

**PLAZMAFLUKTUÁCIÓK ÉS TURBULENS ÁRAMLÁSOK
VIZSGÁLATA FÚZIÓS PLAZMÁKBAN**

PhD téziszfüzet

Bencze Attila

Témavezető: **Dr. Zoletnik Sándor**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem - Elméleti Fizikai Tanszék

MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézet

Budapest

2007

1. Bevezetés

Az utóbbi két évtized intenzív kutatásainak köszönhetően a fúziós plazmafizika és technológia eljutott arra a szintre, hogy egy fúziós reaktor releváns berendezés mérnöki tervei elkészüljenek. A tervezett berendezés az ITER (**I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor), amely széles nemzetközi együttműködésben fog felépülni a franciaországi Cadarache-ban 2016-ig. Ahhoz, hogy a fúziós közösség idáig eljuthasson, több mint fél évszázados, folyamatos kutatómunkára volt szükség, amely munka nemzetközi együttműködések sokaságát foglalja magában. A fúziós erőmű megvalósításának nehézségei nagyon komolyak, sokrétűek és nem voltak előreláthatóak. Az egyik ilyen jelentős probléma az anomális transzport kérdésköre. Röviden szólva, a probléma lényege abban áll, hogy a fúziós berendezésekben a mágneses térre merőleges transzport túlságosan nagy, ezért nem érhető el a fúzió fenntartásához szükséges hőmérséklettartomány. A transzportot anomálisnak mondják, mert nem érhető meg pusztán a Coulomb-ütközéseken alapuló klasszikus diffúzióval. Ma már tudjuk, hogy az anomális transzport oka, a plazmában állandóan jelen lévő instabil fluktuációk keltette turbulens mozgás.

2. Előzmények és célkitűzések

1982-ben F. Wagner és munkatársai meglepő felfedezést tettek az ASDEX tokamakokon. A kísérlet során, a plazma fűtési teljesítményét változtatva, ugrásszerű változást figyeltek meg az energiaösszetartási időben – az energiaösszetartás megnövekedett. Arra a következtetésre jutottak, hogy a jelenség, melyet L-H átmenetnek (*Low to High confinement mode transition*) neveznek, kiváltója a plazma szélén felépülő transzportgát (ETB, *Edge Transport Barrier*), mely meredek sűrűség-és nyomáseloszlást okoz a plazma szélén. Később megfigyelték, hogy a megnövekedett energiaösszetartással együtt járt a plazmafluktuációk amplitúdójának drasztikus csökkenése a plazma szélén. Intenzív elméleti és kísérleti kutatások indultak meg a transzportgátak vizsgálatára. Mára már széles körben elfogadott az a nézet, hogy a transzportgátak kialakulásáért, elsősorban a plazmában felépülő nyírt áramlási rétegek felelnek. Ezek a nyírt áramlások szétszakítják a turbulens örvényeket, ezzel csökkentik a transzportot. Tokamak plazmák számítógépes szimulációkkal való vizsgálata során, a kilencvens években kiderült, hogy az anomális transzport önszabályozásának lényeges szereplői a plazma egyensúlyi áramlásai fölötti nagyon lassú modulációk, melyeket éppen a mikroturbulencia gerjeszt nemlineárisan. Ezen áramlási sebesség modulációkat, melyeket *zonális áramlásoknak* (zonal flows, ZF) nevezünk, mára már több nagyteljesítményű szuperszámítógépeken futó párhuzamos szimulációkban megfigyelték. Ezzel párhuzamosan az analitikus elméleti modellek sokasága látott napvilágot, a gerjesztő instabilitások széles tárházát vonultatva fel. Mindezen elméleti munkákhoz képest a zonális áramlások kísérleti megfigyelése még gyerekcipőben jár. Az utóbi egy-két évben ezen a területen is felgyorsulni látszanak az események. A jelen disszertációban bemutatott kísérleti megfigyelést megelőzően két publikáció látott napvilágot [G. S. Xu et. al., *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 125001, 2003 és A. Fujisawa et al., *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 165002, 2004], amelyek olyan áramlási sebesség modulációkról számoltak be, melyek tulajdonságai megegyeztek az elméletileg jószolt zonális áramlások sajátosságai-

