

Tranziens hullámok fúziós plazmákban

Pokol Gergő

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3-9.,
telefon: (1) 463-2469, fax: (1) 463-1954, pokol@reak.bme.hu

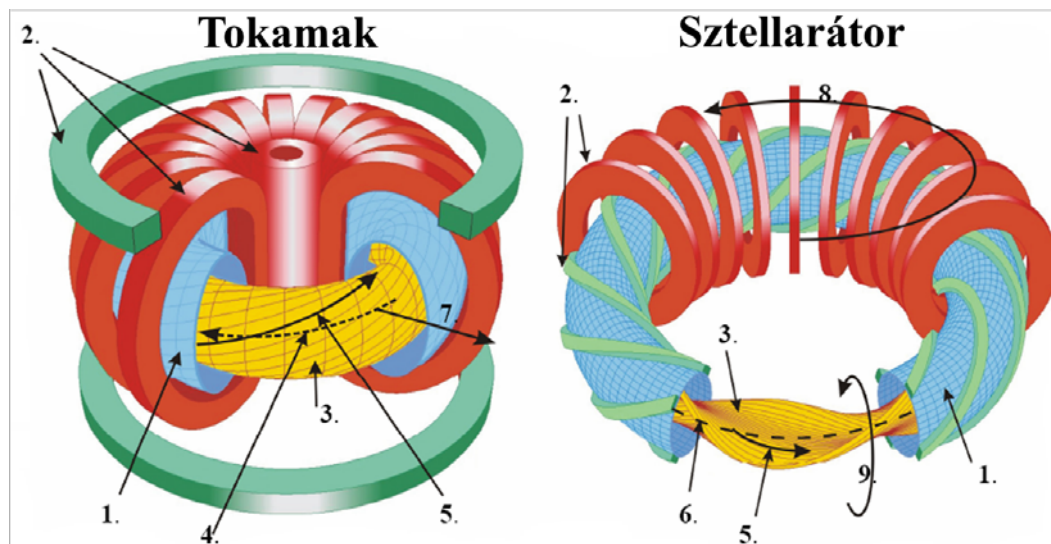
A cikkben két kutatási témát mutatok be, amelyek közös pontja, hogy mindkettő a fúziós plazmákban fellépő, rövid ideig tartó, tranziens hullámokhoz kötődő jelenségekkel foglalkozik. Az első téma a kísérletekben megfigyelt tranziens magneto-hidrodinamikai (MHD) módusok jellemzését és elméleti modellek keresését foglalja magában. A második téma a részecskehullám kölcsönhatás elméletéből kiindulva ad jóságot az ún. füttyülő hullám (whistler wave) időleges destabilizálódására speciális plazmaállapotok, tokamak diszrupciók, esetén.

Bevezetés

Régóta ismert tény, hogy könnyű atommagok egyesülése során hatalmas energia szabadul fel, és a szóba jöhető fúziós reakciók paramétereit is már évtizedekkel ezelőtt kimérték részecskegyorsítós kísérletekben. A fúziós energiatermelés gyakorlati megvalósítása azonban napjainkig várat magára azon egyszerű oknál fogva, hogy a pozitív töltésű atommagok taszítják egymást, és ezért a fúziós reakciók csak nagyenergiájú ütközésekben tudnak lejátszódni. 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 °C hőmérsékletű, megfelelően nagy sűrűségű anyagot kell megfelelően hosszú ideig összetartanunk (Lawson-kritérium) [1].

A fúziós reakciókhoz szükséges 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 ($\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$) plazmát tartunk össze erős ($\sim 5 \text{ T}$), tórus alakú mágneses térrel viszonylag hosszú ideig ($>1 \text{ s}$).



