

**FÚZIÓS BERENDEZÉSEK BEN FELLÉPŐ TRANZIENS
HULLÁMJELENSÉGEK TANULMÁNYOZÁSA STATISZTIKUS
ELJÁRÁSOKKAL ÉS ELMÉLETI MODELLEKKEL**

PhD tézisfüzet

Pokol Gergő

Témavezető: **Dr. Pór Gábor**

Konzulens: **Dr. Fülöp Tünde**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem - Nukleáris Technika Tanszék

Budapest

2009

A kutatások előzménye

A növekvő energiaigény és a globális felmelegedés komplex problémájából az egyik lehetséges kiút a magfúzió, mint energiatermelő reakció, alkalmazása [European Physical Society, 2007]. Az atommagok egyesülése azonban csak nagyenergiájú ütközésekben tud lejátszódni, és így a fúziós energiatermelés technikai megvalósítása napjainkig várat magára. A fúziós reakciók hatáskeresztmetszetének energiafüggését figyelembe véve a fúziós energiatermelés kritériumaként azt kapjuk, hogy még a legkedvezőbb deutérium-trícium reakció esetén is körülbelül 100 millió K hőmérsékletű, megfelelően nagy sűrűségű anyagot kell a környezettől megfelelően elszigetelve összetartanunk. Ilyen hőmérsékleten az anyag plazma halmazállapotban van, és a fúziós energiatermelés legnagyobb kihívása ezt az anyagot összetartani. A legígéretesebb koncepció a fúziós plazma összetartására a mágneses terek alkalmazása. Ekkor viszonylag kis sűrűségű – a nagy hőmérséklet ellenére atmoszferikus nyomású – plazmát tartunk össze erős, tórusz alakú mágneses térrel a szilárd falaktól jól elszigetelve.

Ötven éves fejlődésük során, a tórusz alakú, mágneses összetartású berendezéseknek két igazán sikeres típusa alakult ki: a tokamak és a sztellarátor. Mind a két berendezés toroidálisan magába záródó mágneses teret használ, így a mágneses erővonalak mentén mozgó töltött részecskék nem jutnak ki a berendezésből. A sztellarátorban a stabil összetartáshoz szükséges mágneses térszerkezetet külső tekercsekkel hozzák létre, míg a tokamakban egy erős toroidális áramot hajtanak a plazmában. Mindkét irányban folynak kutatások: az ITER tokamakot [ITER Physics Basis Editors et al., 1999] elsősorban a kisebb tokamakokon (pl. ASDEX-Upgrade) szerzett tapasztalatok alapján építik, míg a Wendelstein 7-X sztellarátor építését [Wanner and the W7-X Team, 2000] a közvetlen előd Wendelstein 7-AS [Hirsch et al., 2008] ígéretes eredményei motiválták.

Eredményeim a mágnesesen összetartott fúziós plazmákban fellépő tranziens hullámjelenségekhez kapcsolódnak. A fúziós paraméterű, forró és híg, plazmában gyakran fellépnek ilyen hullámok, és nemlineáris folyamatokon keresztül sokszor komoly hatásuk van a transzportfolyamatokra, és gyorsrészecske-populációkra. Jelentőségüknek megfelelően a plazma tranziens hullámjelenségeit, és az egyéb kapcsolódó tranzienseket nagy erővel tanulmányozzák mind kísérleti, mind elméleti oldalról.

Célkitűzések

A disszertáció célja tranziens plazmahullámok és transzport folyamatok kölcsönhatásának vizsgálata fúziós plazmafizikai berendezéseken kísérleti adatok statisztikus eljárásokkal történő feldolgozásával és elméleti számítások segítségével. A problémáknak ezen széles köréből két speciális feladatra koncentráltam:

1. A plazmaszéli tranziens hullámok és transzport események kölcsönhatásának vizsgálata a Wendelstein 7-AS sztellarátoron (ELM-szerű események, kvázikohereus módus), illetve hasonló vizsgálatok támogatása az ASDEX-Upgrade tokamakon (ELM, pellet). A kísérleti adatok feldolgozásához szükséges jelfeldolgozási módszerek kidolgozása, azok alkalmazása különböző plazmadiagnosztikák jeleinek összehasonlító elemzésére, a tapasztalt jelenségeket magyarázó elméleti modellek felállítása.
2. A nagy tokamakokban fellépő Maxwell-eloszlástól "elfutó" relativisztikus elektronnyaláb és az ún. fütyülő plazmahullámok kölcsönhatásának elméleti leírása. Kritérium keresése a hullám destabilizálódására és a relativisztikus elektronpopulációra való visszahatásának modellezése.

