

**Szélplazma turbulencia
karakterizálása a KSTAR
tokamakon nyalábemissziós
spektroszkópiával**

PHD TÉZISFÜZET

Szerző:

LAMPERT MÁTÉ

Témavezető:

DR. ZOLETNIK SÁNDOR

Wigner Fizikai Kutatóintézet
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
2018

Bevezetés

A fúziós energiatermelés megvalósításához kulcsfontosságú az anomális részecske- és energiatranszport teljes megértése. Az anomális transzport lényegesen nagyobb részecske- és hőtranszportot eredményez, mint azt az egy-részecske képen alapuló neoklasszikus transzport modell jósolja. A tudomány mai állása alapján az anomális transzportot a plazmaturbulencia okozza, ami jelentősen hozzájárul a plazma részecske- és energiavesztéséhez és ezzel annak összetartásához is. [Wesson and Campbell, 1997]

Nyalábemissziós spektroszkópia

A plazma turbulencia vizsgálatához kifinomult mérési technikákat fejlesztettek ki a fúziós kutatások során. Az egyik ilyen mérési módszer a nyalábemissziós spektroszkópia (NYES). A NYES egy semleges részecskenyalábot használ az elektron sűrűség és fluktuációinak mérésére, amely általában Deutérium fűtőnyaláb vagy Lítium diagnosztikai nyaláb. A mérés során a részecskenyalábot a plazmába lövik, majd a nyaláb-plazma kölcsönhatás során a nyaláb atomjai gerjesztődnek. Ezután spontán legerjesztődnek és eközben fotont bocsátanak ki. A kibocsátott fény intenzitása arányos a helyi elektron sűrűséggel és annak fluktuációival. A NYES diagnosztika ezt a fényt méri egy megfelelő optikai rendszer és gyors detektorok segítségével.

A nyalábemissziós spektroszkópiai mérések során a nagy behatolási mélységük miatt az 50-100keV energiájú fűtőnyalábok szél- és magplazma turbulencia mérésére is használhatók [McKee et al., 2003]. Ezzel szemben a kis behatolási mélységgel rendelkező 30-60keV energiájú lítium nyalábokat eredetileg csak a szél- és határréteg plazma radiális elektron sűrűség profiljának mérésére fejlesztették ki [McCormick et al., 1997], de később szélplazma turbulencia mérésre is elkezdték használni [Zoletnik et al., 1999].

A Deutérium NYES az 50-100keV energiájú deutérium nyaláb Doppler-eltolódott D-alfa ($\approx 656.1 \text{ nm} \pm \lambda_{Doppler}$) vonalát méri a Balmer-sorozatból. A fűtőnyalábok majdnem minden nagy fúziós kísérletben jelen vannak így a NYES diagnosztikához csak egy megfigyelőrendszer építése szükséges. Azonban fontos, hogy a megfigyelés iránya elegendő Doppler-eltolódást biztosítson ahhoz, hogy a plazma-nyaláb kölcsönhatás során kibocsátott fény hullámhossza különváljon az erős Deutérium-alfa háttér fénytől. A plazmaturbulencia vizsgálatához centiméter nagyságú térbeli felbontás szükséges, azonban a fűtőnyalábok szélessége ennél jóval nagyobb. Viszont ha a mágneses erővonalak mentén történik a mérés, az erővonal mentén elnyúlt turbulens struktúrák vizsgálhatóvá válnak széles nyaláb esetén is. Ezeket a kívánalmakat általában lehetetlen egyszerre teljesíteni, így kompromisszumot kell kötni a térbeli felbontás és a háttérfény elnyomása között. Így a deutérium NYES diagnosztikát mag- és szélplazma turbulencia mérésre használják általában.

A Lítium NYES egy 30-60keV energiájú lítium nyaláb nyaláb-plazma kölcsönhatása során, a 2p-2s atomi átmenet közben kibocsátott fény intenzitását méri ($\approx 670.8 \text{ nm}$) [Thomas et al., 2008]. A mérési módszer segítségével elektronsűrűség fluktuációk [Zoletnik et al., 1999] és radiális elektron sűrűség profil mérhető [Fischer et al., 2008] a határréteg- és szélplazmában. Mivel a mérőrendszer része a diagnosztikai lítium nyaláb is, ezért a technológia jóval bonyolultabb, mint a deutérium nyalábok esetén. Mivel a nyaláb csak 1-2cm széles, így centiméter skálájú térbeli felbontás érhető el minden megfigyelési irányban. A lítium nyaláb alacsony teljesítménye ($\approx 100 \text{ W}$) miatt a plazmát csak elhanyagolható mértékben perturbálja. A nyalábot néhány száz kHz frekvenciával modulálni lehet [Zoletnik et al., 2005], így a turbulencia és magneto-hidrodinamikai időskáláján lehet a háttérfényt mérni.