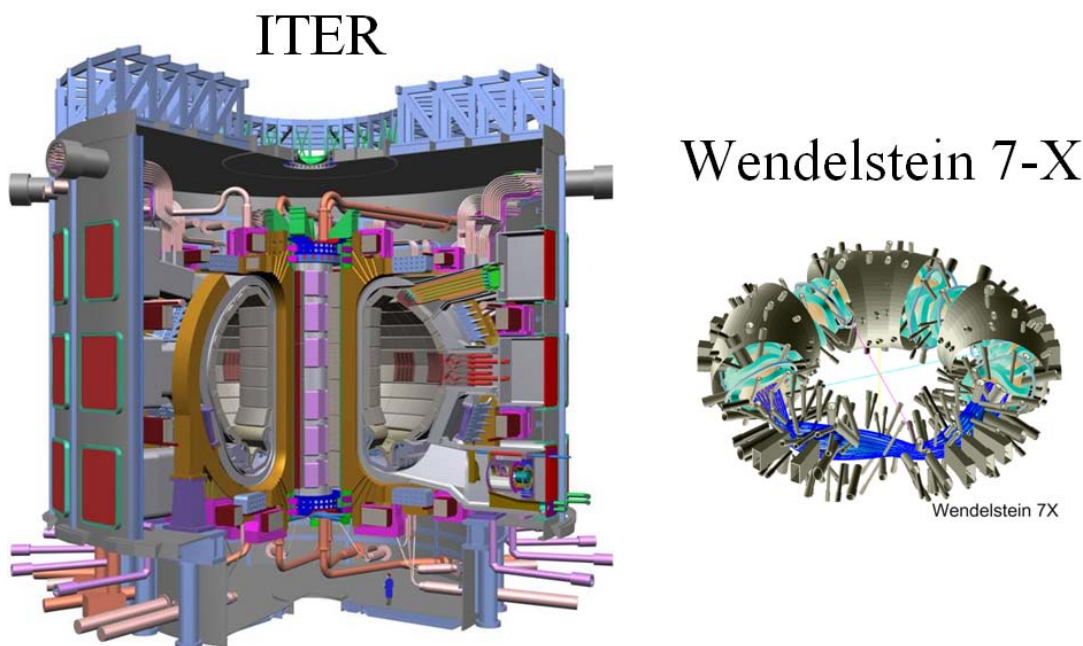
1. ábra: Tokamak és sztellarátor elvi vázlatja:

1. Vákuumkamra, 2. Toroidális és helikális tekercsek, 3. Plazma, 4. Plazmaáram,
5. Mágneses erővonal, 6. Mágneses tengely, 7. Radiális irány, 8. Toroidális irány, 9. Poloidális irány

Beérkezett: 2008. március 1.

Ötvenéves fejlődésük során, a tórusz alakú, mágneses összetartású berendezéseknek két igazán sikeres típusa alakult ki: a tokamak és a sztellarátor (1. ábra). Mind a két berendezés toroidálisan magába záródó mágneses teret használ, így a mágneses erővonalak mentén mozgó töltött részecskék nem jutnak ki a berendezésből. A plazma stabilan egy helyben tartásához viszont szükség van a mágneses erővonalak helikális megcsavarására, és itt

mutatkozik meg a különbség a két típus között. Míg a sztellarátorban a teljes mágneses térszerkezetet külső tekercsekkel hozzák létre, a tokamakban egy erős (1-10 MA) toroidális áramot hajtanak a plazmában, és ez adja a optimális mágneses térszerkezethez szükséges poloidális irányú mágneses indukció komponensét.



2. ábra: Az ITER tokamak és a Wendelstein 7-X sztellarátor főbb komponenseinek tervei

A valóságban természetesen nem olyan egyszerű a berendezések felépítése, mint ahogy az az 1. ábrán látható. A 2. ábra a ma épülő legnagyobb tokamak (ITER) és a ma épülő legnagyobb sztellarátor (Wendelstein 7-X) terveit mutatja. Az ITER világméretű összefogásban épül Cadarache-ban, Franciaországban [2], míg a Wendelstein 7-X-et a németek és Európa építik Greifswaldban [3].

Tranziens MHD módusok

A cikkben elsőként bemutatásra kerülő kutatási téma a Wendelstein 7-AS (W7-AS) sztellarátor plazmájában megfigyelt jelenségek elsősorban kísérleti tanulmányozását foglalja magában, így elsősorban a Wendelstein 7-X (W7-X) sztellarátor jövőbeli teljesítményére lehetnek hatással.