Vizsgálati módszerek

A Wendelstein 7-AS sztellarátoron több mennyiséget is mértek a tranziens transzportjelenségek időskáláját felbontani képes mintavételi frekvenciával. Az plazmadiagnosztikák közötti korrelációs feldolgozásban felhasznált jelek a mágneses tér fluktuációit, a plazma sűrűségét, a plazma hőmérsékletét valamint a milliméter-hullámhosszú plazmahullámok intenzitását jellemzik [Hirsch et al., 2008]. A kapcsolódó tranziens hullámok jellemzésére – a Wendelstein 7-AS sztellarátoron és az ASDEX-Upgrade tokamakon is – elsősorban a mágneses tér fluktuációit mérő tekercsek jeleit használtam.

A hagyományos zajdiagnosztikai módszerek közül alkalmaztam a Fourier-spektrumokat, koherencia-, fázis- és a korrelációfüggvényeket [Schnell, 1985]. A tranziens jelekre kifejlesztett módszereim ezen módszerek általánosításai, és a folytonos lineáris idő-frekvencia transzformációkon [Mallat, 2001] alapulnak.

Az elméleti számításaim során a plazma kinetikus elméletét használtam: A plazmahullám lineáris stabilitását leíró egyenlet és a részecske-hullám kölcsönhatás kvázilineáris leírása is az ütközésmentes Boltzmann-egyenletből eredeztethető [Stix, 1992].

Irodalmi hivatkozások listája

[European Physical Society, 2007] European Physical Society (2007). Energy for the future - EPS position paper on the nuclear option. *Press release of the European Physical Society*, pages 1–24.

[Hirsch et al., 2008] Hirsch, M., Baldzuhn, J., Beidler, C., Brakel, R., Burhenn, R., Dinklage, A., Ehmler, H., Endler, M., Erckmann, V., Feng, Y., Geiger, J., Giannone, L., Grieger, G.,

Grigull, P., Hartfuss, H.-J., Hartmann, D., Jaenicke, R., König, R., Laqua, H., Maassberg, H., McCormick, K., Sardei, F., Speth, E., Stroth, U., Wagner, F., Weller, A., Werner, A., Wobig, H., Zoletnik, S., and for the W7-AS Team (2008). Major results from the stellarator Wendelstein 7-AS. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 50(5):053001 (204pp).

[ITER Physics Basis Editors et al., 1999] ITER Physics Basis Editors, ITER Physics Expert Groups, ITER Joint Central Team, and Physics Integration Unit (1999). ITER Physics Basis. *Nuclear Fusion*, 39(12):2137–2638.

[Mallat, 2001] Mallat, S. (2001). *A wavelet tour of signal processing*. Academic Press, second edition.

[Schnell, 1985] Schnell, L., editor (1985). *Jelek és rendszerek mérés technikája*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.

[Stix, 1992] Stix, T. H., editor (1992). *Waves in plasmas*. Springer-Verlag New York, Inc., New York.

[Wanner and the W7-X Team, 2000] Wanner, M. and the W7-X Team (2000). Design goals and status of the Wendelstein 7-X project. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 42(11):1179–1186.

