma sugarának elég nagy tartományán keresztülhúzódnak, vagyis a radiálisan lokalizált transzport eseményeknek közös oka van. Rossz összetartású plazmában a transzportfolyamatok felerősödnek, így itt erősebb korrelációt várunk a különböző frekvenciájú MHD-módusok amplitúdóváltozása között, mint jó összetartású esetben.

A fenti elképzelés tükrében először *szimulációval* *teszteltük* a sávteljesítmények szétválasztásának fenti módszerét. Különböző frekvenciájú jelek kitörésszerű burkolókkal történő modulálásával két vagy több frekvenciasávot szimuláltunk. A szimulált jelkomponenseket összeadtuk, és hozzáadtunk egy detektálási fehér zajt.

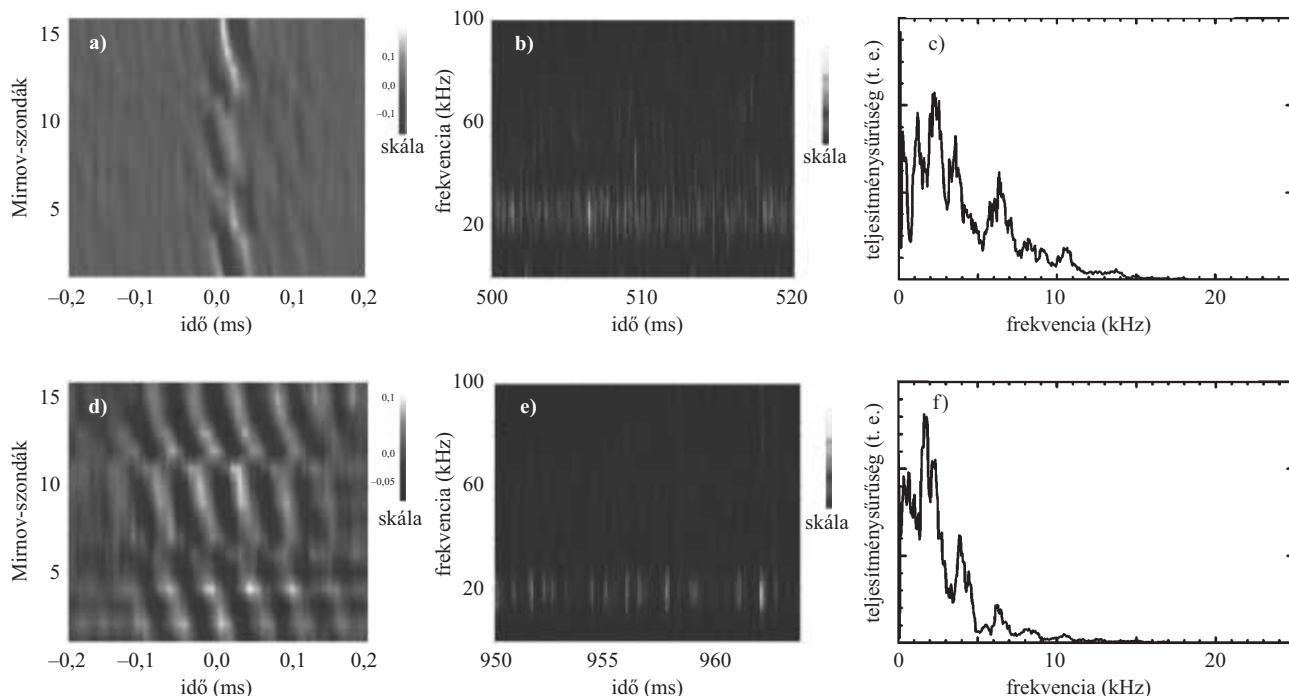
Rövid idejű Fourier-transzformáció használatával a szimulált jelet sikeresen szétválasztottuk összetevőire. A kinyert sávteljesítmény-jelek közötti korrelációt kiszámítva úgy találtuk, hogy a szimulált burkolók keresztkorrelációs függvényét jól visszakaptuk (részletek: [4]-ben).