val. Ahhoz, hogy zonális áramlások kimutatásáról beszélhessünk, ki kell mutatnunk, hogy az áramlási sebesség fluktuációknak van alacsony frekvenciás (az energiaösszetartási idő skálájának megfelelő) összetevője. A modulációknak radiálisan lokalizáltaknak, poloidálisan és toroidálisan elnyúltaknak kell lenniük. A kép teljessé tételéhez hozzátartozna annak kimutatása, hogy a zonális áramlásokat a plazmaturbulencia hozza létre továbbá, hogy a zonális áramlások képesek modulálni az anomális részecske- és energiafluxust – ezen két fontos jellemző igazolása mindeztáig egyetlen esetben sem sikerült. A kísérleti vizsgálatok jelenleg a zonális áramlások, vagy pontosabban szólva a zonális áramlás-szerű modulációk kimutatásánál és azok statisztikus jellemzőinek feltérképezésénél tart.

Jelen doktori disszertáció célja, numerikus, analitikus és kísérleti eszközök felhasználásával vizsgálni a mágnesesen összetartott plazmákban fellépő nyírt poloidális áramlásokat. Doktori munkám konkrét célkitűzései a következő pontokban fogalmazhatók meg:

- Célul tűztem ki azon kérdés vizsgálatát, hogy az általam a Wendelstein 7-AS sztelarátorban mért korrelációs függvények alakja függ-e a poloidális áramlási sebesség radiális nyírásától, illetve annak vizsgálata, hogy a Li-atomnyaláb diagnosztikai mérésekben kapott korrelációs függvényeket befolyásolják-e, és ha igen, akkor hogyan az atomfizikai effektusok.
- A radiálisan nyírt áramlási sebesség modulációk kulcsszerepet töltenek be az anomális plazmatranszport szabályozásában. Célul tűztem ki azon kérdés vizsgálatát, hogy lehetséges-e és milyen feltételek mellett egy pont korrelációs technika alkalmazása sebességmodulációk kimutatására fúziós berendezésekben.
- Korrelációs technikák alkalmazásának egyik fontos korlátja, hogy a mért idősor véges hosszúságú, ezért csak véges számú eseményt detektálhatunk. Ez a körülmény ún. eseménystatisztikus zajként jelenik meg az autokorrelációs függvényeinkben. Céлом egy analitikus számításokkal indokolható összefüggés levezetése, mely könnyen alkalmazható becslést ad az autokorrelációs függvény eseménystatisztikus zajából származó relatív szórására.
- Céлом továbbá, valós plazmafizikai berendezésben (CASTOR tokamak, Prága), a zonális áramlások kimutatása és jellemzése alkalmazva az általam kidolgozott autokorrelációs-szélesség technikát.

3. Új tudományos eredmények

1. **Tézis:** Numerikus kódot készítettem a W7-AS sztellarátor Li-nyaláb diagnosztika jeleinek szimulációjára. A kód figyelembe veszi a W7-AS sztellarátor valós három dimenziós mágneses geometriáját [P1, P4].

A tokamakokkal ellentétben a sztellarátorok nem tekinthetők axiálszimmetrikus berendezéseknek, ezért a teljes háromdimenziós mágneses geometriát figyelembe kell venni amennyiben a bennük lejátszódó folyamatokat szeretnénk megérteni. A a neoklasszikus transzport által okozott veszteségek csökkentése érdekében helikális tekercsek alakítják ki a mágneses tret, aminek következtében a mágneses felületek alakja igen bonyolult lehet. A plazmában fellépő sűrűségfluktuációk vizsgálatának egyik elterjedt eszköze az ún. atomnyaláb diagnosztika (jelen esetben Li-atomnyaláb diagnosztika). A mérési eredmények értelmezéséhez fontos támpontot adhat egy olyan szimuláció, amely az adott diagnosztika mérési jeleit szimulálja realisztikus geometriában. A szimuláció során, a fluxuskoordináták terében rögzített alakú, adott élettartamú sűrűségperturbációkat mozgattunk adott tér-és időbeli lefolyású áramlási térben, figyelembe véve a fluxusfelületek háromdimenziós geometriáját. A Li-nyaláb diagnosztika mérési pontjaiban, adott mintavételi frekvenciával mintát vettünk a szimulált jeltől, majd ugyanazon adatfeldolgozási eljárásoknak vetettük alá, mint a valódi méréseket.