Új tudományos eredmények

- 1. Tézis:** Kifejlesztettem a sávteljesítmény-korrelációs jelfeldolgozás technikát, ami során egy alkalmasan választott folytonos lineáris idő-frekvencia transzformáció segítségével a jelet különböző frekvenciasávú összetevőkre bontom, és az így kapott időben változó sávteljesítmények között keresztkorrelációs függvény segítségével keresek statisztikai összefüggéseket. A módszer alkalmazhatóságát és paraméterezésének kérdéseit részletesen tárgyaltam. [P1,P10]
- 2. Tézis:** Alkalmaztam és elemeztem a hagyományos – frekvencia-eltolás invariáns simítással számolt – wavelet koherencia és rövid-idejű Fourier-transzformáción alapuló idő-frekvencia koherencia módszert, és bevezettem a wavelet koherencia módszert skálainvariáns simító kernel alkalmazásával. Ezzel a wavelet koherencia alkalmazhatósága kibővült, mert így a koherencia-becslés hibája egyenletes lett az idő-frekvencia síkon, míg idő-frekvencia felbontása jellegében a wavelet transzformáció idő-frekvencia felbontásával egyezik. A módszert a Wendelstein 7-AS sztellarátor és az ASDEX-Upgrade tokamak mágneses jeleire alkalmazva globálisan koherens tranziens hullámokat detektáltam. [P2,P3,P7,P8,P11,P12]
- 3. Tézis:** Algoritmust adtam arra, hogy térben kiterjedt többpont mérésekből hogyan lehet tranziens hullámok módusszámát meghatározni ideális idő-frekvencia felbontással. A módszer folytonos lineáris idő-frekvencia transzformáció alapú kereszt spektrum-jellegű mennyiségeken – kereszt spektrogram vagy kereszt skálagram – alapul, és egy időeltolással szemben invariáns idő-frekvencia módusszám térképet szolgáltat. A módszer segítségével a Wendelstein 7-AS sztellarátoron tranziens hullámok poloidális, az ASDEX-Upgrade tokamakon toroidális módusszámait határoztam meg. [P3,P7,P8,P11]
- 4. Tézis:** Az ELM-szerű események és a tranziens MHD módusok kapcsolatát a Wendelstein 7-AS sztellarátoron sávteljesítmény-korrelációs technikával és más zajdiagnosztikai eszközökkel vizsgáltam a különböző plazmadiagnosztikák jeleinek összehasonlító elemzésével. Ezen elemzések során a poloidális mágneses tér fluktuációmérések (Mirnovszonda), a lokális elektronsűrűség-fluktuáció- és radiális elektronsűrűség-profilmérések (LiBES), az elektronhőmérséklet-profilmérések (ECE), az elektronsűrűség-turbulencia intenzitásmérésnek (LOTUS)jeleit és e jelekből számolt sávteljesítményeket hasonlítottam össze. Megállapítottam, hogy rosszabb plazmaösszetartás esetén összetett és térben kiterjedt tranziens transzport események vannak jelen, amelyek hatással vannak a plazma globális összetartására. Különböző típusú lövések elemzése során arra következtetésre jutottam, hogy az ELM-szerű módusok a radiális transzport kisebb részéért felelősek. A tranziens hullámok módusszáma sok esetben a plazmaszéli mágneses tér struktúrájával rezonáns, de egyéb módusok is megjelennek. [P1,P9,P13,P14,P15]
- 5. Tézis:** A mágneses plazma kinetikus elméletét alapul véve becslést adtam arra, hogy az ún. magnetoszonikus-fütyülő hullámok milyen plazmaparaméterek mellett destabilizálódnak a tokamak diszrupciókban keletkező elfutó elektronok jelenlétében a ciklotron rezonancián alapuló részecske-hullám kölcsönhatáson keresztül. A kapott ered-

mények szerint nagy tokamakok diszrupcióiban destabilizálódhat ez a hullám, és alacsonyabb mágneses tér esetén könnyebben destabilizálódik. [P4,P5,P16,P17]

- 6. Tézis:** A hullám-részecske kölcsönhatás kvázilineáris elméletét alapul véve modelleztem a füttyülő hullámok hatását az elfutó elektronok eloszlásfüggvényére. A kapott eredmények alapján elmondható, hogy a füttyülő hullám hatása az elfutó elektronokra egy nagyon gyors szögszórás. Ez a folyamat több, egymást követő fázisban zajlik le, aminek dinamikája erősen függ a plazmaparamétereiktől, de a végeredménye mindenképpen az elfutó elektronok nyalábjának szétszórása. Fentiek magyarázhatják azt a kísérleti megfigyelést, hogy nagy tokamakokban egy kritikus mágneses tér alatt nem látnak elfutó elektronokat. [P6,P7]