Turbulens transzport a határréteglazmában

A határréteg plazma turbulencia filamentáris struktúráinak felfedezése óta [Zweben, 1985] számtalan szimulációt és kísérletet végeztek a megismerésük érdekében. Ezeket a koherens filamentáris struktúrákat blob filamentumoknak vagy egyszerűen bloboknak hívják. Ezen események a határréteg plazmán keresztül részecske, hő, momentum és áramtranszportot okoznak és így fokozzák a környező struktúrákkal való plazma-fal kölcsönhatást.

Az utóbbi években egyre növekedett az érdeklődés a határréteg plazma transzport vizsgálatára a blobok első fallal és a divertorral való kölcsönhatása miatt. A blobok nem kívánt módon megnövelik a plazmahatároló elemek, rádiófrekvenciás antennák és az első fal hőterhelését. A szélplazmában található nyírt réteg sebességét is befolyásolhatják ezek az események és így egyben a mag plazma összetartását is. Elméleti és szimulációs számolások is azt mutatják, hogy a blobok momentum transzportja hozzájárul a szélplazma forgásának felgyorsulásához is [Myra et al., 2008]. Látható, hogy a blobok jelentősen hozzájárulnak a transzporthoz és az egész plazma összetartásához is, így vizsgálatuk elengedhetetlen egy jövőbeli fúziós erőmű üzemelése érdekében.

A vizsgálatok azt mutatták, hogy a blobok mágneses tér mentén elnyúlt struktúrák melyeket az $\underline{E} \times \underline{B}$ drift kifelé mozgat. Az ehhez szükséges elektromos teret a blobokban a mágneses tér görbülete és gradiense által létrehozott töltés szétválasztás hozza létre [Cheng et al., 2010]. A mérések során a blobok poloidális terjedési iránya az ion-diamágneses irány volt, melynek nagyságát több különböző fizikai folyamat is befolyásolja. Felfedeztek a blobok helyén visszamaradó, alacsonyabb sűrűségű struktúrákat is, úgynevezett lyukakat. Ezek az ellenkező irányban, radiálisan befelé és poloidálisan az elektron diamágneses irányba mozognak [Xu et al., 2009].

Az intermittens plazmatranszport egyik legfontosabb kérdése a blob és lyuk események kialakulása és egymással való kapcsolata. Ezen kívül fontos kérdés az is, hogy hogyan függenek az események jellemzői különböző plazmaparaméterektől. Ezeket a kérdéseket több tokamak berendezésen is vizsgálták Ohmikus, alacsony és magas összetartású plazmákban. A különböző berendezésekről származó eredmények egyaránt azt mutatják, hogy a blobok és a lyukak a határréteg plazmában található nyírt rétegben születnek [D'Ippolito et al., 2011] és főbb tulajdonságai függetlenek attól, hogy a plazma alacsony vagy magas összetartási módban van-e [Fuchert et al., 2014].

A fenti eredmények többsége Langmuir-szonda által mért ion-szaturációs áram mérésekből származik. A szondák nem képesek nagy teljesítményű plazmák belsejében és a plazma széléhez közel mérni a teljes kisülés alatt, mert megolvadnának a nagy hőterhelés miatt. Ahhoz, hogy ilyen nagy teljesítményű plazmaállapotokban is meg lehessen határozni az események tulajdonságait, fontos lenne egy olyan mérési módszer kifejlesztése, amely kevésbé korlátozott. Egy lehetséges megoldás lenne a fent említett nyalábemissziós diagnosztika felhasználása a határréteg plazma turbulencia vizsgálatára.