2. **Tézis:** Ezen kódot alkalmaztam az erősen nyírt poloidális plazmaáramlások, fényfluktuációk korrelációs függvényeire gyakorolt hatásának vizsgálatára. Megállapítottam, hogy a mérésekben gyakran megfigyelt komplex korrelációs struktúrák magyarázhatók a poloidálisan nyírt áramlások, turbulens örvényekre gyakorolt hatásával. Megállapítottam továbbá, hogy erősen nyírt poloidális áramlások esetén a fényfluktuációk tér-és időbeli korrelációs függvényeinek értelmezése során figyelembe kell venni atomfizikai hatásokat [P1, P4].

*A plazmafluktuációk tér-és időbeli jellemzőit statisztikusan a korrelációs függvények segítségével írhatjuk le. A Li-nyaláb behatolási iránya mentén mért korrelációs függvények segítségével meghatározhatjuk a turbulens struktúrák nyalábmenti jellemző méretét ill. a struktúrák jellemző időskáláját. A méréseink során sokszor tapasztalhatjuk, hogy a tér-és időbeli korrelációs függvények bonyolult alakúak, ami megnehezíti azok interpretációját. Szimulációs vizsgálataim során arra a következtetésre jutottam, hogy a megfigyelt bonyolult alakú korrelációs függvények magyarázhatók, ha figyelembe vesszük, hogy a plazma áramlási sebessége változik a radiális koordináta mentén. Az atomnyaláb diagnosztikával nem közvetlenül a sűrűség fluktuációkat mérjük, hanem a nyaláb atomjai által kibocsájtott fény intenzitásának fluktuációit. A plazma elektronsűrűségét és a kibocsájtott fényintenzitást egy ütközési-sugárzási atomfizikai modellel [J. Sweinzer et. al., Plasma Phys. Control. Fusion **34**, 1173, 1992] kapcsoljuk össze. Szimulációs vizsgálataimból kiderült, hogy nyírt áramlási térben mozgó sűrűségperturbációk esetében a nyírás hatását figyelembe kell venni, amikor a fényintenzitás fluktuációk korrelációs függvényeit tekintjük. Ennek oka a nyalábatomok gerjesztett állapotainak véges élettartama.*

- 3. Tézis:** Plazmafluktuációkat leíró, random idősor egy egyszerű matematikai modelljéből kiindulva, analitikusan levezettem egy, a gyakorlati adatfeldolgozásban jól használható matematikai összefüggést az autokorrelációs függvény eseménystatisztikai zajból származó relatív szórására [P2, P5].

A plazmában fellépő fluktuációk vizsgálata során, előfordul, hogy rövid időintervallumokból kell kiszámítanunk a korrelációs függvényeket. Ilyenkor az a kérdés vetődik föl, hogy mekkora az így meghatározott korrelációs érték bizonytalansága. Ezen bizonytalanság több zajforrásból is származhat: detektorzaj, fotonzaj, eseménystatisztikus zaj stb. A plazmaturbulenciáról alkotott fizikai képünkből következik, hogy a mért plazmafluktuációkat úgy fogjuk fel, mint véges élettartamú és véges térbeli kiterjedésű események (perturbációk, struktúrák) összessége. Méréseink során csak véges számú ilyen struktúrát detektálhatunk egy véges hosszúságú időintervallumban, az ebből a körülményből származó bizonytalanságot szokás eseménystatisztikus zajnak nevezni. Az autokorrelációs függvényben az eseménystatisztika az egymástól független események véletlenszerű átlapolásából származik. Analitikus számításaim során levezettem egy egyszerű közelítő összefüggést az autokorrelációs függvény relatív szórására, mely szerint a relatív szórás nulla időeltolásnál arányos a korrelációs idő és a feldolgozási időablak hányadosának négyzetgyökével.

- 4. Tézis:** Li-nyalábos fluktuáció-méréseket végeztem a garchingi W7-AS sztellarátoron, melyekre alkalmaztam az autokorrelációs függvény relatív szórására levezetett összefüggést. Ennek segítségével megállapítottam, hogy a mért korrelációs függvények esetében a magplazmában a domináns zajforrás a fotonzaj, míg a scrape-off layer-ben az eseménystatisztika [P5].