A sávteljesítmények korrelációs függvényeit az 52123–52175 lövéssorozatban elemeztük. Ez a kísérletsorozat jó és rossz összetartású lövésekből állt négy plazmasűrűség mellett. A sávteljesítmények autokorrelációs függvényeiben is látunk eltérést (1.b és 1.e ábra), de az igazi különbség a különböző frekvenciasávhoz tartozó sávteljesítmények közötti keresztkorrelációs függvényekben mutatkozik. Jó összetartású plazmákban nulla vagy nagyon kis korrelációt találtunk (1.c ábra), rossz összetartású plazmákban viszont 0,5 körüli keresztkorreláció-maximumot látunk (1.f ábra). Az eredmények jól reprodukálódhatnak az azonos paraméterű lövésekre, és kvalitatívan nem függenek a plazma sűrűségétől sem.

A rossz összetartású lövésekben látható korrelációt magyarázhatja a sávteljesítmény-változások közös eredete, vagy esetleg a különböző frekvenciák közötti energiaátadás.

A fluktuációk közös eredete, korreláció a különböző jelek között

A továbbiakban feldolgozott jelek a 47940 számú lövésből származnak, amelyben a plazmát lassan változtatott toroidális áram segítségével folyamatosan vitték át jó összetartású állapotból rossz összetartású állapotba. Ez



2. ábra. a) és d): Keresztkorrelációs függvények a Mirnov-szondajelek és a Li-BES 13-as csatornajele között a 47940 számú lövés jó (fölül) és rossz (alul) összetartású szakaszában. b) és e): a 8. Mirnov-szondajel spektrumai a 47940 számú lövés feldolgozott szakaszaira, jó és rossz összetartású esetekben. c) és f): a 15–30 kHz-es frekvenciasávhoz tartozó 8. Mirnov-szonda sávteljesítmények teljesítménysűrűség-függvényei a 47940 számú lövés feldolgozott szakaszaira, jó és rossz összetartású esetekben.

az $\tau_a = 1/3$ körüli átmenettel kapcsolatban legtöbbet feldolgozott lövés, mert itt áll rendelkezésünkre a legtöbb diagnosztika.¹

Korreláció a Mirnov-szonda- és a Li-BES-jelek között

Korábban a racionális rotációs transzformáció körüli átmenettel kapcsolatos változásokat találtak a Li-BES-diagnosztika által mért sűrűségfluktuációkban [8]. Megmutatták, hogy a Li-BES által és a Mirnov-szondák által mért módus jellegű fluktuációk ugyanazon MHD-hullám különböző komponensei. Ennek egy bizonyítékát láthatjuk a 2.a és 2.d ábrákon a Mirnov-szonda nyers jelei és a Li-BES-diagnosztika 13-as csatornája (amely a plazma legkülső zárt fluxusfelületén belüli térrészen emittált fényt detektálja) között számolt keresztkorrelációs függvényeken.²