Célkitűzések

A dolgozatom célja, hogy a plazma turbulencia kutatásokhoz hozzájáruljon és így jobban megértsük az egyik legfontosabb transzport mechanizmust a fúziós plazmákban. Ennek érdekében az első fontos cél egy olyan új, kombinált nyalábemissziós diagnosztika kifejlesztése volt, amely alkalmas a turbulencia által okozott elektronsűrűség fluktuációk vizsgálatára deutérium és lítium nyalábon is. Az első mérések elvégzése után cél volt a diagnosztika főbb

paramétereinek meghatározása. Ezután kitűztem célnak, hogy a diagnosztika által mért adatok segítségével jellemzem a szél- és határreteg plazma turbulenciát különböző plazma kisülések során. Ezen célok érdekében felépítettük a kombinált deutérium lítium NYES diagnosztikát a KSTAR tokamakon, majd az első plazmamérések adatait felhasználva meghatároztam a diagnosztika mérési korlátait, végül pedig a mérési adatok segítségével jellemeztem a szél- és határreteg plazma turbulenciát Ohmikus, alacsony, és magas összetartású plazmákban.

Módszerek

A lineáris algebra módszereit, vektor- és mátrixanalízist felhasználva kifejlesztettem egy térbeli kalibrációs módszert a nyalábemissziós spektroszkópia térbeli kalibrációjára. Az elektron sűrűség fluktuációk vizsgálata során a auto- és keresztteljesítmény spektrum meghatározásával azonosítottam a turbulencia kvázi-koherens módusait. A NYES diagnosztika mérési jeleit véges impulzusválaszú szűrő segítségével szűrtem le a turbulencia frekvenciatartományára. Kereszt-kovariancia és koherencia analízis segítségével megállapítottam a turbulens struktúrák terjedési sebességét Ohmikus és alacsony összetartású plazmákban. A NYES jelek momentumainak vizsgálatával meghatároztam a határreteg plazma intermittens eseményeinek születési helyét. Feltételes átlagolás segítségével vizsgáltam ezen események átlagos tulajdonságait és meghatároztam a jellemző radiális és poloidális méreteiket, jellemző sebességüket és a mozgás irányát, valamint a születési rátájukat is.

Új tudományos eredmények

A dolgozatom főbb eredményeit a következő öt tézispont összegzi.

-
- Kifejlesztettem a kombinált deutérium és lítium nyalábemissziós spektroszkópia méréseket vezérlő hardvert és szoftvert és ezzel nagymértékben hozzájárultam az elektron sűrűség fluktuáció mérések sikerességéhez a KSTAR-on. A diagnosztika üzembe helyezése során kifejlesztettem egy térbeli kalibrációs módszert, melynek segítségével lehetőségessé vált a turbulens struktúrák méretének, korrelációs hosszainak és sebességének meghatározása. [1, 2]
 - Összehasonlítottam a deutérium és lítium nyalábon történt mérések jel-háttér arányát, jel-zaj arányát és a turbulencia detektálási korlátját. Megmutattam, hogy ezek a mérések egymást kiegészítő információkkal szolgálnak: a lítium nyaláb mérés radiális elektronsűrűség profilt szolgáltat a plazma szélén és a deutérium nyaláb segítségével két dimenziós relatív elektronsűrűség fluktuáció mérhető magasabb jel-zaj viszony mellett a teljes radiális tartományon. [1]
 - Jellemeztem a kvázi-koherens szélplazma turbulencia által okozott elektronsűrűség fluktuációt különböző plazmaállapotok esetén. Meghatároztam a turbulencia spektrumát, frekvencia tartományát és terjedési sebességeit. [1, 3]
 - Megmutattam, hogy a deutérium nyaláb emissziós spektroszkópia alkalmas a szél- és határréteg plazma intermittens elektronsűrűség fluktuációinak vizsgálatára. Feltételes átlagolás segítségével jellemeztem a határréteg plazmára jellemző blob és lyuk események jellemző radiális és vertikális méretét és látszólagos sebességét L-mode és H-mode plazmákban. [4]
 - L-mode plazmában meghatároztam a turbulencia spektrumot és a fluktuációs amplitúdót Langmuir-szonda ion-szaturációs áram jeleiből és összehasonlítottam a BES által mértekkel. A kapott eredmények alapján a Langmuir-szondák alkalmasabbak

a kis méretű események detektálására, azonban csak korlátozottan tudják mérni a két dimenziós tulajdonságait és perturbálják a plazmát. A deutérium NYES mérés ezzel szemben az egész plazmakisülés során képes két dimenziós elektronsűrűség fluktuáció mérésre a szél- és határréteg plazmában egyaránt, de csak alacsonyabb térbeli felbontással. Ezen korlátokat figyelembe véve a két mérés konzisztens eredményeket szolgáltatott. [4]

Publikációk

A fenti öt tézispontban ismertetett tudományos eredményeimet a következő cikkekben publikáltam.