Motiváció: korábbi megfigyelések

Tokamak és sztellarátor típusú berendezésekben is megfigyelték, hogy a transzport együtthatók jelentősen megváltoznak a racionális felületek közelében, ahol a mágneses erővonalak pár körfordulás után önmagukba záródnak [4,5]. Ezek a felületeken a forgatási transzformáció (iota), ami az erővonal poloidális és toroidális körbefutásának aránya, egy alacsonyrendű racionális szám. A W7-AS sztellarátoron azért lehet

kiválóan tanulmányozni ezt a jelenséget, mert ott a radiális iota-profil csaknem lapos, így egy racionális felület jelenléte globális változást okoz a plazmaösszetartásban. Ezzel szemben a tokamakokban az iota-profil meredek, és a racionális felület hatása lokális.

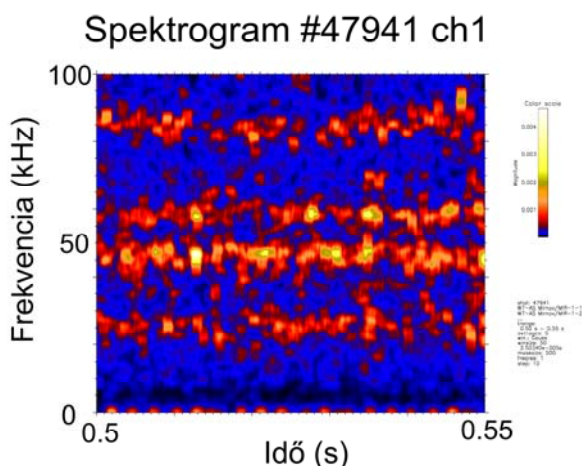
A racionális felületek közelében tapasztalt, plazmaösszetartásban mutatkozó változások fizikáját még nem értjük teljesen, de a jelek arra mutatnak, hogy tranziens transzport eseményeknek – amiket a W7-AS-en ELM-szerű eseményeknek neveztek el [6] – van benne valamilyen szerepe. Az ELM-szerű eseményeket tranziens magneto-hidrodinamikai (MHD) módusok kísérik. Ezek koherens, pár periódus élettartamú felvillanások a sűrűség és mágneses jelekben [7], amelyek térbeli szerkezetét, időbeli lefolyását és transzport-folyamatokkal való kapcsolatát vizsgáltam.

Kísérleti eredmények

A tranziens MHD módusok szerkezetének és az ELM-szerű transzport eseményeknek a kapcsolatát folytonos idő-frekvencia transzformációkon alapuló jelfeldolgozási algoritmusokkal elemeztem. Ezen transzformációknak két osztálya van, a rövid-idejű Fourier-transzformáció (STFT) és az analitikus wavelet-ekkel végzett folytonos wavelet-

transzformáció (CWT). A cikknek nem célja a transzformációk matematikai bevezetése és elemzése, ami megtalálható a hivatkozott irodalomban [8,9].

A 3. ábrán látható spektrogram egy mágneses fluktuáció jel STFT transzformációjával készült, és a jel energiasűrűség-eloszlását mutatja az idő-frekvencia síkon az ábra mellett található színskála szerint. Látható, hogy a rövid ideig tartó felvillanások karakterisztikus frekvenciákon jelentkeznek, ebben a kisülésben 85 kHz, 60 kHz, 45 kHz és 25 kHz körül. Az energiasűrűség-eloszlásokat további statisztikai feldolgozásnak is alá lehet vetni [10,11].