A tézispontokhoz kapcsolódó angol nyelvű referált folyóiratcikkek

- [P1] **G. Pokol**, G. Por, S. Zoletnik and W7-AS team,
Application of a bandpower correlation method to the statistical analysis of MHD bursts in quiescent Wendelstein-7 AS stellarator plasmas,
Plasma Physics and Controlled Fusion **49**, 1391-1408 (2007). WS, impact factor (2008): 2.299
- [P2] **G. Pokol**, G. Por:
ALPS loose parts monitoring system and wavelet analysis,
International Journal of Nuclear Energy Science and Technology, **vol. 2**, 241-252 (2006).
- [P3] T. Szepesi, S. Kálvin, G. Kocsis, K. Lackner, P.T. Lang, M. Maraschek, **G. Pokol** and G. Por:
Investigation of pellet-driven magnetic perturbations in different tokamak scenarios,
Plasma Physics and Controlled Fusion, **elfogadva** (2009). WS, impact factor (2008): 2.299
- [P4] T. Fülöp, **G. Pokol**, P. Helander and M. Lisak:
Destabilization of magnetosonic-whistler waves by a relativistic runaway beam,
Physics of Plasmas, **vol. 13**, 062506 (2006). WS, impact factor (2008): 2.427
- [P5] T. Fülöp, H. M. Smith and **G. Pokol**:
Magnetic field threshold for runaway generation in tokamak disruptions,
Physics of Plasmas, **vol. 16**, 022502 (2009). WS, impact factor (2008): 2.427
- [P6] **G. Pokol**, T. Fülöp and M. Lisak:
Quasi-linear analysis of whistler waves driven by relativistic runaway beams in tokamaks,
Plasma Physics and Controlled Fusion, **vol. 50**, 045003 (2008). WS, impact factor (2008): 2.299

A tézispontokhoz kapcsolódó magyar nyelvű folyóiratcikkek

- [P7] **G. Pokol**:
Tranziens hullámok fúziós plazmákban,
Nukleon, **vol. 1**, 1 (2008).
- [P8] T. Szepesi, S. Kálvin, G. Kocsis, K. Lackner, P.T. Lang, M. Maraschek, **G. Pokol** and G. Por:
Pelletek által keltett mágneses perturbációk vizsgálata fúziós plazmakísérletekben,
Nukleon, **elfogadva** (2009).
- [P9] **G. Pokol**, G. Por and S. Zoletnik:
Transzport-releváns fluktuációk mérése a Wendelstein 7-AS fúziós berendezésen,
Fizikai Szemle, **vol. 55**, pp. 125-130 (2005).