A Li-nyalábos fluktuáció-mérések egyik komoly korlátozó tényezője, az ionágyú által emittált nyalábáram, melynek nagysága méréseim során 1-2 mA nagyságú volt. Figyelembe véve a detektorrendszert a foton elektron sokszorozók által detektált fotonszám $10^7 - 10^8$ foton/sec nagyságrendű. Ugyanakkor méréseink alapján mondhatjuk, hogy a határréteg plazmában (scrape-off layer) a relatív fluktuációs amplitúdók 20-30 %-osak, míg a magplazmában alig érik el az 5%-ot. Mindezekből következően igen lényeges kérdés, hogy a plazma egyes rétegeiben, a Li-nyalábos mérésben a fotonzaj vagy pedig az eseménystatisztikus zaj dominál-e. Az autokorrelációs függvény relatív szórására levezetett összefüggés alkalmazásaként válasz adtam az iménti kérdésre megállapítva, hogy a határréteg plazmában az eseménystatisztikus zaj dominál, míg a magplazmában a fotonzaj.

- 5. Tézis:** Új adatfeldolgozási eljárást dolgoztam ki, a plazmában fellépő áramlási sebességfluktuációk kimutatására, egy pont-mérésből származó autokorrelációs függvények segítségével (ACFW-technika). Meghatároztam a módszer érvényességi határait és érzékenységi görbét. A módszert egyszerű numerikus szimulációkban teszteltem [P2, P3].

A különböző közegekben terjedő perturbációk terjedési sebességének vizsgálatára közismert módszer a keresztkorrelációs technika. Ezen technika alkalmazása során két (vagy

több) térbeli csatornában mérjük a fluktuáló jeleket, majd kiszámítjuk a két csatorna jelei közötti keresztkorrelációs függvényt. A keresztkorrelációs függvény maximumának eltolódásából és a csatornák távolságából megkapható a struktúrák átlagsebessége. Amennyiben csak sebességfluktuációkat szeretnénk kimutatni, elegendő lehet egy pont-mérés elvégzése. Ebben az esetben úgy járunk el, hogy az eredeti fluktuáló jelünket rövidebb szakaszokra osztjuk fel, majd minden egyes szakaszon kiszámítjuk az autokorrelációs függvényt. Az egyes autokorrelációs függvényeknek meghatározzuk a félérték-szélességét. Ilyen módon kapunk egy idősort az autokorrelációs függvények félérték-szélességére. Abban az esetben, ha a struktúrák élettartama nagyobb, mint az az idő amely alatt jellemző térbeli méretüket megteszik, az autokorrelációs függvény félérték-szélessége fordítottan arányos lesz az áramlási sebességgel. A sebességmodulációk ezen meghatározási módszerét neveztük el autokorreláció-szélesség módszernek (*Autocorrelation Width Method, ACFWM*).

- 6. Tézis:** Új mérést terveztem és végeztem el a prágai CASTOR tokamakon, az elméletileg jósolt zonális áramlások közvetlen kimutatására. A Langmuir-szondákkal végzett fluktuáció-mérésekre alkalmaztam az ACFW-technikát. Kimutattam, hogy a CASTOR tokamak összetartott plazmájában, radiálisan centiméteres tartományban lokalizált, poloidális irányban elnyúlt modulációk lépnek fel a plazma áramlási sebességében. Továbbá megállapítottam, hogy ezen nyírt sebességmodulációk relatív fluktuációs amplitúdója 10-20 % közötti, élettartama ≈ 1 ms. Ezen nyírt, fluktuáló áramlási rétegek megfelelnek az elméletek által leírt zonális áramlásoknak (zonal flows) [P3, P6].