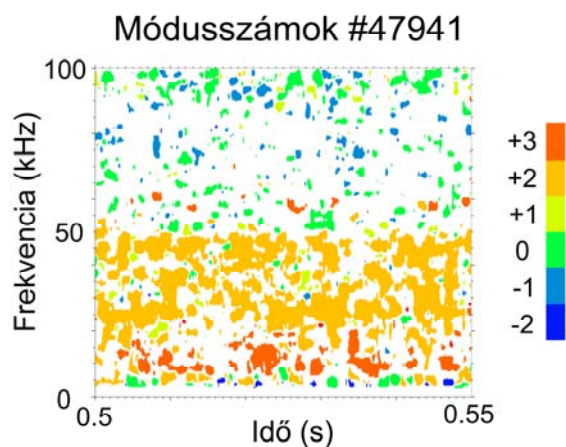


3. ábra: A W7-AS sztellarátor egy mágneses fluktuáció jelének spektrogramja

Általában nem egyetlen jelünk van, hanem egy sor szonda érzékeli részben ugyanazokat a jelenségeket. Ebben az esetben megkísérélhetjük rekonstruálni a detektált jelenségek térbeli szerkezetét, ami a tranziens MHD módusokhoz hasonló globális módusok esetén elsősorban a toroidális és poloidális módusszámok meghatározását jelenti. Az idő-frekvencia transzformációkból kiszámolható a különböző térbeli pozíciójú szondák jeleinek relatív késése (fázisa), és ebből az idő-frekvencia sík minden pontján megadható a legvalószínűbb módusszám értéke [12]. A 4. ábra a 3. ábrán bemutatott idő intervallumra mutatja a plazma egy poloidális metszete körül elhelyezett 16 szondából álló gyűrű jeleiből rekonstruált poloidális módusszámokat. A 4. ábrán a módusszámokat színekkel ábrázoltam. A módusszám előjele a módus forgásának irányát jelöli (pozitív az elektron-diamágneses irány). A fehéren hagyott területeken az adatok nem mutatnak jól meghatározott módusszámra utaló jeleket. Látható, hogy a 25 és 45 kHz sávok körül a +2 módusszám dominál, illetve 10 kHz körül megjelennek +3 módusszámú események is. A többi módusszám elszórva jelentkezik, és valószínűleg a véletlennek köszönhetik létüket, illetve a magasabb frekvenciákon a mintavétellel kapcsolatos problémák is jelentkeznek.

Természetesen különböző kisülésekben különböző karakterisztikus frekvenciák és módusszámok adódnak, de annyit általánosan el lehet mondani, hogy alacsony

módusszámú hullámokról van szó pár periódus élettartammal és 10-100 kHz karakterisztikus frekvenciával.



4. ábra: A W7-AS sztellarátor tranziens MHD módusainak poloidális módusszámú mágneses fluktuáció jeleiből számolva

Lehetséges elméleti modellek

Vizsgálataink kimutatták, hogy a tranziens MHD módusok amplitúdója korrelál az ELM-szerű jelenségekkel járó átmeneti hőmérséklet- és sűrűségprofil-változásokkal [13,14]. Ebből arra lehet következtetni, hogy ezek a plazmahullámok valamilyen módon ok-okozati viszonyban állnak a tranziens transzport jelenségekkel. Lehetségesek olyan folyamatok, amikor valamilyen plazmaparaméter kritikus gradiense destabilizál egy hullámot, és az nemlineáris folyamatokon keresztül transzportot okoz, de az is előfordulhat, hogy egy transzport esemény perturbációja okozza egy hullám megjelenését [12]. Az alternatív modellek közötti döntéshozatalhoz szükség van a különböző forgatókönyvek szimulációjának a megfigyelésekkel való összevetésére.

Elfutó elektronok és füttyülő hullámok

A cikkben bemutatásra kerülő másik kutatási téma inkább elméleti jellegű: az egyensúlyi Maxwell-eloszlástól elfutó (runaway) elektronok kölcsönhatását vizsgálja az ún. füttyülő (whistler) hullámokkal.