A tézispontokhoz kapcsolódó angol nyelvű konferenci cikkek

- [P 10] **G. Pokol**, G. Por, S. Zoletnik, E. Fekete, A. Werner and W7-AS team,
Statistical analysis of experimentally observed transient MHD modes,
Proceedings of the 30th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics (7 - 11 July 2003, St. Petersburg, Russia), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 27 A**, P-3.7 (2003).
- [P 11] **G. Pokol**, G. Papp, G. Por, S. Zoletnik, A. Weller and W7-AS team:
Experimental study and simulation of W7-AS transient MHD modes,
Proceedings of the PLASMA 2007 International Conference on Research and Applications of Plasmas (16 - 19 October 2007, Greifswald, Germany), AIP Conference Proceedings, **vol. 993**, 215 (2008).
- [P 12] E. Belonohy, G. Papp, **G. Pokol**, K. McCormick, S. Zoletnik and W7-AS Team:
A systematic study of the Quasi-Coherent mode in the High Density H-mode regime of Wendelstein-7 AS,
Proceedings of the PLASMA 2007 International Conference on Research and Applications of Plasmas (16 - 19 October 2007, Greifswald, Germany), AIP Conference Proceedings, **vol. 993**, 39 (2008).
- [P 13] **G. Pokol**, G. Por, S. Zoletnik, N. P. Basse and W7-AS team,
Amplitude correlation analysis of W7-AS Mirnov-coil array data and other transport relevant diagnostics,
Proceedings of the 20th IAEA Fusion Energy Conference (1 - 7 Nov. 2004, Vilamoura, Portugal), IAEA Conference & Symposium Papers, **vol. 25/CD**, PS-EX/P6-22 (2005).
- [P 14] G. Papp, **G. Pokol**, G. Por, S. Zoletnik and W7-AS team:
Analysis of transient MHD modes of Wendelstein 7-AS by coherence techniques,
Proceedings of the 32nd EPS Plasma Physics Conference (27 June - 1 July 2005, Tarragona, Spain), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 29 C**, P-5.021 (2005).
- [P 15] S. Zoletnik, N. P. Basse, A. Bencze, D. Dunai, M. Hirsch, **G. Pokol** and G. Por:
Anomalous transport events in the core plasma of the Wendelstein 7-AS stellarator,
Proceedings of the 32nd EPS Plasma Physics Conference (27 June - 1 July 2005, Tarragona, Spain), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 29 C**, P-5.023 (2005).
- [P 16] **G. Pokol**, T. Fülöp, P. Helander and M. Lisak:
Destabilization of magnetosonic-whistler waves by a relativistic runaway beam,
Proceedings of the 21st IAEA Fusion Energy Conference, (16-21 October 2006, Chengdu, China), Fusion Energy 2006 , **IAEA-CN-149**, TH/P6-2 (2006).
- [P 17] **G. Pokol**, T. Fülöp, H. M. Smith and P. Helander:
Criteria for runaway electron generation in tokamak disruptions,
Proceedings of the 22nd IAEA Fusion Energy Conference, (13-18 October 2008 Geneva, Switzerland), **IAEA-CN-156**, TH/P3-4 (2008).

További tudományos közlemények

1. I. Pusztai, **G. Pokol**, D. Dunai, D. Réfy, G. Por, G. Anda, S. Zoletnik and J. Schweinzer,
De-convolution based correction of alkali beam emission spectroscopy density profile measurements,
Review of Scientific Instruments **80**, 083502 (2009). WS, impact factor (2008): 1.738
2. G. Papp, **G. Pokol**, G. Por, V. Igochine and ASDEX Upgrade team:
Analysis of sawtooth precursor activity in ASDEX Upgrade using bandpower correlation method,
Proceedings of the 36th EPS Conference on Plasma Physics (29 June - 3 July 2009, Sofia, Bulgaria), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 33 E**, P1.157 (2009).
3. S. Kálvin, G. Anda, D. Dunai, G. Petravich, S. Zoletnik, **G. Pokol**, B. Játékos, I. Pusztai and D. Réfi:
Reconstruction of plasma edge density profile from lithium beam data using statistical analysis,
Proceedings of the 36th EPS Conference on Plasma Physics (29 June - 3 July 2009, Sofia, Bulgaria), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 33 E**, P5.211 (2009).
4. V. Igochine, O.Dumbrajs, H. Zohm, G. Papp, G. Por, **G. Pokol**, and ASDEX Upgrade team:
The role of stochastization in fast MHD phenomena on ASDEX Upgrade,
Proceedings of the 22nd IAEA Fusion Energy Conference, (13-18 October 2008, Geneva, Switzerland), **IAEA-CN-156**, EX/P9-10 (2008).
5. E. Belonohy, M. Hirsch, K. McCormick, G. Papp, **G. Pokol**, H. Thomsen, A. Werner, S. Zoletnik and W7-AS Team:
Edge instabilities in the high density H-mode operation of W7-AS,
Proceedings of the 35th EPS Conference on Plasma Physics (9 - 13 June 2008, Hersonissos, Crete, Greece), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 32 D**, P2.034 (2008).
6. T. Fülöp, **G. Pokol**, H. M. Smith, P. Helander, M. Lisak:
Magnetic field threshold for runaway generation in tokamak disruptions,
Proceedings of the 35th EPS Conference on Plasma Physics (9 - 13 June 2008, Hersonissos, Crete, Greece), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 32 D**, P2.078 (2008).
7. G. Kocsis, A. Aranyi, V. Igochine, S. Kálvin, K. Lackner, P.T. Lang, M. Maraschek, V. Mertens, **G. Pokol**, G. Por, T. Szepesi and ASDEX Upgrade Team:
Investigation of pellet-driven plasma perturbations for ELM triggering studies,
Proceedings of the 35th EPS Conference on Plasma Physics (9 - 13 June 2008, Hersonissos, Crete, Greece), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 32 D**, P2.070 (2008).