- [1] M. Lampert, G. Anda, A. Czopf, G. Erdei, D. Guszejnov, Á. Kovácsik, G. I. Pokol, D. Réfy, Y. U. Nam, and S. Zoletnik. Combined hydrogen and lithium beam emission spectroscopy observation system for korea superconducting tokamak advanced research. *Review of Scientific Instruments*, 86(7):073501, 2015.
- [2] Y. U. Nam, S. Zoletnik, M. Lampert, and Á. Kovácsik. Analysis of edge density fluctuation measured by trial KSTAR beam emission spectroscopy system. *Review of Scientific Instruments*, 83(10):10D531, 2012.
- [3] W.W. Xiao, P.H. Diamond, W.C. Kim, L.H. Yao, S.W. Yoon, X.T. Ding, S.H. Hahn, J. Kim, M. Xu, C.Y. Chen, B.B. Feng, J. Cheng, W.L. Zhong, Z.B. Shi, M. Jiang, X.Y. Han, Y.U. Nam, W.H. Ko, S.G. Lee, J.G. Bak, J.W. Ahn, H.K. Kim, H.T. Kim, K.P. Kim, X.L. Zou, S.D. Song, J.I. Song, Y.W. Yu, T. Rhee, J.M. Kwon, X.L. Huang, D.L. Yu, K.D. Lee, S.I. Park, M. Jung, S. Zoletnik, M. Lampert, G.R. Tynan, Y.S. Bae, J.G. Kwak, L.W. Yan, X.R. Duan, Y.K. Oh, J.Q. Dong, the KSTAR Team, and the HL-2A Team. Elm mitigation by supersonic molecular beam injection: KSTAR and

HL-2A experiments and theory. *Nuclear Fusion*, 54(2):023003, 2014.

- [4] M. Lampert, S. Zoletnik, J. G. Bak, Y. U. Nam, and the KSTAR Team. 2d scrape-off layer turbulence measurement using deuterium beam emission spectroscopy on KSTAR. *Physics of Plasmas*, 25(4):042507, 2018.

Az eredmények hasznosítása

A PhD munkám során felelős voltam a nyalábemissziós spektroszkópiai mérésekért, melyet 6 mérési kampányon keresztül működtettem 2012 és 2017 között. A mérőrendszer néhány ezer plazmakisülés során gyűjtött adatot az elektron sűrűség fluktuációról. Ezek a mérések további tudományos eredményekhez járultak hozzá, melyek nem tartoznak szorosan a dolgozatban tárgyaltakhoz.

Guszejnov Dávid a RENATE háromdimenziós nyaláb emissziós spektroszkópiát modellező szoftvert validálta az általam végzett mérések segítségével [5]. Yong Un Nam a NYES méréseim segítségével vizsgálta a szélplazma radiális elektronsűrűség profilját és fluktuációit [6]. Náfrádi Gábor a KSTAR NYES mérőrendszerben korábban használt CCD kamera sugárkárosodását vizsgálta az általam szolgáltatott mérési eredmények alapján [7]. Jaewook Kim az elektronsűrűség fluktuációk két-pont korrelációs hossz mérési lehetőségeit vizsgálta a NYES méréseim segítségével [8]. A KSTAR-on történt lítium NYES méréseim hozzájárultak egy nagyáramú semleges lítiumnyaláb kifejlesztéséhez [9], melyet később az EAST tokamakon és W7-X sztellarátoron felépített mérések során is felhasználtak.

További publikációk

- [5] D. Guszejnov, G. I. Pokol, I. Pusztai, D. Refy, S. Zoletnik, M.

-
- Lampert, and Y. U. Nam. Three-dimensional modeling of beam emission spectroscopy measurements in fusion plasmas. *Review of Scientific Instruments*, 83(11):113501, 2012.
- [6] Y. U. Nam, S. Zoletnik, M. Lampert, Ákos Kovácsik, and H. M. Wi. Edge electron density profiles and fluctuations measured by two-dimensional beam emission spectroscopy in the kstar. *Review of Scientific Instruments*, 85(11):11E434, 2014.
- [7] Gábor Náfrádi, Ákos Kovácsik, Gábor Pór, Máté Lampert, Yong Un Nam, and Sándor Zoletnik. Radiation damage of the pco pixelfly vga ccd camera of the bes system on kstar tokamak. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 770:21 – 28, 2015.
- [8] Jaewook Kim, Y.U. Nam, M. Lampert, and Y.-C. Ghim. Reliability of the two-point measurement of the spatial correlation length from gaussian-shaped fluctuating signals in fusion-grade plasmas. *Nuclear Fusion*, 56(10):106016, 2016.
- [9] G. Anda, D. Dunai, M. Lampert, T. Krizsanóczy, J. Németh, S. Bató, Y. U. Nam, G. H. Hu, and S. Zoletnik. Development of a high current 60 kev neutral lithium beam injector for beam emission spectroscopy measurements on fusion experiments. *Review of Scientific Instruments*, 89(1):013503, 2018.