Motiváció: kísérleti megfigyelések

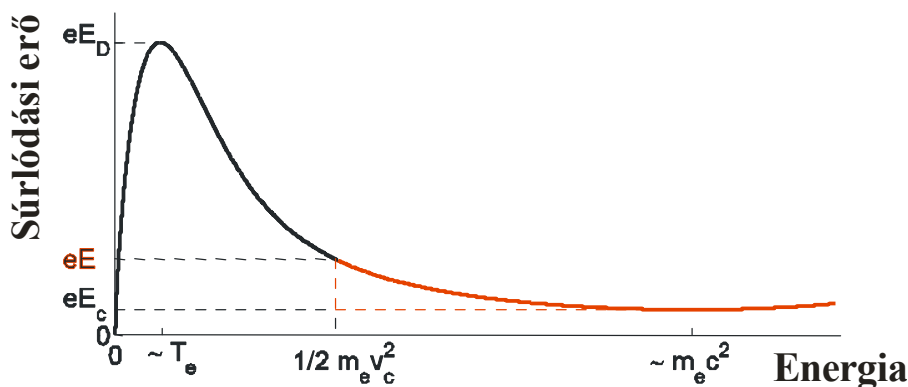
Bár maga a feladat elméleti számolást jelentett, a motiváció ebben az esetben is kísérleti eredményeken alapul. Ha tokamak típusú berendezésekben a plazma összetartása összeomlik, vagyis diszrupció következik be, az önindukció miatt a plazmában folyó erős toroidális áram a lehűlt gáz nagy ellenállása ellenére sem tud csak úgy eltűnni, az Ohm-törvény értelmében erős toroidális elektromos tér jön létre. Bizonyos esetekben ez az elektromos tér a plazma elektronjainak egy részét relativisztikus sebességre (~20 MeV) gyorsítja. Egy ilyen elektronnyaláb akár a berendezést is károsíthatja, ezért igyekeznek elkerülni.

Az elfutó elektronok száma jelentősen eltér a különböző diszrupciókban, és egy kritikus (2.2 T) mágneses tér alatt egyáltalán nem láttak elfutó elektronokat nagy tokamakokban [15,16]. Erre a megfigyelésre adhat magyarázatot az elfutó elektronok kölcsönhatása egy plazmahullámmal.

Elfutó elektronok

Az elfutó elektronok a plazmában tapasztalt ütközéses transzport jellegzetességei miatt léteznek. Szemben azzal a mindennapos tapasztalattal, hogy a sebesség növekedésével nő a közegellenállás, a plazma elektronjaira ez nem mindig igaz. Az 5. ábrán látható görbe mutatja az elektronra ható

súrlódási erőt az elektron energiájának függvényében. A függőleges tengelyen fel tüntetve a súrlódással szemben ható elektrosztatikus gyorsító erő azon értékei, melyeknél az erőegyensúly jellege megváltozik. Ha az elektrosztatikus gyorsító erő nagyobb az eE_c értéknél, akkor létezik egy olyan v_c kritikus sebesség, ami fölött az eE elektrosztatikus gyorsító erő nagyobb lesz a súrlódásnál, és a részecskék relativisztikus sebességre gyorsulnak [17]. Egy eE_D -nél nagyobb gyorsító erő esetén minden elektron felgyorsul. Az elfutó elektronok gyorsulását relativisztikus hatások és sugárzási mechanizmusok mellett a plazmahullámokkal való kölcsönhatás is megállíthatja.



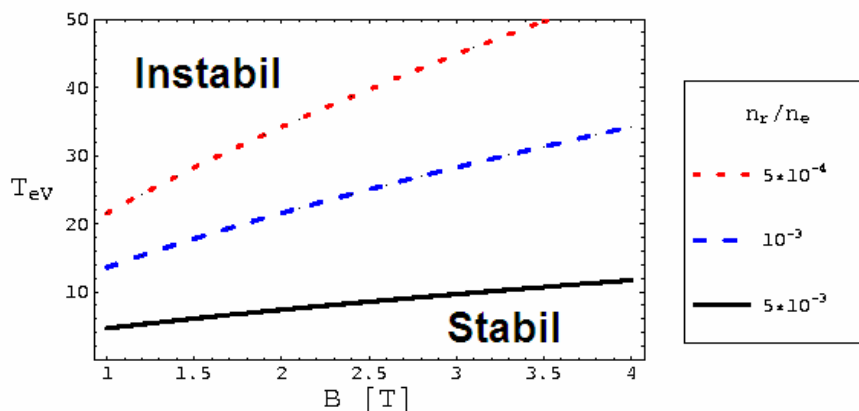
5. ábra: A plazma elektronjaira ható súrlódási erő az energia függvényében

Hullám-részecske kölcsönhatás

Az első dolog, amit a hullám-részecske kölcsönhatás számításához tudnunk kell, az a részecskék – jelen esetben az elfutó elektronok – eloszlásfüggvénye a hullámmal való kölcsönhatást figyelmen kívül hagyva. Esetünkben ezt a relativisztikus Boltzmann-egyenletből számolhatjuk a nagy tokamakok diszrupcióiban érvényes közelítésekkel [19]. A kapott eloszlásfüggvény erősen anizotrop a sebesség koordinátában, az elfutó elektron nyaláb gyakorlatilag egy irányban mozgó részecskékből áll. Ez az anizotropia tudja az adott impulzusú részecskékkel rezonáns plazmahullámokat destabilizálni. Az ebből fakadó

növekedési rátát a linearizált Boltzmann-egyenletből lehet kifejezni különböző hullámokra [18]. A hullám akkor lesz instabil, amikor ez a növekedési ráta nagyobb a csillapításnál.