8. E. Belonohy, A. Bencze, G. Papp, **G. Pokol**, K. McCormick, S. Zoletnik and W7-AS Team:
Density and magnetic fluctuation studies on the W7-AS stellarator,
Proceedings of the 34th EPS Conference on Plasma Physics (2 - 6 July 2007, Warsaw, Poland), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 31 F**, P-2.046 (2007).
9. I. Pusztai, D. Dunai, **G. Pokol**, G. Por, J. Schweinzer and S. Zoletnik:
Capabilities of alkali Beam Emission Spectroscopy for density profile and fluctuation measurements,
Proceedings of the 34th EPS Conference on Plasma Physics (2 - 6 July 2007, Warsaw, Poland), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 31 F**, P2.137 (2007).
10. G. Papp, **G. Pokol**, G. Por, S. Zoletnik and W7-AS team:
Investigation of transient MHD modes of Wendelstein 7-Advanced Stellarator,
Proceedings of the International Youth Conference on Energetics, (31 May - 2 June 2007, Budapest, Hungary), 109 (2007).
11. I. Pusztai, **G. Pokol** and G. Por:
Atomnyaláb diagnosztika optimalizálása a COMPASS-D tokamakra,
Proceedings of the V. Nukleáris Technikai Szimpózium (30 Nov. - 1 Dec. 2006, Paks, Hungary).
12. T. Fülöp, **G. Pokol**, P. Helander and M. Lisak:
Destabilization of magnetosonic-whistler waves by a relativistic runaway beam,
Proceedings of the 33rd EPS Plasma Physics Conference (19 - 23 June 2006, Rome, Italy), Europhysics Conference Abstracts, **vol. 30 I**, P1.182 (2006).
13. G. Anda, A. Bencze, M. Berta, D. Dunai, K. Gál and **G. Pokol**:
Fúziós nyári iskola a CASTOR tokamagnál,
Fizikai Szemle, **vol. 55**, pp. 105-110 (2005).
14. **G. Pokol**, G. Por and S. Zoletnik:
A Wendelstein 7-AS sztellarátor transzport-releváns méréseinek feldolgozása,
Proceedings of the III. Nukleáris Technikai Szimpózium (2 - 3 Dec. 2004, Budapest, Hungary).
15. **G. Pokol** and G. Por:
ALPS loose parts monitoring system and wavelet analysis,
Proceedings of the 29th IMORN International Meeting On Reactor Noise (17 - 19 May 2004, Budapest, Hungary).

Konferencián elhangzott szóbeli előadások

1. **G. Pokol** and S. Zoletnik:
Application of BES for MHD and turbulence measurements,
Workshop on Active Beam Spectroscopy for control of the fusion plasma (24-27 March 2009, Leiden, Netherlands).
2. **G. Pokol**:
Interesting problems from the field of fusion plasma physics - Érdekes feladatok a fúziós plazmafizika területéről,
VI. Nukleáris Technikai Szimpózium (29-30 Nov. 2007, Budapest, Hungary).
3. **G. Pokol**, T. Fülöp, P. Helander, M. Lisak and D. Anderson:
Destabilization of magnetosonic-whistler waves by a relativistic runaway beam,
Hungarian Plasma Physics and Fusion Technology Workshop (20 - 21 April 2006, Visegrád, Hungary).
4. **G. Pokol**, G. Por and S. Zoletnik:
A Wendelstein 7-AS sztellarátor transzport-releváns méréseinek feldolgozása,
III. Nukleáris Technikai Szimpózium (2 - 3 Dec. 2004, Budapest, Hungary).
5. **G. Pokol** and G. Por:
ALPS loose parts monitoring system and wavelet analysis,
29th IMORN International Meeting On Reactor Noise (17 - 19 May 2004, Budapest, Hungary).
6. **G. Pokol**:
Amplitude correlation analysis of W7-AS Mirnov-coil data,
2nd Hungarian Plasma Physics Workshop (22 - 24 April 2004, Budapest, Hungary).