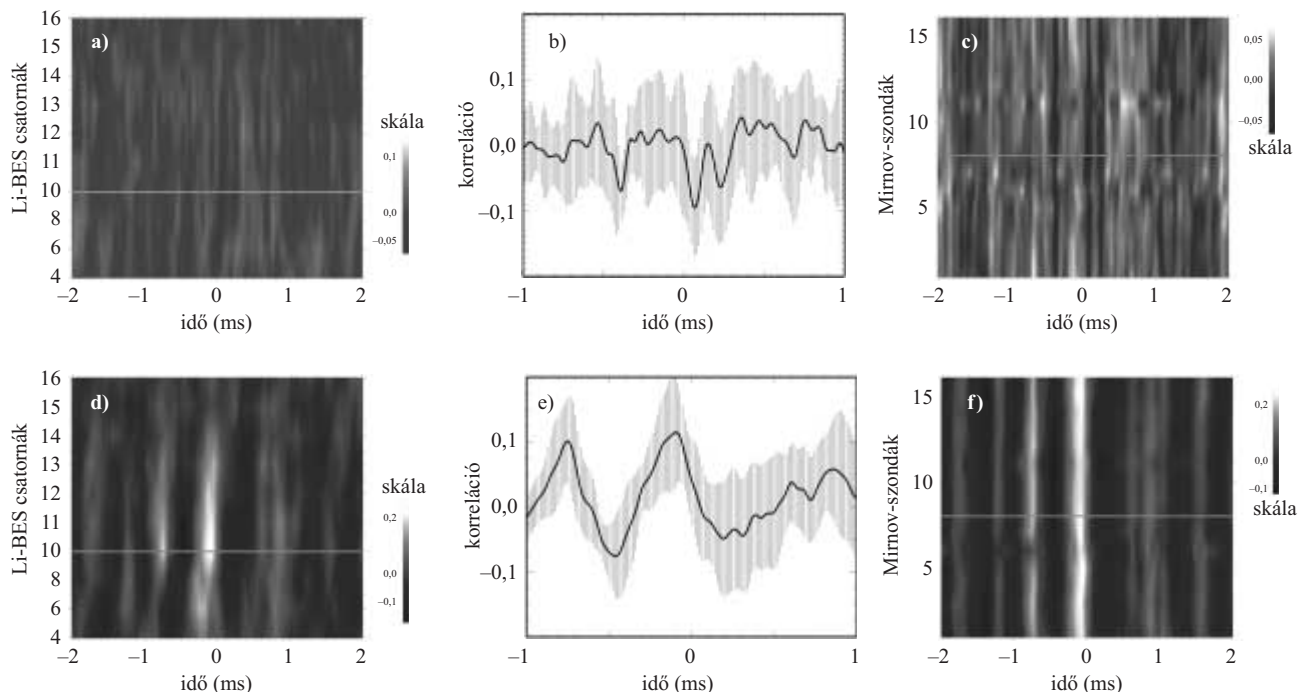
Két jellegzetességet láthatunk ezeken a keresztkorrelációs függvényeken. Az egyik az alapvető hullámzás 0,05 ms körüli periódusidővel, ami a 2.b és 2.e spektrumokon is látható 20 kHz uralkodó frekvenciának felel meg. A 2.a és 2.d ábrákon látható különböző Mirnov-szondák

közötti fázistolást az MHD-módus poloidális forgása okozza. Ezek a jellegzetességek ugyanúgy jelen vannak a jó és a rossz összetartású állapotokban. A különbség a két keresztkorrelációs ábra között a struktúrák relaxációs hosszában van. Rossz összetartású esetben a struktúra a $0 \pm 0,15$ ms tartományban látható, jó összetartású esetben a struktúra sokkal keskenyebb ($\pm 0,04$ ms), és a zérustól kissé eltérő közepű. A kis időeltolás magyarázatával nem foglalkoztunk, mert a két jelet különböző ADC mintavételezte, és a szinkronizálás pontosságát nem tudtuk ellenőrizni. A lecsengés idejében látott különbség egyértelműen szignifikáns és további elemzést kíván. A keresztkorrelációs függvények lecsengésében látható időállandókat a Mirnov-szondajelek spektrumjain is megfigyelhetjük (2.b és 2.e ábrák). Rossz összetartású plazmaállapotban ritkábban jönnek hosszabb felvillanások. A felvillanások gyakoriságára vonatkozó állítás kvantitatívan is vizsgálható a 15–30 kHz frekvenciasáv sávteljesítményének teljesítménysűrűség-függvényével (2.c és 2.f ábra).