A 6. ábra a füttyülő hullám stabilitási tartományát mutatja a leginstabilabb hullámszámvektorú hullámra adott elfutó elektron hányadokra. Magasabb diszrupció utáni hőmérséklet esetén instabilabb a hullám, mert ekkor kisebb az ütközéses csillapítás, míg erősebb mágneses tér esetén stabilabb [19]. Ez utóbbi összefüggés jó egyezést mutat a kísérleti tapasztalatokkal, miszerint nagy mágneses tér esetén akadálytalanul keletkeznek az elfutó elektronok, nincsen jelentős hullám-részecske kölcsönhatásra utaló jel.



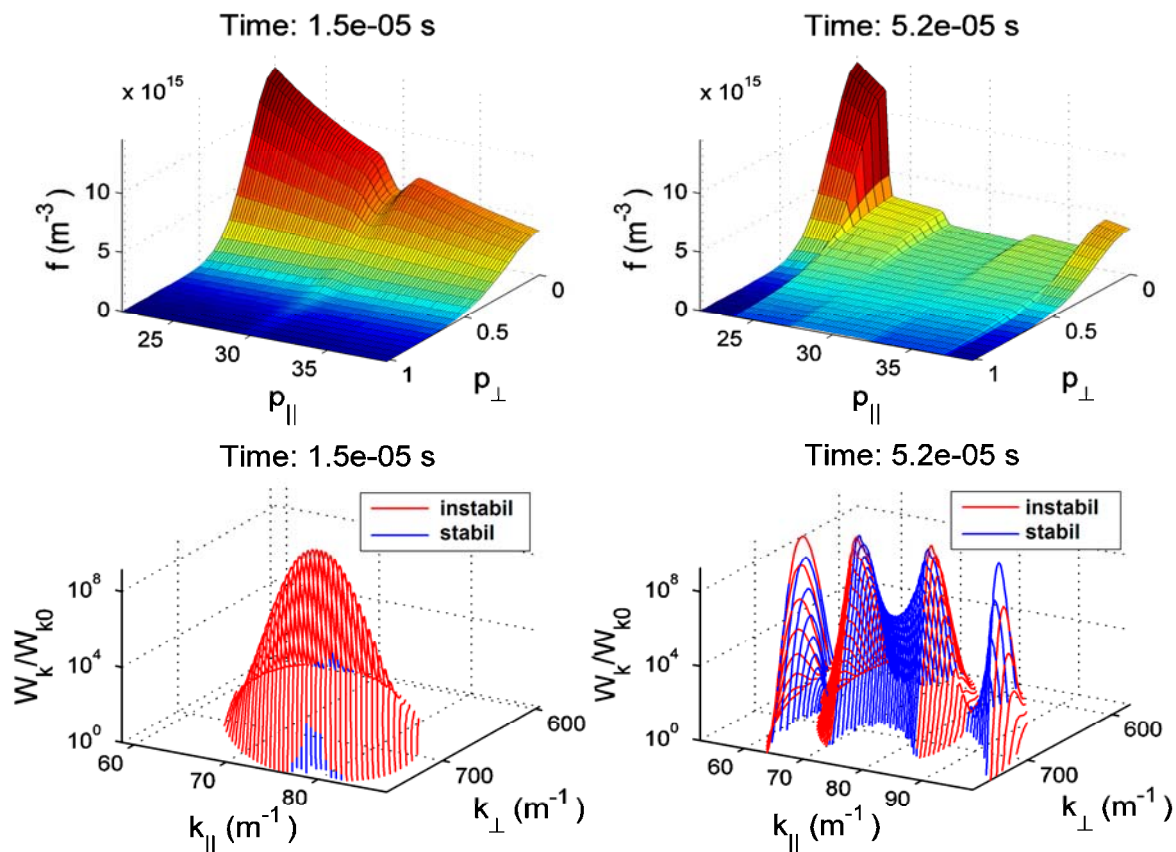
6. ábra: A füttyülő hullám stabilitási tartománya a mágneses térerősség (B) és diszrupció utáni hőmérséklet (T_{eV}) síkon különböző elfutó elektron hányadok (n_r/n_e) esetén tiszta deutérium plazmára