A prágai Plazmafizikai Intézet CASTOR tokamakja egy kis, flexibilis, toroidális plazmafizikai berendezés, melynek nagysugara $R = 0.4$ m, kissugara $a = 8.5$ cm, a toroidális mágneses tér értéke $B_t \leq 1.5$ T, a plazmaáram $I_p \leq 25$ kA, a kisülés hossza 30 – 50 ms. A plazma termodinamikai paramétereit tekintve, a vonalintegrált elektronsűrűség $\bar{n}_e \leq (2 - 3) \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, míg a középponti elektronhőmérsékletet $T_e(0) \sim 200$ eV-nak becsülik. Méréseinket, a főbb plazmaparaméterek és plazmafluktuációk vizsgálatára széleskörűen alkalmazott Langmuir-szondákkal végeztük. A mérés céljainak megfelelően, két szondasort alkalmaztunk egyenként 16 darab Langmuir-szondával. A két szondasort egyazon poloidális metszetben helyeztük el, egymástól 90° -os (≈ 12 cm) poloidális szögben. Az egyes szondasorok minden egyes szondáján a ACFW-módszer segítségével meghatároztuk a sebességfluktuációkat, majd ezen fluktuációk radiális, poloidális keresztkorrelációs függvényeit illetve autokorrelációs függvényeit. Megállapítottuk, hogy ezen sebesség fluktuációk sajátosságai megegyeznek az elméletileg jósolt stacioner zonális áramlások tulajdonságaival.

4. Publikációk

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [P1] S. Zoletnik, G. Petravich, **A. Bencze**, M. Berta, S. Findler, K. McCormik, J. Schweinzer:
Two-dimensional density and density fluctuation diagnostic for the edge plasma in fusion devices,
Rev. Sci. Instrum., **76**, pp. 073504, 2005.
- [P2] **A. Bencze**, S. Zoletnik:
Autocorrelation analysis and statistical consideration for the determination of velocity fluctuations in fusion plasmas,
Physics of Plasmas, **12**, pp. 052323, 2005.
- [P3] **A. Bencze**, M. Berta, S. Zoletnik, J. Stockel, J. Adamek, M. Hron:
Observation of zonal flow-like structures using the autocorrelation-width technique,
Plasma Phys. Control. Fusion, **48**, pp. S137-S153, 2006.
- [P4] S. Zoletnik, **A. Bencze**, M. Berta, B. Kardon:
Identifying turbulence phenomena in Wendelstein 7-AS stellarator,
29nd EPS Conference on Plasma Phys. Montreaux, 17-21June 2002 ECA **26B**, pp. P-2.16., 2002.
- [P5] **A. Bencze**, S. Zoletnik:
Statistical method for analysing modulations in the poloidal flow velocity,
30nd EPS Conference on Plasma Phys. St. Petersburg, 7-11July 2003 ECA, **27A**, pp. P-3.8, 2003.
- [P6] **A. Bencze**, M. Berta, S. Zoletnik, J. Stockel, J. Adamek, M. Hron:
Detection of radially localized and poloidally symmetric structures in the poloidal flow of tokamak plasmas,
32nd EPS Conference on Plasma Phys. Tarragona, 27June-1July 2005 ECA, **29C**, pp. P-5.022, 2005.

További tudományos közlemények

1. S. Zoletnik, N.P. Basse, **A. Bencze**, D. Dunai, M. Hirsch, G. Pokol, G. Por:
Anomalous transport events in the core plasma of the Wendelstein 7-AS stellarator,
32nd EPS Conference on Plasma Phys. Tarragona, 27June-1July 2005 ECA, **29C**, pp. P-5.023, 2005.
2. M. Berta, B. Tal, **A. Bencze**, S. Zoletnik, J. Stockel, M. Hron, R. Dejarnac, J. Zajac:
The spatial structure of flows, Reynolds stress and turbulence in the Castor tokamak,

33nd EPS Conference on Plasma Phys. Rome, 19-23 June 2006 ECA, **30I**, pp. P-4.074, 2006.

3. G. Anda, **A. Bencze**, M. Berta, D. Dunai, K. Gál, G. Pokol:
Fúziós nyári iskola a Castor tokamaknál,
Fizikai Szemle, **205/3**, pp. 105-110, 2005.

Konferencián elhangzott szóbeli előadások

1. **A. Bencze**: *A termonukleáris fúzió jelene és jövője, avagy a fúzió színre lép*, Physics on Stage Conference Székesfehérvár, 2003
2. **A. Bencze**: *Correlation analysis and statistical consideration for the determination of velocity fluctuations in fusion plasmas*, Second Hungarian, Plasma Physics Workshop, 2004
3. **A. Bencze**: *Autokorrelációs-szélesség módszer alkalmazása sebességfluktuációk vizsgálatára fúziós plazmákban*, IV. Nukleáris Technikai Szimpózium, Budapest, 2005