Irodalomjegyzék

- [Cheng et al., 2010] Cheng, J., Yan, L. W., Hong, W. Y., Zhao, K. J., Lan, T., Qian, J., Liu, A. D., Zhao, H. L., Liu, Y., Yang, Q. W., Dong, J. Q., Duan, X. R., and Liu, Y. (2010). Statistical characterization of blob turbulence across the separatrix in HL-2A tokamak. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 52(5):055003.
- [D'Ippolito et al., 2011] D'Ippolito, D. A., Myra, J. R., and Zweben, S. J. (2011). Convective transport by intermittent blob-filaments: Comparison of theory and experiment. *Physics of Plasmas*, 18(6):060501.
- [Fischer et al., 2008] Fischer, R., Wolfrum, E., Schweinzer, J., and the ASDEX Upgrade Team (2008). Probabilistic lithium beam data analysis. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 50(8):085009.
- [Fuchert et al., 2014] Fuchert, G., Birkenmeier, G., Carralero, D., Lunt, T., Manz, P., Müller, H. W., Nold, B., Ramisch, M., Rohde, V., and Stroth, U. (2014). Blob properties in L- and H-mode from gas-puff imaging in ASDEX upgrade. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 56(12):125001.
- [McCormick et al., 1997] McCormick, K., Fiedler, S., Kocsis, G., Schweinzer, J., and Zoletnik, S. (1997). Edge density measurements with a fast Li beam probe in tokamak and stellarator experiments. *Fusion Engineering and Design*, 34-35(0):125 – 134.

- [McKee et al., 2003] McKee, G. R., Fenzi, C., Fonck, R. J., and Jakubowski, M. (2003). Turbulence imaging and applications using beam emission spectroscopy on DIII-D (invited). *Review of Scientific Instruments*, 74(3):2014–2019.
- [Myra et al., 2008] Myra, J. R., Russell, D. A., and D’Ippolito, D. A. (2008). Transport of perpendicular edge momentum by drift-interchange turbulence and blobs. *Physics of Plasmas*, 15(3):32304.
- [Thomas et al., 2008] Thomas, D. M., McKee, G. R., Burrell, K. H., Levinton, F., Foley, E. L., and Fisher, R. K. (2008). Chapter 6: Active spectroscopy. *Fusion Science and Technology*, 53(2):487–527.
- [Wesson and Campbell, 1997] Wesson, J. and Campbell, D. J. (1997). *Tokamaks*. Clarendon Press.
- [Xu et al., 2009] Xu, G. S., Naulin, V., Fundamenski, W., Hidalgo, C., Alonso, J., Silva, C., Gonçalves, B., Nielsen, A., Rasmussen, J. J., Krasheninnikov, S., Wan, B., Stamp, M., and Contributors, J. E. (2009). Blob/hole formation and zonal-flow generation in the edge plasma of the JET tokamak. *Nuclear Fusion*, 49(9):092002.
- [Zoletnik et al., 1999] Zoletnik, S., Anton, M., Endler, M., Fiedler, S., Hirsch, M., McCormick, K., Schweinzer, J., and the W7-AS Team (1999). Density fluctuation phenomena in the scrape-off layer and edge plasma of the wendelstein 7-as stellarator. *Physics of Plasmas*, 6(11):4239–4247.
- [Zoletnik et al., 2005] Zoletnik, S., Petravich, G., Bencze, A., Berta, M., Fiedler, S., McCormick, K., and Schweinzer, J. (2005). Two-dimensional density and density fluctuation diagnostic for the edge plasma in fusion devices. *Review of Scientific Instruments*, 76(7):-.
- [Zweben, 1985] Zweben, S. J. (1985). Search for coherent structure within tokamak plasma turbulence. *The Physics of Fluids*, 28(3):974–982.