Érdeemes megfigyelni a Mirnov-szondák jeleiből a 15–30 kHz frekvenciasávban kapott sávteljesítmények és a Li-BES-jelek között számolt keresztkorrelációs függvényeket (3. ábra). A bal oldali két ábrán (3.a és 3.d ábra) egy kiválasztott Mirnov-szonda (a 8-as számú) és a különböző Li-BES-csatornák közötti keresztkorrelációs függvények láthatók, míg a jobb oldali két ábrán (3.c és 3.f ábra) az egy kiválasztott Li-BES-csatorna (a 10-es számú) és az összes Mirnov-szonda közötti keresztkorrelációs függvényeket ábrázoltuk. Középen (3.b és 3.e ábra) a 8-as számú Mirnov-szonda és a 10-es Li-BES-csatorna közötti keresztkorrelációs függvények láthatók. Megfigyelhető, hogy a jó összetartású állapotban nincs szignifikáns korreláció a jelek között, és a keresztkor-

¹ Figyelembe véve, hogy mely időszakokról álltak rendelkezésünkre kvázistacioner jelszakaszok, a Mirnov-szondajelek Li-BES-jelekkel történő összehasonlításához a 0,50–0,52 s időtartományt választottuk a jó összetartású állapotból, és a 0,950–0,963 s tartományt a rossz összetartású szakaszból. A Mirnov-szondajelek LOTUS-jelekkel történő összehasonlításához a 0,42–0,56 s és a 0,9–0,96 s időtartományokat választottuk értelemszerűen a jó és rossz összetartású állapotokból.

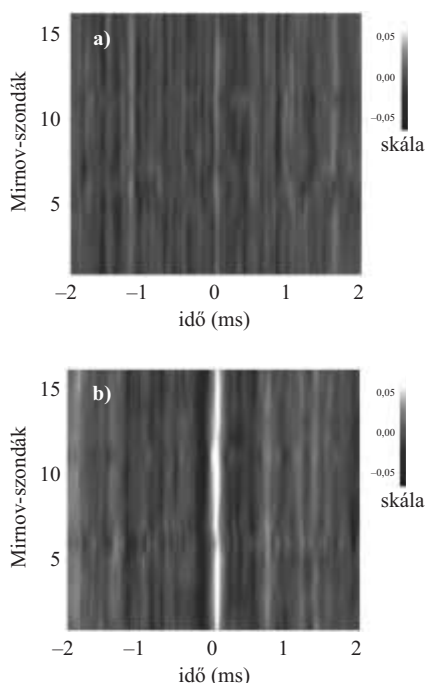
² A keresztkorrelációs függvények számolásában a cikkben található összes ábra esetén azt a konvenciót követtük, hogy az időtengely mindig a Mirnov-szondajel késését mutatja a Li-BES- és LOTUS-jelekhez képest.



3. ábra. Keresztkorrelációs függvények a Li-BES-csatornák jelei és a Mirnov-szondajelek 15–30 kHz-es frekvenciasávhoz tartozó sávteljesítményei között a 47940 számú lövés jó (föül) és rossz (alul) összetartású szakaszában. a) és d): keresztkorrelációs függvények a 8. Mirnov-szondajel sávteljesítménye és különböző Li-BES-csatornák között. b) és e): keresztkorreláció a Li-BES 10-es csatornajele és a 8. Mirnov-szondajel sávteljesítménye között. c) és f) keresztkorrelációs függvény a Li-BES 10-es csatornajele és a Mirnov-szondajel sávteljesítménye között. (Az utolsó zárt fluxusfelület a 10-es Li-BES-csatorna körül található.)

relációs függvények hullámzása a rövid idejű Fourier-transzformáció simításának megfelelő. Rossz összetartás esetén szignifikáns korrelációt találtunk az utolsó zárt fluxusfelület közelében mérő Li-BES-csatornák és az összes Mirnov-szonda sávteljesítménye között.

4. ábra. Keresztkorrelációs függvények a Mirnov-szondák jeleinek 15–30 kHz frekvenciasávhoz tartozó sávteljesítményei és a LOTUS lézerszórás 750 kHz frekvenciájú sávteljesítménye között jó (föül) és rossz (alul) összetartású esetben.