A hullám destabilizálódása sem jelenti még feltétlenül az elfutó elektronok eltűnését. Eddig csak azt számoltuk ki, hogy az elektronok eloszlásfüggvénye hogyan hat a hullám stabilitására, de az elfutó elektron nyaláb szempontjából a lényeg a hullám lineáris növekedés szakaszán túl jelentkezik, amikor a hullám elkezd visszahatni az őt destabilizáló eloszlásfüggvényre. Ezt a visszahatást megfelelően kicsi amplitúdójú és növekedési rátájú és megfelelően széles spektrumú hullámok esetén a kvázilineáris egyenletrendszer írja le [18].

A kvázilineáris egyenletrendszer tagjai: 1. a lineáris növekedési ráta kifejezése az elfutó elektronok eloszlásfüggvényéből, 2. a hullám energiájának a lineáris növekedési ráta szerinti exponenciális növekedését vagy csökkenését leíró egyenlet, 3. a hullámnak az eloszlásfüggvényre történő visszahatását a hullám energiájának függvényében leíró egyenlet. Ennek a három, kölcsönösen összecsatolt egyenletnek keressük az önkonzisztens megoldását [18].

A 7. ábrán a kvázilineáris egyenletrendszer numerikus megoldásának eredményét láthatjuk. Az első feltüntetett időpillanatban a hullám még éppen elérte azt az energiát, amikor már szignifikáns hatása van az elfutó elektronok eloszlásfüggvényére. Mivel a hullámot destabilizáló tényező az eloszlásfüggvény sebességbeli anizotrópiája volt, a hullám visszahatása ennek az anizotrópiának a csökkentését eredményezi, vagyis a részecskék szóródnak. Amint az eloszlásfüggvény anizotrópiája egy kritikus szint alá csökken, a hullám stabilizálódik, és energiája elkezd csökkenni. Amennyiben az elfutó elektronok száma növekszik, az instabilitás első fázisát egy újabb követi, ami tovább izotropizálja az eloszlásfüggvényt, ez látható a 7. ábra második időpontjában. Eközben az érintett tartománya az eloszlásfüggvénynek is folyamatosan szélesedik.

Számításaink azt mutatták, hogy a diszrupciók során keletkező elfutó elektronok számának ingadozásáért a fűtülő hullámmal való kölcsönhatás lehet a felelős. A teljes bizonyossághoz szükség lenne az effektus integrálására egy részletes diszrupció szimulációba vagy a fűtülő hullám kísérleti megfigyelésére.



7. ábra: A fűtülő hullám és az elfutó elektronok kvázi-lineáris kölcsönhatása: A felső ábrákon az elfutó elektronok eloszlásfüggvényét látjuk a relativisztikus impulzus mágneses erővonalakkal párhuzamos és merőleges komponenseinek függvényében két időpillanatban. Alatta a fűtülő hullám termikus energiára normált spektrális energiáját látjuk a hullámszámvektor mágneses erővonalakkal párhuzamos és merőleges komponenseinek függvényében ugyanazon időpillanatokban.

A két téma közös pontjai

A cikkben érintett két téma első ránézésre meglehetősen különbözik egymástól: az egyik alapvetően egy kísérleti adatfeldolgozás sztellarátoron végzett méréseken, míg a másik egy elméleti számolás egy tokamakokat érintő problémában. A nyilvánvaló különbségek mellett azonban számos már felderített és még több potenciális közös pont van a két témában: Amit az adatfeldolgozás témában rögtön láttuk, hogy tranziens hullámokkal van dolgunk, az az elméleti gondolatmenetnek az egyik végső eredménye lett. Közben a tranziens MHD módusok egyik lehetséges elméleti magyarázataként felmerült, hogy azt is nemtermikus elektronok destabilizálják, mint az elfutó elektronok a fűtülő hullámot. Ezen kapcsolatoknak a

további elemzése és az ezekben rejlő lehetőségek kiaknázása rendkívül hasznos lehet mind a két kutatási téma szempontjából.