Fontos megértenünk ezen a keresztkorrelációs függvények jelentését. Itt egy adott frekvenciasávban mért mágneses móduszerű tevékenység intenzitásának kapcsolatát vizsgáljuk a hozzá hasonló időskálán változó sűrűségprofil-lapulásokkal, amelyeket a Li-BES-jelekben látunk. Az ily módon számolt keresztkorrelációs függvények tehát azt mutatják, hogy a sűrűségprofil-változások milyen kapcsolatban vannak az MHD-módusok gerjesztődésével.

A 3.e ábrán látható keresztkorrelációs függvény központi csúcsa negatív eltolást mutat, ami azt jelzi, hogy a Mirnov-szondákban mért felvillanások körülbelül 100 μ s-mal a profilváltozások *előtt* jelentkeznek. Ez azt jelezheti, hogy a modellünkkel ellentétben az MHD-tevékenység okozza a profil lapulását, mint azt a TJ-II sztellátor eredményei is sugallták [9], ám ilyen következtetéseket stacioner lövések jobb statisztikájú feldolgozásaival kell még alátámasztani.

Korreláció a Mirnov-szonda- és a LOTUS-jelek között

Ok-okozat szempontjából is érdekes megvizsgálni a Mirnov-szonda által érzékelt MHD-tevékenység intenzitásának és a LOTUS lézerszórással mért milliméter skálájú turbulencia intenzitásának időtartománybeli összefüggéseit.³

A jelek korrelációs függvényei a 4. ábrán láthatók jó és rossz összetartású állapotokban. Míg jó összetartás

³ Ehhez a más feldolgozásokban [6] megszokott 700–800 kHz frekvenciasávot választottuk ki a LOTUS-jelekből, amelynek a sávteljesítményét a LOTUS-jelek feldolgozására kifejlesztett diszkrét ablakozott Fourier-transzformáció alapú programmal számoltuk. A Mirnov-szondajelekből a szokásos módszerrel a 15–30 kHz frekvenciasáv sávteljesítményét számoltuk ki.

esetén nem látunk kapcsolatot, rossz összetartású állapotban 100 μ s-os időskálán a Mirnov-szonda helyzetétől függetlenül érdekes struktúrát látunk. A Mirnov-szondajelben látható tranziens MHD-módus felgerjesztődése előtt a turbulencia erősödni, míg utána gyengülni látszik. Ez a tapasztalat alátámasztani látszik a széles körben elterjedt elképzelést, hogy az anomális transzportot a turbulenciából felnövekvő transzportesemények okozzák, ám messzemenő következtetések levonása előtt még mindenképpen érdemes jobb statisztikát biztosító stationer lövéseket is feldolgozni.

Összegzés

Rövid idejű Fourier-transzformációt használva kiszámoltuk a W7-AS sztellarátor Mirnov-szondajeleire a spektrogramokat az $\tau_a=1/3$ körüli átmenet jó és rossz összetartású plazmaállapotaira, amelyekből ezután kinyertük a különböző frekvenciasávokhoz tartozó sávteljesítményeket. Azt találtuk, hogy a sávteljesítmény-jelek statisztikája (teljesítménysűrűség-függvény, autokorrelációs függvény) függ a plazma összetartásától.

Kiszámoltuk a Mirnov-szonda sávteljesítmények kereszt-korrelációs függvényét az ugyanakkor a jelnek más frekven-

ciákhoz tartozó sávteljesítményeivel és más diagnosztikák (Li-BES, LOTUS) jeleivel. Minden esetben szignifikáns korrelációt találtunk rossz összetartású esetben, és nem találtunk korrelációt jó összetartású esetben. Ez a tapasztalat azt bizonyítja, hogy rossz összetartású esetben nagy méretű komplex transzportesemények történnek. Ezen események valószínűleg a W7-AS sztellarátoron korábban megfigyelt ELM-szerű (ELM-like) struktúrák [10].

A Mirnov-szonda sávteljesítményei és az egyéb diagnosztikák (Li-BES, LOTUS) jelei között számolt kereszt-korrelációs függvények időkéteséseket mutatnak. Ez reményt ad arra, hogy állandó paraméterű lövések feldolgozásából számolt, jobb statisztikájú kereszt-korrelációs függvényekből akár ok-okozati kapcsolatokra is fény derüljön.

Irodalom

1. R. BRAKEL et al. – Nuclear Fusion 42 (2002) 903
2. S. ZOLETNIK et al. – Phys. Plasmas 6 (1999) 4239
3. M. ANTON et al. – J. Plasma Fusion Res. 1 (1998) 259
4. G. POKOL et al. – ECA 27A (2003) P-3.7
5. M. SAFFMAN et al. – Rev. Sci. Instrum. 72 (2001) 2579
6. N.P. BASSE et al. – Phys. Plasmas, to be published (2004)
7. S. MALLAT: A wavelet tour of signal processing – Academic Press, 2001
8. S. ZOLETNIK et al. – Plasma Phys. Control Fusion 44 (2002) 1581
9. C. ALEJALDRE et al. – 19th International Conference on Fusion Energy OV/4-4 (2002)
10. M. HIRSCH et al. – ECA 22C (1998) 718

»MIKÉPPEN A FÖLDÖN, AZONKÉPPEN AZ ŰRBEN IS« – avagy elsődleges és másodlagos kozmikus sugárzás-dozimetria a Nemzetközi Űrállomáson és a földi kiegészítő vizsgálatok

Pálfalvi József, Szabó Julianna

KFKI Atomenergia Kutatóintézet

Eördögh Imre

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

A szerzőkből és munkatársaikból létrehozott csapat 2000 óta foglalkozik a Nemzetközi Űrállomáson (ISS) észlelhető kozmikus sugárzás vizsgálatával, szilárdtest-nyomdetektort felhasználó technikával. Ez a tevékenység a BRADOS-projektekben valósul meg. Fő célja az ISS szerviz-moduljában az elsődleges kozmikus sugárzás, valamint a falban és szerkezeti anyagokban kiváltott másodlagos (főleg neutronokból álló) sugárzás térbeli eloszlásának és időbeli változásának vizsgálata. Az űrbeli mérések előkészítéséhez kapcsolódva a detektorok űrviszonyok közötti viselkedésének vizsgálatára különböző földi vizsgálatok és részecskegyorsítóknál végzett kalibrálások folynak. A mérésekből megállapítottuk, hogy az űrhajósok átlagos dózisterhelése 2001-ben a napi 523 μ Sv körüli értéket is elérhette, míg 2003-ban – főleg a csökkenő naptevékenység miatt – ez 320 μ Sv volt naponta.

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

A kutatások 2002–2004. között a MŰI támogatásával folytak (TP–174).

A KFKI Atomenergia Kutatóintézet (AEKI) Sugárvédelmi Kutatócsoportjának (SK) munkatársai 1975 óta foglalkoznak atomi részecskék szilárdtest-nyomdetektorral történő vizsgálatával. A kutatócsoport nemzetközileg is elismert eredményeinek, valamint az Űrdozimetriai Csoport sikeres PILLE-programjának eredményeként az SK meghívást kapott több nemzetközi űrdozimetriai, illetve a Nemzetközi Űrállomáson (ISS) történő kozmikus sugárzás mérési programban való részvételre. Ezek: BRADOS (koordinátor: moszkvai Orvosi–Biológiai Problémák Intézete, IBMP), BIOPAN–RADO (koordinátor: Európai Űrkutatási Ügynökség, ESA és IBMP) és SORD–MATROSHKA (ESA-koordináció) programok. A mérőberendezések fejlesztéséhez és működésük ellenőrzésére földi kísérletek folynak különböző nagyenergiás gyorsítóberendezéseknél. Ebben az összefüggésben a földi kísérletek és módszertani ismertetés mellett a BRADOS-programokban való közreműködésünket és eredményeinket kívánjuk közreadni. Mindenekelőtt röviden megismertetjük az olvasót a szilárdtest-nyomdetektorokkal, és megadjuk néhány szakkifejezés jelentését is.