Köszönetnyilvánítás

Mindenek előtt köszönet illeti témavezetőimet: Dr. Pór Gábort a Műegyetemről és Dr. Fülöp Tündét a Chalmers Egyetemről. Vezetésük, tanácsaik, biztatásuk az itt bemutatott munka nélkülözhetetlen részét képezi. Köszönöm még a velem együtt dolgozó hallgatók: Papp Gergely és Pusztai István munkáját és kitartását. Végül köszönet illeti Dr. Zoletnik Sándort és számos más kollégát elsősorban a KFKI-RMKI, BME NTI, Chalmers, IPP Greifswald és IPP Garching kutatóhelyekről az ötletekért, tanácsokért, vitákért.

Irodalomjegyzék

- [1] T. J. Dolan: *Fusion Research*, Pergamon Press, 2000.
- [2] *The ITER team: Progress in the ITER Physics Basis*, Nuclear Fusion 47 (2007).
- [3] M. Wanner and the W7-X team: *Design goals and status of the Wendelstein 7-X project*, Plasma Physics and Controlled Fusion 42, 1179-1186 (2000).
- [4] N. J. Lopes Cardozo et al.: *Electron thermal transfer in RTP: filaments, barriers and bifurcations*, Plasma Physics and Controlled Fusion 39, B303-B316 (1997).
- [5] R. Brakel and W7-AS team: *Electron energy transport in the presence of rational surfaces in the Wendelstein 7-AS stellarator*, Nuclear Fusion 42, 903 (2002).
- [6] M. Hirsch et al.: *ELM-like transport events and their impact on confinement in W7-AS*, Europhysics Conference Abstracts 22C, 2322 (1998).
- [7] S. Zoletnik et al.: *Density fluctuation phenomena in the scrape-off layer and edge plasma of the Wendelstein 7-AS stellarator*, Physics of Plasmas 6, 4239 (1999).
- [8] S. Mallat: *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 2001.
- [9] A. Mertins: *Signal Analysis*, Wiley, 1999.
- [10] G. Pokol et al.: *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).
- [11] G. Papp et al.: *Analysis of transient MHD modes of Wendelstein 7-AS by coherence techniques*, Europhysics Conference Abstracts 29C, P-5.021 (2005).
- [12] G. Pokol et al.: *Experimental study and simulation of W7-AS transient MHD modes*, AIP Proceedings of PLASMA 2007 Conference, TuP31 (2007).
- [13] G. Pokol et al.: *Amplitude correlation analysis of W7-AS Mirnov-coil array data and other transport relevant diagnostics*, IAEA Conference and Symposium Papers 25/CD, PS-EX/P6-22 (2005).
- [14] S. Zoletnik et al.: *Anomalous transport events in the core plasma of the Wendelstein 7-AS stellarator*, Europhysics Conference Abstracts 29C, P-5.023 (2005).
- [15] R. D. Gill et al.: *Behaviour of disruption generated runaways in JET*, Nuclear Fusion 42, 1039 (2002).
- [16] R. Yoshino et al.: *Generation and termination of runaway electrons at major disruptions in JT-60U*, Nuclear Fusion 39, 151 (2000).
- [17] P. Helander, D. J. Sigmar: *Collisional Transport in Magnetized Plasmas*, Cambridge University Press, 2002.
- [18] T. H. Stix: *Waves in Plasmas*, American Institute of Physics, 1992.
- [19] T. Fülöp et al.: *Destabilization of magnetosonic-whistler waves by a relativistic runaway beam*, Physics of Plasmas 13, 062506 (2006).
- [20] G. Pokol et al.: *Quasi-linear analysis of whistler waves driven by relativistic runaway beams in tokamaks*, Plasma Physics and Controlled Fusion, submitted (2008).